



مدونة المناهج السعودية

<https://eduschool40.blog>

الموقع التعليمي لجميع المراحل الدراسية

في المملكة العربية السعودية

برایان غرین

الكون الأنيق

الأوقار الفائقة، والأبعاد الدفينة،
والبحث عن النظرية النهاية

ترجمة:

د. فتح الله الشيخ

علي مولا

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

الكون الأنيق

**الأوتار الفائقية، والأبعاد الدفينة،
والبحث عن النظرية النهائية**



المؤسسة العربية للترجمة - الجزائر المنظمة العربية للترجمة

برایان غرین

الكون الأنيق

الأوتار الفائقة، والأبعاد الدفينة،
والبحث عن النظرية النهاية

ترجمة:
د. فتح الله الشيخ

مراجعة:
د. أحمد عبد الله السماحي

الفهرسة أئمَّاء النشر - إعداد المنظمة العربية للترجمة
غرين، بريان
الكون الأنيق: الأوتار الفائقة، والأبعاد الدفينة، والبحث عن النظرية النهائية/
بريان غرين؛ ترجمة فتح الله الشيخ؛ مراجعة أحمد عبد الله السماحي.
467 ص.. (ثقافة علمية معاصرة)
بليوغرافية: ص 455-451.
يشتمل على فهرس.
ISBN 9953-0-0431-5
1. علم الكونيات. 2. نظريات الأوتار الفائقة. أ. العنوان. ب. الشيخ
فتح الله (مترجم). ج. السماحي، أحمد عبد الله (مراجعة). د. السلسلة.
539.7

«الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تُعبّر بالضرورة
عن اتجاهات تبناها المنظمة العربية للترجمة»

Greene, *The Elegant Universe*
Copyright © by Brian R. Greene
ALL RIGHTS RESERVED

جميع حقوق الترجمة العربية والنشر محفوظة حصراً لـ:

المنظمة العربية للترجمة



بنية شاتيلا، شارع ليون، ص. ب: 5996-113
الحرماء - بيروت 2090 1103 - لبنان
هاتف: 753031 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot.org.lb - <http://www.aot.org.lb>

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية
بنية «سداد تاور» شارع ليون ص. ب: 6001 - 113
الحرماء - بيروت 2090 1103 - لبنان
تلفون: 801587 - 801582 - 869164
برقياً: «مرعربي» - بيروت / فاكس: 865548 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - <http://www.caus.org.lb>

الطبعة الأولى: بيروت، أيار (مايو) 2005

إلى أمي وذكرى والدي
مع حبي وامتناني

المحتويات

9	تصدير
11	مقدمة المؤلف
القسم الأول: حد المعرفة	
17	الفصل الأول: التشابك مع الوتر
القسم الثاني: مأزق المكان والزمان والكم	
39	الفصل الثاني: المكان والزمان وعين الراصد
71	الفصل الثالث: عن الاعوجاجات والتتموجات
105	الفصل الرابع: الغرابة المخفة المجهرية
الفصل الخامس: الحاجة إلى نظرية جديدة: النسبية العامة في مواجهة ميكانيكا الكم	
القسم الثالث: السيمفونية الكونية	
157	الفصل السادس: لا شيء سوى الموسيقى: أساسيات نظرية الأوتار الفائقة
189	الفصل السابع: التفوق في الأوتار الفائقة
209	الفصل الثامن: أبعاد أكثر مما تراه العين
235	الفصل التاسع: الأدلة الواضحة: بصمات التجارب
القسم الرابع: نظرية الأوتار ونسيج الزمكان	
257	الفصل العاشر: الهندسة الكمية
291	الفصل الحادي عشر: تمزيق نسيج الفضاء
311	الفصل الثاني عشر: ما بعد الأوتار: في البحث عن نظرية-M

351	الفصل الثالث عشر: النقوب السوداء: منظور وتر / نظرية-M
377	الفصل الرابع عشر: تأملات في علم الكون
القسم الخامس: التوحيد في القرن العادي والعشرين	
407	الفصل الخامس عشر: آفاق مستقبلية
423	الثبت التعريفي
443	ثبات المصطلحات
451	المراجع
457	الفهرس

تصدير

كتاب "الكون الأنيق" ليس كتاباً علمياً عادياً باللغة الإنكليزية فقط ولكنه كتاب يعرض أحدث النظريات في الفيزياء وعلم الكون (الكونسولوجي) في لغة أدبية رفيعة وأسلوب مشوق مثل الروايات أو الأحداث الدرامية. ومؤلف الكتاب عالم من الذين شاركوا في إبداع هذه النظريات، وهو أديب يستخدم كل أدوات البلاغة في اللغة الإنكليزية، الأمر الذي يرهق أي مترجم علمي. وإنني أقر هنا أنه لولا الدراء الواسعة للصديق العزيز الدكتور أحمد عبد الله السماحي - مراجع الترجمة - باللغة الإنكليزية وبنواحي الحياة الأمريكية التي استقى منها المؤلف روایاته وأمثاله وتشبيهاته، ولو لا سعة صدره وتحمله لمجادلاتها الطويلة والعديدة، لما أمكن إنجاز هذه الترجمة.

وإنني لأنقدم بالشكر لكل من ساهم في تفسير أو شرح وتبيان كلمة أو جملة أو فقرة في هذا الكتاب، وأخص بالشكر السيدة كاترين-ماري السماحي المتخصصة في اللغة الإنجليزية والترجمة، والستة سحر توفيق على تصويباتها لنص الترجمة. وأدين بالشكر لأستاذنا الدكتور أحمد مستجbir لتحمسه وتشجيعه. وإذا كان "غرين" - مؤلف الكتاب - قد كتب "الكون الأنيق" إيماناً منه بضرورة وجوده لفئات عريضة من الناس - كما ذكر في مقدمته - فإنني أرجو أن يتفع بترجمته إلى العربية جمهور كبير من القراء، متخصصين وغير متخصصين.

د. فتح الله الشيخ

*

الكتاب الذي بين يدينا فريد في عدة أمور، الأمر الأول أنه يعرض آخر ما توصلت إليه علوم الفيزياء والكون وأحدث أخبار علمائها، والأمر الثاني أنه مكتوب بلغة رصينة وأدبية رفيعة وبأسلوب رائع، أما الأمر الثالث فهو أن المؤلف يخاطب في الكتاب كل الناس (طلاباً وعلماء ومثقفين وعاديين)، والكتاب بذلك نادر وثمين.

وقد جاءت مراجعتي للترجمة متزامنة مع الترجمة نفسها، وهو ما جعل من عملية المراجعة وكأنها مشاركة في الترجمة، وأدخلنا ذلك، مع المترجم -

الصديق العزيز الدكتور فتح الله الشيخ، في جدال بلغ الذروة أحياناً، التزاماً منا بالأمانة العلمية، وتدقيقاً للمعاني والمدلولات، وانحيازاً للغة العربية التي تشق طريقها في ساحة العلوم والمعارف البشرية الحديثة بصعوبة بالغة، بعد أن كانت هي لغة العلوم والمعارف البشرية لقرون عديدة.

وعندما انتهت الترجمة والمراجعة شعرت بسعادة غامرة لأن عملاً مثل هذا سيصبح قريباً في متناول القارئ العربي، وسيزين المكتبة العربية بأخر إنجازات العلم الحديث.

د. أحمد عبد الله السماحي

مقدمة المؤلف

ظل آينشتاين خلال الثلاثين سنة الأخيرة من حياته يبحث من دون كلل على ما يطلق عليه نظرية المجال الموحد - نظرية قادرة على وصف قوى الطبيعة في إطار شامل مترابط. لم يكن آينشتاين مدفوعاً بأشياء ترتبط غالباً بالسلوك العلمي مثل محاولة تفسير هذه أو تلك من البيانات التجريبية، لكنه كان مدفوعاً باعتقاد حماسي في أن الفهم العميق للكون قد يكشف عن أكثر عجائب مصداقية: بساطة ومقدرة المبادئ التي تأسس عليها. أراد آينشتاين أن يلقي الضوء على أحداث الكون بوضوح لم يصل إليه أحد من قبل، ما يجعلنا نقف خائعين أمام أناقة وروعة الكون.

لم يتوصل آينشتاين أبداً لتحقيق هذا الحلم، لأن في أيامه كان كثير من الأمور يقف حجر عثرة في سبيل ذلك. كان هناك عدد من السمات الأساسية للمادة، وقوى الطبيعة إما غير معروفة، أو في أحسن الظروف مفهومة بقدر ضئيل. لكن الفيزيائيين خلال نصف القرن الأخير مروا بعشرات ونجاحات ودخلوا طرقاً معتمة في بعض الأحيان، وظلوا يشيدون بثبات، بناء على اكتشافات من سبقوهم، ليجمعوا معاً أكثر عمقاً عن كيفية عمل الكون. والآن، وبعد فترة طويلة منذ أن تساءل آينشتاين عن نظرية موحدة وخرج من ذلك خاوي الوفاض، فإن الفيزيائيين يعتقدون أنهم توصلوا أخيراً إلى إطار ينسج كل هذه الأفكار مع بعضها في ثوب متناغم لنظرية متفردة. هي في الأصل قادرة على وصف كل الظواهر الفيزيائية. تلك هي "نظرية الأوتار الفائقة"، موضوع هذا الكتاب.

وقد قمت بكتابة "الكون الأنيق" في محاولة لجعل الأفكار الثاقبة التي انبثقت من طبيعة بحوث الفيزياء متاحة لقطاع عريض من القراء، وخاصة أولئك غير المتعمدين في الرياضيات أو الفيزياء. ومن خلال المحاضرات العامة التي ألقيتها عن الأوتار الفائقة لاحظت تشوقاً واسع الانتشار لفهم ما الذي تتناوله الأبحاث المعاصرة حول القوانين الحالية للكون، وكيف أن هذه القوانين تتطلب إعادة صياغة شاملة لمفهومنا عن الكون والتحديات التي تعترض التوصل إلى النظرية الحتمية. وإنني لأأمل أن يثير هذا الكتاب ويشفي الفضول بما سننشره من الإنجازات العظمى التي حدثت في الفيزياء بدءاً من آينشتاين وهيزنبرغ، وكيف أن اكتشافهما قد أزهرت في التقدم الهائل الذي وصلنا إليه هذه الأيام.

وإنني لأأمل أن يجد كتاب "الكون الأنثيق" اهتماماً لدى القراء الذين يحظون بقدر من الخلفية العلمية. كما أأمل أن يبلور هذا الكتاب بعض الموضوعات الأساسية من الفيزياء الحديثة لطلاب العلوم ومعلميهم، مثل النسبية الخاصة والنسبية العامة وميكانيكا الكم، وكذلك أأمل أن أنقل عدوى الحماس للباحثين ليسدوا كل الشغرات على طريق التوصل إلى النظرية الموحدة التي نفكر في اكتشافها منذ أمد طويل. وقد حاولت أيضاً، بالنسبة للقارئ الشره للعلوم الميسرة، أن أفسر الكثير من التقدم المبهر في فهمنا للكون والذي تم التوصل إليه في العقد الأخير. أما بالنسبة لزملاطي في فروع العلوم الأخرى، فإنني أأمل أن يقدم هذا الكتاب إحساساً مخلصاً ومتوازناً لما يشعر به منظرو نظرية الأوتار من حماس حول التقدم الذي يجري للتوصول إلى النظرية الحتمية للطبيعة.

تبعد نظرية الأوتار الفائقة مجالاً عريضاً متشابكاً. فهي موضوع عميق ومتسع يتعرض لكثير من الاكتشافات المحورية في الفيزياء. وحيث أن هذه النظرية توحد القوانين المتعلقة بالأمور الكبرى والأمور الصغرى، القوانين التي تحكم في فيزياء أبعد مناطق الكون وفي فيزياء أدق أجزاء المادة، فإن هناك طرقاً كثيرة يمكن أن نطرق بها هذا الموضوع. وقد اخترت أن أركز فهمنا المتتطور للفضاء والزمان. وقد وجدت أن ذلك مسلك متدام محكم بصفة خاصة، وهو المسلك الذي يشق طريقه بضربة منجل خلال الأفكار الأساسية الجديدة. بين آينشتاين للعالم أن الفضاء والزمان يسلكان بطريقة غير مألوفة، بل مذهلة. وقد ربطت أحدث الأبحاث اكتشافات آينشتاين بعالم الكم عن طريق العديد من الأبعاد الدfineة الملفوفة في نسج الكون - الأبعاد التي تلتف بإحكام هندسي يمكن أن تكون مفتاح حل أعقد الأسئلة التي واجهناها. ومع أن بعض هذه المفاهيم غير واضح، إلا أنها سترى أنه من الممكن فهمها باستخدام تشبيهات في غاية البساطة. وعندما تصبّع هذه الأفكار مفهومها فإنها تقدم منظوراً مدهشاً وثورياً عن الكون.

وخلال كل الكتاب، حاولت أن ألتزم ما أمكن بالجانب العلمي وفي نفس الوقت أن أقدم للقارئ فهماً حدسياً - غالباً من خلال التشبيه والاستعارة - عن الكيفية التي توصل بها العلماء إلى المفاهيم المعاصرة عن الكون. وبالرغم من تجنبي استخدام اللغة التقنية والمعادلات، وبسبب تضمن الموضوع لمفاهيم راديكالية جديدة، فإن القارئ يحتاج للتوقف بين حين وآخر ليتأمل مقطعاً هنا أو للتفكير في تفسير ما هناك، ليتمكن من متابعة تقدم الأفكار تماماً. ومقاطع قليلة في الجزء الرابع من الكتاب (التي تركز على أحدث التطورات) هي الأكثر تجريدًا من بقية الأجزاء، وقد حرصت على أن أحذر القارئ مسبقاً من هذه المقطاع،

وأن أقسمَ المتن بحيث يتمكن القراء من المرور عليها في عجلة أو حتى تخطيَها من دون أن يؤثر ذلك إلاً في أضيق الحدود في الانسيابية المنطقية للكتاب. وقد ضمنت الكتاب مسراً بالصطلاحات العلمية لذكر القارئ بطريقة سهلة ومتاحة بالأفكار الواردة في متن الكتاب. ومع أن القارئ العادي قد يرحب في التغاضي عن الملحوظات تماماً، إلا أن القارئ الأكثر اهتماماً سيجد في هذه الملحوظات شرحاً أطول لبعض النقاط التي جاءت في متن الكتاب، وتوضيحاً لأفكار تم تبسيطها، وكذلك بعض جولات تقنية لهةلاء المهتمين بالرياضيات.

إنني أدين بالشكر لكثير من الناس لمساعداتهم لي أثناء إنجاز هذا الكتاب. فقد قرأ دافيد شتاينهارد المخطوطة بعناية عظيمة، وأمدني بكرم بأفكار ثاقبة وبحماس لا يقدر بثمن فيما يتعلق بالتحرير. كذلك قرأ المخطوطة بعناية كل من دافيد موريسون، وكين فاينبرغ، ورفائيل كاسبر، ونيكولاوس بولس، وستيفن كارلليب، وأرثر غرينسبون، ودافيد ميرمين، ومايكل بوبويتس، وشاني أوفين، وقدموا اقتراحاتهم وانطباعاتهم ما ساعد كثيراً في عرض الكتاب. أما الآخرون الذين قرأوا كل المخطوطة أو جزءاً منها وقدموا نصائحهم وتشجيعهم فهم بول آسبينول، وبيرسيس دريل، ومايكل داف، وكورت وتفراید، وجوشوا غرين، وتيدي جيفرسون، ومارك كاميونكوفسكي، وياكوف كانتر، وأندراوس كوفاكس، ودافيد لي، وميغان ماك إيون، وناري ميستري، وهسان بادامين ورونين بليسبر، وماسيمو بوراتي، وفريدي شيري، ولارس سترايت، وستيفن ستروغاتس، وأندرو سترومغر، وهنري تاي، وكومرون فافا، وغابرييل فينزيانو. وإنني أدين بشكل خاص لرافائيل غانر لنقده الثاقب والأمور أخرى كثيرة أثناء فترة إعداد الكتاب في مراحله المبكرة، الأمر الذي ساعد في صياغة الشكل العام للكتاب. وكذلك أدين بالشكر الخاص لروبرت مالي لتشجيعه الرقيق والدؤوب الذي تعدى مرحلة التفكير إلى "بدء الكتابة". وقد قدم ستيفن وينبرغ وسيدني كولمان نصائح قيمة وتعاونة، كما أنه من دواعي سروري الاعتراف بالمدخلات الجيدة لكارول آرشر، وفيكي كارستنس، وويندي غرين، وإريك جندرسون، وغاري كاسي، وشيفا كومر، وروبرت موهيوني، وبام مورهاوس، وبيرير راموند، وأماندا سالز، وبيترو سيمونسيلي. كما أنتي ممتن لكوستاس يفثيميو على مساعدته في مراجعة الحقائق وإيجاد المراجع وعلى تحويله رسومي التخطيطية الأصلية إلى رسوم واضحة تمكن بواسطتها توم روكييل من إبداع الأشكال التي جملت الكتاب. وذلك بصبر القديسين وعين الفنان المبدع. كما أنتي أشكر أندرو هانسون وجيم سينثيا لمساعدتهمما لي في إعداد بضعة أشكال متخصصة.

وإنني لأشكر كل من وافقوا على مقابلتي ومنحني وجهة نظرهم في الموضوعات المختلفة التي غطتها الكتاب، وهم هوارد جيورجي، وشيلدون غلاشو، ومايكل غرين، وجون شوارتز، وجون ويلر، وإدوارد ويتن، واندرو سترومغر مرة ثانية هو وكومرون فافا، وغابرييل فيتزيانو.

ومن دواعي سعادتي أن أقر بأفكار واقتراحات أنجيلا فون درليب التي لا تقدر قيمتها، وكذلك الحساسية الفائقة تجاه التفاصيل التي أبدتها تراسى ناغل وناشرى في دار و. و. نورتون، وقد ساعدوا جميعاً في توضيح العرض. كما أننيأشكر وكيل الأدبىن جون بروكمان، وكاتينكا ماتسون، لإرشاداتهما الخبرة ورعايتهم للكتاب من بدايته وحتى نشره.

وإنني أقر بكل امتنان بالدعم الكريم لأبحاثي في الفيزياء النظرية على مدى أكثر من عقد ونصف من السنين بواسطة المؤسسة القومية للعلوم ومؤسسة ألفريد أ. سلون، وقسم الطاقة بالولايات المتحدة. وربما ليس غريباً أن تكون أبحاثي قد تركزت على تأثير نظرية الأوتار الفائقة على مفهومنا عن الزمان والمكان، وفي الفصلين الأخيرين قمت بشرح بعض الاكتشافات التي كان لي حظ المشاركة في إنجازها. ومع أنني آمل أن يستمتع القارئ بالأمور "الداخلية"، فإنني أدرك أن ذلك قد يترك انطباعاً مبالغـاً فيه عن الدور الذي لعبته في تطوير نظرية الأوتار الفائقة. ولذلك أنتهز هذه الفرصة لأقر بفضل أكثر من ألف فيزيائي من جميع أنحاء العالم، ساهموا وكرسوا حياتهم لجهود تحديث النظرية النهائية للكون. وإنني أعتذر لكل الذين لم يتضمن الكتاب أبحاثهم، ولا يعكس ذلك إلا وجهة النظر التي اخترتها وتحديد حجم الكتاب.

وأخيراً، إنني أدين بالشكر من كل قلبي لآلن آرثر على الحب الأصيل والدعم اللذين بدونهما لم يكن لهذا الكتاب أن يرى النور.

القسم الأول

حد المعرفة

الفصل الأول

التشابك مع الوتر

ظل علماء الفيزياء لأكثر من نصف قرن على دراية بأن هناك سحبًا داكنة تلوح في الأفق البعيد، حتى وهم في أوج الاكتشافات العلمية العظمى في التاريخ. ولو أطلقنا على ما حدث "محاولة الاختباء" لكان ذلك شيئاً درامياً جداً. كانت المشكلة تمثل في أن الفيزياء الحديثة تقوم على ركيزتين أساسيتين. الأولى هي النظرية النسبية العامة للأبرت آينشتاين، وهي تمنحنا الإطار النظري لفهم العالم في أبعاده الكبيرة: النجوم وال مجرات وتجمعات المجرات، وحتى ما وراء المدى البعيد للكون نفسه. أما الركيزة الثانية فهي ميكانيكا الكم، وهي التي تزودنا بالإطار النظري لفهم العالم في أصغر أبعاده: الجزيئات والذرات وحتى الدقائق تحت الذرية مثل الإلكترونات والكواركات. وفي نهاية المطاف، أيقن علماء الفيزياء تجريبياً، وعلى مدى سنوات عديدة من البحث، صحة كل التنبؤات التي بشرت بها كل من هاتين النظريتين. غير أن نفس هذه الوسائل النظرية أدت وبشكل لا يقبل الجدل إلى نتيجة غير مرحبة: تبعاً للصياغة الحالية لنظرية النسبية العامة ونظرية ميكانيكا الكم، فإن إدحاهما تنفي الأخرى بحيث لا بد من أن تكون واحدة منها فقط على صواب. وهكذا فإن النظريتين اللتين تشكلان أساس التقدم الهائل في الفيزياء خلال المائة عام الماضية - التقدم الذي فسر تمدد السماوات من جهة، وفسر البنية الأساسية للمادة من جهة أخرى - غير متافقتين.

إذا لم تكن قد سمعت مسبقاً بهذا التناقض الحاد فربما ستعجب لماذا. ولم يست إلاجابة صعبة المنال. ففي معظم الحالات يقوم الفيزيائيون إما بدراسة الأشياء الصغيرة الخفيفة (مثل الذرات ومكوناتها)، أو بدراسة الأشياء الكبيرة الثقيلة (مثل النجوم والمجرات)، وليس الأمران معاً.

ومعنى ذلك أنهم يحتاجون لاستخدام نظرية ميكانيكا الكم فقط أو النظرية النسبية فقط. وهم في ذلك يتتجاهلون عن عدم التحذيرات التي تطلقها النظرية الأخرى. وعلى مدى خمسين سنة، لم يكن هذا الاتجاه مصدر اطمئنان من

ناحية، ولا محل إهمال من ناحية أخرى، لكنه ظل ماثلاً أمام علماء الفيزياء طول الوقت.

من المحتمل أن يكون للكون نهاية. ففي أعماق الثقوب السوداء تنسحق أية كتلة هائلة لتحول إلى حجم متناهي الصغر. كان الكون لحظة الانفجار الهائل "Big Bang" قد تفجّر عن كتلة ميكروسكوبية إذا ما قورنت بحبة رمل لبدت حبة الرمل عظيمة الحجم. وهذه العوالم دقيقة لكنها فائقة الكتلة، الأمر الذي يتطلب تطبيق كل من نظرية ميكانيكا الكم والنسبية العامة في آن واحد. ولأسباب متزدادة وضوحاً كلما تقدمنا في هذا الكتاب، فإن الأمور تبدأ في الاضطراب والجيشان والاندفاع مثل البخار عندما يندفع من سيارة تخطر درجة حرارتها علامة الخطر. ويحدث كل ذلك لو حاولنا استخدام معادلات نظرية النسبية العامة ومعادلات ميكانيكا الكم معاً. فإذا أخذنا أسلمة الفيزياء ذات الصياغة الجيدة والتي لا تتضمن بلاغة معينة وعلجناها بمزج هاتين النظريتين، فإننا سنحصل على إجابات غير منطقية. وحتى إذا أردنا أن نستبقي أعماق الثقوب السوداء وبدائيات الكون على التناقض والتناقض القائم بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة، فإنهما يلحان في طلب مزيد من الفهم. ثُرى هل من الممكن أن يكون العالم منقسمًا في عمق مستوياته الأساسية بحيث يتطلب مجموعة من القوانين عند التعامل مع الأشياء الكبرى ومجموعة أخرى مختلفة وغير متوافقة مع الأولى عند التعامل مع الأشياء الصغرى؟

تصدى نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory) للإجابة عن ذلك، وهي النظرية التي ظهرت حديثاً - مقارنة بالصريحين العظيمين لميكانيكا الكم والنسبية العامة - وتأتي إجابتها مدوية: لا. وقد بنت الأبحاث المكثفة لعلماء الفيزياء والرياضيات من جميع أنحاء العالم خلال العقد الأخير أن الاتجاه الجديد في وصف المادة في أقصى مستوياتها الأساسية سيسهل التوتر بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. وفي الواقع فإن نظرية الأوتار الفائقة تعني المزيد: يتطلب الإطار الجديد احتياج كل من النسبية العامة وميكانيكا الكم إحداثها للأخرى لتصبح هذه النظرية (الأوتار الفائقة) مقبولة. وتبعاً لنظرية الأوتار الفائقة فإن التزاوج بين قوانين الأشياء الكبرى والصغرى لم يعد مُرضياً فقط، بل بات حتمياً.

وهذه بعض الأخبار الطيبة. فنظرية الأوتار الفائقة - وتسمى اختصاراً نظرية الأوتار - تذهب بهذا الاتحاد أبعد من ذلك في خطوة عملاقة. ظل آيشتاين على مدى ثلاثة عقود يبحث عن نظرية موحدة في الفيزياء، وهي النظرية التي تتشابك

فيها كل قوى الطبيعة والمكونات المادية في نسيج نظري واحد. لكنه فشل في ذلك. واليوم ومع مطلع الألفية الجديدة يدعى مؤيدو نظرية الأوتار أن خيوط هذا النسيج الواحد المراوغ قد اتضحت أخيراً. وتملك نظرية الأوتار المقدرة على إظهار أن كل الأحداث العجيبة التي تجري في الكون بداية من الرقص العشوائي لل Kovarikas (الجسيمات تحت الذرية) إلى الفالس التقليدي لمنظومة مكونة من نجمين يدوران أحدهما حول الآخر، وببداية من كرات اللهب البدائية في الانفجار الهائل (Big Bang) إلى الدوران المهوول للمجرات في السماء. كل هذا مجرد انعكاسات لمبدأ فيزيائي عظيم، وسيادة لمعادلة واحدة.

وحيث إن ملامح نظرية الأوتار تتطلب أن نغير مفاهيمنا عن المكان والزمان والمادة تغييراً جذرياً، فإن الأمر سيستغرق بعض الوقت للتعود عليه ولتمكن من سبر أغواره عند مستوى معقول. وكما سيتضح بجلاء عندما نظر إلى نظرية الأوتار في الإطار الصحيح، فإنها ستتبثق بشكل درامي لكن طبيعياً كنتيجة للاكتشافات الثورية في الفيزياء خلال المائة عام الماضية. وسنرى في الحقيقة أن التناقض بين النسبية العامة وميكانيكا الكم ليس هو الأول، بل الثالث في سلسلة متتابعة من التناقضات المحورية التي أمكن حصرها خلال القرن الماضي. وقد أدى حل كل تناقض منها إلى مراجعة شاملة لمفهومنا عن الكون.

أولاً: التناقضات الثلاثة

تم التعرف على أول هذه التناقضات في أواخر القرن التاسع عشر، وهو يتعلق بالخواص الممحورة لحركة الضوء. وباختصار، وطبقاً لقانون الحركة لنيوتن فإنك إذا ركضت بسرعة كافية يمكنك أن تلحق بشاع الضوء. لكن، وتبعاً لقوانين جيمس كلارك ماكسويل عن الكهرومغناطيسية، فإنك لن تستطيع. وكما سنرى في الفصل الثاني من هذا الكتاب حل آينشتاين لهذا التناقض بواسطة النظرية النسبية الخاصة، وهو بذلك قد غير مفهومنا عن المكان والزمان كلية. وطبقاً للنسبية الخاصة لا يمكن أن تفك في المكان والزمان كمفهوم عالمي جامد ثابت يشعر به كل إنسان بنفس الشكل، لكنهما يبدوان - المكان والزمان - في أبحاث آينشتاين كبني طبيعة يعتمد شكلها ومظهرها على حالة الحركة التي عليها المشاهد.

وعلى الفور قام تطور النسبية الخاصة بإعداد المسرح لظهور التناقض الثاني. تنص إحدى نتائج أبحاث آينشتاين أنه لا يمكن لأي جسم - وفي الحقيقة ولا لأي تأثير أو اختلال من أي نوع - أن ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وكما سنرى في الفصل الثالث، فإن نظرية نيوتن الكونية للجاذبية - وهي النظرية

الناجحة عند تجربتها والمقبولة حدسياً - تتضمن انتقال التأثيرات لمسافات شاسعة "لحظياً". كان آينشتاين مرة أخرى هو الذي قام بحل هذا التناقض الثاني. وقد مفهوماً جديداً للجاذبية ضمن نظرية النسبية العامة عام 1915. وقد غيرت النسبية العامة المفاهيم السابقة عن المكان والزمان تماماً كما فعلت من قبلها النسبية الخاصة. فكل من المكان والزمان لا يتأثران فقط بحركة المشاهد بل إنهم قد ينحرفان ويلتويان تبعاً لوجود المادة أو الطاقة في طريقهما. وتؤدي مثل هذه التشوّهات في نسيج المكان والزمان إلى انتقال قوى الجاذبية من مكان إلى آخر كما سنرى. وبذلك فإن المكان والزمان لا يمكن اعتبارهما بعد ذلك مجرد خلفية خاملة تجري عليها أحداث العالم، بل إنهم، ومن خلال نظرتي النسبية الخاصة والعامة، يؤديان أدواراً خاصة في نفس الأحداث.

وتتكرر الصورة مرة أخرى: فعندما حلَّ اكتشاف النسبية العامة أحد التناقضات أدى إلى ظهور تناقض آخر. وقد طور علماء الفيزياء ميكانيكا الكم على مدى ثلاثة عقود بدءاً من سنة 1900 (ستناوش ذلك في الفصل الرابع) وذلك كرد فعل لعدد من المشاكل القوية التي ظهرت عند تطبيق مفاهيم الفيزياء في القرن التاسع عشر على العالم الميكروسكوبى. وكما ذكرنا سابقاً، فإن التناقض الثالث والأكثر حدة قد ظهر من عدم التوافق بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة. وكما سنرى في الفصل الخامس، فإن الانحناء الهندسى الرقيق لشكل الفراغ والناتج من النسبية العامة، يتناقض مع السلوك المتذبذب القلق على المستوى الميكروسكوبى للعالم تبعاً لميكانيكا الكم. ظل الأمر كذلك حتى منتصف الثمانينيات من القرن العشرين عندما قدمت نظرية الأوتار حلاً لهذا التناقض الذي هو المشكلة المحورية في الفيزياء الحديثة. وبجانب ذلك تتطلب نظرية الأوتار - القائمة على النسبية الخاصة والعامة - تجديد مفاهيمنا عن المكان والزمان بشكل جذري. فعلى سبيل المثال يتعامل معظمنا مع الكون على أنه ذو ثلاثة أبعاد فراغية. غير أن الأمر ليس كذلك وفقاً لنظرية الأوتار التي تنص على أن للعالم أبعاداً أكثر كثيراً مما تشاهده العين . وهي الأبعاد المضفرة بقوة في نسيج الكون المطوي. وتشغل هذه الأفكار المتميزة موقعاً مركزياً في طبيعة المكان والزمان ، وهي التي سستخدمها كعلامة استرشادية في كل ما يأتي لاحقاً. وبشكل واقعي، فإن نظرية الأوتار هي قصة المكان والزمان منذ عهد آينشتاين.

وحتى نقر لنظرية الأوتار بالفضل، فإننا نحتاج إلى الرجوع خطوة للوراء لنصف بإيجاز ما تعلمناه خلال القرن الماضي عن بنية الكون الميكروسكوبية.

ثانياً: الكون في أصغر أبعاده: ما الذي نعرفه عن المادة؟

كان الإغريق القدماء يعتقدون أن الكون مصنوع من دقائق "غير قابلة للانقسام" أطلقوا عليها ذرات (Atoms). وكما في اللغات ذات الأبجدية حيث يتكون العدد الهائل من الكلمات من تجمع عدد محدود من الحروف، فإن الإغريق كانوا يظلون أن الكلم الهائل من المواد يتكون هو الآخر من اتحاد عدد صغير من وحدات بناء أولية معينة. كان ذلك مجرد تخمين غيبي. وبعد مرور أكثر من ألفي عام ما زلنا نعتقد في صحة ذلك بالرغم من أن خواص وحدات البناء الأساسية قد خضعت لتعديلات عديدة. وقد بين علماء القرن التاسع عشر أن الكثير من المواد المألوفة مثل الأكسجين والكربون تتكون من مكونات دقيقة يمكن التعرف عليها، الأمر الذي يتمشى مع المعتقدات التي أرساها الإغريق وأطلقوا عليها اسم ذرات - أي غير قابلة للانقسام. ارتبط هذا الاسم بالذرات مع أن التاريخ قد أظهر خطأ ذلك، حيث اتضح أن الذرات "قابلة للانقسام". وقد أرست أبحاث كل من طومسون وإرنست رذرфорد ونيلز بوهر وجيمس تشادويك في بداية الثلاثينيات من القرن العشرين نموذجاً للذرة يماثل النظام الشمسي، الأمر المألوف لمعظمنا. وت تكون الذرات - التي صارت أبعد ما تكون عن كونها مادة أولية - من أنوية تحتوي على بروتونات ونيوترونات محاطة بحشد من الإلكترونات في مداراتها.

ولفتره ما اعتقاد كثير من علماء الفيزياء أن البروتونات والنيوترونات والإلكترونات هي الذرات "الإغريقية". غير أنه في العام 1968 ، وفي مركز المعجل الخطي في ستانفورد، وباستغلال الإمكانيات المتقدمة لتقنية اختبار أغوار المادة، وجد العلماء التجاربيون أن البروتونات والنيوترونات ليست أولية هي الأخرى. وأنبتو أن كلاً من البروتونات والنيوترونات تتكون من ثلاثة جسيمات أصغر تسمى كواركات (Quarks) - وهو اسم غريب اقتبسه موراي جيل - مان عالم الفيزياء النظرية من مقطع في رواية جيمس جويس "السهر بجانب جثمان فينيغان" Finnegan's Wake لأنه كان يظن أن هذه الجسيمات موجودة. كما أنهم أثبتوا أن الكواركات نفسها تجيء على نوعين، أطلقوا عليهما - بلا فلسفة - صفتني "أعلى" و "أ أسفل". ويكون البروتون من كواركين اثنين من نوع "أعلى" ، وكوارك واحد من نوع "أسفل" ، بينما يتكون النيوترون من كواركين "أسفل" وكوارك واحد "أعلى" .

وببدو أن كل ما شاهده في عالمنا الأرضي أو السماوي مصنوع من اتحاد الإلكترونات والكواركات العليا والكواركات السفلية. ولا يوجد أي دليل تجريبي على أن أيّاً من هذه الجسيمات الثلاثة يتكون من مكونات أصغر. غير أن هناك العديد من الدلائل التي تشير إلى أن العالم نفسه به مكونات معينة أخرى. وقد اكتشف فريديريك راينز (Frederick Reins) وكلايد كوان (Clyde Cowan) في متتصف الخمسينيات من القرن العشرين أدلة تجريبية حاسمة على وجود جسيمة أساسية رابعة أطلقوا عليها "نيوتروينو" Neutrino، وكان وولفغانغ باولي قد تنبأ بوجودها في بداية الثلاثينيات من القرن العشرين. أثبتت النيوتروينو أنها جسيمة شبح من الصعب الكشف عنها لأنها من النادر أن تتدخل مع المواد الأخرى. فمثلاً تستطيع جسيمة نيوتروينو متوسطة الطاقة أن تعبر خلال تريليونات الأميال من فلز الرصاص من دون أن تتأثر حركتها ولو بصورة ضئيلة جداً. ولا بد أن تشعر براحة لأنه في الوقت الذي تقرأ فيه هذه الجملة تعبر جسده، وتعبر الأرض كذلك، بلايين من جسيمات النيوتروينو التي اندفعت إلى الفضاء من الشمس كجزء من رحلتها المترفة خلال الكون. وقد اكتشفت جسيمة أخرى في نهاية الثلاثينيات من القرن العشرين، هي "الميون" Muon، وهي جسيمة مثل الإلكترون، إلا أنها أثقل منه مائتي مرة. وقد اكتشفها علماء الفيزياء أثناء دراستهم للأشعة الكونية (سيل من الجسيمات التي تتهمر على الأرض من الفضاء الخارجي). وحيث أنه لم تكن هناك في النظام الكوني معضلة أو ظروف مناسبة تستدعي وجود جسيمات الميون، لذلك تلقى عالم فيزياء الجسيمات إيزيدور إسحق رابي (Isidor Isaac Rabi)، الحاصل على جائزة نوبل، اكتشاف الميون بفتور قائلًا: "من الذي أمر بهذه الجسيمة"، ومع ذلك كانت موجودة، وكان هناك المزيد بعدها.

وباستخدام تقانة متزايدة المقدرة، واصل الفيزيائيون دفع قطع من المادة بعضها مع بعض بطاقة متزايدة لتحدث ظروفًا لحظية غير مسبوقة منذ الانفجار الهائل (Big Bang). وكانوا يبحثون في الشظايا عن مكونات أساسية جديدة يضيفونها إلى قائمة الجسيمات التي كان يتزايد عددها باستمرار. وفي ما يلي ما اكتشفوه: أربعة كواركات أخرى، الفتنة Charm، والغرير Strange، والقاع Bottom، والقمة top، وكذلك قريب آخر للإلكترون لكنه أثقل منه أطلق عليه اسم "تاو" Tau، وكذلك جسيمان آخران لهما خواص تشابه النيوتروينو (أطلق عليهما ميون نيوتروينو Muon-Neutrino، وتاو نيوتروينو Tau-Neutrino - للتفرقة بينهما وبين النيوتروينو الأصلية التي أصبح اسمها إلكترون - نيوتروينو). وتنتج هذه

الجسيمات من تصدامات عالية الطاقة وتتوارد كالأشباح في لحظات ولا تدخل في تكوين أي شيء من الأشياء التي نتعامل معها، لكن هذا ليس نهاية المطاف. فلكل من هذه الجسيمات جسيمة مضادة مرافقة . والجسيمات المضادة لها نفس كتلة الجسيمة، لكنها تختلف في بعض الأمور المعينة الأخرى مثل الشحنة الكهربائية (كذلك شحنتها بالنسبة لقوى أخرى سأأتي على ذكرها في ما بعد). فمثلاً الجسيمة المضادة للإلكترون تسمى البوزيترون . ولها نفس كتلة الإلكترون تماماً لكن شحنتها موجبة +1 بينما شحنة الإلكترون سالبة -1. وعندما تلتقي المادة والمادة المضادة فإن كلاً منها يلاشى الآخر لتنتاج طاقة بحثة . ولذا لا توجد المادة المضادة في الطبيعة حولنا إلا في ما ندر.

تمكن الفيزيائيون من التعرف على نسق لهذه الجسيمات مبين في الجدول رقم (1-1). وتقع جسيمات المادة في ثلاث مجموعات ، غالباً ما يطلق عليها عائلات (Families). وتحتوي كل عائلة على كواركين اثنين وإلكترون أو أحد أقاربه ، وواحدة من مجموعة النيوتروينو. وتمتلك الجسيمات المقابلة في العائلات الثلاث خواص متطابقة ما عدا الكتلة ، التي تزداد من عائلة إلى أخرى. وخلاصة القول أن علماء الفيزياء قد اختبروا بنية المادة حتى وصلوا إلى أبعاد تقترب من جزء من البليون من جزء من البليون من المتر وبينوا أن كل الأشياء التي نتعامل معها اليوم سواء كانت طبيعية أم مصنعة نتيجة تصدامات بذرات عملاقة ، كل هذه المواد تتكون من اتحاد بعض الجسيمات من العائلات الثلاث ومن جسيماتها المضادة.

ونظرة خاطفة على الجدول رقم (1-1) تتركك من دون شك متفقاً مع رابي Rabi في حيرته حيال اكتشاف الميون. وقد أعطى تنسيق الجسيمات على شكل عائلات بعض النظام والترتيب ، ولكنه أوجد عدداً لا يحصى من التساؤلات الملحة من نوع لماذا؟. لماذا يوجد هذا العدد الكبير من الجسيمات الأساسية وبالذات عندما يبدو أن الغالبية العظمى من الأشياء في العالم من حولنا لا تحتاج إلا للإلكترونات والكواركات العليا والكواركات السفلية؟ لماذا توجد ثلاثة عائلات؟ ولماذا لا توجد عائلة واحدة أو أربع عائلات أو أي عدد آخر منها؟ ولماذا تملك هذه الجسيمات كتلة مختلفة عشوائية؟ ولماذا مثلاً تزن الجسيمة تاو حوالي 3520 مرة أثقل من الإلكترون؟ لماذا تزن كواركات القمة 40200 مرة أثقل من الكواركات العليا؟ وهذه أمثلة فقط للعشوائية العددية الظاهرة. فهل حدث ذلك بالصدفة ، أم باختيار إلهي ، أم هل هناك تفسير علمي شامل لهذه السمات الأساسية لعالمنا؟

الجدول رقم (1-1)

المائلة الثالثة		المائلة الثانية		المائلة الأولى	
الكتلة	الجسيمة	الكتلة	الجسيمة	الكتلة	الجسيمة
109	تاو	11	ميون	00054	إلكترون
<.033	- نيوترينو	<.0003	- نيوترينو	<10 ⁻⁸	- نيوترينو
189	كوارك قمة	1.6	كوارك أنيق	.0047	كوارك أعلى
5.2	كوارك قاع	16	كوارك غريب	0.0047	كوارك أسفل

المائلات الثلاث للجسيمات الأساسية وكتلتها (كمضاعفات لكتلة البروتون). وما زالت كتلة النيوترينو تراغ عملية قياسها تجريبياً.

ثالثاً: القوى، أو أين الفوتون؟

تصبح الأشياء أكثر تعقيداً فقط عندما نتعامل مع قوى الطبيعة. العالم من حولنا مفعم بوسائل إظهار التأثيرات المختلفة، فالكرة تضرب بالمضارب، ويلقي المتهمنسون المندفعون بأنفسهم من حلق في اتجاه الأرض، كذلك تستطيع المغناطيسات الاحتفاظ بقطار فائق السرعة على ارتفاع قليل من القスピان الفلزية، وتتصدر عدادات جايجر نبضات كرد فعل للمواد المشعة، وتتفجر القنابل النووية. ويمكن التأثير على الأشياء بدفعها أو شدها أو هزها بعنف، أو يقذف أو إطلاق أشياء أخرى عليها، أو بواسطة مطها أو ليها أو طحنتها أو تجميدتها أو تسخينها أو حرقها. وقد جمعَ الفيزيائيون خلال المائة سنة الماضية تللاً من الأدلة التي أكدت أن كل التداخلات بين الأجسام والمواد المختلفة، وكذلك ملايين وملايين أخرى من الأمور التي نتعامل معها يومياً، يمكن اختزالها إلى مجموعة من أربع قوى أساسية. والجاذبية هي إحدى هذه القوى. أما الثلاث الأخرى فهي القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة والقوى القوية.

وأكثر هذه القوى شيوعاً هي الجاذبية، فهي المسؤولة عن وجودنا في مدار حول الشمس، وعن استقرار أقدامنا على الأرض. وتعبر كتلة الجسم عن مقدار ما تبذله من جاذبية ومقدار ما يقع عليها منها. والقوى التي تلي الجاذبية شيوعاً هي الكهرومغناطيسية، وهي القوى التي تقف وراء كل مظاهر الرفاهية في العصر

الحدث مثل الأضواء والحسابات وأجهزة التليفزيون والتليفونات . كما أنها وراء صواعق البرق العظيم واللمسة الرقيقة ليد إنسان . وعلى المقياس الميكروسكوبى فإن الشحنة الكهربائية للجسيمة تلعب دوراً في القوى الكهرومغناطيسية يماثل دور الكتلة في حالة الجاذبية : فهي تحدد مدى ما تبذل الجسيمة ومدى رد فعلها كهرومغناطيسياً .

والقوى القوية والقوى الضعيفة أقل ألفة لأن تأثيرها يتضاعف بسرعة خلال المسافات ، ما عدا المسافات تحت الذرية ، وهي القوى النووية ، ولهذا السبب لم تكتشف تلك القوى إلا حديثاً . والقوى القوية هي المسؤولة عن "تماسك" الكواركات بعضها مع بعض في البروتونات والنيترونات والاحتفاظ بالبروتونات والنيترونات محشورة بعضها مع بعض داخل أنوية الذرات . أما القوى الضعيفة فهي المعروفة بأنها المسؤولة عن التفتت الإشعاعي لمواد مثل اليورانيوم والكونيل .

وقد اكتشف الفيزيائيون خلال القرن الماضي سمتين عامتين لكل هذه القوى . السمة الأولى (كما سنرى في الفصل الخامس) وعلى المستوى الميكروسكوبى هي أن كل هذه القوى لها جسيمة مترافقه معها يمكن اعتبارها الحزمة الصغرى لهذه القوى . فإذا أطلقنا شعاعاً من الليزر - "مدفع أشعة كهرومغناطيسية" - فإننا في الواقع نطلق تياراً من الفوتونات ، وهي الحزمة الصغرى للقوى الكهرومغناطيسية . أما المكونات الصغرى لمجالات القوى الضعيفة والقوى القوية ، فهي جسيمات تسمى بوزونات قياسية ضعيفة Weak Gauge Boson ، وغليونات Gluons (ويمكن اعتبار كلمة غلينون معبراً بالتحديد ، فالغليونات تعتبر المكون الميكروسكوبى في الغراء القوي الذي يمسك الأنوية الذرية بعضها مع بعض) . وبحلول عام 1984 ،تمكن العلماء التجاربيون من تأكيد وجود هذه الأنواع الثلاثة من جسيمات القوى ، ومن تعين خواصها بالتفصيل كما هو مبين في الجدول رقم (2-1) . ويعتقد علماء الفيزياء بوجود جسيمة مترافقه لقوى الجاذبية كذلك ، أطلقوا عليها اسم غرافيتون Graviton ، إلا أنهم لم يتحققوا من وجودها تجريبياً حتى الآن .

أما السمة المشتركة الثانية لهذه القوى فإنها مثل الكتلة في تحديدها كيف تؤثر الجاذبية في الجسيمات ، وكذلك مثل الشحنة الكهربائية في تحديدها كيف تؤثر القوى الكهرومغناطيسية فيها . وتتمثل الجسيمات هنا كميات معينة من "شحنة قوية" و "شحنة ضعيفة" ، وهي الشحنات التي تحدد كيف تتأثر بالقوى القوية والقوى الضعيفة . (هذه الخواص موجودة بالتفصيل في الملاحظات الموجودة آخر

هذا الفصل⁽¹⁾). ولكن، وكما في حالة كتلة الجسيمات، وإذا تغاضينا عنحقيقة أن علماء الفيزياء التجربيين قد قدرّوا بدقة تلك الخواص، فإنه لا يوجد أي تفسير لماذا يتكون عالمنا من هذه الجسيمات وبهذه الكتلة وشحّنات القوى بالتحديد.

(1) الجدول الآتي توضّح للجدول رقم (1-1)، وهو يسجل كتل وشحّنات للجسيمات في كل العائلات الثلاث. ويمكن أن يحمل كل نوع من الكواركات ثلاث شحّنات من القوى القوية، والتي يمكن بشيء من الخيال أن توسم بالألوان - وهي تشير إلى قيم عدديّة لشحّنات من القوى القوية. أما الشحّنات الضعيفة المسجلة فهي، بصورة أكثر دقة، "المكون الثالث" لنفس الحركة المغزليّة الضعيفة (Weak Isospin). (ولم نسجل هنا مكوّنات الجسيمات ذات خاصيّة "اليد اليمنى" - لأنّها تختلف في كونها لا تملك شحنة ضعيفة).

المائة الأولى				
الجسيمة	الكتلة	الشحنة الكهربية	الشحنة الضعيفة	الشحنة القوية
إلكترون	00054	-1	$\frac{1}{2}-$	0
إلكترون-نيوترينو	$<10^{-8}$	0	$\frac{1}{2}$	0
كوارك أعلى	0047	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
كوارك أسفل	0047	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	أحمر، أخضر، أزرق

المائة الثانية				
الجسيمة	الكتلة	الشحنة الكهربية	الشحنة الضعيفة	الشحنة القوية
ميون	11	-1	$-\frac{1}{2}$	0
ميون - نيوتريلو	<0003	0	$\frac{1}{2}$	0
الكوارك الأبيق	1.6	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
الكوارك الغريب	16	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	أحمر، أخضر، أزرق

المائة الثالثة				
الجسيمة	الكتلة	الشحنة الكهربية	الشحنة الضعيفة	الشحنة القوية
تاو	1.9	-1	$-\frac{1}{2}$	0
تاو-نيوترينو	<033	0	$\frac{1}{2}$	0
كوارك القمة	189	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
كوارك القاع	5.2	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	أحمر، أخضر، أزرق

الجدول رقم (2-1)

الكتلة	جسيمة القوة	القوة
0	Gluon	قوية
0	Photon	كهرومغناطيسية
86,97	بوزونات قياسية ضعيفة Weak Gauge Bosons	ضعيفة
0	غرافيتون	الجاذبية

القوى الأربع في الطبيعة مع جسيمات القوة المرافقية لها وكتلتها كمضاعفات لكتلة البروتون. (تجيء جسيمات القوة الضعيفة على أنواع ذات كتلتين محتملتين كما هو مذكور في الجدول. وتبين الدراسات النظرية أنه لا بد أن يكون الغرافيتون عديم الكتلة).

وعلى الرغم من سماتها العامة، فإن دراسة القوى الأساسية نفسها لم تأت إلا بمزيد من الأسئلة. فمثلاً، لماذا توجد أربع قوى أساسية؟ ولماذا ليست خمساً أو ثلاثة أو واحدة فقط؟ ولماذا تتباين خواص هذه القوى بهذا الشكل؟ ولماذا ينحصر تأثير القوى الضعيفة والقوية فقط في المستوى الميكروسكوبي، بينما مجال قوى الجاذبية والكهرومغناطيسية غير محدود؟ ولماذا هذا الانتشار الواسع للشدة الذاتية لهذه القوى؟

ولكي ندرك ما يعنيه هذا السؤال، لنتخيل أننا نقبض على إلكترون باليد اليسرى وأخر باليد اليمنى، وسنحاول تقريب هاتين الجسيميتن المتماثلين تماماً في الشحنة إحداهما من الأخرى. ستتشعّج قوى الجاذبية الجمع بينهما بينما سيقوم التنافر الكهرمغناطيسي بمحاولة إبعادهما الواحدة عن الأخرى. ترى أيهما الأقوى؟ ليس هناك مجال للمنافسة، فقوى التنافر الكهرمغناطيسي أقوى بحوالي مليون بليون بليون بليون مرة (10^{42} مرة). فإذا كانت المسافة بين رأسين العضلة في أعلى الرند الأمين تمثل شدة قوى الجاذبية، فإن المسافة بين رأسين العضلة في أعلى الرند الأيسر لا بد أن تسع لتتملا الكون أو أبعد من ذلك لتمثل شدة القوى الكهرمغناطيسية. والسبب الوحيد في أن القوى الكهرمغناطيسية لا تطغى على الجاذبية في العالم من حولنا هو أن معظم الأشياء تتكون من كميات متساوية من الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة، الأمر الذي يؤدي إلى تلاش متبادل لقوىهما. ومن ناحية أخرى، وحيث إن الجاذبية قوى جذب دائمة، فلا

مجال للغائها . أي أن الزيادة في المادة تعني زيادة قوى الجاذبية . ويمكن القول أن قوى الجاذبية في الأساس في غاية الضعف . (وتوقف هذه الحقيقة وراء عدم التمكن من إثبات وجود الجرافيتون . ويمثل البحث عن أصغر حزمة من أضعفقوى تحدياً حقيقةً) . وقد أثبتت التجارب أن القوى القوية أقوى من القوى الكهرومغناطيسية بحوالى مائة مرة وأقوى من القوى الضعيفة بحوالى مائة ألف مرة . لكن أين المنطق هنا - أو سبب الوجود - في أن عالمنا له هذه السمات ؟

وليس هذا التساؤل مجرد فلسفة عديمة الجدوى حول السبب وراء حدوث تفاصيل معينة بشكل ما وليس بشكل آخر ؟ فسيصبح العالم مكاناً مختلفاً جداً إذا تغيرت خواص المادة وجسيمات القوى ولو تغيراً طفيفاً . وعلى سبيل المثال ، فإن وجود أنوية مستقرة لحوالى مائة عنصر في الجدول الدوري يتوقف تماماً على النسبة بين شدة القوى القوية والقوى الكهرومغناطيسية . فالبروتونات المحشورة معاً في أنوية الذرات تتنافر جميراً بعضها مع بعض بفعل القوى الكهرومغناطيسية ، لكن ولحسن الحظ فإن القوى القوية بين الكواركات المكونة لها تتغلب على هذا التنافر وتقييد البروتونات بعضها إلى بعض بشدة . لكن أي تغير طفيف في الشدة النسبية بين هاتين القوتين قد يؤدي بسهولة إلى اضطراب في التوازن بينهما ، الأمر الذي قد يتسبب في تفكك معظم الأنوية . وعدا ذلك ، لو كانت كتلة الإلكترونات أكبر بضع مرات مما هي عليه ، فإنها ستتحدد مع البروتونات لتكون نيوترونات لتلتهم أنوية الهيدروجين (أبسط العناصر في الكون ، وت تكون نواته من بروتون واحد) ، ومرة أخرى ، سيضطرب إنتاج العناصر الأكثر تعقيداً . وتعتمد النجوم على دمج الأنوية المستقرة ، وعليه فإن هذه النجوم لن تتوارد إذا حدث مثل هذا التدخل في أساسيات الفيزياء . وتلعب شدة الجاذبية هي الأخرى دوراً فعالاً . وتقوم الكثافة الساحقة للمادة في لب قلب النجم بقدر الفرن النووي ، وهي التي تقف وراء تألق أضواء النجم . فإذا كانت شدة الجاذبية أكثر مما هي عليه فإن تجمع المادة داخل النجم سيتم بصورة أقوى مما سيزيد من سرعة التفاعلات النووية بشكل ملحوظ . تماماً مثل اللهب عندما يتوهج بشدة فإنه وقوده سينفذ بسرعة إذا ما قورن بشمسة تشتعل ببطء ، وكذلك التفاعل النووي إذا زادت سرعته فسيتسبب في أن نجوماً مثل الشمس ستتحرق بمعدلات أسرع كثيراً مما سيحدث تأثيراً مدمرًا في الحياة كما نعرفها . ومن ناحية أخرى ، إذا نقصت شدة الجاذبية بشكل ملحوظ فلن تجمع المادة كلية ، وبالتالي سيمعن ذلك تكون النجوم وال مجرات .

ويمكن أن نسترسل أكثر من ذلك لكن الفكرة واضحة الآن : فالعالم هو ما

هو لأن المادة وجسيمات القوى لها من الخواص ما لها. لكن هل هناك تفسير علمي يقول لنا لماذا هذه الخواص؟

رابعاً: نظرية الأوتار: الفكرة الأساسية

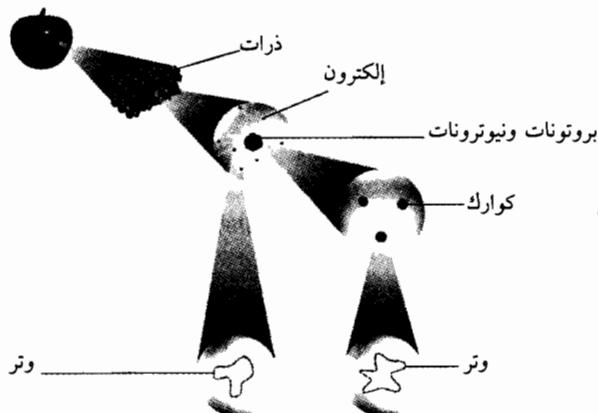
تقدم نظرية الأوتار نموذجاً قوياً مبنياً على الفهم، يتضمن لأول مرة ظهور إطار يجيب عن هذه التساؤلات. ولنبدأ بالفكرة الأساسية.

تمثل الجسيمات في الجدول رقم (1-1) "حروف" جميع المواد. وهي في ذلك مثل مثيلاتها في اللغات، فهي تبدو وكأن ليس لها بنية داخلية أبعد من ذلك. وتدعى نظرية الأوتار غير ذلك. فتبعاً لهذه النظرية، فإننا لو فحصنا هذه الجسيمات بدقة أكبر - أي بدقة تزيد أضعافاً مضاعفة، وهي دقة خارج إمكاناتنا التقنية الحالية - فإننا سنجد أن كلاً منها ليس مجرد نقطة، بل يتكون من أنشطة أحادية البعض. وتكون كل جسيمة من فتيل يتذبذب وبهتز ويتراقص مثل حلقة من المطاط متناهية النحافة. ولأن علماء الفيزياء يفتقرن إلى حنكة جيل-مان الأدبية، فقد أطلقوا عليها اسم الوتر (String). وفي الشكل رقم (1-1) قمنا بتصوير هذه الفكرة الرئيسية لنظرية الأوتار بدءاً من قطعة عادية من المادة مثل تفاحة، ثم كررنا تكبير بيئتها لنكتشف عن مكوناتها بمقاييس متزايدة في الصغر. وتضيف نظرية الأوتار طبقة ميكروسโคبية جديدة لأنشطة متذبذبة إلى ما كان معروفاً مسبقاً في التسلسل من ذرات إلى بروتونات ونيوترونات وإلكترونات وكواركات⁽²⁾.

وعلى الرغم من عدم الوضوح بأي شكل من الأشكال، إلا أنها سترى في الفصل السادس أن الإحلال البسيط لمفهوم الجسيمة-النقطة في مكونات المادة بواسطة الأوتار ينهي عدم التوافق بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة. وبذلك تمكنت نظرية الأوتار من حل العقدة مستعصية الحل المركزية في الفيزياء النظرية المعاصرة. وهذا إنجاز هائل إلا أنه جزء واحد فقط من السبب وراء مثل هذه الإثارة التي أحدها نظرية الأوتار.

(2) يمكن أن يكون للأوتار نهايةان حرتا الحركة (تدعى الأوتار المفتوحة) بالإضافة إلى العروات (الأوتار المغلقة) والمصورة في الشكل رقم (1-1). ولتسهيل ما نعرضه سنركز في معظم الأحيان على الأوتار المغلقة، مع أن كل ما سنذكره ينطبق على كليهما.

الشكل رقم (1-1)



تكون المادة من ذرات، هي بدورها تتكون من كواركات وإلكترونات. وتبعاً لنظرية الأوتار فإن كل هذه الجسيمات هي في الواقع أشوطات دقيقة لأوتار متذبذبة.

خامساً: نظرية الأوتار كنظرية موحدة لكل شيء

مع أن القوى القوية والقوى الضعيفة لم تكن قد اكتشفت بعد في أيام آينشتاين، إلا أن وجود قوتين فقط متميزيتين واحدة من الأخرى (الجاذبية والكهرومغناطيسية) كان أمراً محيراً بشدة. لم يقبل آينشتاين فكرة أن الطبيعة قد قامت على مثل هذا التصميم الغريب. وقد حفز ذلك رحلة آينشتاين على مدى ثلاثين عاماً في البحث عما أسماه نظرية المجال الموحد (Unified Field Theory)، وكان يأمل أن تثبت أن هاتين القوتين هما في الحقيقة نتاج مبدأ واحد عظيم. وقد عزلت هذه المشكلة الدونكيغوتية آينشتاين عن التيار الرئيسي للفيزياء، الذي كان مشغولاً وقتها ويحق في البحث العميق في الإطار الذي بزغ حدثاً لميكانيكا الكم. وقد كتب لأحد أصدقائه في بداية الأربعينيات من القرن العشرين: "لقد أصبحت شخصاً وحيداً عجوزاً ومعروفاً فقط لأنه لا يرتدي جوارب، والذي يقدم في مناسبات خاصة كشخص غريب الأطوار"⁽³⁾.

كان آينشتاين سابقاً لعصره. فبعد أكثر من نصف قرن أصبح حلمه عن النظرية الموحدة هو الكأس المقدسة للفيزياء الحديثة. واليوم أصبح قسم كبير من مجتمع الفيزياء والرياضيات مقتنعاً بشكل متزايد بأن نظرية الأوتار قد تعطي الإجابة.

(3) ألبرت آينشتاين في خطاب إلى صديق 1942، كما هو مقتبس من كتاب: Tony Hey and Patrick Walters, *Einstein's Mirror* (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1997).

وانتلاقاً من مبدأ واحد - هو أن كل شيء على أصغر المستويات الميكروسكوبية يتكون من تجمع جداول متذبذبة - فإن نظرية الأوتار تزودنا بإطار مفرد للتفسير قادر على احتواء كل القوى وكل المادة.

وعلى سبيل المثال، فإن نظرية الأوتار تدعى أن ما نشاهده من خواص الجسيمات - الموجزة في الجدولين رقمي (1-1)، و(1-2) هي مجرد انعكاس للطرق المختلفة التي يمكن أن يتذبذب بها الوتر. وتماماً مثل أوتار الكمان أو البيانو التي لها ترددات تتذبذب عندها فقط - أنساق تشعر بها آذاننا كنوتة موسيقية بإيقاعاتها - كذلك حال الأنشطة في نظرية الأوتار. غير أنها سترى، أنه بدلاً من إنتاج نوتة موسيقية، فإن كل نسق من ذبذبات الأوتار في نظرية الأوتار يظهر على شكل جسيمة تتعدد كتلتها وقوة شحنتها بواسطة نسق اهتزازات الوتر. والإلكترون وتر يتذبذب بطريقة واحدة، أما الكوارك الأعلى فهو وتر يتذبذب بطريقة أخرى، وهكذا. وبعيداً عن كونها مجموعة من الحقائق التجريبية المشوهة، فإن خواص الجسيمات في نظرية الأوتار ما هي إلا إظهار لسمة فيزيائية واحدة لا تتغير: الأنساق الرنينية للتذبذب - الموسيقى إذا صح التعبير - للأنشطة الأساسية للوتر. وتنطبق نفس الفكرة أيضاً على قوى الطبيعة. وسترى أن جسيمات القوى هي الأخرى تترافق مع أنساق محددة لاهتزازات وترية، وعليه فإن كل شيء، كل المادة وكل القوى، تتوحد تحت نفس العنوان: الاهتزازات الميكروسكوبية - النوتة التي يمكن أن تعزفها الأوتار.

ولأول مرة في تاريخ الفيزياء، أصبحنا نمتلك إطاراً له المقدرة على تفسير كل السمات الأساسية التي يقوم عليها بناء العالم. ولهذا السبب توصف نظرية الأوتار أحياناً بأنها قد تكون "نظرية كل شيء" (T.O.E. Theory of Everything)، أو "النظرية النهائية" "Ultimate"، أو "الأخيرة" "Final". وقد قصدت هذه المصطلحات الرنانة أن تظهر أكثر النظريات عمقاً في الفيزياء النظرية التي تصلح أساساً لكل النظريات الأخرى، وهي النظرية التي لا تتطلب ولا حتى تسمح بوجود تفسير أعمق. عملياً، يتخذ الكثير من العلماء النظريين في نظرية الأوتار موقفاً أكثر تواضعاً، ويفكرون في نظرية كل شيء "T.O.E." بشكل محدود كنظرية يمكن أن تفسر خواص الجسيمات الأساسية وخواص القوى التي تتدخل وتؤثر فيها هذه الجسيمات بعضها في البعض الآخر. ويستطيع أي اخترالي وفيي أن يزعم أن هذا الشكل ليس محدوداً، وأنه من ناحية المبدأ يمكن وصف كل شيء - من الانفجار الهائل Big Bang حتى أحلام اليقظة - بواسطة العمليات الفيزيائية الميكروسكوبية والمتضمنة للمكونات الأساسية للمادة. ويجادل الاصتراлиون مدعيين

أنك لو فهمت كل شيء عن المكونات فإنك ستفهم كل شيء.

وستستطيع فلسفة الاختزاليين أن تثير حرارة الجدل بسهولة. ويجد الكثيرون أن من البلاهة والحمق الادعاء بأن عجائب الحياة والعالم ليست إلا مجرد انعكاسات لجسيمات ميكروسكوبية منها مكة في رقصات لا هدف لها، تقودها في ذلك قوانين الفيزياء. ترى هل الشعور بالفرح والحزن والملل هو في الحقيقة تفاعلات كيميائية في الدماغ. تفاعلات بين الجزيئات والذرات وعلى مستوى أكثر ميكروسكوبية، تفاعلات بين بعض الجسيمات الواردة في الجدول رقم (1-1)، والتي هي في الحقيقة مجرد أوتار تذبذب؟ وكيف فعل على هذا الاتجاه النقطي حذر ستيفن وينبرغ في "أحلام النظرية الأخيرة" قائلاً:

"وفي نهاية الطرف الآخر يوجد المعادون للاختزالية والمنزعجون لما يشعرون به تجاه التجريد في العلوم الحديثة. ولأي مدى يمكن أن يُختزلوا هم وعالموهم إلى مادة من الجسيمات أو المجالات وتفاعلاتها، وقد شعروا بالتقزيم نتيجة لهذه المعرفة.... ولن أرد على هذا النقد بحديث منمق عن أوجه الجمال في العلوم الحديثة. ورؤيه الاختزاليين للعالم باردة وعامة. علينا أن نقبلها كما هي، ليس لأننا معجبون بها، ولكن لأنه هكذا يعمل العالم"⁽⁴⁾.

يتافق البعض مع هذا الرأي المتصلب، والبعض يختلف.

وقد حاول البعض الآخر أن يجادل حول كون التطورات، مثل نظرية العشوائية (Chaos Theory)، تبين أن أنواعاً جديدة من القوانين تدخل اللعبة عندما يزداد مستوى تعقيد النظام. وإذا كان إدراك سلوك الإلكترون أو الكوارك يمثل شيئاً ما، فإن استخدام هذه المعرفة لفهم سلوك الإعصار شيء آخر تماماً. ويتافق معظم الناس حول هذه النقطة. غير أن الآراء تباين حول ما إذا كانت الظواهر المتنوعة وغير المتوقعة غالباً التي قد تحدث في أنظمة أكثر تعقيداً من الجسيمات المنفردة - هي حقاً مبادئ جديدة فاعلة في الفيزياء، أو أن المبادئ المعنية مشتقة من مبادئ الفيزياء التي تحكم العدد الهائل من المكونات الأولية ومعتمدة عليها، وإن كان ذلك يحدث بطريقة معقدة للغاية. أما شعوري الخاص فهو أنها لا تمثل قوانين فيزيائية جديدة أو مستقلة. ومع أنه من الصعب أن نفسر خواص الإعصار انطلاقاً من فيزياء الإلكترونات والكواركات، إلا أنني أرى في ذلك مجرد مأزق حسابي وليس مؤشراً على الحاجة إلى قوانين فيزيائية جديدة. لكن مرة أخرى هنالك من لا يتفق مع هذه الرؤية.

Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Panthon, 1992), p. 52.

(4) انظر:

وما لا مجال إطلاقاً للتساؤل بصدره، وما هو في الدرجة الأولى من الأهمية للمرحلة الموصوفة في وصف رحلتنا هذا الكتاب، حتى إذا تقبل المرء المنطق القابل للنقاش للاختزاليين الأولياء، فإن المبادئ شيء، والتطبيق العملي شيء آخر تماماً. ويتفق الكل تقريباً حول فكرة أن نظرية كل شيء (T.O.E.) لا يمكن بأي حال أن تحل مشاكل علم النفس والبيولوجيا والجيولوجيا والكيمياء، بل وحتى الفيزياء، أو حتى أن تصنف هذه العلوم بشكل ما. والعالم مكان رائع الثراء ومعقد لدرجة أن اكتشاف النظرية النهاية بالشكل الذي وصفناه هنا لا يعني نهاية العلم، بل على العكس تماماً: فاكتشاف نظرية كل شيء (T.O.E.) - التفسير النهائي للعالم في أقصى مستوياته الميكروسكوبية، أو النظرية التي لا تقوم على أي تفسير أعمق - قد يزودنا بأصلب الأسس التي يمكن أن نبني عليها فهمنا للعالم. فاكتشافها قد يمثل البداية وليس النهاية. وقد تزودنا النظرية النهاية بدعامة لا تهتز من تماسك أبيدي يؤكد لنا أن العالم مكان مفهوماً

سادساً: حالة نظرية الأوتار

يمثل تفسير وظائف العالم تبعاً لنظرية الأوتار الاهتمام الرئيسي في هذا الكتاب، مع التأكيد المبدئي على الانعكاسات التي يُحدثها هذا التفسير لمفهومنا عن المكان والزمان. وعلى عكس عروض كثيرة أخرى للتطورات العلمية، فإن ما هو معروض هنا لا يمثل في حد ذاته نظرية مكتملة تماماً، تأكّدت باختبارات تجريبية قوية ومقبولة كلياً من مجتمع العلماء. والسبب وراء ذلك، كما سنعرض له في فصول تالية، هو أن نظرية الأوتار بناء نظري عميق ورفع المستوى، وحتى في ضوء التقدم المؤثر الذي تم خلال العقودين الأخيرين، ما زال هناك الكثير قبل أن ندعى أننا قد توصلنا إلى السيطرة الكاملة عليه.

بناء على ذلك، فإن نظرية الأوتار تمثل عملاً ما زال في مرحلة التطور، وأن ما تم جزئياً منه قد أظهر بالفعل أموراً مدهشة في طبيعة المكان والزمان والمادة. والنجاح الأعظم هنا هو التوافق بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. والأكثر من ذلك، وبخلاف أية نظرية سابقة، فإن نظرية الأوتار تملك المقدرة على الإجابة عن الأسئلة الأولية المتعلقة بأهم مكونات الطبيعة الأساسية والقوى. وللروعه المتميزة لكل من الإجابات والإطار الذي تقتربه نظرية الأوتار لتلك الإجابات نفس الدرجة من الأهمية، مع أن ذلك يصعب شرحه. فمثلاً، لقد وُجد أن هناك في نظرية الأوتار الكثير من سمات الطبيعة التي قد تبدو تفاصيل تقنية اعتباطية - مثل عدد المكونات الأساسية المتميزة للجسيمات وخصائص كل منها - إنما

نشأت من مظاهر جوهرية وملمودة في هندسة الكون. وإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن النسيج الميكروسكوبى لعالمنا عبارة عن متاهة متعددة الأبعاد مجدةلة بزيارة، تتذبذب وتلتوي داخلها أوتار العالم بشكل لا نهائى، وفي إيقاع متاغم يلفظ قوانين الكون. وبعيداً عن كونها تفاصيل اعتباطية، فإن خواص قوالب بناء الطبيعة الأساسية تتشابك بعمق مع نسيج المكان والزمان.

وفي النهاية، لا يمكن أن يحل شيء محل التنبؤات المحددة القابلة للاختبار والتي يمكن أن تحدد ما إذا كانت نظرية الأوتار قد أزالت بصدق قناع الغموض الذي يخفي أعمق الحقائق عن عالمنا أم لا. وقد يمضي بعض الوقت قبل أن يبلغ مستوى فهمنا أعمقاً كافية للوصول إلى هذا الغرض، مع أن الاختبارات التجريبية يمكن أن ترودنا بدعم ظرفي لنظرية الأوتار خلال ما يقرب من عشر سنوات - كما ستناقش ذلك في الفصل التاسع . والأكثر من ذلك فإننا سنرى في الفصل الثالث عشر أن نظرية الأوتار قد قامت حديثاً بحل معضلة مركزية تتعلق بالثقوب السوداء، وهي معضلة مرتبطة بأنتروربية بيكينشتاين-هوكنغ (Bekenstein-Hawking)، التي استعانت بعناد على الحل بالطرق التقليدية لأكثر من خمس وعشرين سنة. وقد أقنع هذا النجاح الكثيرين بأن نظرية الأوتار في طريقها لمنحنا فهماً أعمق للكيفية التي يعمل بها الكون.

ويوجز إدوارد ويتن - أحد الرواد والخبراء المتميزين في نظرية الأوتار - الوضع بقوله "نظرية الأوتار جزء من فيزياء القرن الواحد والعشرين، سقطت صدفة في القرن العشرين" ، وهو تقويم أوضحه أول مرة الفيزيائي الإيطالي المرموق دانيال آماتي. وبشكل ما، فإن الأمر يبدو كما لو أنها أعطينا أسلافنا من القرن التاسع عشر حاسباً فائقاً من النوع الحديث من دون أن نعطيهم تعليمات التشغيل. وعن طريق التجربة والخطأ الإبداعي، فإنهم قد يتوصلون إلى تلميحات عن قدرة الحاسوب الفائق، لكن ذلك سيتطلب جهوداً عنيفة ومطولة لاكتساب المقدرة على تشغيله. وهذه التلميحات عن إمكانات الحاسوب تشبه نظرتنا الخاطئة للمقدرة التفسيرية لنظرية الأوتار، التي كان من الممكن أن تقدم حافزاً في غاية القوة للحصول على الإمكانيات الكاملة. وينشط حافز مماثل اليوم جيلاً من علماء الفيزياء النظريين في ملاحقة الفهم التحليلي الشامل والدقيق لنظرية الأوتار.

وتشير ملاحظات ويتن وأخرين من الخبراء في نفس المجال أنه قد تمضي عقود، بل ربما قرون، قبل أن تصبح نظرية الأوتار نظرية تامة ومفهومة. قد يكون ذلك صحيحاً. وفي الحقيقة، فإن رياضيات نظرية الأوتار معقدة لدرجة أن لا أحد اليوم يعلم المعادلات الدقيقة للنظرية. وفي المقابل، فإن علماء الفيزياء يعرفون

هذه المعادلات بالتقريب، وحتى تلك المعادلات المقرئية معقدة لدرجة أنها لم تحل إلا جزئياً حتى الآن. ومع ذلك، فإن مجموعة مشجعة من الإنجازات المفاجئة التي حدثت في النصف الثاني من تسعينيات القرن العشرين - الإنجازات التي أجبت عن أسئلة نظرية على درجة تفوق التصور من الصعوبة حتى الآن - قد تشير في الحقيقة إلى أن الفهم الكمي الشامل لنظرية الأوتار أقرب كثيراً مما كان يعتقد في السابق. ويقوم الفيزيائيون من جميع أنحاء العالم بتطوير تقنيات قوية جديدة للتغلب على طرق التقرير المتعددة المستخدمة حتى الآن. وهم يجمعون معاً العناصر المتباعدة في لغز نظرية الأوتار بمعدل متسارع⁽⁵⁾.

ومن المدهش أن هذه التطورات تقدم لنا فرصةً جديدة لإعادة تفسير بعض الأوجه الأساسية للنظرية المعروفة لبعض الوقت. فمثلاً من الطبيعي عندما ننظر إلى الشكل رقم (1-1) أن يُثار لدينا سؤال: لماذا الأوتار؟ ولماذا ليست أطباقي الهواء الصغيرة (Frisbee Disks)؟ أو كتل صلبة على شكل نقاط ميكروسكوبية؟ أو باقة من كل هذه الاحتمالات؟ وكما سنرى في الفصل الثاني عشر، فإن أحد هذه الأفكار تبين أن كل هذه الأنواع الأخرى من المكونات لها دور هام في نظرية الأوتار، وأن نظرية الأوتار هي في الواقع جزء من شيءٍ تخليقيٍّ أعظم يُسمى حالياً (وبغموض) نظرية- M. وستكون هذه التطورات الأخيرة موضوع الفصول الأخيرة في هذا الكتاب.

ويحدث التقدم في العلوم على شكل نوبات صعود وهبوط. فتمتليء بعض النوبات بإنجازات مفاجئة هائلة، بينما في أوقات أخرى يعاني الباحثون من ندرة الإنجازات. ويعرض العلماء نتائجهم النظرية والتجريبية، وتعرضن هذه النتائج لمجادلات داخل المجتمع، فأحياناً تستبعد وأحياناً أخرى تخضع للتعديل، وفي بعض الأحيان توحى بآراء ملهمة بارزة لوسائل جديدة أكثر دقة في فهم العالم الفيزيائي. وبمعنى آخر، فإن العلم يتقدم في مسار متعرج تجاه ما نعتقد أنه سيكون الحقائق النهائية، وهو المسار الذي بدأ مع المحاولات المبكرة للبشرية في معرفة الكون ولا نستطيع التنبؤ بنهائيته. ولا نعلم ما إذا كانت نظرية الأوتار هي نقطة بالصدفة على هذا المسار أو أنها نقطة تحول أو أنها في الحقيقة نهاية المطاف. لكن المئات من علماء الفيزياء والرياضيات الذين كرسوا حياتهم للعلم من دول عديدة قد أعطونا أملاً مبنياً على أساس سليم في أننا على الأرجح نسير على الطريق الصحيح والنهائي.

(5) مقابلة مع إدوارد ويتزن في 11 أيار / مايو 1998.

إنه ميثاق ذو دلالة على الشراء في طبيعة نظرية الأوتار ومداها البعيد، الذي حتى في مستوى فهمنا الحالي لها قد سمح لنا باكتساب بصيرة جديدة مذهلة في الحالة التي عليها العالم، وهو بمثابة الخيط الرئيسي في ما سيأتي من تطورات تدفع للأمام بشورة مفاهيمنا عن المكان والزمان، التي فجرها آينشتاين في نظرتي النسبية الخاصة والعامة. وسنرى أنه لو كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن نسيج عالمنا له من الخصائص ما كان سيبهر حتى آينشتاين نفسه.

القسم الثاني

مأزق المكان والزمان والكم

الفصل الثاني

المكان والزمان وعين الراصد

في العام 1905 قدم آينشتاين ذو الستة والعشرين ربيعاً، مقالة علمية لتنشر في مجلات الفيزياء (Annals of Physics)، وضع يده فيها على التناقض الخاص بالضوء الذي كان يزعجه منذ بات مراهقاً قبل حوالي عشر سنوات. وعندما وصل محرر المجلة ماكس بلانك إلى الصفحة الأخيرة في هذه المقالة أدرك أنه قد حدث انقلاب على النظام العلمي المتفق عليه، وهكذا وبدون طنطنة أو شنثنة تمكّن موظف في مكتب براءات الاختراع في برن بسويسرا من قلب المفاهيم التقليدية عن المكان والزمان رأساً على عقب، وقدم بدلاً منها مفهوماً له خواص تتعارض مع كل شيء كان مألوفاً لنا من خبرتنا العامة.

كان ذلك هو التناقض الذي أزعج آينشتاين على مدى عقد من الزمان. وفي منتصف القرن التاسع عشر نجح الفيزيائي الاسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل في توحيد الكهرباء والمغناطيسية في إطار المجال الكهرومغناطيسي، وذلك بعد دراسة مستفيضة للتجارب العلمية التي أنجزها الفيزيائي الإنكليزي ميخائيل فاراداي. وإذا كنت يوماً ما على قمة جبل قبل عاصفة رعدية مباشرةً أو وقفت بالقرب من مولد فان دي غراف (Van de Graaf) فسيتولد لديك شعور عميق بما يعنيه المجال الكهرومغناطيسي، لأنك بالفعل قد شعرت به. أما إذا لم تكن هناك، فإن الأمر يشبه إلى حد ما تيار من خطوط القوى الكهربائية والمغناطيسية يتخلل المنطقة من الفراغ الذي تعبّر فيه. فمثلاً، إذا بذرت برادة الحديد بالقرب من مغناطيس، فإن النسق المنظم الذي تكونه يشكل مساراً لبعض خطوط القوى المغناطيسية غير المرئية. وعندما تخلع سترة من الصوف في يوم جاف بالذات وتسمع طقطقة أو ربما تشعر بصدمة لحظية أو صدمتين، فإن ذلك دليل وجود خطوط القوى الكهربائية التي تتولد عن الشحنات الكهربائية المنتقلة من خيوط السترة. وما هو أكثر من اتحاد هاتين الظاهرتين وظواهر أخرى كهربائية ومغناطيسية في إطار رياضي واحد، فإن نظرية ماكسويل قد بنت - ويشكل غير متوقع تماماً - أن الاضطرابات

الكهرومغناطيسية تنتقل بسرعة ثابتة لا تتغير أبداً، وهي السرعة التي اتضح أنها متساوية لسرعة الضوء. ومن هذه النتائج تتحقق ماكسويل من أن الضوء المرئي نفسه ليس إلا نوعاً معيناً من الموجات الكهرمغناطيسية، وهي الموجات التي أدركنا الآن أنها تتدخل مع كيماويات شيكية العين لتعطي الشعور بحاسة الإبصار. وقد أظهرت نظرية ماكسويل، بشكل حاسم، أن الموجات الكهرمغناطيسية (ومنها الضوء المرئي) ما هي إلا مثال على مسافر من المشائين لا يتوقف أبداً، ولا يبطئ من خطوته. فالضوء دائماً يتنقل بسرعة الضوء.

كل هذا أمر جيد إلى أن نبدأ في التساؤل، كما فعل آينشتاين في سن السادسة عشرة. ما الذي يحدث لو تعقبنا شعاعاً من الضوء، بسرعة الضوء؟ وينبأنا المنطق الحدسي الذي يعتمد على قوانين نيوتن للحركة بأننا سندرك موجات الضوء، وبذا فإنها ستبدو وكأنها ساكنة (بالنسبة لنا): أي سيثبت الضوء في مكانه. ولكن، وطبقنا لنظرية ماكسويل وجميع الملاحظات الموثوق بها، فإنه لا يوجد مثل هذا الأمر، أي لا يوجد ضوء ثابت، وببساطة لم يتمكن أحد حتى الآن من الإمساك بحزمة من الضوء في كفه. وهذه هي المعضلة. ولحسن الحظ فإن آينشتاين لم يكن يدرى أن كثيراً من علماء الفيزياء الرواد في العالم كانوا يقدرون ذهانهم حول هذه المشكلة (وكانوا في ذلك يسلكون مسارات كثيرة غير منطقية) ويفكرون ملياً في التناقض بين ماكسويل ونيوتون بخصوصية بدائية في أفكارهم الخاصة.

وسنناقش في هذا الفصل كيف تمكّن آينشتاين من حل هذا التناقض من خلال نظرية النسبية الخاصة، وهو بذلك يكون قد غير إلى الأبد من مفهومنا للمكان والزمان. وقد يكون مدهشاً أن الاهتمام الأساسي في النسبية الخاصة هو الفهم الدقيق للكيفية التي يبدو عليها العالم للأفراد، والذين غالباً ما يُسمون "الراصدين"، الذين يتقلّلون بعضهم بالنسبة لبعض. وقد يبدو ذلك لأول وهلة أنه مجرد تدريب فكري متواضع الأهمية. على العكس تماماً: على يد آينشتاين، وبتخليه للراصدين الذين يركضون وراء أشعة الضوء، فإن هناك تطبيقات مدوية لإدراك الكيفية التي تبدو عليها أكثر المواقف دنيوية بالنسبة للراصدين أثناء حركتهم النسبية.

أولاً: الحدس وعيوبه

تلقي خبرتنا العامة بالضوء على وسائل معينة تتبّع فيها ملاحظات مثل هؤلاء

الراصدين. فمثلاً تبدو الأشجار على جانبي طريق سريع وكأنها تتحرك من وجهاً نظر سائق سيارة، لكنها تبدو ساكنة بالنسبة لمن يقف على جانب الطريق يحاول إيقاف سيارة. وبالمثل، فإن اللوحة الموجودة أمام سائق السيارة تبدو له ساكنة غير متحركة (وهو ما نأمله!)، لكنها مثل باقي السيارة تبدو متحركة بالنسبة لمن يقف على جانب الطريق. ومثل هذه الخواص الأساسية والتلقائية للكيفية التي عليها العالم لا نلاحظها إلا بالكاد.

وتزعم النسبية الخاصة، رغم ذلك، أن الفروق في الملاحظات بين الاثنين (السائق والواقف إلى جانب الطريق) أكثر دقة وحدة. وتقدم النظرية إعلاناً غريباً يتضمن أن الراصدين للحركة النسبية سيكون لهما تقويم مختلف للمسافة وللزمان. ويعني ذلك، كما سنرى، أنه لو كانت هناك ساعتاً يد متماثلتان تماماً مع شخصين يتحركان أحدهما بالنسبة للأخر فإن دقات ساعتيهما ستختلف، وبالتالي فلن يتفقا على مقدار الزمن الذي يمضي بين حادثتين معينتين. وتبين النسبية الخاصة أن هذه المقوله لا تُشهّر بدقة الساعتين المعينتين هنا، لكنها مقوله حقيقية عن الزمن نفسه. وبالمثل، فإن الراصدين المتحركين بعضهم بالنسبة لبعض والذين يقيسون الزمن لن يحصلوا على نفس التبيّجة. ومرة أخرى، لا يرجع ذلك لعدم دقة وسيلة القياس أو خطأ في القياس. وتوّكّد أكثر أجهزة القياس دقة في العالم أن المكان والزمان لا يحسّهما كل إنسان بنفس القيمة، أي نفس المسافة أو الفترة الزمنية. وتحل النسبية الخاصة التعارض بين حسناً عن الحركة وخصوص الضوء، وذلك بالطريقة الدقيقة التي وضع بها آينشتاين الخطوط الأساسية للنسبية الخاصة. لكن لذلك ثمناً: فالأشخاص الذين يتحركون بعضهم البعض لن يتفقوا على المشاهدات الخاصة بكل منهم حول المكان أو الزمان.

لقد مر قرن تقريباً منذ أن أعلن آينشتاين على العالم اكتشافه الدرامي، ومع ذلك فإن معظمنا يرى المكان والزمان كأمر مطلق. لم ترسخ النسبية الخاصة في نفوسنا بعد، فنحن لا نشعر بها، ومضامينها لا تمثل جزءاً أساسياً في حسناً. والسبب في ذلك بسيط جداً. تعتمد تأثيرات النسبية الخاصة في السرعة التي يتحرك بها الإنسان، وبالنسبة لسرعات السيارات والطائرات وحتى سفن المكان فإن هذه التأثيرات ضئيلة. وهناك بالفعل فروق بين الإدراك الحسي للمكان والزمان عند الأفراد المستقررين على الأرض والمسافرين في سيارات وطائرات، لكن هذه الفروق من الضآلّة بحيث لا يمكن ملاحظتها. ومع ذلك، لو سافر أحد في رحلة مستقلّاً مركبة فضائية مستقبلية سرعتها تمثل جزءاً محسوساً من سرعة الضوء، فإن تأثير النسبية سيبدو واضحاً تماماً. وما زال هذا جزءاً من دنيا الخيال العلمي. وعلى

الرغم من ذلك، كما ستناقش في ما بعد، فإن التجارب الذهنية تسمح بمشاهدات واضحة ودقيقة للخواص النسبية للمكان والزمان التي تنبأت بها نظرية آينشتاين.

وللإدراك المقاييس المعنية هنا، لتخيل أننا في عام 1970، وقد ظهرت بعض السيارات الكبيرة والسريعة. أتفق سليم لتوه كل مدخلاته ليشتري سيارة جديدة من نوع ترانس آم، وقد اصطحب شقيقه جيم إلى المضماري المحلي لاختبار السيارة في سرعات غير مسموح بها من باائع السيارة. وبعد أن أدار المحرك مرق سليم بها على المضماري بسرعة 120 ميلاً في الساعة في ما كان جيم يسجل زمنه وهو يقف جانبًا. ولأن سليم كان يرغب في التأكد بشكل مستقل من الزمن الذي يستغرقه، استخدم ساعة إيقاف معه داخل السيارة. وقبل نشر أبحاث آينشتاين لم يكن أحد يتساءل ما إذا كانت ساعتاً إيقاف كل من سليم وجيم ستقيس نفس الزمن أم لا. ولكن طبقاً للنسبية الخاصة بينما ستسجل ساعة جيم الزمن 30 ثانية، ستسجل ساعة سليم زمناً مقداره 29.2999999999952 ثانية، أي أقل بمقدار ضئيل جداً. ويدعى أن هذا الفرق من الصغر بحيث لا يمكن أن يقاس إلا بأجهزة تتعدي بمراحل في دقتها ساعات الإيقاف اليدوية، وأنظمة تسجيل الوقت الأوليمبية، بل وحتى تتعدي أكثر الساعات الذرية الهندسية دقة. وليس غريباً أن خبرتنا اليومية لا تكشفحقيقة أن مرور الزمن يعتمد على حالة الحركة.

وسيحدث نفس عدم الاتفاق بالنسبة لقياس الأطوال. فعلى سبيل المثال، وفي تجربة أخرى يستخدم فيها جيم حيلة ذكية لقياس طول سيارة سليم الجديدة: يبدأ بتشغيل ساعة الإيقاف عندما تمر أمامه مقدمة سيارة سليم ثم يوقف تشغيل الساعة عند لحظة مرور مؤخرة السيارة. وحيث أن جيم يعلم أن سرعة سيارة سليم 120 ميلاً في الساعة، فهو بذلك يستطيع حساب طول السيارة، وذلك بضرب السرعة في الزمن المسجل بساعته. ومرة أخرى، وقبل آينشتاين، لم يكن أحد ليتساءل عما إذا كان طول السيارة المقىيس بطريقة جيم غير المباشرة سينطبق تماماً على طولها الذي قاسه سليم بعناية عندما كانت السيارة واقفة على أرضية المعرض: وعلى العكس، تقول النسبية الخاصة أنه إذا كان سليم وجيم يجريان قياساتهما بدقة، ووجد سليم أن سيارته طولها 16 قدماً بالضبط، فإن جيم سيجد أن طولها 15.999999999974 قدماً - أي بفارق ضئيل جداً. وكما سبق بالنسبة لقياس الزمن، فإن الفرق ضئيل جداً لدرجة أن أجهزة القياس العادية ليست على درجة من الدقة تسمح لها باكتشاف هذا الفرق.

ومع أن هذه الفروق في غاية الضاللة إلا أنها تظهر شرحاً في المفهوم الشائع عن ثبات وعالمية المكان والزمان. وكلما زادت السرعة النسبية للأفراد كما في

حالة سليم وجيم، فإن الشرخ يزداد وضوحاً. وللوصول إلى فروق ملحوظة، لا بد أن تصبح السرعات المعنية جزءاً لا بأس به من السرعة المحتملة القصوى - أي سرعة الضوء - التي أثبتت نظرية وقياسات ماكسويل أنها حوالى 186000 ميل في الثانية أو 670 مليون ميل في الساعة. وهذه السرعة من الكبر بحيث تلف كوكب الأرض أكثر من سبع مرات في الثانية الواحدة. وإذا كان سليم، على سبيل المثال، يقود سيارته بسرعة 580 مليون ميل في الساعة (أي 87٪ من سرعة الضوء) بدلاً من 120 ميلاً فقط، فإن رياضيات النسبية الخاصة تتنبأ بأن طول السيارة الذي سيقيسه جيم سيكون 8 أقدام فقط، وهو فرق كبير عما يقيسه سليم (وعن المواصفات المذكورة في كتاب السيارة). وبالمثل، فإن الزمن الذي يستغرقه سليم لقطع المضمار والمقياس بواسطة جيم سيكون تقريباً ضعف الزمن الذي سيسجله سليم لنفسه المضمار.

وحيث أن مثل هذه السرعات الهائلة تقع بعيداً خارج أي شيء يمكن التوصل إليه حالياً، فإن ظاهرة "تمدد الزمن" Time Dilation و "تلصل لورنتز Lorentz Contraction" - كما يطلق تقنياً على هاتين الظاهرتين - ضئيلة جداً في حياتنا اليومية. فإذا حدث وكنا في عالم تنتقل فيه الأشياء بسرعات تقارب سرعة الضوء، فإن خواص المكان والزمان بهذا الشكل ستتصبح حدسية تماماً - لأننا سنستشعرها بصورة دائمة بحيث لا يتطلب الأمر مناقشات أكثر من الحركة الظاهرة للأشجار على جانبي الطريق التي ذكرناها في مستهل هذا الفصل. وبما أننا لا نعيش في مثل هذا العالم، فإن هذه الخواص غير مألوفة لنا. وكما سنرى فإن إدراك وتقبل هذه الخواص يتطلب أن نعرض نظرتنا للعالم إلى تغيرات شاملة.

ثانياً: مبدأ النسبية

هناك بنية راسختان تشكلان أساس النسبية الخاصة. وكما ذكرنا سابقاً، فإن إحداهما هي خواص الضوء، وسنناقشه بشكل أكثر تفصيلاً لاحقاً. أما البنية الأخرى فهي أكثر تجريداً. وهي لا تتعلق بقانون فيزيائي محدد، وإنما تتعلق بكل قوانين الفيزياء وتعرف باسم "مبدأ النسبية Principle of Relativity". ويقوم مبدأ النسبية على حقيقة بسيطة: في أي وقت نناقش فيه السرعة (سرعة الجسم واتجاه حركته) لا بد أن نحدد بالضبط من أو ما الذي يقوم بالقياس. ومن السهل التوصل إلى إدراك معنى وأهمية هذه المقوله إذا فكرنا ملياً في الوضع الآتي: لتخيل جورج، وهو شخص يرتدي بدلة فضاء مزودة بضوء أحمر يضيء دورياً، وهو يسبح في فضاء مظلم خال تماماً ويعيد جداً عن أي كوكب أو نجم أو مجرات.

ومن منطلق جورج، فإنه ساكن تماماً في أعمق الظلام المنتظم من حوله في الفضاء. وعلى مسافة بعيدة تلتقط عين جورج ضوءاً أحضر يتوجه وينطفئ دوريًا ويبدو وكأنه يقترب أكثر وأكثر منه. وفي النهاية يقترب الضوء من جورج لدرجة أنه يميز فيه حالة فضاء أخرى لجواهle في الفضاء، تسبح ببطء واسمها غريس. تحيي غريس جورج، ويرد عليها التحية وهي تبتعد في الفضاء. ويمكن إعادة سرد هذه القصة من وجهة نظر غريسي بنفس الكلام ونفس درجة اليقين. وتبدأ القصة بغريس ساكنة في الفضاء الخارجي اللانهائي، وعن بعد تلمع غريس ضوءاً أحمر يتوجه وينطفئ ويبدو وكأنه يقترب أكثر وأكثر منها. وفي النهاية يصبح قريباً منها للدرجة التي تميز فيها غريس أن هذا الضوء لبدلة فضاء شخص آخر - جورج الذي يسبح ببطء، وتحييها جورج وترد عليه غريس التحية ثم تبتعد في الفضاء.

وتتصف القستان نفس الموقف من وجهتي نظر متباينتين لكنهما صادقتان. بكل واحد منها يشعر أنه ساكن ويرى أن الآخر هو الذي يتحرك. ويمكن تفهم وجهة نظر كل منها ومبرراتها. وحيث أن هناك تماثلاً بين رائدي الفضاء، فإننا لا يمكن أن نقول - وعلى أساس سليمة - أن أحدهما على "صواب" والآخر على "خطأ". وكل وجهة نظر صحيحة بنفس الدرجة.

ويصور هذا المثال معنى مبدأ النسبية: مفهوم الحركة نسبي. ولا يمكن أن نتكلّم على حركة جسم إلا بالنسبة لجسم آخر أو مقارنته به. وبذا لا معنى لعبارة "يتنقل جورج بسرعة 10 أميال في الساعة"، حيث أنها لم تحدد أي جسم آخر للمقارنة. لكن هناك معنى للعبارة "يتنقل جورج بسرعة 10 أميال في الساعة ماريا بغريس" لأننا قد حددنا بذلك غريس كنقطة مرجعية للقياس. وكما يتضح من هذا المثال، فإن العبارة الأخيرة مكافأة تماماً لعبارة "يتنقل غريس بسرعة 10 أميال في الساعة مارة بجورج (في الاتجاه العكسي)". وبمعنى آخر، لا يوجد مفهوم "مطلق" للحركة. فالحركة نسبية.

وجوهر هذه القصة هو أنه لا جورج ولا غريس قد دفعتهما أو شدتهما أو أثرت فيهما أية قوى أو وقعا تحت تأثير أي عامل آخر قد يؤثر في حالة الحركة الريتيبة الحرة ذات السرعة الثابتة لهما. ولذا، وبعبارة أكثر دقة، فإن السرعة الحرة التي لا تؤثر فيهما قوى خارجية (Force-Free) ليس لها معنى إلا إذا قورنت بأجسام أخرى. وهذا توضيح هام لأنه إذا تدخلت القوى فستتسبب في تغيير سرعة الراصددين - أي تغير من سرعتهم و/أو اتجاه حركتهم - ويمكن الإحساس بهذا التغيير. فمثلاً، إذا كان جورج يضع على ظهره صاروخاً يدفعه فإنه قطعاً سيشعر أنه يتحرك. وهو شعور داخلي. فإذا كان الصاروخ يعمل فإن جورج سيدرك أنه

يتحرك حتى لو كانت عيناه مغلتين ولذلك لا يستطيع إجراء مقارنة بأجسام أخرى. وبدون مثل هذه المقارنات، فإنه لا يمكن أن يدعى أنه ساكن بينما "يتحرك العالم من حوله". والحركة ذات السرعة الثابتة شيءٌ نسبيٌّ، والأمر ليس كذلك بالنسبة للحركة غير ثابتة السرعة، أو بنفس المعنى الحركة المتتسارعة. (وسيفيد اختبار هذه المقوله في الفصل القادم عندما نتناول الحركة المتتسارعة ونناقش نظرية النسبية العامة لآينشتاين).

عندما نضع هذه القصص في ظلمة الفراغ الخاوي فإن ذلك يساعد في الفهم، وذلك بإزالة الأشياء المألوفة مثل الشوارع والمباني والتي تُنسب لها بحكم العادة - من دون وجه حق - صفة خاصة هي أنها "ثابتة". ومع ذلك ينطبق نفس المبدأ على الأوضاع الأرضية، الأمر الذي في الحقيقة نمارسه بشكل شائع⁽¹⁾. فمثلاً، تخيل أنك بعد أن استغرقت في النوم في قطار، استيقظت بالضبط لحظة مرور قطارك بجوار قطار آخر على طريق مواز. وحيث أن القطار الآخر سيحجب عنك تماماً المنظر من النافذة، وبذلك سيمعن رؤيتك لأي جسم آخر، فإنك مؤقتاً لن تدرك ما إذا كان قطارك هو الذي يتحرك أم القطار الآخر أو كلاهما. وطبعاً لو كان قطارك يهتز أو يتدرج أو كان يغير من اتجاهه بالدوران حول أحد المنحنيات فستشعر أنك تتحرك. لكن إذا كان القطار يتحرك ببنوعة تامة - وتظل سرعته ثابتة - فإنك ستشعر بالحركة النسبية بين القطارات من دون أن تتمكن من معرفة أيهما هو الذي يتحرك.

ولنذهب خطوة أبعد من ذلك. تخيل نفسك في مثل هذا القطار، وأنك أغفلت ستائر النوافذ تماماً. فإذا افترضنا أن سرعة القطار ثابتة تماماً، وأنك لا تملك القدرة على رؤية أي شيء خارج عربة القطار، فإنه لا توجد وسيلة تتعرف بها على حالة الحركة. وسيبدو منظر العربة حولك هو نفسه من دون أي تغير تماماً سواء كان القطار ساكناً في محله أو يتحرك بسرعة عالية. وقد صاغ آينشتاين هذه الفكرة، التي ترجع أصولها في الواقع إلى أفكار غاليليو، وهو يزعم أنه من المستحيل لك أو لأي شخص آخر مسافر بالقطار أن يقوم بتجربة داخل عربة قطار مغلقة بحيث يحدد ما إذا كان القطار يتحرك أم لا. ويصور ذلك مرة أخرى مبدأ النسبية: حيث أن كل التحركات الحرة التي لا تخضع لتأثير قوى خارجية ليس لها معنى إلا إذا قورنت بأشياء أو أفراد آخرين يتحركون كذلك حرفة حرفة من دون

(1) وجود أجسام ذات كتلة مثل الأرض يزيد تعقد الموضوعات باقحام قوى الجاذبية. وحيث أنها نظرية الان على الحركة في الاتجاه الأفقي - وليس الرأسى - فسنحمل وجود الأرض. وفي الفصل القادم سنقوم بمناقشة مستفيضة للجادبية.

الخضوع لتأثير قوى خارجية. ولا توجد وسيلة تمكنك من تحديد أي شيء عن حالة الحركة التي أنت عليها من دون القيام بمقارنة مباشرة أو بصورة غير مباشرة مع جسم آخر "خارجي" ، وببساطة، لا يوجد مفهوم عن الحركة ذات السرعة الثابتة "المطلقة" ؛ والمقارنات فقط هي التي لها معنى فيزيائي.

وقد أيدن آينشتاين في الواقع أن مبدأ النسبية يقول ما هو أكثر من ذلك: كل قوانين الفيزياء - مهما كانت - لابد أن تكون واحدة مطلقاً بالنسبة لكل الراصدين إذا كانوا في حركة ثابتة السرعة. فإذا كان جورج وغريس لا يسبحان منفردين في الفضاء، لكنهما كانا يقومان بنفس مجموعة التجارب في محظتهما الفضائيتين اللتين تسبحان في الفضاء، فإن النتائج التي سيحصلان عليها ستكون متطابقة. ومرة أخرى، فإن كلاً منهما سيعتقد عن قناعة أن محظته ساكنة، على الرغم من أن المحظتين في حركة نسبية. فإذا كانت كل أجهزتهما واحدة، فلا يوجد ما يميز وضع الأجهزة بعضها من بعض، فإنهما متماثلان تماماً. وبينما على ذلك فإن قوانين الفيزياء التي سيستنتجها كل منهما من هذه التجارب ستكون واحدة. ولن يشعرا هما أو تجاربهم - التي تعتمد عليهم عموماً - بأنهما يتحركان بسرعة ثابتة. إنه هذا المفهوم البسيط الذي يجعل مثل هذين الراصدين متماثلين تماماً، إنه هذا المفهوم الذي يقع في صلب مبدأ النسبية. وسنستخدم هذا المبدأ حالاً بشكل مكثف.

ثالثاً: سرعة الضوء

لابد أن يتناول المكون الأساسي الثاني في النسبية الخاصة الضوء وخصائص حركته. وعلى عكس ما نزعمه بأنه لا معنى لمقوله "يتنقل جورج بسرعة 10 أميال في الساعة" من دون تحديد نقطة مرجعية للمقارنة، فإن جهود مجموعات من الفيزيائيين التجاربيين المتتابعة على مدى ما يقرب من قرن من الزمان قد بينت أن كل الراصدين سيتفقون على أن الضوء ينتقل بسرعة 670 مليون ميل في الساعة "من دون تحديد نقطة مرجعية للمقارنة".

وقد أحدثت هذه الحقيقة ثورة في نظرتنا للعالم. ولنببدأ أولاً في إدراك ما تعنيه هذه الحقيقة، وذلك بمقارنتها بمقولات مماثلة في حالة أجسام أخرى أكثر شيوعاً. تخيل أنك كنت في الخارج في يوم رائع مشمس مع صديقة لك تمارسان إحدى اللعبات. وكتنما تقاذفان بينكمما الكرة بسرعة 20 قدمًا في الثانية مثلاً. وفجأة ضربت صاعقة كهربية فوق رأسيكما، الأمر الذي دفعكما للركض بحثاً عن حماية. وبعد مرور العاصفة عدتما لاستئناف اللعبة، لكنك ستلاحظ حدوث بعض التغيير.

فقد أصبح شعر صديقتك نافراً في جميع الاتجاهات، وعيناها أصبحتا متعبيتين مضطربتين. وإذا نظرت إلى يديها فسيز عجل أن ترى أنها لا تلعب بكرة البيسبول مرة ثانية، ولكنها بدلاً من ذلك ستقدفك بقنبلة يدوية. ومن المفهوم أن حماسك للعب سيتضاءل بشدة، وستجري هارباً. لكن لأنك تجري، فإن السرعة التي تلاحقك بها هذه القنبلة ستكون أقل من 20 قدمًا في الثانية. ومن خبرتنا العامة، فإنه في الحقيقة إذا كنت تجري بسرعة تقترب من 12 قدمًا في الثانية، فإن سرعة اقتراب القنبلة اليدوية منك ستكون $(12 - 20) = 8$ أقدام في الثانية. وفي مثال آخر، إذا كنت على الجبال وبدأت كتلة من الجليد في الانهيار تجاهك، فإن فكرك سيتجه إلى الدوران والجري، لأن ذلك سيتسبب في خفض سرعة اقتراب كتلة الجليد منك - وهو أمر طيب عموماً. ومرة أخرى، فإن سرعة كتلة الجليد المنهارة بالنسبة لراصد ساكن لا يتحرك ستكون أكبر من سرعتها بالنسبة للشخص الذي يجري محاولاً الابتعاد عنها.

والآن لنقارن هذه المشاهدات الأساسية حول لعبة البيسبول والقابل اليدوية والانهيارات الجليدية مع مشاهدتنا حول الضوء. ولنجعل المقارنة أكثر إحكاماً، لنتخيل أن شعاع الضوء يتكون من "أكياس" أو "حزم" دقيقة تسمى فوتونات (صفة من صفات الضوء سنتناها بتفصيل أكبر في الفصل الرابع). وعندما نضيء كشافاً أو نرسل شعاعاً من الليزر، فإننا في الواقع نطلق تياراً من الفوتونات في اتجاه ضوء الكشاف أو شعاع الليزر. وكما فعلنا مع القنابل اليدوية والانهيارات الجليدية، فلتتخيل كيف تبدو حركة الفوتون لشخص ما أثناء حركته. ولتخيل أن صديقتك المضطربة قد استبدلت القنبلة اليدوية بشعاع قوي من الليزر. فإذا أطلقت هذا الشعاع تجاهك، وكان لديك أجهزة لقياس سرعة الفوتونات المقتربة منك مع هذا الشعاع، فستجد سرعتها 670 مليون ميل في الساعة. لكن ما الذي سيحدث إذا كنت تجري هارباً كما فعلت عندما لعبت معك بالقنبلة اليدوية؟ وما هي السرعة التي ستسجلها للفوتونات المتوجهة إليك؟ وحتى نفهم الأمر بصورة أفضل، تخيل أنك تركب سفينة الفضاء "إنتربرايز" وتفلت من صديقتك بسرعة 100 مليون ميل في الساعة مثلاً. وباتباع المنطق القائم على رؤية نيوتن التقليدية، وحيث أنك تبتعد، فإنه من المتوقع أن تسجل سرعة أبطأ للفوتونات المتوجهة نحوك. وعلى وجه التحديد فإنك ستتوقع أن تجد سرعة الفوتونات المقتربة منك (670 مليون ميل في الساعة - 100 مليون ميل في الساعة = 570 مليون ميل في الساعة).

وقد تمكنت أعداد هائلة من الأدلة التي حصل عليها العلماء من تجاربهم والتي يرجع تاريخها إلى العام 1880، كذلك التحليل الدقيق لتفسيرات نظرية

ماكسويل الكهرومغناطيسية عن الضوء، من إقناع المجتمع العلمي ببطء أن هذا في الواقع ما لا يحدث. وحتى لو كنت تتفهقر فإنك ستسجل سرعة للفوتونات المفتربة منك مساوية لـ 670 مليون ميل في الساعة وليس أقل من ذلك بأية قيمة مهما صغرت. ومع أن ذلك قد يبدو غريباً جداً لأول وهلة ومختلفاً عما حدث للشخص الذي يجري مبتعداً عن كرة البيسبول أو القنبلة اليدوية أو الكتلة الجليدية المنهارة، فإن سرعة الفوتونات المفتربة دائماً 670 مليون ميل في الساعة. ويحدث نفس الشيء إذا كنت تجري في اتجاه الفوتونات القادمة أو عكس اتجاهها. فسرعة اقترابها أو ابعادها ثابتة تماماً لا تغير؛ وستظل تنتقل بسرعة 670 مليون ميل في الساعة. وبغض النظر عن الحركة النسبية لمصدر الفوتونات والراصد فإن سرعة الضوء دائماً واحدة⁽²⁾.

ولا تسمح الإمكانيات التقنية المحدودة بإجراء مثل هذه التجارب التي وضعناها عن الضوء، غير أن تجارب المقارنة ممكنة. فمثلاً، اقترح عالم الفيزياء الهولندي ويليام دي سيتير سنة 1913 أنه يمكن استخدام زوج من النجوم يتحرك بسرعة (نجمان يدوران أحدهما حول الآخر) لقياس تأثير مصدر متحرك على سرعة الضوء. وقد أكدت التجارب المختلفة من هذا النوع خلال العقود الثمانية الماضية أن سرعة الضوء القادر من نجم متحرك هي نفسها سرعته من نجم ساكن - 670 مليون ميل في الساعة - في حدود دقة مذهلة لأجهزة قياس في غاية الدقة. والأكثر من ذلك، فإن عدداً كبيراً من تجارب تفصيلية أخرى أجريت خلال القرن الماضي - تجارب تقيس سرعة الضوء مباشرة في ظروف مختلفة، كما أنها تختبر العديد من النتائج التي تظهر عن هذه الخاصية للضوء - كما شرحنا ذلك حالاً - وقد أكد كل ذلك ثبات سرعة الضوء.

وإذا لم تستطع تقبل هذه الخاصية للضوء، فلست وحدك. وعلى منعطف القرن، حاول علماء الفيزياء جهدهم لتفنيد ذلك، لكنهم لم يتمكنوا. وعلى العكس، فإن آينشتاين احتضن فكرة ثبات سرعة الضوء، لأنه وجد في ذلك الإجابة عن المعضلة التي كانت تقلقه منذ أن كان مراهقاً. فمهما كانت السرعة التي تلاحق بها شعاع الضوء فإنه سيظل يتحرك متبعاً عنك بسرعة الضوء. ولن تستطيع أن تغير من السرعة الظاهرية لانتقال الضوء قيد أنملة عن 670 مليون ميل

(2) وسرعة الضوء في الفضاء الخاوي هي، بدقة أكثر، 670 مليون ميل في الساعة. وتتحفظ سرعة الضوء عندما ينتقل في مادة مثل الهواء أو الزجاج تقريباً كما في حالة سقوط حجر من أعلى جرف عندما يدخل مسطحاً مائياً. وهذا هو الباطل في سرعة الضوء بالنسبة لسرعته في الفراغ، وهو لا يؤخذ في اعتبارنا أثناء مناقشاتنا للنسبية، لذا فقد جرى إهماله خلال هذا الكتاب.

في الساعة، بل وأكثر من ذلك، فإنك لن تستطيع إبطاءه ليبدو ساكناً بالنسبة إليك. انتهت القضية. لكن الانتصار على التناقض لم يكن أمراً هيناً. فقد أيقن آينشتاين أن ثبات سرعة الضوءعني سقوط فيزياء نيوتن.

رابعاً: الحقيقة ونتائجها

السرعة مقياس للمسافة التي يقطعها جسم في زمن معين. فإذا كنا في سيارة تقطع 65 ميلاً في الساعة، فإن ذلك يعني طبعاً أنها نتقل 65 ميلاً إذا حافظنا على هذه السرعة لمدة ساعة. والسرعة بهذه الصياغة مفهوم دنيوي، ويمكن أن تعجب لم كل هذه الضجة التي أثارناها حول سرعة كرة البيسبول وكرات الجليد والفوتوتانات. ومع ذلك، دعنا نذكر بأن المسافة مفهوم يتعلق بالفضاء. وبالتحديد هي مقياس لمقدار ما هو موجود بين نقطتين. كما أن مفهوم "الأمد" أو "الدراوم" (Duration) يتعلق بالزمن - كم من الزمن يمضي بين حدثين. وبذلك فإن السرعة ترتبط بمفهومنا عن المكان والزمان ارتباطاً وثيقاً. وبمثل تلك الصياغة، فإن الحقائق التجريبية التي تتحدى مفهومنا العام عن السرعة، مثل ثبات سرعة الضوء، لها من الإمكانيات أن تتحدى مفاهيمنا العامة عن المكان والزمان نفسها. ولهذا السبب فإن الحقيقة الغربية عن سرعة الضوء تستحق تدقيقاً أكثر تفصيلاً - التدقيق الذي جاء به آينشتاين وأدى إلى نتائج مذهلة.

١ - التأثير في الزمن: الجزء الأول

يمكننا بأقل مجهد ممكن، وباستغلال ثبات سرعة الضوء، أن نبين أن المفهوم اليومي المألوف للزمن خطأ بلا جدال. تخيل أن زعيمي أمتين متحاربتين يجلسان على طرفين مأهولة المفاوضات الطويلة، وقد توصلتا لتوهما إلى اتفاق لوقف إطلاق النار، لكن لا يرغب أي منهما في أن يوقع قبل الآخر. ويأتي سكرتير عام الأمم المتحدة بفكرة قرار ذكي. سيوضع مصباح مطفأً على المنضدة في منتصف المسافة بين الرئيسين. وعند إضاءة المصباح فإن الضوء المشع منه سيصل إلى كل منهما في نفس الوقت حيث أن المسافة بين كل واحد منهما والمصباح متساوية. وقد وافق كل رئيس على التوقيع على نسخة من الاتفاق عند رؤيته للضوء. تم تنفيذ الخطة وتوقيع الاتفاق برضاء الطرفين.

حاول السكرتير العام أن يستخدم نفس الطريقة، بعد النجاح الذي أبهجه، في حالة أمتين آخرين متحاربتين، توصلتا إلى اتفاق سلام. لكن الفرق الوحيد هنا هو أن الرئيسين المعنيين في هذه المفاوضات يجلسان على طرفين منضدة داخل

قطار يسير بسرعة ثابتة. كان رئيس الدولة التي يسير إليها القطار يجلس في مواجهة اتجاه السير، بينما يجلس رئيس الدولة التي تقع خلف القطار مواجهًا الاتجاه العكسي. ولأن السكريتير العام على علم بحقيقة أن قوانين الفيزياء لها نفس الشكل من دون النظر إلى حركة الراصد، طالما أن حركته ثابتة، فإنه لم يعر هذا الفرق أي اهتمام، ويحضر المصباح الذي سيعطي إشارة البدء في احتفالية التوقيع كما حدث سابقاً. ويوقع الرئيسان الاتفاق ويحتفلان مع حاشيتهم من المستشارين بانتهاء العداوة.

وفي نفس اللحظة وصلت الأنباء بأن القتال نشب من جديد بين الناس من الجانبيين الذين كانوا يشاهدون مراسم التوقيع من على رصيف المحطة خارج القطار المتحرك. وقد انزعج كل من كان داخل قطار المفاوضات لسماعهم أن سبب تجدد العداوة هو ادعاء الناس من الدولة التي تقع أمام القطار بأنهم قد خدعوا حيث قام رئيسهم بالتوقيع على الاتفاق قبل رئيس الدولة التي تقع خلف القطار. وحيث أن كل من كان في القطار - من الجانبيين - يوافق تماماً على أن الاتفاق قد تم توقيعه في نفس اللحظة، فكيف يمكن للمشاهدين للمراسم من الخارج أن يظنو غير ذلك؟

ولنتدارس بتفاصيل أكثر رؤية أحد المشاهدين من على رصيف المحطة. في البداية كان المصباح مطفأ، ثم في لحظة معينة أضاء مرسلاً بأشعه الضوء في اتجاه كل من الرئيسين. ومن منظور شخص على رصيف المحطة، فإن رئيس الدولة الواقعة في اتجاه القطار يسافر عكس اتجاه الضوء، بينما يتقهقر رئيس الدولة الواقعة خلف القطار. ويعني ذلك، بالنسبة للمشاهد من على رصيف المحطة، أن شعاع الضوء سيقطع مسافة أقصر بالنسبة لرئيس الدولة الواقعة أمام القطار والذي يتحرك تجاه الضوء المقترب، مما بالنسبة لرئيس الدولة الواقعة خلف القطار، والذي يتحرك مبتعداً عن الضوء. وليست هذه مقوله عن "سرعة" الضوء عندما ينتقل في اتجاه الرئيسين - وقد أشرنا من قبل أنه مهما كانت حالة حركة المصدر أو المشاهد فإن سرعة الضوء تظل ثابتة دائماً. ولكننا نضيف هنا فقط كم سيقطع شعاع الضوء الذي انطلق في لحظة البداية ليصل إلى كل رئيس منهم، وذلك من وجهة نظر المشاهدين من على رصيف المحطة. وحيث أن هذه المسافة أقصر بالنسبة لرئيس الدولة التي تقع أمام القطار مما بالنسبة لرئيس الدولة التي تقع خلف القطار، وحيث أن سرعة الضوء في اتجاه كل منهما ثابتة، فإن الضوء سيصل لرئيس الدولة الواقعة أمام القطار أولاً. ولهذا السبب ادعى مواطنو هذه الدولة أنهم قد خدعوا.

وعندما أذاعت محطة CNN شهادة الحاضرين، فإن كلا من السكرتير العام والرئيسين وكل مستشاريهم لم يصدقوا ما سمعوه. فكلهم متفق أن المصباح كان موضوعاً بعناية في منتصف المائدة تماماً بين الرئيسين، ولهذا، وبدون أي لغط أو ضجة، فإن الضوء المشع قد قطع نفس المسافة ليصل إلى كل منهما. وحيث أن سرعة الضوء المشع في اتجاه اليمين أو اليسار متساوية فإنهم يعتقدون وبالفعل شاهدوا أن الضوء قد وصل إلى كلا من الرئيسين في نفس الوقت.

من الذي على صواب، الذين في داخل القطار أم الذين خارجه؟ فمشاهدات كل مجموعة والتفسيرات المؤدية لها معصومة من الخطأ. والجواب هنا أن "كلا الطرفين" على صواب. مثل جورج وغريسي السابعين في الفضاء، فكل منهما على صواب من وجهة نظره. والأمر المؤكد هنا أن الحقيقة من وجهة نظر كل منهما متناقضة. القضية السياسية محل التزاع هنا هي: هل وقع الرئيسان الاتفاقية في نفس اللحظة؟ وتؤدي بنا الملاحظات والأسباب المذكورة أعلاه بشكل لا يقاوم إلى النتيجة الآتية: بالنسبة لمن هم في القطار فإن الرئيسين وقعا في نفس اللحظة، بينما من وجهة نظر من هم على رصيف المحطة، لم يفعلَا ذلك. وبمعنى آخر فإن الأشياء المترادفة من وجهة نظر بعض المشاهدين ليست متزامنة من وجهة نظر آخرين، إذا كانت المجموعتان في حركة نسبية.

وهذه نتيجة فذة، وواحدة من أهم وأعمق ما تم اكتشافه حتى الآن من طبيعة الواقع. ومع ذلك، فإنك إذا لم تذكر من كل ما قرأته في هذا الفصل بعد أن تكون قد فرغت من الكتاب، إلا المحاولة الفاشلة للاتفاق، فإنك بذلك تكون قد احتفظت بروح اكتشاف آينشتاين. ويدون رياضيات متقدمة أو سلسلة من الأمور المنطقية المعقدة، فإن هذه الخاصية غير المتوقعة تماماً تتبع مباشرة من ثبات سرعة الضوء كما يصورها هذا السيناريو، وتتجدر ملاحظة أنه إذا كانت سرعة الضوء ليست ثابتة ولكن تسلك تبعاً للحدس القائم على الحركة البطيئة لكرة البيسبول أو الكرة الجليدية، فإن المشاهدين من على رصيف المحطة سيتفقون مع من هم في القطار. لكن سيظل المشاهد من على رصيف المحطة معتقداً أن الفوتونات تنتقل مسافة أبعد للوصول إلى رئيس الدولة الواقعة خلف القطار مما للوصول إلى رئيس الدولة الواقعة أمام القطار. غير أن الحدس العادي يعني أن الضوء الذي يقترب من رئيس الدولة الواقعة خلف القطار سيتحرك أسرع حيث أنه أخذ "دفعة" من القطار المتحرك إلى الأمام. وبالمثل فإن هؤلاء المشاهدين سيررون الضوء الذي يقترب من رئيس الدولة الواقعة أمام القطار يتحرك أبطأ لأنه "يُشدّ" إلى الخلف بواسطة حركة القطار. وعندما يأخذ المشاهدون هذه الظواهر الخاطئة

في اعتبارهم فإنهم سيرون أن أشعة الضوء ستصل لكلا الرئيسين في نفس الوقت. ومع ذلك فإن الضوء، في عالم الحقيقة، لا يسرع ولا يبطئ من حركته، ولا يمكن دفعه إلى سرعة أعلى أو شده إلى سرعة أقل. وبذلك فإن المشاهدين على رصيف المحطة سيدعون بصدق أن الضوء قد وصل إلى رئيس الدولة الواقعة أمام القطار أولاً.

ويتطلب ثبات سرعة الضوء أن نتخلى عن المفهوم القديم الذي يقول بأن التزامن (Simultaneity) مفهوم كوني، يتفق عليه كل واحد من دون النظر لحالة الحركة التي هو عليها. والساعة الكونية التي كنا نعتبرها تدق بلا كلل نفس الثاني هنا على الأرض وعلى المريخ وعلى المشتري وفي مجرة أندروميدا وفي كل ركن من أركان الكون، هذه الساعة ليست موجودة. وعلى العكس، فإن المشاهدين الموجودين في حركة نسبية لن يتقدمو على أن الأحداث تقع في نفس الزمن. ومرة أخرى، فإن السبب في أن هذه النتيجة - المميزة بصدق للعالم الذين نعيش فيه - ليست مألوفة أبداً، هو أن التأثيرات التي تحدثها متناهية الضآلة عندما تكون السرعات المعنية هي السرعات التي تعامل معها بشكل عام في حياتنا اليومية. ولو كان طول مائدة المفاوضات 100 قدم، وسرعة القطار 10 ميل في الساعة، فإن المشاهدين على رصيف المحطة "سيرون" أن الضوء قد وصل إلى رئيس الدولة الواقعة أمام القطار قبل الرئيس الآخر بمقدار جزء من مليون من مiliar من الثانية ($\frac{1}{1000000000000}$ من الثانية). ومع أن ذلك يمثل اختلافاً إلا أنه من الصالحة بحيث لا يمكن اكتشافه مباشرة بالحواس البشرية. فإذا كان القطار يتحرك بسرعة أكبر كثيراً، ولتكن 600 مليون ميل في الساعة، فإنه من وجهة نظر شخص على رصيف المحطة فإن الضوء سيستغرق زماناً أطول 20 مرة ليصل إلى رئيس الدولة الواقعة خلف القطار مقارنة بالزمن الذي يستغرقه هذا الضوء ليصل إلى رئيس الدولة الأخرى. وفي السرعات العالية فإن التأثيرات المذكورة للنسبة الخاصة تصبح أكثر وضوحاً.

2- التأثير في الزمن : الجزء الثاني

من الصعب إيجاد تعريف مجرد "للزمن" - وقد آلت كل المحاولات حتى الآن لتعريف الزمن إلى الاستدلال بكلمة "الزمن" نفسها، أو أدت إلى الدخول في متأهات لغوية لتجنب هذا التعريف. وبدلاً من سلوك هذا الطريق يمكن أن نلجأ إلى وجهة نظر براغماتية لنعرف الزمن بأنه الشيء الذي تقيسه الساعة. وسيحيل هذا الأمر مشكلة التعريف إلى الكلمة "الساعة"؛ وهنا يمكن أن

نفكر بشكل غير دقيق في أن الساعة هي الجهاز الذي تحدث به حركة دورانية تامة الانتظام، وتقيس الزمن بعد عدد الدورات التي تحدثها ساعتنا. وتختصر الساعات المألوفة مثل ساعات اليد لمثل هذا التعريف: فللاخيرة عقارب تتحرك في دورات منتظمة، وما نفعله في الواقع هو أننا نحسب الزمن المنصرم بعدد الدورات (أو كسورها) التي تحدثها العقارب بين أحداث مختارة.

ومن الطبيعي أن يتضمن معنى "دورات حركة تامة الانتظام" مفهوماً عن الزمن، حيث أن كلمة "منتظمة" تشير إلى فترات زمنية متساوية لكل دورة. ومن منطلق عملي، فإننا نتعامل مع هذا الأمر عبر بناء ساعات من مكونات فيزيائية بسيطة، تتوقع لها - على أساس متين - أن تقوم بحركات حلقة متكررة لا تتغير بأي شكل من الأشكال من حلقة إلى أخرى. وما ساعات أجدادنا ذات البندول الذي يتارجح يميناً ويساراً، وال ساعات الذرية التي تقوم على مبدأ تكرار العمليات الذرية إلا أمثلة بسيطة لذلك.

وهدفنا هو فهم كيف تؤثر الحركة في مرور الزمن. وحيث أنها قد عرفنا الزمن عملياً بمعلومية الساعات، فإننا يمكن أن نحوال سؤالنا إلى كيف تؤثر الحركة في دقات الساعة؟ ومن الأهمية أن نؤكد في البداية على أن نقاشنا لا يهتم بكيفية سلوك العناصر الميكانيكية لساعة معينة تجاه الاهتزاز والاصطدام اللذين يتتجان من الحركة المضطربة، لكننا سنهم في الواقع بأكثر أنواع الحركات بساطة وأكثرها هدوءاً - الحركة بسرعة ثابتة بشكل مطلق - ولذا لن يكون هناك أي اهتزاز أو اصطدام بتاتاً. وبالآخرى، سنهم بالسؤال الكوني عن كيفية تأثير الحركة في مرور الزمن، وكيف أنها بذلك تؤثر في دقات أي وكل الساعات بصرف النظر عن تصميم أو بناء معين.

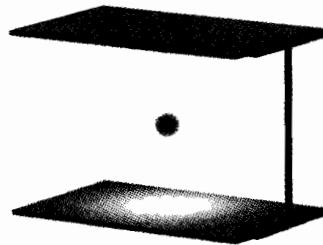
وسنعرض هنا لهذا الغرض أكثر الساعات بساطة من حيث المفهوم (غير أنها أكثرها بعداً عن كونها عملية). وتعرف هذه الساعة "بالساعة الضوئية"، وت تكون من مرتدين صغيرتين محمولتين على سنادة إحداهما في مواجهة الأخرى، وبينهما فوتون وحيد يتارجح جيئة وذهاباً⁽³⁾. فإذا كانت المرأتان على بعد ست بوصات فسيستغرق الفوتون حوالي جزء من مليار من الثانية ليكمل دورة كاملة (من الثانية). ويمكن أن نتخيل أن دقات الساعة الضوئية تحدث كل مرة يكمل فيها الفوتون دورته - وبذا فإن مليار دقة تعني مرور ثانية واحدة.

ويمكن استخدام الساعة الضوئية كساعة إيقاف لقياس الزمن المنصرم بين

(3) انظر الشكل رقم (2).

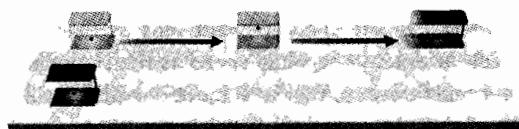
حاديين: وببساطة نقوم بعد الدقات التي حدثت خلال الفترة المعنية ونضربها في زمن كل دقة. فمثلاً، إذا كنا نسجل زمن سباق للخيل ونعد دورات الفوتوون بين بداية السباق ونهايته، وكانت 55 ملياراً، فيمكن القول إن السباق قد استغرق 55 ثانية.

الشكل رقم (1-2)



ت تكون الساعة الضوئية من مراتين متوازيتين يتراقص بينهما فوتون. و "تدق" الساعة كلما أكمل الفوتون دورة كاملة.

الشكل رقم (2-2)



ساعة ضوئية ساكنة في مقدمة الشكل بينما الساعة الضوئية الأخرى تنزلق بسرعة ثابتة.

والسبب وراء استخدام الساعة الضوئية في نقاشنا هو أن بساطتها الميكانيكية تتحي جانباً التفاصيل غير الجوهرية. وبذا فإنها تزودنا بما يكشف بأوضح ما يمكن كيفية تأثير الحركة في مرور الزمن. وحتى ندرك ذلك، لتخيل أننا نراقب في تراجع مرور الزمن وذلك بالنظر إلى ساعة ضوئية تدق فوق منضدة مرتبة. وفجأة تبدأ ساعة ضوئية أخرى في الانزلاق على المنضدة بسرعة ثابتة⁽⁴⁾. والسؤال المطروح هنا هو ما إذا كانت الساعة الضوئية المتحركة ستدق بنفس المعدل مثل الساعة الضوئية الساكنة؟

وللإجابة عن هذا السؤال، لأخذ في اعتبارنا المسار الذي يجب أن يتخذه الفوتون في الساعة المنزلقة - وذلك من منظورنا - ليحدث دقة واحدة. يبدأ

(4) انظر الشكل رقم (2-2).

الفوتون مساره عند قاعدة الساعة الضوئية المترجلة كما في الشكل رقم (2-2)، متوجهًا إلى المرأة العليا. وحيث أن الساعة تتحرك من منظورنا، فإن الفوتون لابد أن ينتقل بزاوية كما هو مبين في الشكل رقم (2-3). فإذا لم ينتقل الفوتون عبر هذا المسار فإنه سيخطى المرأة العليا ويضيع في الفراغ. وحيث أنه من حق الساعة المترجلة - الحق كل الحق - أن تدعى أنها ساكنة بينما كل شيء حولها يتحرك، فإننا نعرف أن الفوتون سيصطدم بالمرأة العليا، وبذا فإن المسار الذي رسمناه له صحيح. ينعكس الفوتون على المرأة العليا وينتقل مرة أخرى في مسار قطري ليصطدم بالمرأة السفلية لتدق الساعة المترجلة. وال نقطة البسيطة لكنها أساسية هي أن المسار القطري المزدوج الذي نرى الفوتون يقطعه أطول من المسار العمودي من أسفل وأعلى الذي يتخذ الفوتون في الساعة الساكنة. ويجب أن يقطع الفوتون في الساعة المترجلة مسافة في الاتجاه الأيمن بالإضافة إلى المسافة التي يقطعها من أسفل وأعلى، وذلك من منظورنا. والأكثر من ذلك فإن ثبات سرعة الضوء يثبتنا أن فوتونات الساعة المترجلة تنتقل بنفس سرعة فوتونات الساعة الساكنة. وحيث أن على فوتونات الساعة المترجلة أن تنتقل مسافة أبعد لإحداث دقة واحدة، فإن معدل دقاتها سيكون أقل. ويوضح هذا الجدل البسيط كيف أن الساعة الضوئية المتحركة، من منظورنا، تدق أبطأً من الساعة الضوئية الساكنة. وحيث أنها قد اتفقنا على أن عدد الدقات يعكس مباشرة كم مضى من الزمن، فإننا سنرى أن مرور الزمن قد صار أبطأً بالنسبة للساعة المتحركة.

الشكل رقم (3-2)



فوتون الساعة المترجلة ينتقل في مسار قطري من منظورنا .

وقد تتساءل عما إذا كان ذلك يعكس فقط بعض السمات الخاصة للساعات الضوئية ولا ينطبق على ساعات أجدادنا أو ساعات رولكس. وهل سيباطأ الزمن المقيس بهذه الساعات المألوفة كذلك؟ والإجابة هنا هي نعم مدوية، كما هو واضح من تطبيق مبدأ النسبية. لنضع ساعة رولكس على كل من الساعتين الضوئيتين، ونعيد إجراء التجارب السالفة مرة أخرى. وكما سبق أن ناقشنا فإن الساعة الضوئية الساكنة وساعة رولكس الموضوعة فوقها ستبيّنان انقضاء زمين

متماثلين بحيث تقابل كل مليار دقة من الساعة الضوئية ثانية واحدة في ساعة رولكس. لكن ما هو الحال بالنسبة للساعة الضوئية المتحركة وساعة رولكس الموضوعة فوقها؟ وهل سيتطابق معدل دقات ساعة رولكس لتتزامن مع الساعة الضوئية الموضوعة فوقها؟ حسناً، وحتى نقوى من اقتناعنا بهذه النقطة، فلتتخيل أن الساعة الضوئية وساعة رولكس المرتبطة بها تتحرّكان لأنهما مثبتتان في أرضية عربة قطار بلا نوافذ ينزلق على القضبان في خط مستقيم تماماً وبنعومة فائقة وسرعة ثابتة. ولا توجد وسيلة تبعاً لمبدأ النسبية يستطيع أن يتحقق بها أي راصد داخل القطار من أي تأثير لحركة هذا القطار. لكن إذا فقدت الساعاتان الضوئية ورولكس تزامنهما فسيكون لذلك تأثيراً ملحوظاً بالتأكيد. وهذا فإن الساعة الضوئية المتحركة وساعة رولكس المثبتة عليها لابد أن تسجلا نفس الفترة الزمنية، أي أن ساعة رولكس لابد أن تتطابق بنفس الشكل الذي تتطابق به الساعة الضوئية. وبدون النظر إلى النوع أو الماركة أو التركيبة، فإن الساعات التي تتحرّك بعضها بالنسبة لبعض تسجل مرور الزمن بمعدلات مختلفة.

كما أن المناقشات حول الساعة الضوئية توضح كذلك أن الفرق الدقيق في الزمن بين الساعة الساكنة وال ساعة المتحركة يعتمد على طول المسافة التي يجب أن يقطعها فوتون الساعة المترجلة ليكمل بها كل دورة. ويعتمد ذلك بدوره على سرعة حركة الساعة المترجلة - من وجهة نظر راصد ساكن، فكلما ازدادت سرعة انزلاق الساعة كلما بعدت المسافة التي يجب على الفوتون قطعها في اتجاه اليمين. ونستنتج من ذلك أن معدل دقات الساعة المترجلة بالنسبة للساعة الساكنة لابد أن يصبح أقل فأقل كلما تحرك أسرع فأسرع⁽⁵⁾.

(5) وللقارئ ذي الميول الرياضية، نسجل أن هذه المشاهدات يمكن أن تتحول إلى مقولات كمية. فمثلًا إذا كانت سرعة الساعة الضوئية المتحركة v ويستغرق الفوتون t ثانية لإتمام دورة واحدة كاملة (كما قيست بواسطة ساعتنا الضوئية الساكنة)، فتكون الساعة الضوئية قد قطعت مسافة قدرها vt عندما يعود الفوتون إلى المرأة السفل. ويمكن أن تستخدم نظرية فيثاغورس لحساب طول كل من المسار القطري في الشكل رقم (3-2) وهو حيث $h^2 = v^2 t^2 + (v t/2)^2$ المسافة بين المراتين في الساعة الضوئية (وهي 6 بوصات كما ورد في المتن). وبذلك يكون طول المسارين القطريين هو $\sqrt{v^2 t^2 + (v t/2)^2} = 2.2$. وحيث أن سرعة الضوء لها قيمة ثابتة ويرمز لها اصطلاحاً بـ c ، فإن الضوء سيستغرق $2\sqrt{(v t/2)^2 + h^2/c^2}$ ثانية ليكمل رحلة المسارين القطريين. وبناءً نحصل على المعادلة $c/t = 2\sqrt{(v t/2)^2 + h^2/c^2}$ والتي يمكن حلها بالنسبة لـ t لتعطي $t = \sqrt{c^2 - v^2}/2$ ولتجنب اللبس، لنكتب الآتي $t = 2h\sqrt{c^2 - v^2}/c$ (للتحرك)، حيث يشير الرمز السفلي إلى الزمن الذي يcas لحدوث دقة واحدة في الساعة المتحركة. ومن جهة أخرى، فإن زمن الدقة الواحدة في الساعة الساكنة هو $t = 2h/c$ ساكن. وكما يُبين الجبر البسيط، فإن $t = \sqrt{c^2 - v^2}/c$ (ساكن) وهو ما يدل مباشرة على أن دقة واحدة في الساعة المتحركة =

وللإحساس بالمقاييس المستخدم نلاحظ أن الفوتون يقطع دورة كاملة في حوالي جزء من مليار من الثانية. وحتى تتمكن الساعة من الانتقال مسافة معقولة في الزمن الذي تستغرقه دقة واحدة فلا بد وأن تنتقل بسرعة مذهلة - أي بكسر ملحوظ من سرعة الضوء. ولو كانت تنتقل بسرعة اعتيادية أكثر مثل عشرة أميال في الساعة، فإن المسافة التي ستقطعها في اتجاه اليمين في زمن دقة واحدة في غاية الضالة - حوالي 15 جزء من المليار من القدم فقط. وتصبح المسافة الرائدة التي يجب أن يقطعها الفوتون المترافق ضئيلة جداً، وبالتالي فإن تأثيرها في معدل دقات الساعة المتحركة سيكون هو الآخر ضئيلاً جداً. ومرة أخرى، وبناء على مبدأ النسبية، فإن هذا الأمر صحيح لكل الساعات - أو بمعنى آخر للزمن نفسه. وهذا هو السبب في أن الكائنات - مثلنا - التي تنتقل بعضها بالنسبة لبعض بمثل تلك السرعات البطيئة، لا تدرك التغيرات في مرور الزمن. فالتأثيرات جد ضئيلة على الرغم من تأكينا من وجودها. ومن جهة أخرى، إذا استطعنا أن نتعلق ممسكين بالساعة المنزلقة ونتحرك معها بسرعة تماثل ثلاثة أرباع سرعة الضوء مثلاً، فإنه يمكن استخدام معدلات النسبية الخاصة لتوضيح أن الراديين الساكنيين سيشاهدون ساعتنا المتحركة تدق بمعدل يساوي تقريرياً ثالثي معدل دقات ساعتهم، وهو بالتأكيد تأثير بين.

خامساً: الانشغال بالحياة

لقد رأينا أن ثبات سرعة الضوء يعني أن الساعة الضوئية المتحركة تدق أبطأ من الساعة الضوئية الساكنة. وبناء على مبدأ النسبية، فإن هذا الأمر ليس صحيحاً فقط في حالة الساعات الضوئية، ولكن صحيح كذلك لأية ساعة - ولابد أن يكون صحيحاً للزمن نفسه. ويمر الزمن أكثر ببطءاً لشخص يتحرك مما بالنسبة لشخص ساكن. فإذا كان المنطق البسيط الذي أوصلنا إلى هذا الاستنتاج سليماً، فهل يمكن لشخص أن يحيا لمدة أطول كونه متحركاً مما لو كان ساكناً؟ وفي النهاية، إذا كان الزمن يمر أكثر ببطءاً لشخص ما يتحرك مما بالنسبة لشخص ساكن، فإن هذا التباين يجب ألا ينطبق فقط على الزمن الذي تقيسه الساعات، ولكن كذلك بالنسبة للزمن الذي تقيسه ضربات القلب وتحلل أجزاء الجسم. هذا هو الحال كما تم التأكيد منه مباشرة - ليس في ما يتعلق بالعمر المتوقع للإنسان،

= تستغرق وقتاً أطول من الساعة الساكنة. ويعني ذلك أنه بين حدثنين مختارين فإن العدد الكلي للدقائق سيكون أقل في حالة الساعة المتحركة منه في الساعة الساكنة، مؤكداً أن وقتاً أقل قد انصرم بالنسبة للمشاهد المتحرك.

ولكن بالنسبة لجسيمات معينة من العالم الأصغر: الميونات (Muons). غير أن هناك نقطة هامة تحول دون أن ندعى أننا قد وقعنا على منع دائم للشباب.

عندما تجلس الميونات باسترخاء في المختبر، فإنها تتحلل في عملية قريبة الشبه بالتحلل الإشعاعي في زمن متوسط حوالي جزءين من مليون من الثانية ($\frac{2}{1000000}$ من الثانية). وهذا التفكك من الحقائق التجريبية المدعومة بكمية هائلة من الأدلة. ويبدو الأمر وكأن الميون يعيش حياته ببنديقة مصوبة إلى رأسه، وعندما يصل عمره إلى جزءين من المليون من الثانية يتضخم على الزناد ويتحول إلى أشلاء من الإلكترونات والنيوتريونات . أما إذا لم تكن هذه الميونات ساكنة في المختبر، بل متقللة خلال أحد الأجهزة المعروفة باسم مسرع الجسيمات الذي يدفعها إلى سرعات قريبة من سرعة الضوء، فإن متوسط عمرها المتوقع يزداد بشكل مذهل كما تم قياسه بواسطة العلماء في المختبر. وهو الأمر الذي يحدث "في الواقع". فعند سرعة تصل إلى 667 مليون ميل في الساعة (99,5% من سرعة الضوء) سنشاهد زيادة عمر الميون عشر مرات. وتفسير ذلك تبعاً للنسبية الخاصة هو أن "ساعات اليد" التي تحملها الميونات تدق أبطأ كثيراً من ساعات المختبر. وبعد زمن طويل من توقع ساعات المختبر للميونات أن يتضخم على الزناد وتتفجر فإن ساعات الميونات سريعة الحركة تعلن أن وقت النهاية لم يحن بعد. ويمثل ذلك استعراضاً مباشراً ودرامياً جداً لتأثير الحركة في مرور الزمن. فإذا أمكن أن يتحرك الناس بنفس سرعة الميونات فإن العمر المتوقع لهم سيزداد بنفس الدرجة. ويدلاً من أن يعشوا 70 سنة، فإنهم سيعيشون 700 سنة⁽⁶⁾.

والآن، لنضع يدنا على صلب الموضوع؛ فعلى الرغم من أن الراصدين في المختبر يرون أن الميونات سريعة الحركة تعيش أطول من أخواتها الساكنة، فإن هذا يرجع إلى بطيء سريان الزمن بالنسبة للميونات المتحركة. ولا ينطبق ببطء الزمن على الساعات الموجودة مع الميونات فقط، بل كذلك على كل الأنشطة التي تقوم

(6) في حالة ما إذا كنت تزيد اقتناعاً أكثر بتجربة أقل خصوصية من تجربة مسرع الجسيمات، إليك الآتي. في تشرين الأول/أكتوبر 1971 قام كل من ج.س. هافيل، الذي كان في جامعة واشنطن في سانت لويس، وريتشارد كينغ من مرصد البحرية للولايات المتحدة، بوضع ساعات ذرية ذات شاعع السبيزيوم على متن طائرات تجارية طارت بها حوالي 40 ساعة. وبعد أن أخذنا في اعتبارهما بعض السمات الدقيقة المتعلقة بتأثير الجاذبية (ستناقشها في الفصل التالي) وتزعم النسبية الخاصة أن الزمن الكلي المتصرم الذي تسجله الساعة الذرية المتحركة لا بد من أن يكون أقل من الزمن المنصرم والمسجل بساعة مماثلة ساكنة على الأرض ببضع مئات الأجزاء من المليار من الثانية. وهذا بالضبط ما وجده هافيل وكينغ: يباطأ الزمن بالفعل في الساعة المتحركة.

بها. فمثلاً، إذا كان الميون الساكن يتمكن من قراءة 100 كتاب خلال عمره القصير، فإن ابن عمه سريع الحركة سيتمكن هو الآخر من قراءة نفس المائة كتاب، لأنه على الرغم من حياته الأطول كما يبدو من حياة الميون الساكن، إلا أن معدل قراءته - وبالمثل كل شيء آخر في حياته - قد تباطأ كذلك. ومن منظور المختبر، يبدو الأمر وكأن الميون المتحرك يعيش حياته بالعرض البطيء. ومن هذا المنطلق فإن الميون المتحرك سيعيش أطول من الساكن، لكن "كمية الحياة" التي سيمارسها كل منهما متساوية تماماً. ويسري نفس الاستنتاج طبعاً على الأفراد سريعي الحركة ذوي العمر المتوقع البالغ عدة قرون. فمن منظورهم الحياة كما هي، لكن من منظورنا فإنهم يعيشون حياة بالعرض البطيء جداً، وعليه فإن دورة حياتهم العادية ستستغرق فترة هائلة من الزمن بمقاييسنا.

سادساً: وعلى أي حال، من الذي يتحرك؟

تمثل الحركة النسبية مفتاح فهم نظرية آينشتاين ومصدراً مرجحاً للاضطراب. ولعلك قد لاحظت أن المنظور المعكوس يبدل أدوار الميونات "المتحركة"، التي تجادلنا حول ساعاتها التي تسير ببطء، مع نظيراتها "الساكنة". وبالضبط كما في حالة جورج وغريس حيث لكل منهما نفس الحق في أن يعلن أنه هو الساكن والآخر هو المتحرك، فإن الميونات التي وضعناها كمتحركة لها الحق تماماً في أن تدعى، من منظورها، أنها لا تتحرك بينما الميونات "الساكنة" هي التي تتحرك في الاتجاه العكسي. ويمكن تطبيق نفس البراهين هنا بنفس الدرجة من اليقين انطلاقاً من هذا المنظور، الأمر الذي يؤدي إلى الاستنتاج العكسي ظاهرياً، أي أن الساعات المحمولة على الميونات التي أطلقنا عليها ساكنة تسير ببطء مقارنة بالساعات المحمولة على الميونات التي وصفناها بأنها متحركة.

وقد قابلنا موقفاً من قبل، وهو موقف احتفالية التوقيع في ضوء المصباح، حيث كانت هناك وجهتا نظر مختلفتان، الأمر الذي أدى إلى نتائج مضادة تماماً. وفي تلك الحالة كنا مجبرين من منطلق منطق النسبية الخاصة أن ننماز عن الفكرة الراسخة عند كل إنسان، وهي الاتفاق حول أن الأحداث تقع في نفس الوقت بصرف النظر عن حالة الحركة. ومع ذلك فإن التعارض الحالي يبدو هو الأسوأ. كيف يمكن أن يدعى راصدان أن ساعة الآخر هي الأبطأ؟ والأكثر غرابة هو أن منظور الميونات المختلف، والذي هو صادق بنفس الدرجة، يبدو أنه يؤدي بنا إلى استنتاج أن كل مجموعة سوف تدعى بشدة وبكل أسف أنها ستموت أولاً.

ونحن نعلم أن العالم يمكن أن يتصف بعض الصفات الغريبة غير المتوقعة، لكننا نأمل ألاً يعبر بنا ذلك إلى عالم من المنطق المنافي للعقل. وبذا ما الذي يحدث؟ بكل هذه التناقضات الظاهرة الناتجة عن النسبية الخاصة، وبالفحص الدقيق، فإن هذه المعضلات المنطقية تؤدي بنا إلى الكشف عن دخائل جديدة في عمل الكون. ولتجنب الاستغراب في التجسيد البشري أكثر من ذلك، لندع الميونات ونعود إلى جورج غرييس، اللذين يحملان الآن ساعتين رقميتين بالإضافة إلى الأضواء المتوجهة على بذلة الفضاء لكل منها. ومن منظور جورج فإنه هو الساكن بينما غريسي بأضوائهما الخضراء المتوجهة وساعتها الرقمية تبدو عن بعد مقتربة منه ثم تعبّر في ظلمات الفضاء الخاوي. ويلاحظ جورج أن ساعة غرييس أبطأ مقارنة بساعته (بمعدل بطيء يعتمد على سرعة مرورهما أحدهما بالآخر). ولو كان جورج لاماً أكثر لكان قد لاحظ كذلك أن كل شيء عند غرييس - بما في ذلك الطريقة التي حيثها عند مرورها والسرعة التي غمزت بها بعينيها، إلخ - يحدث بحركة بطيئة، هذا بالإضافة إلى بطيء مرور الزمن في ساعتها. ومن منظور غرييس فإن نفس المشاهدات تنطبق على حالة جورج.

ومع أن ذلك يبدو متناقضاً، دعنا نحاول أن نضع أيدينا على تجربة دقيقة يمكن أن تزيح جانباً المنطق المنافي للعقل. وأبسط الطرق لتنظيم الأمور هي أن نجعل كل من جورج وغرييس يضبط ساعته عند الثانية عشرة بالضبط في لحظة مرورهما أحدهما بالآخر. وعندما يتبعاً فلان كلاًًاً منها سيدعى أن ساعة الآخر أبطأ. ولمواجهة هذا النزاع بطريقة مباشرة، فإن جورج وغرييس لا بد أن يتلقيا مرة ثانية، ويقارنا مباشرة الزمن المنقضي بواسطة ساعتيهما لحظة اللقاء. لكن كيف يمكن أن يقوما بذلك؟ حسناً، فجورج لديه محرك نفاث يمكن استخدامه لللحاق بغرييس من منظوره. لكنه إن فعل ذلك فإن التمايز بين منظوريهما والمتسبب في التناقض الظاهر سينكسر، حيث أن جورج سيخضع لحركة متتسعة وليس حرمة. وعندما يتلقيان بهذا الشكل فإن الوقت الذي سيمضي على ساعة جورج سيكون الأقل حتمياً، لأنه يمكن أن يقول بكل ثقة أنه هو المتحرك لإحساسه بذلك. ولم يعد منظوراً جورج وغرييس متكافئين بعد الآن. فإن جورج يفقد حقه في الادعاء بأنه ساكن بمجرد إطلاق محركه النفاث.

وإذا تعقب جورج غرييس بهذا الشكل، فإن الفرق في الزمن بين ساعتيهما سيعتمد على سرعتهما النسبية وتفاصيل استخدام جورج للمحرك النفاث. وإذا كانت السرعات المعنية صغيرة، كما هو الحال الآن، فإن الفرق سيكون متناهي

الصغر. أما إذا كانت السرعات المعنية تمثل أجزاء محسوسة من سرعة الضوء، فإن الفرق يمكن أن يصبح دقائق أو أياماً أو سنوات أو قرونًا أو أكثر من ذلك. وكمثال قوي على ذلك، تخيل أن السرعة النسبية لجورج وغريس عندما يعبر كل منها بالآخر مبتعدين هي 5.99٪ من سرعة الضوء. وبعد انتظار 3 سنوات - وفقاً لساعة جورج - قد انقضت قبل أن يطلق محركه النفاث ليندفع في التو للحاق بغريس بنفس السرعة التي كانا يتحركان بها مبتعدين وهي 5.99٪ من سرعة الضوء. ستمر ست سنوات بساعة جورج عندما يصل إلى غريس حيث أنه سيستغرق 3 سنوات للحاق بها. غير أن رياضيات النسبة الخاصة ستبين أنه قد انقضت ستون سنة بساعة غريس. وليس هذه ببراءة: فإن على غريس أن تستحضر ذاكرتها ما يقرب من 60 سنة مضت لتتذكر لقاءها بجورج في المكان. ومن ناحية أخرى لم تكن سوى 6 سنوات قد مضت. وبالمعنى الصحيح فإن حركة جورج قد جعلته مسافراً في الزمن، ففي الواقع، وبشكل دقيق جداً، فإن جورج قد ارتحل إلى عالم المستقبل لدى غريس.

قد يبدو أن المقارنة المباشرة للساعتين معاً مجرد أمر مسبب للإزعاج، لكنه في الواقع في صلب الموضوع. ويمكننا تخيل عدد من الحالات المختلفة لاحتواء الصدوع الموجود في درع التناقض، لكنها جميعاً قد فشلت في النهاية. فمثلاً، بدلاً من جمع الساعتين معاً، ماذا لو قارن جورج وغريس ساعتيهما بواسطة الاتصال بالטלفون المحمول؟ فإذا كان مثل هذا الاتصال لحظياً فسنواجه بعدم تطابق لا يمكن تجاوزه: فانطلاقاً من منظور غريس فإن ساعة جورج ستكون هي الأبطأ، ولذلك فهو لابد أن يتصل بعد مرور زمن أقل، وانطلاقاً من منظور جورج فإن ساعة غريس هي الأبطأ ولذلك فهي لابد أن تتصل بعد مرور زمن أقل. ولا يمكن أن يكون الاثنين على صواب، وترك نحن في حيص بيص. والنقطة الجوهرية هنا هي أن كل التليفونات المحمولة مثلها مثل كل وسائل الاتصال لا تبث إشاراتها لحظياً. والتليفونات المحمولة تعمل بموجات الراديو، وهي شكل من أشكال الضوء، وبذلك فإن إشاراتها تنتقل بسرعة الضوء. ويعني ذلك أن الأمر يستغرق بعض الوقت حتى تستقبل الإشارات التأخر في الوقت الذي يكفي بالكاد ليسبب توافق المنظورين أحدهما مع الآخر.

ولنفكر في ما يلي أولاً من منظور جورج: تخيل أن جورج يبيت كل ساعة، في بداية الساعة، في تليفونه المحمول المقوله: "الساعة الآن الثانية عشرة وكل شيء على ما يرام" و"الساعة الآن الواحدة وكل شيء على ما يرام"، وهكذا.

وحيث أنه من منظوره تسير ساعة غريس أبطأ، فلأول وهلة يفكر جورج أن غريس ستلتقي هذه الرسائل قبل أن تعلن ساعتها نفس الوقت. وبهذه الطريقة فإنه يستنتج أن على غريس أن توافق على أن ساعتها هي الأبطأ. لكنه يعاود التفكير في ذلك: "حيث أن غريس تبتعد عني، فإن الإشارة التي أبثها إليها بواسطة التليفون المحمول لابد أن تقطع مسافة أطول لتصل إليها. وربما يعوض زمن قطع هذه المسافة الإضافية البطء في ساعتها". ويدفع يقين جورج بأن هناك تأثيرين متنافسين - البطء في ساعة غريس مقابل زمن انتقال إشارته هو - إلى البدء في العمل بصورة كمية لاستيضاح تأثيرهما المشترك. ويجد جورج أن تأثير زمن الانتقال يزيد على ما هو مطلوب لتعويض البطء في ساعة غريس. ويتوصل إلى استنتاج مدهش، هو أن غريس سستقبل إشارته معلنة مرور ساعة واحدة بساعتها هو "بعد" أن تكون الساعة المعلنة قد انقضت بساعتها هي. وفي الحقيقة، وحيث أن جورج يدرك أن غريس خبيرة في الفيزياء، فإنه يعلم أنها ستأخذ زمن انتقال الإشارة في اعتبارها عند توصلها إلى نتائج تتعلق بساعتها بناء على اتصاله بالتليفون المحمول. وبقليل من الحسابات الكمية وبالأخذ في الاعتبار زمن انتقال الإشارة فإن تحليلات غريس لإشارات جورج ستوصلاه إلى نتيجة مفادها أن ساعة جورج تدق أبطأ من ساعتها.

وينطبق نفس المنطق بالضبط إذا تناولنا منظور غريس، وكونها ترسل إشارات كل ساعة لجورج. وفي البداية فإن البطء في ساعة جورج من منظور غريس سيوصلها إلى نتيجة مفادها أنه سستقبل رسائلها كل ساعة قبل أن يبيث هو إشاراته. لكنها عندما تأخذ في الحسبان المسافة الأطول التي ستقطعها إشاراتها حتى تصل إلى جورج وهو يتراجع في الفضاء، فإنها ستتيقن أن جورج سستقبل تلك الإشارات فعلياً "بعد" أن يكون قد أرسل هو بإشارته. ومرة أخرى تتيقن هي أنه حتى لو أخذ جورج في اعتباره زمن انتقال الإشارة فإنه سستنتج من اتصال غريس بالتليفون المحمول أن ساعتها تسير أبطأ من ساعته.

وطالما ظل جورج وغريس يتحركان بلا تسارع فإن منظور كل منهمما على قدم المساواة تماماً. وحتى إن بدا ذلك تناقضاً، فإن كليهما سيفكر أنه على صواب تماماً في اعتقاده أن ساعة الآخر تسير أبطأ من ساعته.

سابعاً: تأثير الحركة في الفضاء

توضح المناقشات السابقة أن الراصدين يرون أن الساعات المتحركة تدق أبطأ من ساعاتهم هم - أي أن الزمن يتأثر بالحركة. وبخطوة صغيرة يمكن أن نرى أن

للحركة نفس التأثير القوي في الفضاء، ولنعد إلى سليم وجيم في مضمار السباق. في حين قام سليم بقياس طول سيارته الجديدة بعناية في صالة العرض بواسطة شريط قياسي. ولا يستطيع جيم استخدام نفس الطريقة بينما يسير سليم مسرعاً بسيارته في مضمار السباق، ولذا لا بد أن يجد طريقة غير مباشرة. وقد سبق أن أشرنا إلى مثل هذه الطريقة، وهي: يبدأ جيم في تشغيل ساعة الإيقاف بمجرد وصول مقدمة السيارة (حاجز الصدمات الأمامي) عنده، ويوقف الساعة عند وصول مؤخر السيارة (حاجز الصدمات الخلفي). وبضرب الزمن المنقضي في سرعة السيارة يستطيع جيم أن يحسب طول السيارة.

وباستخدام ما توصلنا إليه حديثاً من تقدير لترويض الزمن، فإننا نومن أنه من منظور سليم فإنه الساكن بينما جيم هو المتحرك، وعليه فإن سليم يرى أن ساعة جيم تسير ببطء، ونتيجة لذلك يوفن سليم أن القياس غير المباشر الذي أجراه جيم لطول السيارة سيعطي نتيجة أقصر من الطول الذي قاسه هو في صالة العرض، وذلك لأنه في حسابات جيم (الطول يساوي السرعة مضروبة في الزمن المنصرم) يقوم جيم بقياس الزمن بساعة تعمل ببطء. فإذا كانت الساعة تعمل ببطء فإنها تستجع زماناً أقل ونتيجة للحسابات يصبح طول السيارة أقصر.

وبذلك سيكتشف جيم أن طول سيارة سليم أثناء الحركة أقصر من طولها في حالة السكون. وهذا مثال على الظاهرة العامة التي يرى المشاهدون فيها أن الجسم المتحرك يقصر في اتجاه الحركة. فمثلاً تبين معدلات النسبية الخاصة أنه إذا تحرك جسم بسرعة متساوية تقرباً 98% من سرعة الضوء، فإن الراصد الساكن سيرى أن الجسم قد قصر بمقدار 80% عن طوله في حالة السكون. ويصور الشكل رقم (2-4) هذه الظاهر⁽⁷⁾.

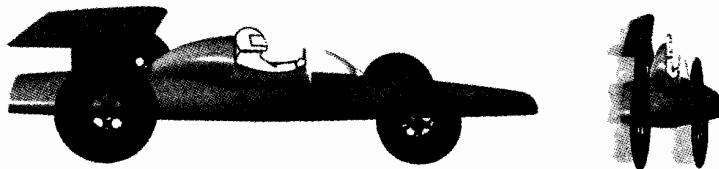
ثامناً: الحركة خلال الزمكان (Spacetime)

أدى ثبات سرعة الضوء إلى إحلال النظرة التقليدية للزمان والمكان كبني جامدة وموضوعية بمفهوم جديد يعتمد فيه الزمان والمكان بشكل خاص على

(7) بالرغم من أن الشكل رقم (2-4) يصور بالضبط انكماش جسم على طول اتجاه حركته، فإن الصورة لا تعكس ما نراه فعلياً إذا كان جسم ما سيرق بسرعة قريبة من سرعة الضوء (مفترضين أن بصائرنا أو الأجهزة الفوتografية كانت على درجة من الدقة لنرى أي شيء على الإطلاق!) وحتى نرى أي شيء بأعيننا - أو بواسطة آلة تصوير - لا بد من أن تستقبل الضوء الذي انعكس من سطح الجسم. وحيث أن الضوء المنعكس يصل إلينا من موقعاً مختلفاً على الجسم، فإن الضوء الذي نراه في آية لحظة يتخذ مسارات مختلفة الأطوال، وينؤدي ذلك إلى نوع من الخداع البصري النسبي الذي يظهر فيه الجسم وكأنه يقترب ويدور.

الحركة النسبية بين الراصد والمرصود. ويمكن أن ننهي مناقشتنا هنا بعد أن أيقنا أن الأجسام المتحركة تبطئ من حركتها ويقصر طولها في اتجاه الحركة. وبذل فإن النسبية الخاصة تعطي منظوراً أكثر تجانساً ليحتوي هذه الظواهر.

الشكل رقم (4-2)

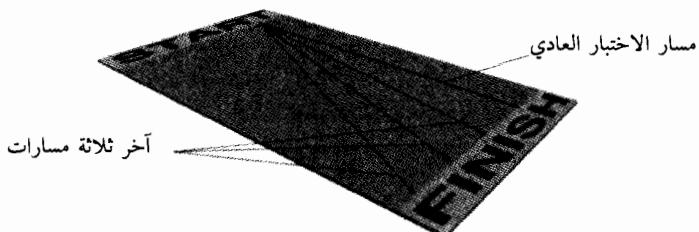


يقصر طول الجسم المتحرك في اتجاه حركته.

وحتى نفهم هذا المنظور، لتخيل سيارة غير عملية تستطيع أن تصل إلى سرعة فائقة مقدارها 100 ميل في الساعة ثم تظل محفظة بهذه السرعة لا أكثر ولا أقل إلى أن يتوقف المحرك وتسير متباطئة حتى تتوقف تماماً، ولتخيل أيضاً أنه نتيجة للشهرة التي حققها سليم كسائل ماهر فقد طلب منه أن يختبر سيارة في طريق طويل مستقيم وعرض موجود في منطقة صحراوية منبسطة. وحيث أن المسافة بين البداية والنهاية 10 أميال، فإن السيارة ستقطع هذه المسافة في $\frac{1}{10}$ ساعة، أي في 6 دقائق. وسيقوم جيم الذي يشتهر كمهندس سيارات بفحص البيانات المسجلة من العشرات من سائقي اختبار السيارات، وقد انزعج لأنه وجد أن عدداً قليلاً من السيارات الأخيرة قد سجل زمناً أطول إلى حد كبير: 7, 6,5، 7,5 دقيقة، بالرغم من أن معظم السائقين يسجلون 6 دقائق. وقد شك في البداية في وجود مشكلة ميكانيكية، حيث تبين الأرقام الأخيرة للسيارات الثلاث أنها كانت تسير بسرعة أبطأ من 100 ميل في الساعة. لكن بعد فحص دقيق للسيارات اقتنع بأنها في حالة ممتازة. ولعجزه عن تفسير الأزمنة الأطول الشاذة، فإنه استشار سليم وسأله حول الاختبارات القليلة الأخيرة. كان عند سليم تفسير بسيط. قال سليم لجيم، بما أن المضمار يمتد من الشرق إلى الغرب، وكلما تقدم الوقت نهاراً فإن الشمس تصبح في مواجهة عينيًّا.. في حالة التجارب الثلاث الأخيرة كانت الشمس فظيعة لدرجة أنه قاد السيارة من بداية المضمار إلى نهايته منحرفاً بزاوية طفيفة. ورسم شكلًا تقربياً للمسار الذي اتخذه في التجارب الثلاث الأخيرة كما هو مبين في الشكل رقم (5-2). أصبح تفسير الأزمنة الأطول للتجارب الثلاث الأخيرة واضحاً تماماً: فعندما تنتقل بزاوية يصبح المسار بين

البداية والنهاية أطول لنفس السرعة التي مقدارها 100 ميل في الساعة، وعليه ستحتاج لمزيد من الزمن لقطعها. وإذا وضعنا المسألة بشكل آخر، فإن الانتقال بزاوية يؤدي إلى أن يستهلك جزء من سرعة المائة ميل في الساعة في الانتقال من الجنوب إلى الشمال تاركاً جزءاً أقل من الرحلة بين الشرق والغرب. ويعني ذلك أن قطع المضمار سيستغرق وقتاً أطول.

الشكل رقم (5-2)



قاد سليم السيارات الثلاث الأخيرة بزاوية متزايدة بسبب توجه الشمس في وجهه في فترة بعد الظهرة.

ومن السهل فهم تفسير سليم كما هو مذكور، ويستحق الأمر إعادة صياغة بشكل طفيف من أجل النقلة في المفاهيم التي نحن على وشك اتخاذها. فالاتجاهان شمال - جنوب وشرق - غرب بعدان مكانيان مستقلان يمكن أن تتحرك فيما بينهما السيارة. (ويمكن كذلك أن تتحرك رأسياً إذا كانت تصعد جبلأً مثلاً، لكننا لنحتاج إلى هذه المقدرة هنا). ويصور تفسير سليم أنه بالرغم من أن السيارة تسير بسرعة 100 ميل في الساعة كل مرة إلا أنها قد اقتسمت هذه السرعة بين البعدين المذكورين خلال التجارب القليلة الأخيرة، ولذا فقد بدا أنها تسير بسرعة أبطأ من 100 ميل في الساعة في اتجاه شرق - غرب. وفي أثناء التجارب الأولى كانت كل سرعة المائة ميل في الساعة مكسرة فقط للحركة في اتجاه شرق - غرب، أما في أثناء التجارب الثلاث الأخيرة فإن جزءاً من هذه السرعة قد استخدم في الحركة في الاتجاه شمال - جنوب.

وقد اكتشف آينشتاين أن هذه الفكرة بالضبط - فكرة انقسام الحركة بين أبعاد مختلفة - تكمن في أساس كل الفيزياء المميزة للنسبية الخاصة، طالما أنها موقنون بأنه ليس فقط الأبعاد المكانية هي التي تقسم حركة الجسم، بل إن بعد الزمان يمكن أن يتقاسم هو الآخر هذه الحركة. وفي الحقيقة، تقع معظم حركة أي جسم

خلال الزمن وليس المكان في أغلب الظروف. دعنا نرى ما الذي يعنيه ذلك؟ نحن نعرف منذ بداية حياتنا مفهوم الحركة خلال المكان. ومع أننا لا نأخذ الأشياء بمثيل هذه المفاهيم إلا أننا نعرف كذلك أننا وأصدقاؤنا وممتلكاتنا إلخ تتحرك جميعاً خلال الزمن. وعندما ننظر إلى ساعة حائط أو ساعة يد، حتى لو كانت نجلس في تراث نشاهد التليفزيون، نرى أن قراءات الساعة تتغير بصورة ثابتة، أي أنها "تحريك للأمام خلال الزمن" بصورة ثابتة. فنحن وكل شيء من حولنا تقدم في العمر، وقدرنا أن ننتقل من لحظة زمنية إلى لحظة تالية. وفي الحقيقة كان كل من عالم الرياضيات هيرمان مينكوفسكي Hermann Minkowski وكذلك آينشتاين في النهاية يدافعان عن فكرة أن الزمن هو بعد آخر للكون - البعد الرابع - وهو يشابه في ذلك بشكل أو باخر الأبعاد المكانية الثلاثة التي نجد أنفسنا داخلها. ومع ذلك يبدو شيئاً مجرداً (Abstract)، إلا أن مفهوم الزمن كبعد آخر مؤكد. فعندما نرغب في مقابلة شخص ما فإننا يمكن أن نخبره أين "في المكان" نتوقع أن نراه - فمثلاً في الطابق التاسع من المبني الواقع على ناصية شارع 53 والجادة السابعة. وتوجد هنا ثلاثة معلومات (الطابق التاسع، والشارع 53، والجادة السابعة) وهي تعكس الموقع المحدد في الأبعاد الثلاثة المكانية في الكون. وعلى نفس الدرجة من الأهمية كذلك تحديداً للموعد الذي نقابل فيه (متى) وليكن في الثالثة بعد الظهر. وتبيننا هذه المعلومة أين "في الزمن" سيكون لقاونا. وبذل فإن الأحداث تتحدد بأربع معلومات: ثلاثة في المكان وواحدة في الزمان. وتحدد مثل هذه البيانات موقع الحدث في المكان والزمان أو اختصاراً في الزمكان. وبهذا المعنى فإن الزمن هو بعد آخر.

وحيث أن هذه الرؤية تتضمن أن الزمان والمكان هما ببساطة مثلان مختلفان للأبعاد، فهل نستطيع أن نتحدث عن سرعة جسم خلال الزمن بطريقة تماثل مفهوم السرعة خلال المكان؟ أجل نستطيع.

ويجيء الحل الكبير لكيفية عمل ذلك من معلومة مركزية تعاملنا معها من قبل. فعندما يتحرك جسم في المكان بالنسبة لنا فإن ساعته ستعمل ببطء مقارنة بساعتنا. بمعنى أن سرعة حركته خلال الزمن ستتباطأ. وهنا مربط الفرس: يعلن آينشتاين أن كل الأجسام في العالم دائماً تتنقل خلال الزمكان بسرعة ثابتة - هي سرعة الضوء. وهي فكرة غريبة، فقد تعودنا على فكرة أن الأجسام تتنقل بسرعات أقل كثيراً من سرعة الضوء. وقد أكدنا على ذلك مراراً، كسبب لأنعدام الألفة مع التأثيرات النسبية في حياتنا اليومية. وكل هذا صحيح. فنحن نتحدث حالياً عن سرعة الجسم المركبة خلال كل الأبعاد الأربع - ثلاثة للمكان وواحد للزمان -

وأن سرعة الجسم من هذا المفهوم العام متساوية لسرعة الضوء. وحتى نستوعب ذلك بشكل كامل ونستوضح أهميته، فإننا نشير إلى أن السرعة الثابتة يمكن أن تتقاسمها أربعة أبعاد - أبعاد مكانية وزمانية مختلفة، كما في حالة السيارة ثابتة السرعة غير العملية المذكورة أعلاه. فإذا كان هناك جسم ثابت لا يتحرك (بالنسبة لنا) وعليه فهو لا يتحرك خلال المكان بالمرة، إذن، كما هو الحال في الاختبارات الأولى للسيارات، تُسهّل كل حركة الجسم للانتقال في بعد واحد - في هذه الحالة بعد الزمني. والأكثر من ذلك، فإن كل الأجسام الساكنة بالنسبة لنا وبالنسبة لبعضها البعض تتحرك خلال الزمن - أي تتقدم في السن - بنفس المعدل أو السرعة. فإذا كان جسم يتحرك خلال المكان، فإن هذا يعني كذلك أن بعضاً من الحركة السابقة خلال الزمن لابد أن يحيد. وكما في حالة السيارة التي تنتقل بزاوية فإن اقتسام الحركة يعني أن الجسم سيتقل بسرعة أبطأ من قرائمه الساكنة خلال الزمن، لأن بعضاً من حركته يستخدم الآن في التحرك خلال المكان. أي أن ساعته ستدق بصورة أكثر بطءاً إذا تحرك خلال الزمن. وهذا بالضبط ما كنا قد وجדناه سابقاً. ونرى الآن أن الزمن يتباطأ عندما يتحرك جسم بالنسبة لنا لأن ذلك يحول بعضاً من حركته خلال الزمن إلى حركة خلال المكان. وهكذا فإن سرعة الجسم خلال المكان هي مجرد انعکاس لكمية الحركة التي تحولت من حركته خلال الزمن⁽⁸⁾.

ونرى كذلك أن هذا الإطار يتضمن في التو حقيقة وجود حد للسرعة

(8) وللقارئ ذي الميول الرياضية، فإننا نسجل هنا أنه من منطلق الزمكان 4 متجهات:

$$x = (ct, \vec{x})$$

يمكن أن نحصل على سرعة 4-متجهات

$$u = d\vec{x}/d\tau$$

حيث τ هي الوقت المناسب الذي يُعرف من

$$d\tau^2 = dt^2 - c^{-2}(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2)$$

والسرعة خلال الزمكان هي مقدار u في المتجهات الأربع

$$\sqrt{(c^2 dt^2 - d\vec{x}^2)/(dt^2 - c^2 d\tau^2)}$$

وهو مساوٍ تماماً لسرعة الضوء c . والآن يمكن إعادة ترتيب المعادلة:

$$c^2 (dt/d\tau)^2 - (d\vec{x}/d\tau)^2 = c^2$$

لتصبح

$$c^2 (dt/dt)^2 + (d\vec{x}/dt)^2 = c^2$$

ويبيّن ذلك أن أي زيادة في سرعة الجسم خلال الفضاء $\sqrt{(d\vec{x}/dt)^2}$ لا بد وأن يصاحبها نقص في قيمة dt/dt ، والأخيرة هي سرعة الجسم خلال الزمن (معدل سريان الزمان على ساعته الخاصة dt مقارنة بساعتنا الساكنة dt).

المكانية للجسم: يصل الجسم إلى سرعته القصوى خلال المكان إذا تحولت كل حركته خلال الزمان إلى حركة خلال المكان. ويحدث ذلك عندما تتحول كل حركته السابقة التي لها سرعة الضوء خلال الزمن إلى حركة بسرعة الضوء خلال المكان. ولأنه يكون قد استخدم كل حركته خلال الزمن فإن هذه السرعة خلال المكان ستكون هي السرعة القصوى التي يمكن أن يصل إليها أي جسم. ويمثل ذلك حالة السيارة التي خضعت للاختبار في اتجاه شمال - جنوب. وكما أنه لا تبقى سرعة للحركة في اتجاه البعد شرق - غرب، فإن أي شيء يتحرك بسرعة الضوء خلال المكان لن يتبقى له من السرعة ما يسمح بالحركة خلال الزمن. ولذا فإن الضوء لا يتقدم في العمر؛ فعمر الفوتون الذي انطلق لحظة الانفجار الهائل هو نفسه عمره الآن. فالوقت لا يمر عند سرعة الضوء.

تاسعاً: ماذا عن $E=mc^2$ ؟

مع أن آينشتاين لم يدع لنظريته تحت اسم "النسبية" (بل اقترح بدلاً من ذلك الاسم نظرية "عدم التغيير" Invariance لتعكس خاصية عدم التغير في سرعة الضوء ضمن أشياء أخرى)، إلا أن معنى المصطلح قد أصبح واضحاً اليوم. وقد بيّنت أبحاث آينشتاين أن مفهومين مثل المكان والزمان، اللذين كانا يبدوان في الماضي وكأنهما منفصلان ومطلقاً، هما في الواقع متداخلان ونسبيان. استرسل آينشتاين ليثبت بعد ذلك أن الخواص الفيزيائية الأخرى للعالم هي الأخرى متشابكة على غير المتوقع. وتزودنا معادلته الأشهر بوحد من أهم الأمثلة. وقد جزم آينشتاين في هذه المعادلة أن طاقة الجسم (E) وكتلته (m) ليستا مفهومين مستقلين؛ ويمكننا تعين الطاقة بمعلومية الكتلة (بضرب الأخيرة في مربع سرعة الضوء c^2) كما يمكن تعين الكتلة بمعلومية الطاقة (بقسمة الأخيرة على مربع سرعة الضوء c^2). وبمعنى آخر فإن الطاقة والكتلة - مثل الدولار والفرنك - عملتان قابلتان للتحويل إحداهما للأخرى. وعلى خلاف العملات، فإن معدل التغيير الذي يساوي مربع سرعة الضوء ثابت دائماً وإلى الأبد. ولأن معدل التغير المذكور كبير جداً (c^2 عدد كبير)، فإن الكتلة الصغيرة تتبع طاقة هائلة. وقد اقتصر العالم المقدرة الهائلة المدمرة التي نتجت من تحويل أقل من 1٪ من رطلين من اليورانيوم إلى طاقة في هيرشفيما في أحد الأيام. و يوماً ما قد نتمكن من تلبية حاجة العالم كله من الطاقة باستخدام معادلة آينشتاين والمصدر الذي لا ينتهي من مياه البحر من خلال الاندماج النووي.

ومن منطلق المفاهيم التي أكداها عليها في هذا الفصل، فإن معادلة آينشتاين

تقدمنا التفسير الأقوى والأصلب للحقيقة الرئيسية حول استحالة انتقال أي شيء أسرع من الضوء. وقد نتساءل مثلاً، لماذا لا نستطيع أن نتعجل جسماً مثل الميون لنندفع سرعته إلى 667 مليون ميل في الساعة - 5.99% من سرعة الضوء - ثم "ندفعه" أكثر ليصل إلى 9.99% من سرعة الضوء، ثم ندفعه "بجد" بعد ذلك بصورة أقوى ليتخطى حاجز سرعة الضوء. وتفسر معادلة آينشتاين لماذا لا تنجح مثل هذه الجهدات أبداً. فكلما زادت سرعة حركة جسم كلما زادت طاقته، ومن معادلة آينشتاين فإننا نرى أنه كلما زادت طاقة أي شيء كلما زادت كتلته. وعلى سبيل المثال، إذا كانت الميونات تنتقل بسرعة مساوية لـ 9.99% من سرعة الضوء فإنها ستزن أكثر كثيراً من أبناء عمومتها الساكنة. وفي الحقيقة فإنها ستكون أثقل بمقدار 22 مرة - حرفيًا. (الكتل الواردة في الجدول رقم (1-1) هي للجسيمات الساكنة) غير أنه كلما ازداد وزن الجسم يصعب أن نزيد من سرعته. فعندما تدفع طفلاً يركب دراجة هذا شيء، أما دفع سيارة نقل عاملة فشيء آخر. وهكذا كلما تحرك الميون بسرعة أكبر يصبح الأمر أكثر صعوبة لزيادة تلك السرعة. وعند سرعة للميون تساوي 99.99% من سرعة الضوء، فإن كتلته تزيد بمقدار 224 مرة، أما عند 99.99% من سرعة الضوء فإن كتلته تزيد بمقدار 70000 70000 مرة. وحيث أن كتلة الميون تزيد بدون حدود إذا اقتربت سرعته من سرعة الضوء، فإن الأمر سيطلب دفعه بكمية لا نهاية من الطاقة لتصل أو تعبير حاجز سرعة الضوء. وهو بالطبع شيء مستحيل، وبذا لا يوجد أي شيء مطلقاً يستطيع الانتقال أسرع من الضوء.

وكما سنرى في الفصل التالي، فإن هذه النتيجة تضع بنور التعارض الرئيسي الثاني الذي واجه الفيزياء خلال القرن السابق، وتبشر في نهاية الأمر باختفاء نظرية موفرة وراسخة أخرى - نظرية الجاذبية الكونية لنيوتون.

الفصل الثالث

عن الاعوجاجات والتموجات

حل آينشتاين التناقض بين "حدس التقدم في العمر" حول الحركة وثبات سرعة الضوء، من خلال النسبية الخاصة. وباختصار يكمن الحل في كون حدتنا خاطئاً - فمن المعروف أن حركة الأشياء أبطأ كثيراً من سرعة الضوء، وأن مثل هذه السرعات المنخفضة تحجب الخواص الحقيقة للمكان والزمان. وتكشف النسبية الخاصة عن طبيعتهما وتبيّن أنهما يختلفان جذرياً عن المفاهيم السابقة لهما. ومع ذلك، لم تكن عملية تعديل فهمنا لأساسيات المكان والزمان أمراً هيناً. وسرعان ما أيقن آينشتاين أن من بين الأصداء العديدة التي تبعـت ظهور النسبية الخاصة كانت هناك واحدة مدوية بشكل خاص: القول بأن لا شيء يمكن أن يسبق الضوء بيرهن على أنه لا يتفق مع نظرية نيوتن العالمية الموقرة عن الجاذبية، التي اقترحتها نيوتن في النصف الثاني من القرن السابع عشر. وهكذا، في الوقت الذي تمكنت فيه النسبية الخاصة من حل أحد التناقضات، فإنها أوجدت تناقضاً آخر. وبعد عقد من العمل الشاق والمراهق في بعض الأحيان، تمكـن آينشتاين من حل هذه المعضلة بواسطة نظريته في النسبية العامة. وفي هذه النظرية قام آينشتاين مرة أخرى بتشويـر مفهومـنا عن المكان والزمان، وذلك بإثبات أنه يحدث لهما اعوجاج وتشويـه لـنقل قـوة الجاذـبية.

أولاً: رؤية نيوتن للجاذبية

غـير إسحق نـيوـتن، المـولـود فـيـ العـام 1642 فـيـ لـيـنـكـولـنـشاـيرـ بـإنـكـلـترـاـ، وجـهـ الـبـحـثـ الـعـلـمـيـ بـأنـ أـدـخـلـ قـوـةـ الـرـياـضـيـاتـ الـكـامـلـةـ فـيـ خـدـمـةـ مـتـطـلـبـاتـ الـفـيـزـيـاءـ. وـكـانـ نـيوـتنـ ذـكـاءـ هـائـلـ لـدـرـجـةـ أـنـ عـنـدـمـاـ كـانـ لـاـ يـجـدـ الـرـياـضـيـاتـ الـتـيـ يـحـتـاجـهـاـ فـيـ بـعـضـ بـحـوـثـهـ مـثـلاـ، كـانـ يـخـرـعـهـاـ. وـقـدـ مـرـتـ ثـلـاثـةـ قـرـونـ تـقـرـيبـاـ قـبـلـ أـنـ يـأـتـيـ إـلـىـ الـعـالـمـ عـبـرـيـ عـلـمـيـ آـخـرـ يـمـكـنـ مـقـارـنـتـهـ بـنـيوـتنـ (يـقـصـدـ الـمـؤـلـفـ سـتـيفـنـ هـوـكـنـغـ). وـمـنـ بـيـنـ اـكـتـشـافـاتـ نـيوـتنـ الـعـدـيدـةـ الـمـدـوـيـةـ فـيـ مـاـ يـتـعـلـقـ بـعـملـ الـكـوـنـ فـإـنـ مـاـ يـهـمـنـاـ هـنـاـ بـالـدـرـجـةـ الـأـوـلـىـ هـيـ الـنـظـرـيـةـ الـكـوـنـيـةـ لـلـجـاذـبـيـةـ.

نعم قوى الجاذبية حياتنا اليومية. وهي التي تحفظنا وكل ما حولنا من أجسام مرتبطة بسطح الأرض، وهي التي تحفظ الهواء الذي نتنفسه من الهروب إلى الفضاء الخارجي؛ كما تحفظ القمر في مداره حول الأرض وتحافظ على الأرض في مدارها حول الشمس. والجاذبية هي التي تفرض إيقاع الرقص الكوني من دون ملل أو كلل، وفي نظام دقيق رتيب يمارسه المليارات والمليارات من قاطني الكون من الكويكبات إلى الكواكب إلى النجوم فال مجرات. وقد تسببت ثلاثة قرون من تأثير نيوتن بأن نسلم بأن القوة الوحيدة - الجاذبية - هي المسؤولة عن هذا الشراء في الأحداث الأرضية والكونية. وقبل نيوتن لم يكن مفهوماً أن سقوط التفاحة من الشجرة على الأرض يشهد بأن نفس المبدأ الفيزيائي هو الذي يجعل الكواكب تدور حول الشمس. وقد قام نيوتن في خطوة جريئة لخدمة سيادة المنهج العلمي، بتوحيد الفيزياء التي تحكم كلاً من السماوات والأرض، وأعلن أن قوى الجاذبية هي اليد الخفية التي تعمل في كل منها.

ويمكن تسمية نظرة نيوتن للجاذبية بالموازن العظيم. فقد أعلن أن كل شيء على الإطلاق يمارس قوة جاذبية على كل شيء آخر على الإطلاق. ومن دون النظر للتركيب الفيزيائي للأشياء فإنها كلها تمارس قوى الجاذبية كما تحس بها. وقد استنتج نيوتن معتمداً على الدراسة العميقة لتحليل حركة الكواكب لجوهانس كبلر - أن شدة الجاذبية بين جسمين تعتمد "بالتحديد" على أمرتين: كمية حشو كل جسم والمسافة بينهما. وكلمة "حشو" تعني المادة - التي تتكون من العدد الكلي للبروتونات والنيوترونات والإلكترونات، والتي بدورها تحدد "كتلة" الجسم. تجزم النظرية الكونية للجاذبية لنيوتن بأن شدة التجاذب بين جسمين كبيرة للأجسام ذات الكتل الكبيرة وصغيرة للأجسام ذات الكتل الصغيرة، كما تؤكد أيضاً أن شدة التجاذب تزيد إذا صغرت المسافة بين الجسمين وتقل إذا زادت المسافة بينهما.

انطلق نيوتن أبعد من هذا الوصف الكيفي وتوصل إلى معادلات تصف كمياً شدة قوة الجاذبية بين جسمين. وتنص هذه المعادلات - بالكلمات - أن قوة الجاذبية بين جسمين تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتتيهما وعكسياً مع مربع المسافة بينهما. ويمكن استخدام "قانون الجاذبية" هذا للتبؤ بحركة الكواكب والمذنبات حول الشمس وحركة القمر حول الأرض وحركة الصواريخ المنطلقة لاكتشاف الكواكب، بالإضافة إلى الاستخدامات الأرضية مثل مسار كرة البيسبول في الهواء والحركة اللولبية للاعبين الغطس أثناء اتجاههم إلى أسفل من على منصة القفز. والتوافق بين التنبؤات والمشاهدات الفعلية لحركة مثل هذه الأجسام مدهش. وقد أعطى هذا النجاح دعماً لا لبس فيه لنظرية نيوتن حتى أوائل القرن العشرين.

غير أن اكتشاف آينشتاين للنسبية الخاصة أدى إلى ظهور ما ثبت أنه عقبة كثيرة لنظرية نيوتن.

ثانياً: عدم التوافق بين جاذبية نيوتن والنسبية الخاصة

والسمة الرئيسية للنسبية الخاصة هي الحد المطلق للسرعة الذي يتحدد بواسطة الضوء. من المهم أن نتيقن من أن هذا الحد لا ينطبق فقط على الأجسام المادية، بل ينطبق كذلك على الإشارات وعلى كل التأثيرات من أي نوع. وببساطة لا توجد أية وسيلة لنقل المعلومات أو أي تأثيرات من مكان لأخر أسرع من الضوء. ومن الطبيعي أن العالم مليء بالطرق التي تنتقل بها التأثيرات بسرعات أبطأ من الضوء. فحدثك وكل الأصوات الأخرى مثلاً تحملها اهتزازات تنتقل في الهواء بسرعة 700 ميل في الساعة تقريباً، وهي سرعة بطيئة إذا قورنت بسرعة الضوء 670 مليون ميل في الساعة. ويصبح هذا الاختلاف في السرعة واضحاً إذا كنت تشاهد مباراة في البيسبول من المقاعد البعيدة عن مكان اللعب. فعندما يضرب اللاعب الكرة بمضريه فإن الصوت يصل إليك "بعد" لحظات من رؤيتك للضربة. ويحدث نفس الشيء في العاصفة الرعدية. فمع أن البرق والرعد يحدثان متزامنين، فإنك ترى البرق قبل أن تسمع الرعد. ومرة أخرى، يعكس ذلك الفرق المحسوس في السرعة بين الضوء والصوت. ويخبرنا النجاح الذي حققه النسبية الخاصة أن الوضع المعكوس، أي الذي تصلنا فيه بعض الإشارات قبل ابعاد الضوء منها، هو أمر مستحيل تماماً. فلا شيء يسبق الفوتونات.

وهنا تكمن المشكلة. ففي نظرية نيوتن للجاذبية يمارس الجسم شد الجاذبية على جسم آخر بشدة تتحدد فقط بكتلة الجسمين المعنيين ومقدار المسافة التي تفصلهما. ولا تعتمد الشدة على طول فترة بقاء الجسمين منجدبين. ويعني ذلك أنه إذا تغيرت كتلتها أو المسافة التي تفصلهما فإن الجسمين سيشعران بالتغيير في شد الجاذبية المتبادل بينهما لحظياً تبعاً لنيوتن. فمثلاً تزعم نظرية نيوتن للجاذبية أنه لو انفجرت الشمس فجأة، فإن الأرض - على بعد 93 مليون ميل تقريباً - ستبتعد لحظياً من مدارها البيضاوي المعتاد. ومع أن ضوء الانفجار يستغرق ثمانية دقائق لينتقل من الشمس إلى الأرض، إلا أنه تبعاً لنظرية نيوتن فإن معلومة انفجار الشمس ستصل لحظياً إلى الأرض من خلال التغير المفاجئ في قوى الجاذبية المتحكمه في حركتها.

وهذا الاستنتاج في تناقض مباشر مع النسبية الخاصة حيث إن الأخيرة تؤكد أنه لا يمكن أن تنتقل أية معلومات أسرع من الضوء - والانتقال اللحظي يشكل اعتداء على هذا المبدأ في أعلى صورة.

ولهذا، ففي الجزء المبكر من القرن العشرين، أيقن آينشتاين بأن نظرية الجاذبية الناجحة جداً لنيوتن تتعارض مع نظريته في النسبية الخاصة. ولوثوق آينشتاين من صحة النسبية الخاصة، وعلى الرغم من تلال الدعم التجاريبي لنظرية نيوتن، فإنه فكر في نظرية جديدة للجاذبية تتوافق مع النسبية الخاصة. وقد أدى ذلك به في النهاية إلى اكتشاف النسبية العامة، التي خضعت فيها خواص المكان والزمان لتحولات ملحوظة مرة أخرى.

ثالثاً: أكثر أفكار آينشتاين إشراقاً

وحتى قبل اكتشاف النسبية الخاصة فإن نظرية نيوتن للجاذبية كانت تفتقر إلى أمر هام. فعلى الرغم من أنها يمكن أن تستخدم لإجراء تنبؤات عالية الدقة حول الكيفية التي تتحرك بها الأجسام تحت تأثير الجاذبية، إلا أنها لا تقدم نظرة ثاقبة عن معنى الجاذبية. بمعنى أنه كيف يحدث أن جسمين منفصلين فيزيائياً أحدهما عن الآخر، ربما لبعض مئات الملايين من الأميال أو أكثر، يؤثران الواحد في حركة الآخر؟ ما هي الوسائل التي تنجذب بها الجاذبية رسالتها؟ وهذه مشكلة كان نيوتن نفسه على دراية بها، فقد كتب يقول:

الأمر الذي لا يمكن تصوره هو أن تقوم مادة جامدة غير حية من دون وساطة من أي شيء آخر ليس مادياً بالتأثير في مادة أخرى من دون اتصال متبادل. وهذه الجاذبية أمر فطري ومتصل وأساسي في المادة لدرجة أن أحد الأجسام يؤثر في جسم آخر خلال الفراغ من دون تدخل من أي شيء آخر يمكن بواسطته أو خلاله انتقال فعلهما وقوتهما من واحد إلى الآخر، الأمر المنافي للعقل بالنسبة لي لدرجة أنتي واثق ألا أحد له كامل القوة الفكرية في الأمور الفلسفية سيقع في هذا. ولابد للجاذبية من عامل مسبب يؤثر باستمرار وفقاً لقوانين معينة، لكن سواء كان هذا العامل مادياً أو غير مادي، فقد تركت هذا لعنابة قرائي⁽¹⁾.

ويعني ذلك أن نيوتن قد تقبل وجود الجاذبية وطور معادلات تصف تأثيراتها

Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of The World*, 2 vols., translated by A. Motte and Florian Cajori (Berkeley, CA: University of California Press, 1962), vol. 1, p. 634.

بدقة، لكنه لم يقدم أبداً أية نظرة ثاقبة في كيفية عملها بالفعل. وقد أعطى العالم "كتيب التشغيل" للجاذبية ورسم الخطوط الرئيسية لكيفية استخدامها - التعليمات التي استغلتها الفيزيائيون والفلكيون والمهندسوون بنجاح لرسم مسارات الصواريخ إلى القمر والمريخ والكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية، وللتنبؤ بالكسوف والكسوف، وللتنبؤ بحركة المذنبات، وهكذا. غير أنه ترك الأمور الداخلية - محتويات "الصندوق الأسود" للجاذبية - في غموض تام. وعندما تستخدم جهاز الأقراص المدمجة (CD) أو الحاسوب الشخصي، فقد تجد نفسك في نفس الحالة من عدم المعرفة في ما يتعلق بكيفية عملها من الداخل. وطالما كنت تعرف كيف تستخدم الآلة فلا أنت ولا أي شخص يحتاج إلى أن يعرف كيف تنجذب هذه الآلة المهام التي تريدها منها. لكن إذا تعطل جهاز الأقراص المدمجة أو الحاسوب الشخصي فإن إصلاحه يعتمد كلياً على معرفة كيفية عمله من الداخل. وبالمثل، أينشتاين أنه على الرغم من مئات السنين من التأكيدات التجريبية لنظرية نيوتن، إلا أن النسبة الخاصة تعني بشكل دقيق أن نظرية نيوتن قد "انكسرت"، وأن إصلاحها يتطلب الإمساك بتلابيب التساؤل عن حقيقة الجاذبية وطبيعتها الكلية.

وفي العام 1907، وبينما كان آينشتاين مستغرقاً في التفكير في هذه المواضيع وهو جالس في مكتب تسجيل الاختراعات في مدينة برن بسويسرا، توصل إلى فكرة أساسية من خلال نوبات متقطعة أوصلته في النهاية إلى نظرية جديدة جذرية للجاذبية - وهي مدخل لن يملا ببساطة الفراغ في نظرية نيوتن، لكنه بالأحرى سيعيد صياغة فكرة الجاذبية بالكامل، وأهم ما في الموضوع أنها ستكون على وفاق تام مع النسبة الخاصة.

والنظرة الثاقبة لآينشتاين مناسبة للسؤال الذي يمكن أن يكون قد شغلك في الفصل الثاني. وقد ركزنا في ذلك الفصل على أننا مهتمون بهم كيف يظهر العالم للأفراد الذين يتحركون بسرعة نسبية ثابتة. وإذا قارنا بعنایة مشاهدات هؤلاء الأفراد سنجد بعض الدلالات المثيرة حول طبيعة المكان والزمان. لكن ماذا عن الأفراد الذين يتحركون حرفة متسرعة؟ ستكون مشاهدات مثل هؤلاء الأفراد أكثر تعقيداً عند تحليلها من تلك المشاهدات الخاصة بالأفراد الذين يتحركون بسرعة ثابتة، والذين تتسم حركتهم بأنها أكثر هدوءاً، لكن مع ذلك يمكن أن نتساءل عما إذا كان هناك بعض الوسائل لترويض هذا التعقيد ووضع الحركة المتسرعة مباشرة في الإطار المكتشف حديثاً للمكان والزمان.

وقد بين "فکر آینشتاين الأکثر توفيقاً" كيف نفعل ذلك. وحتى تفهم أفكار

آينشتاين تخيل أنك في عام 2050 وأنك تعمل رئيساً لخبراء المفروعات في مكتب التحقيقات الفيدرالي (FBI)، وقد تلقيت لتوك مكالمة من شخص متزوج لفحص ما يبدو أنه قنبلة متقدمة الصنع مزروعة في قلب العاصمة واشنطن. وبعد اندفاعك إلى الموقع واختبار القنبلة أصبح الكابوس الرهيب حقيقة: كانت القنبلة نووية ومن القوة بحيث أنها حتى لو دفنت عميقاً في القشرة الأرضية أو أقيمت في أعماق المحيط فإن التدمير الناتج عن انفجارها سيكون مهلاكاً. وبعد دراسة آلية تفجير القنبلة بحرص شديد أيقنت أنه لاأمل هناك في فكها، بل أكثر من ذلك ستري أنها مزودة بشرك عبئي. والقنبلة معلقة في ميزان بحيث تنفجر إذا انحرفت قراءة الميزان بمقدار 50% عن القراءة الحالية. وتبعاً لجهاز التوقيت فليس أمامك إلا أسبوع واحد لتبدأ في العد التناظلي للانفجار. وعلى عاتقك يقع مصير ملايين الناس - فما الذي تفعله؟

حسناً، بما أنه لا يوجد موقع آمن في أي مكان فوق أو تحت الأرض لتفجير القنبلة، فيبدو أنه ليس أمامك سوى خيار واحد: لابد من رفع القنبلة إلى أعماق الفضاء الخارجي، حيث لا يسبب انفجارها أي دمار. وقامت بطرح هذه الفكرة في اجتماع لفريقك في مكتب التحقيقات الفيدرالي، لكن سرعان ما تم تسفيه خطتك من قبل أحد المساعدين الشبان. بدأ مساعدك واسمه اسحق بالقول: "هناك مشكلة خطيرة في خطتك، فكلما انطلقت القنبلة مبتعدة عن الأرض سيقل وزنها، حيث أن شد الجاذبية بينها وبين الأرض سيقل. ويعني ذلك أن قراءة الميزان داخل منظومة القنبلة ستقل مسببة الانفجار قبل الوصول إلى مكان آمن في أعماق الفضاء. وقبل أن يتاح لك الوقت الكافي لاستيعاب هذا النقد تماماً، انطلق مساعد شاب آخر اسمه ألبرت قائلاً: "في الحقيقة عليك أن تفكير ملياً، لأن هناك مشكلة أخرى، وهي في نفس أهمية اعتراض إسحق لكنها أكثر دقة، لذا تحملوني وأنا أشرحها"، ولأنك في حاجة إلى لحظة للتفكير في اعتراضات إسحق، فقد حاولت إسكاتات ألبرت، ولكن كالعادة، عندما يبدأ في الكلام لا توجد طريقة لإسكاته.

"لإرسال القنبلة إلى الفضاء الخارجي، لابد من تركيبها فوق صاروخ. وعندما يتسارع الصاروخ إلى أعلى لاختراق الفضاء ، فإن القراءة على مقاييس الميزان ستزيد، وستؤدي وبالتالي إلى حدوث الانفجار قبل الأوان. وسترى أن قاعدة القنبلة - المستقرة على الميزان - ستزيد من ضغطها على المقاييس أكثر منها في حالة السكون، تماماً كما ينضغط جسمك إلى الخلف فوق مقعد السيارة المتسارعة. وستضغط القنبلة على المقاييس كما يضغط ظهرك على وسائد مقعد السيارة. وعندما ينضغط مقاييس الميزان ستزيد قراءته - سيؤدي هذا إلى انفجار

القبلة إذا كانت الزيادة الناتجة أكثر من ٥٥٪ .

لقد شكرت ألبرت على تعليقه لكن حيث أنك قد استبعدت تفسيره لتأكد ذهنياً على ملاحظات إسحق، فإنك ستعلن مكتتبأً أن قتل فكرة ما قد لا يحتاج سوى إلى ضربة واحدة قاتلة، وفي ما يبدو فقد فعلت ملاحظة إسحق الصحيحة ذلك بالتأكيد. ولأنك شعرت ألاً أمل هناك إلى حد ما، فقد سألت الحضور أن يأتوا بمقترحات جديدة. وفي هذه اللحظة، جاء ألبرت بشرح كاسح: "عند إعادة التفكير، لا أعتقد أن فكرتك ليست قابلة للتنفيذ على الإطلاق. وملاحظة إسحق أن الجاذبية تقل كلما صعد جهاز القبلة في الفضاء يعني أن القراءة على مقاييس الميزان ستختفي. وملاحظتي حول أن تسارع الصاروخ إلى أعلى سيتسبب في أن جهاز القبلة سيضغط أكثر على المقاييس، مما يعني أن القراءة ستزداد. وأيأخذ الملاحظتين معاً، يعني أننا لو تحكمنا بعنایة في تسارع الصاروخ لحظة بلحظة أثناء صعوده، فإن هذين المؤثرين يمكن أن يلغيا أحدهما الآخر" ! وفي المراحل الأولى لصعود الصاروخ، وتحديداً عندما تكون قوى الجاذبية الأرضية كاملة، فإن الصاروخ لن يتسرع بشدة، وستظل قراءة المقاييس في حدود الـ ٥٥٪ المسموح بها. وكلما ارتفع الصاروخ متبعداً عن الأرض - ويصبح تأثير جاذبية الأرض أقل فأقل - فإننا سنحتاج إلى زيادة التسارع إلى أعلى لإحداث التوازن. ويمكن للزيادة في القراءة الناتجة عن التسارع إلى أعلى أن تتساوی تماماً مع النقص في القراءة الناتج عن تناقض شدة الجاذبية، وبذا فإننا في الحقيقة نستطيع أن نحافظ تماماً على القراءة الفعلية على المقاييس من التغير" .

وبدأ اقتراح ألبرت يتخطى شكلاً معقولاً. ولقد أجبت بأن "التسارع إلى أعلى يمكن أن يؤدي إلى تعويض النقص في الجاذبية، ومن الممكن محاكاة تأثير الجاذبية من خلال حركة تسارعية مناسبة" .

"بالضبط!" أجاب ألبرت.

وتسرسل أنت: "وهكذا يمكن أن نرفع القبلة إلى الفراغ مع تنظيم تسارع الصاروخ بحكمة، وبذا يمكن أن نتأكد من عدم تغيير قراءة المقاييس، وبذلك نتجنب انفجارها إلى أن تصل إلى مسافة آمنة من الأرض" . وهكذا، وبواسطة المناورة بين الجاذبية والحركة المتتسارعة - وباستخدام دقة علم الصواريخ في القرن الواحد والعشرين - من الممكن تجنب الكارثة.

كان الإقرار بحقيقة أن الجاذبية والحركة المتتسارعة متشابكتان بشدة هو مفتاح النظرية الثاقبة لأينشتاين في يوم سعيد أثناء وجوده في مكتب تسجيل الاختراعات في برن. وبالرغم من خبرتنا مع القبلة التي أضاءت جوهر أفكاره، إلا أن الأمر

يستحق إعادة صياغة في إطار أقرب إلى ما جاء في الفصل الثاني. ولهذا الغرض، أسترجع حالتك لو كنت في غرفة بلا نوافذ محكمة الغلق لا تتسارع، فلن يكون لديك أي وسيلة لتعيين سرعتك. ستبدو الغرفة دون أي تغير، وأي تجرب ستجريها ستعطي نفس النتائج من دون اعتبار لسرعة حركتك (حركة الغرفة). ومن حيث المبدأ، فإنك بدون علامات خارجية للمقارنة لا يمكنك أن تصف حالة حركتك بسرعة معينة. ومن جهة أخرى، إذا كنت تتسارع، وحتى في ظروف منظورك المحدود والمحبوس داخل الغرفة المحكمة الغلق، فإنك ستشعر بضغط على جسمك. فمثلاً، إذا كان مقعدك المتوجه إلى الأمام مثبتاً على الأرض، وكانت الحجرة محكمة الغلق تتسارع إلى الأمام، فإنك ستشعر بضغط المقعد على ظهرك تماماً كما وصف ألبرت حالة السيارة. وبنفس الطريقة إذا تسارعت الغرفة إلى أعلى فستشعر بضغط الأرض على قدميك. كان يقين آينشتاين أنه داخل الغرفة الصغيرة المحكمة الغلق، لن تستطيع أن تميز حالة التسارع عن حالات عدم التسارع إلا بواسطة الجاذبية: وعندما يتم ضبط هذين المقدارين بحكمة فإنك لا يمكن أن تميز القوة التي تستشعرها: هل هي من الجاذبية أم من التسارع؟ وإذا كانت غرفتك مستقرة رأسياً في سكينة فوق سطح الأرض، فإنك ستشعر بالقوة المألفة على قدميك، تماماً كما في سيناريو التسارع إلى أعلى، وهو بالضبط ما استخدمه ألبرت في الحل الذي اقترحه لرفع القنبلة إلى الفراغ. أما إذا كانت غرفتك مستقرة بظهورها على الأرض، فستشعر بضغط المقعد على ظهرك (يمنعك من السقوط) تماماً مثل تسارعك أفقياً. وقد أطلق آينشتاين على عدم المقدرة على التمييز بين الحركة المتسارعة والجاذبية "مبدأ التكافؤ" (The Equivalence Principle). وهو يلعب دوراً محورياً في النسبية العامة⁽²⁾.

(2) وبذلة أكثر بعض الشيء، أبقى آينشتاين أن مبدأ التكافؤ يصلح طالما كانت مشاهداتنا محصورة في مناطق صغيرة من القضاء - أي كلما كانت "الغرفة" صغيرة بما فيه الكفاية. والسبب هو أن مجالات الجاذبية يمكن أن تختلف في شدتها (وفي اتجاهها) من مكان آخر. لكننا نتصور أن الغرفة تتسارع كواحدة واحدة وبالتالي فإن تسارعك يولد مجال قوى جاذبية مفرداً ومتجانساً. وبالتالي سيفعل في حجم الغرفة سيفيل باطراد المكان المسموح به لتغيير الجاذبية، وبالتالي فإن مبدأ التكافؤ سيصبح أكثر قابلية للتطبيق. أما الفرق بين مجال الجاذبية المتجانس الناتج عن تسارع نقطة مميزة ومجال جاذبية " حقيقي" من المحتمل أن يكون غير متجانس تولد عن جاذبية "المد والجزر" (حيث أنه مسؤول عن تأثير جاذبية القمر عن المد والجزر على الأرض). ويمكن إيجاز الملاحظة الحالية بالقول إن مجال جاذبية المد والجزر يصبح أقل تأثيراً كلما صغر حجم الغرفة، الأمر الذي يؤدي إلى أن يصبح الفرق بين الحركة المتسارعة ومجال الجاذبية الحقيقي غير محسوس.

ويظهر هذا الوصف أن النسبية العامة قد أنهت عملاً بذاته النسبية الخاصة. فمن خلال مبدأ النسبية، تعلن نظرية النسبية الخاصة: تبدو قوانين الفيزياء واحدة بالنسبة لجميع المشاهدين الموجودين في حالة حركة ثابتة السرعة. لكن هذه الديمقراطية في الحقيقة محدودة، فهي تستبعد عدداً هائلاً من وجهات النظر الأخرى - وهم الأفراد الذين يتحركون بتسارع. وتبين لنا أفكار آينشتاين عام 1907 كيف نُضْمِن كل وجهات النظر - ذات السرعة الثابتة والمتسارعة - داخل إطار واحد متكافئ. وحيث أنه لا فرق بين أفضلية متتسارعة بدون حقل جاذبية وأفضلية غير متتسارعة في حقل جاذبية، فإننا يمكن أن نستخدم المنظور الأخير لعلن أن (جميع المشاهدين، بصرف النظر عن حالة حركتهم، يمكن أن يزعموا أنهم في حالة سكون، وأن "بقية العالم هي التي تتحرك من حولهم") طالما أنهم يضمنون مجالاً مناسباً للجاذبية في وصفهم لما يحيط بهم". وفي هذا المعنى، ومن خلال احتواء الجاذبية، فإن النسبية العامة تؤكد أن كل نقط أفضلية المشاهدين المحمولة تقف على قدم المساواة. (وكما سنرى لاحقاً، فإن هذا يعني أن التمييز بين المشاهدين في الفصل الثاني، التي اعتمدت على الحركة المتتسارعة - كما الحال عندما تعقب جورج غريس بإطلاق محركه النفاث، وشاخ بمعدل أبطأ منها - تسمح بوصف متكافئ من دون تسارع، ولكن مع جاذبية).

وبالتأكيد، فإن هذا الارتباط الوثيق بين الجاذبية والحركة المتتسارعة هو إنجاز مشهود، لكن لماذا جعل ذلك من آينشتاين سعيداً لهذه الدرجة؟ السبب ببساطة هو أن الجاذبية شيء غامض. إنها قوة عظمى تتغلغل في حياة الكون، غير أنها مراوغة وغير مادية. ومن ناحية أخرى فإن الحركة المتتسارعة، على الرغم من كونها أكثر تعقيداً بشكل ما من الحركة بسرعة ثابتة، فهي متماسكة ومحسوسة. وباكتشاف رابطة أساسية بين الاثنين، فإن آينشتاين يقين أنه يمكن استخدام فهمه للحركة كأدلة قوية ليكتسب فهماً مماثلاً للجاذبية. ولم يكن اختبار هذه الاستراتيجية عملياً أمراً سهلاً حتى بالنسبة لعقارية آينشتاين، لكن في النهاية حمل هذا المدخل ثمار النسبية العامة. وقد تطلب الوصول إلى هذه النهاية أن يصوغ آينشتاين حلقة ثانية في السلسلة التي توحد بين الجاذبية والحركة المتتسارعة: انحناء المكان والزمان الذي سنعرض له الآن.

رابعاً: التسارع وأعوجاج المكان والزمان

عمل آينشتاين على حل مشكلة فهم الجاذبية التي تسلطت عليه بشكل مكثف. وقد كتب للفيزيائي آرنولد سومرفيلد (Arnold Sommerfeld) بعد مرور

خمس سنوات على الكشف العظيم الذي حدث أثناء وجوده في مكتب براءات الاختراع في برن: "إني متفرغ الآن للعمل على حل مشكلة الجاذبية... هناك أمر واحد مؤكد - هو أنني لم أتعذب في حياتي بشيء مثل هذا أبداً .. وبالمقارنة بهذه المشكلة فإن نظرية النسبية الأصلية [الخاصة] تعتبر لعب أطفال".⁽³⁾

ويبدو أن آينشتاين قد وضع يده على مفتاح الاكتشاف الخطير التالي، وهو ما تبع تطبيق النسبية الخاصة بسهولة - لكن بدقة - على الحلقة التي تربط الجاذبية بالحركة المتسارعة سنة 1912. ولفهم تلك الخطوة في منطق آينشتاين، من الأسهل أن نركز - كما فعل هو كما يبدو - على مثال ما محمد للحركة المتسارعة⁽⁴⁾. وللتذكر مرة أخرى أن الجسم يتسارع إذا تغيرت سرعته أو اتجاه حركته. وللتبسيط سنركز على الحركة المتسارعة التي يتغير فيها اتجاه حركة الجسم بينما تظل سرعته ثابتة. وبالتحديد سنأخذ في الاعتبار الحركة في مسار دائري مثل الحركة التي يمارسها الشخص في لعبة التورنادو في إحدى حدائق الملاهي. فإذا لم تكن قد قمت بتجربة ثبات وضعك أثناء ركوبك هذه اللعبة، فإنك ستقف بظهرك مستنداً إلى الحائط الداخلي لبناء دائري من الزجاج العضوي الذي يدور بسرعات عالية. ومثل كل الحركات المتسارعة فإنك ستشعر بهذه الحركة - وستشعر بأن جسمك مدفوع ناحية الخارج من المركز على امتداد قطر الدائرة، كما ستشعر بضغط حاجز الزجاج على ظهرك ليحتفظ بك في حركة دائيرية. (وفي الحقيقة، وعلى الرغم من أن ذلك لا علاقة له بموضوع مناقشتنا الحالية، فإن الحركة المغزليّة "ثبتت" جسمك إلى الحائط الزجاجي بقوة لدرجة أنه عندما تبتعد السقالة التي تقف عليها فإنك لا تنزلق إلى أسفل). فإذا كانت الحركة أثناء اللعبة ناعمة جداً وأغلقت عينيك فإن ضغط الحركة على ظهرك - مثل الدعم الذي يقدمه السرير - يمكن أن يجعلك تشعر غالباً بأنك راقد. وتأتي كلمة "غالباً" من حقيقة أنك ما زلت تشعر بالجاذبية الرأسية العادية، بحيث لا يمكن استغفال مخك تماماً. أما إذا كنت تركب التورنادو في الفضاء المكان الخارجي، وإذا كان سيدور بالمعدل الصحيح، فإن الأمر سيكون كما تشعر تماماً برقادك على سرير ساكن على الأرض. والأكثر من ذلك أنك عندما "تنهض وتسير على الناحية الداخلية للزجاج

(3) ألبرت آينشتاين، كما هو مأخذ من كتاب: Albrecht Folsing, *Albert Einstein: A Biography* = Albert Einstein: Eine Biographie, translated from the German by Ewald Osers (New York; London: Viking, 1997), p. 315.

John Stachel, "Einstein and the Rigidly Rotating Disk." in: A. Held, ed., *General Relativity and Gravitation: One Hundred Years after the Birth of Albert Einstein*, 2 vols. (New York: Plenum, 1980), p. 1.

الذي يدور فإن قدميك ستضطخنان عليها تماماً كما تفعل قدماك على الأرض. وفي الحقيقة فإن محطات الفضاء المكان يتم تصميمها لتدور بهذا الشكل لتوجد شعوراً مصطنعاً بالجاذبية في الفضاء الخارجي.

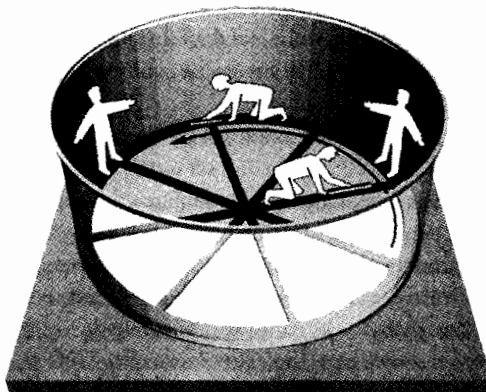
وحيث أننا قد استخدمنا الحركة المتتسارعة للعبة التورنادو المغزلية لمحاكاة الجاذبية، فإننا يمكن أن نتبع آينشتاين ونصف كيف يبدو المكان والزمان لشخص من داخل لعبة التورنادو المغزلية. كان التعليل في ما يخص هذا الموقف كما يلي: يمكننا نحن المشاهدين الساكنين بسهولة أن نقيس محيط ونصف قطر التورنادو المغزلية. فمثلاً، لقياس المحيط يمكن أن نستخدم مسطرة تقلب طولياً على طول الممشى الذي يقف عليه اللاعبون. وبالنسبة لنصف القطر فمن الممكن استخدام نفس الطريقة بادئين من المركز ومنتهين عند الحافة الخارجية. وكما نتوقع من معلوماتنا عن الهندسة بالمرحلة الثانية، فإننا سنجد أن النسبة بينهما هي ضعف العدد π (ط) - حوالي 28.6 - تماماً كما هي في أية دائرة مرسومة على صفحة مستوية. لكن، كيف يبدو الأمر من منظور شخص ما موجود داخل اللعبة؟

وللإجابة عن ذلك سنطلب من سليم وجيم، اللذين يستمتعان برركوب لعبة التورنادو في الوقت الحالي... أن يقوموا ببعض القياسات. سنلقي بمسطرة إلى سليم الذي يتأهب لقياس المحيط، وسنلقي بأخرى لجيم ليقيس نصف القطر. وللحصول على أفضل منظور سنطل على اللعبة من أعلى كما هو مبين في الشكل رقم (3-1). وقد زودنا هذه اللقطة بهم يشير إلى اتجاه الحركة اللحظي عند كل نقطة. وعندما يبدأ سليم في قياس المحيط سنرى في هذه اللحظة من أعلى أنه سيحصل على قراءة مختلفة عما حصلنا عليه. فعندما يضع سليم المسطرة على المحيط سنلاحظ أن "طول المسطرة قد نقص". وما هذا إلا تقلص لورنس الذي ناقشناه في الفصل الثاني، والذي ينص على أن طول الجسم يبدو أقصر في اتجاه حركته. وتعني المسطرة الأقصر أنها ستتطلب طولياً عدداً "أكبر" من المرات لتغطي المحيط كله. وحيث إن سليم ما زال يعتقد بأن طول مسطرته قدم واحد (بما أنه لا توجد حركة نسبية بين سليم ومسطنته فإنه يراها بطولها المعتاد ومقداره قدم واحد)، فإن ذلك يعني أن سليم سيقيس محيطاً "أطول" مما قساه. (إذا بدأ ذلك متناقضاً، يمكن أن يكون الهاشم النهائي رقم (5) مساعداً).

وماذا عن نصف القطر؟ يستخدم جيم نفس الطريقة - طريقة تقليل المسطرة - لإيجاد طول دعامة نصف القطر. ومن ارتفاعنا سنرى أنه سيحصل على نفس النتيجة التي حصلنا عليها. وسبب ذلك أن المسطرة ليست موضوعة في الاتجاه اللحظي لحركة اللعبة (كما هو الحال أثناء قياس المحيط) وبدلاً من ذلك

فإنها تشير بزاوية 90 درجة على اتجاه الحركة، وبذلك فإنها لا تقلص طولياً. وبذا فسيجد جيم نفس طول نصف القطر الذي وجدناه.

الشكل رقم (1-3)



تقلص مساحة سليم لأنها موضوعة على طول اتجاه حركة اللعبة. بينما تقع مساحة جيم على طول دعامة نصف القطر عمودية على اتجاه حركة اللعبة، ولذا فإن طولها لا يتقلص.

والآن عندما يقوم سليم وجيم بحساب نسبة المحيط إلى نصف القطر فقد يجدانها أكبر مما حصلنا عليه، أي أكبر من ضعف قيمة π ($\hat{\tau}$)، حيث إن المحيط قد أصبح أطول بينما ظل نصف القطر كما هو. وهذا أمر غريب. فكيف يمكن في هذا العالم لأي شيء له شكل دائرة أن ينتهك المعتقد الإغريقي الذي يقول بأن هذه النسبة هي بالضبط ضعف قيمة π ($\hat{\tau}$)؟

وفي ما يلي تفسير آينشتاين لذلك. والنتيجة الإغريقية القديمة صحيحة بالنسبة للدوائر المرسومة على سطح مستو. وتماماً كما في حالة المرايا غير المستوية (محدبة ومقعرة أو موجة) في حديقة الملاهي التي تشوه الأبعاد المكانية المعتادة لصورتك، فإن الدائرة المرسومة على سطح غير مستو (موج أو مقعر أو محدب) ستكون نسبتها المكانية مشوهه كذلك: ولن تصبح نسبة المحيط إلى نصف القطر ضعف قيمة π ($\hat{\tau}$).

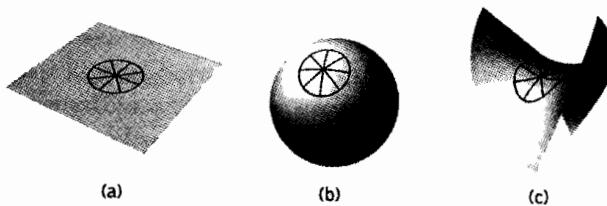
وعلى سبيل المثال، يقارن الشكل رقم (2-3) بين ثلاث دوائر لها نفس نصف القطر. لكنك ستلاحظ أن محيطاتها ليست متساوية. فمحيط الدائرة (ب) المرسومة على سطح كرة أقل من محيط الدائرة المرسومة على سطح مستو (أ)،

على الرغم من أن لهما نفس سمات نصف القطر. وتؤدي طبيعة سطح الكرة المنحنى إلى بعض من التقارب بين خطوط أنصاف قطر الدائرة، الأمر الذي يؤدي بدوره إلى نقص طفيف في محيط الدائرة. ومرة أخرى، فإن محيط الدائرة (ج) المرسومة على سطح منحنٍ - على شكل سرج - سيكون أكبر من ذلك المرسوم على سطح مستو؛ فطبيعة انحناء سطح السرج تتسبب في أن خطوط نصف القطر ستمتد إلى الخارج متباude بعضها عن بعض قليلاً، الأمر الذي يؤدي بدوره إلى زيادة طفيفة في محيط الدائرة. وتعني هذه الملاحظات أن النسبة بين المحيط ونصف القطر في (ب) أقل من 2π (ط). بينما في (ج) فإن النسبة ستكون أكبر من 2π (ط) وخاصة القيمة الأكبر في حالة (ج) وهو بالضبط ما وجدناه في لعبة التورنادو المغزالية. وقد أدى ذلك آينشتاين لطرح فكرة - تحدب المكان - كتفسير لانهak الهندسة الإقليدية "المعتادة". فالهندسة المستوية الإغريقية التي تعلمها التلاميذ لآلاف السنين لا تتطابق ببساطة على شخص يلعب لعبة التورنادو المغزالية. وبالأحرى فإن التعميم حول تحدب المكان كما في (ج) في الشكل رقم (2-3).

(5) إن تحليل لعبة التورنادو، أو كما يطلق عليها في لغة أكثر تقنية "القرص الجامد الدوار"، يؤدي بسهولة إلى بعض اللبس. وفي الحقيقة، وحتى يومنا هذا لا يوجد إجماع عالمي على عدد معقول من سمات هذا المثال. وقد اتبعنا روح تحليل آينشتاين نفسه في المتن، وفي هذا الهاشم نواصل اتخاذ جانب وجهة نظره ونحاول أن نوضح بعض الخواص التي قد نجد أنها تسبب للالتباس. أولاً، قد تسبب لك عدم انكمash محيط اللعبة بنفس الطريقة التي تنكش بها المسطورة ببعض الحرية، وبالتالي عند قياس المحيط بواسطة سليم لن يجد أنه نفس القيمة التي وجدناها في الأصل. وإذا أخذنا في اعتبارنا أننا طوال المناقشة كانت اللعبة تدور باستمرار، ولم نقم بتحليل هذه اللعبة أثناء توقفها، وهكذا من منظورنا كمشاهدين ساكين، فالاختلاف الوحيد بين قياساتنا وقياسات سليم لمحيط اللعبة أن مسطرة سليم قد طرأ عليها انكمash لورنس، وكانت لعبة التورنادو تدور عندما قمنا بقياساتها، وكانت كذلك تدور عندما راقبنا سليم يجري نفس القياسات. وحيث أننا نرى انكمash مسطرته، فإننا نتحقق من أنه علينا وضع المسطورة مرات أكثر لنغطي طول المحيط كله، وبذلك نقيس مسافة أطول، وسيكون انكمash لورنس لمحيط اللعبة شيئاً مناسباً فقط إذا قارنا خواص اللعبة في حالي الدوران والسكون، غير أننا لا نحتاج إلى هذه المقارنة.

ثانياً، وبالرغم من حقيقة عدم حاجتنا لتحليل اللعبة وهي في حالة السكون، فإننا قد نتساءل حول ماذا يحدث عندما تتطاول نم توقف. والآن قد يبدو أن علينا أن نأخذ في اعتبارنا تغير المحيط مع تغير السرعة الناتج من الدرجات المختلفة لانكمashات لورنز. لكن كيف يمكن أن يتمشى هذا مع نصف قطر لا يتغير؟ وهذه مشكلة دقيقة يتوقف حلها على حقيقة أنه لا يوجد جسم "جامد تماماً" في دنيا الواقع. فيمكن للأجسام أن تتمدد وتتوسي وبالتالي تستوعب التمدد والانكمash اللذين تمر بهما، فإذا لم يكن هذا صحيحاً، كما ذكر آينشتاين، فإن القرص الدوار، الذي تكون في الأصل بأن تركنا قطعة من الفائز المنصور تدور لتبرد أثناء حركتها، سيتحطم إذا تغير معدل دورانه وبالتالي. وللحصول على تفاصيل أكثر عن تاريخ القرص الجامد الدوار، انظر: المصدر نفسه.

سيحل محل الهندسة المستوية⁽⁵⁾.



الشكل رقم (2-3)

دائرة مرسومة على سطح كرة (ب) محيطها أقصر من المحيط المرسوم على صفحة مستوية (أ)، بينما للدائرة المرسومة على سطح سرج (ج) محيط أطول، بالرغم من أن للثلاثة نفس نصف القطر.

وهكذا تحقق آينشتاين من أن العلاقات الهندسية المكانية المألوفة والتي صاغها الإغريق وتختص الأشكال المكانية "المستوية" مثل دائرة على سطح منضدة مستوى، لا تنطبق من منظور مشاهد متسارع. وقد نقاشنا نوعاً خاصاً واحداً من الحركة المتتسارعة، لكن آينشتاين قد أوضح أن هناك نتائج مماثلة - تحدب المكان - تصلح في كل حالات الحركة المتتسارعة.

وفي الحقيقة لا تؤدي الحركة المتتسارعة إلى اعوجاج المكان فقط، بل إنها تؤدي كذلك إلى اعوجاج مشابه للزمان. (وتاريخياً ركز آينشتاين اهتمامه أولاً على اعوجاج الزمان، ثم أيقن بعد ذلك بأهمية اعوجاج المكان⁽⁶⁾). ولا يجب أن يكون تأثير الزمان مفاجأة بشكل خاص حيث أنها قد رأينا في الفصل الثاني أن النسبية الخاصة تربط بين المكان والزمان في وحدة واحدة. وقد لخص مينكوفסקי هذا الاندماج في كلمات شعرية قالها سنة 1908، أثناء محاضرة له عن النسبية الخاصة: "وهكذا فإن الزمان بمفرده والمكان بمفرده سيتحولان إلى مجرد ظلال، ولن يحفظ استقلالهما إلا نوع من الاتحاد بين الاثنين"⁽⁷⁾. وفي لغة أبسط لكنها بالمثل غير دقيقة، وينسج المكان والزمان معاً في البنية المتتجانسة للزمكان، تنص النسبية الخاصة على "ما هو صحيح بالنسبة للمكان صحيح للزمان". لكن

(6) سيرى القارئ ذو الخبرة، في مثال لعبة التورنادو، أنه في حالة الإطار المرجعي الذي يدور بانتظام، فإن المقاطع الفضائية ذات الأبعاد الثلاثة المتحدية، والتي ركزنا عليها ستتدخل بعضها مع بعض في زمكان رباعي الأبعاد، سيلاشي تحديه.

Folsing, *Albert Einstein: A Biography*, p. 189.

(7) هيرمان مينكوف斯基، مقتبس من:

هذا الأمر يشير السؤال: في الوقت الذي يمكننا أن نتخيل المكان المعوج لأن له شكلاً محدياً، فما الذي في الواقع يعني بكلمة زمان معوج؟

ولكي نصل إلى الإحساس بالإجابة، لنفرض أنفسنا مرة أخرى على سليم وجيم الموجودين في لعبة التورنادو، ونطلب منهما إجراء التجربة الآتية: يقف سليم بظهره لحائط اللعبة في أحد أطراف دعامات نصف القطر، وسيزحف جيم ببطء في اتجاهه على طول إحدى الدعامات بادئاً من منتصف اللعبة. وسيتوقف جيم عن الزحف بعد كل بضعة أقدام ويقارن الاثنان قراءة الزمن ب ساعتيهما. فماذا سيجدان؟ من موقعنا الساكن، ومن منظورنا من أعلى يمكن أن تنبأ بالإجابة: لن تتفق قراءة الساعتين. وسنصل إلى هذه النتيجة لأننا نونق أن سليم وجيم يتقلان بسرعةتين مختلفتين - في لعبة التورنادو، كلما كنت بعيداً عن مركز دعامة نصف القطر كلما انتقلت مسافة أكبر لتكمل دورة واحدة، ولذلك لا بد أن تكون حركتك أسرع. لكن من منطق النسبية الخاصة، كلما زادت سرعتك فإن دقات ساعتك ستتباطأ، وسنونق أن ساعة سليم ستدق أبطأ من ساعة جيم. وفوق ذلك فإن سليم وجيم سيكتشفان أنه كلما اقترب جيم من سليم فإن معدل دقات ساعة جيم سيتباطأ ليقترب من سرعة دقات ساعة سليم. ويعكس هذا حقيقة أنه كلما ابتعد جيم عن مركز دعامة نصف القطر كلما زادت سرعته الدائرية لتقرب من سرعة سليم.

ونستنتج من ذلك أنه بالنسبة لمشاهد داخل لعبة التورنادو المغزلية مثل سليم وجيم فإن معدل سريان الزمن يعتمد بدقة على موقعيهما - وفي هذه الحالة، يعتمد على بعدهما عن مركز اللعبة. وتفسير ما نعنيه باعوجاج الزمن هو: يكون الزمن معوجاً إذا تغيرت سرعة مروره من موقع إلى آخر. وسيلاحظ جيم كذلك شيئاً آخر له أهمية خاصة في مناقشتنا الحالية كلما زحف على طول دعامة نصف القطر. سيشعر جيم بشد متزايد في اتجاه الخارج، لأنه ليس فقط سرعته هي التي تزيد، بل يتزايد تسارعه كذلك كلما بعد عن مركز اللعبة. وهكذا نجد أنه في لعبة التورنادو يرتبط التسارع الأكبر ببطء الساعات - أي أن التسارع الأكبر يؤدي إلى اعوجاج أكثر وضوحاً في الزمان.

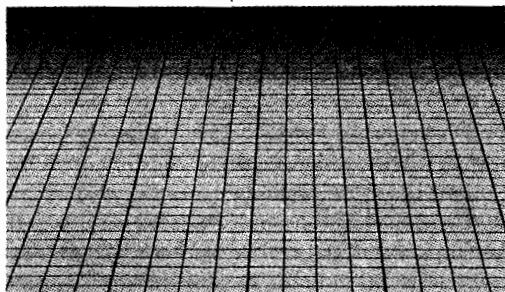
أخذت هذه المشاهدات آينشتاين إلى الوثبة الأخيرة. وحيث أنه قد بين بالفعل أن الجاذبية والحركة المتتسارعة لا يمكن التمييز بينهما، وحيث أنه قد بين أن الحركة المتتسارعة تترافق مع اعوجاج المكان والزمان، فإنه صاغ الاقتراح التالي حول مكتنون "الصندوق الأسود" للجاذبية - الآلة التي تعمل بها الجاذبية. فالجاذبية تبعاً لآينشتاين هي اعوجاج المكان والزمان. ولنـ ما الذي يعني ذلك.

خامساً: قواعد النسبية العامة

حتى نستشعر النظرية الجديدة للجاذبية، سنأخذ في اعتبارنا النموذج الأولي لوضع كوكب مثل كوكب الأرض يدور حول نجم مثل الشمس. وتبعد الجاذبية نيوتن تحفظ الشمس بالأرض في مدار بمجال للجاذبية غير محدد، يمتد لحظياً عبر مسافات شاسعة في الفراغ ليمسك بـ كوكب الأرض (وبالمثل يمتد مجال جاذبية الأرض ليمسك بالشمس). ويعطينا آينشتاين مفهوماً جديداً لما يحدث بالفعل. وسيساعدنا ذلك في مناقشتنا لمدخل آينشتاين في الحصول على نموذج صلب محسوس للزمكان يمكن أن نتعامل معه دون عناء. وحتى نقوم بذلك سنبسط الأمور بطريقتين. أولاً، سنهمل الزمان في اللحظة الآنية ونركز كلية على نموذج المكان. وسنعيد تضمين الزمان في مناقشتنا بعد ذلك. ثانياً، ولنتمكن من رسم صور مرئية والمناورة بها على صفحات هذا الكتاب فإننا غالباً ما سنشير إلى نظير ثانوي للأبعاد للمكان ثلاثي الأبعاد. ومعظم ما سنكتبه من فهم نتيجة التفكير بمدلول النموذج ذي الأبعاد الأقل ينطبق مباشرة على وضع الأبعاد الثلاثة فيزيائياً، وبذا فإن النموذج الأبسط يعطينا وسيلة قوية من الناحية التعليمية.

وقد استخدمنا هذه التبسيطات في الشكل رقم (3-3)، ورسمنا نموذجاً ذو بعدين اثنين لمنطقة فضائية من عالمنا. ويشير التركيب الشبكي إلى وسيلة سهلة لتحديد الموضع تماماً كما تعطي شبكة الشوارع وسيلة لتحديد الموضع في المدينة. وطبعاً في المدينة يستدل على أي عنوان بتحديد موقع شبكة الشوارع ذات البعدين، كما تعطي موقعاً في الاتجاه الرأسي مثل رقم الطابق. إن المعلومة الأخيرة، أي اتجه تحديد الموضع في بعد المكاني الثالث، هي التي يلغيها قياسنا ذو البعدين من أجل وضوح الرؤية.

الشكل رقم (3-3)

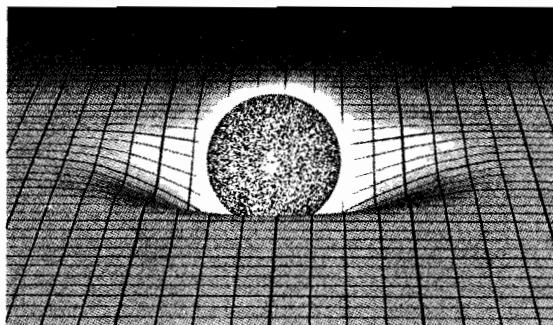


تمثيل تخطيطي لفراغ مستوٍ.

وفي غياب أية مادة أو طاقة، فإن الفراغ كما يراه آينشتاين يكون "مستوياً". وفي النموذج ذي البعدين، فإن هذا يعني أن "شكل" الفراغ لابد أن يشبه سطح منضدة أملس كما هو مرسوم في الشكل رقم (3-3). وهذه هي صورة عالمنا الفضائي التي ظلت مقبولة لآلاف السنين. لكن ما الذي يحدث للفضاء إذا وجد به جسم هائل الكتلة مثل الشمس؟ كان الجواب قبل آينشتاين لا شيء، فالمكان (والزمان) كانوا يعدان بمثابة مبني المسرح الخامل الذي يعد خشبته فقط لتأخذ أحداث العالم مجرها بنفسها عليها. غير أن التسلسل المنطقى لآينشتاين والذي تتبعناه يؤدى بنا إلى نتيجة مختلفة.

يمارس أي جسم ثقيل مثل الشمس، أو أي جسم في الحقيقة، قوة جاذبية على الأجسام الأخرى. وقد تعلمنا من مثال القبلة الإرهابية أن قوة الجاذبية لا يمكن تمييزها من الحركة التسارعية. أما في مثال لعبة التورنادو، فقد تعلمنا أن التوصيف الرياضي للحركة المتتسارعة يتطلب العلاقات الخاصة بالفضاء المكان المحدب. وقد أدت هذه الروابط بين الجاذبية والحركة التسارعية والفضاء المحدب بآينشتاين إلى المقترنات المتميزة بأن وجود كتلة مثل الشمس يتسبب في اعوجاج نسيج الفضاء حولها كما هو موضح بالشكل رقم (4-3). والتшибير المفيد والذي كثيراً ما نلجمأ إليه هو وضع كرة بولينغ فوق غشاء مطاطي في تشبيه لتشوه نسيج الفضاء نتيجة وجود جسم ثقيل مثل الشمس. وتبعاً لهذا الاقتراح الراديكالي فإن الفضاء ليس مجرد مساحة خاملة تمدنا بمسرح لأحداث العالم، بل إن شكل الفضاء يستجيب للأجسام الموجودة في الوسط المحيط.

الشكل رقم (4-3)

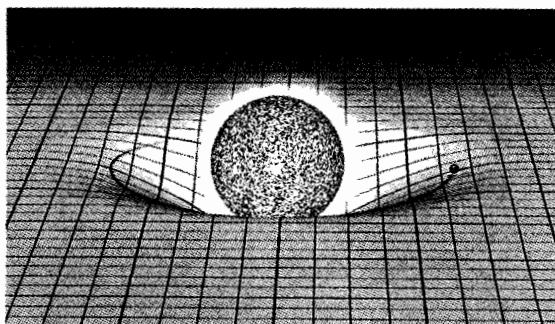


يتسبب جسم ثقيل مثل الشمس في اعوجاج نسيج الفضاء بشكل يشبه تأثير كرة البولينغ عند وضعها على غشاء من المطاط .

ويؤثر هذا الاعوجاج بدوره في الأجسام الأخرى التي تتحرك بالقرب من الشمس، حيث أن عليها الآن أن تعبّر النسيج الفضائي المشوه. وباستخدام التشبيه بكرة البولينغ والغشاء المطاطي، فإننا لو وضعنا كرة صغيرة محملة على الغشاء ودفعناها بسرعة مبدئية صغيرة، فإن المسار الذي ستسلكه سيتوقف على ما إذا كانت كرة البولينغ موجودة في المركز أم لا. فإذا كانت كرة البولينغ غير موجودة فإن الغشاء المطاطي سيكون مستوياً، وستنتقل الكرة الصغيرة في خط مستقيم. أما إذا كانت كرة البولينغ موجودة وبالتالي سيعوج الغشاء، فإن الكرة الصغيرة ستنتقل في مسار منحنٍ. وفي الحقيقة، إذا أهملنا الاحتكاك، وإذا وضعنا الكرة الصغيرة ودفعناها لتشعر بالسرعة المناسبة وفي الاتجاه الصحيح، فإنها ستستمر في الحركة في مسار منحنٍ متكرر حول كرة البولينغ - وفي الحقيقة فإنها "ستتجه إلى مدار". وتبشر لغتنا بتطبيق هذا التشبيه على الجاذبية.

تتسبب الشمس، مثل كرة البولينغ، في اعوجاج الفضاء المحيط بها، بينما تشبه حركة الأرض حركة الكرة الصغيرة وتعتمد على شكل الاعوجاج. أما الأرض فهي مثل الكرة الصغيرة تتحرك في مدار حول الشمس إذا كانت سرعتها ووجهتها مناسبتين. ونطلق عادة على هذا التأثير في حركة الأرض اسم تأثير جاذبية الشمس وهو الموضع في الشكل رقم (5-3). والفرق الآن هو أن آينشتاين، على عكس نيوتن، قد حدد آلية انتقال الجاذبية: وهي اعوجاج الفضاء. ومن وجهة نظر آينشتاين فإن مجال الجاذبية الذي يمسك بالأرض في مدارها ليس فعلاً لحظياً غامضاً للشمس، بل هو اعوجاج النسيج الفضائي الذي تسبب به وجود الشمس.

الشكل رقم (5-3)



تظل الأرض في مدار حول الشمس لأنها تدور على طول واد في النسيج الفضائي الموج. وبلغة أكثر دقة، فإنها تبع "مساراً ذا المقاومة الأقل" في الطاق المشوّه حول الشمس.

وتسمح لنا هذه الصورة بفهم السمتين الأساسيةن للجاذبية بشكل جديد. أولاً، كلما زادت كتلة كرة البولينغ، كلما زاد التشوّه الذي تسببه في الغشاء المطاطي. وبالمثل، في وصف آينشتاين للجاذبية، كلما زادت كتلة الجسم كلما زاد التشوّه الذي يحدثه في الفضاء المكان المحيط به. ويعني ذلك أنه كلما زادت كتلة الجسم زاد تأثير الجاذبية التي يمارسها على الأجسام الأخرى، وهو بالضبط ما يتفق مع خبراتنا. ثانياً، تماماً كما فعل التشوّه الناتج عن كرة البولينغ كلما بعدنا عنها، فإن مقدار الأعوجاج الفضائي الناتج من جسم ثقيل مثل الشمس يقل كلما بعدنا عنه. وينسجم ذلك مرة أخرى مع مفهومنا عن الجاذبية التي يضعف تأثيرها أكثر وأكثر كلما زادت المسافة بين الأجسام.

ولابد أن نذكر نقطة هامة هي أن الكرة الصغيرة نفسها تتسبب باعوجاج الغشاء المطاطي ولو بدرجة طفيفة. وبالمثل فإن الأرض كونها جسمًا ذا كتلة فهي تتسبب أيضاً في اعوجاج النسيج الفضائي ولو بدرجة ضئيلة جداً مقارنة بالشمس. وبلغة النسبة العامة فإن هذا هو ما يجعل الأرض تمسك بالقمر في مداره، وما يجعل الأرض تحفظ بكل ملتصقاً بسطحها. وكما يختلف متزلك الفضاء الفضائي الذي تسببه كتلة الأرض. وفوق ذلك، فإن كل منا - مثل أي جسم ذي كتلة - يسبب اعوجاجاً في النسيج الفضائي يتناسب مع أجسامنا، على الرغم من أن الكتلة الصغيرة نسبياً لجسم الإنسان تجعل هذا التأثير ضئيلاً للغاية.

وباختصار، يتفق آينشتاين تماماً مع مقوله نيوتن "لابد من عامل مسبب للجاذبية"، لكنه قبل تحدي نيوتن الذي ترك فيه تحديد هذا العامل "لعناية قرائي". وعامل الجاذبية وفقاً لآينشتاين هو نسيج الكون.

سادساً: قليل من التحذيرات

يعد التشبيه بالغشاء المطاطي وكمة البولينغ قيماً لأنه يعطينا صورة مرئية يمكن بواسطتها أن ندرك ما نعنيه بالاعوجاج في نسيج العالم. ويستخدم علماء الفيزياء غالباً هذه التشبيهات وتشبيهات أخرى مماثلة لترشد حدهم بالنسبة للجاذبية والتحذب. وعلى الرغم من فائدة التشبيه بالغشاء المطاطي وكمة البولينغ إلا أنها ليست كاملة، وللتوضيح سلفت الانتباه لبعض نقاط الضعف.

فأولاً، عندما تسبب الشمس اعوجاج نسيج الفضاء المكان من حولها فإن ذلك لا يرجع إلى "شدّها إلى أسفل" بواسطة الجاذبية كما في حالة كرة البولينغ،

التي تسبب اعوجاج الغشاء المطاطي لأنها مشدودة في اتجاه الأرض بالجاذبية. أما في حالة الشمس فلا يوجد أي جسم آخر ليقوم بعملية "الشد". وفي المقابل فقد علمنا آينشتاين أن اعوجاج الفضاء المكان هو نفسه الجاذبية. ويتساءب مجرد وجود جسم ذي كتلة في اعوجاج الفضاء كرد فعل. وبالمثل، لا تحفظ الأرض بمدارها لأن هناك بعض الأجسام الخارجية التي تمارس عليها شدًا جاذبياً على طول وديان الوسط الفضائي المعوج، كما في حالة الكرة الصغيرة على الغشاء المطاطي المعوج. وبدلًا من ذلك فقد بين آينشتاين أن الأجسام تتحرك خلال الفضاء المكان (خلال الزمكان بدقة أكثر) على طول أقصر المسارات الممكنة - أي "أسهل" المسارات الممكنة، "أو أقلها مقاومة". فإذا كان الفضاء معوجاً فإن مثل هذه المسارات ستتحدد. وهكذا، وعلى الرغم من أن نموذج الغشاء المطاطي وكمة البولينغ يعطينا تشبيهاً مرئياً جيداً للكيفية التي يمكن بها لجسم مثل الشمس أن يسبب اعوجاج الفضاء من حوله، وبالتالي يؤثر في حركة الأجسام الأخرى، إلا أن الآلية الفيزيائية التي تحدث بها تلك التشوّهات مختلفة تماماً. وتrocق الآلية الأولى لحدسنا عن الجاذبية في الإطار التقليدي لنيوتون، بينما تعيد الآلية الثانية صياغة الجاذبية بدلول تحديد الفضاء.

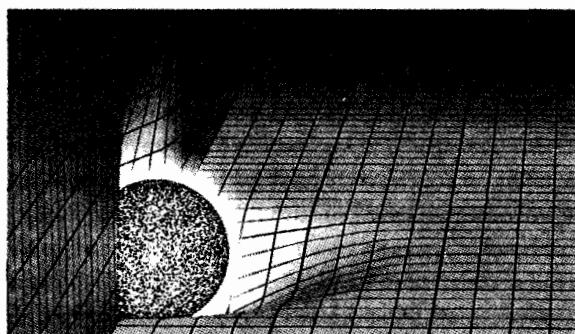
وبناءً نقطة الضعف الثانية للتخييب بالغشاء المطاطي وكمة البولينغ من كون الغشاء المطاطي ذا بعدين. وفي الواقع، مع أنه أمر يصعب تخيله، إلا أن الشمس (وكل الأجسام ذات الكتلة الكبيرة الأخرى) تسبب اعوجاجاً للفضاء ذي الأبعاد الثلاثة المحيط بها. والشكل رقم (3-6) محاولة بدائية لتصور هذا؛ فالفضاء المحيط بالشمس يعني نفس نوع التشوّه سواء كان أسفل، أو على الجوانب، أو أعلى. وبصور الشكل رقم (3-6) تخطيطاً لعينة جزئية لذلك. وينتقل جسم مثل الأرض "خلال" الوسط الفضائي ثلاثي الأبعاد المعوج الناتج من وجود الشمس. وربما تجد أن هذا الشكل مربك - فلماذا لا تندفع الأرض إلى "الجزء الرئيسي" من الفضاء المكان المحدب في الصورة؟ ولتأخذ في اعتبارك أن الفضاء ليس حاجزاً مادياً مثل الغشاء المطاطي. وبدلًا من ذلك، فإن الشبكات المعوجة في الصورة ليست سوى شرائحة دقيقة تتخلل الفضاء ثلاثي الأبعاد المعوج الذي تنغمس فيه تماماً وتتحرك بحرية أنت والأرض وكل شيء آخر. وربما تجد أن هذا الأمر يزيد من صعوبة المشكلة: لماذا لا نشعر بالفضاء إذا كنا منغمسين داخل نسيجه؟ لكننا نشعر به. نحن نشعر بالجاذبية، وبأن الفضاء هو الوسط الذي تنتقل بواسطته قوة الجاذبية. وكما كان يقول عالم الفيزياء المتميّز جون ويلز John

Wheeler واصفاً الجاذبية: "تمسك الكتلة بالفضاء المكان لتخبره كيف يتحدد، بينما يمسك الفضاء المكان بالكتلة ليخبرها كيف تتحرك".⁽⁸⁾

أما نقطة الضعف الثالثة في هذا التشبيه فهي أننا أهملنا بعد الزمن. وقد فعلنا ذلك لتوضيح الرؤية، لأنه بالرغم من ادعاء النسبية الخاصة بأننا يجب أن نفكّر في بعد الزمانِ جنباً إلى جنب مع الأبعاد الفضائية الثلاثة المألوفة، إلا أنه من الصعب تماماً "رؤية" الزمان. غير أنه، وكما صورنا في مثال لعبة التورنادو، فإن التسارع - وبالتالي الجاذبية - تسبب اعوجاج كل من الفضاء والزمان. (في الحقيقة، تبين رياضيات النسبية العامة أنه في حالة حركة جسم بطيء نسبياً مثل دوران الأرض حول نجم نموذجي مثل الشمس، فإنه في الواقع يكون لاعوجاج الزمان تأثيراً على حركة الأرض أكثر كثيراً من اعوجاج الفضاء). وسنعود لمناقشة اعوجاج الزمان بعد الفقرة التالية.

وطالما أنك تحتفظ في ذاكرتك بهذه التحذيرات الثلاثة الهامة، فإنه من المقبول تماماً أن نستخدم صورة الفضاء المكان المعوج التي تزودنا بها كرة البولينغ فوق الغشاء المطاطي كموجز حديسي لرؤية آينشتاين الجديدة للجاذبية.

الشكل رقم (6-3)



عينة للفضاء ثلاثي الأبعاد المعوج الذي يحيط بالشمس.

سابعاً: حل التناقض

وبإدخال الفضاء والزمان كعاملين ديناميكيين، أوجد آينشتاين صورة ذهنية واضحة لكيفية عمل الجاذبية. ومع هذا، يظل السؤال المحوري هو ما إذا كانت

(8) مقابلة مع جون ويلر John Wheeler، في 27 كانون الثاني / يناير 1998.

إعادة صياغة قوة الجاذبية قد حللت التناقض مع النسبية الخاصة، الذي يعيّب نظرية نيوتن للجاذبية. نعم. ومرة ثانية، يعطينا التشبيه بالغشاء المطاطي الفكرة الأساسية. تخيل أن هناك كرة صغيرة تندحر في خط مستقيم على سطح غشاء مستوٍ في غياب كرة البولينغ. وبمجرد وضع كرة البولينغ فوق الغشاء ستتأثر حركة الكرة الصغيرة، ولكن ليس "لحظياً". وإذا صورنا تتابع الأحداث هذا في شريط سينمائي وعرضناه بالحركة البطيئة، فسنشاهد أن الأضطراب الناتج من وضع كرة البولينغ ينتشر مثل التموجات فوق سطح البركة وسيصل في النهاية إلى موضع الكرة الصغيرة. وبعد فترة وجيزة ستخدم الاهتزازات فوق السطح المطاطي مخلفة وراءها غشاء معوجاً ساكناً.

وينطبق نفس الشيء على النسيج الفضائي. ففي عدم وجود أية كتلة يكون الفضاء مستوياً، وسيستقر أي جسم صغير بسعادة أو سيتقل بسرعة ثابتة فيه. أما إذا وجد جسم ذو كتلة كبيرة على الساحة، فإن الفضاء سيعوج - لكن مثل حالة الغشاء، فإن التشوه لن يكون لحظياً. بل سيتشر إلى الخارج مبتعداً عن الجسم الكثيف، ليستقر في النهاية داخل شكل معوج ينclip شد الجاذبية لهذا الجسم الجديد. وفي تشبيهاتنا فإن اضطرابات الغشاء المطاطي تنتقل بسرعة يحددها التركيب المادي الخاص بها. وفي الواقع النسبي للنسبية العامة، يمكن آينشتاين من حساب سرعة انتقال اضطرابات في نسيج العالم، ووجد أنها تنتقل بسرعة متساوية بالضبط لسرعة الضوء. ويعني هذا مثلاً في المثال الافتراضي الذي ناقشناه مسبقاً والذي فيه يؤثر زوال الشمس في الأرض بإحداث تغيرات ناتجة من الشد المتبادل بينهما بالجاذبية. ولن يظهر هذا التأثير لحظياً. بل مثلما يغير جسم من موضعه أو حتى ينفجر إلى أسلاء فسيتسبب ذلك في تغيير التشوه في النسيج الزمكاني الذي ينتشر إلى الخارج بسرعة الضوء، خاصعاً في ذلك للحد الأعلى للسرعة الكونية تبعاً للنسبية الخاصة. وبذل إفاننا على كوكب الأرض سندرك تحطم الشمس في نفس اللحظة التي سنشعر فيها بآثار الجاذبية - حوالي ثمانى دقائق بعد انفجارها. وبذلك تحل صياغة آينشتاين لهذا التناقض؛ وتسرير اضطرابات الجاذبية متوافقة مع الفوتونات ولا تسبقها.

ثامناً: مرة أخرى اعوجاج الزمان

تمثل الصور في الأشكال أرقام (2-3)، (3-4)، و(3-6) ما الذي يعنيه "اعوجاج الفضاء". فالاعوجاج يشوّه شكل الفضاء وقد ابتكر علماء الفيزياء صوراً مشابهة في محاولة لتوضيح معنى "اعوجاج الزمان"، غير أن حل شفرة هذه

الصور كان في غاية الصعوبة، الأمر الذي جعلنا لا نستخدمها هنا. وبدلاً من ذلك سنتعيين بمثال سليم وجيم في لعبة التورنادو، ونحاول أن نصل إلى إدراك كنه أوجاج الزمان بفعل الجاذبية.

ولتفعل ذلك سنعود مرة أخرى إلى جورج وغريس اللذين أصبحا سابحين بالقرب من المنطقة المحيطة بالمجموعة الشمسية وليسا في ظلمات الفضاء الخارجي كما كانوا من قبل. وما زالا يحملان ساعتين رقميتين متزامنتين على بذلتى الفضاء. وللتبسيط، فإننا سنهمل تأثير الكواكب ونأخذ في اعتبارنا فقط مجال جاذبية الشمس. ولنستمر في الخيال، نفترض وجود سفينة فضاء تحوم بالقرب من جورج وغريس، وأنها مدت حبلًا طويلاً يصل إلى قرب سطح الشمس. وسيستخدم جورج هذا الحبل ليهبط ببطء نحو الشمس. وأثناء ذلك كان يتوقف بين فترة وأخرى ليقارن معدل سريان الزمن على ساعتيهما. ويعني أوجاج الزمان الذي تنبأت به النسبة العامة لآينشتاين أن ساعة جورج ستسير أبطأ فأبطأ مقارنة بساعة غريس كلما أصبح مجال الجاذبية الذي يوجد فيه أقوى فأقوى. أي أنه كلما اقترب أكثر من الشمس ستزداد سرعته ببطءً. وهكذا، فإن الجاذبية تشوّه الزمان كما تفعل بالفضاء.

ولابد أن نلاحظ أن الوضع الحالي ليس به تماثل بين جورج وغريس على عكس الحالة الواردة في الفصل الثاني، حيث كان الاثنان يتحركان بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضهما في فضاء خاوي. وسيشعر جورج بزيادة قوة الجاذبية أكثر فأكثر على عكس غريس، وعليه أن يقبض على الحبل بشدة أكثر وأكثر كلما اقترب من الشمس ليتجنب الانجداب إليها. ويتفق الاثنان أن ساعة جورج هي الأبطأ. وليس هناك "منظور على نفس درجة الصحة" يمكن به أن يتبادلا الأدوار ويعكس النتيجة. كان هذا في الحقيقة هو ما وجدناه في الفصل الثاني عندما خضع جورج للتسارع بعد إشعاله للصاروخ المثبت على ظهره ليلحق بغريس. وقد نتج من التسارع الذي شعر به جورج ببطء حاسم في ساعته بالنسبة لساعة غريس. وحيث أننا نعلم الآن أن الشعور بالحركة المتتسارعة هو نفسه الشعور بقوة الجاذبية، فإن الوضع الحالي لجورج على الحبل يتضمن نفس المبدأ. ومرة أخرى نرى أن ساعة جورج وكل شيء آخر في حياته يسير بحركة أبطأ عند المقارنة بغريس.

في مجال جاذبية مثل المجال على سطح نجم عادي كالشمس، يكون التباطؤ في سير الساعات صغيراً جداً. فإذا كانت غريس مستقرة على بعد مليار ميل من الشمس، وعندما يكون جورج قد اقترب لمسافة بضعة أميال من سطح الشمس، فإن معدل دقات ساعته سيصبح حوالي 99,9998 بالمائة من معدل دقات

ساعة غريس أبطأ، لكن ليس كثيراً⁽⁹⁾. وإذا هبط جورج بواسطة جبل ليحوم قريباً جداً من سطح نجم نيوتروني مساوٍ في كتلته لكتلة الشمس، وأنه قد انسحق لتتصبح كثافته (النجم النيوتروني) بضعة ملايين مليارات المرات أكبر من كثافة الشمس، فإن مجال الجاذبية الأكبر هذا سيتسبب في أن ساعة جورج ستدق بمعدل حوالي 76٪ من ساعة غريس. أما مجالات الجاذبية الأقوى مثل تلك الموجودة خارج ثقب أسود مباشر (كما سنتناوش ذلك في ما بعد)، فستحدث تباطؤً أكثر في سريران الزمن، وسيتسبب معدل الجاذبية الأقوى في اعوجاج أكثر قسوة للزمن.

تاسعاً: التحقق التجريبي من النسبة العامة

أسرت النسبة العامة معظم من درسوها برشاقتها الجميلة. فقد قام آيشتاين بإحلال وجهة نظر نيوتن الميكانيكية الجافة عن الفضاء والزمان والجاذبية بوصف هندسي ديناميكي يتضمن الزمان المحدب. وقد غزل آيشتاين الجاذبية في النسبية الأساسية للعالم. وبدلًا من فرض الجاذبية كبنية إضافية، فقد أصبحت جزءاً من العالم في أكثر مستوياته الأساسية. وقد تطبع من بعث الحياة في الفضاء والزمان، أن سمحنا لهما بأن يتحدباً ويعوجاً ويتموجاً، ما أصبحنا نشير إليه بصورة عامة باسم الجاذبية.

وإذا نحنينا الجمال جانباً، فإن الاختبار النهائي لنظرية فيزيائية هو مقدرتها على تفسير الظواهر الفيزيائية والتنبؤ بها بدقة. وقد نجحت نظرية نيوتن للجاذبية في هذا الاختبار نجاحاً باهراً عند ظهورها في نهاية القرن السابع عشر وحتى بداية القرن العشرين. وسواء طبقت على الكرات المقذوفة في الهواء أو الأجسام التي

(9) وبالرغم من هذا فإن الساعات الذرية الحالية دقيقة بما فيه الكفاية لتكشف مثل هذه الاعوجاجات الدقيقة - أو حتى الأكثر منها دقة. فمثلاً في سنة 1976، قام كل من روبرت فيسول Robert Vessol ومارتين ليفين Martin Levine من مرصد هارفارد-سميثonian الفلكي الفيزيائي بالاشتراك مع معاونين من وكالة الطيران والفضاء (ناسا) بإطلاق صاروخ سكوت D من جزيرة والويس بفيرجينيا. كان الصاروخ يحمل ساعة ذرية دقيقة تصل دقتها إلى حوالي جزء من تريليون من الثانية في الساعة. وكانوا يأملون في إثبات أنه كلما ارتفع الصاروخ (وبالتالي يقل تأثير شد الجاذبية الأرضية عليه) فإن ساعة مماثلة موجودة على الأرض ومعرضة لنقوى الجاذبية الكاملة ستدق بشكل ابطأً وبواسطة إشارات ميكرووية في اتجاهين استطاع الباحثون مقارنة معدل دقات الساعتين الذريتين، وقد اتضح بالفعل أن الساعة الذرية الموجودة على ارتفاع 6000 ميل تدق أسرع بقدر 4 أجزاء في المليار مقارنة بمثيلتها على الأرض، الأمر الذي يتفق مع التنبؤات النظرية بدقة أعلى من 0.01٪ (جزء من مائة في المائة).

تهوي من الأبراج المائلة أو المذنبات التي تدور في دوامات حول الشمس أو دوران الكواكب في مداراتها الشمسية، فقد قدمت نظرية نيوتن تفسيرات في غاية الدقة لكل هذه الملاحظات، كما أنها تبأت بأشياء تحققت في عدد لا يحصى من المرات، وفي الكثير من المواقف. وكان الدافع وراء التساؤل، كما أكدنا من قبل، حول هذه النظرية الناجحة تجريبياً هو خاصية الانتقال اللحظي لقوة الجاذبية الذي يتعارض مع النسبية الخاصة.

ومع أن تأثير النسبية الخاصة يعد محورياً للفهم الأساسي للفضاء والزمان والحركة، إلا أنه ضئيل جداً في عالم السرعات البطيئة الذي نعيش فيه عادة. وبالمثل فإن الحيوان بين النسبية العامة لأينشتاين - نظرية للجاذبية توافق مع النسبية الخاصة - ونظرية نيوتن للجاذبية هو الآخر صغير جداً في معظم المواقف العامة. وهذا أمرٌ جيد وسيء في نفس الوقت. وهو جيد لأن آية نظرية تتوهم أنها ستحل محل نظرية نيوتن للجاذبية من الأفضل لها أن تتجه في ما سبق أن أكدته تجربياً نظرية نيوتن. وهو سيء لأنه يجعل من الحكم بين النظريتين تجربياً أمراً صعباً. ويطلب الحكم بين نظريتي نيوتن وأينشتاين أجهزة في غاية الدقة لاستخدامها. في تجارب حساسة جداً للطرق التي تختلف فيها النظريتان. فإذا قذفت بكرة بيسوبول فإن أيّاً من النظريتين يمكن أن يتباين بمكان سقوط الكرة، لكن الإجابة ستختلف اختلافاً ضئيلاً لدرجة أنه لا يمكننا اكتشافه تجربياً بإمكاناتنا المتاحة. والمطلوب تجربة أكثر ذكاءً، وقد اقترحها آينشتاين⁽¹⁰⁾.

نحن نرى النجوم ليلاً، لكنها بالطبع موجودة أثناء النهار. لكننا عادة لا نراها لأن ضوء الشمس يطغى على ضوئها الضئيل والبعيد. وأنباء كسوف الشمس فإن

(10) في متتصف القرن النابع عشر اكتشف العالم الفرنسي إيربان جان جوزيف ليفريه (Urbain Jean Le Verrier) أن كوكب عطارد يحيد قليلاً عن مداره حول الشمس، الأمر الذي يتباين به قانون الجاذبية لنيوتن. وعلى مدى أكثر من نصف قرن استهللت التفسيرات لهذا الانحراف كل الاحتمالات. تقدم حضيض مدار عطارد نحو الشمس (ويبلغ أبساط فإن ذلك يعني أنه في نهاية كل دورة لا يصل عطارد إلى النقطة التي تتبأ بها نظرية نيوتن) - تأثير جاذبية كوكب لم يكتشف بعد أو حلقة من الكويكبات أو قمر لم يكتشف بعد أو تأثير الغبار الكوني أو تأثير انبعاث الشمس - إلا أنها جميعاً لم تحظ بقناعة تكفيها القبول العام. في سنة 1915، حسب آينشتاين تقدم الحضيض الشمسي لكوكب عطارد مستخدماً معادلات النسبية العامة الجديدة، ووجد إجابة أسعدت وجيب قلبه، على حد قوله: «تطابقت تماماً نتائج النسبية العامة مع الملاحظات. كان هذا النجاح بالتأكيد واحداً من الأسباب الواضحة التي أعطت آينشتاين ثقة كافية في نظريته، لكن معظم الآخرين انتظروا تأكيداً لهذه التنبؤات وليس مجرد تفسير لأنحراف معروف مسبقاً. ولمزيد من التفاصيل، راجع Abraham Pais, "Subtle is the Lord": The Science and The Life of Albert Einstein (Oxford; New York: Oxford University Press, 1982), p. 253.

القمر يحجب ضوءها مؤقتاً ويصبح من الممكן رؤية النجوم البعيدة. ومع ذلك فإنه ما زال لوجود الشمس تأثير. ولابد أن يعبر الضوء القادم من بعض النجوم البعيدة بالقرب من الشمس وهو في طريقه إلى الأرض. وتتنبأ النسبية العامة لآينشتاين بأن الشمس ستسبب اعوجاجاً للفضاء والزمان، وأن مثل هذا التشوه سيؤثر في مسار ضوء النجم". وفي النهاية، فإن الفوتونات القادمة من مصدر بعيد تتنقل على طول نسيج العالم، فإذا كان هذا النسيج معوجاً، فسيؤثر ذلك في حركة الفوتون بالضبط كما يتأثر الجسم المادي. ويكون انحناء مسار الضوء هو الأكبر للإشارات الضوئية التي تكاد تماس الشمس وهي في طريقها إلى الأرض. ويمكّنا الكسوف الشمسي من رؤية مثل هذا التلامس بين الشمس وضوء النجم من دون أن يطمسه ضوء الشمس نفسه.

ويمكن قياس زاوية الانحناء مسار الضوء بطريقة بسيطة. فانحناء مسار ضوء النجم يؤدي إلى إزاحة في الموضع "الظاهري" للنجم. ويمكن قياس هذا الانحراف بدقة بمقارنة الموضع الظاهري بالموضع الفعلي لنفس النجم والمعروف من رصد النجوم ليلاً (في غياب تأثير الاعوجاج الذي ينبع من الشمس)، والذي يجري عندما تكون الأرض في موضع مناسب، أي حوالي ستة أشهر قبل أو بعد الكسوف. وفي تشرين الثاني/نوفمبر 1915 استخدم آينشتاين مفهومه الجديد عن الجاذبية لحساب زاوية الانحناء التي ستلامس بها بالكاد إشارة ضوء النجم الشمسي، ووجد أنها حوالي $0,00049$ من الدرجة ($1,75$ ثانية، والثانية في الزوايا هي $\frac{1}{3600}$ من الدرجة). وهذه الزاوية الصغيرة جداً تساوي الزاوية التي يصنعها سمك قطعة نقود معدنية ($1/4$ دولار) إذا وضعتها على بعد مليون من المشاهد رأسياً. وقد كان قياس مثل هذه الزاوية الصغيرة في متناول تقنية ذلك الوقت. وتحت إلحاح من سير فرانك دايسون مدير مرصد غرينويتش، نظم سير آرثر إدينغتون، الفلكي المشهور وسكرتير الجمعية الملكية للفلك بإنكلترا، بعثة استكشاف إلى جزيرة برنسип الواقع على الساحل الغربي لإفريقيا وذلك لاختبار تنبؤات آينشتاين أثناء كسوف الشمس يوم 29 أيار/مايو 1919.

وفي 6 تشرين الثاني/نوفمبر 1919، وبعد حوالي خمسة أشهر من تحليل الصور المأخوذة أثناء كسوف الشمس في جزيرة برنسيب (وصور أخرى للكسوف التقطت بواسطة فريق بريطاني آخر بقيادة تشارلز دافيدسون وأندرو كرومبلين في سوبرال بالبرازيل) تم الإعلان في اجتماع مشترك بين الجمعية الملكية والجمعية الفلكية الملكية أن تنبؤات آينشتاين القائمة على النسبية العامة قد تأكدت. وقد استغرق انتشار هذا النجاح - قلب مفاهيمنا عن المكان والزمان تماماً - خارج

نطاق مجتمع الفيزياء بعض الوقت، الأمر الذي جعل من آينشتاين شخصية مشهورة في جميع أنحاء العالم. وقد جاءت افتتاحية جريدة لندن تايمز يوم 7 تشرين الثاني / نوفمبر 1919 بالبنط الكبير، كما يلي:

"ثورة في العلوم - نظرية جديدة عن العالم - نسف أفكار نيوتن".⁽¹¹⁾

وكانَت هذه لحظة المجد لآينشتاين.

وفي السنوات التي تلت هذه التجربة، خضعت تأكيدات إدينغتون للنسبة العامة لتدقيق حرج. وقد جعلت الصعوبات العديدة ودقة إجراء القياس في هذه التجربة من الصعب تكرارها مرة أخرى، وأوجدت بعض التساؤلات في ما يتعلق بأحقيّة التجربة الأصلية في المصداقية. إلا أنه خلال الأربعين سنة الأخيرة وباستخدام التقدّم التكنولوجي، تم اختبار السمات العديدة للنسبية العامة بدقة عالية بواسطة مجموعة متنوعة من التجارب. وقد تم التأكيد بصورة رائعة من تنبؤات النسبية العامة. ولا يوجد بعد الآن أي شك في أن وصف آينشتاين للجاذبية ليس فقط متافقاً مع النسبة الخاصة، لكنه يعطي تنبؤات أقرب للنتائج التجريبية من تلك التي تعطيها نظرية نيوتن.

عاشرًا: الثقوب السوداء والانفجار الهائل وتمدد الفضاء

ويبينما تظهر النسبية الخاصة جلياً عندما تتحرك الأشياء بسرعات عالية، فإن النسبية العامة تصبح جلية واضحة عندما تصبح الأشياء ذات كتلة كبيرة ويصبح الاعوجاج في الفضاء والزمان بالتالي محسوساً. ولنشرح هنا مثالين.

المثال الأول اكتشاف تم بواسطة الفلكي الألماني كارل شوارتزشایلد، عندما كان يدرس اكتشافات آينشتاين في الجاذبية أثناء قيامه بحسابات مسار قذائف المدفعية على الجبهة الروسية أيام الحرب العالمية الأولى سنة 1916. وقد تمكّن شوارتزشایلد من استخدام النسبية العامة بذكاء بمجرد مضي عدة شهور فقط على وضع آينشتاين لمساته الأخيرة عليها. اكتسب شوارتزشایلد فهماً كاملاً ودقيناً للكيفية التي يعوج بها الفضاء والزمان قريباً جداً من نجم تام التكروز. وقد أرسل شوارتزشایلد بنتائجها من الجبهة الروسية إلى آينشتاين الذي قام بدوره بتقديمها للأكاديمية البروسية نيابة عن شوارتزشایلد.

وفي ما عدا التأكيد الرياضي ودقته التي جعلت الاعوجاج - الذي صورنا

Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution (11) in Twentieth-Century Physics*, rev. ed. (New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996), p. 39.

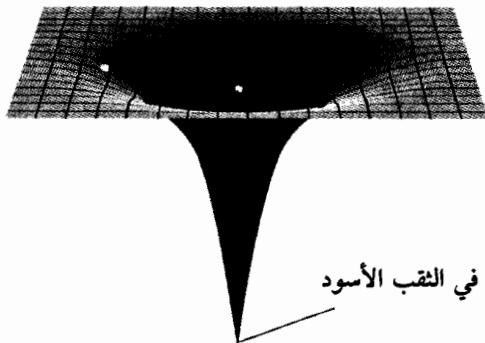
تخطيطاً له في الشكل رقم (3-5) - أكثر دقة، فإن أعمال شوارتزشایلد - التي أصبحت معروفة الآن باسم "حل شوارتزشایلد" - قد كشفت النقاب عن تطبيقات مذهلة للنسبية العامة. وقد بين أنه إذا ركزت كتلة نجم في نطاق كروي صغير للدرجة التي يصبح فيها ناتج قسمة الكتلة على نصف القطر رقمًا يتتجاوز قيمة حرجة معينة، فإن الأعوجاج في الزمكان الناتج من ذلك سيكون من الشدة لدرجة أن أي شيء، بما في ذلك الضوء، يقترب بشدة من هذا النجم لن يتمكن إطلاقاً من الهرب من قبضة جاذبيته. ولأن الضوء - حتى الضوء - لا يمكن من الهرب من مثل هذه "النجوم المضغوطة" فقد أطلق عليها في البداية النجوم "المظلمة" أو "المجمدة". وقد صك جون ويلر في ما بعد اسمًا أكثر ألفة هو "الثقوب السوداء" - وهي سوداء لأنها لا تسمح بمرور الضوء، وثقوب لأن أي شيء يقترب منها سيسقط فيها من دون رجعة. وقد لصق بها هذا الاسم.

وقد صورنا حل شوارتزشایلد في الشكل رقم (3-7). ومع أن للثقوب السوداء سمعة بشعة، فإن الأجسام التي تمر على "مسافة آمنة" منها ستحيد بنفس الشكل كما لو كانت تمر على نجم عادي، لستمر في طريقها. لكن الأجسام مهما كان تركيبها، والتي تقترب أكثر من اللازم - أقرب مما يطلق عليه أفق الحدث (Event Horizon) للثقب الأسود - فإن مصيرها الاقتراض، وستتجذب بعاد في اتجاه مركز الثقب الأسود، وستعرض لضغوط جاذبية تتزايد باستمرار لتسحقها في النهاية. فمثلاً، إذا وضعت قدمك أولاً داخل أفق الحدث، وعند اقترابك أكثر من مركز الثقب الأسود، ستتجدد نفسك متزعجاً في اطراد. وستزداد قوة جاذبية الثقب الأسود بشكل هائل لدرجة أن شدتها لقدمك سيكون أكبر كثيراً من شدتها لرأسك (حيث أنك قد أدخلت قدمك أولاً فستكون هي الأقرب دائماً من رأسك بالنسبة لمركز الثقب الأسود)؛ وفي الواقع سيكون هذا الشد على درجة من القوة بحيث أنك س تستطيل للدرجة التي سيتمكن فيها جسدك بسرعة إلى أشلاء.

وعلى العكس من ذلك، إذا كنت أكثر حنكة في جولتك بالقرب من الثقب الأسود، وكانت حريصاً بشدة لا تخطي أفق الحدث، فيمكنك استغلال الثقب الأسود في عمل مدهش. تخيل، مثلاً، أنك ستكتشف ثقباً أسود كتلته أكبر من الشمس بحوالي ألف مرة، وأنك ستقترب بواسطة حبل لمسافة بوصة واحدة من أفق الحدث للثقب الأسود، تماماً كما فعل جورج بالقرب من الشمس. تتسبب مجالات الجاذبية، كما ناقشنا من قبل، في اعوجاج الزمان، ويعني ذلك أن الزمن سيتطابق بالنسبة لك. وفي الحقيقة، وحيث أن للثقوب السوداء مجالات جاذبية قوية، فإن مرور الزمن بالنسبة لك سيتطابق أكثر وأكثر. وستدق ساعتك عشرة آلاف

مرة تقربياً أبطأ من ساعة أصدقائك الموجودين على الأرض، وإذا كنت ستحروم قريباً جداً فوق أفق الحدث للثقب الأسود بهذه الطريقة لمدة عام، ثم تسلقت الجبل عائداً إلى سفينة الفضاء المكان لتقضى رحلة قصيرة ترفيهية في الوطن، فإنك ستكتشف بمجرد وصولك إلى الأرض أنه قد مر أكثر من عشرة آلاف عام من رحيلك. وبذا تكون قد استخدمت الثقب الأسود كنوع من آلات الزمان بنجاح، الأمر الذي يسمح لك بالسفر في المستقبل البعيد للأرض.

الشكل رقم (7-3)



النقطة المركزية في الثقب الأسود

يحدث الثقب الأسود اعوجاجاً في نسيج الزمكان المحيط به بشدة لدرجة أن أي شيء يدخل في نطاق "افق الحدث" الخاص به، والذي تمثله الدائرة الداكنة - لا يمكن أن يهرب من قبضة جاذبيته. ولا أحد يعرف بالضبط ما الذي يحدث داخل أعمق نقطة في الثقب الأسود.

ولإدراك المقاييس المفرطة المتضمنة، فإن نجماً له كتلة الشمس يصبح ثقباً أسود إذا تحول نصف قطره من قيمته الحقيقية الآن (حوالى 450000 ميل) إلى أقل قليلاً من ميلين. وتخيل: لو اعتصرنا الشمس لتصبح في حجم جزيرة مانهازن العليا. وستزن ملء ملعقة صغيرة من مثل هذه الشمس المضغوطة مقدار وزن جبل إيفريست. وإذا أردنا تحويل كوكب الأرض إلى ثقب أسود، فعلينا أن نضغطه إلى كرة نصف قطرها أقل من نصف بوصة. ظل علماء الفيزياء لمدة طويلة متخوفين في ما يتعلق بالتركيب العائق للمادة وإمكانية وجوده. وقد اعتقد الكثير منهم أن الثقوب السوداء مجرد انعكاسات لخيال العلماء النظريين الذين أنهكهم العمل. إلا أنه خلال العقد الأخير (من القرن العشرين) تراكم عدد متزايد من الأدلة التجريبية على وجود الثقوب السوداء. وطبعاً، ولأنها ثقوب سوداء، فلم يكن من

الممكّن رؤيتها مباشرةً بواسطة مسح السماء بالتلسكوبات. وبدلًا من ذلك، فإنَّ الفلكيين يبحثون عن الثقوب السوداء بالبحث عن سلوك غير عادي للنجوم العاديَّة المشعَّة للضوء، والتي يمكن أن تتوارد قريبةً جدًّا من أفق الحدث لثقب أسود. وعلى سبيل المثال، عندما يتتساقط الغبار والغاز الصادر من الطبقات العليا لنجوم عاديَّة قريبةً من ثقب أسود، في اتجاه أفق الحدث لهذا الثقب، فإنَّها ستتسارع إلى أن تصل سرعتها قرب سرعة الضوء. وعند سرعات مثل هذه تتولَّد كمية هائلة من الحرارة نتيجةً لاحتكاكُ الذي يحدث داخل الجيшиان العظيم للمادة المندفعة في دوامات إلى أسفل، الأمر الذي سيسبِّب توهُّج خليط الغبار والغاز ليُبيِّث الضوء العادي والأشعة السينية، حيثُ أنَّ هذا الإشعاع يتوجَّه قريباً جدًّا من أفق الحدث، فإنهُ سيتمكن من الإفلات من الثقب الأسود ليسافر خلال الفضاء المكان حيثُ يمكن مشاهدته ودراسته مباشرةً. وتعطي النسبيَّة العامة تنبؤات تفصيليَّة عن خواص مثل هذه الانبعاثات للأشعة السينية. وتقدم الملاحظات حول هذه الخواص المتوقعة أدلةً قويةً، وإنْ كانت غير مباشرةً، على وجود الثقوب السوداء. فمثلاً، هناك تلال من الأدلة التي تشير إلى وجود ثقب أسود كثيف الكتلة، التي تعادل مليونين ونصف المليون مرةً كتلة الشمس في مركز مجرتنا درب ال Leone. ويبدو هنا أنَّ الثقب الأسود العملاق خافتًا إذا قرئ بما يعتقد الفلكيون أنه موجود في قلب الكوازارات البراقة المدهشة والمتشَّرة في كلِّ الكون: وهي ثقوب سوداء قد تبلغ كتلتها ميلارات المرات مقدار كتلة الشمس.

توفي شوارتزشایلد في غضون بضعة أشهر فقط من توصله إلى الحل المعروف باسمه، وذلك بسبب إصابته بمرض جلدي أثناء وجوده على الجبهة الروسيَّة. كان عمره وقتها 42 عاماً فقط. وقد كشف اتصاله القصير بنظرية آينشتاين للجاذبية عن وجه مذهلٍ وغامضٍ من أوجه العالم الطبيعي.

والمثال الثاني الذي تستعرض فيه النسبيَّة العامة عضلاتها يتعلَّق بأصل وتطور كلِّ الكون. وكما رأينا من قبل فإنَّ آينشتاين قد بينَ أنَّ المكان والزمان يتداوَيان مع وجود الكتلة والطاقة. ويؤثُّر هذا التشوُّه للزمكان في حركة الأجرام الكونيَّة التي تتحرَّك بالقرب من الأعوجاج الناتج. وللطريقة الدقيقة التي تتحرَّك بها هذه الأجسام، بدورها، نتائج لكتلتها وطاقتها، تأثيرٌ أبعد في اعوجاج الزمكان، والذي بدوره هو الآخر يؤثُّر في حركة الأجسام، وهكذا يستمرُّ أداء هذا الرقص الكوني المتشارِّب. وبفضل معادلات النسبيَّة العامة، وهي المعادلات المتأصلة في عمق هندسة الفضاء المحدب، والتي كان أول من أوجدها عالم الرياضيات العظيم في القرن التاسع عشر جورج برنارد ريمان (سيأتي ذكره في ما بعد)، تمكَّن آينشتاين

من شرح التطور المتبدال بين الفضاء والزمان والمادة بصورة كمية. وقد دهش آينشتاين بصورة عظيمة عندما طبق هذه المعادلات على الكون ككل وليس على حيز معزول مثل كوكب أو مذنب يدور حول نجم، وقد توصل إلى نتيجة عظيمة هي: أن الحجم الشامل للعالم المكاني لابد أن يتغير مع الزمان. أي أن النسيج الكوني لابد أن يتمدد أو يتقلص ولا يمكن أن يكون ثابتاً. وتبين معادلات النسبية العامة ذلك بجلاء.

كانت النتيجة أكثر من المتوقع حتى بالنسبة لآينشتاين. فقد قلب آينشتاين الحدس الجماعي في ما يتعلق بطبيعة الفضاء والزمان، التي رسخت من خلال خبرات حياتنا اليومية على مدى آلاف السنين، غير أن مفهومنا عن عالم موجود دائماً ولا يتغير أبداً كان مغروساً داخلنا بشدة حتى بالنسبة لمفكر راديكالي مثل آينشتاين بحيث يصعب التخلص منه. ولهذا السبب أعاد آينشتاين النظر في معادلاته ونفعها بإدخال عامل أطلق عليه اسم الثابت الكوسموولوجي (Cosmological Constant)، وهو مصطلح إضافي سمح له بأن يتتجنب هذا التوقع وينعم مرة أخرى بسكنينة عالم استاتيكي لا يتغير. إلا أنه بعد مرور 12 عاماً، ومن خلال قياسات تفصيلية للمجرات البعيدة، أرسى الفلكي الأمريكي إدوبن هابل تجربياً مبدأ "تمدد الكون". وتبعاً لرواية مشهورة الآن في حوليات العلوم، فإن آينشتاين قد عاد مرة أخرى إلى الصيغة الأصلية لمعادلاته، مسجلأً أن التعديلات المؤقتة التي أدخلها عليها تمثل أكبر خطأ في حياته⁽¹²⁾ وعلى الرغم من عدم تقبيله في البداية، إلا أن نظريته (نظرية آينشتاين) قد تبنت بتمدد العالم. وفي الحقيقة، وفي بداية العشرينات من القرن العشرين - وقبل قياسات هابل بسنوات - استخدم عالم الأرصاد الجوية الروسي فريديمان معادلات آينشتاين الأصلية بشيء من التفصيل ووجد أن كل المجرات قد تكون محمولة على قاعدة من نسيج فضائي متمدد، وبالتالي فهي تتسارع مبتعدة بعضها عن البعض. وقد أكدت بما لا يدع مجالاً للشك ملاحظات هابل وما تبعها من ملاحظات عديدة هذه النتيجة المدهشة للنسبية العامة. وقد أنجز آينشتاين واحداً من أعظم الأعمال الفكرية في كل العصور، وذلك بتقديمه تفسيراً لتمدد الكون.

وإذا كان النسيج الفضائي يتمدد، وبالتالي تزداد المسافة بين المجرات المحمولة في التيار الكوني تباعداً، فلنا أن نتخيل استرجاع التطور في الاتجاه

(12) وللغرابة فإن الأبحاث الحديثة حول تفاصيل معدل تمدد الكون تشير إلى أن الكون قد يتضمن ثابتاً كونياً صغيراً جداً لكنه لا يساوي الصفر.

العكسي للزمن لنعرف أصل الكون. وفي الاتجاه العكسي ينكمش نسيج الفضاء جالباً جميع المجرات أقرب فأقرب ببعضها من بعض. وكما هو الحال في حالة البخار وما تحتويه، فإن الكون المتخلص الذي ضغط المجرات مع بعضها، سيسبب زيادة هائلة في درجة الحرارة، وتتحلل النجوم، وت تكون بلازما ساخنة من المكونات الأولية للمادة. وباستمرار تخلص هذا النسيج ستترتفع درجة الحرارة بلا حدود كما سيحدث نفس الشيء لكتافة البلازما البدائية. وإذا تخيلنا رجوع الساعة إلى الوراء بدءاً من الزمن الحالي للعالم الذي نشاهده الآن إلى حوالي 15 مليار سنة مضت، فإن الكون الذي نعرفه سينسحق إلى حجم متاهي الصغر. وستنكمش وتعتصر المادة التي يصنع منها "كل شيء" - كل سيارة ومنزل وبنية وجبار على كوكب الأرض، وكوكب الأرض نفسه والقمر وزحل والمشتري وكل كوكب آخر، والشمس وكل نجم في درب اللبانة، ومجرة أندروميدا بمئات المليارات من النجوم وكل المائة مiliar مجرة - بقدر كوني إلى كثافة مذهلة. وكلما دارت الساعة للوراء في اتجاه أزمنة مبكرة أكثر وأكثر سينضغط كل الكون إلى حجم برتقالة ثم ليمونة ثم حبة بازلاء ثم حبة رمل وإلى حجم أقل من ذلك. وإذا سرنا في هذا الاتجاه إلى الوراء حتى "البداية" فإن العالم سيظهر وكأنه بدأ كنقطة - وهي الصورة التي سنعيد اختبارها في فصول قادمة - حيث ينحصر داخلها كل المادة والطاقة معاً إلى كثافة ودرجة حرارة لا يمكن تخيلهما. ومن المعتقد أن هذه الكراوية، الانفجار الهائل، قد تعيق عن هذا الخلط المتطاير الذي يذر البذور التي تطور منها الكون الذي نعرفه.

وصورة الانفجار الهائل كانفجار كوني ينفت المحتوى المادي للكون مثل شظايا نتجت من انفجار قبلة، هي صورة مفيدة نأخذها في اعتبارنا، إلا أنها خادعة بعض الشيء. فعندما تنفجر قبلة، فإن هذا يحدث في موضع معين "في الفضاء" وفي لحظة معينة "في الزمان"، وتتناثر محتوياتها في الفضاء المحيط. أما في حالة الانفجار الهائل فلا يوجد فضاء مكان محيط. فكلما عدنا بتطور الكون إلى الوراء حتى البداية، فإن اعتصار كل المحتوى المادي معاً يحدث نتيجة لتخلص كل الفضاء. ويصف حجم البرتقالة، ثم حجم حبة البازلاء، فحجم حبة الرمل، تصف عودة تطور الكون إلى الوراء، كل الكون، وليس شيئاً ما في الكون. وبالوصول إلى البداية، فلن يكون هناك فضاء خارج قبلة اليدوية التي في حجم رأس الدبوس. وبدلأً من ذلك، فإن الانفجار الهائل هو انفجار الفضاء المكان المضغوط والذي يشبه انتشاره موجة المد التي تحمل معها المادة والطاقة حتى يومنا هذا.

حادي عشر: هل النسبية العامة صحيحة؟

لم نجد حتى الآن أي انحرافات عن تنبؤات النسبية العامة أثناء التجارب التي تجري بالمستوى الحالي للتقنية، والزمن فقط هو الكفيل باكتشاف بعض الانحرافات إن وجدت بواسطة تجارب أكثر دقة في النهاية. وعليه فإن هذه النظرية ستظهر كذلك على أنها مجرد وصف تقريري لكيفية عمل الطبيعة في الواقع. ويعتبر الاخبار المنظم للنظريات على مستويات أكثر فأكثر دقة بالتأكد أحد الطرق التي يتقدم بها العلم، لكنه ليس الطريق الوحيد. وقد رأينا ذلك بالفعل: فالبحث عن نظرية جديدة للجاذبية لم يبدأ بتفنيد تجربتي لنظرية نيوتن، لكنه بدأ بالتناقض بين نظرية نيوتن للجاذبية ونظرية أخرى - هي النسبية الخاصة. وفقط بعد اكتشاف النسبية العامة كنظرية منافسة للجاذبية تم تحديد عيوب تجربة في نظرية نيوتن بالبحث عن وسائل دقيقة تسمح بقياس الخلاف بين النظريتين. وهكذا فإن عدم التطابق الداخلي النظري يمكن أن يلعب دوراً محورياً في دفع التقدم كما ت فعل البيانات التجريبية.

وعلى مدى النصف الأخير من القرن العشرين، واجهت الفيزياء تناقضاً نظرياً آخر على قدم المساواة في الشدة مع التناقض بين النسبية الخاصة وجاذبية نيوتن. فقد بدت النسبية العامة غير متوافقة في أساسها مع نظرية أخرى اختبرت تجربياً بنجاح وهي ميكانيكا الكم. وبالنظر في كل ما تم تغطيته في هذا الفصل، فإن التناقض لا يسمح لعلماء الفيزياء بفهم ما يحدث بالفعل للفضاء والزمان والمادة عندما سحقت بعضها مع بعض تماماً في لحظة الانفجار الهائل أو في مركز ثقب أسود. غير أن التناقض بصفة عامة ينبع إلى النقص الأساسي في مفهومنا للطبيعة. وقد أثمر حل هذا التناقض في محاولات قام بها بعض أعظم علماء الفيزياء النظريين، الذين أعطوا هذا التناقض ما يستحقه من أهمية، فصار المشكلة المحورية في الفيزياء النظرية الحديثة. ويطلب الأمر التألف مع بعض السمات الأساسية لنظرية الكم، التي سنجدها إليها الآن، لفهم هذا التناقض.

الفصل الرابع

الغرابة المخيفة المعجبرية

توجه جورج وغريس مباشرة بعد عودتهما من رحلتهما الفضائية عبر النظام الشمسي، إلى إحدى العحانات ليتناولا بعض المشروبات المنشعة حيث كانا متعبين بعض الشيء. طلب جورج لنفسه مشروب المعتاد من عصير البابايا ولغريس الفودكا مع مياه التونيك، جلس جورج مسترخيًا في مقعده عاكدا يديه خلف رأسه ليستمع بسيجاره الذي أشعله لتوه. وبمجرد أن هيا نفسه لأخذ جرعة من الدخان، دهش لاختفاء السيجار من بين شفتيه. تخيل جورج أن السيجار قد سقط من فمه بطريقة ما، فاعتدل في مقعده متوقعاً أن يجد السيجار قد أحدث حرقاً في قميصه أو بنطلونه. لكن السيجار لم يكن هناك، ولم يعثر عليه جورج. أثارت حركات جورج المضطربة غريس، وأخذت تتجلو ببصرها في ما حولها فوق على السيجار ملقى على منضدة البار خلف مقعد جورج مباشرة. "يا للغرابة"، قالها جورج ثم استطرد "كيف سقط هذا السيجار هناك بحق السماء؟ كما لو أنه قد مر من خلال رأسي - لكن لسانني لم يحترق، وكما يبدو ليس لدى أية ثقوب". فحصت غريس جورج وأكدت على مضمض أن لسانه ورأسه سليمان تماماً. وصلت مشروباتهما في هذه اللحظة، فهز جورج وغريس كتفيهما معتبرين أن سقوط السيجار واحدة من غرائب الحياة الصغيرة. لكن الغرائب في الحانة قد استمرت.

نظر جورج في كوب عصير البابايا فلاحظ أن مكعبات الثلج تترافق باستمرار مصطدمة بعضها البعض وبجدار الكوب مثل السيارات الكهربائية الصغيرة في ساحة اللعب عندما تتصادم وتتباعد طوال الوقت. لم يكن وحده الذي تعرض لذلك هذه المرة. فقد كانت غريس تمسك بكأسها الذي كان في نصف حجم كوب جورج، عندما رأى كلابهما أن مكعبات الثلج في كأسها تترافق بوتيرة أسرع. لم يكن في استطاعتهما التمييز بين مكعبات الثلج، فقد تجمعت المكعبات في كتلة واحدة. لكن كل هذا هُيّن إذا قورن بما حدث بعد ذلك. وبينما كان جورج وغريس يحدقان بأعين مبهورة من الدهشة، إذا بهما يريان مكعباً وحيداً من الثلج يمر من خلال جدار كأسها ليسقط على الأرض. أمسكا بالكأس وفحصاه

فوجداه سليماً تماماً؛ وبطريقة ما فإن مكعب الثلوج قد عبر مباشرة من خلال الجدار الصلب من دون أن يسبب أي تلف. فقال جورج: "لابد أنها هلوسة ما بعد السير في الفضاء المكان". حاول كل منهما أن يتتجاوز ما حدث لمكعبات الثلوج، وتناولوا شرابهما جرعة واحدة ثم توجها إلى البيت طلبا للراحة. ولم يتخيّل جورج وغريس أثناء اندفاعهما للخروج من الحانة أنهما قد أخطأوا الباب الحقيقي وأصطدموا بدلاً من ذلك برسم لباب على الجدار. غير أن أحداً من الحاضرين في الحانة لم يلحظ الاندفاع المفاجئ لجورج وغريس أثناء رحيلهما لتعود الحاضرين على اصطدام الناس بالجدار.

وبينما كان كونراد وفرويد يشعّلان بالضوء أعمق الظلام وروحه منذ قرن مضى، كان الفيزيائي الألماني ماكس بلانك يلقي بأول شعاع من الضوء على ميكانيكا الكم. وهي إطار للمفاهيم يزعم، ضمن أشياء أخرى، أن ما حدث لجورج وغريس في الحانة - عند تحليله على مستوى العالم المجهري - يجب أن لا نرجعه إلى اضطرابات ذهنية. فمثل هذه الأحداث العجيبة غير المألوفة هي أمر عادي للكيفية التي يسلك بها عالمنا في الواقع على المستوى فائق الصغر.

أولاً: الإطار الكمي

ميكانيكا الكم هي إطار من المفاهيم لإدراك الخواص المجهوية للكون. وكما تتطلب النسبية الخاصة والنسبية العامة تغيرات جوهرية في نظرتنا للكون عندما تكون الأشياء متحركة بسرعات هائلة أو عندما تكون لها كتل عظيمة، فإن ميكانيكا الكم تبين أن للكون صفات مدهشة بنفس الدرجة بل حتى أكثر إدهاشاً عندما نفحصه على المستوى الذري وتحت الذري. وقد كتب ريتشارد فينمان أحد أعظم المستغلين بميكانيكا الكم سنة 1965 يقول:

مضى زمن كانت الصحف تكتب فيه أن هناك اثنين عشر رجلاً فقط هم الذين يفهمون نظرية النسبية. ولا أعتقد أن هذا صحيح. فربما كان هناك زمن لم يكن فيه سوى رجل واحد هو الذي يفهمها لأنه هو الذي أمسك بها قبل أن يكتب بحثه. لكن بعد أن اطلع الناس على البحث فإن الكثيرين منهم قد فهموها بشكل أو بآخر، وبالتأكيد كان عددهم أكثر من اثنين عشر. ومن جهة أخرى فإنني أعتقد أنه يمكن أن أقول بكل ثقة أنه لا أحد يفهم ميكانيكا الكم⁽¹⁾.

Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (Cambridge, MA: MIT Press, 1965), p. 129. (1)

وعلى الرغم من أن فينمان قد عبر عن وجهة نظره منذ أكثر من ثلاثة عقود، إلا أنه يمكن القول إنها صحيحة بنفس الدرجة حتى اليوم. وما كان يعنيه فينمان هو أنه على الرغم من أن نظرتي النسبية العامة والخاصة تتطلبان مراجعة شاملة للطريقة السابقة التي كنا ننظر بها للكون، عندما كنا نقبل تماماً المبادئ الأساسية للنظريتين، فإن التضمينات غير المألوفة للمكان والزمان تأتي مباشرة من التفسير المنطقي الدقيق. وإذا فكرت ملياً في تفاصيل أبحاث آينشتاين في الفصلين السابقين بعناية مناسبة، فإنك - ولو لوهلة قصيرة - ستقر بحتمية النتائج التي توصلنا إليها. لكن ميكانيكا الكم تختلف. وبحلول سنة 1928، أو حول ذلك، كان الكثير من المعادلات الرياضية وقواعد ميكانيكا الكم قد استقرت في مكانها، ومنذ ذلك الحين استخدمت وما زالت لإجراء أكثر التنبؤات العددية نجاحاً ودقةً في تاريخ العلم. وفي الواقع فإن من يستخدم ميكانيكا الكم يجد نفسه متبعاً لقواعد المعادلات التي أرساها "الآباء المؤسسين" للنظرية - الطرق الحسابية الجاهزة للاستخدام المباشر - من دون فهم حقيقي لأسباب صلاحية هذه الطريقة وما الذي تعنيه. وعلى عكس النسبية، فإن القليلين فقط، إن وجدوا، هم الذين يفهمون تماماً روح ميكانيكا الكم.

ما الذي يمكن أن نستنتجه من ذلك؟ وهل يعني ذلك أن العالم على المستوى الميكروسكوبى يعمل بطرق غایة في الغرابة وغير مألوفة لدرجة أن العقل البشري، الذي تطور على مر العصور ليدرك ظواهر الحياة اليومية المألوفة، غير قادر على الإدراك الكامل "لما يجري بالفعل"؟ أم هل يمكن أن يكون علماء الفيزياء قد شيدوا صياغة غایة في الغرابة لميكانيكا الكم، صياغة على الرغم من نجاحها الكمي إلا أنها قد أربكت طبيعة الواقع الحقيقة؟ لا أحد يعرف. ربما يأتي في المستقبل بعد فترة من الزمن شخص ماهر ليصل إلى صياغة جديدة تجيب إجابة شافية عن كل التساؤلات التي تبدأ بلماذا وماذا في ميكانيكا الكم. ومرة ثانية، قد لا يحدث ذلك. والشيء الوحيد الذي نعرفه بالتأكيد هو أن ميكانيكا الكم تبين لنا بشكل مطلق لا جدال فيه أن عدداً من المفاهيم الأساسية الضرورية لفهم عالمنا اليومي المألوف تفشل في تقديم أي تفسير أي تفسير عندما نستخدمها ونركز على العالم المجهري. ونتيجة لذلك، لابد من تعديل كل من لغتنا ومنطقنا بشكل كبير عندما نحاول فهم وتفسير العالم على المستويات الذرية وتحت الذرية.

وسنقوم في المقاطع القادمة بتطوير أساس هذه اللغة ونصف عدداً مما تحتويه من مفاجآت ملحوظة. فإذا بدت لك ميكانيكا الكم وكأنها أمر شاذ أو حتى مضحك فلا بد من أن تأخذ في اعتبارك أمرين اثنين. الأول، فوق حقيقة أنها

نظريّة رياضيّة متماسكة، فإن السبب الوحيد وراء اعتقادنا في ميكانيكا الكم هو أنها توصلت إلى تبيّنات تم التحقق منها بدرجة فائقة الدقة. فإذا استطاع شخص ما أن يذكر لك تفاصيل دقيقة وغزيرة عن طفولتك، فمن الصعب ألا تعتقد أنه من أقربائك الذين فارقتهما من زمن بعيد. الثاني، أنك لست وحدك الذي له رد الفعل هذا بالنسبة لميكانيكا الكم. وهي وجهة نظر يتبنّاها بدرجة أو بأخرى بعض الفيزيائيين المؤمنين في جميع العصور. وقد رفض آينشتاين تقبّل ميكانيكا الكم ككل. بل حتى نيلز بوهر، وهو أحد الرواد الأساسيين لنظرية الكم وواحد من أقوى المؤيدين لها، قال مرة، إنه إذا لم تشعر بدور أحياناً أثناء تفكيرك في ميكانيكا الكم، فمعنى ذلك أنك في الواقع لم تفهمها.

ثانياً: الجو ساخن جداً في المطبخ

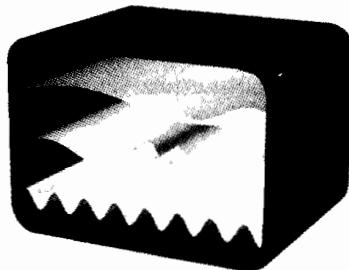
بدأ الطريق إلى ميكانيكا الكم بمشكلة مربكة. فتخيل أن الفرن الذي تملّكه في بيتك معزول عزلًا جيداً، وأنك قد ضبطته على درجة حرارة معينة، ولتكن 400 فهرنهايت، ثم تركته كذلك وقتاً كافياً ليُسخن. عندما تسخن جدران الفرن ستتولّد موجات إشعاعية بداخله حتى لو كنت قد فرغت الهواء منه قبل أن تبدأ في تسخينه. وهي نفس نوع الإشعاعات - الحرارة والضوء على شكل موجات كهرومغناطيسية - التي تنبع من سطح الشمس، أو من قطعة حديد ساخنة متوجهة.

وال المشكلة هنا أن الموجات الكهرومغناطيسية تحمل طاقة - فمثلاً، تعتمد الحياة على الأرض كلية على الطاقة الشمسيّة التي تنتقل من الشمس إلى الأرض بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية. وقد قام علماء الفيزياء في بداية القرن العشرين بحساب الطاقة الكلية التي يحملها الإشعاع الكهرومغناطيسي داخل فرن مسخن إلى درجة معينة. وباستخدام خطوات حسابية معروفة ومقبولة بشكل جيد، توصلوا إلى نتيجة غير مقبولة ومضحكة مؤداها: أن الطاقة الكلية داخل الفرن لانهائيّة عند أي درجة حرارة نختارها.

كان واضحاً للجميع أن الأمر هراء - فالفرن الساخن يمكن أن يتضمّن كمية معقوله من الطاقة، لكن بالتأكيد ليست كمية لانهائيّة. وحتى نفهم الحل الذي اقترحه بذلك فإن المشكلة تستحق أن نفهمها بقدر أكبر من التفاصيل. ويتبّع أنه عند تطبيق نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية على الإشعاع داخل فرن فإن الموجات المتولدة من الجدران الساخنة لابد أن يكون لها "عدد صحيح" من القمم ومن المنخفضات التي تتناسب تماماً مع المسافة بين الأسطح المتقابلة. وبين الشكل

رقم (4-1) بعض الأمثلة على ذلك. يستخدم الفيزيائيون ثلاثة مصطلحات لوصف هذه الموجات: طول الموجة والتردد والسرعة. وطول موجة هو المسافة بين قمتين متتاليتين أو منخفضتين متتاليتين للموجات كما هو مصور في الشكل رقم (4-2). وكلما زاد عدد القمم والمنخفضات قصر طول الموجة، حيث إنها جميعاً لابد من أن تتحشر في المسافة بين جدران الفرن الثابتة. والتردد هو عدد الدورات إلى أعلى وإلى أسفل التي تكملها الموجة في الثانية الواحدة. وتبين أن طول الموجة يتحدد بالتردد والعكس صحيح: فأطوال الموجات الأكبر تعني ترددًا أقل؛ وأطوال الموجات الأقصر تعني ترددًا أكبر. ولتعرف السبب، فكر في ما يحدث عندما تولد موجات بأن تهز حبلًا طويلاً مربوطة من أحد طرفيه. ولتلويد موجة طويلة تهز الحبل برقة من الطرف الموجود في يدك للأعلى ولأسفل. ويكون تردد الموجات في هذه الحالة مطابقاً لعدد الدورات التي تتمها حركة يدك في الثانية، وهو منخفض وبالتالي. ولكي تولد موجات قصيرة عليك أن تهز يدك بصورة أكثر عنفاً - أي عدداً أكبر من الاهتزازات - ويتبع من ذلك موجات ذات ترددات أعلى. وأخيراً يستخدم الفيزيائيون مصطلح السعة لوصف أقصى ارتفاع أو أقصى عمق للموجة كما هو مصور في الشكل رقم (4-2).

الشكل رقم (1-4)

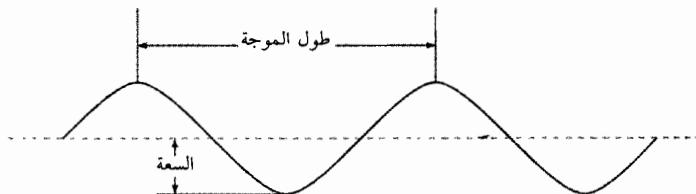


تبعدنا نظرية ماكسويل أن الموجات الإشعاعية في الفرن تمتلك عدداً صحيحاً من القمم والمنخفضات - لتناسب بالضبط مع دورات الموجة.

وإذا كنت تجد أن الموجات الكهرومغناطيسية أمر مجرد بعض الشيء، فهناك تشبيه جيد آخر يستحق أن تحفظه في ذهنك، وهو الموجات التي تنتج من نقر وتر في كمان. وتقابل الترددات المختلفة نغمات موسيقية مختلفة: فكلما كان التردد أعلى كانت النغمة أعلى. وسعة الموجة على وتر الكمان تعتمد على القوة التي

يهتز بها الوتر. فإذا كانت الضربة قوية كانت الطاقة الممnochة لاضطراب الموجة أكبر، وتقابل الطاقة الأعلى سعة أكبر للموجة. ويمكنك سماع ذلك عندما تكون النغمة أعلى صوتاً. وبينما الطريقة فإن الطفة الأقل تقابل سعة أقل وصوتاً أكثر خفوتاً.

الشكل رقم (2-4)



طول الموجة هو المسافة بين قمتين متتاليتين أو منخفضتين متتاليتين للموجة. أما السعة فهي أقصى ارتفاع وأقصى انخفاض للموجة.

وباستخدام الديناميكا الحرارية (الترموديناميكا Thermodynamics) الخاصة بالقرن التاسع عشر تمكّن الفيزيائيون من تحديد كمية الطاقة التي يمكن أن تضخها جدران الفرن الساخنة في الموجات الكهرومغناطيسية بكل أطوالها المسموح بها - بمعنى القوة التي "تضرب" بها الجدران كل موجة فعلياً. وكانت النتيجة التي وجدوها بسيطة تحمل كل الموجات المسموح بها - من دون النظر لطولها - نفس كمية الطاقة (تحدد الكمية بالضبط بدرجة حرارة الفرن). وبمعنى آخر، فإن كل أنساق الموجات الممكنة داخل الفرن تقف على قدم المساواة تماماً من حيث كمية الطاقة المتضمنة فيها.

وتبدو هذه النتيجة لافتاً للانتباه لأول وهلة ولو أنها نتيجة حميدа غير ضارة. لكن ليس الأمر كذلك. إنها تتعيّن سقوط ما أصبح اليوم معروفاً باسم الفيزياء الكلاسيكية. ويكمّن السبب في الآتي: على الرغم من أن شرط وجود عدد صحيح من القمم والمنخفضات يؤدي إلى استبعاد أنساق عديدة متباعدة من الموجات التي يمكن تصوّرها في الفرن، لكن ما زالت هناك أعداد لا نهائية من هذه الموجات التي لها قمم ومنخفضات متزايدة. وحيث أن كل نسق من الموجات يحمل نفس الكمية من الطاقة، فإن ذلك يعني وجود كمية لا نهائية من الطاقة. وعلى مفرق القرنين التاسع عشر والعشرين كان هناك خلل خطير.

ثالثاً: صناعة القطع عند مفترق القرن

توصل بلانك سنة 1900 إلى استنتاج مفعم بالحماس، سمح بإيجاد وسيلة للخروج من هذا المأزق مما جعله يحصل على جائزة نوبل في الفيزياء سنة 1918⁽²⁾. وحتى تدرك هذه النتيجة تخيل أنك وجمهرة كبيرة من الناس - عدد لا نهائي - قد انحشرتم في مخزن كبير بارد يشرف عليه مالكه البخيل. وعلى العائن يوجد ثرمومستات (منظم لدرجة الحرارة) رقمي هائل يتحكم في درجة الحرارة، لكنك ستتصعد عندما تكتشف قيمة ما هو مطلوب دفعه للملك من أجل التسخين: فإذا كان الثرمومستات مضبوطاً عند درجة 50 فهرنهايت، فعلى كل فرد أن يدفع للملك 50 دولاراً. وإذا كان مضبوطاً عند درجة 55 فالمطلوب من كل فرد 55 دولاراً، وهكذا. وستتحقق أن الملك سيربح كمية لا نهاية من النقود لمجرد تسخين المكان لأي درجة حرارة حيث أنك تشارك في المخزن مع عدد لا نهائي من رفاقك.

لكنك إذا تمعنت في قواعد الملك لشروط الدفع فستجد بعض التغرات. فلا يود الملك أن يرجع باقي النقود لمن له باقي، وخاصة أن عدد القاطنين لا نهائي، وأنه مشغول جداً. لذلك فقد عقد ميثاق شرف معهم. فمن يملك القيمة المطلوبة بالضبط، فليفعل ذلك، وإنما فإنهم سيدفعون أكبر فئة عملة لا تستحق رد الباقي. وهكذا، ولكنك ترغب أن يشارك الجميع وفي نفس الوقت تتتجنب الزيادة الهائلة في سعر التسخين، فإليك ستتجبر رفاقك على تنظيم ما يملكونه بالطريقة الآتية: يحمل أحد الأفراد كل العملة فئة البنس، ويحمل آخر كل العملة فئة الخمس بنسات، وثالث يحمل كل العملة فئة العشر بنسات، ورابع يحمل كل العملة فئة ربع دولار، وهكذا مروراً بفئة الدولار والخمسة دولارات والعشرة والعشرين والخمسين والمائة والألف وحتى الفئات الأكبر (وغير المألوفة). وستضطرث الثرمومستات عند درجة 80 فهرنهايت بكل صفافة وتنتظر وصول الملك. وعندما يصل فإن من يحمل البنسات سيدفع 8000 قطعة، ومن يحمل الخمس بنسات سيدفع 1600 قطعة، ومن يحمل العشر بنسات سيدفع 800 قطعة، ومن يحمل

(2) على الرغم من أن أبحاث بلانك قد أوجدت حلّاً لمعضلة الطاقة اللانهائية، إلا أن ذلك فيما يبدو لم يكن هو الهدف الذي دفعه للقيام بهذه الأبحاث. وبالآخرى كان بلانك يحاول فهم موضوع له علاقة وطيدة بذلك: وهي النتائج التجريبية المتعلقة بتوزيع طاقة الفرن - "جسم أسود" بلغة أكثر دقة - على مختلف أطوال الموجات. وللاطلاع على تفاصيل أكثر لناريخ هذا التطور، فإن القارئ المهتم يمكنه قراءة: Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* (Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1978).

عملة الربع دولار سيدفع 320 قطعة، ومن يحمل فئة الدولار سيدفع 80 دولاراً، ومن يحمل فئة الخمسة دولارات سيدفع 16 ورقة، ومن يحمل فئة العشرة دولارات سيعطيه ثمانى ورقات، والشخص الذى يحمل فئة العشرين دولاراً سيعطيه أربع ورقات، أما من يحمل فئة الخمسين دولاراً فسيعطيه ورقة واحدة (حيث أن ورقتين من فئة 50 دولاراً ستتعدى المطلوب دفعه وبالتالي تتطلب رد الباقي). وكل من عدا ذلك يحمل فقط قطعة نقود حداً أدنى تتجاوز المبلغ المطلوب دفعه. وهكذا، فبدلاً من أن يحصل المالك على كمية لا نهاية من النقود كان يتوقعها، فإنه سيرحل بمبلغ تافه مجموعه 690 دولاراً فقط.

استخدم بذلك استراتيجية مشابهة ليخفض من النتيجة غير المعقولة للطاقة اللانهائية داخل الفرن إلى أخرى محددة. وإليكم كيف تم ذلك. ضمن بذلك بجسارة أن الطاقة التي تحملها الموجة الكهرومغناطيسية في الفرن تأتي في قطع مثل فئات العملة. ويمكن للطاقة أن تكون فئة معينة أساسية "فئات طاقة" أو ضعفها أو ثلاثة أمثالها، وهكذا. وبالضبط، كما أنه لا تستطيع الحصول على ثلث بنس أو ربعين ونصف الربع من الدولار، فإن بذلك قد أعلن أنه عند الحديث عن الطاقة من غير المسموح به استخدام الكسور. وتتحدد فئات العملة بواسطة وزارة الخزانة في الولايات المتحدة. وللبحث عن تفسير أساسى أكثر اقترح بذلك أن فئة طاقة الموجة تتعدد بتعدد الموجة - والفتة هي أقل قطعة طاقة يمكن أن تتوارد. وقد افترض بذلك بصفة خاصة أن الحد الأدنى لطاقة الموجة يتناسب طردياً مع ترددتها: يفرض التردد الأكبر (طول موجة أقصر) حداً أدنى أكبر من الطاقة، ويفرض التردد الأصغر (طول موجة أطول) حداً أدنى أصغر من الطاقة. وبشيء من التبسيط، مثل موجات المحيط عندما يكون هادئاً فإنها تكون أطول وأهداً، أما تلك الجياشة فإنها تكون أقصر ومتلاطمـة، كذلك الموجات الأطول من الإشعاع أقل طاقة ذاتية من تلك الموجات الإشعاعية الأقصر.

وهنا مربط الفرس: فقد أظهرت حسابات بذلك أن وجود الطاقة المسموح بها على شكل كتل أو قطع في كل موجة قد عالج النتيجة غير المعقولة السابقة للطاقة الكلية اللانهائية. وليس من الصعب إدراك السبب في ذلك. فعند تسخين فرن إلى درجة حرارة معينة، تتبأـ حسابات الديناميكا الحرارية من القرن التاسع عشر بالطاقة العامة التي من المفترض أن تشارك بها كل موجة في الطاقة الكلية. لكن مثل هؤلاء الرفاق الذين لم يدفعوا نصيبهم في المبلغ العام المطلوب أن يدفعه كل فرد للمالك لأن فئة العملة التي يحملونها أكبر من المطلوب، كذلك إذا كان الحد الأدنى لطاقة موجة معينة يتجاوز الطاقة التي من المفترض أن تساهم

بها، فإنها لن تسهم وستظل ساكنة. وحيث أنه تبعاً لبيانك فإن الحد الأدنى للطاقة التي تحملها الموجة يتناسب طردياً مع ترددتها، فإننا عندما نفحص الموجات ذات الترددات الأعلى (طول الموجة الأقصر) فإننا آجلاً أو عاجلاً سنجد أن الحد الأدنى للطاقة التي تحملها أكبر من المتوقع أن تشارك به. ومثل الرفاق الذين كانوا يحملون عملة من فئات أكبر من 50 دولاراً، فإن الموجات ذات الترددات العالية لن تستطيع أن تشارك في كمية الطاقة التي تتطلبها قواعد فيزياء القرن التاسع عشر. وهكذا تماماً مثلما أن المشاركين في دفع حساب التدفئة هم عدد محدود من الرفاق - الأمر الذي يؤدي إلى كمية محدودة من النقود - فإن عدداً محدوداً من الموجات هي التي تتمكن من المشاركة في طاقة الفرن الكلية - ومرة أخرى يؤدي ذلك إلى كمية محدودة من الطاقة. وسواء كان الأمر يتعلق بالطاقة أو بالنقود فإن عملية تجميع الوحدات الأساسية في قطع و تزايد حجم هذه القطع كلما زاد التردد أو فئة العملة يغير من الإجابة من ما لا نهاية إلى شيء محدود⁽³⁾.

وقد قام بلانك بخطوة هامة عندما استغنى عن البيان الذي لا معنى له حول الناتج اللانهائي. والذي جعل الناس يصدقون أن تخميناته منطقية هو أن هذه الإجابة المحدودة التي أوجدها طريقته الجديدة حول طاقة الفرن قد تطابقت بشكل رائع مع القياسات التجريبية. وعلى وجه التحديد، وجد بلانك أنه إذا تحكم في أحد العوامل التي تدخل في حساباته الجديدة فإنه يستطيع أن يتنبأ بدقة بكلمة الطاقة المقيسة للفرن عند أية درجة حرارة. كان هذا العامل بالذات هو معامل التناوب بين تردد الموجة وقطعة الحد الأدنى من الطاقة التي تملكها الموجة. وقد وجد بلانك أن معامل التناوب هذا - المعروف الآن بثابت بلانك ويرمز له بالرمز \hbar (وتطيق إتش بار) - حوالي جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار من الوحدات اليومية⁽⁴⁾. وتدل القيمة الضئيلة لثابت بلانك على أن حجم قطع الطاقة عادة ما يكون صغيراً جداً. وهذا هو السبب في ما يبدو مثلاً أننا نستطيع أن نغير من طاقة الموجة على وتر الكمان - وبالتالي درجة ارتفاع الصوت بصورة مستمرة. وفي الواقع، على الرغم من أن طاقة الموجة تمر بخطوطات محدودة، على طريقة بلانك، إلا أن حجم هذه الخطوطات من الصغر بحيث أن الفرزات المحددة من مستوى معين لارتفاع الصوت إلى مستوى آخر يبدو بأنه يتم

(3) وبشكل أكثر دقة، بين بلانك أن الموجات ذات محظوظ الطاقة الدنيا الذي يتجاوز متوسط المساعدة الظاهرة (طبقاً للديناميكا الحرارية من القرن التاسع عشر) يتم إخادها أسيّاً. ويزيد هذا الإخاد بحدة عند فحصنا لموجات ذات تردد أعلى.

(4) ثابت بلانك يساوي 1.05×10^{-27} grams, centimeter²/second

بنعومة (وليس عن طريق قفزات). وتبعد تأكيدات بلانك فإن حجم هذه القفزات في الطاقة يزداد كلما ازداد تردد الموجات (بينما تصبح أطوال الموجات أقصر وأقصر). وهذه هي المكونات الأساسية التي تحل تناقض الطاقة اللاهائية.

وكما سترى، فإن فرضية الكم لبلانك تقدم ما هو أكثر كثيراً من مجرد فهم محتوى طاقة الفرن. فهي تقلب الكثير من المفاهيم عن العالم الذي اعتقده لفترة أنه مستقر. ويتضمن صغر قيمة \hbar معظم هذه الابتعادات الجذرية من الحياة العادبة في اتجاه العالم الميكروسكوبى، لكن لو كانت قيمة \hbar أكبر كثيراً مما هي عليه، فإن الحادث الغريب الذي وقع في الحانة سيكون من الأمور العادبة. وكما سترى، فإن نظائرها المجهرية ستكون بالتأكيد عادبة.

رابعاً: ما هي تلك القطع؟

لم يكن لدى بلانك سبب منطقى لإدخال المفهوم المحوري حول قطع الطاقة. وبجانب حقيقة كونها ملائمة، فإنه لا هو ولا أي شخص آخر يستطيع أن يقدم أسباباً مقنعة للذى جعلها أمراً حقيقياً. وكما قال عالم الفيزياء جورج غامو، يشبه الأمر كما لو أن الطبيعة تسمح للفرد بأن يشرب كوباً كاملاً من البيرة أو لا بيرة على الإطلاق، ولا شيء بينهما⁽⁵⁾. وفي 1905، وجد آينشتاين تفسيراً لذلك، الأمر الذى استحق عليه جائزة نوبل في الفيزياء سنة 1921.

توصل آينشتاين إلى تفسيره بالتفكير حول ما كان معروفاً باسم الظاهرة الكهروضوئية. كان عالم الفيزياء الألماني هنريش هيرتز أول من اكتشف أن الإشعاعات الكهرومغناطيسية - الضوء - عندما تسقط على فلزات معينة تنبعث منها إلكترونات، وذلك سنة 1887. وليس هذا بالشيء الغريب. فللفلزات خاصة أن بعض إلكتروناتها ترتبط ارتباطاً ضعيفاً داخل الذرات (ولذلك فهي موصلات جيدة للكهرباء). فعندما يصطدم الضوء بسطح الفلز فإنه يفقد جزءاً من طاقته، كما في حالة سقوط الضوء على جلدك مسبباً شعورك بالدفء. ويستطيع انتقال الطاقة هنا أن يسبب اضطراباً للإلكترونات في الفلز، الأمر الذي يؤدي إلى مغادرة بعض الإلكترونات ضعيفة الارتباط بعيداً عن السطح.

غير أنه ستتضح تلك الصفات الغريبة للظاهرة الكهروضوئية عند دراسة خواص الإلكترونات المنطلقة من سطح الفلز بالتفصيل. ولأول وهلة قد تظن انه كلما زادت شدة الضوء - سطوعه - فإن سرعة الإلكترونات المنطلقة ستزداد هي

Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way* (New York: Anchor Books, 1989), p. 286. (5)

الأخرى، حيث أن الموجات الكهرومغناطيسية الساقطة طاقتها أعلى. غير أن ذلك لا يحدث. لكن سيزداد عدد الإلكترونات المنطلقة بينما تظل سرعتها ثابتة. ومن جهة أخرى، فقد لوحظ تجريبياً أن سرعة الإلكترونات المنطلقة تزداد بزيادة تردد الضوء الساقط. وينفس الطريقة تقل سرعتها إذا انخفض تردد الضوء. (بالنسبة للموجات الكهرومغناطيسية في الجزء المرئي من الطيف، فإن زيادة التردد يقابلها تغير في اللون من الأحمر إلى البرتقالي إلى الأصفر إلى الأخضر إلى الأزرق إلى النيلي وأخيراً البنفسجي. والترددات الأعلى من البنفسجية ليست مرئية وتقابل الأشعة فوق البنفسجية، وتأتي بعدها الأشعة السينية [X]، أما الترددات الأقل من الترددات الحمراء فإنها أيضاً ليست مرئية وتقابل الأشعة تحت الحمراء). وفي الحقيقة كلما قل تردد الضوء المستخدم سنصل إلى نقطة تهبط فيها سرعة الإلكترونات المنطلقة إلى الصفر وتتوقف عملية بثها من السطح، بصرف النظر عن شدة الضوء المبهر المنبع من المصدر. ولأسباب غير معروفة، فإن لون شعاع الضوء الساقط - وليس طاقتة الكلية - هو الذي يتحكم في ما إذا كانت الإلكترونات ستبت من السطح أم لا، كما أنه يتحكم كذلك في طاقة هذه الإلكترونات إذا أبعاثت.

ولإدراك الكيفية التي فسر بها آينشتاين هذه الحقائق المحيزة، فلنرجع مرة أخرى إلى موضوع المخزن، والذي تمت تدفنته إلى درجة 80 فهرنهيات. وتخيل أن المالك الذي يكره الأطفال قد طلب من كل من هو تحت 15 سنة أن يقيم في بدروم المخزن، والذي يمكن للبالغين أن يروه من شرفة كبيرة تحيط بالمخزن. وفوق ذلك، فإن الوسيلة الوحيدة لأي أحد من هذا العدد الهائل من الأطفال أن يغادر بدروم المخزن هو أن يدفع للحارس 85 سنتاً هي تسعيرة الخروج. (هذا المالك شخص رهيب!) وقد نسب البالغون بناءً على إلحاح منك الطريقة الجماعية باستخدام ثبات العملة كما سبق أن وصفنا وذلك لإعطاء النقود للأطفال عن طريق إلقائهما إليهم من الشرفة. ولنر ماذا سيحدث.

يبدأ الشخص الحامل لفتة البنسات في إلقائها، إلا أن هذا من الصالة بحيث لا يمكن لأي طفل أن يجمع تكلفة المغادرة. ولأن هناك عدداً لا يهابه من الأطفال، وكلهم يحارب بضراوة في خضم متلاطم للحصول على النقود المتتساقطة، فحتى لو أسقط حامل البنسات كمية هائلة منها فلن يستطيع أي طفل أن يجمع مبلغ 85 سنتاً المطلوب دفعها للحارس. وينطبق نفس الشيء على البالغين الذين يحملون العملة فئة الخمسة بنسات والعشرة بنسات وأرباع الدولار. ومع أن كل واحد من حاملي العملة يلقي كميات كبيرة من النقود، فإن أي طفل سيكون محظوظاً لو تمكن من الحصول على قطعة عملة واحدة (لا يستطيع

معظمهم الحصول على أي شيء) ومن المؤكد، لن يتمكن أي طفل من جمع مبلغ 85 سنتاً المطلوبة للمغادرة. لكن عندما يبدأ حاملو فئة الدولار في إلقائها - وحتى لو كانت الكمية التي يلقيها صغيرة مقارنة بالآخرين حيث يلقي دولاراً واحداً كل مرة، فسيتمكن الأطفال المحظوظون الذين سيلقطون عملة الدولار الواحد من المغادرة فوراً. وتتجدر ملاحظة أنه حتى ولو أُصيب هذا الإنسان البالغ حامل عملة الدولار بنوبة كرم وألقى كمية كبيرة من الدولارات، فإن أعداد الأطفال الذين سيتمكنون من المغادرة ستزيد بشدة، لكن كل واحد منهم سيكون قد ترك مبلغ 15 سنتاً للحراس. وهذه حقيقة واقعة بصرف النظر عن العدد الكلي للدولارات الملقاة.

و هنا سنرى العلاقة بين ما ذكرناه والظاهرة الكهروضوئية. اقترح آينشتاين إدخال صورة القطع التي جاء بها بلانك لطاقة الموجات في وصف جديد للضوء معتمداً على البيانات التجريبية المذكورة أعلاه. وتبعاً لآينشتاين فإنه يجب أن ننظر إلى شعاع الضوء على أنه تيار من الحزم الدقيقة - جسيمات دقيقة للضوء - والتي أطلق عليها الكيميائي جلبرت لويس اسم "فوتونات" (وقد استخدمنا هذه الفكرة في مثال الساعة الضوئية في الفصل الثاني). ولإحساس بالقياس المستخدم، ووفقاً لهذه الرؤية حول سلبية الضوء المكون من جسيمات، فإن مصباحاً قدرته 100 وات يبعث بمائة مليار مiliار فوتون (10^{20}) في الثانية. وقد استخدم آينشتاين هذا المفهوم ليقترح الآلة المجهرية وراء الظاهرة المجهرية: سينطلق الإلكترونون من سطح الفلز إذا صدمه فوتون ذو طاقة كافية. لكن ما الذي يحدد طاقة كل فوتون على حدة؟ وقد اتبع آينشتاين طريق بلانك في تفسيره للنتائج التجريبية، واقتصر أن طاقة كل فوتون تناسب طردياً مع تردد موجة الضوء (ومعامل التناسب هو ثابت بلانك).

ومثل الحد الأدنى لتكلفة مغادرة الأطفال، فإن الإلكترونات في الفلز لا بد أن يصدمنها فوتون له حد أدنى من الطاقة حتى يمكن من مغادرة السطح. (ومثل الأطفال الذين يناضلون للحصول على النقود فإنه من غير المحتمل تماماً أن يصطدم الإلكترونون واحد بأكثر من فوتون - بل إن معظمهم لن يصطدم بأي فوتون). لكن إذا كان تردد الفوتونات الساقطة صغيراً جداً، فإن فوتوناتها لا تملك القوة اللازمة لطرد الإلكترونات. تماماً كما أنه لا يستطيع أي طفل المغادرة حتى مع الكمية الهائلة الملقاة عليهم من النقود، كذلك لن يمكن الإلكترونون من المغادرة بصرف النظر عن الطاقة الكلية الهائلة المصاحبة لشعاع الضوء الساقط إذا كان ترددتها ضئيلاً جداً (وكذلك طاقة كل فوتون).

و تماماً مثل ما حدث للأطفال حيث تمكنا من مغادرة المخزن عندما

تساقطت فئات من العملة الكبيرة كفاية، فإن الإلكترونات هي الأخرى ستغادر السطح عندما يصبح تردد الضوء الساقط عليها عالياً بما فيه الكفاية - أي فئة الطاقة. وعلاوة على ذلك، وكما في حالة الإنسان البالغ حامل الدولارات، عندما يزيد من كمية النقود الملقاة للأطفال بزيادة عدد الدولارات، فإن الشدة الكلية لشعاع ضوء ذي تردد معين ستزيد بزيادة عدد الفوتونات التي يحتويها الشعاع. وكما أن المزيد من الدولارات سيجعل المزيد من الأطفال قادرين على المغادرة، فإن العدد الأكبر من الفوتونات سيسبب في زيادة عدد الإلكترونات التي ستصطدم وتتحرر من سطح الفلز. وتتجدر ملاحظة أن كمية الطاقة المتبقية مع كل إلكترون منبعث بعد تركه السطح تعتمد كلية على طاقة الفوتون الذي اصطدم به - التي بدورها تتحدد بتردد شعاع الضوء وليس بشدته الكلية. تماماً كما يغادر الأطفال البدروم وكل واحد منهم قد ترك 15 ستاً بصرف النظر عن عدد الدولارات الملقاة إليهم، فإن كل إلكترون يغادر السطح وله نفس الطاقة - وبالتالي له نفس السرعة - بغض النظر عن الشدة الكلية للضوء الساقط. والمزيد من النقود يعني ببساطة أن المزيد من الأطفال سيتمكن من المغادرة، كذلك المزيد من الطاقة الكلية لشعاع الضوء يعني ببساطة مزيداً من الإلكترونات ستتحرر. فإذا أردنا أن يغادر الأطفال البدروم ومعهم مزيد من النقود علينا أن نرفع فئة العملة الملقاة إليهم، وبالمثل إذا أردنا أن تغادر الإلكترونات السطح بسرعة أعلى فلا بد من زيادة تردد شعاع الضوء الساقط - أي، أنت لا بد من أن ترفع فئة الطاقة للفوتونات التي تسقط على سطح الفلز. ويتطابق ذلك تماماً مع البيانات التجريبية. ويُحدّد تردد الضوء (لونه) سرعة الإلكترونات المنبعثة، بينما تحدد شدة الضوء الكلية عدد الإلكترونات المنبعثة. وهكذا بين آيشتاين أن استنتاجات بلانك حول قطع الطاقة تعكس، في الحقيقة، سمة أساسية للموجات الكهرومغناطيسية: فهي تتكون من جسيمات - فوتونات - وهي على شكل حزم صغيرة أو "كوانتا" من الضوء. والسبب في تقطيع الطاقة المصاحبة لهذه الموجات أنها هي في الأصل مكونة من قطع. وقد مثلت وجهة نظر آيشتاين تقدماً عظيمًا. لكن، وكما سرر، فإن القصة ليست بهذه الصورة الجيدة التي تبدو عليها.

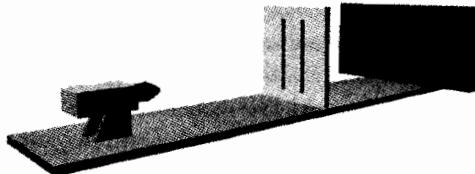
خامساً: هل هي موجة أم جسيمة؟

يعلم الجميع أن الماء - وبالتالي موجات الماء - تتكون من عدد هائل من الجزيئات. ولذا هل هو أمر غريب حقاً أن تتكون موجات الضوء من عدد هائل من الجسيمات هي الأخرى، وبالتالي من الفوتونات؟ نعم، الأمر كذلك. لكن

الغرابة تأتي في التفاصيل. وكما نرى، فإن نيوتن قد أعلن منذ أكثر من ثلاثة مائة سنة مضت أن الضوء يتكون من تيار من الجسيمات. ولذا فال فكرة ليست بجديدة. غير أن بعض أقران نيوتن، ومنهم الفيزيائي الهولندي المرموق كريستيان هيوغينز، لم يتفقوا معه في هذا الرأي بل إن هيوغينز أعلن أن الضوء عبارة عن موجات. احتمل الجدل، لكن في النهاية حسمته تجارب عالم الفيزياء الإنكليزي توماس يونغ في أوائل القرن التاسع عشر التي بينت أن نيوتن كان على خطأ.

ويوضح الشكل رقم (3-4) أحد نماذج تجارب يونغ - المعروفة بتجربة الشق الطولي المزدوج. كان فينمان مغرماً بالقول إن ميكانيكا الكم يمكن أن تدرك من خلال التفكير بعناية في تطبيقات هذه التجربة الفريدة. وهي جديرة بالمناقشة. وكما نرى في الشكل رقم (3-4) فإن الضوء يسقط على حاجز رقيق به شقان طوليان. وهناك لوح فوتوغرافي يسجل الضوء الذي يمر من الشقين. وتبين المساحات الأكبر سطوعاً على اللوح سقوط ضوء أكثر. وتتلخص التجربة في مقارنة الصور على الألواح الفوتوغرافية والناتجة عندما يكون أحد أو كلا الشقين في الحاجز مفتوحاً ومصدر الضوء مشتعلًا.

الشكل رقم (3-4)

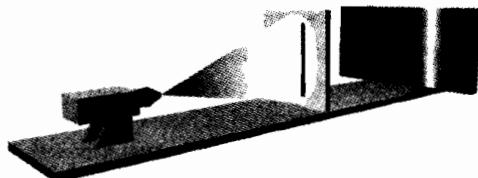


في تجربة الشق المزدوج، يسقط شعاع الضوء على حاجز به شقان طوليان. ويسجل الضوء الذي يمر من خلال الحاجز على لوح فوتوغرافي، عندما يكون أحد الشقين أو كلاهما مفتوحاً.

إذا كان الشق الأيسر مغلقاً والأيمن مفتوحاً، فإن الصورة ستظهر كما في الشكل رقم (4-4). وهو أمرٌ مقبول حيث إن الضوء الذي سيقع على اللوح الفوتوغرافي لا بد من أن يمرَّ خلال الشق المفتوح فقط، ولذلك سيتركز حول الجانب الأيمن من اللوح الفوتوغرافي. وبالمثل إذا أغلقنا الشق الأيمن وتركنا الأيسر مفتوحاً، فإن الصورة ستظهر كما في الشكل رقم (4-5). أما إذا ترك الشقان مفتوحين فإن فكرة نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات ستؤدي إلى توقع

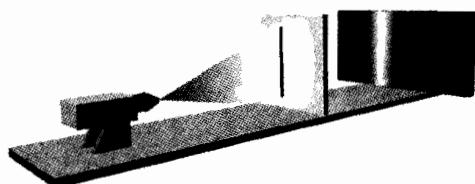
صورة اللوح الفوتوغرافي كما يظهر في الشكل رقم (6-4)، وهو مزيج من الشكلين رقمي (4-4) و(5-4).

الشكل رقم (4-4)



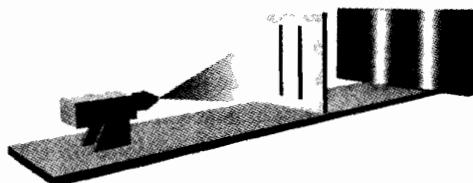
عندما يكون الشق الأيمن مفتوحاً في هذه التجربة يؤدي إلى الصورة المبنية على اللوح الفوتوغرافي.

الشكل رقم (5-4)



كما في الشكل رقم (4-4) بالضبط، إلا أن الشق الأيسر هو المفتوح هنا.

الشكل رقم (6-4)



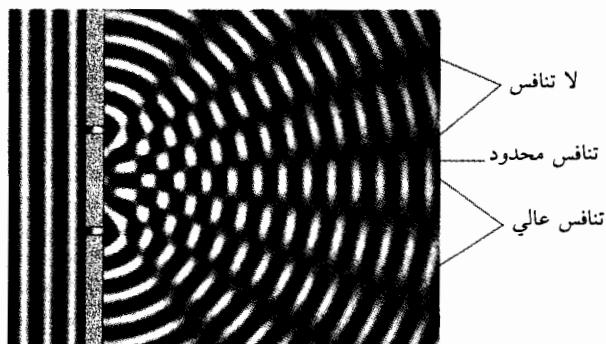
فكرة نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات تؤدي إلى أنه إذا كان الشقان مفتوحين فإن ما سيظهر على اللوح الفوتوغرافي هو مزيج الشكلين رقمي (4-4) و(5-4).

في الواقع، لو فكرت في جسيمات نيوتن للضوء على أنها كريات صغيرة تطلقها في اتجاه الحائط، فإن ما سينفذ منها سيتركز في المنطقتين على امتداد

الشقيقين الطوليين. وفي حالة ما إذا كانت طبيعة الضوء موجية، فإن ذلك سيؤدي إلى توقع مختلف جداً لما سيحدث عندما يكون الشقان مفتوحين. ولنر ما سيحدث.

تصور لوهلة أننا سنتعامل مع موجات الماء بدلاً من موجات الضوء. فسنحصل على نفس النتيجة، غير أن الماء أسهل عندما نفك في الأمر. فعندما تصطدم موجات الماء بالحاجز فإن موجات دائيرية ستنفذ من كل شق طولي، في صورة تشبه كثيراً ما يحدث عند إلقاء حصاة في بركة، كما هو موضح في الشكل رقم (4-7). (ويمكن محاولة إجراء هذه التجربة ببساطة باستخدام حاجز من الورق المقوى به شقان في وعاء به ماء). وعندما تتدخل الموجات النافذة من الشقيقين بعضها مع بعض سيحدث شيء مثير للاهتمام تماماً. فإذا التقت قمتان لموحتين الواحدة مع الأخرى فإن ارتفاع موجة الماء عند هذه النقطة سيزداد مساواً لمجموع ارتفاع قمتى الموحتين. أما إذا التقى قاعاً موحتين، فإن عمق انخفاض الماء عند هذه النقطة سيزداد بنفس الطريقة. وفي النهاية، إذا التقت قمة موجة نافذة من أحد الشقيقين مع قاع موجة نافذة من الشق الآخر فإنهما سيتلاشيان. (في الحقيقة، تكمن هذه الفكرة وراء التخلص من الضجيج في ساعات الرأس - يتم قياس شكل موجة الصوت القادم ثم يتبع موجة أخرى لها نفس الشكل وـ "مضادة" تماماً مما يؤدي إلى تلاشي الصوت غير المرغوب فيه). وفي ما بين هذه التداخلات القصوى - القمم مع القمم، والانخفاضات مع الانخفاضات، والقمم

الشكل رقم (4-7)

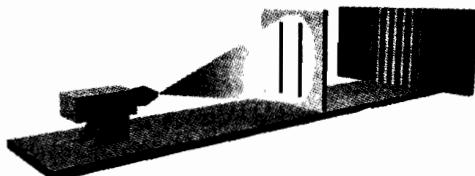


موجات الماء الدائرية التي تنفذ من كل شق طولي وينتقل مع بعضها مسيبة زيادة في ارتفاع الموجات في بعض المواقع وانخفاضها في البعض الآخر.

مع الانخفاضات - فإن هناك مجموعة من الزيادات الجزئية في ارتفاع الموجات أو تلاشياها. فإذا شكلت أنت وعدد وافر من رفاقك صفاً من القوارب الصغيرة موازياً للحاجز، ويسعلن كل واحد منكم مدى الاضطراب الذي تسببت فيه موجات الماء عند مرورها، فإن النتيجة ستتشبه كثيراً ما يبدو في أقصى يمين الشكل رقم (4-7). وستتحدد موقع أكبر اضطراباً عندما تتطابق قمم (أو قيعان) الموجات النافذة من كل شق. أما المناطق التي يقل أو ينعدم فيها الاضطراب فهي تلك التي تنطبق فيها القمم النافذة من أحد الشقين مع القيعان النافذة من الشق الآخر مما يؤدي إلى تلاشي الموجتين.

وحيث أن اللوح الفوتوغرافي يسجل مدى "الاضطراب" الناتج من الضوء، فإن نفس المنطق الخاص بموجات الماء ينطبق على صورة موجات شعاع الضوء مما يؤدي إلى ظهور الصورة كما في الشكل رقم (4-8) عندما يكون الشقان مفتوحين. وتبيّن أكثر المناطق سطوعاً في الشكل رقم (4-8) تطابق قمم الموجات أو قيعانها من كل شق. بينما تبيّن المناطق الداكنة موقع تطابق القمم من أحد الشقين مع القيعان من الشق الآخر مما يؤدي إلى تلاشيهما. ويعرف تتبع الحزم المضاء والمظلمة باسم نسق التداخل. وتختلف هذه الصورة بشكل واضح عن تلك الموضحة في الشكل رقم (4-6). وهذه وبالتالي تجربة قوية للتمييز بين طبيعة الضوء كجسيمات أو كموجات. وقد قام يونغ بإجراء تجربة من هذا النوع وجاءت نتائجها متطابقة مع الشكل رقم (4-8) مما يؤكد الطبيعة الموجية للضوء. انهزمت فكرة نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات (على الرغم من أن ذلك استغرق وقتاً طويلاً قبل أن يقتنع الفيزيائيون به) وقد تبع ذلك أن وضع ماكسويل الأسس الرياضية القوية التي دعمت هذه الفكرة عن طبيعة الضوء كموجات.

الشكل رقم (4-8)



إذا كان الضوء موجة، وفتح الشقان، فسيحدث تداخل بين أجزاء من الموجة النافذة من كل شق.

لكن آينشتاين، ذلك الرجل الذي قضى على نظرية الجاذبية الموقرة لنيوتون، يبدو أنه قد أحيا نموذج نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات وذلك بإدخال الفوتونات. ومن الطبيعي أننا ما زلنا نواجه نفس السؤال: كيف يمكن أن تكون النظرة التي تعتبر الضوء جسيمات مسؤولة عن نسق التداخل في الشكل رقم (4-8) ولأول وهلة، قد تقترح الآتي. يتكون الماء من جزيئات H_2O - جسيمات الماء. ومع ذلك، عندما يتدفق الكثير من هذه الجزيئات بعضها مع البعض، فإنها تنتج موجات الماء بخواص التداخل المرافقة لهذه الموجات والتي تظهر في الشكل رقم (4-7). وهكذا، قد يبدو من المنطقي أن نتوقع أن خواص الموجات مثل أنساق التداخل يمكن أن تنتج من طبيعة الضوء كجسيمات في حالة وجود عدد هائل من الفوتونات ، جسيمات الضوء.

وفي الواقع، فإن العالم الميكروسكوبي أكثر دقة بكثير. وحتى إذا خفضنا من شدة الضوء من مصدره في الشكل رقم (4-8) أكثر وأكثر إلى الدرجة التي عندها ستتنطلق الفوتونات منفردة واحداً تلو الآخر تجاه الحاجز - وليكن المعدل مثلاً فوتوناً كل عشر ثوان - فإن اللوح الفوتوغرافي سيحتفظ بنفس شكله وسيظهر كما في الشكل رقم (4-8): وطالما انتظرنا فترة كافية من الزمن لممرور عدد هائل من هذه الحزم الضوئية المنفصلة من خلال الشقوق الطولية، ولتسجيل كل منها على شكل نقطة في المنطقة التي تصطدم فيها باللوح الفوتوغرافي، فإن هذه النقط ستترافق لتكون صورة نسق التداخل، أي الصورة في الشكل رقم (4-8). وهذا أمر مذهل. كيف يمكن لجسيمات الفوتون المنفردة والتي تمر متsequبة خلال الحاجز منفصلة لتصطدم باللوح الفوتوغرافي، كيف لها أن تتأمر لتنتج الحزم المضيئة والحزم المظلمة للموجات المتداخلة؟ ويدلنا المنطق التقليدي أن كل فوتون سيمر من أي من الشقين الأيمن أو الأيسر، ولذا فإنه من المتوقع أن نجد النسق المبين في الشكل رقم (4-6)، لكن ذلك لا يحدث.

وإذا لم تربكك هذه الحقيقة عن الطبيعة، فإن ذلك يعني أنك إما أن تكون قد رأيتها من قبل وأصبحت غير مكتثر، أو أن عملية الشرح حتى الآن ليست واضحة بما فيه الكفاية. فإذا كان الأمر هو الحالة الأخيرة، إذن لنشرحها مرة أخرى بوسيلة مختلفة بعض الشيء. فإذا أغلقت الشق الأيسر وأطلقت الفوتونات واحداً تلو الآخر في اتجاه الحاجز ، فإن بعضها سيمر والبعض الآخر لن يمر. وستكون الفوتونات التي ستمر صورة على اللوح الفوتوغرافي نقطة ببنقطة لتشبه الشكل رقم (4-4). ستجري التجربة مرة أخرى باستخدام لوح فوتوغرافي جديد، فاتحا هذه المرة الشقين معاً. ومن الطبيعي أنك ستعتقد أن ذلك سيعني فقط زيادة

عدد الفوتونات التي ستمر خلال الشقين في الحاجز، لتصطدم باللوح الفوتوغرافي، وبالتالي ستعرض اللوح لضوء كلي أكثر من المرة الأولى. لكنك عندما ستقوم باختبار الصورة الناتجة في ما بعد، فإنك لن تجد فقط أن الموضع الذي كانت داكنة في التجربة الأولى قد أصبحت مضيئة الآن، ولكن عكس ما هو متوقع، ستكون هناك موضع آخر على اللوح الفوتوغرافي كانت مضيئة في التجربة الأولى أصبحت الآن مظلمة، كما في الشكل رقم (4-8). و "زيادة" عدد الفوتونات المنفردة التي تصطدم باللوح الفوتوغرافي فإنك "ستقلل" من درجة سطوع بعض المناطق. وبطريقة ما فإن جسيمات الفوتون المفردة والمنفصلة مؤقتاً قادرة على أن تلاشي بعضها البعض. وتخيل هذا الأمر الغريب: بعض الفوتونات التي كان من الممكن أن تمر خلال الشق الأيمن لتصطدم باللوح في إحدى المناطق المظلمة في الشكل رقم (4-8)، لن تتمكن من فعل ذلك عندما يكون الشق الأيسر مفتوحاً (وهو سبب إيلام تلك المنطقة الآن). لكن كيف بالله أن حزمة رقيقة من الضوء تمر خلال أحد الشقوق تتأثر بحالة الشق الآخر مفتوحاً أم لا؟ وكما ذكر فينمان، إنه أمر غريب، وكأنك لو أطلقت بندقية آلية تجاه الحاجز وعندما يكون الشقان مفتوحين، فإن الطلقات المنفردة والمستقلة ستلاشي بعضها البعض، تاركة نسقاً من الموضع التي لم تتأثر على سطح الهدف - وهي الموضع التي ستصاب إذا كان هناك ثقب واحد فقط هو المفتوح.

وتبيّن مثل هذه التجارب أن جسيمات الضوء عند آينشتاين تختلف تماماً عن تلك التي قال بها نيوتن. وبشكل ما، فإن الفوتونات - ولو أنها جسيمات - تتضمّن كذلك صفات شبيهة بمواجز الضوء. وحقيقة أن طاقة هذه الجسيمات تتحدد بواسطة صفة من صفات الموجات - التردد - هي أول إشارة إلى وجود اتحاد غريب. لكن كل من الظاهرة الكهروضوئية وتجربة الشق المزدوج قد جعلت المشكلة أكثر وضوحاً. وتبيّن الظاهرة الكهروضوئية أن للضوء خواص خاصّة للجسيمات. أما تجربة الشق المزدوج فقد أوضحت أن للضوء خواص تداخل الموجات. وبين الانثنان معاً أن للضوء خواص مثل كل من الموجات والجسيمات. ويطلب العالم الميكروسكيبي أن نتحشد حDSA حول وجود شيء هو إما موجة أو جسيمة، أو احتمال وجود الشيدين معاً. وهنا ظهرت للوجود مقوله فينمان أن "لا أحد يفهم ميكانيكا الكم"، ويمكن أن ننطق بكلمات مثل "ثنائية جسيمة - موجة". ومن الممكن ترجمة هذه الكلمات إلى صيغة رياضية تصف تجارب العالم الحقيقي بدقة مذهلة. لكنه في غاية الصعوبة أن نفهم على مستوى حدسي عميق الصفات المبهرة للعالم المجهرى.

سادساً: الجسيمات المادية هي الأخرى موجات

في العقود القليلة الأولى من القرن العشرين، تصارع العديد من كبار علماء الفيزياء النظرية بلا هواة لتطوير مفهوم معقول فيزيائياً وصحيح رياضياً للصفات المجهريّة الدقيقة (حتى الآن). فمثلاً، حدث تقدّم محسوس في تفسير خواص الضوء المنبعث من ذرات الهيدروجين المتوجه حرارياً، بقيادة نيلز بوهر في كوبنهاغن. غير أن ذلك وأبحاثاً أخرى أجريت قبل منتصف العشرينات من القرن العشرين كانت مجرد بديل مؤقت من تزاوج أفكار القرن التاسع عشر مع مفاهيم الكم المكتشفة حديثاً، أكثر منها أساساً متماسكاً لفهم العالم الفيزيائي. وعند مقارنة نظرية الكم المطورة جزئياً بالإطار المنطقي الواضح لقوانين نيوتن عن الحركة أو النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل، تبدو نظرية الكم في حالة مشوّشة.

في سنة 1923 أضاف النبيل الفرنسي الشاب، الأمير لويس دي برويل، عنصراً جديداً في المعركة الدائرة حول الكم، وهو العنصر الذي كان مقدراً له أن يساعد في الوصول إلى إطار رياضي لميكانيكا الكم الحديثة التي أكسبته جائزة نوبل في الفيزياء سنة 1929. وقد تحمس دي برويل سلسلة المفاهيم المتأصلة في النسبية الخاصة لآينشتاين، فاقتصر ثانية الموجة - جسيمة وأنها لا تتطبق فقط على الضوء، بل على المادة بنفس الشكل. وقد فكر بالطريقة المبدئية الآتية: إذا كان آينشتاين قد ربط بين الكتلة والطاقة في معادلته ، وكان بلانك وآينشتاين قد ربطا بين الطاقة وتردد الموجات لهذا فإنه عند جمع الاثنين معاً، فإن الكتلة لابد لها من تجسيد لشكل موجي أيضاً. وبعد إمعان الفكر في هذا الاتجاه، اقترح دي برويل أنه تماماً مثل كون الضوء خاصية موجية أظهرت لها نظرية الكم صفة الجسيمات، فإن الإلكترون - الذي عادة فكر فيه كجسيمة - يمكن أن تكون له صفة بمدلول الموجات. أعجب آينشتاين فوراً بفكرة دي برويل، حيث أنها كانت التطور الطبيعي لمساهماته في النسبية والفوتوتونات. ومع ذلك فلا شيء يمكن أن يحل محل الإثبات التجاري. وكان مقدراً لمثل هذا الإثبات أن يأتي عاجلاً في أبحاث كليتون دافيدسون وليستر جيرمر.

في منتصف العشرينات من القرن العشرين، كان كل من دافيدسون وجيرمر، من علماء الفيزياء التجريبيين، من شركة تليفونات بيل، قد درساً كيفية انعكاس شعاع من الإلكترونات من سطح كتلة من النيكل. وكل ما يهمنا في هذا الأمر أن بلورات النيكل في مثل هذه التجربة تقوم بعمل الشقين الطوليين في التجربة الموضحة في الأشكال - بالمعنى السابق. وفي الحقيقة، فإن من المقبول تماماً أن نفكّر في هذه التجربة على أنها نفس التجربة المصورة في ذلك المقطع، غير أنها

استبدلنا شعاع الضوء بشعاع من الإلكترونات. وستتبين وجهة النظر هذه، فعندما اختبر دافيدسون وجيرمر الإلكترونات أثناء مرورها خلال الشقين الطوليين في الحاجز، بأن سمح لها بأن تصطدم بشاشة فوسفورية لتسجل موقع الصدمة التي يحدّثها الإلكترون كنقطة مضيئة – وهو في الواقع ما يحدث في جهاز التليفزيون – وجدا شيئاً مبهراً. فقد ظهر نسق شبيه بذلك الموجود في الشكل رقم (4-8). ولذا فقد أظهرت تجربتهما أن ظاهرة التداخل تحدث للإلكترونات، وهي الأثر الدال على "الموجات". وفي النقاط المظلمة على الشاشة الفوسفورية، كانت الإلكترونات تلاشى بعضها البعض بطريقة أو بأخرى، تماماً كما في حالة تداخل القمم والقيعان في موجات الماء. وحتى إذا خفضت شدة شعاع الإلكترونات إلى الدرجة التي سيتبعت فيها الإلكترون واحداً مثلاً، كل عشر ثوان، فإن الإلكترونات المنفردة ستظل تظهر حزماً من الموضع المضيء والمظلمة – بقعة واحدة كل مرة، وبطريقة ما، وكما هو الحال مع الفوتونات، فإن الإلكترونات المنفردة "تداخل" بعضها مع بعض، بمعنى أن الإلكترونات المنفردة، وبعد فترة من الزمن، ستعيد بناء نسق التداخل المرتبط بالموجات. ونحن مضطرون بشكل لا فكاك منه لأن نستنتاج أن كل إلكترون يتضمن خاصية موجية مترافقه مع صورتها كجسيمات، التي هي أكثر ألفة لنا.

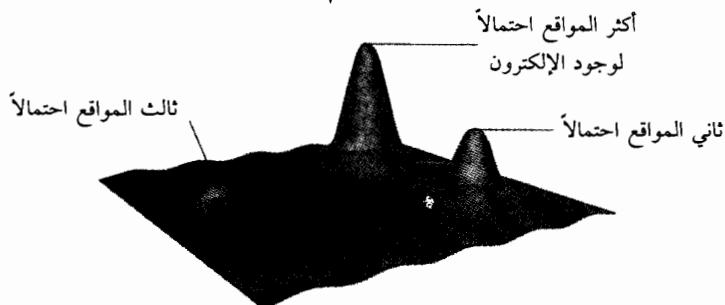
ومع أننا قد وصفنا هذا في حالة الإلكترونات، فإن التجارب المماثلة ستقودنا إلى استنتاج أن كل المادة لها خاصية موجية. لكن كيف ينسجم ذلك مع خبرتنا في عالمنا الحقيقي عن المادة كشيء جامد ثابت، ولا يمكن بأي حال أن يشبه الموجة؟ حسناً، وضع دي برويل صيغة لأطوال موجات المادة، وقد أظهرت أن طول الموجة يتناسب مع ثابت بلانك \hbar (وبصورة أدق، فإن طول الموجة يساوي \hbar مقسوماً على عزم الجسم المادي). وحيث إن \hbar صغيرة جداً، فإن أطوال الموجات الناتجة ستكون بالمثل ضئيلة مقارنة بالمقاييس العادية. ولهذا السبب فإن الخاصية الموجية للمادة تصبح واضحة بشكل مباشر فقط في دراسة العالم المجهرى. تماماً كما في حالة القيمة الهائلة لسرعة الضوء C ، والتي تحجب الكثير من طبيعة المكان والزمان الحقيقة، فإن ضالة \hbar تحجب السمات الموجية للمادة في حياتنا اليومية.

سابعاً: أية موجات؟

جعلت ظاهرة التداخل التي اكتشفها كل من دافيدسون وجيرمر الطبيعة الموجية للإلكترونات واضحة بشكل ملموس. لكن موجات ماذا؟ كان الفيزيائي النمساوي إروين شرودنغر قد اقترح مبكراً أن الموجات عبارة عن إلكترونات

"مكشوطه" ، وقد قرب هذا التعبير "الإحساس" بالموجة الإلكترونية، لكنه كان تقربياً جداً. وعندما تكتشف شيئاً ما فإن جزءاً منه يتواجد هنا وجزءاً آخر يتواجد هناك. إلا أنه لا يمكن أن يتصادف وجود نصف أو ثلث إلكترون أو أي جزء آخر منه في هذه الحالة. وهذا يجعل من الصعب أن تخيل حقيقة ما هو الإلكترون المكشوط. وكبديل لذلك، قام الفيزيائي الألماني ماكس بورن سنة 1926 بتنقية تفسيرات شرودنغر حول موجة الإلكترون. وما زالت تفسيرات ماكس بورن هي السائدة حتى الآن بعد إضافات بوهر ورفاقه إليها. كانت اقتراحات بوهر من أغرب سمات نظرية الكم، لكنها كانت مدعاة بكم هائل من البيانات التجريبية. أكد بوهر أن موجة الإلكترون لابد من تفسيرها بمفهوم "الاحتمالية". ففي الأماكن حيث يكون مقدار الموجة كبيراً (والأكثر دقة مربع المقدار) تكون أكثر المواقع احتمالاً لوجود الإلكترون. أما في الأماكن التي فيها مقدار الموجة صغير، فهي التي يكون احتمال وجود الإلكترون فيها أقل ما يمكن. ويصور الشكل رقم (9-4) مثالاً على ذلك.

الشكل رقم (9-4)



الموجة المصاحبة للإلكترون تكون أكبر حيثما احتمال وجود الإلكترون أكبر، وتكون أصغر كثيراً في أماكن الاحتمال الأقل لوجود الإلكترون.

وفي الحقيقة، هذه الفكرة غريبة. فما شأن الاحتمالية في صياغة الفيزياء الأساسية؟ فقد تعودنا على الاحتمالية في سباق الخيل، وفي المراهنة على وجه العملة عند إلقاءها، وعلى موائد القمار، وهذا يعكس تماماً عدم معرفتنا التامة بالأمر. فإذا كنا نعرف " بدقة " سرعة عجلة الروليت وزون وصلابة الكرة الصغيرة وموقع وسرعة تلك الكرة عند سقوطها على العجلة، والخواص الدقيقة للمادة المصنوعة منها التجويفات في هذه العجلة ... الخ، ثم استخدمنا حاسبات لها المقدرة الكافية على الحسابات الدقيقة، فإننا طبقاً للفيزياء الكلاسيكية يمكن أن

نتيجة تعيين أين ستستقر الكرة. وتعتمد نوادي القمار على عدم مقدرة الأشخاص على التتحقق من كل هذه المعلومات أو على إجراء الحسابات الضرورية قبل المراهنة. ولكننا نرى أن الاحتمالية على مائدة الروليت لا تعكس أي شيء أساسي بالتحديد عن الكيفية التي يسير بها الكون. وعلى النقيض، فإن ميكانيكا الكم تدخل مفهوم الاحتمالية إلى أعماق المستويات في الكون. ووفقاً لبورن وللتتجارب التي دامت أكثر من نصف قرن، فإن الطبيعة الموجية للمادة تعني أن المادة نفسها لا بد من أن توصف في صورة احتمالية بشكل أساسي. وبينما ذكر برويل أنه للأجسام الكبيرة مثل فنجان القهوة وعجلة الروليت تكون الخاصية الموجية حتى غير ملحوظة، ومعظم الأمور العادية فإن احتمالية ميكانيكا الكم المصاحبة يمكن أن تهمل تماماً. لكن على المستويات المجهرية فإن أفضل ما يمكن أن يقال هو أن للإلكترون احتمالية محددة في أن توجد في أي موقع معين.

وللتفسير الاحتمالي الفضل في أن موجة الإلكترون لها نفس سلوك الموجات الأخرى - فهي مثلاً، تصطدم بعائق ما وتعطي كل أنواع الاهتزازات المحددة - ولا يعني ذلك أن الإلكترون نفسه قد انশطر إلى قطع منفصلة. وبالآخر، فإن ذلك يعني أن هناك عدداً من المواقع يمكن للإلكترون أن يتواجد فيها بدرجة احتمال لا يمكن إهمالها. عملياً، فإن ذلك يعني أنه لو تكررت تجربة معينة متضمنة إلكتروناً مرات ومرات بشكل متطابق تماماً، فإننا لن نحصل على نفس الإجابة طوال هذه المرات، أي تحديد موقع الإلكترون. وبالآخر فإن التكرار المتتابع للتجربة سيؤدي إلى مجموعة من النتائج المختلفة لها خاصية أن عدد مرات تواجد الإلكترون في أحد المواقع محكم بشكل الموجة الاحتمالية للإلكترون. فإذا كانت احتمالية الموجة (والأكثر دقة مربع احتمالية الموجة) مرتبطة أكبر في الموقع A مما في الموقع B، فإن النظرية تنبأ بأن إجراء التجربة مرات متكررة ومتتابعة سيؤدي إلى اكتشاف وجود الإلكترون في الموقع A عدداً من المرات أكبر مرتين من وجوده في الموقع B. ولا يمكن توقع نتيجة التجربة، لكن الأفضل أن نتوقع احتمال حدوث أية نتيجة.

ومع ذلك، وطالما كنا قادرين على حساب الشكل الدقيق للموجات الاحتمالية، فإن احتمالية التنبؤات يمكن اختبارها بتكرار تجربة معينة عددة مرات، وبالتالي يمكن قياس احتمال الحصول على نتيجة معينة تجريبية. وبعد مرور بضعة أشهر على اقتراح دي برويل، اتّخذ شرودنجر خطوات حاسمة في هذا الاتجاه بوضع معادلة تحكم شكل الموجات الاحتمالية وتطورها، أو كما عرفت بعد ذلك، الدوال الموجية. ولم يمض وقت طويلاً حتى أصبحت معادلة شرودنجر

والتفسيرات الاحتمالية تستخدم للحصول على تنبؤات دقيقة بشكل مذهل. وبحلول العام 1927، كانت الأمور الكلاسيكية قد فقدت براءتها. وقد ولّ عصر كان العالم فيه يعمل كالساعة، حيث عناصر مكوناته قد دفعت إلى الحركة في لحظة ما من الماضي، وما زالت تؤدي دورها مستسلمة لقدرها المحتوم. ووفقاً لميكانيكا الكم، فإن الكون يتطور تبعاً لقواعد رياضية دقيقة وصارمة، غير أن هذا الإطار يحدد فقط احتمال حدوث أي شيء في المستقبل - وليس أي تغير في هذا المستقبل.

وجد الكثيرون أن هذه النتيجة مربكة، بل وحتى غير مقبولة. وكان آينشتاين أحد هؤلاء. وفي واحدة من أكثر المقولات شهرة في الفيزياء على مر الزمان، عتب آينشتاين على ميكانيكا الكم، قائلاً: "إن الله لا يلعب الترد مع الكون". وقد شعر أن الاحتمالية قد ظهرت في الفيزياء الأساسية لأن الصورة الرقيقة لأسباب ظهورها في حالة عجلة الروليت: نقص أساسي في فهمنا. وفي نظر آينشتاين فإنه لا مكان في العالم لمستقبل يتضمن شكله أي عنصر من عناصر الصدفة. فيجب أن تتنبأ الفيزياء بالكيفية التي يتتطور بها الكون، وليس مجرد احتمالات بأن يحدث أي تطور معين. لكن التجربة تلو الأخرى - وبعضاً الأكثر إقناعاً أجريت بعد وفاته - قد أثبتت أن آينشتاين كان على خطأ. وكما قال عالم الفيزياء النظري البريطاني ستيفن هوكنغ في هذا الصدد: "لقد كان آينشتاين هو المشوش وليس نظرية الكم".⁽⁶⁾.

وبالرغم من ذلك، فإن الجدل حول ما تعنيه ميكانيكا الكم ظل محتدماً. اتفق الجميع على كيفية استخدام معدلات نظرية الكم للتوصيل إلى تنبؤات دقيقة. لكن لم يكن هناك إجماع حول ما يعنيه وجود موجات احتمالية أو الكيفية التي "تحتار" بها الجسيمة أي مستقبل ممكן من بين العديد منها الذي تبعه، أو حتى ما إذا كانت تختار بالفعل أو تنفصل بدلأً من ذلك كرافد لتعيش خارج كل احتمالات المستقبل في عوالم متوازية دائمة التمدد. وتستحق هذه الموضوعات التفسيرية أن يفسح لها كتاب بأكمله، وفي الحقيقة هناك العديد من الكتب الرائعة التي تمزج طريقة بأخرى من طرق التفكير في نظرية الكم. والأمر الذي يبدو مؤكداً أنه مهما اختلفت طرق تفسير ميكانيكا الكم، فإنها تظهر من دون أي لبس أن الكون قد نأسس على مبادئ عجيبة من وجهة نظر خبرتنا اليومية.

(6) ستيفن هوكنغ، محاضرة في ندوة أمستردام عن العاذبية، والثقوب السوداء، ونظرية الأوتار، 21 حزيران / يونيو 1997.

والدرس الذي يمكن استخلاصه من ميكانيكا الكم والنسبية أننا إذا اخترنا بعمق الوظائف الأساسية للكون فإننا قد نتوصل إلى أشياء مختلفة تماماً عن توقعاتنا. وقد تتطلب الجرأة التي نطرح بها الأسئلة العميقة مرونة غير مسبوقة إذا كان علينا أن نقبل الإجابات.

ثامناً: منظور فينمان

كان ريتشارد فينمان واحداً من أعظم علماء الفيزياء النظرية بعد آينشتاين. وقد تقبل تماماً اللب الاحتمالي لميكانيكا الكم، لكنه في السنوات التي تلت الحرب العالمية الثانية اقترح وسيلة قوية جديدة في ما يتعلق بالنظرية. ويتفق منظور فينمان تماماً مع كل ما سبق من منطلق التنبؤات العددية. لكن صياغته كانت مختلفة. ولنصف ذلك من منظور تجربة الإلكترون والشقين الطوليين.

والشيء المريك في الشكل رقم (4-8) هو أننا نتصور أن على كل إلكترون أن يمر خلال أحد الشقين الأيسر أو الأيمن، ولذا فإننا نتوقع اتحاد الشكليين رقمي (4-4) و(4-5) في الشكل رقم (4-6) ليتمثل النتائج بدقة. ولا يعبر الإلكترون الذي يمر من الشق الأيمن أي اهتمام لوجود شق أيسر، والعكس صحيح. لكن بطريقة ما، يحدث ذلك. ويتطابق النسق التداخلي الناتج أن يتداخل ويمتزج شيء ما ذو حساسية لكلا الشقين، حتى لو أطلقا الإلكترونات واحداً تلو الآخر. ولقد فسر كل من شرودنغر، ودي برويل، وبورن هذه الظاهرة بأن نسبوا لكل إلكترون موجة احتمالية. ومثل موجات الماء في الشكل رقم (4-7)، فإن الموجة الاحتمالية للإلكترون "ترى" كلا الشقين ومعرضة لنفس نوع التداخل نتيجة التمازج. والأماكن التي تتعاظم فيها الموجات الاحتمالية بالتمازج تشبه الأماكن ذات الاضطراب المحسوس في الشكل رقم (4-7)، هي الأماكن التي يحتمل أن يتواجد فيها الإلكترون، بينما الأماكن التي تتناقص فيها الموجات الاحتمالية نتيجة التمازج تماثل الأماكن عديمة الاضطراب في الشكل رقم (4-7)، وهي المواقع التي لا يحتمل وجود الإلكترون فيها أبداً، أو حيث احتمال وجوده ضعيف جداً. تصطدم الإلكترونات واحداً فواحداً بالشاشة الفوسفورية، وتتوزع طبقاً لهذا النمط الاحتمالي، الأمر الذي ينتج منه نسق تداخلي مثل الموجود بالشكل رقم (4-8).

اتخذ فينمان وجهة مختلفة. فقد تحدى الفرضيات الكلاسيكية الأساسية التي تعني أن على الإلكترون أن يعبر من الشق الأيسر أو الأيمن. وقد تعتقد أن هذا الأمر خاصية أساسية في كيفية سير الأشياء، وأن تحديه أمر أحمق. وفي النهاية،

ألا تستطيع أن "تنظر" إلى المنطقة الموجودة بين الشقين والشاشة الفوسفورية لتحديد من خلال أي شق سيعبر الإلكترونون؟ أجل يمكنك ذلك. لكنك قد غيرت من التجربة الآن. ولكن "ترى" الإلكترونون، لابد أن تفعل شيئاً ما - على سبيل المثال يمكن أن تسلط عليه الضوء، يعني أن ترتد الفوتونات من سطحه. لكن الآن، وبالمقاييس العادلة، فإن الفوتونات عبارة عن مجسات صغيرة يمكن إهمالها، تعكس من سطح الأشجار واللوحات الفنية والناس من دون أن تؤثر بشكل أساسي في حركة هذه الأشياء الكبيرة جداً نسبياً. غير أن الإلكترونات كتل صغيرة من المادة. وبصرف النظر عن الكيفية الدقيقة التي يجري بها تحديد الشق الذي سيعبر فيه الإلكترونون، فإن الفوتون الذي سيرتد من الإلكترون سيؤثر بالضرورة في حركته التالية. وسيؤثر هذا التغير في الحركة في نتائج تجربتنا. فإذا أثرت في التجربة بالقدر الكافي فقط لتحديد الشق الذي سيعبر منه كل الإلكترونون، فإن التجارب تظهر أن النتائج ستختلف عن تلك الموجودة في الشكل رقم (4-8) لتتصبح مثل تلك الموجودة في الشكل رقم (4-6)! ويؤكد عالم الكم أنه بمجرد تحديد الشق الذي سيذهب إليه الإلكترونون، سواء كان الأيسر أو الأيمن، فإن التداخل بين الشقين سيتلاشى.

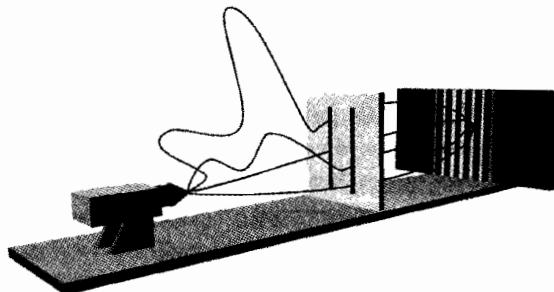
وهكذا، فإن فينمان كان على حق في إثارة هذا التحدي - على الرغم من أن خبرتنا في هذا العالم تتطلب في ما يبدو أن يعبر كل الإلكترونون من خلال أحد الشقين - حيث أيدن علماء الفيزياء في أواخر العشرينيات من القرن العشرين أن أية محاولة للتحقق من هذه الخاصية الأساسية الظاهرة للواقع تفسد التجربة.

زعم فينمان أن كل الإلكترونون ينفذ إلى الشاشة الفوسفورية فإنه في الواقع يعبر من خلال الشقين "معاً". و يبدو ذلك جنوناً، لكن انتظر: فإن الأمور ستتصبح أكثر غرابة. كان فينمان يدفع بأن كل الإلكترون منفرد أثناء انتقاله من المصدر إلى نقطة معينة على الشاشة الفوسفورية يتبع كل مسار محتمل في نفس الوقت. ويوضح الشكل رقم (4-10) القليل من هذه المسارات. يتوجه الإلكترون بطريقة منتظمة رائعة إلى العبور من الشق الأيسر. وفي نفس الوقت يتوجه بطريقة منتظمة رائعة إلى العبور من الشق الأيمن. يتوجه الإلكترونون ناحية الشق الأيسر ولكنه فجأة يغير من مساره ليتجه إلى الشق الأيمن. يتسعك الإلكترونون جيئه وذهاباً ليعبر في النهاية من الشق الأيسر. يذهب الإلكترونون في رحلة طويلة إلى مجرة أندروروميدا قبل أن يعود مرة أخرى ويمر من خلال الشق الأيسر في طريقه إلى الشاشة. ويظل الإلكترونون سائراً - وتبعاً لفينمان، فإنه يتنسم في نفس الوقت كل طريق ممكنته تربط بين نقطة انطلاقه ومحطته النهاية.

يُؤْمِن فِينِيَّمَانُ أَنَّ يُمْكِن أَنْ يَحْدُد عَدْداً مِنْ هَذِهِ الْمَسَارَات بِطَرِيقَةٍ تَجْعَل مَوْسِطَ خَلْطِهَا يُعْطِي نَفْسَ النَّتَائِج تَامَّاً لِلْاحْتِمَالِيَّةِ الْمُحْسُوبَةِ بِاسْتِخْدَامِ مَنْطَلَقِ دَالَّةِ الْمَوْجَةِ. وَهَكُذا فَإِنَّهُ مِنْ مَنْظُورِ فِينِيَّمَانَ، لَا تَوْجُد حَاجَةٌ إِلَى مَوْجَاتِ احْتِمَالِيَّةِ لِتَصَاحِبِ الْإِلْكْتَرُونَاتِ. وَبِدَلَّاً مِنْ ذَلِكَ، عَلَيْنَا أَنْ نَتَخَيلَ شَيْئاً مَمَاثِلًا إِنْ لَمْ يَكُنْ أَكْثَرُ غَرَابَةً. فَاحْتِمَالُ أَنْ يَصِلَ الْإِلْكْتَرُونُ إِلَى نَقْطَةِ مُخَاتَرَةٍ عَلَى الشَّاشَةِ مُبَنيٌ عَلَى التَّأْثِيرِ الْمُخْتَلَطِ لِكُلِّ مَسَارٍ مُمْكِنٍ لِلِّوْصُولِ إِلَى هَنَاكَ - مَعَ أَنَّا دَائِمًا نَنْظَرُ إِلَيْلِكْتَرُونَ عَلَى أَنَّهُ جَسِيمَةٌ. وَتَعْرِفُ هَذِهِ الطَّرِيقَةُ بِاسْمِ مَنْطَلَقِ "مَجْمُوعِ مَسَارَاتٍ" فِينِيَّمَانَ فِي مِيكَانِيَّكَا الْكَمِ (7).

وعند هذه النقطة توقف فهمك لتطور الفيزياء الكلاسيكية فجأةً: فكيف يمكن لإلكترون وحيد أن يتخذ مسارات مختلفة في نفس الوقت - بل عدداً لا نهائياً من تلك المسارات؟ يبدو ذلك الاعتراض وجهاً، غير أن ميكانيكا الكم - وهي فيزياء عالمنا - تتطلب أن نؤجل هذا الاعتراض مؤقتاً. وتتفق نتائج الحسابات التي استخدمت فيها طريقة فينمان مع طريقة الدالة الموجية التي تتفق بدورها مع التجارب. ويجب أن تترك الطبيعة لتتملى ما هو المعقول وما هو غير المعقول. وقد

الشكل رقم (10-4)



تبعاً لصياغة فينمان لميكانيكا الكم، فإننا لابد أن ننظر إلى الجسيمات على أنها تنتقل من موقع إلى آخر عن طريق كل مسار ممكن. وهنا قليل من المسارات اللانهائية للإلكترون منفرد ينتقل من المصدر إلى الشاشة الفوسفورية. لاحظ أن هذا الإلكترون المنفرد يمر فعلياً من خلال الشقين معاً.

(7) من المفيد أن نذكر أن منطلق فينمان في ميكانيكا الكم يمكن استخدامه لاستنتاج المنطلق المعتمد على دالة الموجة والعكس صحيح، ولذا فإن كلا المنطلاقين متكافئان تماماً. وعلى الرغم من أن المفاهيم واللغة والتفسير الذي يتضمنه كلا منطلق مختلف، إلا أن الإتجاهات التي يتوصّل إليها كا، منها متطابقة تماماً.

كتب فينمان مرة يقول "تصف [ميكانيكا الكم] الطبيعة بأنها منافية للعقل من وجهة النظر العامة. وهي تتفق تماماً مع التجارب. ولذا فإنني آمل أن تتقبل الطبيعة على أنها هي المنافية للعقل"⁽⁸⁾.

لكن من دون النظر لكون الطبيعة منافية للعقل عندما نختبرها على المستوى المجهري، فإن الأمور يجب أن تكون متفقة في الخفاء حتى يمكن أن نستعيد الأحداث الواقعية المألوفة للعالم الذي نعيشه كل يوم. ومن هذه النتائج، أوضح فينمان أنك إذا اختبرت حركة الأجسام الكبيرة مثل كرة البيسبول أو الطائرات أو الكواكب، وهي كبيرة مقارنة بالجسيمات تحت الذرية - فإن قاعدة فينمان، التي تمنع أعداداً لكل مسار، تؤكد أن كل المسارات تلغى بعضها البعض تاركة مساراً واحداً فقط إذا أخذنا في الاعتبار اتحادها بعضها مع بعض. وفي الواقع فإن مساراً واحداً فقط من بين العدد اللانهائي من المسارات هو الذي يعنينا عند النظر في حركة الجسم. وهذا المسار على وجه الدقة هو الذي ظهر من قوانين نيوتن للحركة. وهذا هو السبب في أن الأشياء تبدو في حياتنا العادية - مثل الكرة عند قذفها في الهواء - وكأنها تتبع مساراً واحداً متفرداً يمكن التنبؤ به من نقطة الانطلاق إلى نهاية المسار. أما في حالة الأجسام المجهريّة، فإن قاعدة فينمان التي تمنع أعداداً للمسارات تبين أن الكثير من المسارات المختلفة يمكن أن تساهم وتساهم بالفعل في حركة الجسم. فمثلاً، في تجربة الشق الطولي المزدوج، تمر بعض هذه المسارات عبر الشقوق المختلفة، لتعطي نسق التداخل الذي نلاحظه. ولذلك ففي العالم المجهري لا يمكن أن نجزم بأن الإلكترون يمر عبر شق معين من دون الآخر. ويشهد كل من نسق التداخل وصياغة فينمان البديلة لميكانيكا الكم بما لا يدع مجالاً للشك على عكس ذلك.

وكما نجد في التفسيرات المختلفة لكتاب ما أو شريط سينمائي عاماً مساعداً بشكل أو باخر لإدراك المفاهيم المختلفة للعمل (الكتاب أو الشريط السينمائي)، فإن نفس الشيء ينطبق على المنطلقات المختلفة لميكانيكا الكم. ومع أن منطلقات الدالة الموجية و"مجموع مسارات" فينمان دائماً ما تتفق تماماً مع بعضها في التنبؤات، إلا أنها تعطينا طرقاً مختلفة للتفكير في ما يحدث. وكما سترى في ما بعد، فإن أحد هذه المنطلقات يقدم إطاراً توضيحيّاً رفيع المستوى في بعض الاستخدامات.

Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton, NJ: (8) Princeton University Press, 1988).

تاسعاً: غرابة الكم

وهنا لابد أن تكون قد استوعبت بعض الشيء من الطريقة الدرامية الجديدة التي يعمل بها الكون تبعاً لميكانيكا الكم. وإذا كنت لم تصبح بعد ضحية للأقوال المحبيرة لبوهر، فإن غرابة الكم التي ستناقشها لابد أن تصيبك على الأقل بشيء من الدوار.

إن استيعابك ميكانيكا الكم بعمق أصعب من استيعابك لنظرية النسبية - (مثلكما يصعب) التفكير على غرار شخص صغير جداً قد ولد ونشأ في عالم مجهري. ومع ذلك فإن هناك سمة واحدة من سمات النظرية يمكن أن تعمل كنقطة مرجعية لحدسك، حيث إنها الصفة الرسمية التي تميز في الأساس بين الكم والمنطق الكلاسيكي. إنه مبدأ عدم اليقين الذي اكتشفه عالم الفيزياء الألماني ويرنر هيزنبرغ سنة 1927.

نبع هذا المبدأ من الاعتراض الذي يمكن أن تكون قد صادفه من قبل. فقد لاحظنا أن عملية تحديد الشق الطولي الذي يمر فيه الإلكترون (مكانه) سيؤثر بالضرورة في حركته التالية (سرعته). وكما يمكن أن نتأكد من وجود شخص ما بمجرد لمسه برفق أو بضربيه على ظهره بشدة، فلماذا لا نستطيع أن نحدد مكان الإلكترون بواسطة مصدر ضوئي "أكثر رقة" للحصول على أضعف ما يمكن من التأثير في حركته؟ ومن وجهاً نظر فيزياء القرن التاسع عشر، فإننا نستطيع ذلك. وباستخدام مصباح خافت جداً (وأجهاز حساس جداً لقياس الضوء)، فإننا يمكن أن نحصل على صدمة متناهية الضآلة في تأثيرها في حركة الإلكترون. لكن ميكانيكا الكم تلقي الضوء على عيوب هذا المنطق. فعندما نخفض من شدة مصدر الضوء، فإننا نعلم الآن أنها بذلك نقلل من عدد الفوتونات التي تبعث منه. فإذا وصلنا إلى الحد الذي تنطلق فيه الفوتونات منفردة فإننا لن نستطيع تخفيض الضوء أكثر من ذلك من دون أن نطفئه بالفعل. وتضع ميكانيكا الكم حداً أساسياً "لدرجة الرقة" التي عليها المجس المستخدم. وبذلك فإن هناك دائماً درجة دنيا من الاضطراب الذي نسببه لسرعة الإلكترون أثناء تحديدها لموقعه.

وهذا صحيح على الأغلب. ويدلنا قانون بلانك على أن طاقة الفوتون تتناسب طردياً مع تردداته (تناسب عكسياً مع طول الموجة). وباستخدام ضوء أقل فأقل ترددًا (أكبر فأكبر في طول الموجة) فإننا بذلك يمكن أن نحصل على فوتونات منفردة أكثر فأكثر رقة. وهنا مربط الفرس. فعندما تتعكس موجة من سطح جسم ما فإن المعلومات التي تلقاها منها تكفي بالكاد لتحديد موقع الجسم في

حدود هامش من الخطأ مساوٍ لطول الموجة. وللإحساس العدسي بهذه الحقيقة الهامة، فلتتخيل أنك تحاول أن تحدد بالضبط موقع صخرة كبيرة مغمورة جزئياً عن طريق تأثيرها في موجات المحيط التي تمر بها. وعند اقتراب الموجات من الصخرة فإنها تشكل سلسلة من الحلقات على شكل موجات تعلو وتذهب في تتابع ونظام جيد. وبعد أن تمر هذه الحلقات من الموجات بالصخرة فإنها تضطرب، وهو ما يدل على وجود الصخرة المغمورة. ومثل العلامات المحفورة على المسطرة والتي تحدد الأطوال، فإن حلقات الموجات في صعودها وهبوطها هي أصغر الوحدات التي تشكل سلسلة الموجات، ولذلك فإنه باختبار مدى الاضطراب الذي تحدثه الصخرة فقط، يمكننا تحديد موقع الصخرة في حدود هامش من الخطأ مساوٍ لطول حلقة من الموجات، أي طول الموجة. وفي حالة الضوء، فإن الفوتونات عموماً هي حلقات الموجات المنفردة (حيث يتحدد ارتفاع حلقة الموجات بعدد الفوتونات)؛ وعليه فإن الفوتون يمكن أن يستخدم لتحديد موقع جسم بالضبط في حدود دقة مساوية لطول موجته.

وهكذا فإننا نواجه فعل التوازن الناتج من ميكانيكا الكم. فإذا استخدمنا ترددًا عالياً (أطوال موجات قصيرة) للضوء فإننا نستطيع تحديد موقع الإلكترون بدقة أكبر. غير أن الفوتونات عالية التردد لها طاقة كبيرة، ولذلك فإنها تحدث اضطراباً في سرعة الإلكترون. أما إذا استخدمنا ضوءاً منخفض التردد (أطوال موجات كبيرة) فإننا نقلل من التأثير في حركة الإلكترون، حيث أن الفوتونات هنا لها طاقة صغيرة نسبياً، لكننا في هذه الحالة سنس بحي بدقة تحديد موقع الإلكترون. وقد قام هيزنبرغ بإخضاع هذا التنافس لمفهوم الكم واكتشف علاقة رياضية تربط بين دقة تحديد موقع الإلكترون ودقة تعين سرعته. فقد وجد - متمشياً مع نقاشنا - أن كلاً منها يتناسب عكسياً مع الآخر: فالدقة الأعلى في تحديد الموقع تعني بالضرورة دقة أقل في قياس السرعة، والعكس صحيح. وما هو في غاية الأهمية، وبالرغم من تركيزنا في نقاشنا على طريقة معينة لتحديد ما يتعلق بالإلكترون، فإن هيزنبرغ قد بين أن دقة تحديد الموقع تأتي على حساب دقة تعين السرعة والعكس صحيح، وأن هذه الحقيقة من الأساسيةيات الصحيحة بصرف النظر عن الأجهزة المستخدمة أو الطريقة المتبعة. وعلى عكس إطار نيوتن أو حتى إطار آينشتاين اللذين توصف فيهما حركة الجسم بتحديد مكانها وسرعتها، فإن ميكانيكا الكم تبين أنه على المستوى المجهي لن نستطيع تحديد كليهما بدقة تامة. والأكثر من ذلك، إذا عرفت أحدهما بدقة أكثر فإن الآخر سيصبح معروفاً بدقة أقل. ومع أننا قد شرحنا هذا الأمر بالنسبة للإلكترونات، إلا أن هذه الأفكار تنطبق تماماً على

كل مكونات الطبيعة.

حاول آينشتاين أن يقلل من هذا الابتعاد عن الفيزياء الكلاسيكية، بأن يزعم بأنه على الرغم من أن منطق الكم يبدو بجلاء أنه يحدد معرفة الإنسان بموضع وسرعة الإلكترون، إلا أن الإلكترون ما زال يملك موقعاً وسرعة محددين كما تعلمنا دائماً. لكن خلال العقددين الأخيرين أوضح التقدم النظري الذي أحرز بقيادة عالم الفيزياء الأيرلندي المתוّفي جون بل، وبالنتائج التجريبية لآلأن أمسكت الإلكترونون وفي نفس الوقت تحديد سرعته، ولا يخص هذا الأمر الإلكترونون فقط، بل كل شيء. وتبيّن ميكانيكا الكم أنه لا يمكن التحقق تجريبياً من هذه المقوله فقط - كما هو مشروع أعلاه - ، بل إنها تتناقض بشكل مباشر مع النتائج التجريبية التي توصلنا إليها حديثاً.

وفي الواقع إذا أمسكت إلكتروناً ووضعته في صندوق كبير ثم بدأت في الضغط على جدران الصندوق لتحديد موقع الإلكترون بدقة أكثر فإنك ستجد أن الإلكترون سيصبح أكثر فأكثر هيجاناً. كما لو كان قد أصبح بعconde الخوف من الأماكن المغلقة، وسيصبح كالمحنون - مصطداماً بجدران الصندوق بسرعة متزايدة شديدة الهياج غير متوقعة. فالطبيعة لا تسمح لمكوناتها بأن تتحاصر. وفي الحالة المذكورة من قبل، وإذا تصورنا أن \hbar أكبر كثيراً من قيمتها في العالم الحقيقي، مؤدية إلى أن تخضع الأشياء العاديّة في حياتنا اليومية لتأثيرات الكم، فإن مكعبات الثلج في مشروبات جورج وغريس ستتحرّك بجنون لأنها ستتعاني من الخوف من الأماكن المغلقة بالمفهوم الكمي. ومع أن الحانة المذكورة مكان خيالي - فقيمة \hbar في الواقع في غاية الضالّة، فإن هذا النوع من الخوف من الأماكن المغلقة هو صفة عامة للعالم المجهرى. وتصبح حركة الجسيمات المجهرية أكثر عنفاً عند اختبارها وحصرها في أماكن محدودة من الفراغ.

ويؤدي مبدأ عدم التيقن كذلك إلى نشوء ظاهرة مدهشة تعرف باسم ظاهرة "المرور في نفق الكم". فإذا أطلقت رصاصة من البلاستيك صوب حائط أسمته سمهكة عشرة أقدام، فإن الفيزياء الكلاسيكية تؤكد ما تنبئ به غريزتك: سترتد الرصاصة إليك. والسبب في ذلك ببساطة أن الطلقة لا تملك الطاقة الكافية لتنفذ من خلال هذا العائق الهائل. غير أنه على مستوى الجسيمات الأساسية فإن ميكانيكا الكم تبيّن بما لا يدع مجالاً للشك أن دوّال الموجة - أي الموجات الاحتمالية - للجسيمات المكونة للرصاصة تملك قطعاً صغيرة جداً ستخترق هذا الحائط. ويعني ذلك أن هناك فرصة ضئيلة - لكنها ليست صفرة - أن تخترق

الرصاصة بالفعل الحائط لتندفع من الجانب الآخر. كيف يحدث ذلك؟ يرجع السبب، مرة أخرى، إلى مبدأ عدم اليقين لهيزنبرغ.

ولإدراك ذلك، تخيل أنك عاطل تماماً ثم فجأة علمت أن لك قريباً من بعيد قد توفي تاركاً لك ثروة هائلة لترثها. والمشكلة الوحيدة أنك لا تملك ثمن تذكرة الطائرة للوصول إلى هناك. ستشرح الأمر لأصدقائك: فإذا سمحوا لك بالتلغلب على الحاجز الذي يفصل بينك وبين ثروتك الجديدة بأن يقرضوك لفترة قصيرة المال لشراء التذكرة، فإنك ستجازيهم بسخاء بعد عودتك. لكن لا يملك أحد منهم المال ليقرضك. غير أنك تذكر أن لك صديقاً قدماً يعمل بشركة طيران، وستتوسل إليه بنفس الطلب. ومرة أخرى لا يستطيع أن يقرضك المال لكنه يقدم لك حلاً. نظام المحاسبة في شركات الطيران يعمل بطريقة معينة تفيد أنه إذا أبرقت ثمن التذكرة خلال 24 ساعة من وصولك إلى نهاية الرحلة، فلن يعرف أحد أنك لم تدفع ثمن التذكرة قبل السفر، وبهذه الطريقة ستحصل على ميراثك.

طرق المحاسبة في ميكانيكا الكم تشابه ذلك تماماً. وكما بين هيزنبرغ أن هناك تبادلاً بين دقة تحديد الموقع والسرعة، فقد بين كذلك أن هناك تبادلاً مشابهاً في دقة قياس الطاقة والوقت الذي تستغرقه عملية القياس. وتؤكد ميكانيكا الكم أنك لا تستطيع تحديد طاقة جسيمة ما بالضبط في لحظة معينة من الزمن. فالدقة المتزايدة لقياس الطاقة تتطلب فترة زمنية أطول لإجراء القياس. وعموماً فإن ذلك يعني أن طاقة الجسيمة يمكن أن تتأرجح كثيراً طالما أن هذا التأرجح يحدث في فترة قصيرة بما فيه الكفاية. تماماً مثل نظام المحاسبة في شركة الطيران الذي "يسمح لك" بأن "تفترض" ثمن تذكرة الطيران بشرط أن ترده بسرعة كافية، فإن ميكانيكا الكم تسمح للجسيمة أن "تفترض" طاقة طالما أنها ستردها خلال إطار زمني يحدده مبدأ عدم التأكيد لهيزنبرغ.

وتبيّن رياضيات ميكانيكا الكم أنه كلما كبر حاجز الطاقة كلما قل احتمال حدوث هذا النظام المحاسبي المجهري البديع. غير أنه بالنسبة للجسيمات المجهريّة التي تواجه الارتطام بالحائط الأسموني فإنها تستطيع في بعض الأحيان أن تفترض ما يكفي من الطاقة لتচنع المستحيل من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية - أي تنفذ لحظياً عن طريق نفق من خلال منطقة لم يكن لهذه الجسيمات في البداية طاقة كافية لعبورها. وكلما ازداد تعقيد الأجسام التي ندرسها - تكون من أعداد متزايدة من الجسيمات - فإن مثل هذا النفق الكمي يمكن أن يحدث ولكنه يصبح أقل احتمالاً، حيث لا بد أن تكون كل الجسيمات موفقة للدرجة التي يمكنها أن تعبّر من النفق الكمي معًا. وإنّ كان من الممكن أن

تحدث كل الأمور الغريبة مثل اختفاء سيجار جورج وعبور قطعة الثلج من جدار الكأس واختراق جورج وغريس لجدار الحانة. وفي العالم الخيالي مثل الحانة المذكورة التي تخيلنا أن قيمة \hbar فيها كبيرة، فإن مثل هذا النفق الكمي يصبح شيئاً عادياً. غير أن قواعد احتمالية ميكانيكا الكم - وبصفة خاصة القيمة الفعلية الضئيلة \hbar في العالم الواقعي - تبين أنك لو حاولت عبور الحائط مرة كل ثانية فإن عليك أن تستمر في هذه المحاولات زمناً أطول من عمر الكون لتصيب فرصة عبور الجدار أثناء إحدى المرات. ويمثل هذا الدأب الأبدى (والعمر الطويل)، فإنك قد تتمكن - آجلاً أم عاجلاً - من الخروج من الناحية الأخرى من الجدار.

ويصيب مبدأ عدم التيقن القلب من ميكانيكا الكم. وسمات الأجسام في أن لها موقع وسرعات محددة، وأن لها طاقة محددة في لحظات معينة، والتي عادة ما نتصور أنها أمور أساسية ليست محل تساؤل، ننظر إليها الآن على أنها مجرد نتاج لضاللة ثابت بلانك بمقاييس حياتنا اليومية. ومن أولى الأهميات أنه عند تطبيق الحقائق الكمية على نسيج الزمان فإنه يكشف عيناً مميتاً في "خيوط الجاذبية" ويؤدي إلى التناقض الثالث الأولي الذي واجهته الفيزياء خلال القرن الماضي.

الفصل الخامس

الحاجة إلى نظرية جديدة:

النسبية العامة في مواجهة ميكانيكا الكم

لقد تعمق فهمنا بشدة للعالم الفيزيائي خلال القرن الماضي. وقد مكنتنا الأدوات النظرية لميكانيكا الكم والنسبية العامة من فهم ووضع تنبؤات قابلة للاختبار تتعلق بالأمور الفيزيائية بدءاً من العالم الذري وتحت الذري إلى الظواهر التي تحدث على مستوى المجرات وتجمعات المجرات وفي ما وراء بنية الكون ذاته. وهو إنجاز بارز. ومن الملهمحقيقة أن المخلوقات الموجودة في أحد الكواكب التي تدور حول نجم عادي يقع في الطرف البعيد لمجرة عادية نسبياً قد تمكنت، من خلال التفكير والتجريب، من تأكيد واستيعاب بعض أعظم الخواص غامضًا في العالم الفيزيائي. وعلى كل، فإن الفيزيائيين كعادتهم لن يهدأ لهم بال حتى يشعروا بإزاحة الغموض عن أعمق الأشياء وأكثرها أساسية في الكون. وهذا ما كان قد ألمع ستيفن هوكتنغ إليه كخطوة أولى نحو إدراك "عقل الرب"⁽¹⁾.

وهناك أدلة وفيرة على أن كلاً من ميكانيكا الكم والنسبية العامة لا تقدم هذا المستوى العميق لفهم الأمور. ولأن نطاق عمل كل منها يختلف عن الآخر بشكل كبير فإن معظم المواقف تحتاج إلى استخدام إما ميكانيكا الكم أو النسبية العامة وليس الاثنين معاً. ومع ذلك، وفي ظروف خاصة جداً، عندما تكون الأشياء ذات كتلة هائلة وحجم صغير جداً - بالقرب من النقطة المركزية للثقوب السوداء أو كل الكون عند لحظة الانفجار الهائل، وهما مثالان فقط - يتطلب الأمر استخدام النسبية العامة وميكانيكا الكم من أجل فهم أفضل. وعندما تحاول جمع ميكانيكا الكم مع النسبية العامة فإن الوضع يشبه وضع اللهب بجوار البارود، وسيؤدي اتحادهما إلى كارثة مدوية. وتظهر الصياغة الجيدة للمسائل الفيزيائية

Stephen Hawking, *A Brief History of Time: From The Big Bang To Black Holes*, (1) Introduction by Carl Sagan, Illustration by Ron Miller (Toronto; New York: Bantam Books, 1988), p. 175.

إجابات غير منطقية عند مزج معادلات النظريتين معاً. وتشمل الإجابات غير المنطقية شكل تنبؤات حول احتمال حدوث بعض العمليات في ميكانيكا الكم، فهي لا تجيء كنسبة 20٪ أو 73٪ أو 91٪، بل ما لا نهاية له. لكن بحق السماء ما الذي يعنيه احتمال أكثر من الواحد، ولا نقول ما لا نهاية؟ ونحن مدفوعون للقول بأن هناك خطأ جسيماً. وبالفحص الدقيق للخواص الأساسية للنسبية العامة وميكانيكا الكم فإننا يمكن أن نحدد هذا الخطأ.

أولاً: لب ميكانيكا الكم

عندما اكتشف هيزنبرغ مبدأ عدم التيقن، استدارت الفيزياء بحده في اتجاه لم ترجع منه أبداً. فالاحتمالات ووظائف الموجة والتداخل والكلمات تتضمن وسائل راديكالية جديدة لإدراك الواقع. ومع ذلك، فإن الفيزيائي "الكلاسيكي" العائد قد يظل عالقاً بتصنيف من الأمل في أن تجتمع كل هذه المفاهيم الحديثة في إطار واحد لن يبعد كثيراً عن الطريقة القديمة في التفكير. غير أن مبدأ عدم اليقين يقطع كل محاولة للتمسك بالماضي بشكل حازم.

وينبئنا مبدأ عدم التيقن بأن الكون عبارة عن مكان مضطرب عندما نختبره على مسافات أصغر وأصغر وفي أزمنة أقصر وأقصر. وقد رأينا بعض الأدلة على ذلك أثناء محاولاتنا - التي شرحتها في الفصل السابق - لتحديد موقع الجسيمات الأولية مثل الإلكترون بدقة: وذلك بتسلیط ضوء ساطع ذي تردد متزايد على هذه الإلكترونات، لقياس موقعها بدقة متزايدة. لكن ذلك لن يمر من دون مقابل، حيث أن ملاحظاتنا ستصبح أكثر وأكثر اضطراباً. فطاقة الفوتونات عالية التردد تكون عالية، وبالتالي فإنها "تركل" الإلكترونات بشدة ما يغير من سرعتها بشكل ملحوظ. مثل الهياج الذي يحدث في حجرة مملوقة بالأطفال الذين تعرف مكانهم اللحظي بدقة عالية، لكن لا تملك أن تعرف سرعتهم واتجاههم أثناء حركتهم. وتعني عدم المقدرة على تحديد موقع وسرعة واتجاه الجسيمات الأولية أن العالم المجهرى هو عالم مضطرب ذاتياً.

وعلى الرغم من أن هذا المثال يبيّن الارتباط الأساسي بين عدم التيقن والاضطراب، إلا أنه يكشف في الواقع فقط جزء من الرواية. وقد يقودك ذلك مثلاً إلى التفكير في أن عدم التيقن ينتج فقط عندما نتعثر نحن الراصدين الخرقاء للطبيعة على مسرح الأحداث. لكن ذلك غير صحيح. ومثال الإلكترون المحبوس داخل صندوق صغير عندما ينفعل بعنف متراجعاً في جميع الاتجاهات بسرعة كبيرة

يقربنا بعض الشيء من الحقيقة. فحتى بدون "ضربات مباشرة" من فوتونات التجربة المسببة للأضطراب، فإن سرعة واتجاه الإلكترون يتغيران بشدة وبشكل غير متوقع بين لحظة وأخرى. ولكن حتى هذا المثال لا يكشف كلية عن السمات المجهريّة الخارقة للطبيعة التي ضمنها هيزنبرغ في اكتشافه. وحتى في أكثر الواقع هدوءاً، مثل جزء خالٍ من الفضاء المكان، فإن مبدأ عدم التيقن ينبعنا بأنه من منطلق التفضيل المجهري فإن هناك كما هائلاً من الأحداث. وتزداد هذه الأحداث اضطراباً كلما صغرت مقاييس المسافة والزمن.

ويعتبر نظام المحاسبة الكمي أساسياً لفهم ذلك. فنحن نرى من الفصل السابق أنه تماماً مثل احتمال أن تفترض مؤقتاً النقود للتغلب على عقبة مالية هامة، فإن جسيمة مثل الإلكترون يمكن أن تفترض مؤقتاً طاقة للتغلب على حاجز فيزيائي حقيقي، وهذا صحيح. وتدفعنا ميكانيكا الكم خطوة هامة أبعد في تناولنا لهذا التشابه. تخيل شخصاً مدمداً للاقتراء، فهو يتنقل من صديق لآخر طالباً المال. فكلما قصرت الفترة الزمنية لحصوله على المال كلما طالب بفرض أكبر. فهو يفترض ويرد ثم يفترض ويرد مرات ومرات بلا هوادة، أي أنه يأخذ النقود ليعيدها في زمن قصير. ومثل أسعار الأسهم في البورصة في يوم مضطرب في شارع وول ستريت (شارع المال) فإن كمية النقود التي يمتلكها مدمداً الاقتراء في أي لحظة تتفاوت بشدة قصوى، لكن في نهاية المطاف عندما تهدأ الأمور ويحاسب مالياته يتضح أنه في موقف ليس أفضل من لحظة البداية.

ويؤكّد مبدأ عدم التيقن لهيزنبرغ أن هناك إزاحة مضطربة مشابهة جيئة وذهاباً للطاقة والعزّم تحدث بصورة دائمة في العالم على مسافات وفترات زمنية مجهريّة. وحتى في منطقة خاوية من الفضاء المكان - داخل صندوق فارغ مثلاً - فإن مبدأ عدم التيقن ينص على أن الطاقة والعزّم غير مؤكدين فهما يتآرجحان بين قيم قصوى تكون كبيرة إذا كان حجم الصندوق والفترة الزمنية لاختبار صغيرين (يزدادان صغاراً). وفي هذه الحالة فإن حيز الفراغ داخل الصندوق يعمل كما لو كان مدمداً "لاقتراص" الطاقة والعزّم، فهو يأخذ القروض من الكون ويعيدها مرة أخرى إليه. لكن ما هو الشيء الذي يساهم في هذه التبادلات، في هذا الجزء الخالي من الفضاء الهادئ مثلاً؟ إنه كل شيء. في الحقيقة كل شيء. فالطاقة (والعزّم كذلك) هي في النهاية العملة القابلة للتحويل. وتبين المعادلة $E = mc^2$ أنه يمكن تحويل الطاقة إلى مادة والعكس صحيح. وهكذا إذا كان تأرجح الطاقة كبيراً بما فيه الكفاية فإنه قد يتسبب لحظياً في خروج إلكترون وجسيمه المضادة، البوزيترون، إلى الوجود، حتى لو كان هذا الجزء من الفضاء المكان فارغاً في

البداية! وحيث أن هذه الطاقة لابد أن ترد بسرعة، فإن تلك الجسيمات ستلاشي بعضها البعض بعد لحظة قصيرة لتعيد الطاقة المقتضبة أثناء خروجها إلى الوجود. وينطبق نفس الشيء على كل صور الطاقة الأخرى وصور العزم - نشوء وتلاشي جسيمات أخرى، وذبذبات المجال الكهرومغناطيسي الهائج، وتارجع مجال القوى الضعيفة والقوية - حيث يُبَيِّنُنا عدم التيقن في ميكانيكا الكم بأن الكون ساحة مزدحمة مشوشاً مضطربة على المستويات المجهرية. وقد سخر فينمان مرة قائلًا: "نشوء وتلاش ثم نشوء وتلاش، أي مضيعة للوقت".⁽²⁾ وحيث أن الاقتران ثم إعادة الدفع يلاشي كل منهما الآخر في المتوسط، لذلك فإن الجزء الخالي من الفضاء يبدو هادئاً رابطاً الجأش عندما تختبره بعيداً عن المستوى المجهرى. ويكشف مبدأ عدم التيقن مع ذلك أن العالم الماكروسكوبى (Macroscopic) يحجب في المتوسط النشاط الراهن على المستوى المجهرى.⁽³⁾ وكما سررى بعد برهة وجية فإن هذا الشطط هو العقبة أمام مرج النسبية العامة وميكانيكا الكم.

Timothy Ferris, *The Whole Shebang: A State-of-The-Universe(s) Report* (New York: (2) Simon & Schuster, 1997), p. 97.

(3) إذا كنت ما زلت متبحراً حول كيفية حدوث أي شيء في منطقة خالية من الفضاء، فمن المهم أن تتحقق من أن مبدأ عدم التيقن يضع حدأً على مدى "خلاء" منطقة من الفضاء، وهو يعدل ما تنبأ به بولنا "الفضاء الخالي". فعلاً، عند تطبيقه على اصطدامات الموجات في مجال ما (مثل الموجات الكهرومغناطيسية التي تنتقل في مجال كهرومغناطيسي)، فإن مبدأ عدم التيقن يبين أن سعة الموجة والسرعة التي تتغير بها هذه السعة معرضتان لنفس العلاقة العكسية مثل موقع وسرعة الجسيمة. كلما تحددت السرعة بصورة أكثر دقة كلما كان احتمال علمنا بالسرعة التي تتغير بها سعتها أقل. والآن، عندما نقول منطقة خالية من الفضاء فإننا نعني بالضبط أنه لا توجد موجات تعبير من خاللها، وأن لكل المجالات قيمة متساوية للصفر، وذلك ضمن أمور أخرى. وبلغة معقدة لكنها في النهاية مفيدة، يمكننا إعادة صياغة ذلك بأننا نقول إن سعة كل الموجات التي تعبير هذه المنطقة متساوية للصفر بالضبط. فإذا عرفنا بالضبط قيمة السعة فإن مبدأ عدم التيقن يعني أن معدل تغير السعة غير محدد بالمرة ويمكن أن يكون له قيمة مفيدة. وإذا كانت السعة تتغير بذلك يعني أنها في لحظة تالية لن يكون مقدارها صفر، حتى لو ظلت منطقة الفضاء "خالية". ومرة أخرى، فإن المجال في المتوسط سيكون صفرأً حيث أنه في بعض الأماكن ستكون السعة ذات قيمة موجية وفي أماكن أخرى سالبة، وعندئذ لن تتغير محصلة الطاقة في المتوسط غير أن ذلك قيمة متوسطة فقط. ويعني عدم التيقن الكمي أن الطاقة في المجال - حتى في المنطقة الخالية من الفضاء - تارجع صعوداً وهبوطاً ويزداد مقدار التأرجح كلما صغرت مقياس المسافة والزمان الذي تخبر المنطقة في حدوده. ويمكن للطاقة المتنبأة في مثل هذه التأرجحات اللحظية في المجال أن تحول من خلال المعادلة $E=mc^2$ إلى تكون أزواجاً لحظية من الجسيمات والجسيمات المضادة، التي يلاشى بعضها البعض في التو لتحافظ على الطاقة من دون تغير في المتوسط.

ثانياً: نظرية مجال الكم

خلال حقبة الثلاثينيات والأربعينيات من القرن العشرين، ناضل الفيزيائيون النظريون - نذكر منهم على سبيل المثال، بول ديراك، ووولفغانغ باولي، وجولييان شفينغر، وفريمان دايسون، وسين إيتورو توموناغا، وفيمنان - بلا هودة ليكتشفوا صياغة رياضية قادرة على التعامل مع هذا الجمجم المجهرى. وقد وجدوا أن معادلة موجة الكم لشروندرنغر الواردة في الفصل الرابع، في الواقع لم تكن إلا وصفاً تقريرياً للفيزياء المجهرية - أي أنها تقريباً تعمل بكفاءة عالية عندما لا تعمق كثيراً في العالم الميكروسكوبى المجنون (سواء نظرياً أو تجريرياً)، لكنها تفشل بالتأكيد إذا حاولنا ذلك.

والجزء المركزي من الفيزياء الذي أهمله شروندرنغر في صياغته لميكانيكا الكم هو النسبية الخاصة. وفي الواقع "حاول" شروندرنغر أن يضمن النسبية الخاصة في البداية، إلا أن معادلة الكم الناتجة من ذلك كانت تعطي تنبؤات ثبت أنها متناقضة مع القياسات التجريبية للهييدروجين. وقد ألمح ذلك شروندرنغر أن يتناول الأمور بالتقليد الذي يقدس فعل الزمن في الفيزياء، فيتناول قسماً فقرياً للتغلب عليه - وذلك بدلاً من تناول الموضوع مرة واحدة، لنضمن كل معرفتنا من العالم الفيزيائي من أجل وضع نظرية جديدة. غالباً ما يكون الأمر أفضل كثيراً إذا اخذنا عدة خطوات صغيرة بصورة متتالية متضمنة أحدث الاكتشافات من الجبهة الأمامية للبحث العلمي. وقد بحث شروندرنغر ووجد إطاراً رياضياً يشتمل على ثنائية الموجة والجسيمة المكتشفة تجريرياً، لكنه لم يضمن النسبية الخاصة في هذه المرحلة المبكرة من عمله⁽⁴⁾.

وسرعان ما أدرك علماء الفيزياء أن النسبية الخاصة بمثابة المركز للإطار السليم لميكانيكا الكم. ويرجع ذلك إلى أن الجنون المجهرى الذي لاحظناه يتطلب أن الطاقة يمكن أن تتخذ أشكالاً مختلفة - وهو مفهوم يأتي من النسبية الخاصة. وبإهمال النسبية الخاصة فإن منطلق شروندرنغر قد أهمل قابلية التحول للمادة والطاقة والحركة.

(4) وبالرغم من أن المعادلة الأصلية التي صاغها شروندرنغر - والتي تتضمن النسبية الخاصة - لم تصف بدقة الخواص الكمية للإلكترونات في ذرة الهيدروجين، إلا أنه سرعان ما تحققت أنها معادلة مفيدة عند استخدامها بشكل مناسب في تطبيقات أخرى، وبالفعل ما زالت تستخدم حتى الآن. غير أنه في الوقت الذي نشر فيه شروندرنغر معادلته كان أوسكار كلاين ووالتر غوردون قد سبقاه، وبذلك فقد أطلق على معادلته النسبية اسم معادلة "كلاين - غوردون".

وقد ركز علماء الفيزياء جهودهم الأولية لفتح الطريق أمام مرج النسبية الخاصة بمفاهيم الكم وذلك تطبيقاً على القوى الكهرومغناطيسية وتدخلها مع المادة. ومن خلال سلسلة من التطورات الملهمة وضعوا علم الكهربية الديناميكية الكمية. وهي مثال على ما أصبح يسمى في ما بعد بنظرية مجال الكم النسبي أو بنظرية مجال الكم اختصاراً. وهي كمية لأنها تتضمن كل الأمور المحتملة وغير المؤكدة منذ لحظة البداية؛ وهي نظرية مجال لأنها تمزج مبادئ الكم في المفاهيم الكلاسيكية السابقة عن مجال القوة - وهي في هذه الحالة مجال ماكسويل الكهرومغناطيسي. وفي النهاية هي نسبة لأنها تتضمن كذلك النسبية الخاصة من البداية. (إذا رغبت في استعارة شيء مرئي للمجال الكمي فيمكنك أن تستشهد بصورة المجال الكلاسيكي - مثل محيط من خطوط مجال غير مرئي تخترق الفضاء - لكن عليك أن تتفق هذه الصورة بطريقتين. أولاً، يجب أن تخيل أن المجال الكمي يتكون من جسيمات مثل الفوتونات للمجال الكهرومغناطيسي. ثانياً، عليك أن تخيل أن الطاقة على شكل جسيمات - كتل وحركتها - تتحرك جيئة وذهاباً بلا توقف من مجال كمي إلى آخر طالما أنها تتذبذب باستمرار في الفضاء والزمان).

والنظرية الكمية للكهربية الديناميكية هي، بصورة قابلة للجدال، النظرية الأكثر دقة التي حدث أن سبق تقديمها بصدق الظواهر الطبيعية. ويمكن تصور مدى دقها في أعمال توينيتشير وكيتوشيتا، عالم الفيزياء المتخصص في الجسيمات من جامعة كورنيل، الذي قام خلال الثلاثين عاماً الماضية بلا كلل باستخدام الكهربية الديناميكية لحساب خواص تفصيلية معينة للإلكترونات. وقد ملأت حسابات كينوشيتا آلاف الصفحات، الأمر الذي يتطلب في النهاية استخدام أقوى الحاسوبات في العالم لإتمامها. ولم يذهب هذا الجهد سدى. فقد توصلت حساباته إلى تنبؤات عن الإلكترونات تحققت تجريبياً بدقة لا تتجاوز جزءاً في المليار. وهو تطابق مدهش بين الحسابات النظرية المجردة والعالم الواقعي بشكل مطلق. وقدتمكن علماء الفيزياء من خلال الكهربية الديناميكية الكمية من ترسیخ دور الفوتونات "كأصغر حزم ممكنة من الضوء" وتوضیح تداخلها مع الجسيمات المشحونة كهربائياً كالإلكترونات، في إطار رياضي كامل ومقنع يمكن بواسطته إجراء التنبؤات.

وقد ألمهم النجاح الذي حققه الكهربية الديناميكية الكمية علماء الفيزياء الآخرين خلال عقدي السبعينيات والستينيات من القرن العشرين أن يحاولوا تطوير منطلق مشابه لفهم القوى الضعيفة والقوية والجاذبية من وجهة نظر ميكانيكا الكم.

وقد ثبت أن هذه الطريقة مشمرة جداً بالنسبة للقوى الضعيفة والقوية. وكما في حالة الكهربائية الديناميكية الكمية، فإن علماء الفيزياء تمكنا من وضع نظرية مجال كمية للقوى القوية والضعيفة، أطلق عليها اسم "الكروموديناميكا الكمية" وـ"نظرية الكهربائية الضعيفة الكمية". والاسم "الكروموديناميكا الكمية" أكثر بهجة عن الاسم الأكثر منطقية "الديناميكا القوية الكمية"، غير أن ذلك مجرد اسم من دون أي معنى عميق. ومن ناحية أخرى فإن الاسم "الكهربائية الضعيفة" يلخص علامة هامة على طريق فهمنا لقوى الطبيعة.

ومن خلال الأعمال التي أكسبت شيلدون غلاشو وعبد السلام وستيفن وينبرغ جائزة نوبل، بينما أن القوى الضعيفة والكهرومغناطيسية متحدة طبيعياً عن طريق وصفهم النظري بالمجال الكمي، على الرغم من أن الصورة التي تظهر عليها تبدو متمايزة في العالم من حولنا. وفي النهاية، فإن مجالات القوى الضعيفة تتضاعل شدتها على جميع المستويات ما عدا المستوى تحت الذري، بينما للمجالات الكهرومغناطيسية - الضوء المرئي وإشارات الراديو والتليفزيون والأصوات السينية - تواجد ماكسكوبى لا يقبل الجدل. غير أن غلاشو وعبد السلام ووينبرغ قد بينما في الواقع أنه عند طاقة ودرجة حرارة مرتفعين بما فيه الكفاية - كما كان عليه الوضع في أول جزء من الثانية بعد الانفجار الهائل - فإن مجالات الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة تذوب بعضها في بعض لتصبح ذات خواص واحدة لا تمييز بينها، ويطلق عليها بصورة أكثر دقة "المجالات الكهربائية الضعيفة". وعندما تنخفض درجة الحرارة كما يحدث بانتظام منذ لحظة الانفجار الهائل فإن كلا من القوى الكهرومغناطيسية والضعيفة تتبlier على شكل مختلف عن شكلها المشترك في درجات الحرارة العالية - من خلال عملية تعرف باسم "انكسار التماثل" (Symmetry Breaking) سنشرحها في ما بعد - ولذلك فهي تبدو مختلفة في الكون البارد الذي نعيش فيه الآن.

وهكذا، وللتاريخ، فإنه بحلول السبعينيات من القرن العشرين تم تطوير توصيف معقول وناجح من وجهة نظر ميكانيكا الكم لثلاث من القوى الأربع (القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية)، وقد بين الفيزيائيون أن اثنتين من هذه الثلاث (الضعيفة والكهرومغناطيسية) قد جاءتا في الواقع من أصل واحد (القوى الكهربائية الضعيفة). وخلال العقدين الأخيرين أخضع الفيزيائيون المعالجة الميكانيكية الكمية للقوى الثلاث (اللاحاذبية) إلى عدد هائل من التجارب الدقيقة، أثنتان تداخلها بعضها مع بعض ومع جسيمات المادة التي ناقشناها في الفصل الأول. وقد واجهت النظرية كل التحديات بكل ثقة. وبمجرد أن قام التجاربيون بقياس حوالي 19 رقمًا

(كتلة الجسيمات في الجدول رقم (1-1)، قوى شحنتها كما هو مسجل في الجدول الموجود في الملاحظات - الملحوظة بالفصل الأول، وشدة القوى الثلاث اللاجاذبية في الجدول رقم (1-2)، وعدد آخر قليل لن نذكره هنا) فإن العلماء النظريين وضعوا هذه الأرقام في نظريات مجالات الكم لجسيمات المادة وللقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية، فكانت النتائج التي أعقبت ذلك في ما يتعلق بالكون المجهرى تتطابق بطريقة مدهشة مع النتائج التجريبية. ويصدق ذلك حتى نصل إلى الطاقة التي يمكن أن تسحق المادة إلى أجزاء من المليار من جزء من المليار من المتر، وهي الحدود التقنية الآن. ولهذا السبب يطلق الفيزيائيون على نظرية القوى الثلاث اللاجاذبية وعلى العائلات الثلاث لجسيمات المادة، النظرية القياسية أو (وهو الأغلب) النموذج القياسي لجسيمات الفيزياء.

ثالثاً: الجسيمات المراسلة

تبعاً للنموذج القياسي، وكما أن الفوتون هو أصغر مكونات المجال الكهرومغناطيسي، فإن المجالات القوية والضعيفة لها هي الأخرى مكونات أصغر. وكما شرحتنا باختصار في الفصل الأول، فإن أصغر حزم القوى القوية تعرف باسم الغليونات، أما أصغر حزم القوى الضعيفة فتعرف باسم البوزوونات القياسية الضعيفة (أو بشكل أدق بوزوونات W ، و Z) ويوجها النموذج القياسي للتفكير في جسيمات القوى على أنها لا تملك بنية داخلية، أي أنها في هذا الإطار تماماً جسيمات أولية مثل تلك الموجودة في العائلات الثلاث للمادة.

وتقوم الفوتونات والغليونات والبوزوونات القياسية الضعيفة بتقديم الآلة المجهرية لنقل القوى التي تتكون منها. فمثلاً عندما تتنافر جسيمة مشحونة كهربياً مع أخرى لها نفس الشحنة فإنه يمكن تخيل أن كل جسيمة منها محاطة بمجال كهربى - سحابة أو ضباب رقيق من روح الكهرباء - وتنشأ القوى التي تستشعرها كل جسيمة من التناحر بين مجالاتها الكهربية. أما الوصف المجهرى الأكثر دقة للكيفية التي تتنافر بها هذه الجسيمات ف مختلف بعض الشيء. يتكون المجال الكهرومغناطيسي من سرب من الفوتونات، ويتيح التداخل بين جسيمتين مشحontين في الواقع من "دفعهما" للفوتونات جيئاً وذهاباً بينهما. وتقربياً مثل الطريقة التي تؤثر بها أنت في حركة رفيقك أثناء التزلج على الجليد بأن تقذفه أو تقذفها بوابل من كرات البولنخ، فإن جسيمتين مشحونتين كهربياً تؤثر كل منهما في الأخرى بتبادل حزم صغيرة من الضوء.

ومن أهم ما فشل فيه مثل هذا التشبيه مع المترولوجيين على الجليد هو أنه في

حالة تبادل كرات البولنغ فإن الأمر دائمًا "تنافر" - ودائماً يندفع المترجلان بعيداً أحدهما عن الآخر. وعلى التقىض من ذلك، فإن جسيمين مشحونتين شحنة مضادة تتدخلاً بتبادل الفوتونات وتكون القوى الكهرومغناطيسية الناتجة هي تجاذب. ويبدو الأمر وكأن الفوتون ليس هو الناقل للقوى بذاته، ولكنه ينقل رسالة إلى المتلقى عن الكيفية التي عليه أن يتراوّب بها مع القوى المؤثرة. فبالنسبة للجسيمات متشابهة الشحنة فإن الفوتون يحمل رسالة "نفرقوا" بينما بالنسبة للجسيمات متضادة الشحنة فإن الرسالة تقول "تجمعوا". ولهذا السبب فإن الفوتونات تسمى في بعض الأحيان الجسيمات المراسلة للقوى الكهرومغناطيسية. وبالمثل فإن الغليونات والبوزونات القياسية الضعيفة هي الأخرى جسيمات مراسلة للقوى النووية القوية والضعيفة. وتنشأ القوى القوية التي تمسك بالكواركات داخل البروتونات والنيوترونات من تبادل الغليونات بواسطة الكواركات المفردة. ويمكن القول أن الغليونات في هذه الحالة بمثابة الغراء الذي يحافظ على تماسك هذه الجسيمات تحت الذرية معاً. أما القوى الضعيفة المسؤولة عن أنواع معينة من تحول الجسيمات أثناء التفكك الإشعاعي، فإنها تنبع من البوزونات القياسية الضعيفة.

رابعاً: التماثل القياسي

ربما تكون قد أيقنت أن الجاذبية هي الرجل الغريب في مناقشاتنا لقوى الطبيعة في ضوء نظرية الكم. وبينما على نجاح الطرق التي استخدمنا الفيزيائين في حالة القوى الثلاث الأخرى، فقد يطرأ على بالك أن الفيزيائين قد يبحثون عن نظرية مجال كمي لقوى الجاذبية - النظرية التي تعمل فيها أصغر حزمة من مجال قوى الجاذبية، اسمها الغرافيتون، كجسيمة مراسلة. ولأول وهلة، قد يبدو هذا الاقتراح بالذات ملائماً لأن نظرية مجال الكم للقوى الثلاث اللاجاذبية توحي أن هناك تشابهاً يلوح وبخفي بين هذه القوى الثلاث وسمة من سمات قوى الجاذبية التي تعرضنا لها في الفصل الثالث.

ولنسترجع معاً أن قوى الجاذبية تسمح لنا بأن نعلن أن كل الراصدين - بصرف النظر عن حركتهم - يقفون على قدم المساواة جمیعاً. وحتى هؤلاء الذين نعتقد عادة أنهم يتشارعون، فإننا يمكن أن نزعم أنهم ساكنون، حيث يمكنهم أن يرجعوا القوى التي يشعرون بها إلى انغماسهم في مجال للجاذبية. وفي هذا المعنى فإن الجاذبية تقوى التماثل: فهي تؤكد على التساوي بين صحة وجهات النظر الممكنة جميعها، وكل الأطر المرجعية الممكنة. والتماثل بين القوى القوية والضعف الكهرومغناطيسية هو أنها جميعاً مترابطة بتماثلات تقوى من ترابطها،

وإن تكن هذه التماثلات أكثر تجريدية بوضوح من التماثل المصاحب للتجاذبية. وللإحساس بصورة تقريبية بمبادئ التماثل الدقيق، لتأخذ المثال الهام الآتي في اعتبارنا. وكما ذكرنا في الجدول 1 في الهاشم رقم (1) للفصل الأول، فإن كل كوارك يأتي في شكل "اللون" ثلاثة (يطلق عليها مجازاً أحمر وأخضر وأزرق، وليس لها علاقة بالألوان المعروفة لنا في حاسة الإبصار، بل هي مجرد أسماء). وهذه الألوان تحدد كيفية رد فعل الكواركات للقوى القوية تماماً بنفس الطريقة التي تحدد بها شحنتها الكهربية كيفية رد فعلها تجاه القوى الكهرومغناطيسية. وتوكّد كل البيانات التي حصلنا عليها أن هناك تماثلاً بين الكواركات بمعنى أن التداخل بين أي اثنين منها لهما نفس اللون (أحمر مع أحمر، أو أخضر مع أخضر، أو أزرق مع أزرق) تكون كلها متطابقة. وبالمثل فإن التداخل بين اثنين منها ليس لهما نفس اللون (أحمر مع أخضر، أو أخضر مع أزرق، أو أزرق مع أحمر) هي أيضاً متطابقة. وفي الحقيقة فإن هذه البيانات تدعم شيئاً مدهشاً. فإذا كانت الألوان الثلاثة - الشحنات القوية الثلاث المختلفة - التي يمكن أن يحملها الكوارك قد أزيحت بشكل معين (ولنقل بلغة الألوان التي نستخدمها مجازاً، إذا أزيحت ألوان الأحمر والأخضر والأزرق إلى الأصفر والنيلي والبنفسجي مثلاً) وحتى لو كانت تفاصيل هذه الإزاحة تتغير من لحظة لأخرى أو من مكان لأخر، فإن التداخل بين الكواركات - مرة أخرى - لن يتغير أبداً. ولهذا السبب، وكما نقول بأن الكرة تمثل تمثلاً دورانياً لأنها تبدو على نفس الشكل بصرف النظر عن الكيفية التي تدور بها في أيدينا أو الكيفية التي نغير بها من زاوية نظرتنا إليها، نقول لذلك أن الكون مثال على تماثل القوى القوية: لا تغير الفيزياء بهذه الإزاحات في شحنات القوى تلك، وهي لا تتأثر إطلاقاً بها. ولأسباب تاريخية، فإن الفيزيائيين يقولون أن تماثل القوى القوية هو مثال على التماثل القياسي⁽⁵⁾. وهذا النقطة الأساسية، تماماً كما في حالة التماثل بين كل نقاط الملاحظة

(5) وبالنسبة للقارئ ذي الميل الرياضية، فإننا نذكر أن مبادئ التناظر المستخدمة في فيزياء الجسيمات الأولية تقوم عموماً على مجموعات، تعرف باسم مجموعات لاي (Lie)، تتنظم الجسيمات الأولية ممثلة في مجموعات مختلفة، وعلى المعادلات التي تحكم تطورها الزمني أن تخضع لتحولات التناظر المصاحبة لها. وفي حالة القوى القوية يطلق على هذا التناظر SU(3) (المتشابه للدورانات العادية في ثلاثة أبعاد، لكنها تعمل في فضاء أكثر تعقيداً)، وتحتاج الألوان الثلاثة للكواركات المعنية إلى تمثيل في ثلاثة أبعاد. والإزاحة (من أحمر، وأخضر وأزرق إلى أصفر ونيلي وبنفسجي) المذكورة في المتن هي بدقة أكبر من نوع تحول SU(8) الذي يعمل على "محاور الألوان" للكوارك. أما التناظر القياسي فهو التناظر الذي تتمدد فيه تحولات المجموعة على الزمكان: في هذه الحالة، فإن "دوران" ألوان الكواركات بشكل مختلف يحدث في موقع ولحظات مختلفة من الزمن.

التفاضلية الممكّنة في النسبة العامة والتي تتطلّب وجود قوى جاذبية فإن التطورات التي اعتمدّت على أبحاث هيرمان ويل في العشرينيات من القرن العشرين، وشين نينغ يانغ وروبرت ميلز في الخمسينيات من القرن العشرين، قد بيّنت أن التماثلات القياسيّة ما زالت تتطلّب قوى أخرى. ومثل محاولة الحفاظ على درجة الحرارة وحفظ الهواء والرطوبة في منطقة معينة ثابتتين تماماً، وذلك بتعويض أي تغيير خارجي تعويضاً تاماً باستخدام نظام تحكم ببيئي حساس، فطبقاً ليانغ وميلز، لابد من وجود أنواع معينة من مجالات القوى لتعوض تماماً ما يحدث من إزاحة في شحنات القوى. وبالتالي تم المحافظة على التداخل بين الجسيمات بشكل لا يتغيّر أبداً. وفي حالة التماثل القياسي المصاحب لإزاحة شحنات اللون للكواركات فإن القوى المطلوبة ليست سوى القوى القوية نفسها. أي أنه بدون القوى القوية فإن الفيزياء قد تتغيّر بنفس نمط إزاحات شحنات الألوان الموضحة أعلاه. وتبيّن هذه النتيجة أنه بالرغم من اختلاف الخواص بين قوى الجاذبية والقوى القوية اختلافاً شاسعاً (تذكّر مثلاً أن الجاذبية أو هنّ كثيراً من القوى القوية ويعطي تأثيرها مسافات عظيمة جداً) إلا أن لهما ميراثاً مشابهاً إلى حد ما: فكلاهما مطلوب لكي يتضمّن الكون تماثلات معينة. وبالإضافة إلى ذلك يمكن تطبيق نفس الشيء على القوى الضعيفة والقوى الكهرومغناطيسية، موضّحين أن وجودهما أيضاً مرتبط بتماثلات قياسية أخرى - ويطلق عليها التماثلات القياسيّة الضعيفة والكهرومغناطيسية. ولذا فإن القوى الأربع ترتبط ارتباطاً مباشراً بمبادئ التماثل.

وقد تبدو السمة العامة للقوى الأربع أنها تدلّ بوضوح على الاقتراح الوارد في بداية هذا الجزء. وبالتحديد، وعلى طريق جهودنا لتضمّين ميكانيكا الكم في النسبة العامة، فإن علينا إيجاد نظرية لمجال الكم لقوى الجاذبية، تماماً كما اكتشف الفيزيائيون نظريات ناجحة لمجالات الكم للقوى الثلاث الأخرى. وقد ألمّهم هذا المنطق على مر السنين مجموعة من الفيزيائيين المتميّزين وغير العاديين ليتبعوا هذا المسار بحماس شديد، لكن ثبت أن هذا المجال مليء بالأخطار، ولم يتمكّن أحد من أن يعبره بنجاح تماماً. ولنر السبب في ذلك.

خامساً: النسبة العامة في مواجهة ميكانيكا الكم

يجري استخدام النسبة العامة في الحياة العاديّة في المسافات الفلكيّة الهائلة. وبالنسبة لمسافات بهذا الشكل فإن نظرية آينشتاين تعني أن غياب الكتلة معناه تسطّح الفضاء كما يوضح الشكل رقم (3-3). وللربط بين النسبة العامة وميكانيكا الكم لابد من أن نغير من بؤرة اهتمامنا بشكل حاد ونختبر الخواص المجهريّة

الميكروسکوبية للمكان. وقد أوضحنا ذلك في الشكل رقم (1-5)، وذلك بتقرير وتكبير مناطق صغيرة جداً في نسج الفضاء. وعند بداية التقرير لن يحدث شيء كما نرى في المستويات الثلاثة الأولى للتكتير في الشكل رقم (1-5) حيث تختفي بنية الفضاء بشكلها الأساسي. ومن منطلق كلاسيكي بحث فإننا قد نتوقع أن الصورة الهداءة والمنبسطة للفضاء ستتصمد حتى نصل إلى مقاييس صغيرة الطول، غير أن ميكانيكا الكم ستغير هذه النتيجة جذرياً. "فك كل شيء" معرض للتأرجحات الكمية المتأصلة في مبدأ عدم التيقن - حتى مجال الجاذبية. وعلى الرغم من أن المنطق الكلاسيكي يتضمن أن الفضاء الخالي له مجال جاذبية مساواً للصفر، فإن ميكانيكا الكم تبين أن قيمة المجال المتوسطة هي صفر لكن القيمة الفعلية تتراوح لأعلى ولأسفل نتيجة التأرجح الكمي. والأكثر من ذلك، فإن مبدأ عدم التيقن ينبعنا بأن مدى التأرجح في مجال الجاذبية يزداد كلما زاد تركيز انتباها على مناطق أصغر في الفضاء المكان. وتوضّح ميكانيكا الكم أنه لا شيء يفضل البقاء محصوراً في مكان ضيق، ويؤدي تضييق الفضاء إلى مزيد من التأرجحات.

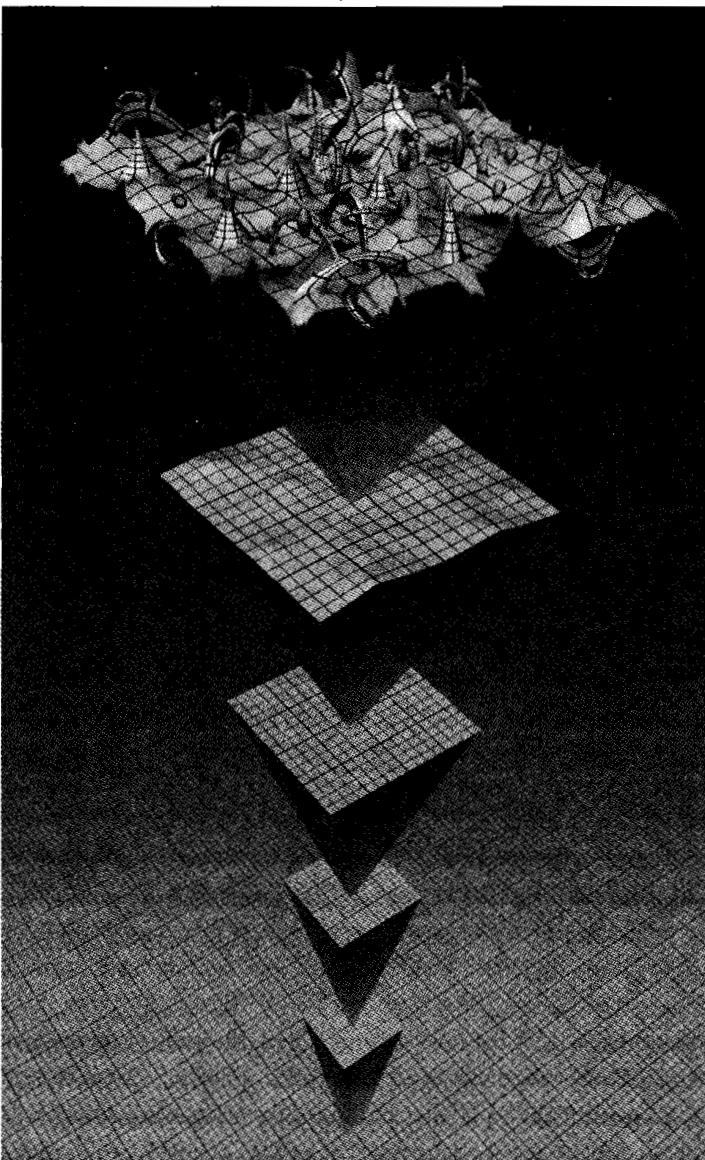
ولأن مجالات الجاذبية تظهر على شكل تحدب، فإن التأرجحات الكمية تظهر نفسها كتشوهات متزايدة العنف للفضاء للمكان المحيط. ونحو نرى بصيصاً من هذه التشوهات يبلغ في المستوى الرابع للتكتير في الشكل رقم (1-5). وباختبار مستويات من المسافات الأقل كما يبيّن المستوى الخامس في الشكل رقم (1-5)، فإننا نرى أن التأرجح العشوائي الكمي في مجال الجاذبية يقابله اعوجاج شديد في الفضاء بحيث لم يعد يمثل جسمًا هندسياً ذا انحناءات رقيقة كما في حالة مثل الغشاء المطاطي الذي أوردناه في الفصل الثالث. وهو يتخذ بالأحرى شكلاً رغويًا هائجاً ملتوياً كما هو مبين بالجزء الأعلى من الشكل. وقد صرّح جون ويلر مصطلح "الرغوة الكمية" ليصف الجنون الذي بينه الفحص فوق المجهري للمكان (وللزمان) - ويصف هذا مملكة غير مألوفة للذكور حيث تفقد المفاهيم المتفق عليها لليسار واليمين وللأمام والخلف ولأعلى وأسفل (بل وحتى مفهوم قبل وبعد) معناها. وعلى مثل هذه المقاييس للمسافات الصغيرة فإننا نرى عدم التوافق الأساسي بين النسبة العامة وميكانيكا الكم. وقد "حطمت التأرجحات الكمية العنيفة التي تظهر عند مقاييس المسافات الصغيرة مفهوم الشكل الهندسي الفضائي الهداء الذي هو المبدأ المحوري في النسبة العامة". وعلى المقاييس فوق المجهري فإن السمة المحورية لميكانيكا الكم - مبدأ عدم التيقن - تتناقض مباشرة مع السمة المحورية للنسبة العامة - نموذج الفضاء المكان الهندسي الهداء (والزمكان).

و عملياً يقحم هذا التناقض نفسه في كل أمر أساسى. فالحسابات التي تمزج بين معادلات النسبية العامة وميكانيكا الكم تؤدى بالضرورة إلى نفس الإجابة غير المنطقية: ما لا نهاية. وتشبه الإجابة بما لا نهاية أثراً حاداً تركه معلم من الطراز القديم لينبئنا بأننا نرتكب خطأ جسيماً⁽⁶⁾. ولا تستطيع معادلات النسبية العامة أن تعامل مع الجنون الغاضب للرغوة الكمية.

ومع ذلك فإننا نلاحظ عندما نتراجع إلى مسافات أكثر اعتيادية (بالسير مع التتابع المرسوم في الشكل رقم (1-5) في الاتجاه العكسي)، أن التأرجحات العشوائية العنيفة الصغيرة تلاشى بعضها البعض - تماماً بنفس الطريقة التي لا يُظهر بها كشف الحساب البنكي لمدمن الاقتراب من الإدمان - ويصبح المفهوم الهندسي الهدى لنسيج الكون مرة أخرى دقيقاً. ويشبه ذلك تماماً ما تراه عندما تنظر إلى صورة مركبة من شبكة من النقاط: فإذا نظرت من بعيد فإن النقاط المكونة للصورة تمتزج بعضها مع بعض لتعطي الانطباع بصورة ناعمة تتغير فيها مناطق الإضاءة بهدوء وبلطف. أما إذا فحصت الصورة عن قرب أكثر، فإن الأمر سيختلف بشكل ملحوظ عن تلك الصورة الناعمة التي تظهر عند النظر من مسافات بعيدة. وليس الأمر سوى مجموعة من النقاط غير المتراقبة كل منها منفصلة عن الأخرى. لكن لاحظ هنا أنك أدركت الطبيعة المنفصلة للصورة فقط عندما اختبرتها عن قرب، أما عن بعد فإنها تبدو ناعمة. وبالمثل فإن نسيج الزمكان يبدو ناعماً إلا إذا اختبرناه بدقة فوق مجهرية. وهذا هو السبب في أن النسبية العامة تنطبق على مقاييس مسافات كبيرة بما فيه الكفاية (وأزمنة) - المقاييس المناسبة للكثير من الاستخدامات الفلكية العادلة - لكنها تصبح غير متماشية عند مقاييس المسافات القصيرة (والأزمنة). وتصدق المقوله المحورية للتعدد الهندسي الرقيق الناعم على المقاييس الكبيرة، لكنها تتحطم نتيجة للتأرجحات الكمية عندما نطبقها على المقاييس الصغيرة.

(6) أثناء تطوير نظريات الكم للقوى اللاحاجذية الثلاث، توصل الفيزيائيون إلى حسابات جاءت بنتائج لانهائية. ويمرر الوقت، ليقروا بالتدرج أنه يمكن الاستغناء عن هذه اللانهائيات باستخدام وسيلة تعرف باسم "إعادة التعريف Renormalization". واللانهائيات التي ظهرت من محاولات دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم كبيرة جداً ولا تخضع لعملية العلاج بإعادة التعريف. وقد أدرك الفيزيائيون حديثاً أن الإجابات اللانهائية إشارة إلى أن النظرية المستخدمة في تحليل شيء ما تقع خارج نطاق استخداماتها. وحيث أن الهدف من الأبحاث الحالية هو إيجاد نظرية لها مجال في التطبيق غير محدود في الأساس - النظرية الأخيرة Ultimate أو النهاية Final - فإن الفيزيائيين رغبوا في الحصول على نظرية لا تشاغلهم فيها إجابات بما لا نهاية، بصرف النظر عن مدى تطرف النظام الفيزيائي موضع التحليل.

الشكل رقم (1-5)



بالتكبير المتتابع لمنطقة من الفضاء المكان، يمكن فحص الخواص فوق المجهرية. ونصطدم محاولات مزج النسبية العامة وميكانيكا الكم بالرغوة الكمية العنيفة التي تبلغ عند أعلى مستوى للتكبير.

وتسمح لنا المبادئ الأساسية للنسبية العامة وميكانيكا الكم بحساب المقاييس التقريبية للمسافات التي علينا أن ننزل إلى أصغر منها لظهور الظاهرة الغربية الموجودة في الشكل رقم (1-5). ويتصاف كل من صغر ثابت بلانك - الذي يتحكم في شدة التأثيرات الكمية - والضعف الذاتي لقوى الجاذبية ليعطيما ما يعرف باسم "طول بلانك" الذي من الصغر بحيث لا يمكن تخيله: فهو جزء من المليون من جزء من المليار من جزء من المليار من المليار من المليار من السنتمتر (10 سم)⁽⁷⁾. ويظهر المستوى الخامس في الشكل رقم (1-5) بشكل تخططي على المستوى فوق المجهر، عند مسافات أصغر من طول بلانك للكون. ولتقرير الإحساس بهذه المسافات فإننا إذا قمنا بتكبير ذرة واحدة إلى حجم مساوٍ لحجم الكون المعروف لنا، فإن طول بلانك لن يتجاوز ارتفاع شجرة متوسطة.

وهكذا يصبح عدم التوافق بين النسبية العامة وميكانيكا الكم واضحًا فقط في جزء صغير من الكون (مستوى محدود من الكون). ولهذا السبب قد تتساءل عما إذا كان ذلك يستحق المعاناة؟ وفي الحقيقة فإن مجتمع الفيزياء لا يتخذ موقفاً موحداً عند تناول هذا الموضوع. فهناك فيزيائيون يعترفون بوجود المشكلة لكنهم يتتجاوزونها ويستخدمون ميكانيكا الكم والنسبية العامة في تناول المشكلات التي تتعلق بالأطوال الأكبر كثيراً من طول بلانك، كما تتطلب ذلك أبحاثهم. إلا أنه هناك فيزيائيون آخرون لا يرتأبون تماماً لحقيقة التناقض الأساسي العميق بين الركيزتين الأساسيةين المعروفتين لنا في الفيزياء، بصرف النظر عن المسافات فوق المجهرية التي يجب اختبارها للكشف عن المشكلة. وهم يقولون إن عدم التطابق

(7) يمكن فهم طول بلانك بالاعتماد على المتنق البسيط المتأصل في ما يسميه الفيزيائيون تحليلاً الوحدات. والفكرة هي كما يلي: عندما تصاغ نظرية كمجموعة من المعادلات فإن الرموز المجردة لا بد من أن ترتبط بسمات العالم الفيزيائية إذا كان لهذه النظرية أن تكون على صلة بالواقع. وبالتالي لا بد من إدخال نظام للوحدات بحيث، مثلاً، لو كان الرمز يعني الطول، فإن لدينا مقاييساً يمكن بواسطته فهم قيمته. وفي النهاية، إذا أظهرت المعادلة أن الطول موضع النقاش هو 5، فإن علينا أن نحدد هل هو 5 سم، أم 5 كم، أو 5 سنوات ضوئية ... الخ. وفي نظرية تضمن النسبية العامة وميكانيكا الكم، ينبع اختيار الوحدات بشكل طبيعي على النحو التالي: هناك ثابتان للطبيعة تقتد عليهما النسبية العامة: سرعة الضوء c وثابت نيوتن G . تعتمد ميكانيكا الكم على ثابت واحد للطبيعة هو \hbar . وبفحص وحدات هذه الثوابت (مثلاً سرعة واتجاه يعبر عنها بالمسافة مقسومة على الزمن، وهكذا)، يمكن للمرء أن يرى أن الحد $\sqrt{\hbar G/c^3}$ له أبعاد الطول، وهو في الحقيقة 1.616×10^{-33} سم. وهذا هو طول بلانك. بحيث أنه يتضمن مدخلات للجاذبية والزمكان (G و c) ويعتمد كذلك على ميكانيكا الكم (\hbar) فإنه يعد الأمر لقياس - الوحدة الطبيعية للطول - في آية نظرية تحاول دمج النسبية العامة وميكانيكا الكم. وعندما نستخدم مصطلح "طول بلانك" في متن الكتاب، فإننا غالباً ما نعني بشكل تقريري، أننا نشير إلى طول في حدود 10^{-33} سم.

يشير إلى عيب أساسي في فهمنا للعالم الفيزيائي. ويعتمد هذا الرأي على وجة نظر غير مثبتة لكنها محسوسة بشدة بأن الكون، إذا فهمناه على أعمق مستوياته وأكثراها أولية، يمكن وصفه بواسطة نظرية تبدو منطقية متجانسة للأجزاء. وبالتالي، وبصرف النظر عن مدى محورية عدم التوافق هذا في أبحاثهم، فإن معظم الفيزيائيين يجدون من الصعب تصديق أن الفهم النظري للكون يتشكل من خليط متنافر رياضياً لإطارين قويين لكنهما متعارضان.

وقد قام الفيزيائيون بمحاولات عديدة لتنقيح النسبية العامة أو ميكانيكا الكم بشكل أو بآخر لتجنب هذا التناقض. وعلى الرغم من أن هذه المحاولات كانت جريئة وعصرية إلا أنها باءت بالفشل الواحدة تلو الأخرى. كان هذا سائداً حتى اكتشاف نظرية الأوتار الفائقة⁽⁸⁾.

(8) بالإضافة إلى نظرية الأوتار هناك حالياً منطلقان اثنان يحاولان دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم. المنطلق الأول يتزعمه روجر بنروز من جامعة أكسفورد ويطلق عليه نظرية تويسنر (Twistor Theory) أو نظرية الإعصار. أما المنطلق الثاني - الذي جاء بهلما من أبحاث بنروز - فيترعى أبهي أشتراك من جامعة ولاية بنسيلفانيا ويعرف باسم طريقة المتغيرات الجديدة (New Variables Method). ومع أنها لن تناقش هذين المنطلقين في هذا الكتاب، إلا أن هناك توقعات متزايدة بأن يكونا مرتبطين ارتباطاً عميقاً بنظرية الأوتار، وأنهما بالتالذ مع نظرية الأوتار قد يسخنان الطريق إلى نفس الحل لمعضلة دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم.

القسم الثالث

الсимфонية الكونية

الفصل السادس

لا شيء سوى الموسيقى: أسسية نظرية الأوتار الفائقة

لقد وفرت الموسيقى منذ زمن بعيد الاستعارات الممتازة إلى الذين أعملوا فكرهم لأجل حل معضلات متعلقة بالكون، ومن "موسيقى الكرات" الفيثاغورثية العتيقة إلى "تجانس الطبيعة" التي حكمت الأبحاث عبر العصور، بحثنا مجتمعين في أغنية الطبيعة عن التجوال الرقيق للأجرام السماوية وفي الانفجارات الصاحبة للجسيمات تحت الذرية. وباكتشاف نظرية الأوتار الفائقة اتخذت التعبيرات الموسيقية المجازية منحى مدهشاً واقعياً، حيث تقترح النظرية أن المشهد المجهري تغمره أوتار دقيقة، تحكم أساقف اهتزازاتها في تطور الكون. وتهب رياح التغيير وفقاً لنظرية الأوتار الفائقة، عبر كون إيلولي (**).

وعلى النقيض فإن النموذج القياسي يرى المكونات الأولية للكون كتركيبات نقطية ليس لها بنية داخلية. وعلى الرغم من قوة هذا المنطلق إلا أن النموذج القياسي لا يمكن أن يكون كاملاً أو نظرية نهائية لأنه لا يتضمن الجاذبية (وكما ذكرنا سابقاً، فإن كل تبعٌ للنموذج القياسي عن العالم المجهري أمكن التحقق منه بصورة أساسية حتى جزء من المليار من جزء من المليار من المتر)، وهذا هو حد الدقة التقنية في الوقت الحاضر). وفوق ذلك، فإن محاولات تصميم الجاذبية داخل إطار ميكانيكا الكم قد فشلت بسبب التأرجحات العنيفة في النسيج الفضائي المكاني والتي تظهر في المسافات فوق المجهريّة، أي عند أطوال أقصر من طول بلانك. وقد أجبرنا هذا التعارض الذي لم يجد حلاً على أن نبحث في اتجاه أعمق لفهم الطبيعة. في العام 1984 قدم كل من الفيزيائي مايكل غرين من كلية كوين ماري في ذلك الوقت، وجون شوارتز من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، أول بحث مقنع حول نظرية الأوتار الفائقة (نظرية الأوتار، للاختصار) يمكن أن يعطينا ما نرجوه من فهم.

(**) نسبة إلى إيلول، إله الريح عند الإغريق والروماني (المترجم والمراجع).

تقدّم نظرية الأوتار تعديلاً مدوياً وجديداً للوصف النظري للخواص فوق المجهريّة للكون - وهو التعديل الذي تحقق منه الفيزيائيون ببطء، وعدل من النسبة العامة لـ آينشتاين بالشكل الذي جعلها تتفق تماماً مع قوانين ميكانيكا الكم. ووفقاً لنظرية الأوتار فإن العناصر الأولية للكون ليست جسيمات نقطية. بل هي فتائل دقيقة أحادية البعد تشبه الحلقة المطاطية المتاهية الصغر في سmekها والتي تهتزّ جيئةً وذهاباً. ولا تنخدع بهذا الاسم: فعلّى عكس أي قطعة عاديّة من الوتر الذي يتكون هو نفسه من جزيئات وذرات، فإن الأوتار في نظرية الأوتار توجد في أعماق المادة. وتقترب النظرية أنها عناصر فوق مجهرية تتكون منها الجسيمات الأولية التي تتكون منها الذرات. والأوتار في نظرية الأوتار من الصغر - يصل طولها في المتوسط إلى طول بلانك تقريباً - لدرجة أنها تظهر كنقاط حتى لو فحصناها بأقوى ما نملك من أجهزة قياس.

ويؤدي الإحلال المباشر للجسيمات (على شكل نقاط) محل جداول من الأوتار كعناصر أساسية لكل شيء إلى تتابع نتائج بعيدة المدى. أولاً والأهم، يبدو أن نظرية الأوتار تزيل التناقض بين النسبة العامة وميكانيكا الكم. وكما سرى فإن الطبيعة الفراغية المتمددة للوثر هي العنصر الحرج الجديد الذي يسمع بإطار فريد متجانس يربط بين النظريتين. ثانياً، تقدّم نظرية الأوتار بالفعل نظرية موحدة تقترح أن كل المادة وكل القوى تنشأ من مكون أساسي واحد: هو الأوتار المتذبذبة. وأخيراً، وكما ستناقش في الفصول القادمة بتفاصيل أكثر، وعدا تلك الإنجازات الواضحة، فإن نظرية الأوتار تغير مرة أخرى وبصورة جذرية من فهمنا للزمكان⁽¹⁾.

أولاً: موجز تاريخ نظرية الأوتار

في العام 1968، كان عالم الفيزياء النظري الشاب غابرييل فينيزيانو يحاول جاهداً أن يفهم الخواص التجريبية المختلفة التي لاحظها للقوى النووية القوية. كان فينيزيانو وقتها يعمل مساعد باحث في CERN مختبر التسريع الأوروبي في جنيف بسويسرا، ويعمل بجري أبحاثه على الأمور التي تتعلق بهذه المشكلة لعدة سنوات، إلى أن توصل في أحد الأيام إلى كشف مذهل. ولدهشته، فقد تحقّق من أن هناك معادلة معروفة للقلة فقط وضعها الرياضي السويسري البارز ليونارد يولر لغرض رياضي بحث منذ حوالى مائة سنة - واسمها معادلة بيتا الخاصة ببيولر -

(1) سيرف القارئ ذو الخبرة أننا نركز في هذا الفصل على نظرية الأوتار "الاضطرابية"، بينما ستناقش السمات اللااضطرابية في الفصلين 12 و13.

ويبدو أنها تصف العديد من خواص الجسيمات المتدخلة بقوة في خطوة واحدة. وقد زودتنا ملاحظات فينيزيانو بإطار رياضي قوي للعديد من خواص القوى القوية، وأطلقت عدداً هائلاً من البحوث هدفها استخدام معادلة بيتا الخاصة ببورل وتصميمات عديدة أخرى لوصف الكم الهائل من البيانات التي جمعها المستغلون بالذرة من جميع أنحاء العالم. غير أنه كان هناك شعور بأن ملاحظات فينيزيانو غير كاملة. وكان الأمر يشبه طالباً يحفظ المعادلات عن ظهر قلب ويستخدمها من دون أن يفهم معناها أو الغرض منها. بدا أن معادلة بيتا صالحة للاستخدام لكن لا يعرف أحد لماذا؟ كانت معادلة تحتاج إلى تفسير. تغير الأمر في 1970 عندما قام كل من يوتشر ونامبو من جامعة شيكاغو، وهولغر نيلسن من معهد نيلز بوهر، وليونارد سوسكيند من جامعة ستانفورد بالكشف عن فيزياء خفية غير معروفة في ذلك الوقت وراء معادلة بورل. وقد بين هؤلاء الفيزيائيون أنه إذا وضعنا نموذجاً للجسيمة الأولية صغيراً مثل أوتار أحاديد بعد متذبذبة، فإن تداخلاتها التنووية يمكن أن تصفها معادلة بورل بدقة. وإذا كانت قطع الأوتار صغيرة جداً فإنها ستبدو كنقاط وسيتمشى ذلك مع المشاهدات التجريبية.

ومع أن ذلك قد قدم نظرية حدسية بسيطة وسارة، فإنه لم يمض وقت طويل قبل سقوط الوصف الوترى للقوى القوية. وفي بداية السبعينيات من القرن العشرين أظهرت التجارب عالية الطاقة القادرة على سبر العالم تحت الذري بعمق أكثر، أظهرت أن النموذج الوترى جاء بعدد من التنبؤات تتناقض مباشرة مع المشاهدات. وفي نفس الوقت كانت نظرية مجال كم الجسيمات النقاط الخاصة بكركمودينامية الكم قد أخذت تتطور، وأدى نجاحها الساحق في شرح القوى القوية إلى رفض نظرية الأوتار.

وقد اعتقد أغلب الفيزيائيين من علماء الجسيمات أن نظرية الأوتار قد أقيمت في سلة مهملات العلم، غير أن القليل الدؤوب منهم ظل متمسكاً بها. فقد شعر شوارتز مثلاً بأن "البنية الرياضية لنظرية الأوتار كانت فائقة الجمال وتحتوي على خواص إعجازية يمكن أن تؤدي إلى شيء ذي قيمة"⁽²⁾. كانت إحدى المشاكل التي لاحظها الفيزيائيون أن بها غنى أكثر من اللازم. وقد تضمنت النظرية أشكالاً من الوتر المتذبذب لها خواص قريبة من خواص الغليونات، مجسدة حقها المبكر في أن تصبح نظرية القوى القوية. ولكن عدا ذلك فإنها تضمنت جسيمات إضافية تشبه المرسال، بما وكأنها لا دور لها في الملاحظات التجريبية حول القوى القوية.

(2) مقابلة مع جون شوارتز، في 23 كانون الأول / ديسمبر 1997.

وفي العام 1974 قام شوارتز وجول تشيرك من دار المعلمين العليا (Ecole Normale Supérieure) بخطوة جريئة حولت هذه النصيحة الظاهرية إلى فضيلة. وبعد دراسة النسق المحير شبيه المرسال لتردد الوتر، أيقنوا أن خواصها تتفق تماماً مع تلك الجسيمات المراسلة المفترضة لقوى الجاذبية - الغرافيتون. ومع أن أحداً لم ير على الإطلاق هذه "الحزم متناهية الصغر" لقوى الجاذبية، إلا أن النظريتين يمكن أن تتبأ بكل ثقة بصفات أساسية معينة لها. وقد اكتشف تشيرك وشوارتز أن هذه الصفات تتحقق بالضبط بواسطة أنساق اهتزازية معينة. وبينما على ذلك، أيفن تشيرك وشوارتز أن السبب وراء فشل نظرية الأوتار في المحاولات الأولى هو أن الفيزيائيين قد حصروا أو قيدوا بشكل غير ملائم مجال هذه النظرية. وقد أعلنا أن نظرية الأوتار ليست مجرد نظرية لقوى القوية، ولكنها نظرية كم تتضمن الجاذبية أيضاً⁽³⁾.

لم يستقبل مجتمع الفيزياء هذا الاقتراح بحماس جارف. وفي الحقيقة يتذكر شوارتز ذلك قائلاً: "لقد أهملت أبحاثنا على مستوى العالم"⁽⁴⁾. كان مسار التقدم العلمي يغض بالعديد من المحاولات الفاشلة لربط الجاذبية بميكانيكا الكم. وقد تبين أن نظرية الأوتار هي الأخرى فاشلة في محاولاتها الأولى لوصف القوى القوية، وأنه من غير المعقول أن نحاول استخدامها لمتابعة هدف أعظم. وقد أظهرت دراسات يائسة ومتتابعة خلال أواخر السبعينيات وأوائل الثمانينيات من القرن العشرين أن كلاً من نظرية الأوتار وميكانيكا الكم تعاني من تناقضاتها الخاصة. وبدا الأمر وكأن قوى الجاذبية قد قاومت مرة أخرى انضواءها تحت التوصيف المجهري للعالم.

كان هذا هو الحال حتى العام 1984، حين بين غرين وشوارتز أن التعارض الكمي مع نظرية الأوتار يمكن حله، وذلك في بحث يمثل نقطة هامة حددت نهاية اثنى عشر عاماً من العمل المضني في البحث التي كانت مهملاً بشكل كبير ومرفوضة تماماً من معظم الفيزيائيين. وفوق ذلك، فقد بيناً أن النظرية الناتجة لها اتساع كافٍ ليحتوي كل القوى الأربع وكل المادة كذلك. وبمجرد ظهور وانتشار هذا البحث عبر مجتمع الفيزياء العالمي، تخلى المئات من فيزيائيي الجسيمات عن مشروعات أبحاثهم ليطلقوا هجومهم الشرس في مواجهة ما بدا وكأنه المعركة النظرية الأخيرة في مجال البحث القديم حول كنه أعمق أساليب عمل الكون.

(3) قدمت اقتراحات مماثلة وبشكل مستقل بواسطة تاميaki يونينا وكوركوت باراداكس ومارتن هالبرن. كذلك ساهم الفيزيائي السويدي لارس برینك بشكل ملحوظ في التطور المبكر لنظرية الأوتار.

(4) مقابلة مع جون شوارتز، في 23 كانون الأول / ديسمبر 1997.

لقد بدأت دراستي العليا في جامعة أكسفورد في تشرين الأول/أكتوبر 1984، وعلى الرغم من أنني كنت متحفزاً لدراسة ما يتعلق بنظرية مجال الكم، والنظرية القياسية، والنسبية العامة إلا أنه كان هناك شعور سائد بين الخريجين القدامى بأنه لا مستقبل لفيزياء الجسيمات، أو على الأقل أن مستقبلها غامض. كان النموذج القياسي قد اتخذ وضعه وكان نجاحه الملموظ في التنبؤ بالنتائج التجريبية يشير إلى أن التحقق منه مسألة وقت وتفاصيل لا أكثر. وإذا ذهبنا أبعد من تلك الحدود ليتضمن النموذج القياسي الجاذبية وإمكانية شرح المدخلات التجريبية التيبني عليها - الأرقام التسعة عشر التي تلخص كتلة وشحنة قوى الجسيمات الأولية وشدها النسبية، وهي تلك الأعداد التي تحددت بالتجارب لكنها لم تفهم نظرياً - فإن ذلك كان أمراً شافعاً جعل كل الفيزيائيين ما عدا الأكثر شجاعة يتخلون عن هذا التحدى. لكن بعد ستة أشهر انقلب الوضع تماماً. فقد نفذت نجاحات غرين وشوارتز حتى إلى خريجي السنة الأولى. وقد غمر الجميع إحساس أخاذ بأنهم في لحظة فاصلة من تاريخ الفيزياء، وحل هذا الإحساس محل الضجر والملل السابق. وقام عدد منا بالعمل الدؤوب ليل نهار في محاولة السيطرة على آفاق الفيزياء النظرية والرياضيات المجددة المطلوبة لفهم نظرية الأوتار.

عرفت الفترة بين 1984 و1986 "بالثورة الأولى للأوتار الفائقة". وقد نشر الفيزيائيون من جميع أنحاء العالم أكثر من ألف بحث خلال هذه السنوات حول نظرية الأوتار. أظهرت هذه الابحاث بما لا يدع مجالاً للشك أن السمات العديدة للنموذج القياسي - السمات التي اكتشفت بعد عناء شديد على مدى عقود من الابحاث - قد انبثقت ببساطة وبشكل طبيعي من البنية العظيمة لنظرية الأوتار. وقد قال مايكيل غرين "في اللحظة التي تواجهك فيها نظرية الأوتار وتحتفق من أن كل التطورات العظمى في الفيزياء تقريباً على مدار المائة سنة الأخيرة تنبثق - وتتبثق بأتفاق" - من مثل نقطة البداية البسيطة تلك، ستتيقن من أن هذه النظرية الخارقة بشكل غير معقول فريدة لا نظير لها⁽⁵⁾. فوق ذلك، فإن نظرية الأوتار تقدم، كما سترى في ما بعد، ولتلك السمات الواردة أعلى، تفسيرات أكثر إقناعاً وشمولاً من تلك الموجودة في النموذج القياسي. وقد أقنعت هذه التطورات الكبير من الفيزيائيين بأن نظرية الأوتار في طريقها لتحقيق ما وعدت به بأن تصبح النظرية الموحدة النهائية.

وعلى الرغم من ذلك اصطدم منظرو نظرية الأوتار مرات عديدة بعقبات

(5) مقابلة مع مايكيل غرين، في 20 كانون الأول/ديسمبر 1997.

خطيرة. وغالباً ما يواجه المرء في أبحاث الفيزياء النظرية معادلات من الصعوبة بمكان فهمها أو تحليلها. لكن عادة لا يستسلم الفيزيائيون، بل يحاولون حل هذه المعادلات بصورة تقريبية: والوضع في حالة نظرية الأوتار أكثر صعوبة. وقد ثبت أنه حتى مجرد تحديد "المعادلات نفسها" أمر صعب لدرجة أن الصور التقريبية فقط منها هي ما يمكن استنتاجه حتى الآن. وبهذا الشكل فإن منظري نظرية الأوتار قد اقصر جدهم على إيجاد حلول تقريبية لمعادلات تقريبية. وبعد سنوات قليلة من هذا التقدم المذهل خلال ثورة الأوتار الفائقة الأولى، وجد الفيزيائيون أن التقريرات المستخدمة غير ملائمة للإجابة عن عدد من التساؤلات الأساسية التي تعوق التطور بعد ذلك. وأصبح الكثير من الفيزيائيين المشتغلين بنظرية الأوتار أكثر إحباطاً، وقرروا العودة إلى مجالات أبحاثهم السابقة لأنه لم يقدم أحد أي مقتراحات أساسية لتخطي هذه الطرق التقريبية. وأصبحت السنوات من أواخر الثمانينيات حتى أوائل التسعينيات من القرن العشرين فترة محاولات بالنسبة لمن قرر الاستمرار منهم. ومثل كنز من الذهب مغلق بإحكام في مكان أمن يمكن رؤيته من خلال ثقب بباب يغريك بالنظر، لكن لا أحد يملك مفتاحه، كانت نظرية الأوتار بجمالها وما تعد به هي ذلك الكنز، وكانت الاكتشافات الهامة تتخلل دورياً فترات الجفاف الطويلة، لكن كان واضحًا للجميع في هذا المجال أن الأمر يتطلب طرقاً جديدة لها المقدرة على تخطي التقريرات السابقة.

أعلن إدوارد ويتن خطة للقيام بالخطوة التالية، وذلك في محاضرة أخاذة في مؤتمر عن الأوتار عام 1995 عُقد في جامعة جنوب كاليفورنيا - وهي المحاضرة التي أدهشت قاعة غصت بأعظم فيزيائيي العالم، مشعلاً بذلك "ثورة الأوتار الفائقة الثانية". وحتى لحظة خروج هذا الكتاب للنور ما زال منظرو نظرية الأوتار يعملون بهمة بالغة في صياغة وتطوير مجموعة من الطرق الجديدة التي تعد بالغلو على الصعوبات النظرية السابقة. وستعرض المقدمة التقنية لعالم منظري نظرية الأوتار لصعوبات في طريقها، لكن النور في آخر النفق، على الرغم من أنه ما زال بعيداً، فقد يصبح مرئياً في النهاية.

في هذا الفصل، وفي عدد من الفصول سيأتي في ما بعد، سنتعرض لمفهوم نظرية الأوتار التي انبثقت من الثورة الأولى للأوتار الفائقة وما تلاها من أبحاث سبقت الثورة الثانية للأوتار الفائقة. وسنشير أحياناً إلى أفكار جديدة تشعبت عن الثورة الثانية؛ أما مناقشة أحدث ما ظهر من أبحاث فسيجيء ذكره في الفصلين الثاني عشر والثالث عشر.

ثانية: هل هي، مرة أخرى، الذرات الإغريقية؟

كما ذكرنا في بداية هذا الفصل وأوضحتنا في الشكل رقم (1-1)، فإن نظرية الأوتار تزعم أنه إذا أمكن اختبار الجسيمات - النقاط المفترضة في النموذج القياسي بدقة تفارق مقدرتنا الحالية، فإن كل نقطة ستبدو وكأنها مصنوعة من حلقة من وتر مفرد دقيق ومتبذب.

ولأسباب ستتض� في ما بعد، فإن طول حلقة الوتر العادي تقريباً هو طول بلانك، أي أصغر من نواة الذرة بمقدار مائة مليار ميليار مرة (10^{20} مرة). وليس مستغرباً أن تجاربنا في هذه الأيام لا تستطيع اكتشاف الطبيعة الورية المجهرية لل المادة: فالأوتار متناهية الدقة حتى بالمقاييس الخاصة بالجسيمات تحت الذرية. وقد يتطلب الأمر معجلاً لدفع المادة للتجمع بطاقة تبلغ حوالي مليون مليار مرة أكثر من أي معجل سبق بناؤه لنتمك من الكشف عن أن الوتر ليس جسيمة - نقطة.

و سنقوم حالاً بوصف التضمينات المذهلة التي نتجت من إحلال الأوّلار محل الجسيمات النقاط ، لكن دعنا أولاً نشير سؤالاً أساسياً جداً: من أي شيء صنعت الأوّلار؟

هناك إجابتان محتملتان لهذا السؤال. الأولى، أن الأوتار مادة أولية حقيقة - فهي "ذرات Atoms" ، مكونات غير قابلة للانقسام ، بالمعنى الحقيقي الذي قصده الإغريق القدامى. ولأنها أصغر المكونات إطلاقاً لأي شيء ولكل شيء فإنها تمثل آخر الطريق - مثل آخر عروسة في الماتروشكا الروسية^(*) - في الطبقات المتعددة لبنية العالم المجهرى. ومن هذا المنظور، وبالرغم من أن الأوتار تشغل حيزاً مكانياً، فإن السؤال عن تركيبتها ليس له معنى. فإذا كانت الأوتار تتكون من شيء أصغر فإنها لن تكون أساسية. وبدلاً من ذلك، فإن أي شيء يمكن أن تتكون منه الأوتار سيعمل مباشرة محلها كمادة أكثر أساسية في تكوين الكون. وباللجوء إلى التشبيه مع اللغة، فإن الفقرات تتكون من الجمل وتتكون الجمل من الكلمات وتتكون الكلمات من الحروف. ومم يتكون الحرف؟ من المنطلق اللغوي، فإن الحرف هو نهاية الطريق. والحروف هي الحروف - أي اللبنات الأساسية للغة المكتوبة، ولا توجد بنية أبعد من ذلك. والتساؤل من تتركب الحروف ليس له معنى. وبالمثل فإن الوتر ببساطة هو الوتر - حيث لا يوجد شيء أكثر أساسية

(*) سلسلة من العرائش الخشبية تدخل بعضها في البعض لتنتهي بأخر عروسة لا تفص شيئاً بعدها (المترجم والمعارج).

منه، وبالتالي لا يمكن أن نصفه بأنه يتكون من أية مادة أخرى. كانت تلك هي الإجابة الأولى. وتعتمد الإجابة الثانية على الحقيقة البسيطة في أنها حتى الآن لا نعرف بعد إن كانت نظرية الأوتار على الحقائقية أو أنها النظرية النهائية للطبيعة. فإذا كانت نظرية الأوتار غير صحيحة، فعندئذ يمكن أن ننناسي الأوتار ولا نتحدث عنها ولا نطرح الأسئلة غير الملائمة عن تركيبها. ومع أن هناك احتمالاً لذلك، إلا أن الأبحاث العلمية منذ منتصف الثمانينيات من القرن العشرين تشير بشكلٍ طاغٍ إلى أن ذلك غير محتمل إطلاقاً. ومن المؤكد أن التاريخ قد علمنا أنه في كل مرة يعمق فهمنا عن الكون فإننا نجد أنه ما زال هناك مكونات مجرية أدق تشكل مستوى أكثر دقة ضمن المادة. وهناك احتمال آخر، إذا فشلت الأوتار في أن تصبح النظرية النهائية، وهو احتمال أن تكون الأوتار واحدة أخرى من الطبقات في البصمة الكونية، وهي الطبقة التي تصبح مرئية عند طول بلازك، وليس الطبقة النهائية. وفي هذه الحالة، فإن الأوتار قد تتكون من بني أصغر منها. آثار منظرو نظرية الأوتار هذا الاحتمال واستمرروا في تعقبه. وهناك تلميحات مشابكة حتى هذه اللحظة في الدراسات النظرية حول أن يكون للأوتار بنية أصغر. لكن حتى الآن لا توجد أدلة محددة بعد. فالزمن والبحث الدؤوب هما فقط الكفيلان بالرد على هذا السؤال.

وفي ما عدا بعض الافتراضات في الفصلين 12، و15، ومن مناقشاتنا سنتعرض للأوتار من وجهاً نظر الإجابة الأولى - أي أنها سنعتبر الأوتار هي المكونات الأكثر أساسية في الطبيعة.

ثالثاً: التوحد من خلال نظرية الأوتار

وي جانب عدم مقدرة النموذج القياسي على احتواء قوى الجاذبية، فإن له عيّاً آخر: لا يوجد تفسير لتفاصيل التركيب. فلماذا انتقت الطبيعة قائمة الجسيمات المحددة والقوى الموضحة في الفصول السابقة والواردة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2)؟ ولماذا هذه القيم بالذات للمؤشرات التسعة عشر التي تصف هذه المكونات كيّاً؟ لا يمكن مقاومة الإحساس بأن هذه الأرقام والخواص التفصيلية مجرد اختيار فقط. وهل هناك فهم أعمق يمكن وراء هذه المكونات العشوائية ظاهرياً، أم أن الخواص الفيزيائية التفصيلية للعالم قد "اختبرت" بالصدفة؟

ولا يقدم النموذج القياسي نفسه تفسيراً، حيث أنه يأخذ قائمة الجسيمات وخصائصها كمدخلات تجريبية. وكما يحدث تماماً في البورصة فإن قيمة ما تملكه لا يمكن تحديده من دون إدخال بيانات استثماراتك الأصلية، فإن النموذج

القياسي لا يستطيع إجراء أي تنبؤات من دون إدخال البيانات عن الخواص الأساسية للجسيمات⁽⁶⁾. وبعد أن يقوم الفيزيائيون التجربيون بقياس هذه البيانات بدقة عالية يمكن للنظريين أن يستخدموا النموذج القياسي لإجراء تنبؤات يمكن اختبارها، مثل ما يمكن أن يحدث عندما تندفع جسيمات معينة للتجمع داخل مسرع. لكن النموذج القياسي لا يستطيع أن يفسر خواص الجسيمات الأولية في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) أكثر مما يستطيع مؤشر داو جونس^(*) أن يفسر استثماراتك الأصلية في الأسهم منذ عشر سنوات.

ولو اكتشفت التجارب محتوى من الجسيمات المختلفة بعض الشيء في العالم المجهرى، من المحتمل أن تتدخل مع قوى أخرى مختلفة بعض الشيء، فإن هذه التغيرات يمكن تضمينها بسهولة معقولة في النموذج القياسي وذلك بتزويد النظرية بمدخلات مختلفة. ومن هذا المنطلق فإن بنية النموذج القياسي مرنة جداً لدرجة أنها يمكن أن تفسر خواص الجسيمات الأولية، كما أنها يمكن أن تتضمن مدى من الاحتمالات.

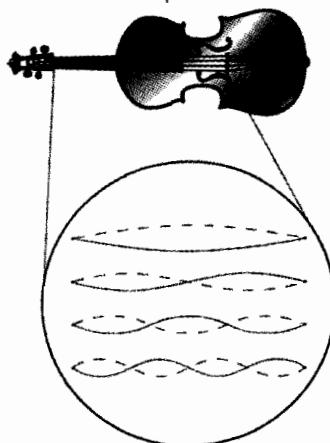
لكن نظرية الأوتار مختلفة اختلافاً جذرياً. فهي صرح نظري فريد وغير مرن. وهي لا تتطلب أي مدخلات عدا رقم واحد مشروع في ما بعد، يمثل علامات مميزة للمقاييس. فكل خواص العالم الميكروي تقع داخل مجال مقدرتها على التفسير. وحتى نفهم ذلك لتأخذ أوتاراً مألوفة أكثر لنا مثل أوتار الكمان. لكل وتر من هذه الأوتار عدد هائل من الأنماط الاهتزازية المختلفة (في الواقع عدد لانهائي) تسمى الرنين (Resonance) كما هو موضح في الشكل رقم (6-1). وهذه هي أنماط الموجات بقممها وانخفاضاتها تفصل بينها مسافات متزايدة وتناسب تماماً المسافة بين نقطتي ثبيت الوتر. وتشعر آذاننا برنين الأنماط الاهتزازية المختلفة كنغمات موسيقية متباعدة. وللأوتار في نظرية الأوتار صفات مماثلة. وهناك رنين لنسيق اهتزازي يحدده الوتر نتيجة المسافات المتزايدة بين القمم والانخفاضات التي تناسب تماماً بعده المكاني. ويعطي الشكل رقم (6-2) بعض

(6) يقترح النموذج القياسي آلية تكتسب بها الجسيمات كتلتها - آلية هيغس Higgs، وذلك على اسم الفيزيائي الأسكتلندي بيتر هيغس. غير أنه من وجهة نظر تفسير كتلة الجسيمات فإن ذلك مجرد إزاحة لحمل تفسير خواص الجسيمات المفترضة "التي تعطي الكتلة" - أي تلك المسماة "بوزون هيغس" (Higgs Boson).

وتحري الآن الأبحاث التجريبية لاكتشاف هذه الجسيمة، لكنه حتى لو اكتشفت وتم تحديد خواصها، فإن ذلك سيشكل بيانات مدخلات للنموذج القياسي، الذي لا تقدم له النظرية تفسيراً.

(*) مؤشر لمجموعة من الشركات الأمريكية الكبرى ويستخدم في بورصة نيويورك (وول ستريت) - (المترجم والمراجع).

الشكل رقم (1-6)

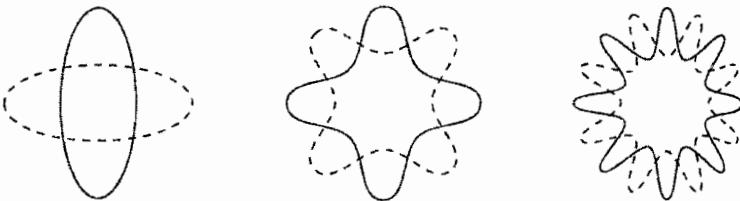


يمكن لأوتار الكمان أن تذبذب على شكل أنساق رئينة حيث تناسب أعداد صحيحة من القمم والمنخفضات بالضبط المسافة بين نهايتي الوتر.

الأمثلة. وهنا الحقيقة المحورية: تماماً كما في حالة الأنساق الاهتزازية المختلفة لأوتار الكمان التي تعطي نغمات موسيقية مختلفة، فإن "الأنساق الاهتزازية المختلفة لوتر أساسي تعطي كتلاً وشحنات قوى مختلفة". ولأن هذه النقطة هامة جداً، فسنذكرها مرة أخرى. وطبقاً لنظرية الأوتار، فإن خواص الجسيمة الأولية - كتلة وشحنة قواها المتنوعة - تتحدد بنسب الرنين الدقيق للاهتزازات التي يحدثها وترها الذاتي.

ومن أسهل ما يمكن فهم الارتباط بين ذلك وكتلة الجسيمة. وتعتمد طاقة نسق اهتزاز وتر معين على سعته - الإزاحة القصوى بين القمم والمنخفضات - وطول موجته - المسافة الفاصلة بين قمتين متتاليتين. وكلما زادت السعة وقصر طول الموجة زادت الطاقة. ويعكس ذلك ما قد تتوقعه بحدسك - فكلما كان النسق الاهتزازي أكثر هيجاناً زادت الطاقة، وكلما قل الهيجان نقصت الطاقة. وهناك مثالان في الشكل رقم (1-4). وهو أمر مأثور، مرة أخرى، فكلما ضربت أوتار الكمان بعنف أكثر فإنها تذبذب بسعة أكبر، أما الأوتار التي تضرب برقة أكثر فإنها ستذبذب بهدوء أكثر (سعة أقل). ونحن نعرف الآن من النسبة الخاصة أن الطاقة والكتلة وجهاً لنفس العملة: فزيادة الطاقة تعني زيادة الكتلة والعكس صحيح. وهكذا وطبقاً لنظرية الأوتار فإن كتلة الجسيمة الأولية تتحدد بطاقة النسق الاهتزازي لوترها الداخلي. فأوتار الجسيمات الأثقل تذبذب بصورة أكثر نشاطاً

الشكل رقم (2-6)



يمكن للحلقات في نظرية الأوتار أن تذبذب في أنساق رئينة - تماثل ما يحدث لأوتار الكمان - حيث يتناسب عدد صحيح من القمم والمنخفضات بالضبط مع المسافة التي يشغلها الوتر.

بينما تذبذب الأوتار الداخلية للجسيمات الأخف بصورة أقل نشاطاً.

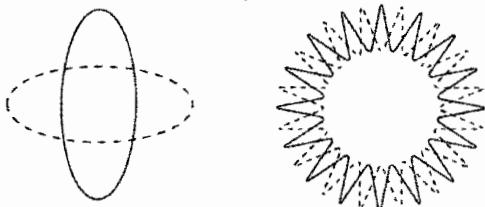
وحيث أن كتلة الجسيمة تحدد خواص جاذبيتها، فإننا نرى أن هناك علاقة مباشرة بين نسق اهتزاز الوتر وتجابب الجسيمة تجاه قوى الجاذبية. وعلى الرغم من أن هذا التعليل تجريدي بعض الشيء، إلا أن الفيزيائيين قد وجدوا تطابقاً بين تفاصيل بعض السمات الأخرى للنسق الاهتزازي للوثر وخواصه. ويحدث نفس الشيء بالنسبة للقوى الأخرى، فتتحدد الشحنة الكهربائية والشحنة الضعيفة والشحنة القوية التي يحملها وتر معين، مثلاً، بالطريقة الدقيقة التي يهتز بها هذا الوتر. والأكثر من ذلك، فإن نفس الفكرة بالضبط تتطابق على الجسيمات المراسلة نفسها. فالجسيمات مثل الفوتونات والبوزوونات القياسية الضعيفة والغليونات ما هي إلا أنساق رئينة لاهتزازات الأوتار. ومن الأمور ذات الأهمية الخاصة، اتضح أنه من بين أنساق اهتزازات الأوتار هناك نسق معين يتطابق تماماً مع خواص الغرافيتون، مما يؤكّد أن الجاذبية هي جزء متكامل في نظرية الأوتار⁽⁷⁾.

وهكذا فإننا نرى طبقاً لنظرية الأوتار أن الخواص المشاهدة لكل جسيمة أولية تنتج من كون وترها الداخلي يحدث نسق اهتزاز رئيني معيناً، ويختلف هذا

(7) بالنسبة للقراء ذوي الميول الرياضية، فإننا نذكر أن الترافق بين الأنساق الاهتزازية للأوتار وشحنات القوى يمكن أن يوصف بدقة أكثر في ما يلي. عند كتمة حركة الوتر، فإن حالات الاهتزاز الممكنة تمثل بمتغيرات في فضاء هيلبرت تماماً كما في حالة أي نظام في ميكانيكا الكم. ويمكن ترقيم هذه المتغيرات بواسطة قيم دايجين تحت مجموعة من عوامل هيرميتيان المتقلبة. ويعطى معامل هاميلتونيان ضمن هذه المعاملات حيث تعطي قيمته الطاقة وبالتالي كتلة الحالة الاهتزازية وكذلك المعاملات التي تولد التأثيرات القياسية المتنوعة والتي تخضع لها النظرية. وتعطى قيم إيجين للمعاملات الأخيرة شحنات القوى التي تحملها حالات اهتزاز الأوتار المرافقة.

المنظور بشدة عن ذلك الذي اعتقاد به الفيزيائيون قبل اكتشاف نظرية الأوتار. ففي المنظور الأقدم كانت الاختلافات بين الجسيمات الأولية تفسر بالقول أنه في الواقع قد "صنع كل نوع من الجسيمات من نسيج مختلف". فمع أن كل جسيمة كانت تعتبر أولية، فإن نوع "حشو" كل منها كان يعتقد أنه مختلف. فمثلاً "حشو" الإلكترون له شحنة سالبة، بينما "حشو" النيوترون ليس له شحنة كهربية. وتغير نظرية الأوتار هذه الصورة راديكالياً بأن تزعم أن "حشو" كل المواد وكل القوى هو "نفس الحشو". فت تكون كل جسيمة أولية من وتر منفرد - أي أن كل جسيمة هي وتر منفرد - وكل الأوتار واحدة تماماً. وينتتج الاختلاف بين هذه الجسيمات من كون وتر كل منها يحدث نسق اهتزاز رئيسي مختلفاً. وما يبدو أنه جسيمات أولية مختلفة هو في الواقع "نعمات" مختلفة لوتر أساسى واحد. وحيث أن العالم يتكون من عدد هائل من هذه الأوتار المتذبذبة، فإنه بذلك يمثل سيمفونية كونية.

الشكل رقم (6-3)



لأنساق الاهتزازية الأكبر هيأجاً طاقة أكبر من تلك الأقل هيأجاً.

وتوضح هذه النظرية العامة كيف أن نظرية الأوتار تقدم إطاراً موحداً حقيقياً رائعاً. فكل جسيمة مادية وكل ناقل للقوى يتكون من وتر له نسق اهتزاز مميز يعتبر بمثابة "بصمه". ولأن كل حدث فيزيائي وكل عملية وكل ما هو موجود في العالم يمكن أن يوصف - في أعمق مستوياته الأولية - بمدلول القوى التي تعمل في ما بين هذه المكونات الأولية للمادة، فإن نظرية الأوتار تقدم الأمل أن تكون هي الوصف الموحد الشامل للعالم الفيزيائي: أي نظرية كل شيء (T.O.E.).

رابعاً: موسيقى نظرية الأوتار

على الرغم من أن نظرية الأوتار قد أزاحت المفهوم السابق عن الجسيمات الأولية التي لا بنية لها، إلا أن اللغة القديمة عنيدة، وبالذات لأنها تقدم وصفاً

دقيقاً للواقع في المستويات الدقيقة جداً للمسافات. ولأننا سنتبع ما هو معمول به في هذا المجال، فسنستمر في الإشارة إلى "الجسيمات الأولية"، إلا أنها نعني بذلك "ما يبدو أنه جسيمات أولية، لكنها في الواقع قطع دقيقة من أوتار متذبذبة". وقد اقترحنا في الفقرات السابقة أن الكتلة وشحنة القوى لمثل هذه الجسيمات الأولية ما هي إلا نتاج الطريقة التي تتذبذب بها أوتارها. ويقودنا ذلك إلى الحقيقة الآتية: إذا استطعنا حساب نسق الاهتزاز الرئيسي للأوتار الأساسية بدقة - "النغمة" ، التي تلعبها هذه الأوتار - فإننا لا بد من أن نتمكن من تفسير الخواص التي نشاهدها للجسيمات الأولية. وبذا، فإنه لأول مرة تضع نظرية الأوتار إطاراً "لتفسير" خواص الجسيمات التي نلاحظها في الطبيعة.

وعند هذه المرحلة، فإننا يجب أن نُمسك بالوتر ونضرب عليه بكل الطرق الممكنة لتحديد الأنفاق الاهتزازية الرئيسية المحتملة. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإننا سنجد أن الأنفاق المحتملة ستعطي خواص المادة وجسيمات القوى في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) بدقة. وطبعي أن الوتر من الصغر بحيث لا يمكن إجراء تجربتنا هذه حرفيأً كما هي مكتوبة. لكن باستخدام الوصف الرياضي فإننا يمكن أن نضرب، نظرياً، على الأوتار. وفي منتصف الثمانينيات من القرن العشرين اعتقد الكثيرون من المتحمسين لنظرية الأوتار أن التحليل الرياضي المطلوب لإجراء هذه العملية كان على وشك التوصل إلى تفسير لكل تفاصيل خواص الكون في أدق مستوياته المجهرية. وقد أعلن بعض المتحمسين من الفيزيائيين أن نظرية كل شيء (T.O.E.) قد تم اكتشافها أخيراً. وقد اتضحت من الإدراك اللاحق على مدى أكثر من عقد من السنوات أن بهجة الانتصار الناتجة من هذا الاعتقاد كانت سابقة لأوانها. تضمنت نظرية الأوتار عناصر لنظرية كل شيء (T.O.E.)، لكن ظل هناك عدد من الحاجز يمنعنا من استنتاج طيف اهتزازات الأوتار بالدقة المطلوبة للمقارنة بالنتائج التجريبية. وحتى هذه اللحظة فإننا لا نعلم ما إذا كنا نستطيع تفسير الخواص الأساسية لعالمنا المذكورة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) بواسطة نظرية الأوتار. وكما سناقش في الفصل التاسع، وباستخدام فروض معينة سنعرضها بوضوح، فإن نظرية الأوتار يمكن أن تعطي خواص العالم في توافق كيفي مع البيانات المعروفة للجسيمات والقوى، لكن استنتاج التفاصيل الرقمية من هذه النظرية ليس في مقدورنا في الوقت الحاضر. وهكذا، وبالرغم من أن إطار نظرية الأوتار قادر على تفسير السبب في أن الجسيمات والقوى لها الخواص التي هي عليها، على عكس النموذج القياسي

للمجسية النقطة، إلا أننا لا نقدر حتى الآن أن نستنتاج هذه الخواص. لكن من الجدير بالذكر أن نظرية الأوتار غنية بشكل واضح وبعيدة المدى، وبالرغم من أنها وإن كنا لا نستطيع حتى الآن تحديد معظم خواصها التفصيلية، إلا أنها يمكن أن تكتسب بصيرة في الآفاق الغنية للظواهر الفيزيائية الجديدة التي تنتج من النظرية، كما سنرى في الفصول التالية.

وستناقش في الفصول التالية كذلك حالة المعوقات التي تواجه النظرية بشيء من التفصيل، لكن من المفيد أولاً أن نفهمها بشكل عام. وتتوارد الأوتار في العالم المحيط بنا بتواترات متنوعة. فاللوتر "الرباط" الذي ندخله في ثقوب الحذاء مثلاً، يكون عادة فضفاضاً (غير مشدود) عند مقارنته بالأوتار المشدودة في الكمان بين نقطتين. لكن هذين الاثنين بدورهما أقل توتراً بكثير من الأوتار المصنوعة من الصلب في البيانو. والعدد الذي تتطلبه نظرية الأوتار لتضع المقياس الشامل هو التوتر الذي يقابل حلقات الوتر. كيف يتحدد هذا التوتر؟ حسناً، إذا تمكنا من ضرب وتر أساسى فإننا سنعرف مدى صلابته، وبذلك نستطيع قياس توتره تماماً بنفس كيفية قياس توتر الأوتار الأكثر ألفة في حياتنا اليومية. لكن لأن الأوتار الأساسية في غاية الدقة، فإن هذه الطريقة لا يمكن استخدامها، ويتطلب الأمر طريقة غير مباشرة. في العام 1974، عندما اقترح كل من تشيرك وشوارتز أن جسمة الغرافيتون هي نسق معين من أنساق اهتزازات الأوتار، فإنهم استطاعوا استئثار مثل هذا المنطلق غير المباشر للتنبؤ بتوتر الأوتار في النظرية. وقد كشفت حساباتهم أن شدة القوة المنقولة بنسق الغرافيتون لاهتزاز الوتر المقترن تناسب عكسياً مع توتر الوتر. وحيث أنه من المفترض أن ينقل الغرافيتون قوى الجاذبية - القوى الضعيفة الواهنة ذاتياً - فقد وجداً أن ذلك يعني توتراً هائلاً يصل إلى ألف مليار مiliار مiliار (10³⁹) طن، وهو المعروف باسم توتر بلانك. ولذا فإن الأوتار الأساسية في غاية الصلابة عند مقارنتها بالأوتار الأكثر ألفة، الأمر الذي يؤدي إلى ثلاثة نتائج متعاقبة.

خامساً: النتائج الثلاث المتعاقبة للأوتار المشدودة

أولاً، بينما تكون نهاية الوتر في البيانو والكمان مثبتتين لتحديد طول ثابت له، فإنه لا يوجد شيء مشابه ليثبت طول الوتر الأساسي. وفي المقابل فإن التوتر الهائل للوثر يتسبب في تقلص الحلقات في نظرية الأوتار إلى أحجام متناهية الضالة. وتحمّل الحسابات التفصيلية إلى أنه في حالة وجود توتر بلانك، فإن ذلك

يعني أن يصبح طول الوتر النمطي مساوياً لطول بلانك - 10^{33} سنتيمتر - كما ذكرنا من قبل⁽⁸⁾.

ثانياً، ونظراً للتوتر الرهيب فإن الطاقة النمطية لحلقة متذبذب في نظرية الأوتار تكون عالية بدرجة قصوى. وحتى نفهم ذلك فإننا نعرف أنه كلما زاد توتر الوتر أصبح دفعه للاهتزاز أصعب. فمثلاً، أسهل كثيراً أن تضرب وتراً في الكمان وجعله يهتزز، من أن تفعل ذلك مع وتر البيانو. فإذا كان لوتوتين توتر مختلف، وكانتا يتذبذبان بنفس الطريقة تماماً، فلن يكون لهما نفس الطاقة. فالوتر ذو التوتر الأعلى ستكون طاقته أعلى من الوتر ذي التوتر الأقل، لأنه يتطلب طاقة أكثر لدفعه للاهتزاز.

وبنها ذلك إلى حقيقة أن طاقة الوتر المتذبذب تتحدد بشيئين: الطريقة الدقيقة التي يتذبذب بها (الأنساق الأكثر هياجاً لتقابل طاقات أعلى) وتوتر الوتر (التوتر أعلى يقابل طاقة أعلى). وفي البداية قد يجعلك هذا الوصف تفكّر بأنه إذا تناولنا أنساق اهتزازاً أهداً فأهداً - أنساقاً لها ساعات أصغر فأصغر وعدد أقل من القمم والانخفاضات - فإن الوتر يمكن أن يحتوي على طاقة أقل فأقل. ولكن، كما وجدنا في الفصل الرابع، وفي صياغة مختلفة، فإن ميكانيكا الكم تبتئأ بأن هذا المنطق غير صحيح. فمثل كل الاهتزازات أو الأضطرابات الموجية، تنقص ميكانيكا الكم على أن تلك الاهتزازات والأضطرابات لا توجد إلا في وحدات منفصلة. ويمكن عموماً القول بأنه تماماً مثل قطع العملة التي تم تكليف بعض الأفراد بها، فإن الطاقة المتضمنة في نسق اهتزاز الوتر تكون أيضاً مضاعفات صحيحة لفنتان من قيم دنيا من الطاقة. وبالتحديد فإن فنتات القيم الدنيا للطاقة هذه تتناسب مع توتر الوتر (كذلك تتناسب مع عدد القمم والانخفاضات في النسق الاهتزازي المعين)، بينما يتحدد العدد الصحيح للمضاعفات بسعة نسق الاهتزاز.

(8) وانطلاقاً من الأفكار التي ظهرت عن الثورة الثانية للأوتار الفائقة (التي سنعرض لها في الفصل 12) حدد وبين، وكذلك جو لايكين بصفة خاصة من مختبر فيرمي المعجل القومي، خطأً ذا قيمة لكنه ممكن الحدوث في هذا الاستنتاج. وقد اقترح لايكين مستغلاً هذا المنهج أنه من المحتمل أن تكون هذه الأوتار تحت تأثير توتر أقل بكثير، وبالتالي تكون أطول كثيراً من المتوقع في الأصل. ويمكن أن تكون هذه الأوتار من الكبر بحيث يمكن رصدها بواسطة الجيل القادم من معجلات الجسيمات. فإذا كان هذا الاحتمال بعيد المثال ونادرًا، فإن الأمر المثير والمترقب هو أن التضمينات الهامة لنظرية الأوتار التي نوقشت في هذا الفصل وفي الفصول التالية يمكن التتحقق منها تجريبياً خلال العقد القادم. ولكن حتى في أكبر السيناريوهات "المتفق عليها" والتي يتبناها منظرو نظرية الأوتار، والتي يقع طول الأوتار فيها في حدود 10^{33} سم عادة، فإن هناك وسائل غير مباشرة للتعرف عليها تجريبياً كما سشرح ذلك في الفصل التاسع.

والنقطة المحورية في هذا النقاش هي: حيث أن الفئات الدنيا للطاقة تتناسب مع توتر الوتر، وحيث أن هذا التوتر هائل، فإن الطاقات الدنيا الأساسية هي بالمثل هائلة جداً، وذلك بالمقاييس العادية لفiziاء الجسيمات الأولية. وهي مضاعفات لما هو معروف بطاقة بلانك. ولندرك هذا المقياس، فإننا إذا حولنا طاقة بلانك إلى كتلة مستخدمين معادلة آينشتاين الشهيرة ، فإن هذه الطاقات ستقابل كتلاً في حدود عشرة مليارات المرات أكبر من كتلة البروتون (مرة). وتسمى هذه الكتلة الهائلة - بمعايير الجسيمات الأولية - "بكتلة بلانك" ، وهي تساوي تقريباً كتلة حبة من الغبار أو تجمع لما يقرب من مليون بكثيراً. وهكذا يصبح المكافئ الكتلي النمطي لحلقة متذبذبة في نظرية الأوتار عموماً أعداداً صحيحة لمضاعفات كتلة بلانك (1، 2، 3، ...). غالباً ما يعبر الفيزيائيون عن ذلك بقولهم مقياس الطاقة "الطبيعي" أو "النمطي" (وبالتالي مقياس الكتلة) في نظرية الأوتار وهو مقياس بلانك.

ويشير ذلك سؤالاً محورياً يتعلق مباشرة بالهدف من إعادة الحصول على نفس خواص الجسيمات المذكورة في الجدولين رقمي (1-1) و(2-2): فإذا كان المقياس "الطبيعي" للطاقة في نظرية الأوتار هو حوالي عشرة مليارات مليارات مرة أكبر من البروتون، فكيف يمكن أن تحسب الجسيمات الأخف كثيراً مثل الإلكترون والكوراكات والفوتونات وغيرها، التي يتكون منها العالم حولنا؟

ويأتي الجواب مرة ثانية من ميكانيكا الكم. فيؤكّد مبدأ عدم التيقن أنه لا شيء في حالة سكون تام. فكل الأجسام تعاني من الهياج الكمي، لأنها إذا لم تفعل ذلك فسنعرف أين هي وما هي السرعة التي تتحرك بها بدقة كاملة، الأمر الذي يتعارض مع مقوله هيزنبرغ المأثورة. وينطبق ذلك أيضاً على الحلقات في نظرية الأوتار، مهما بدا ظاهرياً أن الوتر هادئ، إلا أنه يقوم بشيء من الاهتزازات الكمية. والشيء الجدير باللاحظة، كما ظهر في السبعينيات من القرن العشرين، هو أنه من الممكن أن يحدث "تللاش" للطاقة بين هذه الهياجات الكمية ونوع اهتزازات الوتر الأكثر حدسيّة والذي ناقشناه سابقاً وهو موضح في الشكلين رقمي (2-2) و(3-6). وبالفعل، ومن خلال غرابة ميكانيكا الكم فإن الطاقة المصاحبة للهياج الكمي للوتر تكون "سالبة" ، و"يقلل" هذا من محتوى الطاقة الكلية للوتر المتذبذب بمقدار مساوٍ تقريباً لطاقة بلانك. ويعني ذلك أن الطاقة الأدنى لأنساق اهتزازات الأوتار، التي يمكن أن تتوقع ببساطة أنها مساوية تقريباً لطاقة بلانك (أي مرّة واحدة مثل طاقة بلانك) على الأرجح تتلاشى مؤدية بذلك إلى طاقات اهتزاز ممحصلتها منخفضة، وهي الطاقات التي لها مكافئات قريبة من كتل المادة

وجسيمات الطاقة الموضحة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2). إنها هذه الطاقات الضئيلة لأنساق الاهتزازات التي لذلك تمثل حلقة الوصل بين الوصف النظري للأوتار والعالم التجاريي المتاح لفيزياء الجسيمات. وكمثال هام، فقد وجد تشيرك وشوارتز أنه بالنسبة للنسق الاهتزازي ذي الخواص التي ترشحه ليكون جسيمة غرافيتون المرسال، فإن الطاقة تتلاشى تماماً مؤدية إلى جسيمة قوى جاذبية كتلتها صفر. وهو المتوقع تماماً من الغرافيتون، حيث قوى الجاذبية تنتقل بسرعة الضوء ولا ينتقل بهذه السرعة القصوى سوى الجسيمات عديمة الكتلة. لكن الجسيمات منخفضة الطاقة الاهتزازية هي الاستثناء وليس القاعدة. والوتر الأساسي المتذبذب الأكثر نمطية عبارة عن جسيمة كتلتها أكبر ميلارات المرات من كتلة البروتون.

ويدلنا ذلك على أن الجسيمات الأساسية الخفيفة نسبياً الموجودة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) لا بد أن تنشأ، بشكل ما، من الضباب الرقيق الذي يحوم فوق المحيط الهائج للأوتار ذات الطاقة العالية. ويمكن لجسيمة في ثقل الكوارك القمة الذي كتلته تساوي 189 مرة تقريباً كتلة البروتون أن تنشأ من وتر يتذبذب فقط إذا تلاشت الطاقة الهائلة الخاصة بالوتر بمقاييس بلانك بواسطة هياجات عدم التيقن الكمي بدقة أكثر من جزء من المائة من الجزء من المليون من جزء من المليار. ويبدو الأمر كأنه برنامج "السعر المناسب" The Price Is Right^(*) حيث يعطيك بوب باركر - مقدم البرنامج - عشرة مليارات الدولارات من الدولارات، ويتحداك أن تشتري متاجات تساوي كل المبلغ ما عدا 189 دولاراً بلا زيادة أو نقص. ولكي تصل لمثل هذه الدقة الهائلة من دون أن تكون على دراية دقيقة بالأسعار الدقيقة للأغراض موضع التقويم، فإن ذلك سيربك بشدة حتى أعظم المستوسقين خبرة في العالم. وفي نظرية الأوتار حيث الطاقة هي العملية البديلة، فإن الحسابات التقريرية قد بينت بما لا يدع مجالاً للشك أن التلاشي المشابه للطاقة "يمكن أن يحدث بكل تأكيد؛ لكن ولاسباب ستبدو أكثر وضوحاً في الفصول التالية، فإن التحقق من هذا التلاشي بهذه الدرجة العالية من الدقة يقع عموماً خارج نطاق إدراكنا النظري. وبالرغم من ذلك، وكما أشرنا من قبل، فإننا سنرى أن الكثير من الخواص الأخرى لنظرية الأوتار، التي هي أقل حساسية لمثل تلك التفاصيل الدقيقة، يمكن استنتاجها وإدراكتها بكل ثقة.

وأخذنا ذلك إلى النتيجة المتعاقبة الثالثة للقيمة الهائلة لتوتر الأوتار. تستطيع

(*) برنامج مسابقات في التلفزيون الأمريكي يقوم فيه المسابقون بتصانع بدرجة دقة معينة ليكسبوا، ويتوقف مكسبهم على درجة دقة تقويمهم للأسعار (المترجم والمراجع).

الأوتار أن تقوم بعدد لا نهائي من أنساق الاهتزازات المختلفة. فمثلاً في الشكل رقم (6-2)، بينما البدايات لاحتمالات متتابعة لا تنتهي تتميز بأعداد متزايدة من القمم والانخفاضات. ألا يعني ذلك أنه في المقابل لا بد من أن توجد تتابعات من الجسيمات الأولية لا تنتهي تبدو وكأنها تتناقض مع الموقف التجريبي المعروض في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2)؟

والجواب نعم: فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن كل نسق من الأنساق الرئيسية للأوتار المتذبذبة لا بد أن تقابلها جسيمة أولية. غير أن النقطة الأساسية هي أن التوتر المرتفع للوتر يؤكد أن كل أنساق الاهتزازات - ما عدا القليل - سينقابلها جسيمات ثقيلة بدرجة قصوى (والقليل هنا هو الاهتزازات الأقل طاقة، والتي عانت من تلاشٍ للطاقة شبه تام مع الهياج الكمي للأوتار). ومرة أخرى، فإن تعبير "ثقيل" هنا يعني أنقل مرات كثيرة من كتلة بلانك. وحيث أن أعظم مسرّعات الجسيمات قدرة يمكن أن تصل بالطاقة إلى ما يقرب من ألف ضعف كتلة البروتون فقط، أي أقل من جزء من المليون من جزء من المليار من طاقة بلانك، فإننا بعيدون جداً عن أن نجري أبحاثاً مخبرية على أي من هذه الجسيمات الجديدة التي تنبأت بها نظرية الأوتار.

لكن هناك طرق غير مباشرة يمكن استخدامها في دراسة تلك الجسيمات. فمثلاً الطاقة المتضمنة أثناء مولد الكون لا بد من أنها كانت من الكبير بحيث تتمكن من إنتاج هذه الجسيمات بوفرة. وعموماً لا يتوقع أحد أن تظل هذه الجسيمات حتى يومنا هذا، لأن مثل تلك الجسيمات الفائقة الثقل عادة ما تكون غير ثابتة، فتختلص من كتلتها الهائلة بتفككها إلى سلسلة من الجسيمات الأخف نسبياً، لتنتهي إلى الجسيمات الخفيفة نسبياً التي تملأ العالم حولنا. ومع ذلك، من الممكن أن مثل هذه الحالة فائقة الثقل من الأوتار المتذبذبة - كذكوار من الانفجار الهائل - قد صمدت حتى وقتنا هذا. وسيصبح اكتشاف مثل هذه الجسيمات، كما سنشرح بتفاصيل أكثر في الفصل التاسع، اكتشافاً تذكارياً هائلاً على أقل تقدير.

سادساً: الجاذبية وميكانيكا الكم في نظرية الأوتار

الإطار الموحد الذي تقدمه نظرية الأوتار طاغ. لكن أفضل ما فيها هو مقدرتها على تخفيف العداوة بين قوى الجاذبية وميكانيكا الكم. وللتذكر أن مشكلة مزج النسبية العامة وميكانيكا الكم قد ظهرت لأن العقيدة المحورية في النسبية العامة هي كون الزمان والمكان يشكلان بنية هندسية ناعمة التحدب، وذلك في مواجهة السمات الأساسية لميكانيكا الكم في أن كل شيء في الكون، بما في

ذلك نسيج الزمان والمكان، يعني من التأرجحات الكمية التي تزداد اضطراباً كلما اختبرناها على مستويات أصغر فأصغر في المسافات. ففي المسافات الأقل من مقاييس بلانك، تصبح التموجات الكمية من العنف لدرجة أنها تحطم مفهوم المكان الهندسي ناعم التحدب، الأمر الذي يعني سقوط النسبية العامة.

قامت نظرية الكم بتهيئة التموجات الكمية وذلك "بتمس" خواص الفضاء في المسافات القصيرة. وهناك إجابة تقريرية وأخرى أكثر دقة للرد على السؤال عما يعنيه ذلك وعن كيفية حل هذا التناقض. وسنشرح ذلك تباعاً.

1- الإجابة التقريرية

برغم أن الأمر قد يبدو ساذجاً، لكن إحدى وسائل معرفة بنية الأشياء هي أن تقدّفها بأشياء أخرى ثم تلاحظ بدقة ماذا يحدث لتلك الأشياء. فنحن نرى الأشياء، مثلاً، لأن عيوننا تجمع وعقولنا تحل شفرة المعلومة التي تحملها الفوتونات عندما ترتد عن سطح الأشياء التي نراها. وتبني معجلات الجسيمات على نفس المبدأ: فهي تقدّف بأشياء صغيرة من المادة مثل الإلكترونات والبروتونات بعضها في اتجاه بعض أو في اتجاه أهداف أخرى، لتقوم وسائل التحليل الدقيقة بتحليل رذاد الشظايا المتناثر لتعيين بنية الأجسام موضع الدراسة.

وكلقاعدة عامة فإن حجم الجسيمة المعسوب التي نستخدمها تحدد الحد الأدنى للطول الذي يمكن تسجيله. ولكي ندرك ما تعنيه هذه العبارة الهامة لنتخيل أن سليم وجيم قد قررا أن يرفعا من ثقافتهما بأن يلتحقا بفصل لتعليم الرسم. ومع تقدم الفصل الدراسي أصبح جيم أكثر استشارة تجاه الحرافية المت坦مية التي اكتسبها سليم كفنان، واقتراح أن يتحداه في مسابقة غير عادية. ويخلص تحدي جيم في الآتي: يأخذ كل منهما نواة لثمرة الخوخ ويشبّها في ملزمته (منجلة) ثم يقوم برسم زيتى دقيق لها. لكن الشرط غير العادي لهذا التحدي أنهما لا يملكان الحق في رؤية هذه النواة، وبدلأً من ذلك فمسموح لكل منهما أن يعرف حجم وشكل وصفات النواة الخاصة به فقط بإطلاق أشياء معينة (ليست فوتونات) عليها وملاحظة كيف تحيد هذه الأشياء كما هو موضع في الشكل رقم (4-6). لم يكن معلوماً لدى سليم أن جيم قد ملأ مكان الإطلاق الخاص بسليم بكرات صلبة نسبياً (كما في الشكل رقم (4-6)، (a)) لكنه ملأ المكان الخاص به بكرات بلاستيكية أصغر من 5 ملليمتر (كما في الشكل رقم (4-6)، (b)). بدأ كلاهما في إطلاق الكرات وبدأت المنافسة.

وبعد فترة من الزمان، كان أفضل ما توصل إليه سليم هو في الشكل رقم

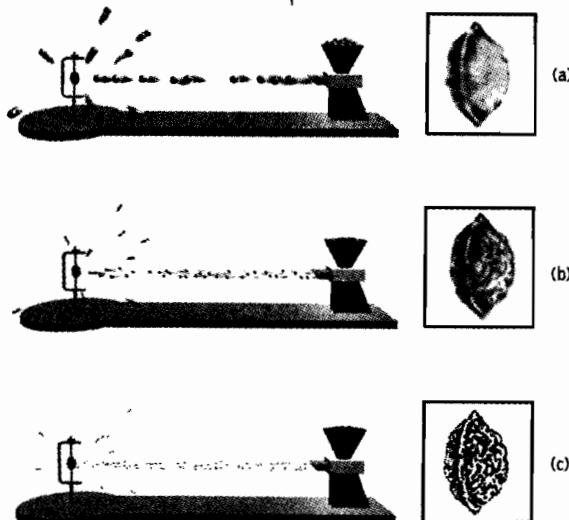
(4-6)، (a). فبملاحظة مسارات الكرة المرتدة تمكن من معرفة أن نواة الخوخ صغيرة وأنها كتلة ذات سطح صلب. كان ذلك هو كل ما استطاع أن يعرفه، فالكرات الكبيرة نسبياً التي استخدمها سليم أكبر من أن تشعر بالبنية المترجة الأدق لنواة الخوخ. وعندما ألقى سليم نظرة على رسم جيم (الشكل رقم 4-6)، (b) انددهش لأنه أدرك أن جيم قد هزمه. وبنظرية خاطفة على مكان إطلاق جيم اكتشف الخدعة. فالقطع الصغيرة التي استخدمها جيم كمجسات كانت من الصغر بحيث تتأثر زاوية انحرافها ببعض السمات الكبيرة التي يتحلى بها سطح نواة الخوخ. وهكذا بإطلاق الكثير من الكرة ذات القطر 5 ملليمتر على نواة الخوخ ومتتابعة ارتداد مسارها استطاع جيم أن يرسم صورة أكثر تفصيلاً. وحتى لا ينهرم سليم فإنه يعود مرة أخرى إلى منصة الإطلاق ويملاها بكرات قطرها حوالي نصف ملليمتر، وهي من الصغر بحيث تستطيع أن تتدخل وترتدي بواسطة أدق التعرجات على سطح النواة. ومتتابعة الكيفية التي ترتد بها هذه المجسات الثاقبة فقد أصبح في مقدوره أن يرسم اللوحة الفائزة كما في الشكل رقم 4-6، (c).

والدرس الذي استقيناها من هذه المنافسة البسيطة واضح: فالجسيمات التي تصلح كمجسات لا يمكن أن تكون أكبر كثيراً من السمة الفيزيائية التي تختبرها، وإنما فإنها لن تكون حساسة للبنية التي تستهدفها.

ويصدق نفس التعليل بالطبع في حالة ما إذا أردنا الحصول على مجسات لاختبار البنية الذرية وتحت الذرية بعمق أكثر. وفي هذه الحالة، فإن القذائف ذات القطر نصف ملليمتر لن تعطي أية معلومات مفيدة لأنها من الكبر بحيث لن تشعر بالبني ذات المقاييس الذرية. ولهذا فإن معجلات الجسيمات تستخدم البروتونات والإلكترونات كمجسات، لأن أحجامها الصغيرة تجعلها أكثر ملاءمة لهذه المهمة. وبمقاييس تحت ذري حيث تحل المفاهيم الكمية محل المنطق الكلاسيكي، فإن القياس المناسب لحساسية الجس عند الجسيمات هو طول الموجة الكمي، الذي يدل على هامش عدم التيقن في موقعها (نافذة عدم التيقن). وتعكس هذه الحقيقة مناقشاتنا لمبدأ عدم التيقن لهيزنبرغ في الفصل الرابع، الذي وجدها فيه أن هامش الخطأ المتضمن عند استخدام جسيمة نقطة كمجس (ركزنا على مجسات الفوتونات، لكن المناقشة تصلاح لجميع الجسيمات الأخرى) يساوي تقريباً طول موجة الكم للجسيمة المجس. وبلغة أبسط بعض الشيء، فإن حساسية المجس لجسيمة نقطة تتحملي باضطرابات ميكانيكا الكم بنفس الطريقة التي يتاثر بها مشرط الجراح عندما ترتعش يده أو يدها. ولنتذكر ما ورد في الفصل الرابع عن الحقيقة الهامة التي تنص على أن طول الموجة الكمي للجسيمة يتناسب عكسياً مع عزمها،

والذي هو مجازاً طاقتها. وهكذا بزيادة طاقة الجسيمة النقطة، فإن طول موجتها الكمية سينتancock باستمرار - ويمكن أن يقل المحو الكمي أكثر فأكثر، وبالتالي يمكن استخدامها كمجس لفحص البني الفيزيائية الأكثر دقة. ومن المعروف أن الجسيمات ذات الطاقة الأعلى لها قوة نفاذ أكبر، ولذا فهي قادرة على فحص السمات الأكثر دقة.

الشكل رقم (4-6)



نواة خوخ مثبتة في ملزمة (منجلة) وترسم فقط عن طريق ملاحظة كيف ترتد الأشياء - "المجسات" - المقذوفة عليها. وباستخدام مجسات تزداد صفراء - (a) كرات كبيرة، (b) كرات 5 ملليمتر، (c) كرات أصغر نصف ملليمتر - فإن تفاصيل أكثر ستظهر على اللوحة.

وفي هذا الصدد، فإن التمييز بين الجسيمات النقطات وجدائل الأوتار يصبح واضحاً. تماماً كما في حالة استخدام الكرات البلاستيكية كمجسات لاختبار سمات سطح نواة الخوخ، فإن الأبعاد المكانية الخاصة بالأوتار تمنعها من فحص بنية أي شيء أصغر بجلاه من حجمها هي نفسها - وهي البني التي لها مقاييس طولية أقل من طول بلانك. وبصورة أدق بعض الشيء، فإن ديفيد غرووس الذي كان في جامعة برینستون في ذلك الوقت، وتلميذه بول ميند قد بينا في العام 1988 أنه عندما نتعامل مع ميكانيكا الكم فإن الزيادة المستمرة في طاقة الوتر لا تعني زيادة مستمرة في مقدرتها على فحص بنى أدق، وهو ما يتعارض مباشرةً مع ما

يحدث للجسيمة النقطة. وقد وجد أنّه عندما تزداد طاقة الوتر فإن مقدراته على فحص بنى ذات أبعاد أقصر ممكّنة في البداية، تماماً كما في حالة الجسيمة النقطة النشطة. لكن عندما تزيد طاقته وتتخطى القيمة المطلوبة لفحص بنى في حدود طول بلانك، فإن الطاقة المضافة لا تضيف حساسية للوتر الفاحص. وبدلاً من ذلك تسبب الطاقة المضافة نمو الوتر في الجسم، وبالتالي تقلل من حساسيته للمسافات القصيرة. ومع أن طول الوتر النمطي هو في الواقع طول بلانك، فإذا زودنا هذا الوتر بطاقة كافية - كمية من الطاقة تعددى أقصى ما يمكن أن يدركه خيالنا الجامع، لكنها ربما تكون قد حدثت عند لحظة الانفجار الهائل - فإننا يمكن أن نجعله ينمو في الحجم إلى أن يصبح ماكروسكوبياً (أكبر من المجهر)، وبذالاً يصبح مجساً آخر (غير ملائم) بالنسبة للعالم المجهر! وكما لو أن الوتر، على عكس الجسيمة النقطة، له مصدران للمحو: الاختراض أو الهياج الكمي، كما هو الأمر للجسيمة النقطة، وأيضاً الحيز المكاني الخاص به. وتؤدي زيادة طاقة الوتر إلى نقص المحو من المصدر الأول (الاختراض الكمي) لكنه في النهاية يزيد المحو من المصدر الثاني (الحيز المكاني). ولب الموضوع أنه مهما حاولت فإن الطبيعة الممتدة للوتر تمنعك من استخدامه لفحص الظواهر على المسافات الأقل من طول بلانك.

وكل التناقضات بين النسبة العامة وميكانيكا الكم تكمن في خواص السطح الفضائي في المسافات الأقل من طول بلانك. "إذا كان من غير الممكن اخبار المكونات الأولى للكون على مسافات أقل من طول بلانك، فلا هي ولا أي شيء يتكون منها يمكن أن يتأثر بالتموجات الكمية المدمرة المفترضة". ويشبه ذلك ما يحدث عندما نمر بيدهنا فوق سطح من الغرانيت أملس ثم صقله بشدة. فمع أنه على المستوى المجهر يكتون سطح الغرانيت من قطع منفصلة محبة، فإن أصحابنا غير قادر على اكتشاف هذه الاختلافات القصيرة المدى فتشعر بالسطح أملس ناعماً. وتمحو أصحابنا الغليظة الفروق المجهرية بين القطع المكونة للسطح. وبالمثل، ولأن للوتر امتداداً مكانيّاً فإن له كذلك حدوداً لحساسيته للمسافات القصيرة. فهو لا يستطيع اكتشاف الاختلافات ذات الأبعاد الأقل من طول بلانك. ومثل أصحابنا فوق سطح الغرانيت، فإن الوتر يمحو التأرجحات فوق المجهرية المضطربة لمجال الجاذبية. وعلى الرغم من أن التأرجحات الناتجة ما زالت محسوسة إلا أن المحو يقلل من تأثيرها بما فيه الكفاية ليعالج عدم التوافق بين النسبة العامة وميكانيكا الكم. وبصفة خاصة فإن اللانهائيات الضارة (المعروضة في الفصل السابق) التي تظهر في حالة تطبيق مفهوم الجسيمة النقطة في صياغة نظرية

الكم للجاذبية، تم الاستغناء عنها بواسطة نظرية الأوتار.

والفرق الأساسي في التشابه بين الغرانيت وموضوع اهتمامنا الحقيقي - النسيج الفضائي - هو أن هناك طرقاً يمكن بها الكشف عن التفاصيل المجهورة لسطح الغرانيت: يمكن استخدام مجسات أكثر دقة عن أصابعنا. فللمجهر الإلكتروني المقدرة على الكشف عن السمات السطحية لأقل من جزء من المليون من المستيمتر، وهذا من الصغر بما يكفي للكشف عن العيوب العديدة على سطح الغرانيت. وعلى النقيض، فلا توجد طريقة في نظرية الأوتار للكشف عن "العيوب" في النسيج الفضائي على مستوى أقل من طول بلانك. وفي العالم الذي تحكمه قوانين نظرية الأوتار، فإن المفهوم المتفق عليه بأننا نستطيع دائماً أن نقسم (أو نقطع) الطبيعة إلى أبعاد أصغر فأصغر، من دون حدود، ليس صحيحاً. فهناك حدود، وتظهر هذه الحدود قبل أن نصل إلى الرغوة الكمية المدمرة في الشكل رقم (1-5). لذلك ويشكل سيصبح أكثر دقة في الفصول اللاحقة، فإنـه يمكن حتى أن نقول إن التموجات الكمية العاصفة المفترضة على مستوى أقل من بلانك "لا توجد". والواضح يمكن أن يقول يوجد شيء ما إذا أمكن - ولو من ناحية المبدأ - جسه وقياسه. وحيث أنه من المفترض أن الوتر هو أكثر الأشياء أولية في الكون، ولأنه من الكبير بحيث لا يتاثر بالتموجات العنيفة في المستويات الأقل من بلانك في النسيج الفضائي ، فإن تلك التأرجحات لا يمكن قياسها، وبالتالي وطبقاً لنظرية الأوتار، فهي في الواقع لا توجد.

2- هل هي خفة يد؟

قد تجعلك هذه المناقشة غير راضٍ عنها. فبدلاً من أن تقوم نظرية الأوتار بترويض التموجات الكمية في المكان على مستوى أقل من بلانك، يبدو أنها قد استخدمنا حجم الأوتار الذي لا يساوي الصفر للاتفاق حول الموضوع برمته. فهل قمنا في الحقيقة بحل أي شيء؟ أجل، لقد فعلنا. وستقوم النقطتان التاليتان بالتأكيد على ذلك.

الأولى، ما تضمنه الجدل السابق من أن المشكلة المفترضة حول التأرجحات الفضائية على مستويات أقل من طول بلانك، هي نتاج مصطنع لصياغة النسبية العامة وmekanika الكم في إطار الجسيمة النقطة. وبمعنى آخر، ولذلك، فإن التقاض الممحوري للفيزياء النظرية المعاصرة هو في الواقع مشكلة من صنع أيدينا. ولأننا قد تصورنا في السابق أن كل جسيمات المادة وكل جسيمات القوى هي أجسام على شكل نقاط، وليس لها امتداد مكاني أبداً، لذا فقد اضطررنا أن نعتبر

خواص الكون على مستويات قصيرة مختارة. وعند المسافات الأدق دخلنا في مضلات يبدو أنها تستعصي على الحل. وتدلنا نظرية الأوتار على أننا قد واجهنا هذه المشكلات لأننا لم ندرك القواعد الحقيقة للعبة؛ فالقواعد الجديدة تبيناً بأن هناك حدوداً للدقة التي يمكن أن نختبر بها الكون - وبشكل واقعي، هناك حدود لكيفية تطبيق مفهومنا المتفق عليه عن المسافات بدرجة من الدقة على البنية فوق المجهريّة للكون. ويمكن أن نرى الآن أن التأرجحات الفراغية العاخصة المفترضة قد ظهرت في نظرياتنا لأننا لم نكن على دراية بهذه الحدود، وبالتالي قادتنا فكرة الجسيمة النقطة لنخطو خطوة كبيرة خاطئة فوق حدود الواقع الفيزيائي.

وبالوصول إلى هذا التبسيط ظاهرياً للتغلب على المعضلة بين النسبة العامة وميكانيكا الكم، لعلك تتعجب لماذا استغرق الأمر كل هذا الوقت ليقترح بعضهم أن صيغة الجسيمة النقطة هي مجرد أمر مثالي، لكن في العالم الواقعي فللجسيمات الأولية بعض من حيز مكاني. ويؤدي بنا هذا إلى النقطة الثانية. فمنذ فترة بعيدة اقترح بعض العظاماء في الفيزياء النظرية من أمثال باولي وهيزنبرغ وديراك وفيمن أن مكونات الطبيعة قد لا تكون في الحقيقة مجرد نقاط بل "بقع" أو "شدرات" متموجة. غير أنهم ومعهم آخرون قد وجدوا أنه من الصعب وضع نظرية لا يكون المكون الأساسي فيها جسيمة نقطة، وتنتمي في نفس الوقت مع أغلب القوانين الفيزيائية الأساسية مثل الحفاظ على احتمالية ميكانيكا الكم (حتى لا يختفي جسم مادي فجأة من العالم من دون أن يترك أثراً) واستحالة انتقال المعلومات بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وقد أظهرت أبحاثهم المرة تلو الأخرى من منظورات مختلفة أن واحداً أو أكثر من هذه المبادئ قد تمت مخالفته عندما أهللنا نموذج الجسيمة النقطة. ولذا ول فترة طويلة بدا وكأنه من المستحيل أن نجد نظرية كم معقوله مبنية على أي شيء غير الجسيمة النقطة. والسمة الحقيقة المؤثرة في نظرية الأوتار أنه على مدى أكثر من عشرين سنة من البحث الدقيق ظهر أنه على الرغم من وجود بعض الصفات غير المألوفة إلا أن نظرية الأوتار تحترم كل ما هو مطلوب من صفات داخلية في آية نظرية فيزيائية معقوله. والأكثر من ذلك، ومن خلال نسقها لاهتزاز الغرافيتون، فإن نظرية الأوتار نظرية كم تحتوي على الجاذبية.

3- الإجابة الأكثر دقة

تمسك الإجابة التقريرية بجوهر الكيفية التي تسيّدت بها نظرية الأوتار حيث سقطت نظريات الجسيمات النقاط. وهكذا، إذا رغبت، فإنك تستطيع أن تنتقل إلى الجزء التالي من دون أن تفقد التسلسل المنطقى لمناقشاتنا. لكن وبعد أن قمنا

بتطوير الأفكار الأساسية للنسبية الخاصة في الفصل الثاني، فإننا نمتلك الآن الوسائل الضرورية لنشرح بدقة أكبر كيف هدأت نظرية الأوتار من الهياج الكمي العنف.

وفي الإجابة الأكثر دقة، سنعتمد على نفس جوهر الفكرة كما في الإجابة التقريرية، لكننا سنعبر عنها مباشرة على مستوى الأوتار. وسنقوم بذلك بعقد مقارنة بين مجسات الجسيمات النقاط ومجسات الأوتار، بعض التفصيل. وسنرى كيف تمحو طبيعة الأوتار الممتدة المعلومات التي من الممكن الحصول عليها باستخدام مجسات الجسيمات النقاط، ولذا، مرة أخرى، سنرى كيف أن هذا سيلغي ببررة سلوك المسافات فوق القصيرة المسؤول عن المعضلة المحورية في الفيزياء المعاصرة.

ستأخذ في اعتبارنا أولاً الطريقة التي تتدخل بها الجسيمات النقاط، إذا فرض أنها موجودة بالفعل، وبالتالي كيف يمكن أن تستخدم كمجسات فيزيائية. وأقوى التداخلات الأساسية هو الذي يحدث بين جسيمتين نقطتين تحركان في اتجاه تصادمي بحيث يتقطع مسارهما كما في الشكل رقم (6-5). فإذا كانت هذه الجسيمات على شكل كرات بلياردو فإنها ستتصادم وسينحرف كل منها إلى مسار جديد. وتبين نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة أن نفس الشيء يحدث أساساً عندما تتصادم الجسيمات الأولية - فهي تتشتت بعضها عن البعض الآخر وتواصل تحركها في مسارات قد انحرفت - غير أن التفاصيل شيء مختلف.

ومن أجل البساطة، تخيل أن إحدى تلك الجسيمات إلكترون والأخرى جسيمة مضادة، بوزيترون. فعندما تصطدم المادة بالمادة المضادة فإنهما يتلاشيان متحولين إلى ومضة من الطاقة ليتخرج عنها مثلاً فوتون⁽⁹⁾. ولكي نميز بين مسار الفوتون الناتج عن المسارات السابقة للإلكترون والبوزيترون فإننا نتبع مصطلحات



جسيمان تدخلان - تدفعان تجاه بعضهما - وتبسيبان في انحراف مسار كل منهما.

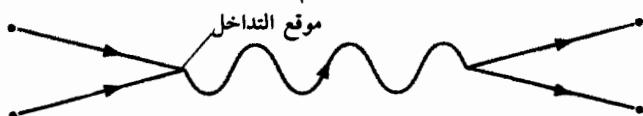
(9) يمكن للقارئ الخبير أن يدرك أن الفوتون الناتج من الصدام بين الإلكترون وبوزيترون هو فوتون افتراضي، لذا فإنه لا بد من أن يتخلى عن طاقته بواسطة التفكك إلى زوج من جسيمة وجسيمة مضادة.

الفيزياء التقليدية، ونرسمه على أنه خط متوج. وعادةً سيقطع الفوتون بعض المسافة ثم يطلق الطاقة التي استقها من زوج الإلكترون - بوزيترون، منتجاً زوجاً آخر من إلكترون - بوزيترون بالمسارات المشار إليها في أقصى يمين الشكل رقم (6-6). وفي النهاية فإن جسيتين قد أطلقتا الواحدة تجاه الأخرى، وتتدخلان بواسطة القوى الكهرومغناطيسية، ثم تظهران في النهاية بمسارات منحرفة، وذلك في سلسلة متابعة من الأحداث تحمل بعض التشابه مع شرحنا لتصادم كرات البلياردو.

وما يهمنا هو تفاصيل التداخل - وعلى وجه الخصوص النقطة التي يتلاشى عندها الإلكترون الأصلي والبوزيترون الأصلي لي المنتجا الفوتون. وكما سيظهر بجلاء، فإن الحقيقة المحورية هنا، هي أن هناك زماناً ومكاناً واضحين يمكن تحديدهما تماماً بالنسبة للحدث: الأمر موضح في الشكل رقم (6-6).

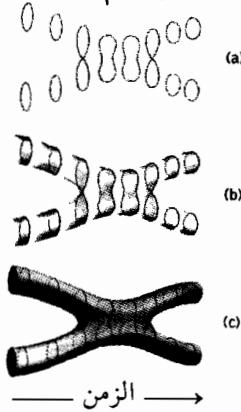
كيف يتغير هذا الوصف إذا اختبرنا الأجسام عن قرب، التي كنا نعتقد أن لها بعداً يساوي الصفر (نقطة)، واتضح أنها أوتار أحادية البعد؟ والعملية الأساسية للتداخل هي نفسها، لكن الأجسام الآن الموجودة في مسارات تصادمية عبارة عن حلقات متذبذبة كما هو واضح في الشكل رقم (6-7). فإذا كانت هذه الحلقات تهتز في أنساق رئينية مناسبة تماماً، فإنها ستعبر عن إلكترون وبوزيترون في مسار تصادمي، كما هو موضح بالضبط في الشكل رقم (6-6). ويكون السلوك كوتر حقيقي واضحاً فقط عندما نختبر المسافات متناهية الصغر، والأصغر كثيراً من أي تقنية حديثة متاحة. وكما في حالة الجسيمة النقطة، فإن الورترين يتصادمان ويتلاشيان بعضهما مع بعض في ومضة خاطفة. والومنصة هي فوتون، الذي هو نفسه وتر في نسق اهتزاز معين. وبذال، فإن الورترين المتلاقيين يتداخلان بالامتزاج وإنما وتر ثالث كما يبدو في الشكل رقم (6-7). و تماماً كما في وصفنا للجسيمة النقطة، فإن هذا الوتر ينتقل لبرهة ثم يطلق طاقته التي اكتسبها من الورترين المتلاقيين بأن يتفكك إلى ورتين يواصلان مسيرتهما. ومرة ثانية لن يظهر هذا إلا من

الشكل رقم (6-6)



في نظرية مجال الكم، تتلاشى الجسيمة والجسيمة المضادة لتنتج فوتوناً. ويتبع ذلك أن يعطي الفوتون جسيمة أخرى وجسيمة مضادة أخرى تتحركان في مسارات مختلفة.

الشكل رقم (7-6)



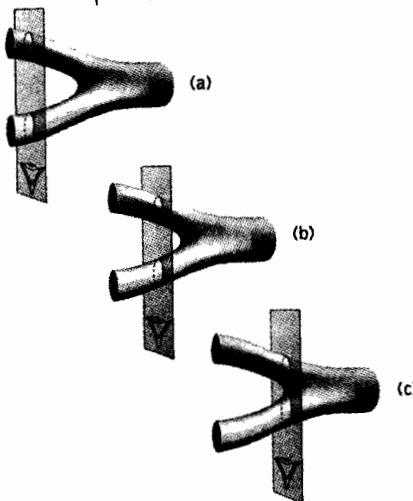
(a) وتران في مسار تصادمي يمكن أن يمتنعا في وتر ثالث يمكن بدوره أن ينطوي إلى وتران يتقلان في مسارين منحرفين. (b) نفس العملية الموضحة في (a) مؤكدة على حركة الوتر. (c) صورة بعد برهة لوتران متداخلين يجوبان العالم.

منظور مجهرى فائق، وسيظهر كتدخل جسيمة نقطة كما في الشكل رقم (6-6). ومع ذلك فإن هناك اختلافاً جوهرياً بين الحالتين. وقد أكدنا على أن تدخل الجسيمة النقطة يحدث في نقطة محددة في الزمان والمكان، وهي الموضع الذي يمكن أن يتفق عليه جميع المشاهدين. وكما سنرى الآن، فإن هذا الأمر ليس صحيحاً للتداخلات التي تحدث بين الأوتار. وسنوضح ذلك بمقارنة الكيفية التي يتصف بها التداخل كل من جورج وغريس، الموجدين في حالة حركة نسبية (كما هو موضح في الفصل الثاني). فسنرى أنهما لن يتفقا على أين ومتى تلامس الوتران لأول مرة.

ولنفعل ذلك، نصور أنك تتبع التداخل بين الوتران بالآلة تصوير عدستها مفتوحة طول الوقت لتسجل كل العملية في شريط واحد⁽¹⁰⁾. وستعرض النتيجة -

(10) من الطبيعي أن آلة التصوير تعمل عن طريق تجميع الفوتوونات التي تعكس عن الأجسام التي نراها ونسجلها على الشريط الفوتوغرافي. واستخدمنا آلة التصوير في هذا المثال أمراً رمزي، حيث أنها لا يمكن أن تصور انعكاس الفوتوونات من الأوتار المتصادمة. والأخرى أنها ترغب في أن تسجل في الشكل رقم (7-6)، (c) ببساطة كل عملية التداخل. وبذكر ذلك فإن علينا أن ننبه إلى نقطة تحطيناها في متن الكتاب. فقد عرفنا من الفصل الرابع أنها يمكن أن نصوغ ميكانيكا الكم باستخدام طريقة جمع كل المسارات لفينمان والتي نحل فيها حركة الأجسام بواسطة تجميع المساهمات من "جميع" المسارات =

الشكل رقم (8-6)

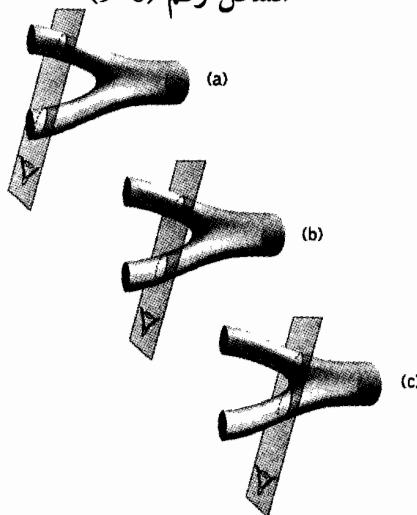


الوتران المتلاقيان في ثلات لحظات متتالية. في (a) و (b) نرى اقتراب الوترين، وفي (c) يتلامس الوتران لأول مرة من وجهة نظر جورج.

والمعروفة باسم "لوحة العالمية للوتر" - في الشكل رقم (6-7). ويستطيع اللوحة العالمية إلى قطع متوازية - تماماً كما نقطع قالب خبز - فإننا يمكن أن نسترجع لحظة تداخل الأوتار. ويوضح الشكل رقم (6-8) مثلاً لهذا التقاطع، وفي الشكل رقم (6-8)، (a) بالتحديد نوضح تركيز اهتمام جورج على الوترين المتلاقيين. وقد زودنا الشكل بمستوى قاطع يقطع كل الأحداث التي تحدث في الفضاء في نفس اللحظة من منظور جورج. وكما فعلنا غالباً في الفصول السابقة فإننا سنلغي واحداً من الأبعاد المكانية في هذا الشكل لزيادة التوضيح. أما في الواقع فهناك طبعاً أبعاد ثلاثة للأحداث التي تجري في نفس اللحظة بالنسبة لأي مشاهد. ويبين الشكل رقم (6-8)، (a) و(b) لقطتين في زمين

المحتملة فيما بين نقطة بداية ونقطة نهاية (كل مسار يساهم بقيمة تحدد إحصائياً بواسطة فينمان). وقد بتنا في الشكلين رقمي (6-6) و(6-7) أحد المسارات المحتملة لجسيمة نقطة من بين عدد لا يهانى منها (الشكل رقم (6-6)), أو مسار أحد الأوتار (الشكل رقم (6-7)) وذلك بتبع مسارها من موضعها الأصلي حتى نقطة نهاية المسار. وتتطبق المنافسة في هذا المقطع على أي مسار محتمل آخر، وبالتالي فهي تطبق على كل العملية الكمية نفسها. (عممت صياغة فينمان لميكانيكا الكم للجسيمة النقطة - في إطار كل المسارات - على نظرية الأوتار من خلال أبحاث ستانلى ماندلشتام من جامعة كاليفورنيا في بيركلي وبواسطة الفيزيائي الروسي ألكسندر بولياكوف الموجود حالياً في قسم الفيزياء بجامعة برinstون).

الشكل رقم (9-6)



الوتران المتقابلين في ثلاثة لحظات متتالية. في (a) و(b) يقترب الوتران الواحد من الآخر؛ وفي (c) يتلامسان للمرة الأولى، من منظور غريس.

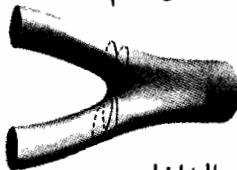
متتابعين - شريحتين متتاليتين من اللوحة العالمية توضحان كيف يرى جورج الوترين لدى اقترابهما الواحد من الآخر. وللأهمية المحورية، فإننا قد بينا في الشكل رقم (6-8)، (c) لحظة الزمن، من وجهة نظر جورج، التي تلامس عندها الوتران لأول مرة واندمجا معا ليتلاصقا الوتر الثالث.

ولنفعل الآن نفس الشيء مع غريس. وتتضمن الحركة النسبية لجورج وغريス، كما وضحنا في الفصل الثاني، أنهما لا يتفقان حول حدوث الأحداث في نفس الوقت. ومن منظور غريس فإن اللوحة العالمية في الشكل رقم (6-7)، (c) لا بد أن تقطع إلى شرائط بزوايا مختلفة لكي تتضمن لحظة بلحظة خطوات التداخل.

وفي الشكل رقم (9-6)، (b) و(c) قد بينا اللحظات المتتالية الآن من منظور غريس متضمنة تلك اللحظة التي ترى فيها الوترين المتقابلين يتلامسان ليتلاصقا الوتر الثالث.

وبمقارنة الشكلين رقمي (6-8)، (c) و(6-9)، (c) كما هو موضح في الشكل رقم (6-10)، فإننا سنرى أن جورج وغريス لن يتتفقا أين ومتى التقى الوتران الأصليان لأول مرة - أي أين سيحدث التداخل. ويعكّد كون الوتر جسم

الشكل رقم (6-10)

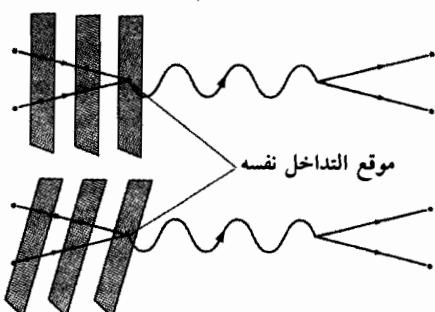


لا يتفق جورج وغريس على موقع التداخل.

ممتد أن لا غرابة هناك في موقعه في المكان والزمان عندما يتداخل الوتران لأول مرة - وبالأخرى فإن الأمر يعتمد على حالة حركة المشاهد.

إذا طبقنا نفس المنطق على تداخل الجسيمات النقطات، كما هو معروض بباجاز في الشكل رقم (6-11) فإننا سنعيد التوصل إلى نفس الاستنتاج الذي توصلنا إليه سابقاً - هناك نقطة محددة في المكان ولحظة محددة في الزمان عندما تتداخل الجسيمات النقطات. تتزاحم كل تداخلات الجسيمات النقطات في نقطة محددة. وعندما تكون القوى المعنية في التداخل هي قوى جاذبية - أي عندما تكون الجسيمة المرسال في هذا التداخل هي الغرافيتون بدلاً من الفوتون - فإن تزاحم (حشر) مجموع القوى في نقطة وحيدة يؤدي إلى نتائج كارثية، مثل الإجابة بلا نهاية التي أشرنا إليها سابقاً. وعلى النقيض فإن الأوتار "تطمس" المكان الذي يحدث فيه التداخل. ولأن المشاهدين المختلفين يرون أن التداخل يحدث في موقع مختلفة على طول الجزء الأيسر من السطح في الشكل رقم (6-10)، فإن ذلك في الواقع يعني أن موقع التداخل قد طمس هو الآخر بالنسبة لهم جميعاً.

الشكل رقم (6-11)



يتفق المشاهدون الموجودون في حركة نسبية على مكان وزمان التداخل بين جسيمين نقطتين.

ويؤدي ذلك إلى انتشار مجموعة القوى، وفي حالة قوى الجاذبية، فإن طمس الموقع يخفف من خواصها فوق المجهرية بدرجة ملحوظة - لدرجة أن الحسابات ستفضي إلى إجابات محددة معقولة بدلاً من الالانهائيات المذكورة سابقاً. وهذه صورة أخرى أكثر دقة لعملية الطمس التي قابلناها في الإجابة التقريبية في نهاية الجزء الأخير. مرة أخرى، فإن هذا الطمس يؤدي إلى تهدئة الأضطرابات فوق المجهرية للمكان عندما تนาقص المسافات الأقل من طول بلانك بعضها مع بعض. ومثلاً ننظر إلى العالم من خلال عدسات ضعيفة جداً أو قوية جداً، فإن التفاصيل الأقل من أبعاد بلانك والتي يمكن أن تكون متاحة لمجس من جسمية نقطة، تطمس مع بعضها بواسطة نظرية الأوتار لتصبح غير ضارة. وعلى عكس حالة إنسان ضعيف البصر، إذا كانت نظرية الأوتار هي الوصف النهائي للكون، فلا توجد عدسات لتصحيح الوضع حتى تصبح التأرجحات في مستويات أقل من بلانك واضحة. وعدم التوافق بين النسبية العامة وmekanika الكم والذي يظهر فقط في المسافات الأقل من مقاييس بلانك - يمكن تجنبه في عالم له حدود دنيا للمسافات التي يمكن الوصول إليها أو حتى يمكن الزعم بأنها موجودة بالمعنى العام. وهذا هو الكون كما تصفه نظرية الأوتار، والذي نرى فيه أن قوانين الأشياء الصغيرة والأشياء الكبيرة يمكن أن تمتزج معاً بتجانس، حيث أنها باختصار قد تغلبنا على الكارثة التي من المفترض أن تظهر عند المسافات فوق المجهرية.

سابعاً: ما الذي وراء الأوتار؟

الأوتار شيء مميز لسيدين: الأول، أنه على الرغم من أنها تشغل حيزاً مكаниاً ممتدأ إلا أنه يمكن وصفها دائماً في إطار ميكانيكا الكم. والسبب الثاني، أنه من بين الأساق الرئinية للاحترازات هناك نسق واحد له خواص الغرافيتون، وبذا يتأكد أن قوى الجاذبية مكون ذاتي في بنية الأوتار. ولكن، تماماً كما بينت نظرية الأوتار أن المفهوم المتفق عليه بأن الجسيمات النقاط ليس لها بعد، قد ظهر بأنه شيء رياضي مثالي لا وجود له في العالم الواقعي، فهل يمكن أن يكون الأمر بالنسبة لجدولة وتر أحادية بعد سماكتها في غاية الرقة، أن تكون هي الأخرى شيئاً رياضياً مثالي؟ وهل يمكن في الواقع أن يكون للأوتار سُمك ما - مثل سطح الإطار الداخلي لدراجة ثنائي الأبعاد - أو حتى بشكل أكثر واقعية مثل كعكة رقيقة ثلاثة الأبعاد؟ وقد أخرجت الصعوبات التي لا يمكن التغلب عليها، والتي اكتشفها هيزنبرغ وديراك وأخرون أثناء محاولاتهم صياغة نظرية كمٌ للشظايا ثلاثة الأبعاد أحراجت مراراً الباحثين الذين سلكوا هذا التسلسل الطبيعي من المنطق.

وعلى غير المتوقع تماماً، وخلال منتصف التسعينيات من القرن العشرين، أیقن منظرو نظرية الأوتار من خلال البراهين غير المباشرة، بل والذكية، أن مثل هذه الأجسام الأساسية ذات الأبعاد الأکثر تلعب في الواقع دوراً هاماً وحساساً في نظرية الأوتار نفسها. وقد تحقق الباحثون بالتدريج من أن نظرية الأوتار ليست نظرية للأوتار فقط. ومن الملاحظات الخطيرة، التي تعتبر محورية بالنسبة لثورة الأوتار الفاقعة الثانية، التي بدأها ويتن وآخرون في العام 1995، أن نظرية الأوتار تتضمن في الواقع مكونات لها أبعاد مختلفة متنوعة: مكونات مثل الأطباقي في لعبة الأطباقي الطائرة ذات البعدين، ومكونات مثل اللطعة لها ثلاثة أبعاد، ومكونات أكثر غرابة تتضمنها النظرية. وسنأخذ هذه الاكتشافات الأحدث في اعتبارنا في الفصلين 13، و14. أما الآن فسنواصل تبعنا للمسار التاريخي واختبارنا للخواص الجديدة المدهشة لعالم قد يبني من أوتار أحادية البعد بدلاً من جسيمات نقاط ليس لها بعد.

الفصل السابع

التفوق في الأوتار الفائقة

عندما نجحت بعثة إدينغتون في العام 1919 في قياس انحراف ضوء نجم بواسطة الشمس كما توقع آينشتاين، أرسل عالم الفيزياء الهولندي هنريك لورنس برقية إلى آينشتاين بالأخبار الطيبة وعندما أذيعت كلمات البرقية المؤكدة للنسبية العامة سأل أحد الطلاب آينشتاين عما يمكن أن يفكّر فيه إذا لم تكتشف تجربة أدينغتون الانحراف المتوقع لضوء النجم، أجاب آينشتاين: "سأكون آسفًا لما حدث للورد العزيز، لأن النظرية صحيحة"^(١). ومن الطبيعي أنه إذا فشلت التجارب في الواقع في إثبات تنبؤات آينشتاين، فإن النظرية لن تكون صحيحة، ولن تصبح النسبية العامة إحدى دعامات الفيزياء الحديثة. غير أن ما كان يعنيه آينشتاين هو أن النسبية العامة تصف الجاذبية بروعة عظيمة وبأفكار بسيطة لكنها قوية لدرجة أنه وجد من الصعب أن تخيل أن الطبيعة يمكن ألا تلتفت إليها. كانت النسبية العامة من وجهة نظر آينشتاين على درجة من الجمال يصعب معها أن تكون غير صحيحة.

لكن الأحكام الجمالية ليست كافية لإجازة المنهج العلمي. وفي النهاية فإن ما يحكم نجاح النظريات هو إلى أي مدى تواجه هذه النظريات الحقائق التجريبية الجافة المجردة. لكن الملحوظة الأخيرة معرضة لكثير من المتطلبات الهامة. عندما تتوضع نظرية ما، فإن الحالة غير النهائية لتطورها غالباً ما تمنع اختبار نتائجها بالتفصيل تجريبياً. ومع ذلك، فعلى علماء الفيزياء أن يعملوا اختيارهم وأن يمارسوا حكمهم حول الكيفية والاتجاه الذي يوجهون نحوه استكمال نظرياتهم غير المكتملة. ويفرض تناقض المنطق الداخلي بعض هذه القرارات، وبالقطع فإن الأمر يتطلب في أي نظرية معقولة أن تتجنب أية غرابة منطقية. ويحكم بعض القرارات الأخرى إدراك التضمينات الكيفية التجريبية لأحدى البنى النظرية بالنسبة لبنية أخرى. ونحن لا نهتم بالنظرية التي لا تتضمن المقدرة على تمثيل أي شيء

(١) آلبرت آينشتاين، مقتطفة من أبواله في كتاب: R. Clark, Einstein: *The Life and Times* (New York: Avon Books, 1984), p. 287.

من تلك الأشياء التي تقابلنا في العالم من حولنا. ولكن بالتأكيد هناك حالات لبعض القرارات التي يتخذها الفيزيائيون النظريون مبنية على حس جمالي - وهو الحس الذي يعني أن للنظرية أناقة وجمالاً في البنية يتمشيان مع العالم الذي نعيش فيه. وطبعاً، لا يوجد أي شيء يؤكد أن هذه الاستراتيجية تؤدي إلى الحقيقة. وربما يكون العالم في أعمقه ذا بنية أقل أناقة مما كنا نعتقد من خلال خبراتنا، أو ربما نجد أن الخصائص الحالية تتطلب تقيحاً واضحاً عند تطبيقها في مجالات أقل أناقة. وبالرغم من ذلك، وعندما نقترب من عصرًا تصف فيه نظرياتنا مجالات من العالم تتزايد صعوبتها اختبارها تجريبياً، فإن علماء الفيزياء يعتمدون على مثل هذه النواحي الجمالية لتساعدهم في السير بسهولة في مسارات معتمدة وفي طرق مسدودة لا يمكن أن يقتفوها إذا لم تتوفر هذه النواحي الجمالية. وحتى هذه اللحظة فقد قدم هذا المنطلق دليلاً قوياً وثاقباً.

والتناظر يشكل جزءاً هاماً في النواحي الجمالية في الفيزياء كما في الفن. لكن على عكس الفن، فإن التناظر في الفيزياء له مفهوم صلب ودقيق جداً. وفي الحقيقة إذا تبعينا بعناية هذا المفهوم الدقيق عن التناظر حتى نتائجه الرياضية، فإن الفيزيائيين قد اكتشفوا خلال العقود القليلة الأخيرة نظريات فيها الجسيمات المادية والجسيمات الرسولية مجدولة بصورة أكثر بكثير مما كان يعتقد أي إنسان من قبل احتمال وجودها. ولمثل هذه النظريات التي لا توحد قوى الطبيعة فقط بل المكونات المادية أيضاً، أعلى درجة ممكنة من التناظر، ولهذا السبب يقال إنها "متناظرة فائقة" - فائقة التناظر Supersymmetric. وكما سرني، فإن نظرية الأوتار الفائقة هي السلف والنموذج الرفيع لإطار فائق التناظر.

أولاً: طبيعة القانون الفيزيائي

تخيل عالماً تتغير فيه قوانين الفيزياء سريعاً كما تتغير الموضة من سنة لسنة أو من أسبوع لأسبوع أو حتى من لحظة لأخرى. وإذا افترضنا أن في مثل هذا العالم لا تسبب تلك التغييرات في اضطراب العمليات الأساسية للحياة، فإن أقل ما يمكن أن يقال هو أنك لن تمر عليك لحظة مملة واحدة. وقد يصبح أبسط الأحداث مخاطرة حيث إن الاختلافات العشوائية ستمنعك وتمنع أي إنسان آخر من استخدام الخبرات السابقة للتنبؤ بأي شيء عن المستقبل.

ومثل هذا العالم كابوس بالنسبة لعلماء الفيزياء، فعلماء الفيزياء - ومثل أغلب الناس - يعتمدون أساساً على ثبات العالم: فالقوانين الصحيحة اليوم كانت كذلك بالأمس، ويصبح صحيحة أيضاً في الغد (حتى إذا لم نكن من المهارة

بحيث نتمكن من فهمها كلها). وفوق كل ذلك، ما الذي يعنيه تعبير "قانون" إذا كان يتغير بصورة فجائية؟ ولا يعني ذلك أن العالم إستاتيكي، فالعالم بكل تأكيد يتغير بطرق لا تحصى من لحظة لأخرى، وبالأحرى، فإن القوانين التي تحكم هذا التطور هي الثابتة لا تتغير . وقد نتساءل عما إذا كنا نعلم حقيقة أن هذا صحيح. في الواقع نحن لا نعرف. لكن نجاحنا في وصف السمات العديدة للكون منذ برهة صغيرة بعد الانفجار الهائل وحتى وقتنا هذا يؤكّد لنا أنه إذا كانت هذه القوانين تتغير فإن ذلك لا بد من أن يكون في غاية الباء. وأبسط الافتراضات التي تواءم مع كل ما نعرفه هو أن تلك القوانين ثابتة.

والآن، تخيل عالماً تتنوع فيه قوانين الفيزياء كما تتنوع الثقافات المحلية وتتغير بشكل حاد غير متوقع من مكان لآخر وتقاوم بشراسة أي مؤثر خارجي في تشكيلها. وكما في معمارات غاليفر، الذي يسافر في مثل هذا العالم فإن ذلك سيعرضك إلى عالم غني جداً بالخيرات غير المتوقعة. لكن هذا كابوس آخر في نظر الفيزيائيين. ومن الصعوبة بمكان مثلاً، أن نتعاش مع حقيقة أن القوانين الصحيحة في بلد ما - أو ولاية ما - قد تكون غير صحيحة في بلد أو ولاية أخرى. لكن فلتتخيل ما الذي ستكون عليه الأشياء إذا أصبحت قوانين الطبيعة تتغير بهذا الشكل. وفي عالم مثل هذا فإن التجارب التي تجري في موقع ما لن يكون لها أي تأثير على قوانين الفيزياء المناسبة في مكان آخر. وفي المقابل، سيكون على الفيزيائيين أن يعيدوا إجراء التجارب مرات ومرات في المواقع المختلفة ليخبروا قوانين الطبيعة المحلية التي تسوء في كل موقع. والحمد لله، فإن كل ما نعرفه يشير إلى أن قوانين الفيزياء هي نفسها في كل مكان. وتدور كل التجارب التي تجمع العالم على نفس مجموعة التفسيرات الفيزيائية. والأكثر من ذلك، فإن مقدرتنا على شرح عدد هائل من المشاهدات الفلكلورية لمناطق من الكون شاسعة البعد باستخدام مجموعة ثابتة من مبادئ الفيزياء، كمثال، تؤدي بنا للاعتقاد بأن نفس القوانين صالحة في كل مكان. وبما أننا لم نسافر إلى الطرف الآخر من الكون، فإننا لا نستطيع أن نجزم بأن هناك نوعاً جديداً من الفيزياء يسود في مكان آخر، لكن كل الأمور تشير إلى التقىض.

ومرة أخرى فإن ذلك لا يعني أن الكون يبدو واحداً - أو له نفس الخواص التفصيلية - في الواقع المختلفة. ورائد الفضاء الذي يقفز بالزانة فوق سطح القمر يمكن أن يأتي بكل أنواع الأفعال التي لا يمكنه القيام بها على الأرض. لكننا نقر بأن هذا الاختلاف ينشأ لأن القمر كتلة أقل كثافة كثيراً من كتلة الأرض؛ ولا يعني ذلك أن قوانين الجاذبية تتغير بطريقة ما من مكان إلى آخر. فقانون نيوتن أو قانون

آينشتاين، لنكون أكثر دقة، للجاذبية، هو نفسه على الأرض وعلى القمر. والاختلاف في ما صادفه رائد الفضاء هو اختلاف في التفاصيل البيئية وليس اختلافاً في القانون الفيزيائي.

استخدامها - كتمناظرات في الطبيعة. ويعني الفيزيائيون بذلك أن الطبيعة تعامل مع كل لحظة من الزمن وكل موقع في المكان بنفس الطريقة - بتناظر - مؤكدة بذلك أن القوانين الأساسية هي نفسها السائدة. ومثل هذه التمناظرات مقنعة بشدة تماماً بنفس الطريقة التي تؤثر بها في الفن والموسيقى؛ وهي تبرز النظام والتماسك في عمل الطبيعة. وأناقة وغنى وتعقد وتتنوع الظواهر التي تنشأ من مجموعة بسيطة من القوانين الكونية هي على الأقل جزء مما يعنيه الفيزيائيون عندما يستخدمون تعبير "جميلة".

وقد توصلنا في مناقشتنا لنظرية النسبية الخاصة والعامة إلى تمناظرات أخرى للطبيعة. وإذا استرجعنا مبدأ النسبية الذي هو لب النسبية الخاصة، فإن ذلك يدلنا على أن كل القوانين الفيزيائية لا بد أن تكون واحدة بصرف النظر عن الحركة النسبية الدائمة التي قد يكون عليها المشاهدون كل على حدة. وهذا تناظر لأنَّه يعني أنَّ الطبيعة تعامل مع مثل هؤلاء المشاهدين بنفس الطريقة، أي بتناظر. ونجد العذر لكل واحد من مثل هؤلاء المشاهدين في أنه يعتبر نفسه أو تعتبر نفسها في حالة سكون. ومرة أخرى، لن يصل المشاهدون الموجودون في حالة حركة نسبية إلى نفس المشاهدات كما رأينا من قبل، فهناك كل أنواع الاختلافات المذهلة في مشاهداتهم. وفي المقابل وكما في حالة خبرات الفوز بالزانة على الأرض وعلى القمر، فإن الفروق في المشاهدات تعكس التفاصيل البيئية - المشاهدون في حالة حركة نسبية - حتى بالرغم من أن المشاهدات محكومة بنفس القوانين.

ومن خلال مبدأ التكافؤ في النسبية العامة، وسَعَ آينشتاين من هذا التناظر بشكل ملحوظ، وذلك بأنَّ بين أن قوانين الفيزياء هي في الحقيقة واحدة بالنسبة لكل المشاهدين، حتى إذا كانوا واقعين تحت حركة معقدة متتسارعة. ولسترجع ما توصل إليه آينشتاين من تتحققه من أن المشاهد المتتسارع له تمام الحق في أن يعلن أنه أو أنها في حالة سكون، وأنَّ القوى التي يشعر بها هي نتيجة مجال الجاذبية. وبمجدد تضمين الجاذبية في إطار النظرية، فإن كل نقاط التفضيل للمشاهدة تقف على قدم المساواة تماماً. وعدا إغراء النواحي الجمالية الذاتية لهذا التعامل المتساوي لكل أنواع الحركة، فقد رأينا أن مبادئ هذا التناظر تلعب دوراً محورياً في الاستنتاجات المذهلة في ما يتعلق بالجاذبية التي اكتشفها آينشتاين.

ترى هل هناك مبادئ تناظر أخرى لها علاقة بالمكان والزمان والحركة يجب

على قوانين الطبيعة أن تتحترمها؟ وإذا فكرت في ذلك فربما تتوصل إلى احتمال آخر. ولا يجب أن تتأثر قوانين الفيزياء بالزاوية التي نجري مشاهداتنا منها. فمثلاً، إذا كنت تجري تجربة ما ثم قررت أن تغير من موقع أجهزتك وتجري التجربة مرة أخرى، فإن نفس القوانين يجب أن تسود. ويعرف ذلك بالتناظر الدوراني، ما يعني أن قوانين الفيزياء تعامل مع كل الاتجاهات المحتملة على قدم المساواة. ومبدأ التناظر هذا متوافق تماماً مع مبادئ التناظر التي سبق مناقشتها.

هل هناك تنازرات أخرى؟ وهل أغفلنا أي تنازرات؟ فقد تقترح أن هناك تنازرات قياسية تتفق مع القوى غير الجاذبية كما هو مبين في الفصل الخامس. ومن المؤكد أن هذه تنازرات في الطبيعة، إلا أنها من نوع أكثر تجريداً؛ وسينصب تركيزنا هنا على التنازرات التي لها علاقة مباشرة بالمكان والزمان والحركة. وبوضع هذا القيد، فإنك لا يمكن أن تفك في احتمالات أخرى. وفي الحقيقة فإنه في العام 1967، تمكن الفيزيائيان سيدني كولمان وجيفري مانديولا من إثبات أنه لا يوجد أي تنازير آخر يرتبط بالمكان والزمان والحركة يمكن أن يضم إلى التنازرات التي شرحناها حالاً ويعطي نظرية تحمل أي تشابه مع عالمنا. وتبعاً لذلك، فإن الفحص الدقيق لهذه الفرضية بالاعتماد على بصيرة عدد من الفيزيائين قد كشف بدقة عن عيب بارز: لم تستغل نتيجة كولمان - مانديولا بشكل كامل التنازرات التي تتأثر بما يعرف بالحركة المغزلية.

ثانياً الحركة المغزلية

يمكن أن تدور جسيمة أولية مثل الإلكترون حول نواة ذرية بنفس الطريقة تقريباً التي تدور بها الأرض حول الشمس. لكن في الوصف التقليدي للإلكترون كجسيمة نقطة، يبدو أنه لا تشبه هناك مع دوران الأرض حول محورها (في حركة مغزلية). وعندما يدور جسم حول نفسه (في حركة مغزلية) فإن النقاط الموجودة على محور الدوران - كما هو الحال في نقطة المركز في طبق فريسيي الدوار (Frisbee) - لا تتحرك. وإذا كان هناك أي شيء مثل النقطة بالفعل، فإنه لا يملك "نقاطاً أخرى" تقع خارج محور الدوران المعنى. وبذلك قد يبدو أنه لا يوجد مفهوم لدوران مغزلي لجسم على شكل نقطة. ومنذ سنوات كثيرة مضت، فإن مثل هذا المنطق سقط ضحية لمفاجأة أخرى من ميكانيكا الكم.

وفي العام 1925، تحقق عالما الفضاء الهولنديان جورج أولينييك وصمويل غودسميث من أن كثيراً من البيانات المحيزة والمتعلقة بخواص الضوء المنبعث والممتص بواسطة الذرات، يمكن تفسيرها إذا افترضنا أن للإلكترونات خواص

مغناطيسية من نوع خاص جداً وقد بين العالم الفرنسي أندريه - ماري أمبير منذ بضع مئات من السنين، أن المغناطيسية تنتهي من حركة الشحنة الكهربية. وقد تتبع أولينبيك وغودسميث هذا الخط واكتشفا أن هناك نوعاً معيناً واحداً فقط من حركة الإلكترون هو الذي يمكن أن يعطي الخواص المغناطيسية التي جاءت بها البيانات: الحركة الدورانية - أي الحركة المغزليّة. وهكذا، على النقيض من التوقعات التقليدية، أعلن كل من أولينبيك وغودسميث أن الإلكترونات تشبه الأرض إلى حد ما في كونها تدور حول النواة وتدور حول نفسها (في حركة مغزليّة).

هل كان أولينبيك وغودسميث يعنيان حرفيًّا أن الإلكترون يدور في حركة مغزليّة؟ نعم ولا. والأمر الذي بيّنته أبحاثهما بالفعل هو أن هناك مفهوماً من ميكانيكا الكم حول الحركة المغزليّة التي تشبه إلى حد ما الصورة العادية. لكن لها طبيعة كمية (من ميكانيكا الكم). إنها واحدة من تلك الخواص الخاصة المجهريّة والتي تعيد صقل الأفكار الكلاسيكيّة لكنها تدخل مفهوم الكم المحقق تجريبياً فمثلاً تخيل لاعبة تزلج على الجليد وهي تدور في حركة مغزليّة. فإذا ضمت ذراعيها إلى الداخل تزداد سرعة دورانها حول نفسها بينما إذا مدت ذراعيها إلى الخارج فإن دورانها حول نفسها يتباطأ. وأجلأً أو عاجلاً ستبطئ الحركة وتتوقف في النهاية اعتماداً على السرعة التي كانت تدور بها. وبختلاف هذا الأمر عن نوع الحركة المغزليّة التي تناولها أولينبيك وغودسميث. وتبعاً لأبحاثهما وللدراستيّة التي تبع ذلك، فإن كل الإلكترون في الكون يتحرك حركة مغزليّة دائمًا وأبداً بمعدل واحد ثابت لا يتغير أبداً. وحركة الإلكترون المغزليّة ليست حالة حركة عابرة مثل كثير من الأشياء المألوفة والتي قد تدور في حركة مغزليّة بسبب أو آخر. وبدلًا من ذلك فإن دوران الإلكترون حول نفسه هو خاصية ذاتية تشبه كثيراً كتلته أو شحنته الكهربائية. فإذا لم يقم الإلكترون بالدوران في حركة مغزليّة، فإنه لن يصبح إلكتروناً.

وبالرغم من أن الأبحاث المبكرة قد تركزت على الإلكترون، إلا أن الفيزيائيين قد بيّنوا في ما بعد أن هذه الأفكار عن الحركة المغزليّة تنطبق بنفس الشكل على كل جسيمات المادة الموجودة ضمن العائلات الثلاث في الجدول رقم (1-1). وهذا الأمر صحيح حتى أدق التفاصيل: فكل جسيمات المادة (ورفاقها من جسيمات المادة المضادة كذلك) لها حركة مغزليّة متساوية لحركة الإلكترون المغزليّة. ففي لغة التخصص، يقول الفيزيائيون إن جسيمات المادة كلها لها سبين Spin - حركة مغزليّة "سبين $- \frac{1}{2}$ "، حيث قيمة $\frac{1}{2}$ تشير بصفة عامة

لأحد مقاييس ميكانيكا الكم عن مدى سرعة دوران الإلكترون حول نفسه⁽²⁾. وفوق ذلك، بين الفيزيائيون أن ناقلات القوى اللاجاذبية - الفوتونات والبوزونات الضعيفة القياسية والغليونات - لها أيضاً خاصية مغزلية ذاتية، اتضحت أنها "ضعف" تلك التي لجسيمات المادة. وكلها تملك "سبين - 1".

وماذا عن الجاذبية؟ تمكّن الفيزيائيون، حتى من قبل ظهور نظرية الأوتار، من تعريف قيمة "سبين" التي يجب على الغرافيتون المفترض أن يمتلكها لكي يكون ناقلاً لقوى الجاذبية. والإجابة هي: ضعف قيمة الحركة المغزلية "سبين" للفوتونات والبوزونات القياسية الضعيفة والغليونات - أي "سبين - 2".

وفي مضمون نظرية الأوتار تكون الحركة المغزلية "سبين" - مثل الكتلة وشحذنات القوى - تصاحب نسق الاهتزاز الذي يحدّثه الوتر. وكما في حالة الجسيمات النقاط فإن الأمر هنا خادع بعض الشيء لأن نظن أن الحركة المغزلية للوتر ناتجة من دورانه حول نفسه في المكان في حركة مغزلية، لكن هذه الصورة تعطّي انطباعاً غير دقيق في الذهن. وبهذه المناسبة، يمكن الآن أن نوضح أمراً هاماً كنا قد قابلناه من قبل. في العام 1974 عندما أعلنت تشيرك وشوارتز أنه يجب اعتبار نظرية الأوتار نظرية كم متضمنة لقوى الجاذبية، فقد أعلنا ذلك لأنهما وجداً أن للأوتار "بالضرورة" نسقاً اهتزازياً في رصيدها، وهو لا كتلة له وله قيمة سبين - 2، وهي السمات المميزة للغرافيتون. وحيث يوجد الغرافيتون توجّد الجاذبية.

وبهذه الخلفية عن مفهوم الحركة المغزلية "سبين" من الممكن الآن أن نتحول إلى الدور الذي تلعبه في الكشف عن الثغرات الموجودة في نتائج كولمان - مانديولا المتعلقة بالتناظرات المحتملة في الطبيعة والتي سبق ذكرها في الجزء السابق.

ثالثاً: التناظر الفائق والشركاء الفائقون

وكما أكدنا من قبل، فإن مفهوم الحركة المغزلية، على الرغم من أنه يشبه ظاهرياً صورة الحركة المغزلية العادية، إلا أنه يختلف في الأساس المتأصل في ميكانيكا الكم. وقد أوضح اكتشافها في العام 1925 أن هناك نوعاً آخر من الحركة الدورانية التي ببساطة لا توجد في العالم الكلاسيكي البحث.

يوزع ذلك بالسؤال الآتي: هل من الممكن أن تؤدي الحركة الدورانية الرقيقة

(2) بصورة أكثر دقة، سبين 2/1 يعني أن الزخم الزاوي Angular Momentum للإلكترون نتيجة حركته المغزلية Spin هو $\frac{\hbar}{2}$.

المصاحبة للحركة المغزليّة إلى تناظر محتمل آخر لقوانين الطبيعة؟ تماماً كما تسمح الحركة الدورانية العاديّة بمبدأ التناظر لعدم التغيير الدوراني ("تعامل الفيزياء مع كل الاتجاهات المكانية على قدم المساواة"). وحوالي 1971 أوضح الفيزيائيون أن الإجابة عن هذا السؤال هي نعم. وعلى الرغم من أن الرواية الكاملة متشعبة تماماً، إلا أن الفكرة الأساسية هي أنه عندما نأخذ الحركة المغزليّة في الاعتبار فإن هناك بالضبط تناهراً واحداً آخر لقوانين الطبيعة، وهو الممكّن رياضياً. ويسمى التناهراً الفائق (Supersymmetry) ⁽³⁾.

ولا يمكن أن يصاحب التناهراً الفائق تغيير حديسي بسيط في نقاط التفضيل المشاهدة مثل التحولات في الزمن، وفي الواقع الفضائية ، وفي التوجه الراوي، وفي السرعة الموجّهة للحركة، وهي كلها تستهلك هذه الاحتمالات. لكن تماماً مثلما أن الحركة المغزليّة "تشبه الحركة الدورانية، لكن مع تحريف كمي" فإن التناهراً الفائق يمكن أن يصاحب التغيير في نقطة تفضيل في المشاهدة في "امتداد كمي في المكان والزمان". والعبارات بين علامات التنصيص لها أهمية خاصة، لأن الجملة الأخيرة قد قُصد بها فقط أن تعطي شعوراً عاماً بموقع التناهراً الفائق في الإطار الأكبر العام لمبادئ التناهراً ⁽⁴⁾. إلا أنه على الرغم من إدراكنا أن التناهراً الفائق أمرٌ صحيح، فإننا سنركز على واحد من "تضميناته الأولى" - آخذين في اعتبارنا أن الطبيعة تتضمن مبادئه - وهو أمر أسهل كثيراً في فهمه.

في بداية السبعينيات من القرن العشرين أيدن الفيزيائيون أن الكون متناهراً فائق، ولا بد للجسيمات في الطبيعة أن تتوارد في أزواج تختلف في قيمة الحركة المغزليّة "سبعين" بمقدار نصف وحدة. وتسمى مثل هذه الأزواج من الجسيمات "بالشركاء الفائقيين" بصرف النظر عما إذا كانت جسيمة نقطة (كما في النموذج القياسي) أو حلقات دقيقة متذبذبة. وحيث أن لجسيمات المادة حركة مغزليّة

(3) كان لاكتشاف وتطوير التناهراً الفائق تاريخ معقد. فبجانب ما ورد في متن الكتاب ساهم كثيرون مساهمات أساسية في ذلك، من بينهم : R. Haag, M. Sohnius, J. T. Lopuszanski, Y. A. Gol'fand, E. P. Lichtman, J. L. Gervais, B. Sakita, V. P. Akulov, D. V. Volkov, and V. A. Soroka.

وقد تم توثيق بعض أبحاثهم في : Rosanne Di Stefano, *Notes on the Conceptual Development of Supersymmetry* (New York: Institute of Theoretical Physics, State University of New York Stony Brook, [n.d.]), Preprint ITP-SB-8878.

(4) وللقارئ ذي الميلول الرياضيّة نشير هنا أن هذا الامتداد يتضمن زيادة الإحداثيات الديكارتية المألوفة للزمكان بإحداثيات كمية جديدة مثل u ، u غير قابلة للاستبدال (Anticommuting) $uxv = -vxu$ وعندئذ يمكن تصور التناهراً الفائق كترجمة إلى هذه الصورة الكمية المضافة للزمكان.

مقدارها $\frac{1}{2}$ ^١، بينما للجسيمات المراسلة حركة مغزلية مقدارها 1، فإن التناظر الفائق يبدو أنه نتيجة تزلاج - مشاركة - بين جسيمات المادة وجسيمات القوة. وهكذا يبدو الأمر وكأنه مفهوم توحد رائع. غير أن المشكلة تأتي في التفاصيل.

في منتصف السبعينيات من القرن العشرين، عندما أراد الفيزيائيون أن يضمنوا التناظر الفائق في النموذج القياسي، فإنهم لم يجدوا أية جسيمة معروفة - الموجودة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) - يمكن أن تكون شريكاً فائقاً بعضها مع البعض. وبدلاً من ذلك، فإن التحليل النظري التفصيلي قد بين أنه إذا تضمن الكون تناظراً فائقاً، فإن كل جسيمة معروفة لا بد من أن يكون لها جسيمة شريكة فائقة ولو لم تكن قد اكتشفت بعد، بحيث تكون قيمة الحركة المغزلية لها أقل من شريكتها بمقدار نصف وحدة. فمثلاً لا بد من أن يكون هناك شريك للايلكترون قيمة سبين له صفر؛ وقد أطلق على هذه الجسيمة المفترضة "سيليكترون" (Selectron) (مشتقة من تناظر فائق Supersymmetry وإلكترون Electron). وينطبق نفس الشيء على جسيمات المادة الأخرى، فمثلاً يسمى الشريك الفائق ذو السبين التخيلي المساوي للصفر للنيوترينيو والكوراكات، "سينيوترينيو" ، و"سيكوراكات". وبالمثل، فإن الشريك الفائق لجسيمات القوى يجب أن يكون له قيمة حركة مغزلية "سبين" $-\frac{1}{2}$ ^١. ويسمى شريك الفوتونات "فوتينوس" وللغليليونات "غللينوس" ولبوزوونات W وZ وينوس "Winos" و"زينوس" Zinos .

وبالفحص الأدق، يبدو أن التناظر الفائق سمة غير اقتصادية بشكل مزعج؛ فهي تتطلب إضافة قائمة كاملة ليتهي الأمر بازدواج قائمة المكونات الأساسية. وحيث أنه لم يُكتشف أي شريك فائق حتى الآن أبداً، فإنه من المنطقي أن نستعير مقوله رابي الواردة في الفصل الأول في ما يتعلق باكتشاف الميون ونأخذها خطوة أبعد لنقول "لم يطلب أحد التناظر الفائق" ، وباختصار نلفظ هذا المبدأ في التناظر. إلا أنه ولأسباب ثلاثة، فإن كثيراً من الفيزيائيين يعتقدون جازمين أن مثل هذا الرفض المطلقاً للتناظر الفائق قد يكون أمراً سابقاً لأوانه تماماً وستناقش هذه الأسباب في ما يلي.

رابعاً: حالة التناظر الفائق: ما قبل نظرية الأوتار

أولاًً من وجهة النظر الجمالية، فإن الفيزيائيين يجدون من الصعوبة أن يعتقدوا بأن الطبيعة قد تحترم معظم، وليس كل، التناظرات الممكنة رياضياً وطبعاً، من المحتمل أن يكون الاستخدام غير الكامل للتناظر هو ما يحدث فعلاً،

غير أن ذلك سيكون أمراً مشيناً وسيبدو الأمر وكأن باخ (الموسيقار الأشهر) قد ترك الحركة النهائية الفاصلة بعد أن طور العديد من الأصوات المتداخلة ليغطي نسقاً عقرياً من التناظر الموسيقي.

ثانياً، وحتى في النموذج القياسي، وهي النظرية التي تهمل الجاذبية، فإن الأمور التقنية الشائكة والمتعلقة بالعمليات الكمية تُحل بسهولة إذا أصبحت النظرية فائقة التناظر. والمشكلة الأساسية تكمن في أن أنواع الجسيمات المميزة تساهم بتصيبها في الجنون الكمي للعالم المجهري وقد اكتشف الفيزيائيون في خضم هذا الجنون عمليات معينة تتضمن تداخلاً للجسيمات يظل ثابتاً "فقط" إذا تم ضبط المؤشرات العددية في النموذج القياسي - لأقرب جزء في المليار من جزء في المليار - وذلك لتعادل معظم التأثيرات الكمية الضارة. ومثل هذه الدقة تناظر التحكم في ضبط زوايا إطلاق رصاصة من بندقية فائقة القوة لتصيب هدفاً معيناً على القمر بهامش خطأ لا يزيد عن سُمك الأمبيا. وعلى الرغم من أن الضبط العددي لمثل هذه الدقة يمكن أن يتم في النموذج القياسي، إلا أن الكثير من الفيزيائيين يتشككون كثيراً في وجود نظرية لها هذه البنية فائقة الحساسية بحيث تنهار إذا تغير أحد الأرقام التي تقوم عليها النظرية في حدود الخانة الخامسة عشرة بعد الفاصلة العشرية⁽⁵⁾.

ويغير التناظر الفائق هذا الأمر بشكل جذري لأن البوزنات - جسيمات لها حركة مغزالية عدد صحيح (وقد سميت كذلك نسبة إلى الفيزيائي الهندي ساتيندرا بوز) - والفييرميونات - الجسيمات التي لها حركة مغزالية نصف عدد صحيح (فردي)، (وقد سميت كذلك نسبة إلى عالم الفيزياء الإيطالي إنريكو فيرمي) - تمثل إلى المساهمة بشكل كمي معادل. ومثل طرف في أرجوحة، وعندما يكون الهياج الكمي للبوزنات موجباً، فإنه يكون للفيرميونات سالباً أو العكس. وحيث

(5) وبالنسبة للقارئ المهتم بتفاصيل أكثر عن هذا الموضوع التقاني، فإننا نشير إلى الآتي: في الهاشم رقم (6) في الفصل السادس أشرنا إلى أن النموذج القياسي يستشهد بـ "الجسيمة المسؤولة عن الكتلة" - بوزون هيغنس - والتي تمنع الجسيمات في الجدولين رقمي رقمي (1-1) و(1-2) كتلتها التي تلاطفها. وحتى يتم هذا الأمر فإن جسيمة هيغنس نفسها لا يمكن أن تكون أقل من اللازم، وقد أظهرت الدراسات أن كتلتها لا بد أن تكون أقل من كتلة ما يقرب من ألف (1000) بروتون. غير أنه اتضح أن التأرجحات الكمية تمثل للمساهمة بشدة في كتلة جسيمات هيغنس مما يدفع بكتلتها لتصل إلى مقياس بلايك. وقد وجد العلماء النظريون، مع ذلك أن هذه النتيجة التي تكشف عن عيب رئيسي في النموذج القياسي، يمكن تجنبيها إذا تم تدقيق بعض المؤشرات المعنية في النموذج القياسي (وبالأخض تلك المسممة الكتلة المجردة لجسيمات هيغنس) حتى في 10¹⁵ جزء ليتلاشى تأثير التأرجحات الكمية على كتلة جسيمات هيغنس.

أن التناظر الفائق يؤكد أن البوزنات والفيرميونات تجيء في ازدجاج فإن التلاشي (التعادل) الأساسي يحدث منذ البداية - وهو التلاشي الذي يسبب الهدوء الملحوظ لبعض التأثيرات الكمية المجنونة. ويوضح أن ثبات التناظر الفائق للنموذج القياسي - النموذج القياسي المدعوم بكل الجسيمات المشاركة الفائقة - لا يعتمد بعد ذلك على الضبط العددي الهش غير المرجح للنموذج القياسي العادي. ومع أن ذلك موضوع عالي التقنية فإن العديد من فيزيائيي الجسيمات يجدون أن هذه النتيجة تجعل التناظر الفائق أمراً جذاباً.

والأمر الثالث من الأدلة الظرفية على التناظر الفائق تأتي من مفهوم التوحد العظيم. وأحد السمات المحيرة لقوى الطبيعة الأربع هي المدى الهائل لشدةتها الذاتية. فشدة القوى الكهرومغناطيسية تقل بمقدار 1% عن شدة القوى القوية، والقوى الضعيفة أقل من ذلك بعده آلاف المرات، وقوى الجاذبية هي الأقل بمقدار بعض مئات الأجزاء من المليون من جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار ($^{35}10$ مرة). وباتباع أبحاث غلاشو وعبد السلام ووينبرغ التي فتحت الطريق ووضعت أساس العلاقة الوطيدة بين الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة (المشروحة في الفصل الخامس) وأكسبتهم جائزة نوبيل، اقترح غلاشو عام 1984 بمشاركة زميله من جامعة هارفارد هوارد جيورجي وجود علاقة ارتباط مشابهة مع القوى القوية. وأعمالهم التي افترضت "التوحد العظيم" لثلاث من القوى الأربع، تختلف في أمر واحد أساسي من النظرية الكهربية الضعيفة: بينما تبلورت وانفصلت القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة من اتحاد أكثر تناهراً عندما انخفضت درجة حرارة الكون إلى حوالي مليون مليار درجة مطلقة فوق الصفر ($^{15}10$ كلفن)، بين جيورجي وغلاشو أن الاتحاد مع القوى القوية يظهر فقط عند درجة حرارة أعلى ببعض عشرات التريليونات من المرات - أي حوالي عشرة مليار مليار درجة فوق الصفر المطلق ($^{28}10$ كلفن). وبحسابات الطاقة فإن ذلك مساواً لحوالي مليون مليون مرة كتلة البروتون أو حوالي عشرة آلاف مرة أقل من كتلة بلانك. أخذ جيورجي وغلاشو الفiziاء النظرية بجرأة إلى دنيا من الطاقة تفوق ما تجراً على اختباره أي إنسان من قبل بمقدار هائل جداً.

وقد جعلت أبحاث جيورجي وهيلين كوين ووينبرغ التالية، في جامعة هارفارد عام 1974، من الوحدة الممكنة للقوى غير الجاذبية في إطار التوحد الأعظم أمراً أكثر وضوحاً وحيث أن مساهمتهم قد استمرت تلعب دوراً هاماً في توحيد القوى وفي تقويم مواءمة التناظر الفائق للعالم الطبيعي، فإن الأمر يستدعي أن نتوقف برها لشرحه.

كلنا نعلم أن التجاذب الكهربائي بين جسيميتين مضادتين في الشحنة أو شد قوى الجاذبية بين جسمين لهما كتلة يزداد شدة كلما قلت المسافة بينهما. وهذه من السمات البسيطة والمعروفة تماماً في الفيزياء الكلاسيكية. ومع ذلك، فإن هناك مفاجأة عندما ننطرب لدراسة فيزياء الكم على شدة هذه القوى. لماذا لا بد أن يكون لميكانيكا الكم أي تأثير على الإطلاق؟ وتمكن الإجابة مرة أخرى في التأرجحات الكمية. فعندما نختبر مجال القوى الكهربائية لأحد الإلكترونات مثلاً، فإننا في الواقع نختبر "الضباب الرقيق" الناتج من نشوء وتلاشي الجسيمة - الجسيمة المضادة، وبذا يتناقص تأثير هذا الضباب. ويعني ذلك أن شدة المجال الكهربائي للإلكترون ستزداد كلما اقتربنا منه.

ويميز الفيزيائيون بين هذه الزيادة الكمية في الشدة كلما اقتربنا من الإلكترون وبين ما هو معروف في الفيزياء الكلاسيكية بقولهم أن الشدة "الذاتية" للقوى الكهرومغناطيسية تزداد كلما قصرت المسافة. ويعكس ذلك ما مفاده أن الشدة تزداد لا مجرد اقتربنا من الإلكترون، بل لأن المجال الكهربائي الذاتي للإلكترون يصبح أكثر فعالية. وفي الواقع، مع أننا قد ركزنا حديثنا عن الإلكترون إلا أن هذه المناقشات تنطبق بنفس المقدار على الجسيمات الأخرى المشحونة كهربائياً، وهو ما يمكن إيجازه بقولنا إن المؤثرات الكمية تدفع شدة القوى الكهرومغناطيسية نحو الزيادة عند اختبارها على مسافات أقصر.

وماذا عن القوى الأخرى في النموذج القياسي؟ وكيف تتغير شدتها الذاتية مع المسافة؟ في العام 1973 قام كل من غروس وفرانك ويلتسيك من جامعة برينستون، ودافيد بوليتس من جامعة هارفارد، كل على حدة، بدراسة هذه التساؤلات، وتوصلوا إلى نتيجة مذهلة: تضخم السحابة الكمية لنشوء وتلاشي الجسيمة من شدة القوى القوية والقوى الضعيفة. ويعني ذلك أنه لو اختبرنا هذه القوى على مسافات أقصر فإننا نخترق أكثر وأكثر هذه السحابة المضطربة وبالتالي ستعرض للتنفس في التضخم الناتج من تأثيرها. وبذا فإن شدة هذه القوى تصبح أقل فأقل عند اختبارها على مسافات أقصر.

تلقى جيورجي وكوين ووينبرغ هذه النتيجة وتوصلوا إلى نهاية جديرة بالانتباه. وقد بينوا أنه عند احتساب تأثيرات الجنون الكمي هذه بعناية، فإن المحصلة هي أن شدة كل القوى الثلاث الجاذبية تتجمع معاً وبينما تختلف شدة هذه القوى بشكل كبير بالمقاييس التقنية المتاحة حالياً، فإن جيورجي وكوين ووينبرغ يدفعون بأن هذا الاختلاف هو في الواقع نتيجة للتأثير المختلف الذي يحدثه غيم النشاط الكمي المجهري في كل من هذه القوى. وقد أظهرت

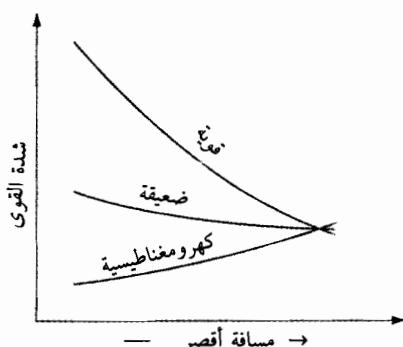
حساباتهم أنه لو اخترقنا هذا الغيم بأن نختبر تلك القوى على مسافات ليست من المقاييس العادية ولكنها تصل إلى حوالي جزء من المائة من جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار من المستيمتر (29-10) (وهو مجرد عشرة آلاف مرة أكبر من طول بلانك)، فإن شدة تلك القوى غير الجاذبية الثلاث تبدو متساوية.

وبعيداً عن عالمنا المألف، كانت هذه الطاقة الهائلة واللازمة للإحساس بمثل هذه المسافات الصغيرة مميزة للكون المبكر المضطرب والساخن عندما مر عليه جزء من الألف من جزء من التريليون من جزء من التريليون من جزء من التريليون (39-10) من الثانية - عندما كانت درجة الحرارة في حدود 10²⁸ كلفن كما أشرنا من قبل. وينفس الطريقة إلى حد ما، التي تنصهر بها المكونات المختلفة - مثل قطع من فلز، أو خشب أو صخر أو معدن الخ - معًا لتصبح بلازما متGANة ومنتظمة عند تسخينها إلى درجة حرارة عالية بما فيه الكفاية، فإن هذه الأبحاث النظرية تفترض أن القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية تمتزج جميعها في قوة عظمى واحدة عند مثل درجات الحرارة الهائلة تلك. وهذا مبين في الشكل التخطيطي رقم (1-7)⁽⁶⁾.

ومع أنها لا نملك التقانة التي تمكنا من اختيار مثل هذه المسافات الضئيلة، أو لنصل إلى مثل هذه الدرجات من الحرارة الهائلة، إلا أنه منذ عام 1974 قام التجاربيون بتنقيح الشدة المقيدة للقوى الثلاث اللاجاذبية في الظروف العادبة بصورة ملحوظة. وهذه البيانات - نقطة البداية لمنحنيات شدة القوى الثلاث في الشكل رقم (7) هي البيانات المدخلات للاستقراءات الكمية لكل من جبورجي وكوين ووينبرغ. وفي عام 1991 قام كل من أوجو أمالدي من CERN، وويم دي بوير وهيرمان فورستناؤ من جامعة كارلسرو بألمانيا بإعادة حساب استقراءات جبورجي وكوين ووينبرغ مستفيدين من تلك التنتيكات التجريبية وبينوا أمررين هامين. الأمر الأول، هو أنه تتطابق على الأغلب شدة هذه القوى اللاجاذبية

(6) تجدر ملاحظة نقطة دقيقة في ما يخص الشكل رقم (1-7)، وهي أن شدة القوى الضعيفة تقع بين شدة القوى القوية والقوى الكهرومغناطيسية، بينما قد ذكرنا في السابق أن هذه القوى الضعيفة تقع أدنى من القوتين المذكورتين. ويمكن السبب في ذلك، كما هو مبين في الجدول رقم (1-2)، في أن الجسيمات المرسال للقوى الضعيفة كثيفة الكتلة بينما تلك الخاصة بالقوى القوية والكهرومغناطيسية لا كتلة لها. وقد وردت شدة القوى الضعيفة في الشكل رقم (1-7) في الواقع، (كما تم قياسها بواسطة ثابت الإزدوج - وهي فكرة ستعرض لها في الفصل 12)، غير أن جسيماتها المرسال كثيفة الكتلة عبارة عن ناقلات بطيئة كسل تؤدي إلى تنافص تأثيرها. وسنرى في الفصل 14 كيف تتواءم قوة الجاذبية داخل الشكل رقم (1-7).

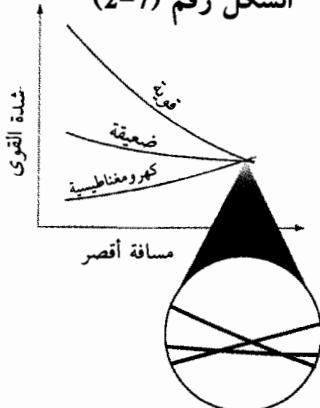
الشكل رقم (1-7)



شدة القوى اللاحاذية الثلاث أثناء عملها على مسافات أكثر قصراً - وهو ما يكفي سلوكها في عمليات عالية الطاقة.

الثلاث لكن ليس تماماً عند المسافات متناهية الصغر (و كذلك الطاقة ودرجة الحرارة العاليتين) كما هو مبين في الشكل رقم (2-2).
الأمر الثاني، هو أنه يختفي هذا التعارض الضئيل الذي لا يمكن إنكاره في شدة هذه القوى إذا أدخلنا التناظر الفائق. والسبب في ذلك أن الجسيمات الشريكات الفائقين التي يتطلبها التناظر الفائق، تساهم بتأرجحات كمية إضافية. وهذه التأرجحات كافية بالكاد لدفع شدة هذه القوى لتتجتمع معاً.

الشكل رقم (2-7)



تنبيح حسابات شدة القوى تبين أنها تلتقي على الأغلب بدون التناظر الفائق، ولكن ليس تماماً.

من الصعب جداً على كثير من الفيزيائيين أن يصدقوا أن الطبيعة قد تختار القوى بحيث يكون لها شدة تتحد على الأغلب ولكن ليس تماماً على المستوى المجهري - أي تصبح متساوية مجهرياً ويشبه الأمر وضع القطع في أحجية الصور المقطعة، عندما تكون القطعة الأخيرة غير متوافقة قليلاً ولا تدخل في المكان المخصص لها بالضبط. ويقوم التناظر الفائق بتنقية نفسه بطريقة رائعة لتصبح كل القطع مناسبة لمكانها.

ومن ملامح الأمر الأخير أنه يزودنا بإجابة ممكنة عن السؤال، لماذا لم تكتشف بعد أي جسم مشاركة فائقة؟ أما الحسابات التي أدت إلى تجمع شدة القوى وأدت إلى اعتبارات أخرى درسها عدد من الفيزيائيين فإنها تشير إلى أن الجسيمات المشاركة الفائقة لا بد وأن تكون أثقل كثيراً من الجسيمات المعروفة. وعلى الرغم من أنه لا يمكن التوصل إلى تنبؤات محددة إلا أن الدراسات قد بيّنت أن الجسيمات المشاركة الفائقة قد تكون ذات كتلة أكبر آلاف المرات من كتلة البروتون إن لم تكن أثقل. وبما أن أحدث المعجلات لا تتمكن من التوصل لمثل هذه الطاقة الهائلة، فإن ذلك يعطي تفسيراً لعدم اكتشاف مثل هذه الجسيمات حتى الآن. وسنعود في الفصل التاسع إلى مناقشة التوقعات التجريبية لتحديد ما إذا كان التناظر الفائق هو خاصية من خواص عالمنا بالفعل، وذلك في المستقبل القريب.

طبعاً، لم تكن الأسباب التي قدمناها لنعتقد في صحة - أو حتى لا نرفض - التناظر الفائق، محكمة. وقد وصفنا كيف يرفع التناظر الفائق نظرياتنا إلى أكثر الأشكال تناهراً - إلا أنه يمكن القول بأن الكون غير مبالٍ بالتوصيل إلى الشكل الأكثر تناهراً الممكن رياضياً. قد ذكرنا أن النقطة التقنية الهامة هي أن التناظر الفائق يعفينا من المهمة الشاقة لضبط المؤشرات العددية في التمودج القياسي لتجنب المعضلات الكمية - لكنك قد تدفع بأن النظرية الحقيقة لوصف الطبيعة قد تكون على حافة الصراط بين تأكيد الذات وتحطيم الذات. وقد ناقشنا كيف يعدل التناظر الفائق من الشدة الذاتية للقوى اللاجاذبية الثلاث عند المسافات الضئيلة بالطريقة التي تفي بالكاف لدمجها معًا في قوة عظمى موحدة - لكنك قد تتفق مرة أخرى أنه لا يوجد شيء في تصميم الطبيعة يفرض أن توافق تماماً شدة القوى هذه عند المقايس المجهريّة وفي النهاية يمكن أن تفترح أن التفسير الأبسط لعدم التوصل إلى اكتشاف الجسيمات المشاركة الفائقة هو أن كوننا ليس فائق التناظر، ولذلك، لا تتوارد الجسيمات المشاركة الفائقة.

ولا يستطيع أحد أن يفتقد هذه الاستجابات. لكن الأمر في حالة التناظر الفائق قد دُعمَ بشكل هائل عندما أخذنا في الاعتبار دوره في نظرية الأوتار.

خامساً: التناظر الفائق في نظرية الأوتار

تضمنت نظرية الأوتار الأصلية، والتي نتجت من أبحاث فينيزيانو في أواخر السنتينيات من القرن العشرين، كل التناظرات التي نوقشت في هذا الفصل، غير أنها لم تتضمن التناظر الفائق (الذى لم يكن قد تم اكتشافه بعد). كان يطلق على النظرية الأولى التي قامت على مفهوم الأوتار، اسم أكثر دقة هو نظرية الأوتار البوزونية (Bosonic String Theory). وتدل كلمة بوزونية على أن كل الأساق الاهتزازية للوتر البوزوني لها حركة مغزلية ذات رقم صحيح - ولا توجد أساق فيرميونية (Fermionic Patterns)، أي لا توجد أساق ذات حركة مغزلية يختلف رقمها بمقدار $\frac{1}{2}$ عن عدد صحيح. ويؤدي هذا إلى مشكلتين.

الأولى، إذا كان لنظرية الأوتار أن تصف كل القوى وكل المادة، فإنها لا بد وبشكل ما من أن تتضمن أساقاً اهتزازية فيرميونية، حيث أن كل جسيمات المادة المعروفة لها حركة مغزلية قيمتها $\frac{1}{2}$ الثانية، والأكثر مدعاة للحيرة، هو التتحقق من وجود نسق واحد للاهتزاز في نظرية الأوتار البوزونية له كتلة سالبة (وبدقة أكثر مربع الكتلة سالب) - ويسمى تاكيون (Tachyon). وقبل ظهور نظرية الأوتار، درس الفيزيائيون احتمال أن يحتوي عالمنا على جسيمات تاكيون بالإضافة إلى الجسيمات المألوفة التي لها جميعاً كتلة موجبة، غير أن مجاهوداتهم قد أظهرت أنه من الصعب إن لم يكن مستحيلاً لنظرية مثل تلك أن تكون منطقية. وبالمثل، ففي إطار نظرية الأوتار البوزونية قام الفيزيائيون بتجربة كل أنواع الحركات العجيبة ليجعلوا من التنبؤ اللامعقول حول أساق اهتزاز التاكيون أمراً معقولاً، لكنهم لم يتوصلا لأية نتيجة. وقد أكدت هذه السمات بشكل متزايد أنه على الرغم من أن النظرية كانت جذابة إلا أن الأوتار البوزونية كانت تفتقد شيئاً أساسياً.

في العام 1971، قبل ببئر راموند، من جامعة فلوريدا، التحدى لتنقيح نظرية الأوتار البوزونية حتى تحتوي أساق الاهتزاز الفيرميونية. ومن خلال أبحاثه والنتائج التي تلت ذلك لشوارتز وأندرية نوفو بدأت في الظهور صورة جديدة لنظرية الأوتار. ولدهشة الكثيرين، فإن أساق الاهتزاز البوزونية والفيرميونية في هذه النظرية الجديدة يبدو أنها تجيء في أزواج. فلكل نسق بوزوني هناك نسق فيرميوني والعكس صحيح. وبحلول عام 1977، وضعت بصيرة العلماء فيرديناندو غليوتسي من جامعة تورينو وشيرك ودافيد أوليف من المعهد الإمبراطوري هذا التوافق على الطريق الصحيح. تضمنت النظرية الجديدة للأوتار

التناظر الفائق والازدواج الملحوظ بين الأنساق الاهتزازية البوزونية والفيرميونية الذي عكس هذه الخاصية عالية التناظر. وهكذا ولدت نظرية الأوتار فائقة التناظر - أي نظرية الأوتار الفائقة. والأكثر من ذلك، فإن أبحاث غليوتسى وشيرك وأوليف قد جاءت بنتيجة أخرى محورية: فقد بینوا أن اهتزازات التاكيون المزعجة للأوتار البوزونية لا تضر بالأوتار الفائقة. وشيئاً فشيئاً بدأت تتجمع قطع أحجية الأوتار كل في مكانه.

غير أن التأثير الأولي الأكبر لأبحاث راموند وكذلك نوفو وشوارتز لم يكن في الواقع في مجال نظرية الأوتار. وبحلول عام 1983 تيقن الفيزيائيان جوليوس ويس وبرونو زومينو أن التناظر الفائق - التناظر الجديد الناتج من إعادة صياغة نظرية الأوتار - يمكن تطبيقه حتى على النظريات القائمة على الجسيمات النقاط. وسرعان ما قاما بخطوات هامة تجاه تضمين مفهوم التناظر الفائق في إطار نظرية المجال الكمي للجسيمات النقاط. ومنذ ذلك الوقت، أصبحت نظرية المجال الكمي الموضوع السائد في التيار الرئيسي لمجتمع علماء فيزياء الجسيمات - مع تزايد وجود نظرية الأوتار كموضوع علمي جانبي - وقد أثارت وجهات نظر ويس وزومينو كمّا هائلًا من الأبحاث التي تلت ذلك حول ما أصبح يسمى "نظرية المجال الكمي فائق التناظر" (Supersymmetric Quantum Field Theory).

وأصبح النموذج القياسي فائق التناظر الذي نقاشناه في المقطع السابق واحداً من الإنجازات النظرية المرموقة في هذا السياق. ونحن نرى الآن، من خلال منعطفات التاريخ، أن نظرية الجسيمات النقاط تلك تدين بالكثير لنظرية الأوتار.

ومع إعادة بعث نظرية الأوتار الفائقة في منتصف ثمانينيات القرن العشرين، عاد للظهور التناظر الفائق في الهيئة التي ظهر بها في الأصل. وفي هذا الإطار، فإن التناظر الفائق يتحلى بمراحل ما كنا قد عرضناه في الجزء السابق. والوسيلة الوحيدة المعروفة لدمج النسبية العامة وميكانيكا الكم هي نظرية الأوتار. غير أن الصورة فائقة التناظر لنظرية الأوتار هي الوحيدة التي تتجنب مشكلة التاكيون غير المريحة، وهي التي لها أنساق اهتزاز فيرميونية مسؤولة عن جسيمات المادة التي تكون العالم من حولنا. ولذلك فإن التناظر الفائق يتتفق تماماً مع فرض نظرية الأوتار النظرية كمية للجاذبية، كما يتفق بنفس الدرجة مع زعمها العظيم من أنها توحد كل القوى وكل المادة. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن الفيزيائيين يتوقعون أن التناظر الفائق صحيح أيضاً.

وعلى كل، وحتى منتصف تسعينيات القرن العشرين، كان هناك أمر واحد مزعج لنظرية الأوتار فائقة التناظر بشكل خاص.

سادساً: إرجاع فائق ناجم عن الوفرة

إذا أخبرك أحدهم أنه قد توصل إلى حل لغز مصير أميليا إيرهارت^(*) فإنك قد تتشوك في أول الأمر، لكن إذا وجدت لديه أدلة موثقة مع تفسيرات مقنعة، فإنك قد تصغي إليه، ومن يدري فقد تقنع بذلك. لكن كيف سيبدو الأمر لو أنه بعد برهة قصيرة جاءك نفس الشخص بتفسير آخر، فإنك ستتصغي صابراً، ولدهشتك قد تجد أن هذا التفسير البديل موثق هو الآخر ومدعم كما في الحالة الأولى. وبعد الانتهاء من هذا التفسير الثاني، سيقدم لك تفسيراً ثالثاً ثم رابعاً وحتى خامساً، كل منها مختلف عن الآخر لكنها جمیعاً مقنعة بنفس الدرجة. وفي نهاية الأمر وبلا شك، فإنك لن تكون قد اقتربت من حل لغز أميليا إيرهارت أكثر مما كنت عليه في البداية. وفي مجال التفسيرات الأساسية، كلما زاد عددها قل تفسيرها بالتأكيد. وبحلول العام 1985، وعلى الرغم من الإثارة المستحقة التي أحدثتها نظرية الأوتار، إلا أنها بدت وكأنها الخبير المتهمس في حل موضوع إيرهارت. والسبب في ذلك أن الفيزيائيين قد أيقنوا، بحلول عام 1985، أن التناظر الفائق، وهو في هذا الوقت العامل المركزي في بنية نظرية الأوتار، يمكن تضمينه في نظرية الأوتار بخمس طرق مختلفة وليس بطريق واحدة. ويتبع من كل طريقة ازدواج للأنساق الاهتزازية البوزونية والفيرميونية، إلا أن تفاصيل هذا الازدواج والصفات العديدة الأخرى للنظريات الناتجة تختلف بشكل جذري. وبالرغم من أن أسماءها ليست ذات أهمية، إلا أنها تستحق الإشارة إليها. وتسمى هذه النظريات الخمس للأوتار الفائقة التناظر: نظرية الطراز الأول، ونظرية الطراز الثاني^(أ)، ونظرية الطراز الثاني^(ب)، ونظرية الطراز المغاير أوه⁽³²⁾، ونظرية الطراز المغاير إي 8 × إي 8.

Type I Theory, Type II A Theory, Type II B Theory, The Heterotic Type O (32) Theory, and The Heterotic Type E8xE8 Theory.

وكل سمات نظرية الأوتار التي ناقشناها حتى الآن صحيحة لكل نظرية من هذه النظريات، لكنها تختلف فقط في التفاصيل الأدق.

وقد أحدث وجود خمس صور لما هو مفترض أن يكون نظرية كل شيء T.O.E. – ومن المحتمل أن تكون النظرية الموحدة النهائية – إرباكاً كبيراً لمنطري

(*) أول سيدة عبرت المحيط في طائرة ميكانيكية في العام 1928، وفي العام 1937 حاولت أن تطير حول العالم بطائرتها، لكنها اختفت بالقرب من جزيرة هاولاند في المحيط الهادئ، ولم يعثر على أي أثر لها أو لطائرتها حتى الآن (المترجم والمراجع).

نظريّة الأوتار. وكما هو الحال في موضوع أميليا إيرهارت، لا بد أن يكون هناك تفسير واحد صحيح فقط (بصرف النظر عن وجود مثل هذا الحل أم لا)، فإننا نتوقع نفس الشيء في ما يتعلق بالإدراك العميق والأساسي للكيفية التي يسير بها العالم؛ فنحن نعيش في عالم واحد، ولذا نتوقع تفسيراً واحداً.

ولحل هذه المعضلة، وبالرغم من وجود خمس نظريّات مختلفة للأوتار الفائقة، فإن أربعاً منها لا بد أن تستبعد تجريبياً ببساطة، لترك إطاراً تفسيريّاً واحداً صحيحاً ومناسباً حتى لو كان هذا هو الحال، فإن السؤال الملحق حول "لماذا وجدت النظريّات الأخرى في أول الأمر؟"، ما زال يقلقنا. وبكلمات ويتمن الساخرة: "إذا كانت هناك واحدة من النظريّات الخمس هي التي تصف عالمنا، فمن يعيش في العوالم الأربع الأخرى؟"⁽⁷⁾. ويحلم الفيزيائيون بأن يؤدي البحث عن الإجابة النهائية إلى استنتاج واحد فريد لا يقبل الطعن على الإطلاق. وبشكل مثالي - فإن النظريّة النهائية - سواء كانت نظرية الأوتار أو أي شيء آخر - لا بد أن تكون هي السبيل لأنّه ببساطة لا يوجد احتمال آخر. فإذا كنا سنكتشف أنّ هناك نظريّة واحدة فقط تبدو منطقية وتتضمن العناصر الأساسية للنسبية وميكانيكا الكم، فإن الكثريين قد يشعرون بأنّهم قد توصلوا إلى الفهم العميق للكيفية التي يتصرف بها العالم وباختصار، سيكون ذلك انتصار النظريّة الموحدة⁽⁸⁾.

وكما سترى في الفصل الثاني عشر فقد أخذت الأبحاث الحديثة نظرية الأوتار الفائقة خطوة عملاقة لتقترب من اليوتوبيا الموحدة، وذلك بأنّ بینت بصورة واضحة أنّ النظريّات الخمس المختلفة هي في الواقع خمس وسائل لوصف نفس النظريّة. ولنظرية الأوتار الفائقة التفرد بالأصلية.

بدا أنّ الأمور تتحذّز وضعها الطبيعي، لكن، وكما ستناقش في الفصل القادم، فإن التوحيد من خلال نظرية الأوتار يتطلب مرة أخرى الابتعاد عن الفكر التقليدي.

(7) Edward Witten, *Lecture at the Heinz Pagels Memorial Lecture Series* (Colorado: (7) Aspen, 1997).

(8) من أجل نقاش أكثر عمقاً لهذه الأفكار وغيرها من نفس النوع، يرجى مراجعة: Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Pantheon Books, 1992).

الفصل الثاني

أبعاد أكثر مما تراه العين

قام آينشتاين بحل تناقضين علميين أساسين من تناقضات المائة سنة الأخيرة من خلال النسبية الخاصة ثم العامة. وعلى الرغم من أن المشكلات الأصلية التي دفعته للقيام بأبحاثه لم تكن ضمن ما توصل إليه، إلا أن كلاً من هذه الحلول غيرت تماماً من مفهومنا عن المكان والزمان. وقد حللت نظرية الأوتار التناقض العلمي الأساسي الثالث من تناقضات القرن الماضي بطريقة تجعل حتى آينشتاين يؤخذ بها. وتتطلب هذه النظرية أن نعرض مفهومنا عن المكان والزمن إلى مزيد من المراجعة الراديكالية. وبهذا فإن نظرية الأوتار تهز بعث أسس الفيزياء الحديثة، لدرجة أن عدد الأبعاد المسلم به عموماً للكون - وهو شيء أساسي لدرجة أنك قد تعتقد أنه غير قابل للمناقشة - قد انقلب عن قناعة بصورة دراماتيكية.

أولاً: وهم المألوف

تغذى الخبرة الحدس. لكنها تقوم بما هو أكثر من ذلك: فالخبرة تصنع الإطار الذي يداخله نحلل ونفسر ما نستقبله. وبلا شك فإنك مثلاً تتوقع من "طفل الغابة" الذي نشأ وسط الذئاب أن يفهم العالم من منظور يختلف كلية عن منظورك أنت. وإذا عقدينا مقارنة أقل حدة، كما في حالة أناس نشأوا في ظل تقاليد ثقافية جد مختلفة، فإنها ستساعدنا في فهم درجة اعتماد تفسيرنا للأمور على خبرتنا. إلا أن هناك أشياء معينة نمارسها "جميعاً". وهي غالباً ما تكون المعتقدات والتوقعات التي تجيء من هذه الخبرات العالمية والتي من الصعب تعريفها، والأكثر صعوبة أن تواجهها. والمثال الآتي يسيط لكنه صارخ. إذا أنهيت قراءة هذا الكتاب ونهضت فإنك ستتحرك في ثلاثة اتجاهات مستقلة - أي من خلال ثلاثة أبعاداً فضائية مستقلة. وبالتأكيد، فإن أي مسار تسلكه - بصرف النظر عن وعورته - سيكون نتاج محصلة الحركة خلال ما نطلق عليه "البعد يمين - يسار" و"البعد أمام - خلف" و"البعد فوق - تحت". وكل خطوة تخطوها تعني أنك أمام ثلاثة اختيارات تحدد كيف تتحرك خلال هذه الأبعاد الثلاثة.

وفي عبارة مماثلة لما صادفناه في مناقشتنا للنسبة الخاصة، فإن كل موقع في الكون يمكن تحديده تماماً بثلاث مجموعات من البيانات: منسوبة إلى هذه الأبعاد الفضائية الثلاثة. وبلغة مألوفة، يمكن أن تحدد عنواناً في مدينة بأن تذكر الشارع (الموقع في البعد "يمين - يسار")، والشارع المتقطع معه أو الجادة (الموقع في البعد "أمام - خلف")، ورقم الطابق (الموقع في البعد "فوق - تحت"). ومن مظور أكثر حداً فقد رأينا أن أبحاث آينشتاين قد شجعنا على أن نفك في الزمن كبعد آخر (البعد "مستقبل - ماض")، مما يؤدي إلى أربعة أبعاد (ثلاثة منها مكانية وبعد واحد زمني). وتحدد الأحداث في الكون بذكر أين ومتى تحدث.

وصفة الكون هذه أساسية ومستقرة ومنتشرة لدرجة أنها تبدو غير قابلة للجدل. إلا أنه في العام 1919 قام رياضي بولندي غير معروف يدعى تيودور كالوزا من جامعة كونننسبرغ بتحدي ما هو واضح مألوف بتهرور، وذلك بأن اقترح أنه من الممكن لا يكون للعالم في الواقع ثلاثة أبعاد مكانية فقط، وربما يكون العدد أكثر من ذلك في الواقع. والاقتراحات التي تبدو سخيفة في بعض الأحيان قد تكون سخيفة في الواقع. وفي بعض الأحيان تهز تلك الأمور الفيزياء من أساسها. ومع أن الأمر قد تطلب بعض الوقت لاستيعابه، فإن مقترحات كالوزا أحدثت ثورة في صياغتنا لقانون الفيزياء. وما زلت نحس بتوابع الزلزال الذي أحدهاته بصيرته النافذة.

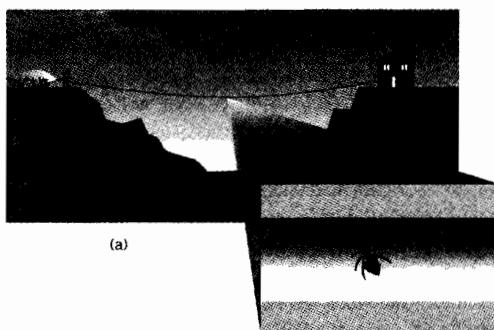
ثانياً: فكرة كالوزا وتنقيح كلاين

قد تبدو الاقتراحات بأن عالمنا يمكن أن يكون له أكثر من ثلاثة أبعاد فضائية أمراً سخيفاً وغريباً أو غامضاً. ومع ذلك، فهو في الواقع اقتراح متماسك ومعقول كلياً. وحتى ندرك ذلك، فمن السهل أن نحوال أنظارنا مؤقتاً عن الكون ككل ونفكر في شيء أكثر ألفة مثل خرطوم مياه طويل ورفيع.

تخيل أن خرطوم مياه طوله بعض مئات من الأقدام يمتد عبر أخدود وأنت تشاهده من على بعد ربع ميل تقريباً كما في الشكل رقم (1-8)، (a). ومن هذه المسافة ستدرك طول الخرطوم الممتد أفقياً غير متعرج، ولكنك لن تتمكن من تمييز سُمْك الخرطوم إلا إذا كنت تملك قوة إبصار فائقة الحدة. ومن هذه المسافة، وإذا كانت هناك نملة تعيش فوق هذا الخرطوم، فهي لا تملك إلا واحداً فقط تسير فيه: البعد "يمين - يسار" على طول الخرطوم. فإذا سألك شخص ما أن تحدد مكان النملة في لحظة معينة فإنك ستحتاج فقط إلى مجموعة واحدة من البيانات: بعد النملة عن الطرف الأيسر (أو الأيمن) للخرطوم. وخلاصة الموضوع أن قطعة طويلة من خرطوم المياه تبدو من مسافة ربع ميل وكأنها ذات بعد واحد فقط.

وفي الحقيقة، فإننا نعلم أن للخرطوم سُمكًا وقد تجد صعوبة في تحديد ذلك من مسافة ربع ميل، ولكن باستخدام منظار مقرب يمكن أن تقرب جزءاً من الخرطوم وتلاحظ مقاسه مباشرة كما هو موضح في الشكل رقم (1-8)، (b). ومن هذا المنظور المكبر سترى أن النملة الصغيرة الموجودة على الخرطوم تملك في الواقع اتجاهين مستقلين يمكنها السير فيهما: على طول بعد "يمين - يسار" الممتد على طول الخرطوم المحدد مسبقاً، وطول بعد "مع ضد عقارب الساعة" حول الجزء الدائري من الخرطوم (محيط الخرطوم الدائري). والآن أنت تعلم أنه لتحديد موقع النملة الصغيرة في آية لحظة، لا بد من مجوعتين من البيانات: أين توجد النملة على طول الخرطوم، وأين توجد النملة على طول المحيط الدائري للخرطوم. ويعكس ذلك حقيقة أن سطح خرطوم المياه له بعدان اثنان⁽¹⁾.

الشكل رقم (1-8)



(a) خرطوم مياه ينظر إليه من مسافة بعيدة فيبدو كأنه جسم ذو بعد واحد (b) عند تكبيره، يظهر بعد ثان - بعد آخر في شكل دائرة تلتف حول الخرطوم - فتصبح مرئية.

(1) هذه فكرة بسيطة، لكن حيث أن عدم دقة اللغة الشائعة قد تؤدي أحياناً إلى ارتباك فإن هناك ملحوظتين تزيلان هذا الارتباك. الأولى هي أنها تفترض أن النملة مجبرة على أن تعيش على "سطح" خرطوم المياه، فإذا كان في مقدورها أن تندى إلى داخل الخرطوم - أي إذا تمكنت من اختراق المادة المطاطية للخرطوم - فستحتاج إلى ثلاثة أعداد لتحديد موقعها، لأننا ستحتاج إلى تحديد عمق اختراقها للخرطوم. أما إذا كانت النملة تعيش فقط على سطح الخرطوم، فإن موقعها يتحدد فقط ببعدين. ويؤدي بنا ذلك إلى الملحوظة الثانية. فحتى لو كانت النملة تعيش فقط على سطح الخرطوم فإنه يمكننا، إذا أردنا ذلك، أن نحدد موقعها بثلاثة أعداد: العددين العاديين يمين-يسار، وخلف- أمام، وفوق- تحت بما هو مألف لنا من أبعاد الفضاء. لكن بمجرد معرفتنا بأن النملة تعيش فقط على سطح الخرطوم فإن العددين المشار إليهما في المتن يعطيان الحد الأدنى من البيانات التي تحدد الموقع المفرد للنملة. وهذا ما نعنيه عندما نقول إن سطح الخرطوم ذو بعدين.

ومع ذلك فهناك فرق واضح بين هذين البعدين، فاتجاه طول الخرطوم يكون طويلاً وممتدًا ومن السهل رؤيته. أما الاتجاه حول سُمك الخرطوم فيكون قصيراً ومتبعداً ومن الصعب رؤيته. ولكي ندرك البعد الدائري، لا بد من اختبار الخرطوم بدقة أكبر بشكل ملحوظ.

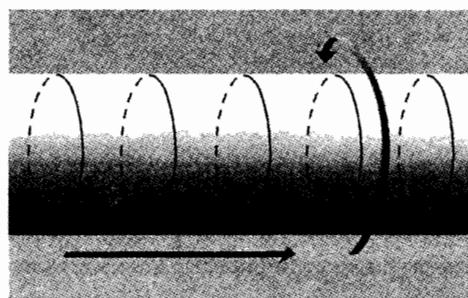
ويحدد هذا المثال سمة هامة ودقيقة للأبعاد الفضائية: فهي تظهر في نوعين. فهي يمكن أن تكون كبيرة وممتدة، وبذلك يمكن مشاهدتها مباشرة أو يمكن أن تكون صغيرة متجمدة وأصعب كثيراً في رؤيتها. ومن الطبيعي أنك لم تبذل جهداً كبيراً لاكتشاف البعد "المجعد" الملتف حول سُمك الخرطوم. وكل ما فعلته هو أنك استخدمت منظاراً مقرباً ومع ذلك، فإذا كنت تملك خرطوماً ريقاً جداً - في رقة شعرة أو أنبوبة شعرية - فإن إدراك البعد المتجمد سيكون أكثر صعوبة.

وقد اقترح كالوزا شيئاً مذهلاً في بحث بعث به إلى آينشتاين في العام 1919. اقترح أن النسيج الفضائي للكون قد يكون له أكثر من الأبعاد الثلاثة الشائعة. كان الدافع وراء هذه الرسالة الراديوكالية، كما سنشرح بعد قليل، هو تيقن كالوزا من أن ذلك يعطي إطاراً رائعاً وطاغياً لنسيج النسبية العامة لآينشتاين ونظرية ماكسويل للکهرومغناطيسية معًا في إطار مفرد موحد للمفاهيم. ولكن، لطرح السؤال الآتي في التو، كيف يتناصف هذا الاقتراح مع الحقيقة الظاهرة في أننا "نرى" بالضبط ثلاثة أبعاد فضائية؟

والإجابة المتضمنة في أبحاث كالوزا والتي ن清华ها ووضاحتها الرياضي السويدي أوسكار كلاين عام 1926 هي أن النسيج الفضائي لعالمنا قد يكون له بعد ممتد وبعد متجمد. تماماً مثل خرطوم المياه الممتد أفقياً، فإن عالمنا أبعداً كبيرة وممتدة ومن السهل رؤيتها - الأبعاد الثلاثة المألوفة. لكن ومثل المقاس الدائري لخرطوم المياه، فإنه يمكن أن يكون للعالم أبعاداً إضافية فضائية تتبع بعد بإحكام في فراغ دقيق - فراغ من الدقة بحيث لم يكتشفه أحد حتى الآن بواسطة أكثر الأجهزة التجريبية تقدماً.

وحتى نستوضح الصورة أكثر لهذا الاقتراح الجدير بالملاحظة، لتأمل مثال خرطوم المياه لبرهه. تخيل أن الخرطوم مطلٌ بحلقات سوداء متقاربة على طول امتداده. ومن مسافة بعيدة يبدو الخرطوم وكأنه خط رفيع ذو بعد واحد. إلا أنك لو استخدمت منظاراً مقرباً لتقريب الصورة فستكتشف البعد المتجمد بسهولة أكثر بعد عملية طلائه وسترى الصورة الموسعة في الشكل رقم (2-8). ويؤكد هذا الشكل أن سطح الخرطوم ذو بعدين، أحدهما كبير ممتد والآخر صغير دائري. اقترح

الشكل رقم (8-2)

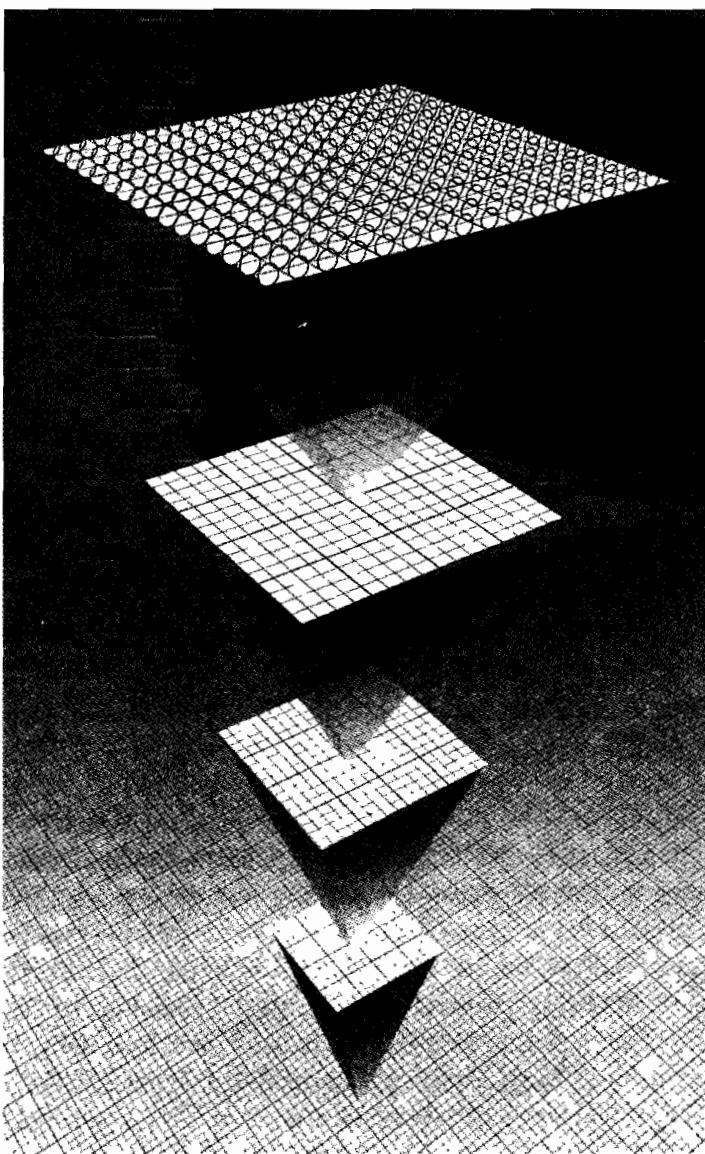


سطح خرطوم المياه ذو بعدين: أحدهما طويل وممتد (الممتد أفقياً) ويؤكده السهم المستقيم؛ والأخر قصير ومتجمع (دائري المقاس) ويؤكده السهم الدائري.

كالوزا وكلابين أن عالمنا الفضائي له نفس السلوك، إلا أن له ثلاثة أبعاداً فضائية كبيرة وممتدة، وبعداً واحداً صغيراً ودائرياً - والمجموع الكلي أربعة أبعاداً فضائية. من الصعب رسم أي شيء ذي أبعاد كثيرة، ولذا ومن أجل رؤية ذلك الأمر، سنكتفي بصورة تتضمن بعدين كبيرين وواحداً دائرياً صغيراً، وهو موضح في الشكل رقم (8-3)، حيث قمنا بتكبير النسيج الفضائي بنفس الطريقة التي كبرنا بها سطح خرطوم المياه.

وتبيّن الصورة السفلی في الشكل البنية الظاهرية للفضاء - العالم العادي من حولنا - على مقاييس المسافات المألوفة مثل الأمتار. وتمثل هذه المسافات في أكبر مجموعة من خطوط الشبكة. وفي الصور المتتابعة بعد ذلك، فإننا نكّبُر النسيج الفضائي مرتكزين اهتمامنا على مناطق تزداد صغرأً، نقوم بتكبيرها على التوالي لجعلها أسهل رؤية. وفي البداية، عندما نختبر النسيج الفضائي من مسافة أقصر، فلن نرى شيئاً، ويدوأنه يحتفظ بنفس الصورة الأساسية كما يبدو من مسافة بعيدة، وهو ما نراه في تكبيرات المستويات الثلاثة الأولى. إلا أنه باستمرار زيادة التكبير في مستويات أعلى وفي اتجاه الفحص المجهري الأدق للفضاء - المستوى الرابع للتکبير في الشكل رقم (8-3) - يظهر بعدّ جديد دائري متجمع، يشبه كثيراً حلقات دائرية من الخيط المكون لقطعة من السجاد محكمة النسج. اقترح كالوزا وكلابين وجود أبعاد دائيرية إضافية عند كل نقطة في الأبعاد الممتدة، تماماً مثل وجود المقاس الدائري لخرطوم المياه عند كل نقطة على استقامة الخرطوم (ولتوسيخ الرؤية فقد قمنا فقط برسم عينة مصورة للبعد الدائري عند نقاط فضائية منتظمة

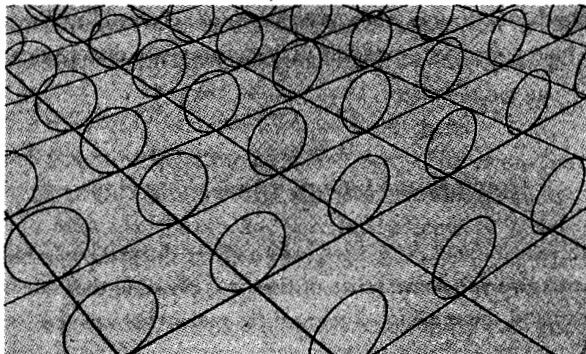
الشكل رقم (3-8)



كما في الشكل رقم (1-5)، فإن كل مستوى متتابع يمثل تكبيراً عظيماً للنسيج الفضائي من المستوى السابق له. وربما يكون لعالمنا أبعاداً أكثر - كما نرى في المستوى الرابع للتکبير - لم يتم التعرف المباشر عليها نظراً لتجدها في الفضاء بحيث تبدو صغيرة جداً.

المسافات فيما بينها في الأبعاد الممتدة). وبين الشكل رقم (4-8) صورة عن قرب للبنية المجهرية للنسيج الفضائي من وجهة نظر كالوزا وكلاين.

الشكل رقم (4-8)



تمثل شبكة الخطوط الأبعاد الممتدة الشائعة، فيما تمثل الدوائر الأبعاد الجديدة الدقيقة والمتجمدة. ومثل الحلقات الدائرية لخيط يكون قطعة من السجاد محكم النسج، فإن الدوائر توجد عند كل نقطة من الأبعاد المألوفة الممتدة - لكن لتوضيح الرؤية نرسمها عند تقاطعات الخطوط في الشبكة.

والتشابه مع خرطوم المياه واضح، إلا أن هناك بعض الاختلافات الهامة. فللكون ثلاثة أبعاد فضائية كبيرة وممتدة (وفي الواقع نرسم اثنين منها فقط)، مقارنة ببعد واحد للخرطوم، والأكثر أهمية أنها نصف النسيج الفضائي للعالم نفسه وليس مجرد جسم مثل الخرطوم الذي يتواجد ضمن هذا العالم. إلا أن الفكرة الأساسية واحدة: مثل المقاس الدائري للخرطوم، فإن البعد الدائري الإضافي المتعدد للكون صغير جداً، وأكثر صعوبة في التعرف عليه عند مقارنته بالبعد الممتد الكبير الواضح. وفي الحقيقة فإن حجمه من الصغر بحيث لا يمكن التعرف عليه حتى بأقوى أجهزة التكبير عندنا. ومن الأمور التي في غاية الأهمية، أن البعد الدائري ليس مجرد نتوءات دائيرية داخل الأبعاد الممتدة المألوفة كما يمكن أن تخدع من الصورة. وبالأحرى فإن البعد الدائري بعد جديد، وهو البعد الموجود عند كل نقطة في الأبعاد الممتدة المألوفة، تماماً مثل كل من الأبعاد فوق - تحت، ويمين - يسار، وأمام - خلف الموجودة عند كل نقطة كذلك. وهو اتجاه جديد ومستقل يمكن أن تتحرك فيه النملة لو كانت صغيرة بما فيه الكفاية. ولتحديد الموقع الفراغي لمثل هذه النملة المجهرية فإننا قد نحتاج لمعرفة أين تقع

بالنسبة للأبعاد الثلاثة الممتدة المائلوفة (التي تمثلها الشبكة) و "كذلك" أين موقعها على بعد الدائري. وعليه سنحتاج لأربع مجموعات من المعلومات الفضائية ، وإذا أضفنا الزمن ، فسنحتاج إلى مجموع من خمس مجموعات من المعلومات عن الزمكان - أي مجموعة زائدة عما هو متوقع عادة.

وهكذا ، وللغرابة ، فإننا نرى أنه على الرغم من إدراكنا للأبعاد الثلاثة الفضائية الممتدة فقط ، فإن تفسيرات كالوزا وكلاين توضح أن ذلك لا يمنع وجود أبعاد إضافية متعددة ، وخاصة إذا كانت متناهية الصغر. وهكذا فإن الكون يمكن أن يكون له أبعاد أكثر مما تراه العين.

كم هو صغير هذا "الصغير"؟ تستطيع أحدث الأجهزة أن تعرف على بني من الصغر مثل جزء من المليار من جزء من المليار من المتر. وطالما كان هذا بعد الإضافي متعدداً لحجم أقل من هذه المسافة الضئيلة ، فإنه من الصغر بحيث لا نكتشفه. دمج كلاين عام 1928 اقتراح كالوزا الأصلي مع بعض الأفكار من مجال ميكانيكا الكم الذي بدأ يظهر. أشارت حساباته إلى أن هذا بعد الإضافي الدائري قد يكون في صغر طول بلانك ، أي أقصر كثيراً مما هو متاح تجريبياً. ومنذ ذلك الحين يطلق الفيزيائيون على احتمال وجود أبعاد فضائية إضافية دقيقة اسم نظرية كالوزا وكلاين⁽²⁾.

ثالثاً: الحركة جيئةً وذهاباً على خرطوم المياه

لقد عنينا بالمثال الملموس لخرطوم المياه والشكل رقم (3-8) أن نعطيك الإحساس بكيف يمكن أن يكون للعالم أبعاد فضائية إضافية. لكن حتى بالنسبة للباحثين في نفس المجال ، فإنه من الصعب أن تخيل عالماً له أكثر من ثلاثة أبعاد فضائية. ولهذا السبب ، فإن الفيزيائيين قد شحدوا حدتهم حول هذه الأبعاد

(2) من المدهش أن الفيزيائيين ساقوا ديموبولوس ، ونيما أركاني-هاميد ، وجيا دفالى قد أشاروا إلى أنه حتى لو كانت الأبعاد الإضافية المتعددة من الطول بحيث تبلغ ميليمتراً ، فإنه من المحتمل أنها لم تكتشف حتى الآن ، وذلك تأسساً على أفكار دايجناتيوس أنطونيديس ، وجوزيف لايكين. والسبب في ذلك هو أن مجلات الجسيمات تقوم باختبار العالم الميكروي بواسطة الاستفادة من القوة القوية والقوة الضعيفة والقوة الكهرومغناطيسية. أما قوة الجاذبية فهي ت العمل عموماً لكونها واهنة جداً بمقاييس الطاقة المتاحة تقنياً. غير أن ديموبولوس ومعاونيه قد لاحظوا أنه إذا كان للبعد الإضافي المتعدد غلبة التأثير في قوة الجاذبية (شيء ما يتضح أنه مقبول في نظرية الأوتار) فإنه من المحتمل أن تكون جميع التجارب قد غفلت عنه. وستقوم تجارب جديدة ، عالية الحساسية بالنسبة للجاذبية ، بالبحث عن مثل تلك الأبعاد المتعددة "الكبيرة" في المستقبل القريب. فإذا جاءت النتائج إيجابية كان ذلك بمثابة أعظم الاكتشافات في كل العصور.

الإضافية، وذلك بتأملهم في ما ستكون عليه الحياة لو عشنا في عالم خيالي له أبعاد أقل - متبعين طريق إدوبن آبوت ومخذين بالعمل الكلاسيكي "فلاتلاند" (الأرض المسطحة)⁽³⁾ - والتي ندرك فيها تدريجياً أن للعالم أبعاداً أكثر مما ندركه مباشرة. ولنجرب ذلك بأن تخيل عالماً ذا بعدين اثنين مثل خرطوم المياه. ويتطلب ذلك أن نستغنى عن المنظور "من الخارج" الذي يرى الخرطوم على أنه جسم في عالمنا. وبالآخرى، فإننا سترى العالم المعروف لنا وندخل عالم الخرطوم الذي فيه مسطح الخرطوم الطويل جداً هو كل شيء على مدى امتداد الفضاء (يمكن تصوره على أنه طوويل إلى ما لا نهاية). تخيل أنك نملة دقيقة تعيش على هذا السطح.

ولنبدأ بجعل الأمور أكثر تطرفاً. تخيل أن طول بعد الدائري لعالم الخرطوم قصير جداً - من القصر بحيث لا تدرك وجوده لا أنت ولا رفاقك المقيمين عليه. وبدلأً من ذلك فإنك وكل الآخرين الذين يعيشون في عالم الخرطوم ستعتقدون أن هناك حقيقة أساسية في الحياة في غاية الوضوح بحيث لا تقبل النقاش: لهذا العالم بعد فضائي "واحد". (إذا ظهر في عالم الخرطوم ذلك نملة آينشتاين خاصة به، فإن من يعيشون على الخرطوم يمكن أن يقولوا بأن هذا العالم له بعد فضائي واحد وبعد زماني واحد). وفي الواقع، هذه الصفة واضحة بذاتها للدرجة أن المقيمين على الخرطوم أطلقوا على عالمهم "الأرض الخط"، مؤكدين بشكل مباشر أن له بعداً فضائياً واحداً.

تختلف الحياة في الأرض الخط كثيراً عن الحياة التي نعرفها. فمثلاً الجسم المألف لك لا يمكن أن يُناسب الأرض الخط. ومهما بذلت من جهد في إعادة تشكيل الجسم، فإن هناك شيئاً لا يمكن تجنبه وهو أن لك بالتأكيد طولاً وعرضًا وسمكاً - التوأّج الفضائي في ثلاثة أبعاد. وليس هناك مكان في عالم الأرض الخط لمثل هذا التركيب البادخ. ولتنذكر أنه بالرغم من تصورك الذهني للأرض الخط التي ما زالت مرتبطة بجسم طويل مثل الخيط موجود في فضائنا، فإنك تحتاج فعلاً أن تفكّر في الأرض الخط على أنها عالم - وهذا هو المطلوب. وككائن في الأرض الخط فإن عليك أن تتلاءم في امتدادها الفضائي. حاول أن تخيل ذلك ولو حتى تخيلت أن لك جسم نملة، فإنك لن تتمكن من أن تتلاءم. فلا بد أن تعتصر جسمك الذي على شكل نملة ليصبح أشبه بالدوامة، وأن تعرصه أكثر وأكثر ليصبح بلا سمك على الإطلاق. ولتلقاء مع الأرض الخط، لا بد أن

Edwin Abbot, *Flatland: A Romance of Many Dimensions* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1991). (3)

تكون شيئاً له طول "فقط".

تخيل بعد ذلك أن لك عيناً عند كل طرف من جسمك. وعلى عكس العين البشرية التي يمكن أن تدور في محجرها لترى الأبعاد الثلاثة، فإن عينك مثبتة للأبد في موقعها، لأنك كائن خطي، وكل منها يحذق في بعد واحد. "وليس" ذلك قصوراً تشريحياً في جسمك الجديد. وبدلاً من ذلك، فإنك وجميع الكائنات الخطية الأخرى تقرؤن بأنه لأن للأرض الخط بعداً واحداً فقط، فليس هناك اتجاه آخر يمكن أن تنظر إليه عينك. فإلى الأمام وإلى الخلف هو كل امتداد الأرض الخط.

ويمكن أن نذهب أبعد من ذلك في تخيل الحياة على الأرض الخط، لكن سرعان ما ستتحقق أنه ليس هناك المزيد. فمثلاً، إذا وجد كائن خطي آخر على أحد جانبيك، فتصور كيف يبدو: فإنك سترى إحدى عينيه فقط - العين التي تواجهك - لكن على عكس العين البشرية فإن هذه العين ستظهر كنقطة مفردة. فليس للعيون في الأرض الخط أية سمات. ولا تبدي أية مشاعر - فلا مكان هناك لمثل هذه الخواص المألوفة. والأكثر من ذلك فإنك لن ترى سوى هذه الصورة شبه النقطة لعين جارك. فإذا أردت أن تعبّرها وتكتشف دنيا الأرض الخط على الجانب الآخر لجسمها، فإنك ستتصادف إحباطاً عظيماً فإنك لن "تتمكن من عبورها". لأنها "تغلق الطريق" تماماً، وليس هناك مكان على الأرض الخط لتدور حولها. فوضع الكائنات الخطية المنتشرة على طول امتداد الأرض الخط ثابت لا يتغير. أي بؤس هذا.

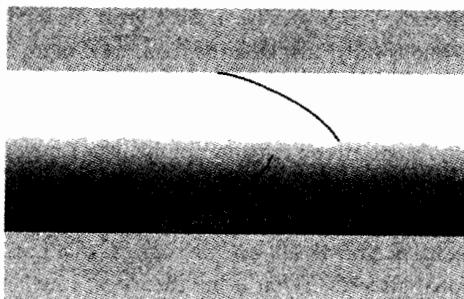
وبعد بضعة آلاف سنة من ظهور الدين في الأرض الخط، قدم أحد الكائنات الخطية، واسمه كالوزا ك. لain، بعض الأمل للكائنات الخطية الملتصقة بالأرض. قد يكون وحياً إليها، أو نتيجة مجرد السأم من التحديق لسنوات في عين جارته، أن يقترح أن أرض الخط قد لا تكون ذات بعد واحد في نهاية المطاف. فماذا لو كان يفترض أن للأرض الخط في الواقع بعدين اثنين، بحيث يكون البعد الفضائي الثاني ذا اتجاه دائري وصغير جداً، ومن الصعب التعرف عليه مباشرة لأنه متناهي الصغر. يسترسل كلاين في رسم صورة للحياة الفسيحة الجديدة. فإذا أمكننا أن نفرد هذا الاتجاه الفضائي المتعرج قليلاً - الأمر الذي أصبح ممكناً فقط بناء على الأبحاث الحديثة التي أجراها رفيقه لاينشتاين. يصف كالوزا ك. لain عالماً يصييك أنت ورفاقك بالدهشة ويغرس الأمل في الجميع - عالم يمكن أن تتحرك فيه الكائنات الخطية بحرية لتعبر بعضها بجوار البعض مستغلة بعد الثاني: حلّت نهاية عالم العبودية الفضائية. ونحن ندرك أن كالوزا ك. لain يصف الحياة في

عالم الخرطوم "ذي السمك".

وفي الحقيقة إذا كان للبعد الدائري أن ينمو، نافخاً الأرض الخط لتصير مثل عالم الخرطوم، فإن حياتك ستغير بشكل خطير. خذ جسدك مثلاً، ككائن خطبي، فإن أي شيء يقع بين عيناك يشكل ما هو داخل جسمك. وتمثل عيناك بالنسبة لجسمك الخطبي ما يمثله الجلد للجسد البشري العادي: فهي تمثل الحاجز بين ما هو داخل جسمك والعالم الخارجي. ولا يمكن للطبيب في الأرض الخط أن يصل إلى داخل جسمك الخطبي إلا إذا ثقب سطحه - وبمعنى آخر، فإن الجراحة في الأرض الخط لا تتم إلا عن طريق الأعين.

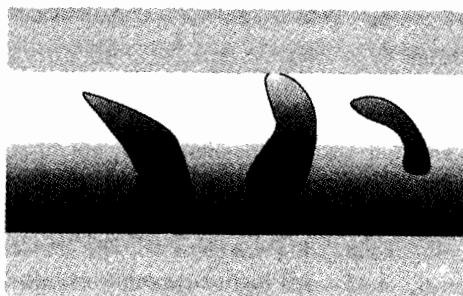
والآن تخيل ما يمكن أن يحدث إذا كان للأرض الخط، بناء على كالولزا ك. لain، بعد سري متعدد وإذا كان هذا بعد يتمدد لمسافة كبيرة ملحوظة. وهنا يمكن للكائن خطبي أن يرى جسمك بزاوية، ولذا فإنه سيرى مباشرة ما بداخله كما هو موضح في الشكل رقم (5-8). وباستخدام هذا بعد الثاني، فإن الطبيب يمكن أن يجري العملية على ما بداخل جسمك مباشرة. أمرٌ غريب!!! فبمروor الزمن سينمو للكائنات الخطبية بلا شك ما يشبه الجلد ليحمي ما بداخل الجسم المعرض للخارج - حديثاً - من التلامس مع العالم الخارجي. والأكثر من ذلك، فإنها ستنمو بلا شك إلى كائنات لها طول وعرض: وستنزلق الكائنات المسطحة (Flatbeeings) على طول عالم الخرطوم ذي البعدين كما هو موضح في الشكل رقم (8-6). فإذا نما بعد الدائري بشكل كبير، فإنه في الواقع سيصبح عالماً ذو بعدين مشابهاً إلى حد كبير الأرض المسطحة لآبوات - عالم خيالي ذو بعدين،

الشكل رقم (5-8)



يمكن للكائن خطبي أن يرى مباشرة ما بداخل جسم آخر عندما تمدد الأرض الخط وتحول إلى عالم الخرطوم.

الشكل رقم (6-8)



كائنات مسطحة ذات بعدين تعيش في عالم خرطوم المياه.

ملأه آبوات بمحتوى ثقافي غني ، بل وحتى وضعه في إطار محكم ساخر يقوم على الشكل الهندسي للفرد. وبينما من الصعب أن تخيل أن يحدث أي شيء ذي قيمة في الأرض الخط - حيث لا يوجد مكان كافٍ لأي شيء - فإن الحياة على عالم الخرطوم ستصبح مفعمة بالاحتمالات. كان التطور من بعد فضائي واحد إلى بعدين مرئيين فضائيين كبيرين أمراً درامياً.

والآن لماذا نتوقف هناك؟ فقد يكون للعالم ذي البعدين نفسه بعد آخر متعدد ، وبالتالي يصبح في السر ذا ثلاثة أبعاد. ويمكن تصوير ذلك كما في الشكل رقم (4-8) طالما أنها نظر بأننا نتصور أن هناك بعدين ممتدان (بينما عندما تحدثنا عن هذا الشكل في البداية كنا نتصور أن الشبكة المنسطة تمثل الأبعاد الثلاثة الممتدة). وإذا كان لا بد للبعد الدائري أن يتمتد ، فإن الكائن ذا البعدين سيجد نفسه في عالم جديد فسيح ، والحركة فيه ليست محدودة أو مقصورة على اليمين - يسار وأمام - خلف على طول الأبعاد الممتدة. فالآن يمكن أن يتحرك الكائن في بعد ثالث وهو الاتجاه "أعلى - أسفل" على طول الدائرة. وفي الواقع إذا كان بعد الدائري ينمو لدرجة كبيرة بما فيه الكفاية ، فإن ذلك سيصبح عالمنا ذا الأبعاد الثلاثة. ونحن لا نعلم حتى الآن ما إذا كان أي بعد من الأبعاد الثلاثة الفضائية يمتد إلى الخارج إلى الأبد ، أو أنه في الحقيقة يتبع على نفسه على شكل دائرة عملاقة لا تتمكن من إدراكها أقوى التلسكوبات المتاحة. فإذا أصبح بعد الدائري في الشكل رقم (4-8) ضخماً بما فيه الكفاية - يمتد لمليارات السنين الضوئية - فإن الشكل سيعبر تماماً عن عالمنا.

لكن السؤال يعود من جديد: لماذا التوقف هناك؟ ويأخذنا ذلك إلى وجهاً

نظر كالولزا وكلاين: إن عالمنا ذو الأبعاد الثلاثة قد يوجد به بعد فضائي رابع لم يتباً به أحد من قبل. فإذا كان هذا الاحتمال المدهش أو تعميمه على أبعاد متعددة عديدة (ستناقشها قريباً) صحيحاً، وإذا كانت هذه الأبعاد المتعددة هي نفسها تمدد إلى حجم كبير، فإن الأمثلة ذات الأبعاد الأقل التي ناقشناها هنا توضح أن الحياة التي نعرفها قد تتغير تغيراً جذرياً.

ولكن للغراوة، حتى إذا ظلت هذه الأبعاد متعددة وصغيرة دائماً، فإن وجود الأبعاد المتعددة الإضافية له انعكاسات مدوية.

رابعاً: التوحد في الأبعاد الأعلى

وعلى الرغم من أن اقتراحات كالولزا في العام 1919 حول احتمال أن يكون للعالم أبعاد أكثر من تلك التي ندركها مباشرة، فإن شيئاً آخر قد فرض هذا الاحتمال الجدير باللاحظة. صاغ آينشتاين النسبية العامة في الوضع المألف لكون ذي ثلاثة أبعاد فضائية وبعد زماني آخر. ورغم ذلك، فإن الصيغة الرياضية لهذه النظرية يمكن أن تستخدم مباشرة لوضع معادلات مشابهة لعالم له أبعاد فضائية إضافية. وفي ظل هذا الافتراض البسيط بوجود بعد فضائي إضافي قام كالولزا بإجراء التحاليل الرياضية واستنبط بجلاء المعادلات الجديدة.

وقد وجد كالولزا أن صور المعادلات الخاصة بالأبعاد الثلاثة العادية هي في الأساس مطابقة لمعادلات آينشتاين. ولأن كالولزا قد ضمنها بعداً فضائياً إضافياً فلم يكن من الغريب أن يجد معادلات إضافية بجانب تلك التي استنبطها آينشتاين في الأصل. وبعد دراسة المعادلات الإضافية المرتبطة بالبعد الجديد، أدرك كالولزا أن هناك شيئاً مثيراً فلما تكن هذه المعادلات الإضافية سوى معادلات ماكسويل التي استنبطها سنة 1880 لوصف القوى الكهرومغناطيسية! وبإضافة بعد فضائي آخر يكون كالولزا قد وحد نظرية آينشتاين للجاذبية مع نظرية ماكسويل للضوء.

وقبل كالولزا كانت الجاذبية والكهرومغناطيسية تعتبران قوتين لا علاقة بينهما، ولم تكن هناك أدلة إشارة لوجود علاقة بينهما. ويوجد هذا الفكر الجريء الخالق في تصور أن للعالم بعد فضائياً إضافياً، اقترح كالولزا أن هناك من المؤكد علاقة قوية بينهما. وتجادل نظريته بأن كل من الجاذبية والكهرومغناطيسية مرتبطة بتموجات نسيج الفضاء. وتحمل هذه التموجات الجاذبية في الفضاء العادي ذي الأبعاد الثلاثة، بينما تحمل التموجات - في البعد الجديد المتعدد - الكهرومغناطيسية.

أرسل كالولزا ببحثه إلى آينشتاين، الذي أثاره تماماً. وقد كتب آينشتاين في 21

نيسان/أبريل 1919 إلى كالوزا ليخبره بأنه لم يتخيل في حياته أن التوحد بين النظريتين يمكن أن يتحقق "من خلال عالم أسطواني ذي خمسة أبعاد [أربعة فضائية وواحد زمني]"، ثم أضاف "لقد أعجبتني فكرتك بشدة لأول وهلة"⁽⁴⁾. إلا أنه كتب مرة أخرى بعد أسبوع وبشيء من التشكك هذه المرة: "لقد قرأت بحثك ووجدته مثيراً للاهتمام بالفعل، وحتى الآن فإنني لا أجده ما يمنع ذلك. ومن جهة أخرى، لا بد أن أعترف بأن الأدلة المطروحة لا تبدو مقنعة بما فيه الكفاية"⁽⁵⁾. غير أنه في 14 تشرين الأول/أكتوبر 1921، وبعد مرور أكثر من عامين، كتب آينشتاين لـ كالوزا مرة أخرى، بعد أن مضى الوقت الكافي لهضم منطلقات كالوزا الجديدة غير المسبوقة هضماً تماماً: "ظهرت عندي أفكار أخرى حول عدم تشجيعك في نشر أفكارك عن التوحد بين الجاذبية والكهرباء منذ عامين... فإذا رغبت، فإبني على كل حال سأقدم بحثك للأكاديمية"⁽⁶⁾. وأخيراً، حصل كالوزا على رضى المعلم.

ومع أنها كانت فكرة جميلة، إلا أن الدراسات التفصيلية التي تبعت اقتراح كالوزا والمدعمة بمساهمات كلاين قد بينت أنها في تناقض خطير مع البيانات التجريبية. وقد تبأت أبسط المحاولات لتضمين الإلكترونون في النظرية بقيم لنسبة الكثافة إلى الشحنة مختلفة بشكل كبير عن القيم المقيسة. ولأنه لم يجد أن هناك في الأفق أي طريق واضح للغلبة على هذه المشكلة فقد فقد الكثير من الفيزيائيين اهتمامهم بأفكار كالوزا بعد أن كانوا معنین بها. إلا أن آينشتاين وأخرين ظلوا بين حين وأخر يداعبهم احتمال وجود هذا البعد الإضافي المتعدد، لكن سرعان ما أصبح ذلك من الاهتمامات غير الأساسية للفيزياء النظرية .

وفي الواقع كانت أفكار كالوزا سابقة لعصرها بكثير. اتسمت العشرينيات من القرن العشرين ببداية ازدهار للفيزياء النظرية والتجريبية المعنية بفهم القوانين الأساسية للعالم المجهرى. أصبح النظريون منشغلين جداً عندما بدأوا في تطوير بنية ميكانيكا الكم ونظرية مجال الكم. وكان على التجاربيين أن يكتشفوا الخواص التفصيلية للذرة والعديد من مكوناتها الأولية. كانت النظرية تقود التجارب، في الوقت الذي كانت فيه التجارب تنقح النظرية، واندفع الفيزيائيون إلى الأمام على

(4) آينشتاين في خطابه لـ كالوزا، مأخوذ من كتاب: Abraham Pais, "Subtle Is the Lord..": The Science and the Life of Albert Einstein (Oxford: Oxford University Press, 1982), p. 330.

(5) آينشتاين في خطابه لـ كالوزا، مأخوذ من: Daniel Z. Freedman and Peter Van Nieuwenhuizen, "The Hidden Dimensions of Spacetime," *Scientific American*, vol. 252 (1985), p. 62.

(6) المصدر نفسه.

مدى نصف قرن ليصلوا في النهاية إلى النموذج القياسي. وليس غريباً أن تركت جانب التخمينات حول الأبعاد الإضافية أثناء هذه الفترة الخصيبة والعنيفة. وفي الوقت الذي كان فيه الفيزيائيون يختبرون الطرق الكمية ذات القدرة العالية، والتي أدت تطبيقاتها إلى تنبؤات قابلة للتحقق تجريبياً، لم يكن هناك اهتمام كبير في الاحتمال المجرد أن يكون الكون مكاناً مختلفاً بشدة بمقاييس الأطوال متناهية الصغر للدرجة التي تعجز معها أعظم الأجهزة عن اختبارها.

لكن عاجلاً أو آجلاً، خبا هذا الازدهار. وفي الفترة من نهاية سبعينيات وبداية سبعينيات القرن العشرين كانت البنية النظرية للنموذج القياسي قد اتخذت وضعها. ومع نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن العشرين تحقق الكثير من تنبؤاتها تجريبياً، وتوصل معظم فيزيائي الجسيمات إلى أن المسألة مجرد وقت قبل أن تتحقق باقي التنبؤات. غير أنه تبقى القليل من التفاصيل الهامة دون حل. وقد شعر الكثيرون أن الأسئلة الهامة المتعلقة بالقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية قد تمت الإجابة عليها.

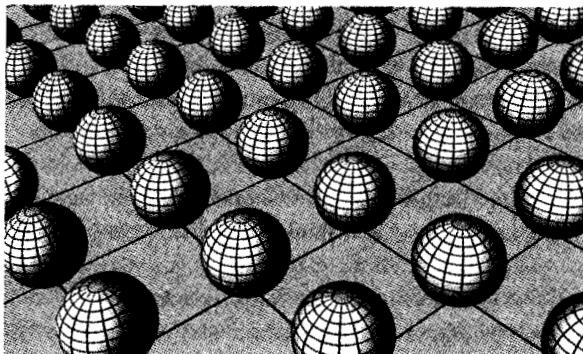
وفي النهاية أصبح الوقت مناسباً تماماً للعودة إلى التساؤل الأعظم على الإطلاق: التناقض المبهم بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. وقد شجعت النجاحات التي تمت فيما يتعلق بصياغة نظرية كمية لقوى الطبيعة الثلاث الفيزيائيين أن يحاولوا احتواء القوة الرابعة، وهي الجاذبية. وبعد تتبع العديد من الأفكار التي كان مصيرها الفشل في النهاية، فإن مجتمع الفيزيائيين أصبح أكثر انفتاحاً تجاه الأفكار الراديكالية نسبياً وقد انتعشت من جديد نظرية كالولزا وكلاين بعد أن كانت قد تركت لتموت في أواخر عشينيات القرن العشرين.

خامساً: نظرية كالولزا - كلاين الحديثة

تعمل فهمنا للفيزياء وتغير بشكل ملحوظ خلال العقود الستة التي مضت منذ اقتراح كالولزا الأصلي. فقد تمت صياغة ميكانيكا الكم تماماً والتحقق منها تجريبياً. واكتشفت القوى القوية والقوى الضعيفة التي لم تكن معروفة حتى عشينيات القرن العشرين وأصبحت مفهوماً بشكل كبير. وقد فسر بعض الفيزيائيين سقوط مقترنات كالولزا الأصلية بأنه لم يكن على دراية بهذه القوى الأخرى، وبذا فقد كان محافظاً بدرجة كبيرة في تجديده لمفهوم المكان. والقوى الأكثر تعني الحاجة إلى أبعاد أكثر. ولم يكن مجرد وجود بعد دائري منفرد كافياً، مع أنه كان قادراً على الإشارة إلى ارتباط ما بين النسبية العامة والكهرومغناطيسية.

ويحل محل منتصف سبعينيات القرن العشرين، جرت جهود بحثية مكثفة تركت

الشكل رقم (7-8)

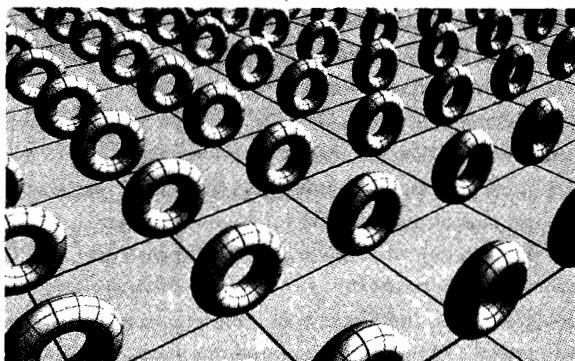


بعدان إضافيان متعددان على شكل كعكة مجوفة.

حول نظريات على أبعاد أعلى بها اتجاهات فضائية متعددة. ويصور الشكل رقم (7-8) مثلاً ذا بعدين إضافيين متعددين على شكل سطح كروي - أي كرة. وكما في حالة بعد الدائري المنفرد، فإن هذه الأبعاد الإضافية مثبتة على "كل نقطة" على امتداد الأبعاد المألوفة. (ولوضوح الرؤية فقد قمنا مرة أخرى برسم عينة توضيحية وحيدة للأبعاد الكروية التي تبعد بعضها عن بعض بصورة منتظمة على شكل نقاط شبكة الأبعاد الممتدة). وعدها اقتراح وجود أعداد مختلفة من الأبعاد الإضافية، فإن المرء يمكن أن يتصور كذلك أشكالاً أخرى للأبعاد الإضافية. فعلى سبيل المثال، في الشكل رقم (8-8) صورنا احتمال وجود بعدين إضافيين آخرين، لكنهما في هذه المرة على شكل كعكة مجوفة. ومع أن ذلك يقع خارج إمكانيات رسمنا، إلا أن هناك احتمالات معقدة يمكن تصورها حيث توجد ثلاثة أو أربعة أو خمسة أبعاد أو أي عدد من الأبعاد الفضائية الإضافية التي تتعدد في عدد كبير من الأشكال الغريبة. ومرة أخرى، فإن الشروط الأساسية لوجود هذه الأبعاد أن يكون لها امتداد فضائي أصغر من أصغر الأطوال التي نستطيع اخبارها، حيث لم يتتوفر اكتشافنا لأية تجارب تدل على وجودها.

كانت الاقتراحات حول أكثر الأبعاد العليا احتمالاً تتضمن كذلك التأاظر الفائق. وكان الفيزيائيون يأملون أن يقوم التلاشي الجزيئي لمعظم التأرجحات الكمية العنيفة، التي نشأت من تزاوج الجسيمات فائقة المشاركة، بالمساعدة في تقليل العداء بين الجاذبية وميكانيكا الكم. وقد صكوا الاسم "الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأعلى" (Higher-Dimensional Supergravity) لتعبر عن تلك النظريات التي تضم الجاذبية والأبعاد الإضافية والتأاظر الفائق.

الشكل رقم (8-8)



تجعد الأبعاد الإضافية على شكل "دونات" مجوفة أو محدبة.

وكما كان الحال في محاولات كالوزا الأصلية، ظهرت الصور المختلفة للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأعلى وكأنها واعدة في البداية. وكانت المعادلات الجديدة الناتجة من الأبعاد الإضافية تذكاراً مدهشاً لتلك المعادلات التي استخدمت لوصف الكهرومغناطيسية والقوى القوية والضعيفة. لكن الفحص التفصيلي الدقيق قد بين أن الألغاز القديمة ما زالت قائمة. ومن الهام جداً أن التموجات المزعجة الكمية للفضاء في المسافات القصيرة قد تم تهديبها بواسطة التناول الفائق، لكن ليس بدرجة كافية لتوصلنا إلى نظرية معقوله. وقد وجد الفيزيائيون أيضاً أنه من الصعوبة الحصول على نظرية واحدة معقولة ذات أبعاد أعلى تتضمن كل صفات القوى والمادة⁽⁷⁾.

(7) اكتشف الفيزيائيون أن أكثر الصفات صعوبة في التمودج القياسي، ليتضمن صياغة ذات أبعاد أكثر، هي تلك المعروفة باسم الكفية (من كف اليد^(*)) أو الكيرالية "Chirality". وحتى لا ننقل على القارئ بمناقشتنا، فإننا لم نتعرض لهذه النقطة في الكتاب، أما بالنسبة للقراء المهتمين فإننا نقوم بذلك الآن باختصار. تخيل أن بعضهم قد عرض لك شريطاً سينمائياً لبعض تجارب علمية معينة، ثم وجه إليك تحدياً غير عادي وهو أن تحدد ما إذا كان الشريط الذي شاهدته قد سجل التجربة مباشرة أم أنه سجل صورتها في المرأة. ولنكون المصور السينمائي ذا خبرة فإنه لا يوجد في الشريط أية دلائل تدل على وجود المرأة من عدمه. فهل تستطيع مواجهة هذا التحدي؟ في منتصف خمسينيات القرن العشرين بنيت الأفكار النظرية لكل من ت. د. لي، وس. ن. يانغ، وكذلك الناتج التجريبي لـس. س. واؤ ومعاونيه أن بالإمكان مواجهة هذا التحدي طالما أن الشريط قد تم تصويره. وبالتالي أرسّت أبحاثهم قاعدة تنص على أن قوانين الكون ليست متماثلة تماماً مع صورتها في المرأة، بمعنى أن الصور المنعكسة في المرأة لبعض عمليات معينة - =

(*) جاءت التسمية من كون كف اليد اليمنى يمثل صورة مرآة من كف اليد اليسرى، وهما لا ينطبقان، وكلمة "كيرال" إغريقية وتعني الكف (المترجم والمراجع).

وبالتدرج بدأت تظهر على السطح بوضوح نظرية موحدة تجمعت قطعة قطعة، لكن لم يكن هناك عنصر المحوري القادر على ربط كل هذه القطع معاً في سلوك كمي ميكانيكي مستقر. وفي العام 1984 دخلت هذه القطعة المفقودة إلى الرواية - نظرية الأوتار - واحتلت صدارة المسرح.

سادساً: أبعاد أكثر ونظرية الأوتار

والآن لا بد من أن تكون قد اقتنعت بأن عالمنا "قد" يكون له أبعاد فضائية إضافية متعددة، وقطعاً، حيث أنها متناهية الصغر، فلا شيء ينفي وجودها. لكنها قد تصدمك كونها كما لو كانت مصطنعة. وعجزنا عن اختبار المسافات الأقصر من جزء من المليار من جزء من المليار من المتر لا يسمح فقط بوجود أبعاد إضافية دقيقة ولكن يسمح كذلك بوجود كل أنواع السلوكيات المحتملة الدقيقة الأخرى - وربما يكون هناك حضارة ميكروسكوبية مأهولة بأناس خضر أصغر. وبينما يبدو أن الأبعاد الإضافية أكثر منطقية عن العالم المجهرى المأهول، فإن افتراض وجود أي منها لم يختبر تجريبياً - وغير قابل للاختبار في الوقت الحالى - وعليه فإن احتمال وجود أي منها واحد.

هكذا كان الحال حتى ظهور نظرية الأوتار. وهذه النظرية هي التي تحل المعضلة الرئيسية التي تواجه الفيزياء المعاصرة - وهي عدم التوافق بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة - وهي التي توحد فهماًنا لكل القوى والمكونات المادية الأساسية في الطبيعة. لكن للوصول إلى هذه الإنجازات اتضحت أن نظرية الأوتار تتطلب أن يكون للكون أبعاد فضائية إضافية.

وهنا يكمن السبب. وأحد العناصر الرئيسية في ميكانيكا الكم هو أن مقدرتنا على التنبؤ محددة أساساً بمنطق تأكيد أن نتائج معينة تأتي من احتمالات معينة.

= تلك التي تعتمد بشكل مباشر على القوى الضعيفة - "لا يمكن أن تحدث في عالمنا"، حتى ولو كانت العملية الأصلية ممكنة الحدوث. وهكذا، إذا تابعت الشريط السينمائي (الفيلم)، ورأيت إحدى تلك العمليات المستحيلة تحدث، فإنك ستعلم أنك تشاهد صورة مرآة للتجربة وليس التجربة نفسها. وحيث أن المرأة تبادل ما هو يمين-يسار والعكس، فقد أوضحت أبحاث لي ويانغ وواو أن الكون ليس متاظراً تماماً فيما يخص يمين-يسار، أي بلغة التخصص فإن الكون كثيـر "Chiral". إنها تلك الخاصية من خواص النموذج القياسي (القوة الضعيفة على وجه التحديد) التي وجد الفيزيائيون أنه من المستحيل تقريباً تضمينها في إطار الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأكثر. وحتى تتجنب إرباك القارئ فإننا نشير إلى أننا ستناقش في الفصل العاشر مفهوماً في نظرية الأوتار يسمى "تاظير المرأة"، غير أن استخدام كلمة "مرآة" في هذا المضمون يختلف تماماً عن استخدامها هنا.

وبالرغم من أن آينشتاين قد شعر بأن هذا الأمر سمة غير مستحبة لمفهومنا للحديث، وقد تتفق مع آينشتاين على هذا الرأي، لكنه يبدو بالتأكيد كأنه حقيقي. وللتقبل ذلك. ونحن جميعاً نعرف أن الاحتمالات هي دائماً أرقام تقع بين الصفر والواحد الصحيح - وبينفس الطريقة إذا عبرنا بالنسبة المثلوية، فإن الاحتمالات تتراوح بين الصفر والمئة وقد وجد الفيزيائيون إشارة هامة إلى أن نظرية ميكانيكا الكم قد شطحت بعيداً، وذلك بحسابات معينة أدت إلى "احتمالات لا تقع" في المدى المقبول. فمثلاً كنا قد أشرنا مسبقاً إلى أن أحد دلائل عدم التوافق الشديد بين النسبية العامة وميكانيكا الكم - في إطار الجسيمة النقطة - هو أن الحسابات تؤدي إلى احتمالات لانهائية. وتعالج نظرية الأوتار هذه "اللانهائيات" كما ذكرنا من قبل. لكن، وهو ما لم نشر إليه من قبل، هناك مشكلة أكثر حرجاً ما زالت متباعدة. ففي الأيام الأولى لنظرية الأوتار اكتشف الفيزيائيون بعض حسابات معينة تؤدي إلى احتماليات "سلبية"، وهي الأخرى خارج المدى المقبول. وبذل، ولأول وهلة، بدت نظرية الأوتار غارقة في المياه الساخنة لميكانيكا الكم.

بحث الفيزيائيون ياصرار عنيد، ووجدوا السبب في هذه السمة غير المقبولة. بدأ تفسير ذلك بلاحظة بسيطة: فإذا كان الوتر مثبتاً على سطح ذي بعدين - مثل سطح المنضدة أو خرطوم المياه - فإن عدد الاتجاهات المستقلة التي يمكن أن يتذبذب فيها تختلف إلى "اثنين" فقط: اتجاه يمين - يسار، واتجاه أمام - خلف على طول السطح. ويتضمن أي نسق اهتزازي موجود على السطح بعض التراكيب للاهتزازات في هذين الاتجاهين. وبالتالي فإننا نرى أن ذلك يعني أيضاً أن أي وتر في الأرض المنبسطة وفي عالم خرطوم المياه، أو في أي عالم ذي بعدين، هو الآخر ثابت ليتذبذب في بعدين فضائيين مستقلين فقط. فإذا قُدر للوتر أن يغادر السطح فإن عدد الاتجاهات المستقلة للاهتزاز سترتفع إلى ثلاثة، حيث سيتمكن الوتر من التذبذب في الاتجاه فوق - تحت. وبالمثل، ففي عالم ذي ثلاثة أبعاد فضائية فإن الوتر يمكن أن يتذبذب في ثلاثة اتجاهات مستقلة. وبالرغم من صعوبة التخيل، فإن النسق يستمر: في عالم له أبعاد فضائية أكثر وأكثر، فإن هناك المزيد والمزيد من الاتجاهات المستقلة التي يمكن أن يتذبذب بها الوتر.

وتأكدنا على حقيقة اهتزازات الوتر تجيء من أن الفيزيائيين قد وجدوا أن الحسابات المعقدة كانت تتأثر كثيراً بعدد الاتجاهات المستقلة التي يتذبذب فيها الوتر. وقد نشأت الاحتمالات السلبية من الاختلاف بين ما تتطلب النظرية وما يبدو أن الواقع يفرضه: بينت الحسابات أن الأوتار يمكن أن تتذبذب في تسعة اتجاهات فضائية مستقلة، وأن كل الاحتمالات السالبة ستلاشى. حسناً، فإن هذا شيء رائع

نظرياً، لكن ماذا بعد؟ فإذا كانت نظرية الأوتار تصف عالمنا بأن له ثلاثة أبعاد فضائية، فإن ذلك يعني أننا ما زلنا في موقف محير. هل نحن حقاً في مثل هذا الموقف؟ وقد رأينا أن كالوزا وكلابين اللذين قادا المسيرة قد وجدا المنفذ. وبما أن الأوتار غاية في الدقة، فإنها لا تتذبذب فقط في الأبعاد الممتدة لكنها تستطيع أن تتذبذب في الأبعاد الدقيقة والمتجمدة أيضاً. وهكذا "يمكن" أن نجد الأبعاد الفضائية التسعة التي تتطلبها نظرية الأوتار في عالمنا، بافتراض - تبعاً لـ كالوزا وكلابين - أنه بالإضافة إلى الأبعاد الثلاثة الفضائية الممتدة المألوفة هناك ستة أبعاد فضائية أخرى متجمدة. وبهذه الطريقة فإن نظرية الأوتار، التي كانت تبدو وكأنها على حافة الاستبعاد من دنيا الفيزياء، قد أمكن إنقاذهما. والأكثر من ذلك، وبدلاً من مجرد افتراض وجود الأبعاد الإضافية كما فعل كالوزا وكلابين ومنتبعهما، فإن نظرية الأوتار "تطلب" وجود هذه الأبعاد بالضرورة. وحتى تصبح نظرية الأوتار معقوله فإن الكون لا بد من أن يكون له تسعة أبعاد فضائية وبعد زمني واحد، ليصبح المجموع عشرة أبعاد. وبهذه الطريقة يجد افتراض كالوزا للعام 1919 إجماعاً أكثر ما يكون إنقاضاً وقوة.

سابعاً: بعض التساؤلات

ويشير ذلك عدداً من التساؤلات. الأول، لماذا تتطلب نظرية الأوتار عدداً محدداً يتكون من تسعة أبعاد لتتجنب القيم الاحتمالية غير المقبولة؟ وربما يكون هذا أصعب الأسئلة في نظرية الأوتار ولا يمكن الإجابة عنه بدون اللجوء إلى المعالجة الرياضية. وتكشف الحسابات المباشرة لنظرية الأوتار عن هذه الإجابة، لكن لا يملك أحد التفسير الحدسي غير التقني لكيفية ظهور العدد تسعة بالتحديد. وقد قال الفيزيائي إرنست رذرфорد يوماً ما أنه إذا لم تستطع تفسير نتيجة ما بمصطلحات بسيطة وغير تقنية، فإنك في الواقع لم تفهمها. لم يقل رذرфорد أن هذا يعني أن نتائجك خاطئة، بل كان بالأحرى يقول إنك لم تفهم أصولها أو معناها أو تطبيقاتها تماماً. قد يكون هذا صحيحاً بالنسبة لخاصية الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار. (في الحقيقة، لمستغل هذه الفرصة لترتبط - بين أقواس - بالسمة المحورية لثورة الأوتار الفاقعية الثانية التي ستناقشها في الفصل 12. وقد اتضحت أن الحسابات التي أدت إلى وجود عشرة أبعاد زمكانية - تسعة فضائية وواحد زمني - كانت تقريبية. وفي منتصف تسعينيات القرن العشرين، قدم ويتن - معتمداً على وجهة نظره الخاصة به والأبحاث السابقة لكل من مايكيل داف من جامعة A&M بتكساس، وكريس هول، وبول تاونسند من جامعة كمبريدج - دليلاً

مقنعاً على أن الحسابات التقريرية "تفتقد" بالفعل بعدها فضائياً واحداً: دفع ويتنا
بأن نظرية الأوتار، لدھشة أغلب المشتغلين النظريين بها، تتطلب في الواقع عشرة
أبعاد فضائية وبعداً زمنياً واحداً ليصبح المجموع "أحد عشر" بعداً وسندع جانباً
هذه النتيجة الهامة حتى الفصل 12، حيث أنه ليس لها إلا صلة ضعيفة بالمادة التي
ستعرض لها قبل ذلك.

أما التساؤل الثاني، إذا كانت معادلات نظرية الأوتار (أو بدقة أكثر،
المعادلات التقريرية التي تقود مناقشاتنا قبل أن نصل إلى الفصل 12) تظهر أن
للكون تسعه أبعاد فضائية وبعداً زمنياً واحداً، فلماذا تكون ثلاثة أبعاد فضائية
(وبعد زمني واحد) كبيرة وممتدة بينما كل الأبعاد الأخرى متناهية الصغر
ومتجعدة؟ ولماذا لا تكون جميعاً ممتدة أو متتجعدة أو أي احتمال آخر بين
الحالتين؟ ولا يعرف أحد حتى الآن الإجابة عن هذا السؤال. وإذا كانت نظرية
الأوتار صحيحة، فإننا حتمياً سنتمكن من استخلاص الإجابة، لكن حتى الآن ما
زال فهمنا للنظرية غير تام للدرجة التي توصلنا إلى هذا الهدف. ولا يعني ذلك أنه
لم تكن هناك محاولات جسورة لتفسير ذلك. فمثلاً، ومن منظور كسمولوجي (كوني)،
يمكن أن نتصور أن كل الأبعاد كانت في البداية متتجعدة بشدة، ثم، في
لحظة الانفجار الهائل، انفردت وامتدت ثلاثة أبعاد فضائية وبعد واحد زمني حتى
وصلت إلى مداها الحالي، بينما ظلت الأبعاد الفضائية الأخرى صغيرة كما هي.
وقد قدمت الأدلة التقريرية الإجابات للتساؤل لماذا نمت ثلاثة أبعاد فضائية بشكل
كبير، كما سنتنا نقاش في الفصل 14، غير انه من الإنصاف أن نقول إن هذه
التفسيرات ليست إلا في مراحلها الأولى. وفي ما سيتبع، فإننا سنفترض أن كل
الأبعاد متتجعدة ما عدا ثلاثة، الأمر الذي ينطابق مع ما نراه حولنا. ومن الأهداف
الرئيسية للأبحاث الحديثة، التوصل إلى أن هذا الافتراض ينبع من النظرية نفسها.
والتساؤل الثالث، بافتراض ضرورة وجود العديد من الأبعاد الإضافية، فهل
من الممكن أن يكون بعضها أبعاداً زمانية إضافية، وليس أبعاداً فضائية إضافية؟
وإذا فكرت في ذلك للحظة، ستجد أن ذلك احتمال شاذ في الواقع. ولدينا جميعاً
إدراك غريزي لما معناه أن يكون للعالم أبعاد فضائية متعددة، حيث أنها نعيش في
عالمنا نتعامل فيه باستمرار مع ما مجموعه ثلاثة. لكن ما الذي يمكن أن يعنيه تعدد
الأزمنة؟ وهل يمكن أن يتوااءم أحد هذه الأزمنة مع الزمن كما نعرفه في الوقت
الحالي نفسيأ، فيما "يختلف" الآخر بشكل ما؟

سيصبح الأمر أكثر غرابة إذا فكرنا في وجود زمن متتجعد. فمثلاً، إذا سارت
نملة دقيقة حول بعد فضائي إضافي متتجعد على شكل دائرة، فإنها ستتجدد نفسها

تعود إلى نفس المكان مرات ومرات لأنها تسير على شكل دوائر. ويحمل ذلك بعض الغموض لأننا نألف المقدرة على العودة باختيارنا إلى نفس الموقع في الفضاء كلما رغبنا في ذلك. إلا أنه لو كان بعد المتعدد بعداً زمنياً، فإن السير فيه يعني العودة، بعد انقضاء فترة زمنية، إلى لحظة سابقة من الزمن. وهذا بالطبع يقع خارج عالم خبرتنا. فالزمن كما نعرفه بعد يمكن أن نقطعه في اتجاه واحد فقط بحتمية مطلقة، وغير قادرin إطلاقاً على العودة إلى لحظة مضت من الزمن. وطبعاً، قد يكون للأبعاد الزمانية المتعددة صفات جد مختلفة عن المألوف، فقد يكون هناك بعد زمني فسيح تتخيل أنه يعيدهنا إلى لحظة خلق العالم، ثم يتقدم ثانية إلى اللحظة الحالية. لكن وعلى عكس الأبعاد الفضائية، فإن الأبعاد الزمانية الجديدة وغير المعروفة مسبقاً قد تتطلب إعادة بناء حذتنا بشكل عظيم. استمر بعض النظريين في محاولة استكشاف إمكانية تضمين أبعاد زمانية إضافية في نظرية الأوتار، لكن لم يحسس الموقف بعد. وفي مناقشاتنا لنظرية الأوتار سنتلزم بالمنطلق الأكثر "تقليدية" والذي فيه كل الأبعاد المتعددة أبعاد مكانية، غير أن الاحتمال المثير لوجود أبعاد زمانية جديدة يمكن أن يلعب دوراً في التطورات المستقبلية.

ثامناً: المستبعات الفيزيائية للأبعاد الإضافية

بيّنت سنوات من الأبحاث، ترجع في بدايتها إلى بحث كالوزا الأصلي، أنه على الرغم من أن أي أبعاد إضافية يقترحها الفيزيائيون لا بد وأن تكون أصغر من أن "نراها" أو "تراها" أجهزتنا مباشرة (حيث أنها لم نرها)، إلا أن لها تأثيرات هامة غير مباشرة في الفيزياء التي نعرفها. وفي نظرية الأوتار، فإن هذا الارتباط بين الخواص المجهرية للفضاء والفيزياء التي نعرفها واضح بصفة خاصة.

وحتى تفهم ذلك، فإنك تحتاج إلى استرجاع أن كتلة وشحنة الجسيمات في نظرية الأوتار تتحدد بواسطة أنساق الاهتزازات الرئينة المحتملة للأوتار. تخل وترأ دقيقاً أثناء تحركه وتذبذبه، وستتيقن من أن الأنساق الرئينة ستتأثر بما يحيطه من فضاء. فكر مثلاً في موجات المحيط. وعلى اتساع المحيط الهائل المفتوح، فإن أنساق الموجات المعزولة تكون حرة نسبياً لتشكل وترتحل في أي طريق تشاء. ويشبه هذا كثيراً الأنساق الاهتزازية لوتر يتحرك خلال بعد فضائي كبير وممتد. وكما في الفصل 6، فإن وترًا مثل هذا يكون حراً أن يتذبذب في أي اتجاه ممتد آخر في آية لحظة. لكن إذا مررت موجات المحيط تلك خلال وسط فضائي أكثر ازدحاماً، فإن تفاصيل شكل الحركة الموجية ستتأثر بكل تأكيد، بعمق المياه مثلاً، وبموقع وأشكال الصخور التي ستعرضها، وبالقنوات التي ستغير المياه خلالها، وهكذا. أو

تخيل أنبوب الأرغن أو البوق الفرنسي. فالأصوات التي تحدثها كل من هاتين الآلتين نتيجة مباشرة للأنساق الرئينية لاهتزاز تيارات الهواء داخل هذه الآلات، وتتعدد هذه الأنفاق بالحجم والشكل الدقيقين للفراغ المحيط داخل الآلة التي يمر خلالها التيار الهوائي. وللأبعاد الفضائية المتجمدة نفس الواقع على الأنفاق الاهتزازية الممكنة للوتر. وحيث أن الأوتار الدقيقة تتذبذب خلال جميع الأبعاد الفضائية فإن الطريقة التي تلتقط وتتجدد بها الأبعاد الإضافية حول بعضها البعض تؤثر بشدة وتحدد بدقة أنفاق الاهتزاز الرئينية المحتملة. وتكون هذه الأنفاق، التي تتعدد إلى حد بعيد ب الهندسة الأبعاد الإضافية، مجموعة الخواص الممكنة للجسيمات التي نلاحظها في الأبعاد الممتدة المألوفة. ويعني ذلك أن " الهندسة الأبعاد الإضافية " تحدد الصفات الفيزيائية والمميزة مثل كتلة الجسيمة وشحتها التي نلاحظها في الأبعاد الثلاثة الفضائية الكبيرة العادية في حياتنا اليومية.

وهذه النقطة هامة وعميقة لدرجة أنها سعيد ذكرها بكل مشاعرنا. وتبعاً لنظرية الأوتار فإن الكون مصنوع من أوتار دقيقة تكون فيه أنفاق الاهتزاز الرئينية هي الأصل المجهري لكتلة الجسيمات وشحنتها القوى. وتتطلب نظرية الأوتار كذلك أبعاداً فضائية إضافية لا بد أن تتجدد في أحجام جد صغيرة لتطابق مع عدم رؤيتنا لها إطلاقاً لكن الوتر الدقيق يمكن أن يختبر الفضاء الدقيق. فعندما يتحرك الوتر وهو يتذبذب أثناء ذلك، فإن الشكل الهندسي للأبعاد الإضافية يلعب دوراً حرجاً في تحديد الأنفاق الرئينية للاهتزاز. ولأن أنفاق اهتزازات الوتر تظهر لنا على شكل كتلة وشحنة الجسيمات الأولية، فإننا نستنتج أن هذه الخواص الأساسية للكون تتحدد بالمقاييس الكبيرة بواسطة الحجم والشكل الهندسيين للأبعاد الإضافية. وهذه واحدة من أهم خواص نظرية الأوتار التي نتوقع لها تأثيراً بعيداً.

وحيث أن الأبعاد الإضافية تؤثر بشكل مدوٍ في الخواص الفيزيائية الأساسية للكون، فإن علينا الآن - بحماس منقطع النظير - أن نبحث عن فهم للشكل الذي عليه هذه الأبعاد المتجمدة.

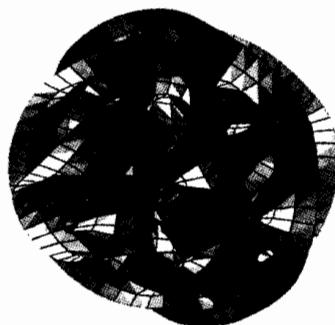
تسعاً: كيف تبدو الأبعاد المتجمدة؟

لا يمكن للأبعاد الفضائية في نظرية الأوتار أن تتجدد بأي طريقة كانت، لأن المعادلات التي تنبثق من هذه النظرية تقييد بشدة الشكل الهندسي الذي تتحذى تلك الأبعاد. وفي العام 1984، بين كل من فيليب كانديلاس من جامعة تكساس بياوستين، وغاري هوروبيتس، وأندرو سترومغر من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارا، وإدوارد ويتن، أن هناك فصيلاً معيناً من الأشكال الهندسية سدايسية الأبعاد

يمكن أن يتفق مع هذه الشروط. وتعرف هذه الأشكال باسم فراغات كالابي - ياو (Calabi-Yau Spaces) أو (أشكال كالابي - ياو) على شرف اثنين من علماء الرياضة هما يوجينيو كالابي من جامعة بنسلفانيا، وشينغ ياو من جامعة هارفارد، اللذان لعبت أبحاثهما في هذا الموضوع - قبل ظهور نظرية الأوتار - دوراً محورياً في فهم هذه الفراغات. وعلى الرغم من أن الرياضيات التي تصف فراغات كالابي - ياو معقدة ودقيقة، إلا أنها يمكن أن تأخذ فكرة عن الكيفية التي تبدو عليها عن طريق إحدى الصور⁽⁸⁾.

ونبين في الشكل رقم (8-9) مثلاً لأحد فراغات كالابي - ياو⁽⁹⁾. ولا بد من أن تأخذ في اعتبارك عند النظر إلى هذه الصورة في الشكل أنها مقيدة بحدود، حيث أنها نحاول أن نمثل شكلًا سداسي الأبعاد على ورقة ثنائية الأبعاد، الأمر الذي يشكل صعوبات واضحة. غير أن الصورة تحمل فكرة تقريرية لما قد يبدو عليه فراغ كالابي - ياو⁽¹⁰⁾.

الشكل رقم (9-8)



أحد الأمثلة لفراغ كالابي - ياو.

(8) بالنسبة للقارئ ذي الميلول الرياضية نشير هنا إلى أن مخروط كالابي-ياو هو مخروط معقد من مخروطات كاهل ذات النوع الأول من تشيرن Chern الذي يعني الاختفاء. وقد ضمن كالابي عام 1957 أن كل مخروط من هذه المخروطات يسمح بنظام ريتسي Ricci - المسطح المتري، وقد برهن ياو على ذلك في العام 1977.

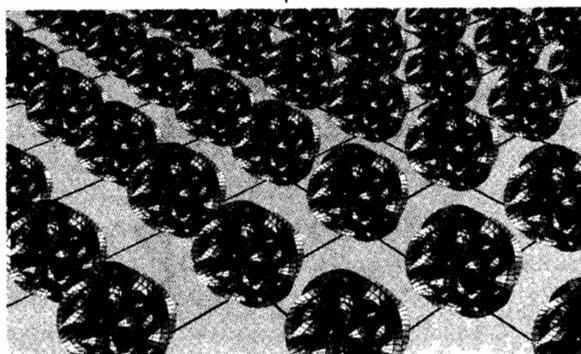
(9) هذا الشكل إهداء من أندرو هانسون من جامعة إنديانا، وقد صنع باستخدام Mathematica 3-D Graphing Package.

(10) بالنسبة للقارئ ذي الميلول الرياضية نشير إلى أن هذا الشكل من أشكال كالابي-ياو (فراغ كالابي-ياو) هو قطاع حقيقي ثلاثي الأبعاد يمر خلال سطح خماسي مفرط في إسقاط لفضاء رباعي.

وما الصورة في الشكل رقم (8-9) إلا واحدة من عشرات آلاف الأمثلة لأشكال كالابي - ياو التي تتفق مع المتطلبات الصارمة للأبعاد الإضافية التي انبثقت عن نظرية الأوتار. ومع أن هذا الشكل ينتمي لعائلة من عشرات آلاف الأعضاء، وبذا فإنه لا يبدو كاستثناء، إلا أنه يجب مقارنته مع العدد اللانهائي من الأشكال الممكنة رياضياً وبهذا المقاييس فإن فراغات كالابي - ياو تعتبر نادرة بالفعل.

وحتى تكتمل الصورة، علينا أن تخيل الآن أننا نستبدل كل الكرات في الشكل رقم (7-8) - التي تمثل بعدين متعددين - بفراغ كالابي - ياو. بمعنى أن نظرية الأوتار تزعم أنه عند كل نقطة على الأبعاد الثلاثة الممتدة والمألفة، هناك ستة أبعاد لم ترد من قبل حتى الآن، وهي متتجعدة بشدة في واحد من هذه الأشكال المعقدة كما هو مصور في الشكل رقم (8-10). وهذه الأبعاد متكاملة وتمثل جزءاً كلياً للوجود من التسييج الفضائي، فهي موجودة في كل مكان. فإذا حركت يدك على شكل قوس كبير، فإنك في الواقع لا تحرركها خلال الأبعاد الثلاثة الممتدة فقط، بل خلال هذه الأبعاد المتتجعدة كذلك. ومن الطبيعي، وأن الأبعاد المتتجعدة متناهية الصغر، أنك عندما تحرك يدك تطوف حولها عدداً هائلاً من المرات، مع العودة لنفس نقطة البداية كل مرة. ويعني مدى هذه الأبعاد المتتجعدة الضئيل أنه لا يوجد حيز للأجسام الكبيرة مثل يدك لتتحرك فيه - وينتهي الأمر بعد أن حركت يدك بأنك لم تدرك إطلاقاً ما حدث أثناء رحلتك خلال أبعاد كالابي - ياو المتتجعدة.

الشكل رقم (10-8)



تبعاً لنظرية الأوتار، للكون أبعاد إضافية متتجعدة في أحد أشكال كالابي - ياو.

وهذه سمة مذهبة لنظرية الأوتار، غير أنه إذا كنت عملي التفكير، فإن عليك أن ترجع بالمناقشة إلى الموضوع الأساسي المتماسك. والآن وبعد أن تكون لدينا إدراك أفضل عن الشكل الذي قد تبدو عليه الأبعاد الإضافية، فإن السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو ما هي الخواص الفيزيائية التي تنتج من الأوتار التي تتذبذب خلال هذه الأبعاد، وكيف يمكن مقارنة هذه الخواص بالمشاهدات التجريبية؟ وهذا هو تساؤل نظرية الأوتار الذي يساوي \$ 64000 .

الفصل التاسع

الأدلة الواضحة: بصمات التجارب

لا شيء يجلب السرور للعلماء النظريين لنظرية الأوتار أكثر من أن يقدموا بكل فخر إلى العالم قائمة تفصيلية بالتنبؤات التي تتحقق تجريبياً. وبالتأكيد، لا يمكن لأية نظرية تصف عالمنا أن تستقر قبل أن تتعرض تنبؤاتها إلى التتحقق التجريبي. ومن دون النظر لمدى حبكة الصورة التي تقدمها نظرية الأوتار، فإنها إذا لم تصف عالمنا بدقة فلن تكون لها أية قيمة أكثر من لعبة محلية مثل لعبة البرج والتنين (*Dungeons and Dragons*).

بول إدوارد ويتن بالإعلان أن نظرية الأوتار قد حققت وأكدهت بشكل درامي وتجريبي تنبؤات مثل: "لنظرية الأوتار خاصية واضحة في التنبؤ بالجاذبية"⁽¹⁾. وما كان يعنيه ويتن بذلك هو أن كلاً من نيوتون وأينشتاين قد طورا نظريتيهما عن الجاذبية لأن مشاهداتهما للعالم قد بينت لهما بوضوح أن الجاذبية موجودة، ولذا فقد تطلب الأمر تفسيراً دقيقاً ومتمشياً مع مشاهداتهما. وعلى العكس، فإن الفيزيائي الذي يدرس نظرية الأوتار - حتى لو لم يكن على دراية بالنسبة العامة بالمرة - سيتوصل للجاذبية بالتأكد في إطار الأوتار. ومن خلال نسق اهتزاز الغرافيتون عديم الكتلة المغزلي - 2 ، فإن نظرية الأوتار تخيط الجاذبية في نسيجها النظري في كل مكان. وكما قال ويتن: "إن واحدة من أعظم الحقائق على الإطلاق هي أن الجاذبية تنبع من نظرية الأوتار⁽²⁾. واعترافاً بذلك فإن هذا "التنبؤ" يمكن ويدقة أكثر تسميتها "ما بعد الحدث" ، لأن الفيزيائين قد اكتشفوا التوصيف النظري للجاذبية قبل أن يعرفوا نظرية الأوتار. وقد أشار ويتن لذلك بأنه مجرد صدفة تاريخية على كوكب الأرض. ويدفع ويتن بشيء خيالي بأنه في حضارات أخرى متقدمة في الكون، من المحتمل تماماً أن تكون نظرية الأوتار قد اكتشفت أولاً، وأن نظرية الجاذبية قد جاءت نتيجة مذهلة لذلك.

Edward Witten, "Reflections on the Fate of Space-time," *Physics Today* (April 1996), p. 24. (1)

(2) مقابلة مع إدوارد ويتن، 11 أيار / مايو 1998.

وبيما أثنا مرتبطون بتاريخ العلوم على كوكبنا، فإن كثيرين يجدون أن "ما بعد الحدث" بالنسبة للجاذبية أمر غير مقنع تجريبياً لتأكيد نظرية الأوتار. وسيسعد معظم الفيزيائيين كثيراً بحدوث أحد أمرين: تبنّي صادق لا خداع فيه من نظرية الأوتار يمكن للتجريبيين التأكيد منه، أو تفسير "ما بعد الحدث" لخاصية ما للعالم (مثل كتلة الإلكترون أو وجود ثلاث عائلات للجسيمات) التي لا يوجد لها تفسير حتى الآن وستناقش في هذا الفصل إلى أي مدى ذهب العلماء النظريون لنظرية الأوتار في اتجاه هذين الهدفين.

ومن السخرية كما سرر، أنه بالرغم من أن لنظرية الأوتار المقدرة على أن تصبح أكثر النظريات التي درسها الفيزيائيون تبنّوا - النظرية التي لها المقدرة على شرح الخواص الأكثر أساسية للطبيعة - فإن الفيزيائيين لم يتمكنوا بعد من إجراء تنبؤات بالدقة الضرورية لمواجهة البيانات التجريبية. ومثل طفل تلقى هدية عيد الميلاد التي كان يحلم بها لكنه لم يستطع تشغيلها لأن بعض الصفحات قد فقدت من كليب التشغيل، فإن فيزيائيي الوقت الحالي يمتلكون الكأس المقدسة^(*) للعلوم الحديثة، لكنهم لم يتمكنوا من الكشف عن مقدرة النظرية الكاملة على التنبؤ، ولن يستطيعوا إلى أن ينجحوا في "كتابة" كليب التشغيل كاملاً إلا أنه، كما ستناقش في هذا الفصل، وبشيء من التوفيق، فإن إحدى السمات الرئيسية لنظرية الأوتار يمكن أن تحظى بتأكيد تجريبي خلال العقد القادم. وبقدر أكبر من التوفيق، فإن بصمات غير مباشرة للنظرية يمكن أن تتأكد في آية لحظة.

أولاً: إطلاق النار من أمكنة مختلفة

هل نظرية الأوتار صحيحة؟ نحن لا نعرف. فإذا كنت من أنصار عدم تقسيم قوانين الفيزياء بين تلك التي تحكم العالم الكبير وتلك التي تحكم العالم الصغير، وإذا كنت كذلك تعتقد أننا يجب ألا نستكين حتى نصل إلى نظرية مدى تطبيقاتها لانهائي غير محدود، فإن نظرية الأوتار هي الوحيدة الموجودة على الساحة. وقد تجادل بأن ذلك يلقي الضوء فقط على قصور الفيزيائيين في التخييل أكثر من بعض التفردات الأساسية لنظرية الأوتار. ربما يكون ذلك صحيحاً. وقد تجادل أكثر مثل رجل يبحث عن مفاتيحه المفقودة تحت ضوء الشارع فقط، فالفيزيائيون يحتشدون

(*) الكأس المقدسة التي شرب منها المسيح - عليه السلام - في العشاء المقدس، والتي أخذ المسيحيون فيما بعد يبحثون عنها بكل عزم (المترجم والمراجع).

حول نظرية الأوتار لمجرد أن أهواه التاريخ العلمي قد ألت شعاعاً عشوائياً واحداً من نفاذ البصيرة في هذا الاتجاه. ربما. فإذا كنت إما محافظاً نسبياً أو مغرماً بمجرد المعارضة فقد تذكر أن الفيزيائيين لا يجب أن يضيئوا الوقت على نظرية تفترض صفة جديدة للطبيعة تقل بضع مئات ملايين المليارات من المرات عن أصغر شيء يمكن اختباره تجريبياً.

إذا كنت قد تفوحت بهذه الاعتراضات في ثمانينيات القرن العشرين، عندما كانت نظرية الأوتار تسطع لأول مرة، فإن بعض أكثر الفيزيائيين احتراماً في ذلك الوقت كانوا سينضمون إليك. فمثلاً في منتصف ثمانينيات القرن العشرين قام الفيزيائي شيلدون غلاشو من جامعة هارفارد والحاصل على جائزة نوبل ومعه الفيزيائي بول جينزباغ، الذي كان وقتها في جامعة هارفارد، قاما بالاستخفاف علينا بنظرية الأوتار لعجزها عن الخضوع للتجربة:

بدلاً من المواجهة التقليدية بين النظرية والتجربة، فإن منظري نظرية الأوتار يلاحظون تناقضاً داخلياً، حيث تتحدد الحقيقة بالأناقة والتفرد والجمال. وتعتمد النظرية في وجودها على مصادفات سحرية وإلغاءات عجائبية وعلاقات بين حقول رياضيات تبدو لا علاقة في ما بينها (وربما تكون غير مكتشفة). فهل يمكن لهذه الخواص أن تكون سبباً يجعلنا نقبل نظرية الأوتار كواقع؟ وهل يمكن أن تحل الرياضيات والتواهي الجمالية محل التجربة المجردة وتتفوق عليها؟⁽³⁾

وقد قال غلاشو في مجال آخر:

نظرية الأوتار الفائقة طموحة لدرجة أنها إما أن تكون صحيحة تماماً أو خاطئة تماماً. والمشكلة الوحيدة أن الرياضيات المستخدمة فيها جديدة وصعبة للدرجة التي لن تستطيع الحكم معها بصحة أي من الاحتمالين لفترة قد تصل إلى عدة عقود.⁽⁴⁾.

وقد وصل الأمر لدرجة أن غلاشو تسأله عمما إذا كان "على أقسام الفيزياء أن تدفع مرتبات لمنظري نظرية الأوتار أو أن يسمح لهم بإفساد الطلاب سريعي

Sheldon Glashow and Paul Ginsparg, "Desperately Seeking Superstrings?", *Physics Today*, (3) (May 1986), p. 7.

Sheldon Glashow, in: *The Super World I: Proceedings of the Twenty-Forth Course of the International School of Sub Nuclear Physics on the Super World, Held August 7-15, 1986, In Erice, Sicily, Italy*, The Sub Nuclear Series; 24, Edited by Antonio Zichichi (New York: Plenum, 1990), p. 250.

التأثير، محذراً بأن نظرية الأوتار ستنتهي بالعلوم، تماماً مثلما فعلت الدراسات اللاهوتية أثناء العصور الوسطى.⁽⁵⁾

وقد أعلن ريتشارد فينمان بوضوح قبل وفاته بوقت وجيز أنه لا يعتقد أن نظرية الأوتار هي العلاج الفريد للمشاكل التي احتملت بالتزاوج المتجلانس بين الجاذبية وميكانيكا الكم - وبالذات تلك اللانهائيات الضارة:

إنني أشعر - وقد أكون مخطئاً - أن هناك أكثر من طريقة لتنزع جلد قط. ولا أعتقد أن هناك طريقة واحدة فقط للتخلص من اللانهائيات. وحقيقة أن نظرية ما تخلص من اللانهائيات بالنسبة لي ليست سبباً كافياً للاعتقاد في تفردها⁽⁶⁾.

كما كان هوارد جيورجي الزميل المتميز لغلاشوا في جامعة هارفارد وأحد معاونيه، من أعلى الأصوات نقداً لنظرية الأوتار في أواخر ثمانينيات القرن العشرين، حيث قال:

إذا سمحنا لأنفسنا بأن نُخدع بالقول الساحر عن التوحد "النهائي" على مسافات من الصغر بحيث يعجز أصدقاؤنا التجربيون عن مساعدتنا، فإننا سنكون في موقف صعب، لأننا سنفقد العملية الهامة التي نهذب بها الأفكار غير المناسبة والتي تميز بها الفيزياء من أنشطة بشرية أخرى عديدة وأقل إثارة⁽⁷⁾.

وكما هو الحال بالنسبة لمواضيع كثيرة ذات أهمية كبيرة، فكما أن هناك من يقول لا، فإن هناك المؤيدون للمتحمسين. فعندما علم ويتن كيف تضمن نظرية الأوتار الجاذبية وميكانيكا الكم معاً، قال: "إنها أعظم إنجاز ذهني" في حياته⁽⁸⁾. وقد قال كومرون فافا وهو أحد الرواد المنظرين لنظرية الأوتار بجامعة هارفارد إن نظرية الأوتار توضح بكل تأكيد أعمق المفاهيم عن الكون، كما لم نحظ بها من قبل⁽⁹⁾. كما قال موري جيل - مان الحائز جائزة نوبيل إن نظرية الأوتار

Sheldon Glashow and Ben Bova, *Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicist and the Matter of this World* (New York: Warner Books, 1988), p. 335.

Richard Feynman, in: Paul Davis and Julian Brown, eds., *Superstrings: A Theory of Everything?* (Cambridge MA: Cambridge University Press, 1988).

Howard Georgi, in: Paul Davies, ed., *The New Physics* (Cambridge MA; New York: Cambridge University Press, 1989), p. 447.

(8) مقابلة مع إدوارد ويتن، 4 آذار/مارس 1998.

(9) مقابلة مع كومرون فافا، 21 كانون الثاني/يناير 1998.

"شيء عظيم" وإنه يتوقع أن تصبح إحدى صور نظرية الأوتار نظرية كل العالم⁽¹⁰⁾.

وكما ترى، فإن الجدل حول كيفية عمل الفيزياء تغذيه الفيزياء جزئياً، والفلسفة المتميزة جزئياً. ويرغب "التقليديون" أن ترتبط الأبحاث النظرية بالمشاهدات التجريبية بشدة، وذلك في بوتقة البحث الناجحة خلال القرون القليلة الماضية بشكل كبير. غير أن البعض الآخر يعتقد أنها مستعدون أن نتعامل مع بعض المشاكل التي تقع خارج مقدرتنا التقنية على اختبارها مباشرة. وعلى الرغم من وجود الفلسفات المختلفة، فإن نقد نظرية الأوتار قد خبا خلال العقد الماضي. ويعزو غالباً ذلك إلى أمرين: الأول، أنه قد لاحظ في متتصف ثمانينيات القرن العشرين ما يلي:

كان منظرو نظرية الأوتار يزعمون بحماس وبتوتر أنهم سيجيبون عن كل أسئلة الفيزياء قريباً. ولأنهم قد أصبحوا أكثر حكمة في اندفاعهم وحماسهم، فإن الكثير من انتقاداتي خلال الثمانينيات قد أصبحت غير ذات موضوع⁽¹¹⁾.

والثاني، أنه قد أشار إلى ما يلي:

لم نقدم نحن، منظري اللا أوتار، أي جديد على الإطلاق في العقد الأخير. ولذلك فإن القول بأن نظرية الأوتار هي الوحيدة في الساحة هو قول قوي وقدر. فهناك بعض الأسئلة التي لا يمكن الإجابة عنها في إطار نظرية المجال الكمي المألوفة. الأمر الذي أصبح واضحاً جداً. فربما يمكن الإجابة عن هذه الأسئلة بأمور أخرى، والأمر الآخر الذي أعرفه هو نظرية الأوتار⁽¹²⁾.

ويعود جيورجي مرة ثانية إلى الثمانينيات، ليقول بنفس الشكل تقريراً: وفي أزمة مختلفة من بداية تاريخها، تجملت نظرية الأوتار أكثر من اللازم. وقد وجدت أثناء سنوات الاعتراف أن بعض الأفكار في نظرية الأوتار قد أدت إلى طرق مثيرة في تفكيري حول الفيزياء، وكانت مفيدة في أبحاثي.

(10) موراي جيلمان، مقتبس من كتاب: Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth Century Physics* (New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1996), p. 414.

(11) مقابلة مع شيلدون غالاش، 28 كانون الأول/ديسمبر 1997.

(12) المصدر نفسه.

وأنا أكثر سعادة الآن أن أرى الناس ينفقون وقتهم في دراسة نظرية الأوتار، حيث أتني أستطيع أن أرى كيف أن بعض الأمور المفيدة ستنتج من ذلك⁽¹³⁾.

وقد أوجز العالم النظري دافيد غروس - أحد رواد فيزياء الأوتار والفيزياء التقليدية - الموقف ببراعة بالطريقة التالية:

اعتنى أثناء تسلق جبل الطبيعة أن يكون التجربيون في مقدمة الطريق. وكنا نحن النظريين الكسالى نتبعهم. وبين الحين والآخر كانوا يركلون حجراً تجريبياً يصطدم برأوسنا. وكنا نفهم الفكرة في نهاية الأمر ونتخاذل الطريق الذي مهده التجربيون. وعندما نلحق بهم كنا نفسر لهم المنظر وكيفية وصولهم إليه. كان ذلك هو الطريق القديم السهل (على الأقل بالنسبة للنظريين) لتسلق الجبل. وتتوقع جميعاً للعودة إلى تلك الأيام. لكننا نحن النظريين قد يتحتم علينا أن نقود الآن. وهذا أمر أكثر وحشة⁽¹⁴⁾.

وليس لدى منظري نظرية الأوتار الرغبة في رحلة منفردة للوصول إلى قمة جبل الطبيعة؛ فهم يفضلون أكثر أن يشاركهم رفاقهم التجربيون في هذا الحمل وتلك الإثارة. والأمر مجرد عدم توافق تقني في حالتنا الراهنة - اضطراب في التسلسل التاريخي - فإن يقوم النظريون بمد جبال وكابلات التسلق في آخر دفعه تجاه القمة قد أصبح على الأقل جزئياً من واقع الأمور، بينما لم يصل التجربيون بعد. ولا يعني هذا أن نظرية الأوتار تنفصل في الأساس عن التجربة. والأخرى أن منظري الأوتار يعتقدون آمالاً عظيمة في أن يركلوا لأسفل "حجراً نظرياً" من طاقة فائقة من أعلى قمة الجبل إلى التجربيين الذين يعملون في معسكر القاعدة

(13) مقابلة مع هوارد جبورجي في 28 كانون الأول/ديسمبر 1997. وأثناء هذا الحوار لاحظ جبورجي أن التنفيذ العملي (التجريبي) للتبؤ بتحليل البروتون والذى انبثق أولاً من نظرية التوحد الكبرى التي صاغها هو وغلاشوا (راجع الفصل السابع)، قد لعبت دوراً واضحاً في مقاومته لاعتناق نظرية الأوتار الفاشلة. وقد أبدى بحدة ملاحظة حول أن نظريه "النظرية الموحدة الكبرى" قد طالت عالمًا ذات طاقات أعلى كثيراً من أي نظرية أخرى سابقة، وعندما ثبت أن تنبؤاتها على خطأ - عندما أدى ذلك إلى إزاحته جانبًا بشكل تلقائي - فإن اهتمامه تجاه دراسة فيزياء الطاقة العالية قد تغير بشكل فجائي. وعندما سأله ما إذا كان من الممكن أن يؤدي نجاح الإثبات التجربى لنظريته الموحدة الكبرى، لو حدث ذلك، إلى أن يندفع ليصل إلى مقياس بلانك، فإنه أجاب "أجل، من المحتمل أن ذلك كان سيحدث".

David Gross, "Superstrings and Unification," in: *Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics*, Munich, Fed. Rep. of Germany, August 4-10, 1988, Edited by R. Kotthaus and J. Kühn (Berlin; New York: Springer-Verlag, 1988), p. 329.

الأسفل. وهذا هدف أولي لأبحاثنا الراهنة حول نظرية الأوتار. وحتى الآن لم تلق أية أحجار متسرعة من القمة إلى أسفل، لكن كما سنتناقش الآن، فإن بعض حصوات واحدة تفعل ذلك الآن بكل تأكيد.

ثانياً: الطريق إلى التجربة

لن نتمكن من التركيز على الأطوال الدقيقة الضرورية لرؤية الأوتار مباشرة من دون التوصل إلى تقنية هائلة تفتح الطريق لحل هذه المعضلة. ويستطيع الفيزيائيون أن يصلوا باختباراتهم حتى المقاييس الدنيا التي تبلغ جزءاً من المليار من جزء من المليار من المتر باستخدام مسرّعات يبلغ حجمها تقريباً بضعة أميال. ويطلب فحص مسافات أصغر طاقات أكبر، الأمر الذي يعني آلات أضخم لها القدرة على تركيز هذه الطاقة على جسيمة مفردة. وحيث أن طول بلانك يبلغ حوالي 10^{17} مرة أصغر من الأشياء التي نتعامل معها في حياتنا الآن، فإننا باستخدام التقنية المتوفرة حالياً، سنحتاج إلى مسرّعات حجمه مثل حجم المجرة لنتتمكن من رؤية الأوتار المفردة. وفي الحقيقة، فإن شموبيل نوسينوف من جامعة تل أبيب، قد بين أن هذه الحسابات التقريرية المبنية على المقاييس المباشرة ربما تكون أكثر تفاؤلاً من اللازم. فلقد أشارت دراساته الأكثر دقة إلى أنها قد تحتاج إلى مسرّعات جل في حجم الكون كله. (الطاقة اللازمة لاختبار مادة عند طول بلانك تساوي تقريباً ألف كيلووات ساعة - أي متوسط الطاقة اللازمة لتشغيل جهاز تكييف الهواء لمدة مائة ساعة - وعليه فإن هذا ليس أمراً غريباً بالتحديد. لكن التحدي التقني الذي لا يقهر هو تركيز كل هذه الطاقة على جسيمة مفردة، أي على وتر مفرد (إذا كان الكونغرس الأمريكي قد ألغى تمويل المصادر الفائقة الذي يعمل بالوصلات الفائقة - مسرّعات مسرّع عجل محبيته مجرد 54 ميلاً فقط - فعليك أن تنسى أنه سيمول مسرّعاً عجلاً للاختبار عند أطوال بلانك. وإذا كنا نرغب في اختبار نظرية الأوتار تجريبياً فلا بد من البحث عن طريقة غير مباشرة. علينا أن نحدد تطبيقات المستبعنات الفيزيائية لنظرية الأوتار التي يمكن مشاهدتها عند أطوال كثيرة من طول الأوتار نفسها⁽¹⁵⁾).

وقد اتخذ كل من كانديلاس، وهورويتس، وسترومنغر، ووين الخطوات

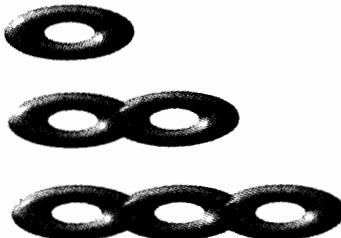
(15) إذا قلنا ذلك فإن الأمر يستحق أن نحتفظ في أذهاننا بالاحتمال الضئيل الذي أشرنا إليه في الهاشم رقم (8)، الفصل السادس حول إمكانية أن تكون الأوتار أطول بشكل ملحوظ مما كان يعتقد في الأصل، وبالتالي يمكن أن تخضع لللاحظات التجريبية مباشرة بواسطة مجلات بعد بضعة عقود من السين.

الأولى نحو هذا الهدف في بحثهم الذي أحدث دوياً هائلاً. وهم لم يكتشفوا فقط أن الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار لا بد من أن تتعجد في شكل كالابي - ياو، بل إنهم استخدموها بعض التضمينات التي جاءت بها هذه الأشكال على الأساق المحتملة لاهتزازات الأوتار. وبهذا يكونون قد توصلوا إلى نتيجة محورية ألغت بالضوء على الحلول المذهلة غير المتوقعة التي تقدمها نظرية الأوتار لمشاكل فيزياء الجسيمات التي مكث طويلاً بلا حلول.

ولنسترجع أن الجسيمات الأولية التي اكتشفها الفيزيائيون تقع في ثلاث عائلات لها نفس التنظيم، حيث تزداد كتلة الجسيمات بالتدريج من عائلة لأخرى. والسؤال المحير الذي لم يكن له أية إجابة قبل ظهور نظرية الأوتار هو: لماذا هناك عائلات؟ ولماذا ثلاثة بالذات؟ وإليك ما تفترحه نظرية الأوتار في هذا الصدد. يحتوي شكل كالابي - ياو التقليدي على ثقوب تشبه تلك الموجودة في مركز اسطوانة الفونوغراف، أو الثقوب في الكعكة أو في مجموعة من الكعكات كما هو موضح في الشكل رقم (1-9). وفي مضمون كالابي - ياو للأبعاد العليا، هناك في الواقع تنوع من أنواع مختلفة من الثقوب يمكن أن تظهر - وهي ثقوب يمكن أن تتحذّز بدورها أبعاداً متعددة ("ثقوب متعددة الأبعاد") - لكن الشكل رقم (1-9) يبيّن لنا الفكرة الأساسية. وقد اختبر عن قرب كل من كانديلاس، وهو روبيتس، وسترومنغر وويتن تأثير هذه الثقوب على الأساق المحتملة لاهتزازات الأوتار، وسرى ما اكتشفوه في ما يلي.

وهناك عائلة لتذبذبات الأوتار ذات الطاقة الأدنى ترتبط بكل ثقب في جزء الفضاء للكالابي - ياو. وحيث أن الجسيمات الأولية المألوفة لا بد من أن تقابل أساق التذبذبات ذات الطاقة الأدنى، فإن وجود الثقوب المتعددة - التي تشبه إلى

الشكل رقم (1-9)



كعكة، أو طارة مستديرة، وبينات عمومتها متعددة الثقوب.

حد ما تملك الموجودة في الكعكة المتعددة - يعني أن أنساق اهتزازات الأوتار ستقع في عائلات متعددة. فإذا كان لشكل كالابي - ياو ثلاثة ثقوب فإننا سنجد ثلاث عائلات للجسيمات الأولية⁽¹⁶⁾. وبذا فإن نظرية الأوتار تزعم أن التنظيم العائلي المشاهد تجريبياً هو مجرد انعكاس لعدد الثقوب في الشكل الهندسي الذي يحتوي أبعاداً إضافية، وليس صفة ما غير قابلة للتفسير لمصدر عشوائي أو إلهي. وهذه نتائج من النوع الذي يصيب الفيزيائين باضطراب في ضربات القلب.

وقد نظن أن عدد الثقوب في أبعاد تقارب أبعاد بلانك المتتجدة - التي تشغل قمة جبل الفيزياء من دون منازع - قد ركلت الآن إلى أسفل حجراً قابلاً للاختبار تجريبياً تجاه مستويات الطاقة المتاحة. وبعد كل ذلك فإن الفيزيائين يمكن أن يؤسسوا - وقد أسسوا بالفعل - عدد عائلات الجسيمات : 3. وللأسف فإن عدد الثقوب الموجودة في كل من عشرات آلاف أشكال كالابي - ياو المعروفة تنتشر على مدى واسع. فللبعض ثلاثة، وللبعض الآخر 4، 5، 25 وهكذا - وقد يصل عددها إلى 480 ثقباً في البعض. "والمشكلة القائمة في الوقت الحالي أن لا أحد يعرف كيف يستنبط من معادلات نظرية الأوتار أيّاً من أشكال كالابي - ياو يكون الأبعاد الفضائية الإضافية "فلو أمكننا أن نجد المبدأ الذي يسمح بانتقاء أحد أشكال كالابي - ياو من بين الاحتمالات العديدة، فمن المؤكد أن حجراً من أعلى قمة الجبل سيندفع إلى أسفل في معسكر التجاربيين. فإذا كانت معادلات نظرية الأوتار قد أفرزت شكلاً معيناً مفرداً من أشكال كالابي - ياو، وكان هذا الشكل بثلاثة ثقوب، فإننا نكون قد توصلنا بشكل مذهل من نظرية الأوتار لتفسير يشرح سمة معروفة من سمات عالمنا بدون ذلك كانت ستظل غامضة تماماً. لكن اكتشاف المبدأ الذي يمكن به اختيار الشكل المناسب من أشكال كالابي - ياو يمثل مشكلة لم تحل بعد. ومع ذلك - وهي نقطة هامة - فإننا نرى أن نظرية الأوتار تقدم إمكانية الإجابة عن هذا اللغز الأساسي من ألغاز فيزياء الجسيمات، وهو في حد ذاته تقدم محسوس.

وليس عدد العائلات إلا نتيجة تجريبية للأشكال الهندسية للأبعاد الإضافية. ومن خلال تأثيرها في الأنساق المحتملة لاهتزازات الأوتار، فإن النتائج الأخرى

(16) بالنسبة للقارئ ذي الميل الرياضية، نشير إلى أن أكثر المقولات الرياضية دقة هي أن عدد العائلات هو نصف القيمة المطلقة لعدد يولر (Euler) في فراغات كالابي-ياو (أشكال كالابي-ياو). وعدد يولر هو المجموع التبادلي للأبعاد في المجموعات المخروطية التشكيل - والأخيرة هي ما نشير إليه ببساطة باسم الثقوب عديدة الأبعاد. وهكذا فإن ثلاث عائلات تنتهي من عدد يولر لأشكال كالابي-ياو مساواً 6 ± .

للأبعاد الإضافية تتضمن الخواص التفصيلية للقوى وللجسيمات المادية. وكمثال أولى، فقد بينت أبحاث سترومنغر وويتن التي تلت ذلك أن كتلة الجسيمات في كل عائلة تعتمد على - ولتوقف برهة هنا، لأن الأمر خادع إلى حد ما - الطريقة التي تتقاطع وتتدخل بها حدود الثقوب متعددة الأبعاد في أشكال كالابي - ياو بعضها مع البعض. ومن الصعب أن نتخيل الأمر، لكن الفكرة تكمن في أن الأوتار تتذبذب خلال الأبعاد الإضافية المتتجعدة والتنظيم الدقيق للثقوب المختلفة والطريقة التي تتحدد بها أشكال كالابي - ياو حول هذه الأوتار، فإن لكل ذلك تأثيراً مباشراً على أنساق الاهتزازات الرئينة المحتملة. وبالرغم من صعوبة تبع التفاصيل، وأن هذه التفاصيل ليست أساسية في الواقع، فإن الأمر مهم، كما في حالة عدد العائلات، هو أن نظرية الأوتار يمكن أن تقدم لنا إطاراً للإجابة عن أسئلة مثل: لماذا للإلكترون وجزيئات أخرى الكتل التي هي عليها، والتي لم تتطرق إليها النظريات السابقة بالمرة. ومرة أخرى، ومع الاستمرار في إجراء مثل هذه الحسابات، فإن الأمر يتطلب معرفة أي بعد إضافي لفراغ كالابي - ياو نأخذه في اعتبارنا.

وتقديم المناقشة السابقة بعض الأفكار عن الكيفية التي يمكن بها يوماً ما لنظرية الأوتار أن تفسر خواص جسيمات المادة المدونة في الجدول رقم (1-1). ويعتقد منظرو نظرية الأوتار أنه سيأتي اليوم الذي يمكن فيه شرح خواص الجسيمات المراسلة للقوى الأساسية المدونة في الجدول رقم (2-1). أي أنه أثناء التواء واهتزاز الأوتار في تموتها خلال الأبعاد الممتدة والمتجعدة فإن مجموعة صغيرة من مخزون الاهتزازات الهائل تكون من تذبذبات لها حركة مغزليه 1 أو 2. وهذه هي الحالات المرشحة للاهتزازات الوترية الحاملة للقوى. وبصرف النظر عن شكل فراغ كالابي - ياو فإن هناك نسقاً اهتزازيًّا واحداً ليس له كتلة، لكن حركته المغزليه = 2، ونطلق على هذا النسق اسم الغرافيتون. وتعتمد القائمة الدقيقة لجسيئات المراسلة ذات الحركة المغزليه 1 - عددها وشدة القوى التي تنقلها والتناظرات القياسية التي تخضع لها - بصورة جوهرية على الشكل الهندسي الدقيق للأبعاد المتتجعدة. وهكذا، ومرة ثانية، نصل إلى التتحقق من أن نظرية الأوتار تقدم إطاراً لتفسير محتوى الجسيمات المراسلة الذي نشاهده في عالمنا، أي أنه يشرح خواص القوى الأساسية، ولكن من دون معرفة شكل كالابي - ياو الذي تتجعد فيه الأبعاد الإضافية بالضبط، فإننا لا يمكن أن نتوصل إلى أي تنبؤات مؤكدة أو تفسيرات لما اكتشف مسبقاً (بخلاف ملاحظات ويتن حول التفسير اللاحق للجاذبية).

لماذا لا يمكننا أن نحدد أي شكل من أشكال كالابي - ياو هو "الصحيح"؟ ويعزو معظم منظري نظرية الأوتار ذلك إلى عدم ملاءمة الأدوات النظرية المستخدمة حالياً في تحليل نظرية الأوتار. وكما سنتناقش بشيء من التفصيل في الفصل 12، فإن الإطار النظري لنظرية الأوتار معقد بدرجة كبيرة حتى أن الفيزيائيين لم يتمكنوا إلا من إجراء حسابات تقريرية فقط من خلال ترتيبات تعرف باسم نظرية الاضطرابات (Perturbation Theory). وفي هذا المخطط التقريبي، يقف كل شكل من أشكال كالابي - ياو المحتملة على قدم المساواة مع الأشكال الأخرى، أي لا ينفرد أي واحد منها في الأساس عن طريق المعادلات. وحيث أن النتائج الفيزيائية لنظرية الأوتار تعتمد بشكل حساس على الشكل الدقيق للأبعاد المتعددة، من دون المقدرة على انتقاء أي من فراغات كالابي - ياو من بين الكثيرة الأخرى، فإنه لا يمكن صياغة استنتاجات محددة قابلة للاختبار تجريبياً. والقوى الدافعة وراء الأبحاث هذه الأيام هي تطوير طرق نظرية تتفوق على المنطلق التقريبي، على أمل أن يقودنا ذلك يوماً ما إلى شكل متفرد من أشكال كالابي - ياو للأبعاد الإضافية، وهذا بالإضافة لميزات أخرى. وسنقوم بمناقشة ما يحرز من تقدم في هذا الاتجاه في الفصل 13.

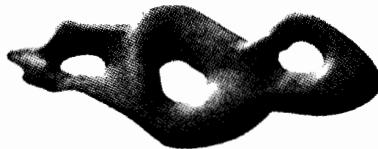
ثالثاً: الاحتمالات الكلية

وهكذا، فإنك قد تتساءل: حتى مع عدم مقدرنا حتى الآن على اختيار أي شكل من أشكال كالابي - ياو الذي تنتقيه نظرية الأوتار، فهل هناك اختيار يعطي خواص فيزيائية تتطابق مع تلك التي نشاهدها؟ وبمعنى آخر، إذا كان علينا أن نستخرج الصفات الفيزيائية المناسبة والمصاحبة لكل واحد من أشكال كالابي - ياو ثم نجمعها جميعاً في كatalog عملاق، فهل ترى سبباً واحداً منها يتفق مع الواقع؟ وهذا سؤال هام، لكن من الصعب الإجابة عنه إجابة شافية لسبعين رئيسيين.

ومن المناسب أن نبدأ بالتركيز على أشكال كالابي - ياو التي تعطي ثلاث عائلات. وسيؤدي ذلك إلى اختزال قائمة الاختيارات الهامة بشكل واضح على الرغم من أن الكثير سيتبقى. وفي الحقيقة، لاحظنا أنها نستطيع أن نعيد تشكيل الكعكة متعددة الثقوب من أحد الأشكال إلى عدد من الأشكال الأخرى - وفي الواقع عدد لا يحصى من التشكيلات - من دون تغيير عدد الثقوب التي تحتويها. ونوضح في الشكل رقم (9-2) أحد هذه الأشكال التي أعيد تشكيلها من أسفل الشكل رقم (9-1). وبنفس الطريقة يمكن أن نبدأ بفراغ كالابي - ياو ذي

الثلاثة ثقوب لتعيد تشكيله بهدوء من دون أن نغير عدد الثقوب، ومرة أخرى من خلال عدد لانهائي من الأشكال المتتالية. (عندما ذكرنا سابقاً أن هناك عشراتآلاف الأشكال من أشكال كالابي - ياو، فإننا كنا بالفعل نجمع معاً كل تلك الأشكال التي يمكن أن تتغير بعضها إلى البعض الآخر عن طريق مثل تلك التفسيرات الهادئة في التشكيل ، وكنا نعتبر أن كل المجموعة عبارة عن فراغ كالابي - ياو واحد). وتكون المشكلة في أن الخواص الفيزيائية التفصيلية لتذبذبات الأوتار وكتلتها وردود فعلها تجاه القوى تتأثر كثيراً بمثل هذه التغييرات التفصيلية في الشكل، لكن ومرة أخرى فإنه ليس لدينا وسائل انتقاء احتمال ما أكثر من الآخر. حتى لو استعان أساتذة الفيزياء بأعداد كبيرة من طلاب الدراسات العليا، فليس من المحتمل التوصل إلى الفيزياء المعبرة عن القائمة اللانهائية للأشكال المختلفة.

الشكل رقم (2-9)



شكل كعكة متعددة الثقوب يمكن إعادة تشكيلها في أشكال كثيرة، ويوضح الشكل واحداً منها، من دون تغيير عدد الثقوب التي تحتويها.

وقد أوصل هذا التقين منظري نظرية الأوتار إلى أن يختبروا فيزياء عينة من أشكال كالابي - ياو المحتملة. وحتى هنا لم تسر الأمور كما يجب. فالمعادلات التقريبية التي يستخدمها منظرو نظرية الأوتار حالياً ليست بالقدرة الكافية لاستخلاص الفيزياء اللازمة لاختيار شكل من أشكال كالابي - ياو بصورة كاملة. ويمكن لهذه المعادلات أن تساعدنا بطريقة لا بأس بها في فهم خواص اهتزازات الأوتار، التي نأمل أن تتمشى مع الجسيمات التي نشاهدها. لكن الاستنتاجات الفيزيائية المحددة والدقيقة، مثل كتلة الإلكترون أو شدة القوى الضعيفة، تتطلب معادلات أكثر دقة بكثير عن تلك التقريبية المتاحة حالياً. ولنسترجع من الفصل السادس - وبرنامج الثمن المناسب - أن المقياس "الطبيعي" للطاقة في نظرية الأوتار هو طاقة بلانك، وأنه فقط من خلال تلاشيات في غاية الدقة يمكن لنظرية الأوتار أن تقدم أنساقاً اهتزازية لها كتلة في حدود كتلة المادة المعروفة وجسيمات

القوة تتطلب التلاشيات الدقيقة حسابات دقيقة، لأنه حتى الأخطاء الصغيرة قد تؤدي إلى تأثيرات مدوية في دقة النتائج. وكما سمعنا في الفصل 12، ففي منتصف تسعينيات القرن العشرين أحرز الفيزيائيون تقدماً ملحوظاً نحو التغلب على المعادلات التقريرية الحالية، إلا أنه ما زال الطريق أمامهم طويلاً.

وهكذا، أين نقف نحن؟ فحتى مع عدم وجود خصائص أساسية، الأمر الذي يمثل حجر عثرة، يمكن بها انتقاء شكل واحد فقط من أشكال كالابي - ياو الضرورية لاستخلاص نتائج المشاهدة لمثل هذا الاختيار بشكل تام، فإننا ما زلنا نتساءل ما إذا كان هناك أي اختيار من كتالوج كالابي - ياو يصلنا إلى عالم يتفق ولو تقريباً مع مشاهداتنا. والإجابة على هذا التساؤل مشجعة تماماً. ومع أن معظم الأشكال في كتالوغ كالابي - ياو تعطي نتائج مختلفة بوضوح عن عالمنا (أعداد مختلفة لعائلات الجسيمات وأعداد وأنماط مختلفة من القوى الأساسية، وذلك ضمن اختلافات أخرى محسوسة)، إلا أن القليل من هذه الأشكال يؤدي إلى فيزياء قريبة بشكل كيفي مما نشاهده في الواقع. ويعني ذلك أن هناك أمثلة من فراغات كالابي - ياو التي إذا اخترناها للأبعاد المتعددة التي تتطلبهما نظرية الأوتار فإنها تعطي اهتزازات للأوتار قريبة الشبه بالجسيمات في النموذج القياسي. ومن الأمور ذات الأهمية القصوى أن نظرية الأوتار تدخل قوى العجاذبية بنجاح في إطار نسيج ميكانيكا الكم.

وبمستوى فهمنا الحالى، فإن هذا الوضع هو أفضل ما كنا نأمل فيه. فإذا اتفق الكثير من أشكال كالابي - ياو ولو بصورة تقريرية مع التجارب، فإن حلقة الوصل بين اختيار معين وفيزياء التي نشاهدها ستصبح أكثر طوعية. وقد تلائم اختيارات عديدة الوضع، وبالتالي لن يتفرد أحد هذه الاختيارات حتى ولو من منظور تجريبي. ومن جهة أخرى، إذا لم يتفق ولو من بعيد جداً أحد أشكال كالابي - ياو مع الخواص الفيزيائية المشاهدة، فسيبدو أن نظرية الأوتار لا تتلاءم مع عالمنا إطلاقاً حتى ولو كانت إطاراً نظرياً رائعاً فإذا وجدت أعداد صغيرة من أشكال كالابي - ياو التي لها المقدرة ولو بشكل تقريري على تحديد التطبيقات الفيزيائية بالتفصيل، فإنها ستكون في حدود المقبول، الأمر الذي يمثل عائداً مشجعاً بدرجة كبيرة في وقتنا الحاضر.

وسيمكن تفسير خواص المادة الأولية وجسيمات القوى من بين أعظم الإنجازات العلمية، إن لم يكن أعظمها. ومع ذلك فقد نتساءل عما إذا كان هناك أي تنبؤات نظرية لنظرية الأوتار - على عكس تفسير ما سبق - يمكن للفيزيائيين

التجريبيين أن يحاولوا تأكيدها إما الآن أو في المستقبل القريب. أجل توجد مثل هذه التنبؤات.

رابعاً: الجسيمات الفائقة

وتجربنا الصعوبات النظرية، التي تمنعنا من استخلاص تنبؤات تفصيلية من نظرية الأوتار، على البحث عن السمات العامة وليس الخاصة في عالم يتكون من الأوتار. وتشير كلمة العامة هنا إلى الخصائص الأساسية - بدرجة كبيرة - لنظرية الأوتار التي لا تتأثر بتلك الخواص التفصيلية للنظرية التي ما زالت خارج نطاق مقدرتنا، إن لم تكن مستقلة عنها تماماً. ويمكن مناقشة مثل هذه الخواص بكل ثقة حتى ولو كان فهمنا للنظرية ككل منقوصاً وسنعود في الفصول التالية إلى أمثلة أخرى لكننا الآن سنركز على واحد منها، وهو التناظر الفائق.

وكما سبق أن ناقشنا، فإن الخاصية الأساسية لنظرية الأوتار هي كونها عالية التناظر، وهي لا تتضمن فقط مبادئ التناظر الحدسي ، بل إنها تتفق كذلك مع أكمل مجالات الرياضيات لهذه المبادئ، وهو التناظر الفائق. ويعني ذلك - كما ناقشنا في الفصل السابع - أن أنساق اهتزازات الأوتار تجيء في أزواج - أزواج الشركاء الفائقين - تختلف بعضها عن بعض بمقدار نصف وحدة في الحركة المغزليّة. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن بعض اهتزازات الأوتار ستعبر عن الجسيمات الأولية المعروفة. وبناءً على الأزواج فائق التناظر، فإن نظرية الأوتار تقدم تنبؤات عن أن كل جسيمة معروفة لها شريك فائق. ومن الممكن تعريف شحنات القوى التي يجب أن تحملها كل من هذه الجسيمات المشاركة الفائقة، لكننا لا نملك المقدرة في الوقت الحالي على التنبؤ بكل منها. ومع ذلك فإن التنبؤ بوجود "شركاء الفائقين" هو سمة عامة لنظرية الأوتار، وهو خاصية صحيحة للنظرية ومستقلة عن سماتها التي لم تتوصل بعد إلى إدراكها.

ولم يُشاهد أحد أبداً حتى الآن الشركاء الفائقين للجسيمات الأولية المعروفة. وقد يعني ذلك أنها لا توجد، وعليه فإن نظرية الأوتار خاطئة. لكن الكثير من فيزيائيي الجسيمات يعتقدون أن ذلك يعني أن الشركاء الفائقين ثقيلين جداً، وبالتالي فهم خارج نطاق مقدرتنا الحالية على ملاحظتهم تجريبياً. ويقوم الفيزيائيون الآن بتشييد معجل عملاق في جنيف بسويسرا يطلق عليه "صادم هادرون العظيم" (Large Hadron Collider). وتعاظم الآمال بأن تكون هذه الآلة من القوة بحيث يمكنها اكتشاف الجسيمات المشاركة الفائقة. ومن المتوقع أن يكون المعجل جاهزاً للعمل قبل سنة 2010، وبعد أن يعمل بقليل قد يتتأكد وجود

التناظر الفائق تجريبياً. وكما قال شوارتز، "يجب أن يكتشف التناظر الفائق قريباً. وعندما يحدث ذلك سيكون أمراً درامياً"⁽¹⁷⁾. غير أنه يجب أن تأخذ في اعتبارك أمرين. حتى إذا اكتشفت الجسيمات المشاركة الفائقة، فإن هذه الحقيقة وحدها لن تؤكد صحة نظرية الأوتار، وكما رأينا، وبالرغم من أن التناظر الفائق قد اكتشف نتيجة لدراسة نظرية الأوتار، إلا أنه قد ضمن كذلك بنجاح في نظريات الجسيمات النقاط، وعليه هي ليس مقصور على أصوله الوترية فقط. وبالعكس، وحتى إذا لم تكتشف الجسيمات الشركاء الفائقة بواسطة "معجل هادرون العظيم" فإن تلك الحقيقة وحدها لن تلغي وجود نظرية الأوتار، حيث أن الشركاء الفائقين قد يكونون من الثقل بحيث يصبحون خارج نطاق التعرف عليهم حتى بواسطة هذه الآلة.

خامساً: الجسيمات جزئية الشحنة

بصمة أخرى من بصمات نظرية الأوتار تتعلق بالشحنة الكهربية، وهي أقل عمومية من الجسيمات الشركاء الفائقة، لكنها درامية بنفس الدرجة. وللجسيمات الأولية في النموذج القياسي تنوع محدود من الشحنات الكهربية: فالكتواركات والكتواركات المضادة لها شحنات كهربية قيمتها ثلث أو ثنان، والقيم السالبة لهذه الكسور، بينما شحنات الجسيمات الأخرى صفر وواحد وسالب واحد. وتجمع هذه الجسيمات هو المسؤول عن كل المادة المعروفة في الكون. غير أنه في نظرية الأوتار من المحتمل وجود أنساق رينية اهتزازية تقابل الجسيمات ذات الشحنات الكهربية واضحة الاختلاف. فمثلاً يمكن أن تتحذ الشحنة الكهربية لجسيمة كسورة ذات قيم غريبة، مثل $\frac{1}{5}$ ، $\frac{1}{11}$ ، $\frac{1}{13}$ ، $\frac{1}{53}$ ، ضمن تنوع من احتمالات أخرى. وتتشاء هذه الشحنات غير العادية إذا كان للأبعاد المتعددة خاصية هندسية معينة: الثقوب ذات الخاصية الغريبة والتي تحل الأوتار التي تلفها حولها نفسها فقط بواسطة الدوران عدداً معيناً من المرات⁽¹⁸⁾. ليست التفاصيل هنا هامة بصفة خاصة، لكن يتضح أن عدد مرات الدوران الضرورية لحل الوتر، تتبدى في أنساق الاهتزاز المسموح بها عن طريق تحديد مقام الكسر في التعبير عن الشحنة.

ولبعض أشكال كالابي - ياو هذه الخاصية الهندسية، بينما ليست موجودة في البعض الآخر، ولهذا السبب فاحتمال وجود سور شحنة كهربية غير عادية

(17) حوار مع جون شوارتز في 23 كانون الأول/ديسمبر 1997.

(18) بالنسبة للقارئ ذي الميل الرياضية، نلاحظ أنها تشير إلى مخروط كالابي-ياو بمجموعة محددة غير عادية تحدد رتبتها في حالات معينة مستوى الشحنة الكسرية (مقام الشحنة الكسرية-الجزئية).

ليس أمراً عاماً مثل وجود الجسيمات الشركاء الفائقة. ومن جهة أخرى، وبينما التنبؤ بوجود الشركاء الفائقين ليس خاصية حكراً على نظرية الأوتار، فإن عقوداً من الخبرة قد أظهرت أنه لا توجد أسباب تفرض وجود مثل كسور الشحنات الكهربية - الغريبة هذه في آية نظرية للجسيمات النقاط. ويمكن إقحام هذه الكسور في نظرية الجسيمات النقاط، لكن الأمر بهذا الشكل سيبدو كالمثل المشهور عن دخول ثور في محل أطقم الصيني. ويؤدي الظهور المحتمل لكسور الشحنة هذه من الخواص الهندسية البسيطة التي يمكن أن تتصف بها الأبعاد الإضافية، إلى جعل هذه الشحنات الكهربية غير العادية بصمة تجريبية طبيعية لنظرية الأوتار.

وكما هو الحال بالنسبة للشركاء الفائقين، فإنه لم تشاهد حتى الآن مثل هذه الجسيمات غريبة الشحنة، وفهمنا لنظرية الأوتار لا يسمح بتنبؤ محدد حول الكتلة التي يجب أن تولدها الصفات الصحيحة للأبعاد الإضافية. وأحد التفسيرات لعدم رؤية الجسيمات ذات الشحنة الجزئية، مرة أخرى، هو أنه إذا وجدت، فإن كتلتها لا بد من أن تكون أكبر مما تستطيعه وسائل التقنية التي نملكها في الوقت الحالي - وفي الواقع، فمن المحتمل أن تكون كتلتها في حدود كتلة بلانك. أما إذا توصلنا يوماً إلى تجربة توصلنا لإدراك مثل هذه الشحنة الغريبة، فسيمثل ذلك دليلاً قوياً جداً على صحة نظرية الأوتار.

سادساً: بعض الاحتمالات الأبعد؟

ما زالت هناك بعض الطرق التي قد نجد فيها أدلة على صحة نظرية الأوتار. فمثلاً، أشار ويتن إلى بُعد احتمال أن يرى الفلكيون يوماً ما دليلاً مباشرأً على صحة نظرية الأوتار في البيانات التي يجمعونها من مشاهداتهم للسماء. وكما أشرنا في الفصل السادس، فإن حجم الوتر هو طول بلانك النموذجي، أما الأوتار الأعلى طاقة فيمكن لها أن تنمو أكثر بشكل محسوس. وفي الواقع، فإن طاقة الانفجار الهائل كانت من الكبر بحيث أنتجت عدداً قليلاً من الأوتار الضخمة التي من خلال التمدد الكوني قد نمت لتصل إلى مقاييس فلكية. ويمكن أن تخيل الآن أو في وقت ما في المستقبل وجود وتر من هذا النوع قد يمرق عبر السماء الليلية تاركاً بصمة لا تخطئها العين يمكن قياسها على البيانات التي يجمعها الفلكيون (مثل إزاحة صغيرة في درجة حرارة الأرضية الميكروية الإشعاعية الكونية⁽¹⁹⁾). وكما قال ويتن : " وبالرغم من أن هذا خيالي بعض الشيء، إلا أنه هو السيناريو

(19) انظر الفصل 14 من هذا الكتاب.

المفضل عندي لتأكيد صحة نظرية الأوتار، حيث لا يوجد شيء آخر يجيب عن ذلك بهذه الصورة الدرامية مثل مشاهدة الور بالتلسكوب⁽²⁰⁾.

وبوافية أكثر، فإن هناك بصمات تجريبية محتملة أخرى لنظرية الأوتار قد طرحت. وسنسرد هنا خمسة أمثلة على ذلك. الأول، لاحظنا في الجدول رقم (1-1) أننا لا نعرف هل النيوترينوات خففة جداً أم أنه ليس لها كتلة بالمرة. ووفقاً للنموذج القياسي فإنها عديمة الكتلة، ولكن لا يوجد أي سبب لذلك بالمرة. والتحدي الذي يواجه نظرية الأوتار هو أن تقدم لنا تفسيراً مقنعاً للبيانات حول النيوترينوات حالياً ومستقبلاً، وبصفة خاصة إذا أظهرت التجارب في النهاية أن للنيوترينوات كتلة ضئيلة جداً لكنها ليست صفراء. الثاني، هناك بعض العمليات الافتراضية والتي لا يسمح بها النموذج القياسي، لكن قد تسمح بها نظرية الأوتار. ومن بين هذه الافتراضات التفكك المحمول للبروتون (لا تقلق، فإن كان مثل هذا التفكك صحيحاً فإنه سيحدث ببطء شديد) والطفرات والتحولات المحتملة لتجمعات الكواركات المختلفة، في تعارض مع الخواص المستقرة منذ زمن طويل لنظرية مجال الكم للجسيمات النقاط⁽²¹⁾. وهذه الأنواع من العمليات شديدة بصفة خاصة لأن عدم وجودها في النظريات المتفق عليها يجعلها إشارات حساسة للفيزياء لا يمكن احتسابها إلا باللجوء إلى مبادئ نظرية جديدة. ويرصد آية واحدة من هذه العمليات، فإن ذلك يقدم أرضاً خصبة لنظرية الأوتار لتقدم بدورها تفسيراً. أما السبب الثالث، فهناك أنساق معينة لاهتزازات الأوتار يمكن أن تساهم بفاعلية في مجالات قوى جديدة بعيدة المدى ودقيقة، وهذا في حالة اختيارات معينة لأشكال كالابي - ياو. ولو تم اكتشاف تأثيرات لمثل هذه القوى فإن ذلك سيعكس بعضاً من الفيزياء الجديدة لنظرية الأوتار. والسبب الرابع، وكما سنلاحظ في الفصل القادم، فقد جمع الفلكيون أدلة عن أن مجرتنا ومن المحتمل أن يكون الكون كله يسبح في حمام من المادة المظلمة (Dark Matter) لم يتم التعرف على كنهها حتى الآن. وتقترح نظرية الأوتار، من خلال أنساقها العديدة الممكنة لlahتزاز الرئيسي، وجود عدد من الاحتمالات للمادة المظلمة، إلا أن الحكم على هذه الاحتمالات لا بد أن ينتظر النتائج التجريبية المستقبلة التي تتحقق منها الخواص التفصيلية للمادة المظلمة.

(20) حوار مع إدوارد ويتن في 4 آذار / مارس 1998.

(21) بالنسبة للذوي الخبرة، نشير إلى أن بعض هذه العمليات تنتهك قاعدة الحفاظ على عدد لبيتون، وكذلك تناظر زمن تكافؤ الشحنة العكسي . Charge-Parity-Time (CPT) Reversal Symmetry

وأخيراً، السبب الخامس لربط نظرية الأوتار بالمشاهدات يتضمن الثابت الكوني - ولنتذكر كما سبق أن ناقشنا في الفصل الثالث أن ذلك كان التعديل المؤقت الذي أدخله آينشتاين على المعادلات الأصلية للنسبية العامة ليؤكد سكون الكون (كون ستاتيكي). ومع أن ما تبع ذلك من اكتشاف أن الكون في حالة تمدد جعل آينشتاين يسحب تعديله، فقد أيقن الفيزيائيون منذ ذلك الوقت أنه لا يوجد تفسير لقيمة الثابت الكوني المساوية للصفر. ويمكن تفسير الثابت الكوني على أنه نوع من الطاقة الشاملة المخزونة في فراغ الفضاء، وعلى ذلك فإن قيمته يجب أن تكون نظرياً قابلة للحساب، وعملياً يمكن قياسها. لكن وحتى اليوم فقد أدت مثل تلك الحسابات والقياسات إلى تناقضات هائلة: أظهرت الملاحظات أن الثابت الكوني إما أن يكون صفرأً (كما اقترح آينشتاين في النهاية) أو أن تكون قيمته ضئيلة جداً؛ وتشير الحسابات إلى أن التأرجحات الكمية في فراغ الفضاء الحالي تميل إلى توليد ثابت كوني لا يساوي الصفر، وتبلغ قيمته 120 رتبة (1 متربعاً من اليمين بعدد 120 صفر) أكبر مما تسمح به التجربة! ويمثل ذلك تحدياً رائعاً وفرصة لمنطري نظرية الأوتار: هل يمكن لحسابات نظرية الأوتار أن تتفق هذه التناقضات وتفسر لماذا يكون الثابت الكوني صفرأً؟ وإذا أثبتت التجارب في النهاية أن قيمة هذا الثابت صغيرة وليس صفرأً، فهل يمكن للنظرية أن تقدم تفسيراً لذلك؟ وهل سيتمكن منظرو نظرية الأوتار من أن يرتفعوا إلى مستوى هذا التحدي - فهم لم يصلوا بعد إلى ذلك - لأنه لو حدث ذلك لأصبح لدينا دليلاً مفعماً يدعم نظرية الأوتار.

ثامناً: التثمين

يحفل تاريخ الفيزياء بأفكار تبدو لأول وهلة غير قابلة للاختبار بالمرة، لكن، ومن خلال عدد من التطورات غير المتوقعة، أمكن إخضاعها في النهاية إلى عالم التتحققات التجريبية. وما مفهوم أن المادة مكونة من ذرات، وفرضية باولي حول وجود جسيمات النيوترينو الشبح، واحتمال أن تكون السماء مرصعة بالنجوم النيوترونية والتقويب السوداء، إلا ثلاثة أفكار بارزة تمثل صحة هذه المقوله - فالأفكار التي نتقبلها الآن كلية كانت عند بدء ظهورها تبدو استغرافاً في الخيال العلمي أكثر منها سمات لحقائق علمية.

والداعم لطرح نظرية الأوتار هو على الأقل في مثل قوة أي من الأفكار الثلاثة السابقة - في الواقع فقد تُوجَّت هذه النظرية لأكثر التطورات في الفيزياء النظرية أهمية وإثارة منذ اكتشاف ميكانيكا الكم. وهي مقارنة جريئة بصفة خاصة

لأن تاريخ ميكانيكا الكم يعلمنا أن الثورات في الفيزياء يمكن أن تستغرق ببساطة عدة عقود حتى تصل إلى النضج. وبالمقارنة بمنظري نظرية الأوتار اليوم، فإن الفيزيائيين الذين أوجدوا ميكانيكا الكم كانت فرصتهم أفضل. فميكانيكا الكم، وحتى قبل أن تكتمل تماماً، كان في استطاعتها الاتصال المباشر مع النتائج التجريبية. ومع ذلك فقد استغرق الأمر قرابة ثلاثة عقود لتخرج البنية المنطقية لميكانيكا الكم إلى الوجود، كما استغرق الأمر عشرين سنة أخرى تقريباً لتضمين النسبية الخاصة كلياً في هذه النظرية. ونحن الآن نعمل على تضمين النسبية العامة فيها، وهي المهمة الأكثر تحدياً بكثير، والأكثر من ذلك، فإن هذا الأمر يجعل من الارتباط مع التجارب عملية أكثر صعوبة. وعلى عكس أولئك الذين أخرجوها النظرية الكمية إلى الوجود، فإن منظري نظرية الأوتار اليوم لا يملكون طريقة ممهداً من الطبيعة - من خلال نتائج تجريبية تفصيلية - يقودهم من خطوة إلى أخرى.

يعني ذلك أنه يمكن أن نتصور جيلاً أو أكثر من الفيزيائيين وقد أوقفوا حياتهم على دراسة وتطوير نظرية الأوتار من دون عائد يذكر من التجارب. ويعرف العدد الهائل من الفيزيائيين على مستوى العالم الذين يتبعون بحماس نظرية الأوتار أنهم يخاطرون: فالجهد الذي يستغرق حياة كاملة قد يؤدي بهم إلى نهايات منقوصة وغير حاسمة. وبلا جدال فإن التقدم النظري المحسوس سيستمر، لكن هل سيكون ذلك كافياً للتغلب على العقبات الحالية ويوصلنا إلى تنبؤات محددة وقابلة للاختبار تجريبياً؟ فهل ستؤدي الاختبارات غير المباشرة التي ناقشناها في ما سبق إلى أدلة حقيقة واضحة على صحة نظرية الأوتار؟ وتقع هذه التساؤلات في مركز اهتمام كل منظري نظرية الأوتار، لكنها كذلك أسئلة لا شيء يقال حولها في الواقع. ولن تتضح إجاباتها إلا بمرور الزمن. فالبساطة الرائعة لنظرية الأوتار، والطريقة التي يستأنس بها التناقض بين الجاذبية وميكانيكا الكم، وقدرتها على توحيد كل مكونات الطبيعة، ومقدرتها الكامنة غير المحدودة على التنبؤ، كل هذا يقدم إلهاماً ثرياً يجعل الأمر يستحق المخاطرة.

وقد دعمت هذه الاعتبارات الرائعة بصفة دائمة بواسطة مقدرة نظرية الأوتار على الكشف بشكل ملحوظ عن خصائص فيزيائية جديدة لعالم مبني على الأوتار - وهي خصائص تكشف عن تماسك عميق ورائع في عمل الطبيعة. والكثير من التغييرات الواردة أعلاه ذو عمومية لدرجة أنه بالرغم من التفاصيل غير المعروفة حالياً، فإنها ستصبح الصفات الأساسية لعالم مشيد من الأوتار. وسيكون لأكثر هذه الصفات دهشة تأثير مدوٍ على فهمنا المتتطور أبداً عن الفضاء والزمان.

القسم الرابع

نظريّة الأوتار ونسيج الزمكان

الفصل العاشر

الهندسة الكمية

في خلال ما يقرب من عقد من الزمان، قام آينشتاين وحده بإلغاء الإطار النيوتوني الذي ظل سائداً لعدة قرون، وأعطى العالم مفهوماً جديداً وعميقاً للجاذبية بصورة راديكالية. ولم يستغرق الأمر طويلاً بالنسبة للخبراء وغير الخبراء على حد سواء ليتكلموا على العبرية والبناء الأصيل لإنجازات آينشتاين في صياغته للنسبية العامة. ولكن يجب ألا نغض النظر عن الظروف التاريخية المناسبة التي ساهمت بقوة في نجاح آينشتاين. وفي مقدمة هذه الظروف كانت رؤية جورج برنارد ريمان عالم الرياضيات في القرن التاسع عشر، الذي أسس بقوّة الوسائل الهندسية لوصف الفراغات المحدبة ذات الأبعاد الاختيارية. وقد حطم ريمان قيود الأفكار الإقليدية عن الفراغ المسطح في محاضرته الافتتاحية الشهيرة عام 1854 بجامعة غوتينجن، فمهّد بذلك الطريق نحو معالجة رياضية ديمقراطية لهندسة مختلف الأسطح المحدبة. وقد كانت آراء ريمان هي نفسها التي زودتنا بالرياضيات اللازمة لتحليل الفراغات الموجة كمياً مثل تلك التي في الشكلين رقمي (4-3) و(4-6). وتظهر عبرية آينشتاين في استخدامه رياضيات ريمان وكأنها فُصّلت خصيصاً لتطبيقاتها في رؤيته الجديدة لقوى الجاذبية. وقد أعلن بجرأة أن رياضيات هندسة ريمان تتواءم تماماً مع فيزياء الجاذبية.

لكن الآن، وبعد قرن تقريباً من إنجاز آينشتاين المغربي فإن نظرية الأوتار تقدم وصفاً كمياً للجاذبية، يعدل بالضرورة من النسبية العامة عندما تتضاءل المسافات المعنية لتصل إلى طول بلانك. وحيث أن هندسة ريمان هي لب النسبية العامة فإن هذا يعني أنها لا بد أن تتمحور لتلائم بصدق الفيزياء الجديدة للمسافات القصيرة في نظرية الأوتار. وبينما تؤكد النسبية العامة على أن هندسة ريمان تصف الخواص المحدبة للكون، فإن نظرية الأوتار تؤكد على أن هذا صحيح فقط إذا اختبرنا نسيج الكون على مسافات أطول بما فيه الكفاية. وعلى مسافات قصيرة مثل طول بلانك لا بد أن يظهر نوع جديد من الهندسة، وهو النوع الذي يتوااءم مع الفيزياء الجديدة لنظرية الأوتار. ويسمى هذا الإطار الهندسي

الجديد باسم "الهندسة الكمية".

وعلى عكس حالة هندسة ريمان، لم يكن هناك لحن جاهز على رف الرياضيين يمكن أن يطوعه منظرو نظرية الأوتار في خدمة الهندسة الكمية. وبدلاً من ذلك فإن الفيزيائيين والرياضيين يدرسون الآن بهمة نظرية الأوتار ويعملون شيئاً فشيئاً أجزاء فرع جديد من الفيزياء والرياضيات. وبالرغم من أن القصة الكاملة لم تكتب بعد، فإن هذه الدراسات قد كشفت بالفعل عن الكثير من الخواص الهندسية الجديدة للزمكان نتجت من نظرية الأوتار - الخواص التي بكل تأكيد كانت ستذهل حتى آينشتاين.

أولاً: قلب هندسة ريمان

إذا قمت بالقفز فوق ترامبولين (Trampoline) فإن وزنك سيتسبب في انشائه نتيجة لتتمدد نسيجه المرن. ويكون التمدد في أقصى حالاته تحت قدميك مباشرة، بينما يكون أقل ما يمكن عند أطراف الترامبولين. وتستطيع ملاحظة ذلك بوضوح إذا كانت هناك صورة مألوفة مثل الموناليزا مرسومة على سطح الترامبولين. وعندهما يكون الترامبولين لا أحد عليه فإن صورة الموناليزا تبدو عادية، لكن عندما تقف على الترامبولين فإن الصورة ستتبعد، وبالاخص الجزء الواقع تحت قدميك كما هو موضح في الشكل رقم (10-1).

الشكل رقم (1-10)



عند الوقوف فوق ترامبولين عليه صورة الموناليزا فإن الشكل يضطرب أكثر ما يمكن تحت قدميك.

ويتفيد هذا المثال مباشرةً في صلب الإطار الرياضي لبريمان الذي يصف الأشكال الموجة. وتأسساً على الأفكار المبكرة للرياضيين كارل فريدريك جاوس (Nikolai Lobachevsky) ونيقولاي لوباتشيف斯基 (Carl Friedrich Gauss) وغانوس بولياي (Janos Bolyai) وأخرين، بين ريمان أن التحليل الدقيق للمسافات بين كل المواقع على جسم ما أو فيه تقدم وسيلة لتحديد مقدار تحديبه. وبالتقريب، فإنه كلما زاد التمدد (غير المنظم) كلما زاد الحيدور عن علامات الأبعاد على الشكل المسطح، وكلما زاد تحدب الجسم. فمثلاً يكون أقصى تمدد لترامبوليّن بالضبط تحت قدميك، ولهذا فإن علاقة المسافات بين النقاط في هذه المنطقة تصبح الأكثر اضطراباً وبذلك فإن هذه المنطقة من الترامبوليّن تكون قد عانت أكبر قدر من التحديب، ويتمشى ذلك مع ما كان متوقعاً، حيث أن ذلك هو الموضع الذي تعاني فيه الموناليزا أقصى اضطراب، الأمر الذي يؤدي إلى ملامح اقتضاب في ركن ابتسامتها الأخاذة المعتادة.

طُوئَ آينشتاين اكتشافات ريمان الرياضية بأن منتها تفسيراً فيزيائياً دقيقاً وقد بين، كما سبق أن ناقشنا في الفصل الثالث، أن تحدب الزمكان يتضمن قوى الجاذبية. ولنمنع الفكر الآن في هذه التفسيرات عن قرب أكثر. ومن وجهة نظر الرياضيات فإن تحدب الزمكان - مثل تحدب الترامبوليّن - يعكس العلاقات المضطربة للمسافات بين مواقعه. وفيزيائياً، فإن قوى الجاذبية التي يحس بها أي جسم هي انعكاس مباشر لهذا الاضطراب. وكلما جعلنا الجسم يصغر أكثر فأكثر، فإن الفيزياء والرياضيات ستتواءم أكثر وأكثر باقترابنا من التيقن من المفهوم الرياضي المجرد عن النقطة. لكن نظرية الأوتار تحد من الدقة التي يمكن بها التتحقق من الصياغة الهندسية لبريمان بواسطة فيزياء الجاذبية، لأن هناك حدأً لمدى تناهي صغر أي جسم. وب مجرد وصولك إلى الأوتار لا تستطيع أن تذهب أبعد من ذلك. ولا يوجد مفهوم تقليدي عن الجسيمة النقطة في نظرية الأوتار - وهذا هو العنصر الأساسي في مقدرة هذه النظرية على تقديم نظرية كمية للجاذبية. وبين ذلك بكل ثقة أن الإطار الهندسي لريمان، الذي يقوم أساساً على المسافات بين النقاط قد عُدل عند المقاييس المعجهرية بواسطة نظرية الأوتار.

ولهذه الملاحظات تأثير ضئيل جداً في الاستخدامات الماكروية العادية للنسبية العامة. ففي الدراسات الفلكية، على سبيل المثال، يصور الفيزيائيون المجرات على أنها نقاط، حيث أن حجمها دقيق جداً بالنسبة للكون ككل. ولهذا السبب فقد أثبتت تطبيق الإطار الهندسي لريمان، بهذه الطريقة التقريرية، أنه تقرير

دقيق جداً، كما يشهد بذلك نجاح النسبية العامة في الإطار الكوني. أما في العالم المجهري الفائق، فإن الطبيعة الممتدة للأوتار تؤكد أن هندسة ريمان لن تكون ببساطة الصياغة الرياضية الصحيحة. وبدلاً من ذلك، كما سترى الآن، لا بد أن تحل الهندسة الكمية لنظرية الأوتار محلها، مما يؤدي إلى خواص جديدة درامية وغير متوقعة.

ثانياً: الملعب الكوني

تبعاً لنموذج الانفجار الهائل في علم الكون، فإن كل العالم قد انبعث بعنف من انفجار عالمي مفرد منذ حوالي 15 مليار سنة مضت. واليوم، وكما تم اكتشافه في الأصل بواسطة هابل، فإننا يمكن أن نرى "شظايا" هذا الانفجار على شكل الميلارات الكثيرة من المجرات التي ما زالت تبتعد إلى الخارج. فالكون في حالة تمدد. ولا نعلم هل سيستمر هذا التمدد إلى الأبد أم سيأتي وقت يتباطأ عنده ثم يتوقف التمدد ليتعكس اتجاهه بعد ذلك مؤدياً إلى انهيار كوني إلى الداخل. ويحاول الفلكيون وفيزيائيو الفلك الإجابة عن هذا السؤال تجريبياً، حيث أن تلك الإجابة تكمن في شيء يمكن قياسه: متوسط كثافة المادة في الكون.

إذا تجاوز متوسط كثافة المادة ما يعرف بالثافة الحرجة (Critical Density) التي تبلغ حوالي جزء من مائة من جزء من المليار من جزء من المليار (10⁻²⁹) جرام لكل متر مكعب من الكون - فإن قوى جاذبية كبيرة بما يكفي ستحتاج الكون لتوقف ثم تعكس اتجاه التمدد. أما إذا كان متوسط كثافة المادة أقل من القيمة الحرجة، فإن شد الجاذبية سيكون من الضعف بحيث لا يستطيع إيقاف التمدد، الذي سيستمر للأبد. (وقد تظن بناء على ملاحظاتك الشخصية للكون، أن متوسط كثافة كتلة الكون تتعدى بكثير القيمة الحرجة. لكن إذا أخذت في الاعتبار أن المادة - مثل النقود - تميل إلى التجمع، وإذا استخدمنا متوسط كثافة كتلة الأرض، أو النظام الشمسي أو حتى مجرة درب ال Leone كمؤشر على كثافة العالم ككل، فإن ذلك سيكون بمثابة اتخاذ ثروة بيل غيتيس كمؤشر لمتوسط ثروة سكان الأرض. وكما أن هناك الكثير من الناس الذين تتضاعل ثروتهم مقارنة بثروة بيل غيتيس، وبالتالي تقلل بشدة من قيمة المتوسط، فإن هناك الكثير من الفضاء الفارغ بين المجرات، الأمر الذي يقلل بشكل درامي من المتوسط العام لكتافة المادة).

وبالدراسة الدقيقة لتوزيع المجرات في الفضاء، يمكن للفلكيين أن يحصروا بشكل جيد كمية المادة المرئية في الكون. وقد اتضح أن قيمتها أقل من القيمة

الحرجة بشكل ملحوظ. غير أن هناك دليلاً نظرياً وتجريبياً قوياً على أن الكون يعج بمادة مظلمة. وهذه هي المادة التي لا تساهم في عمليات الاندماج النووي التي تمد النجوم بالطاقة، وعليه فهي لا تصدر ضوءاً؛ ولذلك فهي لا تُرى بالتلسكوبات الفلكية. ولم يتمكن أحد من معرفة كنه المادة المظلمة، ولا نقول كميتها الموجودة بالضبط. وبذلك فإن قدر الكون المتعدد حالياً ما زال غير واضح.

ولنفرض جدلاً أن كثافة كتلة الكون تتعدي القيمة الحرجة، وأنه يوماً ما في المستقبل البعيد سيتوقف التمدد وسيبدأ الكون في الانهيار على نفسه إلى الداخل، وستبدأ كل المجرات في الاقتراب بعضها من البعض ببطء، وبمرور الوقت ستزداد سرعات اقترابها إلى أن تندفع جميعاً في سرعة مخيفة. ونحتاج إلى أن تخيل أن كل الكون سيقتصر إلى كتلة كونية منكمة للغاية. وكما ذكرنا في الفصل الثالث، سينكمش الكون من حجم أقصى يبلغ مليارات السنوات الضوئية إلى أن يبلغ ملابين السنوات الضوئية، مكتسباً سرعة متزايدة في كل لحظة مثل كل الأشياء عندما تنسحق معاً إلى أن تصل إلى حجم مجرة واحدة، ثم تصل إلى حجم نجم واحد، ثم إلى حجم كوكب، ثم إلى حجم برتقالة، ثم إلى حجم حبة بازلاء، ثم حجم حبة رمل، ووفقاً للنسبة العامة ستصل إلى حجم جزيء واحد، ثم حجم ذرة واحدة، ثم أخيراً تصل إلى مضغة كونية صلبة تصل إلى "لاحجم". وتبعاً للنظرية المتفق عليها فإن الكون قد بدأ انفجاره من حالة حجم مساو للصفر، وإذا كانت كتلته كبيرة بما فيه الكفاية، فإنه سيتهي بأن ينسحق إلى حالة مماثلة من الانضغاط الكوني النهائي.

غير أنه عندما تصل المسافات المعينة إلى ما يقرب من طول بلانك أو أقل، فإن ميكانيكا الكم تبطل فعل معادلات النسبية العامة، كما نعرف كلنا الآن. ولا بد بدلاً من ذلك من الاستفادة من نظرية الأوتار. وهكذا وبينما تسمح النسبية العامة لآينشتاين بالشكل الهندسي للكون أن يتضاءل اختيارياً - بنفس الطريقة بالضبط التي تسمح بها رياضيات هندسة ريمان لشكل مجرد ليتخد حجماً يصل إلى أصغر ما يمكن تخيله - فإن الأمر يقودنا لتساءل عن الكيفية التي تعدل بها نظرية الأوتار هذه الصورة. وكما سترى الآن، فإن هناك دليلاً على أن نظرية الأوتار تضع حدأً أدنى، مرة أخرى، لقياس المسافات المتاحة فيزيائياً، وتزعم بصورة جديدة تماماً أن الكون لا يمكن أن ينضغط إلى حجم أصغر من طول بلانك في أي بعد من أبعاده الفضائية.

وبناءً على الألفة التي بينك وبين نظرية الأوتار، فقد يغريك ذلك بالمخاطر

بأحد النقاط عن كيفية حدوث ذلك. وقد تجادل بعد كل ذلك بأنه لا يهم كم عدد النقاط التي تتكون بعضها فوق البعض - الجسيمات النقاط - فإن حجمها الشامل ما زال صفرًا. وعلى النقيض، لو كانت هذه الجسيمات أوتاراً بالفعل، وانهارت معاً بشكل عشوائي تماماً، فسيكون لها حجم رقعة مختلف عن الصفر، وتقربياً مثل كرة من خيوط مطاطية رفيعة لها حجم بلاك. وإذا فكرت بهذا الشكل فستكون على الطريق الصحيح، لكنك قد تفتقد سمات هامة ودقيقة عن كون نظرية الأوتار يمكن توظيفها بشكل رائع لتقترح حجماً أدنى للكون. وتؤكد هذه السمات بكل ثقة على صحة فيزياء الأوتار الجديدة التي دخلت الساحة، وعلى تأثيرها في هندسة الزمكان.

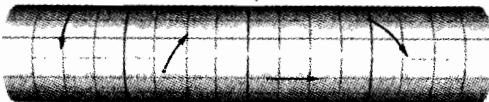
وحتى نفسر هذه الأمور الهامة، فلنستخدم مثلاً يستبعد التفاصيل العرضية من دون المساس بالفيزياء الجديدة. وبدلأً من التعامل مع كل الأبعاد العشرة للزمكان في نظرية الأوتار - أو حتى الأبعاد الأربع الممتدة للزمكان التي نألفها - لنرجع مرة أخرى إلى عالم خرطوم المياه. وقد أدخلنا هذا العالم ثالثي الأبعاد الفضائية في الأصل، في الفصل الثامن، ضمن إطار سابق لنظرية الأوتار لتفسير بعض وجهات نظر كالوزا وكلاين في عشرينيات القرن العشرين. ولنستخدم ذلك كملعب كوني لتدرис خواص نظرية الأوتار بشكل مبسط، ونسنستخدم حالاً الآراء التي اكتسبناها لحسن من فهمنا لكل ما تتطلبه نظرية الأوتار من أبعاد فضائية. وفي هذا الاتجاه فإننا نتخيل البعد الدائري لعالم خرطوم المياه الذي يبدأ رائعاً وممتلئاً ثم ينكحش إلى أحجام أصغر فأصغر، مقترباً من الأرض الخطيئة - الصورة الجزئية المبسطة للانهيار الهائل (Big Crunch).

والسؤال الذي نبحث عن إجابة عنه هو ما إذا كانت الخواص الهندسية والفيزيائية لهذا الانهيار العالمي لها سمات تختلف بجلاء بين عالم مؤسس على الأوتار وأخر مؤسس على الجسيمات النقاط.

ثالثاً: السمة الأساسية الجديدة

ليس علينا أن نذهب بعيداً في بحثنا عن فيزياء الأوتار الأساسية الجديدة. ويمكن لجسيمة نقطة تتحرك في عالم ذي بعدين أن تأتي بأنواع الحركات الموضحة في الشكل رقم (10-2): تستطيع أن تتحرك على طول البعد الممتد للخرطوم، كما أنها تستطيع أن تتحرك على طول الجزء المتوجع للخرطوم، أو تحرك حركة وسيطة بين الاثنين. وتستطيع حلقة وترية أن تتحرك بنفس الطريقة مع فارق واحد هو أنها تتذبذب أثناء حركتها على السطح، كما في الشكل رقم (10-

الشكل رقم (2-10)



حركة الجسيمات النقاط فوق اسطوانة.

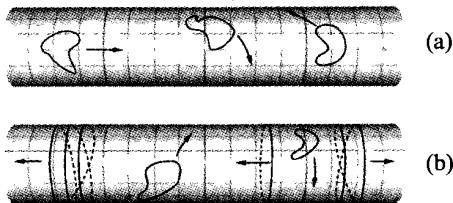
(3)، (a). وقد ناقشنا هذا التمايز من قبل بشيء من التفصيل: تذبذب الأوتار يصبح عليها صفات مثل الكتلة وشحنات القوى. ومع أن ذلك من الأمور الأساسية في نظرية الأوتار، إلا أنها ليست في مركز اهتمامنا حيث أنها قد فهمنا بالفعل تطبيقاتها الفيزيائية.

وفي المقابل، فإن اهتمامنا الحالي ينصب على اختلاف آخر بين حركة الجسيمة النقطة وحركة الوتر، وهو الاختلاف الذي يعتمد مباشرة على "شكل" الفضاء الذي يتحرك فيه الوتر. وحيث أن الوتر شيء ممتد، فإن هناك ترتيبات أخرى محتملة غير تلك التي ذكرت من قبل: فهو يستطيع أن يدور - أو يمكن القول بأنه لاسو^(*) - حول الجزء الدائري من عالم الخرطوم كما هو موضح في الشكل رقم (3-10)، (b)⁽¹⁾ وسيواصل الوتر انزلاقه وذبذبته إلا أنه سيقوم بذلك في هيئات ممتدة. وفي الواقع يستطيع الوتر أن يتلف حول الجزء الدائري للفضاء أي عدد من المرات كما هو موضح في الشكل (3-10)، (b)، وسيقوم مرة أخرى بحركة تذبذبية أثناء انزلاقه. وعندما يعالِم الوتر في مثل هذه الهيئة الملفوفة، فإننا نطلق عليه "نمط الحركة الدائرية". ومن الواضح أن وجود الوتر في نمط الحركة الدائرية ما هو إلا إمكانية كامنة في الأوتار. ولا يوجد مثل ذلك في الجسيمات النقاط. ونحن نرمي الآن إلى فهم تطبيقات هذا النوع الكيفي الجديد من حركة الوتر على الأوتار نفسها وكذلك على الخواص الهندسية للبعد الذي يدور حوله.

(*) جبل في طرفه أنشطة يستعمل في اقتناص الخيل (المترجم والمراجع).

(1) وتكللًا للموضوع، فإننا نشير إلى أنه على الرغم من أن معظم ما تطرقنا إليه حتى هذه اللحظة من الكتاب ينطبق بنفس المقدار على الأوتار المفتوحة (الوتر ذو النهايات الحرة) أو حلقات الأوتار المغلقة (الأوتار التي ركزنا عليها)، فإن الموضوع الذي سنناقشه هنا يظهر فيه نوعان من الأوتار قد يبدو أن لهما صفات مختلفة. وفي النهاية، فإن الأوتار المفتوحة لن تتشابك أو تتعقد بالاتفاق حول بعد دايري. ومع ذلك، ومن خلال الأبحاث التي لعبت دوراً حيوياً في ثورة الأوتار الفائقة الثانية، بين جو بولتشينسكي من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارا سنة 1989 واثنين من تلاميذه هما جيان-هيyo داي، وروبرت ليه، بينما كيف تتواءم الأوتار المفتوحة تماماً مع الاستنتاجات التي وجدناها في هذا الفصل.

الشكل رقم (3-10)



تستطيع الأوتار أن تتحرك فوق الاسطوانة بطريقتين مختلفتين - في هيئة غير ملفوفة، وفي هيئة ملفوفة.

رابعاً: فيزياء الأوتار الملتوية

ركزنا من خلال مناقشاتنا السابقة لحركة الأوتار على الأوتار غير الملتوية. وتشترك الأوتار الملتفة حول عالم فضائي دائري فيأغلب الخواص مع الأوتار التي درسناها. وتساهم اهتزازات هذه الأوتار، وبشدة في الخواص الظاهرية بنفس الشكل مثل تلك غير الملتوية. والاختلاف الرئيسي في حالة الأوتار الملتوية هو أن لها كتلة "دنيا" تتحدد بمقاييس بعد الدائري وعدد لفات الوتر. وتحدد الحركة التنبذية للوتر مدى المساهمة في زيادة الكتلة عن الحد الأدنى.

وليس من الصعب إدراك أصل ذلك الحد الأدنى للكتلة. ويتوقف الطول الأدنى للوتر الملفوف على محيط بعد الدائري وعدد لفات الوتر حوله. ويحدد الحد الأدنى لطول الوتر كتلته الدنيا: فكلما زاد طول الوتر زادت كتلته لزيادة حجمه. وحيث أن محيط الدائرة يتناصف مع نصف قطرها، فإن الحد الأدنى لعدد اللفات يتناصف مع نصف قطر الدائرة التي يلتف حولها الوتر. وباستخدام علاقة الكتلة بالطاقة لآينشتاين يمكن القول إن الطاقة الكامنة في الوتر الملتف تتناصف مع نصف قطر بعد الدائري. (وللأوتار غير الملفوفة كذلك حد أدنى للطفل، لأنه إذا لم يكن لها هذا الحد الأدنى، فسيعيدها ذلك إلى عالم الجسيمات النقاط. ويؤدي نفس المنطق إلى أن للأوتار غير الملفوفة كتلة دنيا قد تكون ضئيلة جداً لكنها ليست صفراء. وهذا صحيح بشكل ما، لكن تأثير ميكانيكا الكم الذي تعرضنا له في الفصل السادس - ولتتذكر "السعر المناسب" - قادر على أن يلاشي تماماً هذه المشاركة في الكتلة. ولنسترجع أن هذا هو السبب الذي يؤدي إلى أن تعطي الأوتار غير الملفوفة جسيمات لا وزن لها مثل الفوتون والغرافيتون والجسيمات الأخرى عديمة الوزن أو ذات الوزن القريب من الصفر. غير أن الأوتار الملفوفة تختلف في هذا الشأن).

كيف يؤثر وجود أشكال الأوتار الملفوفة في الخواص الهندسية للأبعاد التي تلتف حولها الأوتار؟ كانت الإجابة التي تم الاعتراف بها لأول مرة في العام 1984 غريبة وجديرة باللاحظة، وقد جاء بها الفيزيائيان اليابانيان كيجي كيكاكاو وماماسامي ياماساكى.

ولنذكر هنا آخر المراحل الكارثية في تنوعات الانهيار الهائل لعالم خرطوم المياه. وعندما يتقلص نصف قطر بعد الدائري إلى طول بلانك، وطبقاً للنسبية العامة، فإنه سيواصل تقلصه إلى أطوال أقل، غير أن نظرية الأوتار تفرض إعادة تفسير جذرية لما يحدث بالفعل. وتزعم نظرية الأوتار أن جميع العمليات الفيزيائية في عالم خرطوم المياه، حيث نصف قطر بعد الدائري أقصر من طول بلانك ومستمرة في النقصان، تتطابق تماماً مع العمليات الفيزيائية التي يكون فيها بعد الدائري أطول من طول بلانك ومستمرة في الزيادة! ويعني ذلك أنه عندما يحاول بعد الدائري أن ينهار عبر طول بلانك متوجهاً نحو أطوال أصغر، فإن هذه المحاولات لا طائل تحتها من وجهة نظر نظرية الأوتار، الأمر الذي يقلب الهندسة رأساً على عقب. وتبين نظرية الأوتار أن هذا التطور يمكن أن تعاد صياغته - بالضبط يعاد تفسيره - لأنه عندما يتقلص الأبعاد الدائرية إلى طول بلانك تبدأ في التمدد ثانية. وتعيد نظرية الأوتار كتابة قوانين الهندسة للمسافات القصيرة، فما كان يبدو سابقاً أنه انهيار عالمي تام ينظر إليه الآن على أنه ارتداد عالمي. ويمكن أن يتقلص بعد الدائري ليصل إلى طول بلانك. لكن بسبب نمط الالتفاف فإن محاولات التقلص أكثر من ذلك تؤدي في الواقع إلى تمدد. ولنر السبب في ذلك.

خامساً: طيف حالات الأوتار^(*)

ويعني الاحتمال الجديد لأنواع مختلفة أن طاقة الوتر في عالم خرطوم المياه لها مصدران: الحركة الاهتزازية، وطاقة الدوران. وتبعد لكالولزا وكلاين، يعتمد كل مصدر من هذين المصادر على هندسة الخرطوم، أي على نصف قطر المعالم الدائري المتعدد، لكن بالتواز وترى ملحوظ، حيث أن الجسيمات النقاط لا تستطيع الالتفاف حول الأبعاد. ومهمننا الأولى هي أن نحدد بالضبط كيف تعتمد مساهمة الدوران والاهتزاز في طاقة الوتر على حجم بعد الدائري. ولهذا الغرض، من المفيد فصل الحركة الاهتزازية للأوتار إلى نوعين:

(*) بعض الأفكار الواردة في هذا المقطع وفي المقاطع القليلة الآتية دقيقة إلى حد ما، ولذا لا تزعج إذا قابلت صعوبات في تتبع كل حلقة من حلقات تسلسل الشرح - وخاصة إذا قرأت الموضوع مرة واحدة (المؤلف).

الاهتزازات المتجانسة والاهتزازات العادية. وتشير الاهتزازات العادية إلى الذبذبات المعتادة التي سبق أن ناقشناها مراراً مثل تلك الموضحة في الشكل رقم (6-2)؛ أما الاهتزازات المتجانسة فتشير إلى حركة أبسط : الحركة العامة للوتر عندما ينزلق من وضع آخر من دون التغير في الشكل. وكل حركة الوتر هي مجموع الانزلاق والذبذبة - للاهتزاز المتجانس والعادي - غير أنه في العرض الحالي من الأسهل الفصل بينهما بهذا الشكل. وفي الحقيقة لن تلعب الاهتزازات العادية دوراً محورياً في تعليلاتنا، ولذلك سنأخذ تأثيرها في الاعتبار فقط بعد أن تكون قد انتهينا من شرح لب الموضوع.

سنعرض هنا الملاحظتين الرئيسيتين. الأولى هي : تتناسب عكسياً طاقات الإثارات الاهتزازية المتجانسة للوتر مع نصف قطر البعد الدائري. وهذه نتيجة مباشرة لمبدأ عدم التيقن في ميكانيكا الكم : فنصف القطر الأصغر يتحكم بإحكام أكثر في الوتر، ولذا تزداد كمية الطاقة في حركته من خلال الشعور برهبة الأماكن المغلقة وفقاً لميكانيكا الكم. وهكذا كلما نقص البعد الدائري زادت بالضرورة طاقة حركة الوتر - وهي السمة المميزة للتتناسب العكسي. الثانية، وكما وجدنا في المقطع السابق، فإن طاقة اللف تتناسب طردياً - وليس عكسيًا - مع نصف القطر. ولنتذكر أن ذلك يعود إلى أن الطول الأدنى للأوتار الملفوفة وبالتالي طاقاتها الدنيا تتناسب مع نصف القطر. وتؤكد هاتان الملاحظتين أن أنصاف الأقطار الكبيرة تعني طاقة دوران كبيرة وطاقة اهتزاز صغيرة، بينما أنصاف الأقطار الصغيرة تعني طاقة دوران أقل وطاقة تذبذب أكبر.

ويؤدي هذا إلى حقيقة أساسية : فأي نصف قطر كبير في عالم خرطوم المياه يقابله نصف قطر صغير له طاقة دوران في العالم الأول مساوية لطاقة الاهتزاز في العالم الثاني، وطاقة اهتزاز في العالم الأول مساوية لطاقة الدوران في العالم الثاني. وحيث أن الخواص الفيزيائية تعتمد على الطاقة الكلية لهيئة الوتر - وليس على كيفية تقسيم الطاقة بين دورانية واهتزازية - فليس هناك أي تمييز فيزيائي بين هذين الشكلين المختلفين هندسياً في عالم خرطوم المياه. وبذلك وللغرابة الشديدة، تدعى نظرية الأوتار أنه لا اختلاف على الإطلاق بين عالم خرطوم المياه "السمين" وعالمه "الربيع".

إنها مجموعة من الرهانات العالمية قريبة الشبه بما قد تفعله أنت كمستثمر ذكي إذا واجهت هذا الموقف المحير. تصور أنك قد علمت أن أقدار نوعين من الأسهم في بورصة وول ستريت - ولتكن مثلاً أسهم شركة إنتاج أجهزة لياقة وأسهم شركة صمامات القلب - مرتبطة بشكل وثيق. وقد تم الإغلاق اليوم بسعر

دولار واحد للسهم في كل منهما. وقد علمت من مصادر مطلعة أنه إذا زاد سعر سهم أحدهما انخفض الآخر والعكس صحيح. والأكثر من ذلك، وحيث أن مصدرك موثوق به تماماً (لكن قد يسبب ذلك تجاوزات قانونية) - وقد أخبرك أن أسعار الإغفال في اليوم التالي ستكون بالتأكيد متناسبة عكسياً فيما بينها. أي أنه إذا أصبح سعر إغفال أحدهما 2 دولار للسهم، فسيكون الآخر $\frac{1}{2}$ دولار (50 سنت)، وإذا أغلق واحد منها بسعر 10 دولارات للسهم فإن الآخر سيكون $\frac{1}{10}$ (10 سنت) للسهم، وهكذا. لكن الشيء الوحيد الذي لا يستطيع هذا المصدر أن يخبرك به هو أنه لا يعرف أيهما سيرتفع وأيهما سينخفض. فما الذي ستفعله؟

حسناً، ستدفع لاستثمار كل أموالك في البورصة بالتساوي بين الشركتين. كما ستتأكد، من إجراء بعض الحسابات، أن استثماراتك لن تخسر في اليوم التالي. ففي أسوأ الحالات ستبقى أسعار الأسهم كما هي (سيكون سعر الإغفال لكل سهم 1 دولار واحد)، لكن إذا تحرك سعر أي منها - متفقاً مع معلومات مصدرك الداخلي - سيزيد من دخلك. فمثلاً إذا ارتفع سهم شركة أجهزة اللياقة إلى 4 دولارات وكان سعر إغفال الشركة الأخرى $\frac{1}{4}$ دولار (25 سنت)، فإن القيمة المجموعية لهما هي $\frac{1}{4} \times 4$ دولار (لكل زوج من الأسهم) مقارنة بسعر اليوم السابق وهو دولاران. والأكثر من ذلك، فإنه من منطلق المحصلة النهائية، فلا يعنينا ما إذا كانت أسهم شركة أجهزة اللياقة هي التي ارتفعت وانخفضت أسهم شركة صمامات القلب أو العكس. فإذا كنت تهتم فقط بالمال فإن هذين الظرفين المختلفين لا فرق بينهما من وجهة نظر الربح.

والوضع في نظرية الأوتار يشبه ذلك حيث أن طاقة الأشكال الوترية تأتي من مصادر - الاهتزاز والدوران - مساهمتها في الطاقة الكلية للوتر مختلفة بشكل عام. لكن وكما سترى بتفصيل أكثر، فإن أزواجاً معينة من الظروف الهندسية المتباعدة - التي تؤدي إلى طاقة دوران عالية/طاقة اهتزاز منخفضة، أو طاقة دوران منخفضة/طاقة اهتزاز عالية - لا يمكن التمييز بينها فيزيائياً. وعلى عكس التشبه بالأمور المالية حيث تختلف الاعتبارات بالنسبة للشركاتين فيمكن التمييز بين نوعي أسهمهم إلى جوار المسائل المالية، أما في حالة الأوتار لا يمكن إطلاقاً التمييز بين سيناريوهات الأوتار في كل حالة.

وفي الواقع، فإننا سنرى أنه لكي نجعل التشابه مع نظرية الأوتار أكثر دقة، علينا أن نأخذ في اعتبارنا ما سيحدث لو لم توزع نقودك بالتساوي بين الشركتين، فاشترت مثلاً 1000 سهم من شركة أجهزة اللياقة و3000 سهم من شركة صمامات القلب. وهنا ستعتمد استثماراتك على أي من الشركتين ستترتفع أسعار أسهمها عند

الإغفال وأيهمما ستنخفض. فمثلاً، إذا كان سعر الإغفال 10 دولار (شركة اللياقة) و10 سنوات (شركة صمامات القلب) فإن استثماراتك الأصلية التي كانت 4000 دولار ستتصبح الآن 10300 دولار. أما إذا حدث العكس - سعر الإغفال 10 سنوات (شركة اللياقة) و10 دولار (شركة صمامات القلب) - فستصبح استثماراتك 30100 دولار - أي أكثر بكثير من الحالة السابقة.

إلا أن العلاقة العكسية بين أسعار الإغفال للسهمين تؤكد ما يلي: إذا استثمر صديق لك عكس استثماراتك "بالضبط" - أي 3000 سهم من شركة اللياقة و1000 سهم من شركة صمامات القلب - فإن قيمة رأسماله ستتصبح 10300 إذا كان سعر الإغفال في حالة الصمامات عاليًا/ واللياقة منخفضاً تماماً مثل استثماراتك في حالة اللياقة عال/ الصمامات منخفض) و30100 إذا كان سعر الإغفال لياقة عال/صمامات منخفض (ومرة ثانية تساوي استثماراتك في الوضع العكسي). أي أنه من منطلق القيمة الكلية للأسهم فإن التغير المتبادل بين أي الأسهم سيغلق مرتعاً وأيها منخفضاً يتم تعويضه بالضبط بالتغير المتبادل لعدد الأسهم التي تملكها من كل شركة.

ولنستبق هذه الملاحظات في اعتبارنا عندما نعود للحديث عن نظرية الأوتار وعن طاقات الأوتار المحتملة في حالة معينة. تخيل أن نصف قطر بعد الدائري لخرطوم المياه أكبر عشر مرات من طول بلانك مثلاً. وسنكتب هذا $R = 10$. ويمكن للوتر أن يلتف حول هذا بعد الدائري مرة أو مرتين أو ثلاث مرات وهلم جرا. ويسمى عدد مرات التتفاف الوتر حول بعد الدائري "عدد الدوران"، وتتناسب الطاقة الناتجة من الدوران، والتي تعتمد على طول الوتر الملفوف، مع حاصل ضرب نصف القطر في عدد الدوران. وبالإضافة إلى ذلك، وبالنسبة لأي كمية من الدوران، فإن الوتر يستطيع القيام بالحركة الاهتزازية. وبما أن الاهتزازات المتتجانسة، موضع تركيزنا الآن، لها طاقات تتناسب عكسياً مع نصف القطر، فإنها تتناسب طردياً مع العدد الصحيح لمضاعفات مقلوب نصف القطر - $\frac{1}{R}$ - الذي هو في هذه الحالة $= \frac{1}{10}$ طول بلانك⁽²⁾.

(2) إذا كنت تعجب لماذا كانت الطاقة الاهتزازية المتتجانسة الممكنة مضاعفات أعداد صحيحة لـ $\frac{1}{R}$ ، فإن ما تحتاجه هو أن تسترجع المناقشات حول ميكانيكا الكم - موضوع مخزن البضائع بصفة خاصة - في الفصل الرابع. وقد تعلمنا من ذلك أن ميكانيكا الكم تعني أن الطاقة مثل القمر تجيء في فئات محددة: مضاعفات صحيحة لفئات مختلفة من الطاقة. وفي حالة الحركة الاهتزازية المتتجانسة للأوتار في عالم خرطوم المياه، فإن هذه الفئات من الطاقة هي بالضبط $\frac{1}{R}$ ، كما عرضنا في المتن مستخدمين مبدأ عدم التيقن. وهكذا فإن الطاقة الاهتزازية المتتجانسة مضاعفات صحيحة لـ $\frac{1}{R}$.

وكما ترى فإن هذا الوضع مشابه إلى حد بعيد لما ذكرناه عن بورصة وول ستريت، حيث أعداد الدوران والاهتزاز مماثلة بشكل مباشر لأسهم الشركاتين، حيث $R = \frac{1}{R}$ تشابه أسعار إقفال أسهم الشركاتين. والآن وكما أنك تستطيع بسهولة أن تحسب القيمة الكلية لاستثماراتك من أعداد أسهم كل شركة وسعر إقفالها، فإنه يمكن حساب طاقة الوتر الكلية عن طريق عدد الاهتزاز وعدد الدوران ونصف القطر. ونقدم في الجدول رقم (10-1) قائمة جزئية من هذه الطاقات الكلية لأشكال وتربة مختلفة، التي نعرفها بأعداد الدوران وأعداد الاهتزاز، في عالم خرطوم المياه ذي نصف القطر $R = 10$.

والقائمة الكاملة للطاقات ستكون لانهائي الطول حيث أن أعداد الدوران والاهتزاز يمكن أن تتخذ قيمًا اختيارية صحيحة، غير أن هذه العينة من القائمة تكفي لنقاشتنا. وترى من القائمة ومن ملاحظاتنا أننا في وضع طاقة دوران عالية/طاقة اهتزاز منخفضة: فطاقة الدوران تأتي من مضاعفات 10، أما طاقة الاهتزاز فتأتي من مضاعفات العدد الأقل $\frac{1}{10}$.

تخيل الآن أن نصف قطر بعد الدوراني يتقلص مثلاً من 10 إلى 2.9 ثم إلى 2.7 وهكذا، إلى أن يصل إلى 4.3 ثم 2.2 ثم 1.1 ثم 7.0 حتى يصل إلى 1.0 $(\frac{1}{10})$. حيث لغرض مناقشتنا الحالية سنتوقف. وفي هذا الشكل الهندسي المتميز في عالم خرطوم المياه، يمكننا أن نجمع جدولًا مشابهًا لطاقات الوتر: ستصبح هنا طاقات الدوران مضاعفات للعدد ، بينما ستصبح طاقات الاهتزاز مضاعفات معكوس هذا العدد أي 10. وبين الجدول رقم (10-2) هذه النتائج.

ولأول وهلة قد يبدو الجدولان مختلفين. لكن إذا اختبرنا ذلك عن قرب أكثر فسنكتشف أنه على الرغم من الترتيب المختلف، فإن عمود "طاقة الكلية" في كلا الجدولين له نفس البداية ونفس النهاية. ولإيجاد المدخل المناظر في الجدول رقم (10-2) لأي مدخل نختاره في الجدول رقم (10-1)، فإننا ببساطة نقوم بتبادل أعداد الاهتزاز وأعداد الدوران. أي أن مساهمات الاهتزاز والدوران تلعب دوراً مكملاً من بعض البعض عندما يتغير نصف قطر بعد الدائري من 10 إلى $\frac{1}{10}$. وهكذا، وبالنسبة لطاقات الأوتار الكلية، فليس هناك تمييز بين الأطوال المختلفة للبعد الدائري. تماماً كما في حالة تبادل لياقة عال/صممات منخفض مع صمامات عال/لياقة منخفض الذي يتم تعويضه بالضبط بالتبادل في عدد الأسهم لكل شركة، فإن تبادل نصف القطر من 10 إلى $\frac{1}{10}$ يتعادل بالضبط بواسطة تبادل أعداد الاهتزاز وأعداد الدوران. والأكثر من ذلك، فلغرض التبسيط قمنا بالتركيز على

القيمة الأصلية لنصف القطر $R = 10$ و مقلوبها $= \frac{1}{10}$ ، والنتيجة هي نفسها لو كنا قد اخترنا أي نصف قطر ومقلوبه⁽³⁾.

والجدولان رقمـا (10-1) و(10-2) ليسا كاملين لسبعين : الأول ، كما ذكرنا أنـا أورـدنا عدـدا قـليلاً فقط من الاحتمالات الـلانهائيـة لأعداد الدورـان / الـاهتزاز التـي يمكن أن يـتـخـذـها الـوـترـ. ولا يـسـبـبـ ذلك أـيـةـ مشـكـلـةـ - وـنـسـطـعـ أنـ نـجـعـ هـذـينـ الجـدـولـيـنـ منـ الطـوـلـ بـقـدرـ ماـ نـحـتـمـلـ ، وـفـيـ النـهـاـيـةـ سـنـجـدـ أـنـ العـلـاقـةـ بـيـنـهـمـاـ سـتـظـلـ سـارـيـةـ كـمـاـ هـيـ . وـالـسـبـبـ الثـانـيـ ، وـيـخـلـافـ طـاـقـةـ الدـوـرـانـ فـإـنـاـ لـمـ نـأـخـذـ فـيـ اـعـتـارـنـاـ إـلـاـ مـسـاـهـمـةـ الطـاـقـةـ النـاتـجـةـ مـنـ حـرـكـةـ الـاهـتزـازـ الـمـتـجـانـسـةـ لـلـوـتـرـ. وـعـلـىـ آـلـاـنـ أـنـ نـدـخـلـ الـاهـتزـازـاتـ الـعـادـيـةـ بـالـمـثـلـ ، حـيـثـ أـنـ هـذـهـ تـعـطـيـ مـسـاـهـمـاتـ إـضـافـيـةـ فـيـ طـاـقـةـ الـوـتـرـ الـكـلـيـةـ وـتـحـدـدـ كـذـلـكـ شـحـنـاتـ الـقـوـىـ التـيـ تـحـمـلـهـاـ الـأـوـتـارـ. وـعـلـىـ كـلـ فـيـ الـجـدـولـيـنـ رـقـمـيـ (10-1) وـ(10-2) ، فـإـنـ الـجـدـولـيـنـ كـانـاـ سـيـظـلـانـ مـعـبـرـيـنـ تـامـاـ ، حـيـثـ أـنـ مـسـاـهـمـاتـ الـاهـتزـازـيـةـ الـعـادـيـةـ تـؤـثـرـ بـنـفـسـ الـقـدـرـ تـامـاـ فـيـ كـلـ جـدـولـ. وـلـهـذـاـ فـإـنـاـ نـسـتـنـتـجـ أـنـ كـتـلـةـ وـشـحـنـةـ الـجـسـيـمـاتـ فـيـ عـالـمـ خـرـطـومـ الـمـيـاهـ ذـيـ نـصـفـ الـقـطـرـ R مـساـوـيـةـ تـامـاـ لـتـلـكـ فـيـ عـالـمـ الـخـرـطـومـ التـيـ لـهـاـ نـصـفـ الـقـطـرـ $\frac{R}{2}$. وـحـيـثـ أـنـ هـذـهـ الـكـتـلـ وـشـحـنـاتـ الـقـوـىـ تـحـكـمـ الـفـيـزـيـاءـ الـأـسـاسـيـةـ ، فـلـيـسـ هـنـاكـ وـسـيـلـةـ لـلـتـميـزـ بـيـنـ هـذـينـ الـعـالـمـيـنـ الـهـنـدـسـيـنـ الـمـتـمـاـيـزـيـنـ. وـلـكـلـ تـجـربـةـ يـمـكـنـ الـقـيـامـ بـهـاـ فـيـ أـحـدـ الـعـالـمـيـنـ هـنـاكـ تـجـربـةـ مـنـاظـرـةـ يـمـكـنـ الـقـيـامـ بـهـاـ فـيـ عـالـمـ الثـانـيـ مـؤـديـةـ إـلـىـ نـفـسـ النـتـائـجـ بـالـضـبـطـ.

(3) وـرـياـضـيـاـ ، يـشـأـ التـطـابـقـ بـيـنـ طـاـقـاتـ الـأـوـتـارـ فـيـ عـالـمـ لـهـ بـعـدـ دـاـئـريـ نـصـفـ قـطـرـهـ R أوـ $\frac{R}{2}$ مـنـ حـقـيقـةـ أـنـ صـيـغـةـ الـطاـقـةـ هـيـ $wR + \frac{v^2}{R}$. حـيـثـ v هـيـ عـدـدـ الـاهـتزـازـاتـ ، وـ w عـدـدـ الـلـفـاتـ. وـهـذـهـ الـمـعـادـلـةـ ثـابـتـةـ الـكـمـيـةـ فـيـ ظـرـوفـ الـتـبـادـلـ الـلـحـظـيـ بـيـنـ v ، w وـبـالـمـثـلـ بـيـنـ R ، $\frac{1}{R}$ - أـيـةـ تـحـتـ ظـرـوفـ تـبـادـلـ أـعـدـادـ الـاهـتزـازـ وـالـلـتـفـافـ وـمـعـكـوسـ نـصـفـ الـقـطـرـ. وـنـحـنـ نـتـعـاملـ فـيـ مـنـاقـشـاتـنـاـ بـوـحدـاتـ بـلـانـكـ ، غـيـرـ أـنـهـ مـمـكـنـ استـخـدـامـ وـحدـاتـ أـثـرـيـةـ وـذـلـكـ بـإـعادـةـ صـيـاغـةـ مـعـادـلـةـ الـطاـقـةـ بـمـدـلـولـ $\sqrt{\alpha}$ - الـذـيـ يـعـرـفـ بـمـقـيـاسـ الـأـوـتـارـ - وـقـيمـتـهـ تـسـاويـ حـوـالـيـ طـوـلـ بـلـانـكـ 10^{33} سـمـ. وـيـمـكـنـاـ عـنـدـئـذـ أـنـ نـعـبرـ عـنـ طـاـقـاتـ الـوـتـرـ كـالـآـتـيـ $wR + \frac{v^2}{R}$ وـهـيـ ثـابـتـةـ الـكـمـيـةـ فـيـ ظـرـوفـ الـتـبـادـلـ بـيـنـ v ، w وـبـالـمـثـلـ بـيـنـ R ، $\frac{1}{R}$ حيثـ عـبـرـنـاـ عـنـ الـقـيمـتـيـنـ الـأـخـرـيـنـ بـمـدـلـولـ وـحدـاتـ مـأـلـوـفةـ لـلـمـسـافـاتـ.

الجدول رقم (1-10)

عدد الاهتزاز	عدد الدوران	الطاقة الكلية
1	1	$1/10 + 10 = 10.1$
1	2	$1/10 + 20 = 20.1$
1	3	$1/10 + 30 = 30.1$
1	4	$1/10 + 40 = 40.1$
2	1	$2/10 + 10 = 10.2$
2	2	$2/10 + 20 = 20.2$
2	3	$2/10 + 30 = 30.2$
2	4	$2/10 + 40 = 40.2$
3	1	$3/10 + 10 = 10.3$
3	2	$3/10 + 20 = 20.3$
3	3	$3/10 + 30 = 30.3$
3	4	$3/10 + 40 = 40.3$
4	1	$4/10 + 10 = 10.4$
4	2	$4/10 + 20 = 20.4$
4	3	$4/10 + 30 = 30.4$
4	4	$4/10 + 40 = 40.4$

أنماط الاهتزاز والدوران البسيطة لوثر يتحرك في عالم مبين في الشكل رقم (10-3) وله نصف قطر $R=10$. تساهم طاقات الاهتزاز بمضاعفات وطاقات الدوران بمضاعفات 10، مودية إلى الطاقة الكلية المبينة. ووحدة الطاقة هي طاقة بلانك، فمثلاً 10.1 في العمود الأخير هي 10.1 مضروبة في طاقة بلانك.

الجدول رقم (2-10)

عدد الاهتزاز	عدد الدوران	الطاقة الكلية
1	1	$10 + 1/10 = 10.1$
1	2	$10 + 2/10 = 10.2$
1	3	$10 + 3/10 = 10.3$

يتبع

1	4	$10 + 4/10 = 10.4$
2	1	$20 + 1/10 = 20.1$
2	2	$20 + 2/10 = 20.2$
2	3	$20 + 3/10 = 20.3$
2	4	$20 + 4/10 = 20.4$
3	1	$30 + 1/10 = 30.1$
3	2	$30 + 2/10 = 30.2$
3	3	$30 + 3/10 = 30.3$
3	4	$30 + 4/10 = 30.4$
4	1	$40 + 1/10 = 40.1$
4	2	$40 + 2/10 = 40.2$
4	3	$40 + 3/10 = 40.3$
4	4	$40 + 4/10 = 40.4$

كما في الجدول رقم (10-1) عدا أن نصف القطر هنا $\frac{1}{10}$.

سادساً: الجدول

عندما أصبح جورج وغريس كائنين مسطحين ذوي بعدين، فإنهمما أخذوا يعلمان أستاذين للفيزياء في كون خرطوم المياه. وبعد أن أسس كل منهما مختبره الذي يتنافس مع مختبر الآخر، أخذ كل منهما يزعم أنه قد تمكّن من تحديد البعد الدائري للخرطوم. وللغرابة، وعلى الرغم من السمعة الطيبة لكل منهما في الدقة الكبيرة للأبحاث، إلا أن نتائجهما لم تتفق مع بعض. فيزعم جورج أن نصف قطر البعد الدائري $R = 10$ عشرة أضعاف طول بلانك، فيما تزعم غريس أن نصف قطر $R = \frac{1}{10}$ أي عشر طول بلانك.

يقول جورج مخاطباً غريس: "بناء على حساباتي المبنية على نظرية الأوتار فإني أعلم أن نصف قطر البعد الدائري هو 10، ولذلك يجب أن تتوقع رؤية أوتار ذات الطاقة الواردة في الجدول رقم (10-1). ولقد أجريت العديد من التجارب مستخدماً معجل طاقة بلانك الجديد، وقد كشفت هذه التجارب أن هذه النتيجة قد تأكّدت بدقة. ولذا وبكل ثقة فإنني أعلن أن نصف قطر البعد الدائري $R = 10$ ". وقدمت غريس أثناء دفاعها عن نفسها هذه الملاحظات نفسها ما عدا أن نتائجها قد تأكّدت بالجدول رقم (10-2) في أن نصف قطر $R = \frac{1}{10}$.

وفي لمحه سريعة بينت غريس لجورج أن الجدولين في الواقع متناظران على الرغم من الترتيب المختلف لهما. أجاب جورج، المعروف جداً بأنه أبوطاً قليلاً في التفكير من غريس "كيف يكون ذلك؟ فإني أعلم أن قيم نصف القطر المختلفة تعطي قيمة محتملة مختلفة لطاقات الأوتار وشحنتها من خلال أساسيات ميكانيكا الكم وخواص الأوتار الملفوفة. فإذا اتفقنا على هذا فعلينا أن نتفق على تطابق قيمي نصف القطر !!".

أجابت غريس مستخدمة وجهة نظرها التي توصلت إليها حديثاً عن فيزياء الأوتار، "إن ما تقوله تقريباً صحيح، لكنه ليس صحيحاً تماماً. وفي العادة، من الصحيح أن قيمتين مختلفتين لنصف القطر تعطيان طاقات مختلفتين. ومع ذلك، وفي الظروف الخاصة عندما تكون قيمتا نصف القطر تتناسبان عكسياً مثل $\frac{1}{R}$ - فإن الطاقة والشحنة المسموح بهما في الواقع متناظرات. فما تسميه أنت نمط الدوران أطلق عليه أنا نمط الاهتزاز، وما تطلق أنت عليه نمط الاهتزاز أسميه أنا نمط الدوران. لكن الطبيعة لا تعنيها اللغة التي نستخدمها. وبخلاف ذلك فإن الفيزياء محكومة بخواص المكونات الأساسية - كتلة الجسيمات (طاقاتها) وشحنات القوى التي تحملها. وبصرف النظر عما إذا كان نصف القطر هو R أو $\frac{1}{R}$ ، فإن القائمة الكاملة لهذه الخواص بالنسبة للمكونات الأساسية متناظرة في نظرية الأوتار".

وفي لحظة من لحظات الإدراك الجريء، قال جورج: "أظنني قد فهمت. وبالرغم من أن الوصف التفصيلي الذي نستخدمه أنا وأنت للأوتار قد يختلف - ما إذا كانت تدور حول بعد الدائري أو هي نفسها تسلك مسلك الاهتزاز - فإن القائمة الكاملة للخواص التي تكتسبها هذه الأوتار واحدة. ولذا، وحيث أن الخواص الفيزيائية للعالم تعتمد على هذه الخواص للمكونات الأساسية، فإنه لا يمكن التمييز أو التفاضل بين أنصاف الأقطار المتناسبة عكسياً بعضها مع بعض". وكان جورج على صواب.

سابعاً: ثلاثة أسئلة

وهنا يمكن القول، "انظر، إذا كنت أنا كائناً صغيراً في عالم خرطوم المياه، فإني كنت سأقوم ببساطة بقياس محيط هذا الخرطوم بشرط قياسي، وبالتالي سأحدد نصف القطر بمن من دون أي لبس - وبدون أي مهارات. فلماذا هذا الهراء عن احتمالين لا يمكن التمييز بينهما لنصف قطر مختلفين؟ وما هو أكثر من ذلك، ألم تخل نظرية الأوتار عن الأبعاد الأقل من طول بلانك، فلماذا إذن

نتحدث عن أبعاد دائيرية لها أنصاف أقطار تمثل أجزاء من طول بلانك؟ وفي النهاية، وفي مجال الحديث عن الموضوع، فلماذا نهتم بعالم الخرطوم ذي البعدين - وما هي محصلة كل ذلك عندما نتعامل مع كل الأبعاد؟ . ولنبدأ بالإجابة عن السؤال الأخير، لأن هذه الإجابة ستضطرنا لمواجهة السؤالين الأولين.

وعلى الرغم من أن مناقشاتنا تدور حول عالم خرطوم المياه، إلا أنها قد أزمنا أنفسنا بعد فضائي واحد ممتد وأخر فضائي متعدد لمجرد التبسيط. فإذا كنا نتعامل مع ثلاثة أبعاد فضائية وستة أبعاد دائيرية - والأخيرة هي أبسط أشكال كالابي - ياو - فإننا سنصل إلى نفس التبيبة. ولكل دائرة نصف قطر، إذا تبادلت الوضع مع معكوسها^(*) فإن ذلك سيؤدي إلى عالم فيزيائي متاخر.

ومن الممكن أن نخطو بهذه التبيبة خطوة عملاقة أخرى. فنحن نلاحظ ثلاثة أبعاد فضائية في عالمنا، يمتد كل منها طبقاً للملاحظات الفلكية مسافة تقرب من 15 مليار سنة ضوئية (السنة الضوئية حوالي 6 تريليون ميل - التريليون = مليون مليون، وبذلك فإن هذه المسافة تكون حوالي 90 مليار تريليون ميل). وكما ذكرنا في الفصل 8 ما من شيء يبنينا ما الذي يوجد وراء ذلك. فنحن لا نعرف ما إذا كانت هذه الأبعاد تتواصل إلى ما لا نهاية أو ربما تتحدد على نفسها في شكل دائرة هائلة تتعدي إمكانيات أحدث التلسكوبات وأكبرها حساسية. فإذا كان الأمر الثاني هو ما يحدث فإن رجل الفضاء المسافر في الفضاء والذي يتوجه باستمرار في نفس الاتجاه سيدور حول العالم حتمياً، مثل ما فعل ماجلان في دورانه حول الأرض - وسيعود مرة ثانية إلى نقطة البداية.

ولذا فإن الأبعاد الممتدة المألوفة قد تكون في شكل دوائر وبالتالي ينطبق عليها مفهوم R و $\frac{1}{R}$ في نظرية الأوتار. وللتقرير، وإذا كانت الأبعاد المألوفة دائيرية فإن أنصاف أقطارها لا بد أن تكون في طول 15 مليار سنة ضوئية المذكورة أعلاه، والتي هي حوالي عشرة تريليون تريليون تريليون تريليون (R = $10^{61} \times 10^6$) مرة طول بلانك، وهي ترداد بتمدد العالم. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة فإن ذلك مماثل فيزيائياً للأبعاد المألوفة الدائرية ذات أنصاف الأقطار متناهية الصغر، حوالي $\frac{1}{R} = \frac{1}{10^{61}}$ = 10^{-61} مرة طول بلانك! "وهذه هي الأبعاد المألوفة والمعروفة لنا جدياً في وصف بديل جاءت به نظرية الأوتار". وفي الواقع وبأسلوب معكوس فإن هذه الدوائر الدقيقة تزداد صغرأً بمرور الزمن، حيث أنه

(*) R و $\frac{1}{R}$ (المترجم).

كلما زادت R فإن $\frac{1}{R}$ تنكمش. ويبدو الأمر وكأننا قد خرجنا من هذا المأزق العميق. كيف يمكن أن يكون هذا صحيحاً؟ وكيف يدخل إنسان طوله ستة أقدام في مثل هذا العالم المجهرى غير المعقول؟ وكيف يمكن لعالم بهذه الضائقة أن يتساوى فيزيائياً مع الامتداد الشاسع الذي نشاهده للسماءات؟ ويقودنا الأمر بعد ذلك بقوة إلى السؤال الثاني من الأسئلة الثلاثة الأصلية: كان من المفروض أن تستبعد نظرية الأوتار المقدرة على اختبار المسافات الأقل من طول بلانك. لكن إذا كان طول نصف قطر البعد الدائري R أكبر من طول بلانك، فإن معكوسه $\frac{1}{R}$ هو بالضرورة كسر من طول بلانك. وعليه ما الذي يجري؟ فالإجابة عن السؤال الأول من هذه الأسئلة الثلاثة سيلقي الضوء على سمة هامة ودقيقة للفضاء والمسافات.

ثاماً: المفاهيم المشابكة للمسافة في نظرية الأوتار

المسافة مفهوم أساسي في إدراكنا للعالم للدرجة أنه من السهل التقليل من عمق دقتها. ومع التأثير المدهش للنسبة الخاصة وال العامة في مفاهيمنا عن الزمان والمكان والسمات الجديدة النابعة من نظرية الأوتار، يقودنا كل ذلك لنكون أكثر حرصاً بشكل ما في تعريفنا للمسافة وأكثر التعريفات أهمية في الفيزياء هي تلك القابلة للتطبيق - أي التعريفات التي تقدم طريقة، على الأقل من ناحية المبدأ، لقياس أي شيء تعرفه. وبعد كل ذلك، وبصرف النظر عن كيفية تجريد المفهوم، فإن التعريف العملي القابل للتطبيق يسمح لنا بتطويع معناه للخطوات التجريبية المستخدمة لقياس قيمته.

كيف نقدم تعريفاً قابلاً للتطبيق عن مفهوم المسافة؟ والإجابة عن هذا السؤال في ضوء نظرية الأوتار مثير للدهشة حقاً ففي العام 1988 أشار الفيزيائيان روبرت براندنبرجر من جامعة براون، وكومرون فافا من جامعة هارفارد، إلى أنه لو كان شكل البعد الفضائي دائرياً، فإن هناك تعريفان للمسافة في نظرية الأوتار مختلفين لكنهما يعتمدان أحدهما على الآخر ويحدد كل منهما طريقة تجريبية محددة لقياس المسافة مبنية على المبدأ البسيط الذي ينص على أنه إذا انتقل مجس بسرعة ثابتة ومعروفة فإننا نستطيع قياس مسافة ما بتعيين الزمن اللازم لقطعها بواسطة المجس. ويتوقف الفرق بين الطريقتين على اختيار المجس المستخدم. فيستخدم التعريف الأول الأوتار غير الملفوفة حول بعد دائري، بينما يستخدم التعريف الثاني أوتاراً م ملفوفة. ونرى هنا أن طبيعة امتداد المجس الأساسي مسؤولة عن وجود تعريفين طبيعيين قابلين للاستخدام للمسافة في نظرية الأوتار. أما في نظرية الجسيم النقطة

التي لا تحتوي مفهوماً عن الدوران، فإن هناك تعرضاً واحداً من هذا النوع.

كيف تختلف نتائج كل طريقة؟ كانت الإجابة التي توصل إليها براندنبيرجر وفافا مدهشة وحقيقة. ويمكن فهم الفكرة العامة وراء هذه النتائج باللجوء إلى مبدأ عدم التيقن. فالأوتار غير الملفوفة يمكن أن تتحرك بحرية وتختبر كل محيط الدائرة، وهو الطول الذي يتناسب مع R . وتبعداً لمبدأ عدم التيقن فإن طاقات هذه الأوتار تتناسب مع $\frac{1}{R}$ (وللتذكرة العلاقة المعكوسية بين طاقة المجرس والمسافة التي يختبرها والمذكورة في الفصل 6). ومن جهة أخرى، فقد رأينا أن الأوتار الملفوفة لها طاقة دنيا تتناسب مع R ، وك مجسات للمسافة، فإن مبدأ عدم التيقن يبينا بأنها تعتمد على معكوس هذه القيمة، أي $\frac{1}{R}$. وبين المضمون الرياضي لهذه الفكرة أنه لو استخدمنا كلاً منها لقياس نصف قطر بعد دائري في الفضاء، فإن مجس الوتر غير الملفوف سيقيس R ، بينما يقيس الوتر الملفوف $\frac{1}{R}$ حيث أنها تقيس المسافات بمضاعفات طول بلانك كما ذكرنا من قبل. وتدعي نتائج كل تجربة أنها هي نصف القطر - والذي نتعلمه من نظرية الأوتار هو أن استخدام مجسات مختلفة لقياس المسافات يمكن أن يؤدي إلى نتائج مختلفة. وتنطبق هذه الخاصية في الواقع على جميع قياسات الأطوال والمسافات وليس فقط على قياس الأبعاد الدائرية.

وتناسب النتائج التي نحصل عليها من مجسات الأوتار الملفوفة وغير الملفوفة عكسياً مع بعضها مع بعض⁽⁴⁾.

(4) وقد تتعجب كيف يمكن لوتر مفروم حول بعد دائري نصف قطره R أن يعطي في نفس الوقت نصف قطر قيمته $\frac{1}{R}$. وبالرغم من المنطقية الشاملة لهذا التساؤل، فإن حله يمكن بالفعل في عدم دقة صياغة السؤال نفسه. فعندما نقول إن الوتر ملفوف حول دائرة نصف قطرها R ، فإننا بالضرورة تعامل مع تعريف للمسافة حتى يصبح للعبارة "نصف قطر R " معنى. لكن هذا التعريف للمسافة صالح فقط لحالة الوتر غير الملفوف - أي، أنماط الاهتزاز. ومن وجہة نظر هذا التعريف للمسافة - وهذا التعريف فقط - فإن هیة الوتر الملفوف تبدو وكأنها تتلف حول جزء دائري من الفضاء. غير أنه من التعريف الثاني للمسافة، هذا التعريف الذي يعني بهيجة الوتر الملفوف، فإن الأوتار تأخذ مواقع في الفضاء تماماً مثل أنماط الاهتزاز من وجہة نظر التعريف الأول للمسافة، ونصف القطر الذي "يرونه" هو $\frac{1}{R}$ ، كما ناقشنا في المتن.

يعطي هذا الوصف شيئاً من المتنفس عن سبب العلاقة العكssية لقياس المسافة للأوتار الملفوفة وغير الملفوفة. ولأن هذه النقطة دقيقة، فقد يكون من الجدير أن نشير إلى التحليل التقني الذي يتعلق بهذا الموضوع وذلك للقارئ ذي الميلول الرياضية. أما في ميكانيكا الكم للجسيمات النقاط العاديّة، فإن المسافة والوزن (وأساساً الطاقة) يرتبطان عن طريق تحولات فورييه Fourier Transforms. أي أنه وضع حالة إيجن $|x|$ على دائرة نصف قطرها R يمكن تعريفها بالمعادلة

$$|x\rangle = \sum_p e^{ipx} |p\rangle$$

حيث $p = v/R$ و $|p\rangle$ هي عزم حالة إيجن (المناظر المباشرة لما أطلقنا عليه نمط الاهتزاز المتجانس =

وإذا كانت نظرية الأوتار تصف عالمنا، فلماذا لم نلتقي مع هذين الاحتمالين الممكnen عن المسافات في الحياة اليومية أو في المحاولات العلمية؟ وكل مرة نتحدث فيها عن المسافات فإننا نغفل ذلك بطريقة تتمشى مع خبرتنا عن مفهوم واحد للمسافات من دون أدنى إشارة إلى وجود مفهوم ثان. لماذا لم ندرك الاختلال البديل الآخر؟ والإجابة هي أنه على الرغم من وجود درجة عالية من التناقض في عرضنا للموضوع، فainما ذكرت R (وبالتالي $\frac{1}{R}$ بالمثل) تختلف بشكل ملحوظ عن القيمة 1 (أي، مرة ثانية طول بلانك مضروباً في 1)، وهكذا فإن واحداً من التعريفين القابلين للتطبيق يثبت أن استخدامه في غاية السهولة. وخلاصة الأمر أنها دائماً نستخدم المنطق الأسهل غير مدركون بالمرة وجود الاختلال الآخر. ويرجع التباين في صعوبة المنطلقين إلى الاختلاف البين في كتلة المحسنين المستخدمين - طاقة دوران عالية/طاقة اهتزاز منخفضة والعكس صحيح - فإذا كان نصف القطر R (وبالتالي $\frac{1}{R}$ بالمثل) يختلف بشكل واضح عن طول بلانك (أي أن $R=1$). وتنتظر الطاقة "العالية" لأنصاف الأقطار المختلفة بشكل كبير عن طول بلانك محسنات غاية في الكثافة - مليارات مليارات المرات أثقل من البروتون مثلاً - بينما تنتظر الطاقة "المنخفضة" محسنات ذات كتلة تزيد بالكاد عن الصفر. وفي مثل تلك الظروف، هناك اختلاف كبير في الصعوبة بين المنطلقين، حيث أن إنتاج هيئات الأوتار الثقيلة عمل، حتى الآن، أكبر من قدرتنا التقنية. ولذلك فعملياً إن واحداً فقط من هذين المنطلقين هو الممكن إجراؤه تقانياً - وهو الذي يتضمن الأخف من بين نوعي الهيئات الورثية. وهو النوع المستخدم ضمنياً في كل مناقشاتنا حول المسافات حتى الآن، والذي يخاطب حدسنا ويتواءم معه.

= للوتر - الحركة الكلية من دون تغير في الشكل). ومع ذلك، هناك مفهوم ثان لوضع حالة إيجان في نظرية الأوتار $|\bar{x}\rangle$ تعرف باستخدام حالات الأوتار الملقحة:

$$|\bar{x}\rangle = \sum_{\omega} e^{i\bar{x}\bar{p}} |\bar{p}\rangle$$

حيث $|\bar{p}\rangle$ حالة إيجان الملقحة ولها $wR = \bar{p}$.

ومن هذه التعريفات نرى مباشرة أن x دورية، ودورتها هي $2\pi R$ بينما \bar{x} دورية، ودورتها $2\pi/R$ الأمر الذي يبين أن x هي وضع محاور على دائرة نصف قطرها R بينما \bar{x} وضع محاور على دائرة نصف قطرها $1/R$. وبشكل أوضح يمكن أن نتمثل الحالتين $|x\rangle$ ، $|\bar{x}\rangle$ حيث يبدأن من نقطة الأصل ونسع لهما بالزيادة مع الزمن ليقاوما بصياغة مفهومنا لتعريف المسافة. أما نصف قطر الدائرة، إذا قيس بأي من المحسنين فهو يتاسب طردياً مع الفترة الزمنية المطلوبة للحالة لتعود إلى هيئتها الأصلية. وحيث أن الحالة التي لها الطاقة E تتتطور بمعامل طوري يتضمن E ؛ فإننا نرى أن الفترة الزمنية وكذلك نصف القطر هي $t \sim 1/E$ ، $R \sim 1/E$ لأنماط الاهتزاز، لأنماط الالتفاف.

فإذا نحننا جانبًا الناحية العملية في عالم محكوم بنظرية الأوتار، فإننا نكون أحراراً في قياس المسافات مستخدمين أيّاً من المنطلقين. فعندما يقيس الفلكيون "حجم العالم" فإنهم يفعلون ذلك باختبار الفوتونات التي سافرت عبر الكون والتقطتها تلسكوباتهم. ومن دون لف أو دوران فإن الفوتونات هي النمط "الخفيف" للأوتار في هذه الحالة. والنتيجة التي نحصل عليها أكبر من طول بلانك ⁶¹ 10 مرة كما ذكرنا من قبل. فإذا كانت الأبعاد الفضائية الثلاثة المألولة في الحقيقة دائرة ونظرية الأوتار صحيحة، واستخدم الفلكيون أجهزة جد مختلفة (لا وجود لها في الوقت الحالي)، فمن حيث المبدأ بإمكاننا قياس امتداد السماء بواسطة أنماط أوتار ملفوقة وثقيلة، وسنحصل على نتائج هي معكوس هذه المسافة الهائلة. ومن هذا المنطلق فإننا نتخيل الكون إما أنه هائل كما نراه عادة، أو ضئيل بشكل مزعج. ووفقاً لأنماط الخفيفة للأوتار فإن العالم كبير ومتعدد، وبالنسبة لأنماط الثقيلة فإنه ضئيل ومتقلص. ولا يوجد تنافق هنا، بل على العكس فلدينا تعريفان للمسافات متمايزان لكن لهما نفس المغزى. ونحن نألف التعريف الأول أكثر كثيراً نتيجة لقيود التقانية، لكن، مع ذلك فإن كلاً منهما مفهوم صحيح بنفس الدرجة.

و هنا نستطيع أن نجيب على سؤالنا المبكر حول الأشخاص الكبار في عالم صغير. فعندما نقيس طول شخص ما ونجد أنه ستة أقدام مثلاً، فإننا بالضرورة تكون قد استخدمنا النمط الخفيف للأوتار. ولمقارنة أحجام هؤلاء الأشخاص بحجم الكون فإن علينا أن نستخدم نفس طريقة القياس كما ذكرنا من قبل، الأمر الذي يؤدي إلى حجم أكبر كثيراً من ستة أقدام. والسؤال عن كيفية تواجد مثل هذا الشخص في عالم "دقيق" تم قياسه بواسطة الأنماط الثقيلة للأوتار سؤال غير ذي معنى - وكأنك تقارن التفاح بالبرتقال. وحيث أن لدينا الآن مفهومين للمسافات - باستخدام المجرسات الخفيفة أو الثقيلة للأوتار - فإن علينا مقارنة القياسات المأخوذة بنفس الطريقة.

تاسعاً: الحجم الأدنى

لقد كانت رحلة صعبة بشكل ما، لكننا الآن مهيئون لحل المعضلة. فإذا التزم المرء باستخدام "الطريقة السهلة" لقياس المسافات - أي باستخدام أخف أنماط الأوتار بدلاً من الأنماط الثقيلة - فإن النتائج ستكون "دائماً" أكبر من طول بلانك. وكي نرى ذلك، لنتخيل من خلال الانهيار الافتراضي الهائل الأبعاد الممتدة الثلاثة مفترضين أنها دائرة. ولنفرض جدلاً أنه في بداية تجربتنا الذهنية،

كانت أنماط الأوتار غير الملفوفة هي الخفيفة وباستخدامها تحدد للعالم نصف قطر هائل ينكمش بمرور الزمن. وأثناء انكماسها تصبح هذه الأوتار غير الملفوفة أثقل بينما تصبح الأوتار الملفوفة أخف. وعندما ينكمش نصف القطر ليصل إلى طول بلانك - أي عندما تصل R إلى القيمة 1 - يصبح لأنماط الدوران والاهتزاز كل متقاربة. وتصبح الطريقتان المختلفتان لقياس المسافات على نفس الدرجة من الصعوبة، والأكثر من ذلك، ستؤدي كل منها إلى نفس النتيجة حيث أن معكوس الرقم 1 يساوي نفسه.

وباستمرار انكماس أنصاف الأقطار، تصبح الأوتار الملفوفة أخف من الأوتار غير الملفوفة، ولذلك، وحيث أنها نميل دائماً نحو "الطريق الأسهل" فإننا يجب أن نستخدمها لقياس المسافات. ووفقاً لهذه الطريقة في القياس، التي تؤدي إلى معكوس القيم المقيسة بالأوتار غير الملفوفة، فإن نصف القطر يكون أكبر من طول بلانك ويتجاوزه. ويعكس ذلك أن R ببساطة - القيمة المقيسة بواسطة الأوتار غير الملفوفة - تنكمش إلى 1، وتستمر في الانكماس إلى قيم أصغر، وقيمة $\frac{1}{R}$ - الكمية المقيسة بواسطة الأوتار الملفوفة - تكبر إلى قيمة 1 وتستمر في الزيادة. ولهذا، إذا استخدمنا المرء دائماً أنماط الأوتار الخفيفة - الطريقة "الأسهل" لقياس المسافات - فإن القيمة الدنيا المقيسة ستكون طول بلانك.

وبالتحديد، تكون قد تجنبنا الانهيار الهائل إلى حجم مساوٍ للصفر، لأن نصف قطر الكون المقاس باستخدام مجسات أنماط الأوتار الخفيفة يكون دائماً أكبر من طول بلانك. وبدلأً من الاندفاع في الانهيار نحو طول بلانك ثم إلى أحجام أصغر، فإن نصف القطر - عند قياسه بواسطة أنماط الأوتار الأخف - يتناقص ليصل إلى طول بلانك ثم ينعكس لحظياً لينمو ويستبّل الانهيار بالانفجار.

ويتواءم استخدام أنماط الأوتار الخفيفة لقياس المسافات مع مفهومنا المتفق عليه بالنسبة للطول - الطول الذي كان موجوداً فترة طويلة قبل اكتشاف نظرية الأوتار. وبناء على هذا المفهوم عن المسافات، كما هو واضح في الفصل الخامس، فإننا قابلنا مشاكل يصعب التغلب عليها مرتبطة بالتأرجحات الكمية العنيفة إذا كان للمسافات الأقصر من طول بلانك أن تلعب دوراً فيزيائياً. ونرى مرة أخرى، أنه من هذا المنظور أمكن تجنب الأطوال فائقة القصر بواسطة نظرية الأوتار. وانطلاقاً من الإطار الفيزيائي للنسبية العامة ومن الإطار الرياضي المقابل لهندسة ريمان، فإن هناك مفهوماً وحيداً للمسافات يمكن أن يتخذ قيماً اختيارية صغرى. أما في الإطار الفيزيائي لنظرية الأوتار، وبالتالي في دنيا النظام الهندسي الكمي المنتشق، هناك مفهومان للمسافات. وبشيء من الحكمة في استخدام كليهما

سنجد أحد مفاهيم المسافة يتلاءم مع كل من حدتنا والتبسيط العامة عندما تكون المسافات كبيرة، لكنه يختلف بشكل درامي عندما تصبح المسافات قصيرة، وبصفة خاصة فإن المسافات الأقصر من طول بلانك تصبح غير متاحة.

وحيث أن هذا النقاش دقيق تماماً، فلنعد التأكيد على نقطة محورية. فإذا كان علينا أن نتفاوض عن التمييز بين الطريق "السهل" والطريق "الصعب" في قياس الأطوال، وواصلنا استخدام الأنماط غير الملفوفة كلما انكمشت R مروراً بطول بلانك، فإن الأمر قد يبدو أننا سنصل بالتأكيد إلى مسافات أقل من طول بلانك. غير أن المقطع السابق ينبع أن كلمة "مسافة" في الجملة الأخيرة لا بد أن تُفسَّر بعنابة وحيث يمكن أن يكون لها معنيان مختلفان، يتفق واحد منها فقط مع مفاهيمنا التقليدية. وفي هذه الحالة عندما تنكمش R إلى أطوال أقل من بلانك بينما نمضي في استخدام الأوتار غير الملفوفة (حتى لو أنها أصبحت أثقل من الأوتار الملفوفة)، فإننا بذلك نوظف الطريق "الصعب" في قياس المسافات، وعندها فإن معنى "المسافة" هنا لا يتفق مع استخداماتنا القياسية. ومع ذلك فإن المناقشة أبعد كثيراً من مجرد فذلكة لفظية أو حتى راحة لنا أو طريقة عملية للقياس. وحتى لو استخدمنا المفهوم غير القياسي للمسافات، وبناء عليه وصفنا نصف القطر بأنه أقصر من طول بلانك، فإن الفيزياء التي نتعامل معها - كما شرحنا في المقاطع السابقة - ستكون مماثلة تماماً لفيزياء عالم فيه نصف القطر، بالمفهوم السائد للمسافات، أكبر من طول بلانك (كما اخترناه مثلاً بالانتظار الدقيق بين الجدول رقم (10-1) والجدول رقم (10-2)). إنها الفيزياء في حقيقة الأمر هي التي تهم وليس اللغة.

وقد استخدم براندنبيرج وفافا وفيزيائيون آخرون هذه الأفكار ليقرحوا إعادة كتابة قوانين علم الكون، الذي فيه لا يتضمن كل من الانفجار الهائل والانهيار الهائل المحتمل عالماً حجمه مساوٍ للصفر، بل عالماً أبعاده لها طول بلانك في جميع الاتجاهات. وهذا الاقتراح مريح بكل تأكيد لتجنب مشاكل كون تنتج من انهيار نقطة لا نهاية الكثافة، أو يبدأ انفجاره منها. ومع أنه من الصعب أن تخيل بمفهومنا كل العالم وقد انضغط إلى حبة صغيرة في حجم بلانك، فإنه حقيقة أمراً أكثر من الخيال أن نتصور أن العالم ينسحق إلى مجرد نقطة لا حجم لها على الإطلاق. أما علم الكون المبني على الأوتار، كما سشرح ذلك في الفصل 14، فهو مجال ما زال في مراحله الأولى، لكنه يحمل الأمل بوعود عظيمة، وقد يزودنا بالبديل الأسهل كثيراً في استيعابه بدلاً من نموذج الانفجار الهائل القياسي.

عاشرًا: إلى أي مدى يعتبر هذا الاستنتاج عاماً؟

ماذا لو كانت الأبعاد الفضائية ليست دائيرية الشكل؟ فهل ستظل هذه الاستنتاجات الجديرة بالاهتمام عن الحد الأدنى للمدى الفضائي في نظرية الأوتار صالحة؟ لا أحد يعرف بالتأكيد. فالسمة الأساسية للأبعاد الدائرية أنها تسمح باحتمال وجود أوتار ملفوقة. وطالما كانت الأبعاد الفضائية ستسمح للأوتار بالالتقاء حولها - بصرف النظر عن تفاصيل أشكالها - فإن معظم الاستنتاجات التي توصلنا إليها ستظل صالحة للتطبيق. لكن ماذا سيحدث لو كان اثنين من هذه الأبعاد مثلاً على شكل سطح كروي؟ ففي هذه الحالة لا تقع الأوتار في "مصلحة" الهيئة الملفوفة، لأنها تستطيع دائمًا أن "تنزلق" تماماً كما يعود الشريط المطاطي المشدود لشكله الأصلي عن سطح كرة البيسبول. ولكن بالرغم من ذلك، هل تحدد نظرية الأوتار الحجم الذي تستطيع أن تنكمش إليه هذه الأبعاد؟

يبدو أن العديد من الدراسات تبين أن الإجابة تعتمد على ما إذا كان البعد الفضائي الكامل ينكمش (كما في أمثلة الفصل الحالي) أم أن "كتلة" منفصلة من الفضاء هي التي تنهار (كما سبق ونشر في الفصلين 11، و13). ويسود اعتقاد بين منظري نظرية الأوتار أن هناك حجمًا أدنى محدد، بصرف النظر عن الشكل، تماماً كما في حالة الأبعاد الدائرية، طالما كان الوضع يتعلق بانكماس الأبعاد الفضائية كل. والهدف الهام هو ترسیخ هذه التوقعات من أجل الأبحاث القادمة لأن لها تأثيراً مباشراً على عدد من سمات نظرية الأوتار بما في ذلك تطبيقاتها في الكوسموЛОجيا (علم الكون).

حادي عشر: تناظر المرأة

قام آينشتاين، مستخدماً النسبة العامة، بتشكيل رابطة بين فيزياء الجاذبية وهندسة الزمكان. ولأول وهلة، فإن نظرية الأوتار تقوي وتوسيع الرابطة بين الفيزياء والهندسة، حيث أن خواص الأوتار المتذبذبة - كتلتها وشحනات القوى التي تحملها - تعتمد بشكل كبير على خواص مكونات الفضاء المتتجدة. ومع ذلك فقد شاهدنا حالاً أن الهندسة الكمية - التوافق بين الهندسة والفيزياء في نظرية الأوتار - له بعض الانحرافات المدهشة. ففي النسبة العامة وفي الهندسة "المتفق عليها" تختلف دائرة لها نصف القطر R عن أخرى لها نصف القطر $\frac{1}{R}$ ، الأمر الواضح والبسيط؛ عدا أنه في نظرية الأوتار لا فرق بينهما فيزيائياً. ويدفعنا هذا إلى أن تكون على جرأة كافية لنذهب أبعد من ذلك ونسأل عما إذا كانت هناك

أشكال هندسية للفضاء تختلف بشكل أكثر جذرية - وليس في مجرد الحجم الكلي فقط ، ولكن أيضاً تختلف في الشكل - لكن وبالرغم من كل ذلك فهي فيزيائياً غير قابلة للتمايز فيما بينها في نظرية الأوتار.

في العام 1988 ، أبدى لانس ديكسون من مركز المعجل الخطي في ستانفورد ، ملاحظات قيمة في هذا الخصوص ، والتي طورها بعد ذلك وولفغانغ ليشى من CERN ، وفافا من هارفارد ، ونيكولاوس وارنر من MIT في ذلك الوقت. وتأسساً على النواحي الجمالية الدفينه في اعتبارات التناظر ، قام هؤلاء الفيزيائيون باقتراحاتهم الجريئة حول احتمال أن يكون لشكليين مختلفين من أشكال كالابي - ياو- تم اختيارهما للبعدين المتعددين الإضافيين - نفس الفيزياء.

ولتكنون فكرة عن كيف يمكن لاحتمال بعيد كهذا أن يحدث في الواقع ، لنسترجع أن عدد الثقوب في أبعاد كالابي - ياو الإضافية تحدد عدد العائلات التي تنضوي تحتها الإثارات الوترية. وتشابه هذه الثقوب تلك الموجودة في الكعكة الدائرية أو أبناء عمومتها متعددى الثقوب الموجودة في الشكل رقم (9-1). وأحد نماذج الصورة ذات البعدين هو أننا مضطرون أن نبين أن الصفحة المطبوعة لا تستطيع إظهار أن لفضاء كالابي - ياو سداسي الأبعاد ثقبواً متنوّعة في أبعادها. وبالرغم من أنه من الصعب تصوّر مثل هذه الثقوب ، إلا أنه يمكن وصفها بالرياضيات المفهومة جيداً. والحقيقة الأساسية هنا أن عدد عائلات الجسيمات التي نشأت من اهتزازات الأوتار تعتمد فقط على العدد الكلي للثقوب وليس على عدد ثقوب كل بعد على حدة (ولهذا لا نهتم حول وضع تمایزات بين الأنواع المختلفة للثقب أثناء مناقشتنا في الفصل التاسع). والآن تخيل اثنين من فراغات كالابي - ياو ، التي يختلف فيها عدد الثقوب في الأبعاد المتنوعة ، لكن العدد الكلي للثقوب واحد فيها. وحيث أن عدد ثقوب كل بعد ليس متساوياً ، فإن شكلي كالابي - ياو مختلفان. ولكن بما أن لهما نفس العدد الكلي للثقوب فإن كلاً منهما سيؤدي إلى عالم له "نفس عدد العائلات". وليس هذا بالطبع إلا إحدى الخواص الفيزيائية. والاتفاق على كل الخواص الفيزيائية هو مطلب أكثر تعجيزاً ، لكنه على الأقل يمنحك الأمل حول كيفية أن يصبح تخمين ديكسون وليرشي وفافا ووارنر احتمالاً صحيحاً.

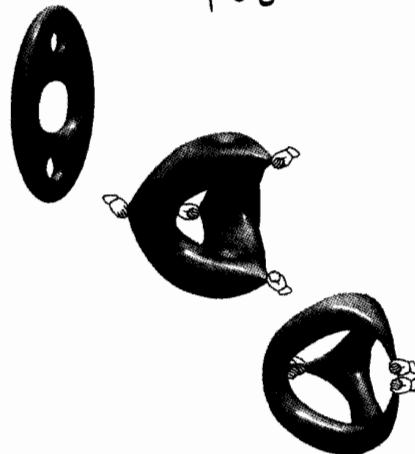
في خريف 1987 التحقت بقسم الفيزياء جامعة هارفارد في زمالة علمية بعد الدكتوراه ، وكان مكتبي في نفس الطابق الذي به فافا. وحيث أن رسالتي كانت ترتكز على الخواص الفيزيائية والرياضية لأبعاد كالابي - ياو المتعددة في نظرية

الأوتار، فقد أبقياني فافا على دراية بأعماله في هذا المجال. وعندما توقف أمام مكتبي في خريف 1988 وأخبرني بما توصل إليه هو وليرشي ووارنر، أخذت بما سمعت لكن خالجنبي الشك. كان سبب دهشتي أنني أيقنت أنه لو كانت أفكارهم صحيحة، ستفتح طريقةً جديداً في أبحاث نظرية الأوتار، أما سبب ما خالجنبي من شك فكان يقيني أن التخمين شيء والخواص المستقرة للنظرية شيء آخر تماماً.

وخلال الشهور التي تلت ذلك، فكرت كثيراً في ما عرضوه، وبصراحة أصبحت شبه مقتنع بأنه ليس صحيحاً. غير أنه، ولدهشتني، وأثناء إجرائي لبحث لا علاقة له فيما يبدو بهذا الموضوع - بالتعاون مع رونين بليسيير الذي كان وقتها طالب دراسات عليا بجامعة هارفارد، والآن عضو هيئة تدريس بمعهد وايزمان وجامعة ديوك، سرعان ما تغير رأيي تماماً. فقد أصبحنا أنا وبليسيير مهتمين بتطوير الطرق التي نبدأ فيها بأحد أشكال كالابي - ياو الأصلية، ونناور بها رياضياً لنحصل على أشكال غير معروفة للكالابي - ياو حتى الآن. وكنا بالتحديد مندفعين تجاه تقنية تعرف باسم أوربيفولدنغ (Orbifolding)، التي كان رائدتها ديكسون وجيفري هارفي من جامعة شيكاغو، وفافا وويتن في منتصف ثمانينيات القرن العشرين. وفي هذه الطريقة تلتتصن النقاط المختلفة على الشكل الأصلي للكالابي - ياو معًا وفقاً لقواعد رياضية تؤكد تكون أشكال جديدة للكالابي - ياو. وقد أوضحنا ذلك في رسم تخطيطي في الشكل رقم (4-10). والرياضيات التي تعمل بها المناورات الموضحة في الشكل رقم (4-10) معقدة، ولهذا السبب فإن منظري نظرية الأوتار قد درسوا بالتفصيل هذه الطريقة فقط في حالة تطبيقها على الأشكال البسيطة - أي على الاحتمالات المتنوعة ذات الأبعاد الأكثر في أشكال الكعكات (الدونت) الموضحة في الشكل رقم (1-9). إلا أنها أنا وبليسيير قد أدركنا أن بعض الأفكار الجديدة والجميلة لدورون جيبير، الذي كان في جامعة برنسون في ذلك الوقت، قد نقدم إطاراً نظرياً قوياً لتطبيق تقنية أوربيفولدنغ على أشكال كالابي - ياو الكاملة مثل تلك الموجودة في الشكل رقم (8-9).

وبعد بضعة أشهر من السعي المكثف وراء تلك الأفكار توصلنا إلى نتيجة مدهشة. فلو قمنا بلصق مجموعات معينة من النقاط بعضها مع بعض بالشكل الصحيح فإن أشكال كالابي ياو التي ستنتج من ذلك ستختلف بشكل مذهل عن الشكل الذي بدأنا به: أعداد الثقوب ذات الأبعاد الفردية في أشكال كالابي - ياو الجديدة تساوي أعداد الثقوب ذات الأبعاد الزوجية في الأشكال الأصلية، والعكس صحيح. وبالتحديد فإن ذلك يعني أن العدد الكلي للثقوب - وبالتالي عدد عائلات الجسيمات - في كل حالة هو نفسه على الرغم من أن تبادل الأعداد

الشكل رقم (4-10)



أوريبيفولدغ Orbifolding، طريقة تتبع منها أشكال جديدة لكالابي - ياو بالتصاق النقاط المختلفة بعضها مع بعض على أحد أشكال كالابي - ياو الأصلية.

الفردية والزوجية يعني أن أشكالها وبنيتها الهندسية الأساسية مختلفة تماماً⁽⁵⁾.
وعندما أثارنا التقارب الواضح مع أفكار ديكسون - ليرشي - فافا - وارنر،
بدأنا أنا وبليسير التفكير الجدي في السؤال المحوري: بجانب عدد من عائلات
الجسيمات، هل يتفق شكلان كالابي - ياو المختلفان في بقية الخواص الفيزيائية؟
وبعد بضعة أشهر من التحليلات الرياضية التفصيلية والمعقدة، التي كنا أثناءها قد
تلقينا تشجيعاً وتعضيداً من غراهام روس، المشرف على رسالتنا في جامعة
أوكسفورد، ومن فافا، تمكنا أنا وبليسير من أن نؤكد أن الإجابة عن هذا السؤال
هي نعم، بكل تأكيد. ولأسباب رياضية تتعلق بالتبادل الزوجي - الفردي، قمنا أنا

(5) بالنسبة للقارئ ذي الميل الرياضية، نشير إلى أنه بدقة أكبر فإن عدد عائلات اهتزاز الأوتار هو نصف القيمة المطلقة لخاصية يول لفراغ كالابي-ياو، كما سبق أن ذكرنا في الهماش رقم (16) في الفصل التاسع. وتتحدد بواسطة القيمة المطلقة للفرق بين $h^{2,1}$ ، $h^{1,1}$ ، $h^{0,0}$ ، حيث تشير إلى (p,q) عدد هودج.
وإذا تحولنا إلى التعبير عددياً، فإن ذلك يعني عدد الدورات الثلاثية غير العادية المتناظرة ("تقرب ثلاثة الأبعاد") وعدد الدورات الثنائية المتناظرة ("تقرب ثنائية الأبعاد"). وهكذا بينما يدور الحديث عن العدد الكلي للتقرب في متن الكتاب، فإن التحليل الأكثر دقة بين أن عدد العائلات يعتمد على القيمة المطلقة للفرق بين الأبعاد الفردية والأبعاد الزوجية للتقرب. ومع ذلك فإن النتيجة واحدة. فعلى سبيل المثال، إذا اختلف شكلان من أشكال كالابي-ياو عن طريق تبادل $h^{2,1}$ ، $h^{1,1}$ أعداد هودج، فإن عدد عائلات الجسيمات - والعدد الكلي "للتقرب" - لن يتغير.

وبليسير بضم المصطلح "ثنيات المرأة" لنصف فراغات كالابي - ياو المختلفة هندسياً لكنها متكافئة فيزيائياً⁽⁶⁾. والفراغات المتمفردة في ازدواجات المرأة لأشكال كالابي - ياو ليست حرفيّاً صور مرأة من بعضها البعض بالمعنى الذي نستخدمه في حياتنا اليومية. وحتى مع أن لها صفات هندسية مختلفة إلا أنها تنتج نفس الكون الفيزيائي عند استخدامها في الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار.

كانت الأسابيع التي تلت حصولنا على تلك النتائج وقتاً عصبياً للغاية. وقد أدركنا أنا وبليسير أننا بصدق أن نضع أيدينا على أمر هام جدّيد في فيزياء الأوتار. فقد بینا أن التوافق الوثيق بين الهندسة والفيزياء الذي وضعه في الأساس آينشتاين قد تم تطويره جذرياً بواسطة نظرية الأوتار: فالأشكال الهندسية المختلفة جذرياً والتي تعني خواص فيزيائية مختلفة في النسبة العامة تعطي في نظرية الأوتار فيزياء واحدة متناظرة. لكن ماذا لو كنا على خطأ؟ وماذا لو كانت تضميناتها الفيزيائية تختلف في بعض الأمور الدقيقة التي أغفلناها؟ فمثلاً عندما عرضنا نتائجنا على ياو، أعلن بأدب لكن في حزم أننا لا بد أن تكون قد ارتكبنا خطأ ما، وجزم بأنه من وجهة النظر الرياضية فإن نتائجنا على درجة من الغرابة يجعلها غير صحيحة. وقد دفعنا تقويمه للتوقف والتفكير بشكل جدي. وأن ترتكب خطأ في موضوع بسيط وصغير فلن يسترعي ذلك إلا قليلاً من الاهتمام. غير أن نتائجنا تقدم خطوة غير متوقعة في اتجاه جديد والذي سيحدث بكل تأكيد رد فعل قوي. فلو كنا على خطأ فسيعلم الجميع بذلك.

وأخيراً، وبعد فحص وتمحیص متكررين ازدادت ثقتنا في نتائجنا، وقمنا بإرسال البحث للنشر. وبعد أيام قليلة، وأثناء وجودي بمكتبي في جامعة هارفارد دق جرس التليفون. كان فيليب كانديلاس من جامعة تكساس على الطرف الآخر، وكان أول سؤال بادرني به هو ما إذا كنت جالساً في مقعدي. أجل كنت جالساً. عندها أخبرني أنه واثنين من تلاميذه، مونيكا لينكر ورولف شيمريغ قد توصلوا إلى أمر سيفيحيوني من مقعدي. وقد وجدوا بالفحص الدقيق لعينة كبيرة لمجموعة من أشكال كالابي - ياو التي حصلوا عليها بواسطة الكمبيوتر، أنه على الأغلب قد جاءت جميعها في أزواج متقابلة بتبادل الثقوب الفردية والزوجية. أخبرته أنني ما زلت جالساً في مقعدي - وأنني وبليسير قد توصلنا لنفس النتيجة. واتضح أن أبحاث كانديلاس مكملة لأبحاثنا؛ وقد ذهبنا خطوة أخرى لأن بينا أن كل الفيزياء

(6) جاء هذا الاسم من أن "مسات هودج" - ملخص رياضي للثقوب متعددة الأبعاد في فراغ كالابي-ياو - انعکاسات صورة مرأة لكل فراغ من فراغات كالابي-ياو.

الناتجة التي تأتي في أزواج مرآة كانت واحدة، بينما كان كانديلاس وتلامذته قد اظهروا أن عينة كبيرة بشكل ملحوظ من أشكال كالابي - ياو تأتي في أزواج مرآة. ومن خلال هذين الباحثين اكتشفنا تناظر المرأة في نظرية الأوتار⁽⁷⁾.

ثاني عشر: فيزياء ورياضيات تناظر المرأة

يمثل تيسير الارتباط القوي والفرد - وفقاً لآينشتاين - بين هندسة الفراغ والفيزياء المرئية واحداً من التحولات الصارخة الناتجة من نظرية الأوتار. غير أن هذه التطورات تضم ما هو أكثر كثيراً من مجرد موقف فلسفياً. فتناول المرأة بالتحديد، يقدم وسيلة قوية لفهم كل من فيزياء نظرية الأوتار ورياضيات فراغات كالابي - ياو.

كان علماء الرياضيات المشغلون في مجال الهندسة الجبرية يدرسون فراغات كالابي - ياو لأسباب رياضية بحثة، وذلك قبل اكتشاف نظرية الأوتار بزمن طويل. وقد توصلوا إلى الكثير من الخواص التفصيلية لهذه الفراغات الهندسية بدون ظهور أي ملمع عن التطبيقات الفيزيائية في المستقبل. وقد اتضح أن سمات معينة لفراغات كالابي - ياو صعبة - وفي الأساس مستحيلة - بالنسبة للكشف عنها كلياً بواسطة الرياضيين. لكن اكتشاف تناظر المرأة في نظرية الأوتار قد غير من ذلك بشكل واضح. وملخص القول أن تناظر المرأة يعني أن أزواجاً معينة من فراغات كالابي - ياو، تلك الأزواج التي كان يعتقد أنها غير مرتبطة بعضها ببعض تماماً، أصبحت الآن مرتبطة بشكل وثيق بواسطة نظرية الأوتار. وهي مرتبطة بواسطة العالم الفيزيائي العام الذي تتضمنه كل منها إذا كانت أي منها هي التي تم اختيارها لتكون بعد الإضافي المتتجعد. ويقدم هذا الارتباط المتشابك غير المتوقع في السابق، وسيلة فيزيائية ورياضية جديدة وقاطعة.

تخيل مثلاً أنك مشغول بحساب الخواص الفيزيائية - كتلة الجسيمات وشحنات القوى - المرتبطة بأحد اختيارات كالابي - ياو المحتملة للأبعاد الإضافية. ولست معيناً بصفة خاصة بالتوافق بين النتائج التفصيلية والتجربة، حيث أننا قد رأينا أن هناك عدداً من العقبات النظرية والتقنية تجعل من هذا أمراً في غاية الصعوبة في الوقت الحالي. وبدلأً من ذلك فإنك تعمل من خلال تجربة ذهنية

(7) يستخدم كذلك المصطلح "تناول المرأة" في مضمون آخر مختلف تماماً في الفيزياء مثل حالة الكفية الكيرالية) - أي ما إذا كان الكون متناظراً يمين-يسار - كما سبق أن ناقشنا في الهاشم رقم (7)، في الفصل 8.

تتعلق بما قد يكون عليه الكون إذا تم اختيار شكل معين من أشكال كالابي - ياو. ولفتره يبدو أن كل شيء يسير على ما يرام، لكن وفي خضم أبحاثك تقابلك صعوبات في الحسابات الرياضية لا يمكن التغلب عليها. ولا يستطيع أحد أن يحلها حتى ولو كان من أعظم الخبراء الرياضيين في الكون. لقد أصبحت في مأزق. لكن عندئذ أدركت أن لهذا الشكل من أشكال كالابي - ياو رفيق صورة مرآة. و بما أن نتائج فيزياء الأوتار المتعلقة بكل عضو من ازدواج صورة المرأة متناظرة، فإنك ستقر بأنك حر في اختيار أي منها لإجراء حساباتك. وهكذا سعيد إجراء الحسابات الصعبة على فراغ كالابي - ياو الأصلي مستخدماً صورة المرأة الأخرى، متأكداً من أن نتائج الحسابات - أي الفيزياء - ستكون هي نفسها. ومن النظرة الأولى قد تظن أن الصورة المعدلة للحسابات ستكون في مثل صعوبة الحسابات الأصلية. لكنك ستتفق على مفاجأة قوية وسارة: ستكتشف أنه بالرغم من أن النتيجة واحدة إلا أن الصيغة التفصيلية للحسابات مختلفة تماماً، بل وفي بعض الأحيان تحول الحسابات المعقدة الفظيعة إلى حسابات غاية في السهولة على صورة المرأة لفراغ كالابي - ياو. ولا يوجد تفسير بسيط لحدوث ذلك، لكن - على الأقل بالنسبة لحسابات معينة - ذلك يحدث بكل تأكيد، بل ويمكن أن تكون درجة الصعوبة التي أصبحت عليها الحسابات قد تناقصت بشكل حاد. والمغزى هنا واضح بالطبع: فأنت لست بعد في مأزق.

ويشبه ذلك - بشكل ما - إذا طلب أحدهم منك أن تحصي بالضبط عدد البرتقالات الموجودة عشوائياً في سلة عملاقة طول ضلعها 50 قدماً وعمقها 10 أقدام. ستبدأ في إحصاء البرتقال واحدة واحدة، وسرعان ما ستدرك أن هذا العمل مضن جداً. ولحسن حظك يجيئك صديق كان موجوداً عند تسليم البرتقال. يخبرك هذا الصديق أن البرتقال قد وصل معيناً في صناديق صغيرة بعناية (تصادف أنه كان يمسك بأحدتها) وأن هذه الصناديق عندما رصت كانت بطول عشرين صندوقاً وعرض عشرين صندوقاً وارتفاع عشرين صندوقاً وهكذا ستحسب بسهولة أن البرتقال قد جاء معيناً في 8000 صندوق، وأن كل ما تحتاج إليه هو معرفة كم برتقالة في الصندوق الواحد. وستفعل ذلك بسهولة لأن تأخذ الصندوق من صديقك، ثم تملأه بالبرتقال، الأمر الذي يعني مهمتك الرهيبة في إحصاء البرتقال من دون أي مجهود يذكر. وخلاصة القول أنك بإعادة تنظيم حساباتك بمهارة تمكنك من إنجاز مهمتك بسهولة محسوسة.

والوضع بالنسبة لحسابات عديدة في نظرية الأوتار هو نفسه. ومن منظور أحد أشكال كالابي - ياو قد تتضمن الحسابات عدداً لا حصر له من الخطوات

الرياضية الصعبة. ومع ذلك، وبنقل الحسابات إلى صورة المرأة فإن إعادة الترتيب بطريقة أكثر كفاءة بكثير تسمح بإنهاها بسهولة نسبية. وقد قمنا أنا وبليسير بهذه الخطوة التي طبقت عمليات بشكل مثير للانتباه بواسطة كانديلاس وتعاونيه زينيا دي لا أوسا وليندا باركيرز من جامعة تكساس، وبواسطة بول غرين من جامعة ماريلاند. وقد أثبتوا أنه يمكن إتمام حسابات على درجة لا يمكن تخيلها من الصعوبة باستخدام منظور صورة المرأة، بقليل من الجبر والحاسب الشخصي.

كان هذا التطور مثيراً وخاصة بالنسبة لعلماء الرياضيات، لأن بعض هذه الحسابات كانت هي بالضبط التي عكفوا عليها سنين طويلة من دون الوصول إلى حل. فنظرية الأوتار - أو هكذا يزعم الفيزيائيون - قد سبقتهم في الوصول إلى الحل.

والآن لا بد أن نأخذ في الاعتبار أن هناك عموماً تنافساً جيداً وصحياً بين علماء الرياضيات وعلماء الفيزياء. وقد تصادف أن كان هناك عالماً رياضياً من النرويج - جير إيلينغرسورد وشتين آريلد ستروم يجريان أحد الحسابات العديدة التي تغلب عليها بنجاح كانديلاس وتعاونوه باستخدام تناظر المرأة. وباختصار توصلت حساباتهما إلى إحصاء عدد الكرات التي يمكن "رصها" داخل فراغ معين لكالابي - ياو، بطريقة مشابهة إلى حد ما لطريقة إحصاء البرتقال في السلة العملاقة. وفي مؤتمر للفيزيائيين والرياضيين في بيركلي 1991، أُعلن كانديلاس النتائج التي توصل إليها هو ومجموعته باستخدام نظرية الأوتار وتناول المرأة، وهي: 375، 317، 206. بينما أُعلن إيلينغرسورد وستروم نتائج حساباتهما الرياضية التي في غاية التعقيد وهي: 425، 549، 682، 2. وتجادل الرياضيون والفيزيائيون لعدة أيام: فمن منهم على صواب؟ تحول السؤال إلى اختبار حقيقي للمصداقية الكمية لنظرية الأوتار، حتى أن بعض الناس قد علق - على شكل دعابة - أن هذا الاختبار هو البديل (أو أقرب شيء) لمقارنة نظرية الأوتار مع التجربة. والأكثر من ذلك فإن نتائج كانديلاس قد تخطت النتيجة العددية الوحيدة التي زعم إيلينغرسورد وستروم أنهما توصلا إليها. وقد زعم كانديلاس وتعاونوه أنهم قد أجروا عن أسئلة كثيرة أخرى كانت أكثر صعوبة بمراحل - كانت في الحقيقة صعبة لدرجة أن الرياضيين لم يحاولوا أبداً الاقتراب منها. ولكن هل يمكن أن نثق في نتائج نظرية الأوتار؟ انتهى الاجتماع بتبادل مثير للأفكار بين الرياضيين والفيزيائيين، لكن من دون حل للتناقض.

وبعد شهر من ذلك، وصلت رسالة بالبريد الإلكتروني لجميع المشاركين في مؤتمر بيركلي معنونة "الفيزياء تتضرر!"، فلقد اكتشف إيلينغرسورد وستروم خطأ

في شفرة الكمبيوتر، وعند تصححها تأكدت نتائج كانديلاس. ومنذ ذلك الحين أجريت العديد من المراجعات الرياضية على المصداقية الكمية لتناظر المرأة في نظرية الأوتار: لقد نجحت بسهولة بدرجة امتياز. وحديثاً جداً وبعد ما يقرب من عقد من الزمان بعد اكتشاف تناظر المرأة بواسطة الفيزيائيين، أنجز الرياضيون تقدماً عظيماً في الكشف عن الأسس الرياضية المتأصلة في هذه الحسابات. وبالاستفادة من المساهمات المحسوسة لعلماء الرياضة مكسيم كونتسيفيش وبوري مانين وغانغ تيان وجون لي وألكسندر جيفينتال، وجد ياو ومعاونوه بونغ ليان وكيفن ليو في النهاية برهاناً رياضياً عظيماً على صحة المعادلات المستخدمة لإحصاء الكرات في فراغات كالابي - ياو، وبذلك يكونون قد توصلوا لحل المشكلات التي حيرت الرياضيين لمئات السنين.

وإلى جانب اعتبارات هذا النجاح، فإن ما ألقت عليه الضوء هذه التطورات هو الدور الذي بدأت تلعبه الفيزياء في الرياضيات الحديثة. دأب الفيزيائيون لفترة طويلة على "التنقيب" في أرشيف الرياضيين بحثاً عن وسائل لبناء وتحليل نماذج للعالم الفيزيائي. أما الآن ومن خلال اكتشاف نظرية الأوتار بدأت الفيزياء في رد الدين وتقديم وسائل ذات مقدرة عالية للرياضيين لحل مشكلاتهم المتعثرة. ولا تقدم نظرية الأوتار إطاراً موحداً للفيزياء فقط، بل إنها من الممكن أن تقيم اتحاداً عميقاً بنفس الدرجة مع علم الرياضيات كذلك.

الفصل العاشر

تمزيق نسيج الفضاء

إذا شددت غشاء من المطاط بقوة فعاجلاً أو آجلاً سيتمزق. وقد أوحىت هذه الحقيقة البسيطة للعديد من الفيزيائيين على مر السنين أن يتساءلوا ما إذا كان من الممكن أن يحدث نفس الشيء للنسيج الفضائي المصنوع منه الكون. أي أنه، هل من الممكن أن يتمزق النسيج الفضائي إرباً، أم أن هذه مجرد فكرة خادعة نشأت عن اتخاذ مثال غشاء المطاط بجدية أكثر من اللازم؟

تجيب النسبية العامة لآينشتاين على هذا التساؤل بلا، فالنسيج الفضائي لا يمكن أن يتمزق⁽¹⁾. فمعادلات النسبية العامة تمد جذورها بقوة في هندسة ريمان، وكما أشرنا في الفصل السابق، فإن هذا إطار يتناول الاضطراب في علاقات المسافات بين الواقع في الفضاء. وحتى يصبح الكلام ذا معنى حول هذه العلاقة بين المسافات، فإن الصياغة الرياضية تتطلب أن يكون نسيج الفضاء "ناعماً" - وهو مصطلح له معنى تقني رياضي، لكن استخداماته اليومية تشكل خلاصته: لا تجعدات ولا ثقوب ولا قطع منفصلة "ملتصقة" بعضها البعض ولا تمزقات. فإذا كان لنسيج الفضاء مثل هذه الصفات غير المنتظمة، فإن معادلات النسبية العامة كانت ستفشل تماماً، مشيرة إلى بعض الكوارث الكونية المختلفة - وستحدث نتيجة كارثية، يبدو أن عالمنا حسن السلوك قد تجنبها.

ولم يمنع ذلك النظريين ذوي الخيال الواسع على مدار السنين من التفكير مليأً في احتمال وجود صياغة جديدة للفيزياء تتخطى نظرية آينشتاين الكلاسيكية، وتتضمن فيزياء الكم بحيث يمكن أن تبين حدوث قطع وتمزيق ودمج للنسيج الفضائي. وفي الحقيقة، إن إدراك أن فيزياء الكم تؤدي إلى تموجات عنيفة على المسافات القصيرة، أدى إلى جعل البعض يفترضون أن التمزق صفة مجهرية

(1) سيرى القارئ ذو الميول الرياضية، إذا كانت طوبولوجية الفضاء ديناميكية - أي أنها تتغير. ونلاحظ أنه على الرغم من استخدامنا بكثرة للتغيير التغيير الطوبولوجي الديناميكي، فإننا عملياً نعني دائماً عائلة أحادية المؤشر للزمكان الذي تغير فيه الطوبولوجيا كدالة من هذا المؤشر. وتقنياً فإن هذا المؤشر ليس هو الزمن، لكن في حدود معينة، يمكن في الأساس تعريفه بمدلول الزمن.

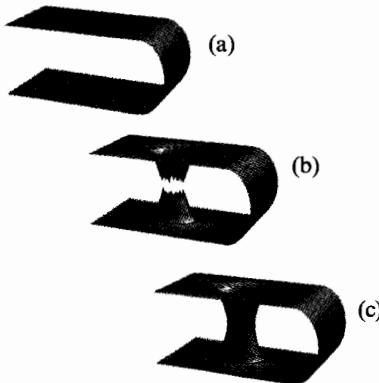
شائعة في نسيج الفضاء. ويستغل مفهوم ثقب الدودة هذه المقوله الخاطئة (مفهوم معروف بين المغermenin بأفلام الخيال العلمي (Star Trek Deep Space Nine) وال فكرة هنا بسيطة: تخيل أنك رئيس مجلس إدارة شركة كبيرة مقرها بالطابق التسعين بأحد برجي مركز التجارة العالمية في نيويورك^(*). ويوجد في البرج الآخر في الطابق التسعين أيضاً فرع من فروع الشركة يستلزم الأمر الاتصال به بصورة مستمرة. وحيث أنه ليس عملياً أن ينتقل أحد المكتبين إلى مكان الآخر، فقد توصلت إلى اقتراح معقول، وهو بناء جسر بين المكتبين يصل بين البرجين، الأمر الذي يمكن العاملين من التحرك بحرية بين المكتبين من دون أن يقطعوا صعوداً وهبوطاً تسعين طابقاً.

وينبع ثقب الدودة نفس الدور: فهو جسر أو نفق يختصر المسافة و يصل بين منطقتين في الكون. ولتخيل عالماً على الشكل الموجود في الشكل رقم (1-11) مستخدماً نموذجاً ذا بعدين. فإذا كان مقر شركتك يقع بالقرب مندائرة السفلية في الشكل رقم (1-11)، (a) فإنك من الممكن أن تصلك إلى المكتب الفرعى الذي يقع بالقرب من دائرة العليا فقط لأن تقطع كل الطريق الذي على شكل الحرف U. لكن إذا كان في استطاعة نسيج الفضاء أن يتمزق مكوناً ثقباً كما في الشكل رقم (1-11)، (b)، وأن هذه الثقوب يمكن أن تنمو على الشكل مجسات لتندمج معاً كما في الشكل رقم (1-11)، (c)، فسيصل جسر فضائي بين الموقعين اللذين كانا منفصلين. وهذا هو الثقب الدودي. وعليك أن تتذكر أن هناك تشابهاً بين هذا الثقب الدودي وجسر مركز التجارة العالمي، لكن هناك فرق أساسى: فجسر مركز التجارة العالمي سيقطع منطقة من الفراغ الموجود - الفراغ بين البرجين. وعلى النقيض، فإن الثقب الدودي يكون منطقة جديدة في الفراغ، حيث أن الفراغ المحدب ذو البعدين في الشكل رقم (1-11)، (a) هو كل ما هناك (في المحاكاة ذات البعدين). أما المناطق التي تقع خارج الغشاء فإنها تبين عدم تطابق هذا التصور الذي يمثل عالم الحرف U وكأنه جسم داخل عالمنا ذي الأبعاد الأكبر. ويخلق الثقب الدودي فضاء جديداً، ومن ثم يتالق بمنطقة فضائية جديدة.

هل توجد فعلاً ثقوب دودية في العالم؟ لا يعرف أحد. وإن وجدت، فهي بعيدة كل البعد عن الوضوح، فليس من المعروف ما إذا كانت شكلاً مجهرياً فقط أم أنها ستغطي مناطق شاسعة من الكون (كما في Deep Space Nine). لكن

(*) المبني لم يعد له وجود الآن بعد أحداث 11 سبتمبر (المترجم والمراجع).

الشكل رقم (1-11)



(a) في عالم على الشكل حرف U فإن الطريقة الوحيدة للانتقال من طرف إلى الطرف الآخر هو أن تقطع طول كل الكون. (b) يتميز نسيج الكون ويدأ طرقا ثقب دودي في النمو. (c) يندمج طرقا الثقب الدودي مكونين جسراً جديداً - وصلة تختصر المسافة بين طرفي الكون.

العنصر الأساسي في تحديد ما إذا كانت حقيقة أم خيالاً هو تحديد ما إذا كان نسيج الفضاء يتميز أم لا.

وتقديم الثقوب السوداء مثلاً صارخاً آخر يتمدد فيه نسيج الفضاء حتى آخر مداده. وقد رأينا في الشكل رقم (3-7) أن مجال الجاذبية الهائل لثقب أسود يؤدي إلى تحدب أقصى، الأمر الذي يتسبب في ظهور النسيج الفضائي، وقد أصابته انبعاجات ونتوءات عند مركز الثقب الأسود. وعلى عكس حالة الثقب الدودي، فإن هناك دليلاً تجريبياً قوياً يعهد وجود الثقوب السوداء، ولذا فإن السؤال عما يحدث فعلاً في النقطة المركزية للثقب الأسود هو سؤال علمي وليس مجرد تخمينات. ومرة أخرى، تفشل معادلات النسبية العامة تحت مثل هذه الظروف. وقد اقترح بعض الفيزيائيين وجود ثقب بالفعل، لكننا محميون من هذه الأمور الكونية "المتفردة" بواسطة أفق الحدث للثقب الأسود، الذي يحجب أي شيء من الهروب من قبضة جاذبيته. وقد قاد هذا المنطق روجر بنروز من جامعة أوكسفورد ليفكر في "فرض رقابة كونية" تسمح بحدوث مثل عدم الانتظام الفضائي هذا فقط إذا كانت محظوظة تماماً عن أعيناً خلف حجاب أفق الحدث. ومن جهة أخرى، وقبل اكتشاف نظرية الأوتار، ظن بعض الفيزيائيين أن المزاج الملائم بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة يمكن أن يظهر أن ثقب الفضاء الظاهرية

قد تمت معالجتها - "حياكتها" - بواسطة الاعتبارات الكمية.

وباكشاف نظرية الأوتار والدمج المتجانس لميكانيكا الكم والجاذبية، فإننا في وضع يسمح بدراسة هذه الموضوعات. حيث أن منظري نظرية الأوتار لم يتمكنوا من الإجابة بعد كلية عن هذه الموضوعات، غير أنهم استطاعوا خلال السنوات القليلة الماضية حل موضوعات أخرى قريبة جداً منها. وفي هذا الفصل سنناقش كيف أظهرت نظرية الأوتار، للمرة الأولى، وبصورة مؤكدة أن هناك ظروفًا فيزيائية تختلف عن الثقوب الدودية والثقوب السوداء في أمور معينة يمكن في وجودها أن يتميزق نسيج الفضاء.

أولاً: الاحتمال الذي يعذب بالإغواء

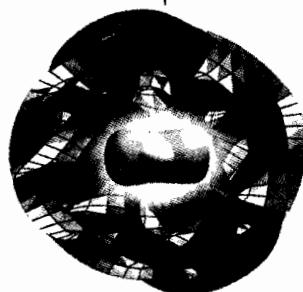
في عام 1987 أبدى شينغتونغ ياو وتلميذه غانغ تيان الموجودان الآن بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) ملاحظة رياضية مثيرة. باستخدام طريقة رياضية معروفة جيداً وجداً أن أشكالاً معينة من أشكال كالابي-ياو يمكن أن تتحول إلى أشكال أخرى بتثقيب سطحها وإعادة حياكة الثقوب الناتجة ووفقاً لنسلق رياضي دقيق⁽²⁾. وقد حددتا تقربياً نوعاً معيناً من الكرات ذات البعدين - مثل سطح كرة الشاطئ - موجوداً داخل فراغ كالابي-ياو الأصلي، كما في الشكل رقم (11-2)، (وكرة الشاطئ ثلاثة الأبعاد مثل جميع الأجسام المائلة). ونحن نتعامل هنا فقط مع سطحها ونهمل سمك المادة المصنوع منها هذا السطح وكذلك الفراغ الموجود بداخليها. وتتحدد مواقع النقاط على سطح كرة الشاطئ بإعطائهما عددين - "خطوط عرض" و"خطوط طول" - تماماً كما نحدد مواقع النقاط على سطح الأرض. ولهذا السبب فإن سطح كرة الشاطئ ثنائي الأبعاد مثل خرطوم المياه الذي ناقشناه في الفصول السابقة). أخذ ياو وتلميذه في اعتبارهما تقلص الكرة حتى ضاقت وتحولت إلى نقطة مفردة، ما صورنا ذلك في تسلسل الأشكال في الشكل رقم (11-3). وقد بسطنا هذا الشكل والأشكال التالية في هذا الفصل بأن ركزنا على أكثر "القطع" مواءمة في الشكل كالابي-ياو. غير أنه لا بد أن نحتفظ في أذهاننا بملحوظة أن هذه التحولات إنما تحدث ضمن فراغات كالابي-ياو الأكبر من ذلك، كما في الشكل رقم (11-2). وأخيراً تخيل تيان وياو أنهما يشدان

(2) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، تتضمن خطوط العمل احتزال المنحنيات المنطقية على مخروط كالابي-ياو ثم الاستفادة من حقيقة أنه تحت ظروف معينة يمكن للتفرد الناتج أن يعدل عن طريق الفصل الدقيق المتميز.

برفق فراغ كالابي-ياو عند نقطة التقلص (الشكل رقم (4-11)، (a)) ليظهرها للعيان ثم يلصقها في شكل آخر من أشكال كرات الشاطئ (الشكل رقم (4-11)، (b)) التي يمكن أن يعيدوا تسطيحها في شكل ممتد رائع (الشكل رقم (4-11)، (c) و(d)).

ويسمى علماء الرياضيات هذا التابع من المناورة "التحول الانقلابي". ويبدو

الشكل رقم (2-11)



المنطقة المسلط عليها الضوء داخل الشكل كالابي-ياو تحتوي على الكرة.

الشكل رقم (3-11)



كرة داخل الشكل كالابي-ياو تقلص باستمرار إلى نقطة ضاغطة على نسيج الفضاء. وقد قمنا بتبسيط هذا الشكل والأشكال التالية بإظهار جزء فقط من الشكل كالابي-ياو الكلي.

الشكل رقم (4-11)



تمزق فراغ متقلص من فراغات كالابي-ياو ينفتح وينمو ليصبح سطحه أملس. تحول الكرة الأصلية من الشكل رقم (3-11).

الأمر وكأن الشكل كرة الشاطئ الأصلية قد انقلب ليتحول إلى توجه جديد داخل الشكل كالابي-ياو. وقد لاحظ ياو وتيان وآخرون أنه في ظروف معينة، يختلف الشكل كالابي ياو الجديد الذي نتج من الانقلاب كما في الشكل رقم (4-11)، (d)، طوبولوجياً عن شكل كالابي-ياو الأصلي في الشكل رقم (3-11)، (a) إلى الشكل النهائي في الشكل رقم (4-11)، (d) من دون تمزق نسيج فراغ كالابي-ياو في مرحلة ما في وسط هذا التحول.

ومن منطلق رياضي فإن هذه العملية لياو وتيان مثيرة لأنها تقدم طريقة لإنتاج فراغات جديدة لکالابي-ياو من الفراغات المعروفة. لكن إمكانياتها الكامنة تقع في دنيا الفيزياء حيث تثير السؤال المفعم بالإغراء: هل يمكن أن يحدث بالفعل هذا التسلسل الذي وضحته بدءاً من الشكل رقم (3-11)، (a) وحتى الشكل رقم (4-11)، (d) في الطبيعة، بجانب كونه خطوات رياضية مجردة؟ وهل يمكن لنسيج الفضاء أن يتمزق ثم يعاد إصلاحه بالطريقة التي ذكرناها، وعلى النقيض من توقعات آينشتاين؟

ثانياً: منظور المرأة

بعد مرور بضعة أعوام على مشاهدات ياو ومعاونيه في العام 1987، ظل ياو يشجعني بين الحين والآخر على أن أفكّر في التجسيد الفيزيائي لهذه التحولات الانقلابية، ولم أفعل. فقد كانت هذه التحولات تبدو لي مجرد جزء من الرياضيات البحتة من دون سند من فيزياء نظرية الأوتار. وفي الحقيقة، واعتماداً على المناقشات التي جاءت في الفصل العاشر، حيث اكتشفنا أن للأبعاد الدائرية حدأً أدنى لنصف القطر، فإنه من المغرى أن نقول بأن نظرية الأوتار لا تسمح للكرة في الشكل رقم (3-11) أن تقلص إلى النهاية حتى تصبح نقطة. ولنتذكر، كما لاحظنا في الفصل العاشر أنه إذا انهارت كتلة من الفضاء - قطعة كروية من الشكل كالابي-ياو في هذه الحالة - على النقيض من انهيار بعد فضائي كامل، فإن المقوله التي تحدد أنصاف الأقطار الصغيرة والكبيرة ليست محل تطبيق مباشر هنا. ومع ذلك، فإن فكرة استبعاد التحول الانقلابي لا تصل لمرحلة الدقة، ويفيد احتمال تمزق نسيج الفضاء بعيداً.

غير أنه في ذلك الحين، في العام 1991 سأل الفيزيائي النروجي آندي لوتكن وبول آسيبنوول (زميلي في الدراسات العليا بجامعة أوكسفورد والأستاذ حالياً بجامعة ديووك) نفسيهما سؤالاً أصبح في غاية الإثارة: إذا حدث تمزق نسيج فضاء كالابي-ياو الذي يخص هذا الجزء من عالمنا فماذا سيكون عليه المنظر من منطلق

صورة مرآة فراغ كالابي-ياو؟ وحتى ندرك الدافع وراء هذا السؤال علينا أن نسترجع أن الفiziاء الناجمة عن أي من ازدواج صور المرأة في أشكال كالابي-ياو (إذا اخترتناها من الأبعاد الإضافية) هي واحدة، غير أن الرياضيات المعقدة التي على الفيزائيين أن يستخدموها لاستخلاص الفiziاء من الممكن أن تختلف بشكل ملحوظ بين الاثنين. ضمن آسبينول ولوتكن أن التحول الانقلابي المعقد رياضياً في الشكلين رقمي (11-3) و(11-4) قد يكون له وصف صورة مرآة أبسط كثيراً - وهو الوصف الذي قد يعطي رؤية أكثر شفافية للفiziاء المرافقه.

وفي هذا الوقت لم يكن تناظر المرأة مفهوماً بالعمق المطلوب للإجابة عن السؤال الذي طرحاه. إلا أن آسبينول ولوتكن قد لاحظا أنه لا يوجد شيء في وصف صور المرأة يمكن أن يشير إلى نتيجة فيزيائية كارثية مرتبطة بتمزق الفراغ أثناء التحولات الانقلابية. وتقريراً في هذا الوقت كانت الأبحاث التي نجريها أنا وبليسيير للبحث عن ازدواجات صور المرأة لأشكال كالابي-ياو⁽³⁾ قد أدت بنا، من دون أن نتوقع ذلك، إلى أن نفكّر في التحولات الانقلابية أيضاً. والتصاق النقاط المختلفة مع بعضها كما في الشكل رقم (11-4)، حقيقة رياضية معروفة جيداً - وهي العملية التي استخدمناها لتصميم أزواج صور المرأة - قد أدت إلى أوضاع هندسية تتطابق مع التنوءات والثقوب في الشكلين رقمي (11-3) و(11-4). ومع ذلك فلم نجد أنا وبليسيير فيزيائياً أي كارثة ملزمة لذلك. والأكثر من ذلك، وبإيعاز من ملاحظات آسبينول ولوتكن (وكذلك بتشجيع من أصحابهما مع غراهام روس) أدركتنا أنا وبليسيير أنه يمكننا إصلاح التنوءات رياضياً بطريقتين مختلفتين. أدت إحدى الطريقتين إلى الشكل كالابي-ياو الموجود في الشكل رقم (11-3)، (a) بينما تؤدي الأخرى إلى ما هو موجود في الشكل رقم (11-4)، (d). وقد أوحى لنا ذلك بأن التطور من الشكل رقم (11-3)، (a)، وحتى الشكل رقم (11-4)، (d) ما هو إلا شيء يمكن أن يحدث بالفعل في الطبيعة.

وبحلول آخر العام 1991 كان قليل من منظري نظرية الأولار لديهم إحساس قوي بأن نسيج الفضاء "يمكن" أن يتمزق. لكن لم يكن لدى أي منهم الوسائل التقنية ليعضد أو يدحض هذا الاحتمال المذهل بكل تأكيد.

ثالثاً: السير ببطء إلى الأمام

وبين حين وأخر سنة 1992، حاولنا أنا وبليسيير أن نبين أن نسيج الفضاء

(3) انظر الفصل العاشر من هذا الكتاب.

يمكن أن يمر بتحولات انقلابية نتيجة تمزق الفضاء. وقد أوجدت حساباتنا أجزاء متفرقة من دلائل ظرفية مضادة، لكننا لم نقع على البرهان الأكيد. وفي الربع قام بليسيير بزيارة معهد الدراسات المتقدمة بجامعة برنستون ليلتقي معاشرة. وقد أخبر ويتن في جلسة خاصة عن محاولاتنا الحديثة للتحقق من رياضيات التحولات الانقلابية لتمزق الفراغ في إطار فيزياء نظرية الأوّلار. وبعد أن لخص بليسيير أفكارنا، انتظر ليسمع رد فعل ويتن. استدار ويتن مبتعداً عن السبورة وأخذ يحدّق من خلال نافذة المكتب. وبعد دقيقة أو ربما دققتين من الصمت استدار ناحية بليسيير وأخبره أنه إذا كانت أفكارنا صحيحة "سيكون ذلك أمراً مدهشاً". حمس ذلك من جهودنا. ولكن بعد برهة، وبينما كان التقدم متوقفاً في هذا الشأن، اتجه كل منا للعمل على مشروعات أخرى في نظرية الأوّلار.

وحتى مع هذا فقد وجدت نفسي أفكرا مليأة في التحولات الانقلابية الناتجة من تمزق الفضاء. ويمرور الشهور، ازداد شعوري تأكيداً بأنها لا بد أن تكون جزءاً لا يتجزأ من نظرية الأوّلار. وقد جعلت الحسابات الأولية التي أجريناها أنا وبليسيير وكذلك المناقشات الممثرة مع ديفيد موريسون، عالم الرياضيات من جامعة ديوك، جعلت الأمر يبدو وكأنه الاستنتاج الوحيد الذي يعضده تناظر المرأة بشكل طبيعي. وفي الحقيقة، وأثناء زيارة لجامعة ديوك قمت بالاشتراك مع موريسون وببعض الملاحظات التي قدمها شيلدون كاتس من جامعة ولاية أوكلاهوما، وكان موجوداً في زيارة لجامعة ديوك في نفس الوقت، وهي ملاحظات ساعدت كثيراً، قمنا بوضع الخطوط العريضة الاستراتيجية لنبرهن على أن التحولات الانقلابية يمكن أن تحدث في نظرية الأوّلار. لكن عندما بدأنا بإجراء الحسابات المطلوبة وجدنا أنها شديدة الكثافة بشكل غير عادي. حتى أنه باستخدام أسرع الحاسوبات فإنها قد تستغرق أكثر من قرن من الزمان لتتكامل. لقد أحرزنا بعض التقدم، لكن من الواضح أننا في حاجة لفكرة جديدة، الفكرة التي تعلي من كفاءة طرق حساباتنا بشكل كبير. وقد توصل فيكتور باتيريف - وهو عالم رياضيات من جامعة إيسين - من دون أن يتعمد ذلك، إلى مثل هذه الفكرة ونشرها في مقالين في ربيع 1992.

أصبح باتيريف مهتماً جداً بتناول المرأة، وخاصة في ضوء نجاح كانديلاس وتعاونيه في استخدام أبحاثه لحل معضلة إحصاء عدد الكرات الواردة في نهاية الفصل العاشر ومع ذلك، ومن منظور رياضي، لم يكن باتيريف مستريحاً إلى الطرق التي استشهدنا بها أنا وبليسيير لاكتشاف أزواج صور المرأة في فراغات كالابي-ياو. وبالرغم من أن منطلقنا قد استخدم وسائل مألوفة لمنظري نظرية

الأوتار إلا أن باتيريف أخبرني في ما بعد أن بحثنا قد بدا له وكأنه "سحر أسود". ويعكس ذلك الانشقاق الثقافي الكبير بين مناهج الفيزياء والرياضيات، وعندما تقترب نظرية الأوتار من حدودهما، يصبح الاختلاف الشاسع في اللغة والطرق والأسلوب لكل مجال أكثر وضوحاً. فالفيزيائيون مثل الرواد الأوائل من مؤلفي الموسيقى، لا يمانعون في تطوير القواعد التقليدية في بحثهم عن الحلول. أما الرياضيون فهم أقرب ما يكونون لمؤلفي الموسيقى الكلاسيكيين، يؤلفون موسيقاهم في أطر أكثر جموداً، ولا يتقللون إلى خطوة تالية إلا بعد الانتهاء تماماً من الخطوات السابقة. ولكلتا الطريقتين إيجابياتها وسلبياتها، فكل منها تقدم طريقة فريدة للاكتشافات الخلاقة. وكما في الموسيقى الحديثة والكلاسيكية، لا يمكن القول بأن إحداهما على صواب والأخرى على خطأ - فالطرق التي يختارها المرء تخضع للذوق والتدريب بالشكل كبير.

بدأ باتيريف في إعادة تصميم نسخ صور المرأة في إطار رياضي اعتيادي أكثر، وقد نجح في ذلك. وقد توصل باتيريف إلى خطوات رياضية منهجية لصياغة أزواج من فراغات كالابي-ياو تمثل صور مرآة بعضها البعض، وذلك بمحض من الأبحاث السابقة لـ "شي-شير روان"، عالم الرياضيات من تايوان. وقد تبسطت تصميماته لتصبح مثل الطريقة التي اكتشفناها أنا وبليسير في الأمثلة التي درسناها، لكنه قدمها في إطار أكثر عمومية مصوغة بطريقة اعتيادية أكثر بالنسبة للرياضيين.

والجانب الآخر في الموضوع هو أن أبحاث باتيريف قد افتحت مناطق في الرياضيات لم يطرقها معظم الفيزيائيين من قبل أبداً. فعلى سبيل المثال، يمكنني أن أستخلص لب الموضوع، لكنني أعاني من صعوبات كبيرة في فهم الكثير من التفاصيل الحرجة. غير أنه كان هناك أمر واحد واضح: فالطرق المستخدمة في أبحاثه، إذا فهمت وطبقت بصورة صحيحة يمكن أن تفتح خطأً جديداً في محاولات معالجة موضوع الانتقالات الانقلابية الناجمة عن تمزق الفضاء.

وفي أواخر الصيف، مدفوعاً بالحماس الذي جاءت به هذه التطورات، قررت أنني راغب في العودة إلى مشكلة الانتقالات كلية ويتفرع تام. وقد علمت من موريسون أنه سيدهب في إجازة دراسية من جامعة ديووك ليقضيها في معهد الدراسات المتقدمة، وعلمت كذلك أن آسبينول سيكون هناك كزميل في مهمة علمية لما بعد الدكتوراه. وبعد عدة مكالمات تليفونية ورسائل إلكترونية، استطعت أن أحصل على إجازة دراسية من جامعة كورنيل لقضاء خريف 1992 في هذا المعهد أيضاً.

رابعاً: ظهور استراتيجية

من الصعب إيجاد مكان أكثر مثالية لقضاء ساعات طويلة من المناقشات الجادة أكثر من معهد الدراسات المتقدمة. تأسس هذا المعهد في العام 1930، ويقع في حقول تموج بالخضرة على حدود غابة جميلة تبعد بضعة أميال عن موقع جامعة برنستون. ويقال إنه لا شيء يلهيك عن عملك في هذا المعهد، حيث أنه لا يوجد ما يلهيك.

وقد التحق آينشتاين بهذا المعهد في العام 1933 بعد أن غادر ألمانيا ومكث هناك طوال حياته بعد ذلك. ولا يحتاج الأمر إلى كثير من الخيال لتصور آينشتاين وهو يحوم حول نظرية المجال الواحد في أروقة هذا المعهد الغارق في الهدوء والعزلة. فتراث التفكير العميق يتشر في الجو، الذي في حين يتوقف على مدى التقدم المباشر لديك، يمكن أن يكون إما مثيراً أو شديد الوطأة.

ويعد فترة وجيزة من الوصول إلى هذا المعهد، كنت أنا وأسبينول نسير في شارع ناسو (الشارع التجاري الرئيسي في مدينة برنستون) محاولين أن نختار مكاناً لتناول العشاء. ولم يكن هذا الأمر هيناً، حيث أن بول من المتعصبين لأكل اللحوم، بينما أنا نباتي. وبينما نحن في خضم حديثنا عن حياتنا أثناء سيرنا، سألني أسبينول عما إذا كانت عندي أفكار لأبحاث جديدة. أجبته أن عندي بالفعل، وأعددت على مسمعه أهمية استعراض أن الكون يمكن أن يعاني من تحولات ناجمة عن تمزق الفضاء، إذا كان من الممكن وصف العالم بنظرية الأوتار. وسردت الخطوط الاستراتيجية العريضة التي كنت أتبعها، وكذلك الآمال الجديدة التي جاءت مع أبحاث باتيريف ويمكن أن تسمح لنا بملء الفراغات. وقد تصورت أنني أعظ بول، وأنه سيشار بهذا الحديث. لكن الأمر لم يتره. وفي المقابل كان تحفظه نابعاً من طول ممارستنا الذهنية الطيبة لمقارنة بعضنا أفكار بعض. وبعد عدة أيام تقابلنا، ووجهنا كل اهتمامنا للتحولات الفجائية.

وفي ذلك الحين، وصل موريسون إلى المعهد، وفي جلسة ضمت ثلاثة في حجرة الشاي، تناولنا صياغة استراتيجية في هذا الشأن. واتفقنا أن يكون هدفنا المحوري هو تحديد ما إذا كان التطور من الشكل رقم (11-3)، (a) إلى الشكل رقم (11-4)، (d) يمكن أن يحدث بالفعل في عالمنا. لكن كان التعامل المباشر مع هذا السؤال مستحيلاً حيث أن المعادلات التي تصف هذا التطور كانت في غاية الصعوبة، وبخاصة عندما يحدث تمزق للفضاء. وفي المقابل، فإننا قد اخترنا إعادة صياغة الموضوع مستخدمين وصف صور المرأة، وأملين أن تكون

المعادلات المعنية أكثر طواعية. وهذا الأمر موضع بصورة تخطيطية في الشكل رقم (5-11) الذي فيه الصف الأعلى هو التطور الأصلي من الشكل رقم (3-11)، (a) إلى الشكل رقم (4-11)، (d)، والصف السفلي هو نفس التطور من منظور صور المرأة لأشكال كالابي-ياو. وكما أدرك عدد منا، اتضحت أن إعادة الصياغة ناحية صور المرأة متمشية تماماً مع فيزياء الأوتار ولا يقابلها أية كارثة. وكما ترى، لا يبدو أن هناك أي تمزق أو تشوه في الصف السفلي من الشكل رقم (5-11). إلا أن السؤال الحقيقي الذي أثارته هذه الملاحظات كان: هل تقوم بدفع تناقض صور المرأة أبعد من حدود تطبيقاتها؟ وبالرغم من أن أشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى والصف الأسفل الموجودة في أقصى اليسار في الشكل رقم (11-5) تعطي نفس الفiziاء، فهل حقيقي أنه عند كل خطوة من خطوات التطور من الجانب الأيسر في اتجاه الجانب الأيمن في الشكل رقم (5-11) - لا بد بالضرورة أن تمر الأشكال بمراحل من التمزق والتشوه - تكون الخواص الفيزائية للشكل الأصلي وصور المرأة واحدة؟

الشكل رقم (5-11)



التحول الفجائي الناجم عن تمزق الفضاء (الصف الأعلى) وإعادة الصياغة لصورة المرأة (الصف الأسفل) المقابلة لها.

وعلى الرغم من أنه كان لدينا حجج قوية لنعتقد أن العلاقة الوطيدة بين صور المرأة ستظل صالحة أثناء تطور الأشكال، مؤدية إلى التمزق في الصف الأعلى لأشكال كالابي-ياو في الشكل رقم (5-11)، فقد أدركنا أنه لا يعرف أحد ما إذا كان الصف الأعلى أو الصف الأسفل لأشكال كالابي-ياو في الشكل رقم (5-11) سيستمر في التواجد على شكل صورة مرآة بعد حدوث التمزق. وهذا سؤال حرج، لأنه لو كان الأمر كذلك، فإن عدم وجود كارثة في منظور صورة المرأة يعني عدم وجودها في الصورة الأصلية، وتكون بذلك قد بينا أن الفضاء يمكن أن يتمزق في نظرية الأوتار. وأدركنا أنه يمكن اختزال هذا السؤال ليصبح مجرد حسابات: استخلص خواص الكون الفيزائية لشكل كالابي-ياو الأعلى بعد

حدوث التمزق (مستخدماً مثلاً الشكل الأيمن العلوي من أشكال كالابي - ياو في الشكل رقم (11-5)) وكذلك لصورة المرأة المفترضة (الشكل الأيمن السفلي من أشكال كالابي - ياو في الشكل رقم (11-5)) ولتر ما إذا كانا متطابقين.

لقد كانت تلك هي الحسابات التي كرسنا أنفسنا لها أنا وموريسون وأسيبنول في خريف العام 1992.

خامساً: الليالي الأخيرة في وقع خطوات آينشتاين النهائية على الأرض

إن فكر إدوارد ويتن الثاقب مغلق في مسلك ناعم في الحديث يحمل في طياته غالباً السخرية. وينظر إليه على أنه خليفة آينشتاين كأعظم فيزيائي في العالم على قيد الحياة. وينذهب البعض إلى أبعد من ذلك فيصفونه بأنه أعظم فيزيائي في كل العصور. ويتمتع بهم شديد تجاه المشكلات الشائكة في الفيزياء، وله تأثير هائل في صياغة اتجاه البحث في نظرية الأوتار.

ومجالات إنتاج ويتن أسطورية. وتصوره زوجته تشارا نابي - وهي فيزيائية في نفس المعهد كذلك - وهو جالس إلى طاولة المطبخ يختبر بذهنه حدود المعرفة في نظرية الأوتار، وبين لحظة وأخرى يتقطط ورقة وقلماً ليتحقق من بعض التفصيات الممحيرة⁽⁴⁾. ويروي أحد زملاء البحث رواية أخرى عنه في صيف ما عندما كان مكتبه مجاوراً لمكتب ويتن. وهو يصف عدم الاستقرار في وضع حسابات نظرية الأوتار المعقدة أثناء جلوسه إلى مكتبه وهو يستمع إلى الدقات المتلاحقة والمتناغمة للوحة الأزرار في كمبيوتر ويتن، حيث تنساب المقالات العلمية الخطيرة واحدة تلو الأخرى من عقله إلى ملفات الكمبيوتر.

وفي غضون أسبوع أو أكثر من وصولي، وبينما كنا نتحاور أنا وويتن في فناء المعهد، سأله عن خطط أبحاثي. أخبرته عن التحولات الفجائية الناجمة عن تمزق الفضاء والاستراتيجية التي خططنا لاتبعها. تحمس بشدة عند سماعه هذه الأفكار، لكنه حذر من ذلك لأنه تصور أن الحسابات قد تكون في غاية الصعوبة وأشار إلى نقطة الضعف المحتملة في الاستراتيجية التي شرحتها، والتي لها صلة ببعض الأبحاث التي كنت قد أجريتها منذ بضع سنوات مع فافا ووارنر. وقد اتضح أن الموضوع الذي أثاره مجرد أمر يمس منظاراتنا لفهم التحولات الفجائية، لكن ذلك جعله يبدأ التفكير في الأمر الذي اتضح أن له علاقة بباحثانا وأنه ومكملاً لها.

قررنا أنا وأسيبنول وموريسون أن نقسم حساباتنا إلى قسمين. وللوهلة الأولى

K. C. Cole, "A Theory of Everything," *New York Times Magazine* (18 October 1987), p. 20. (4)

قد يبدو أن التقسيم الطبيعي يتضمن أولاً استخلاص الفيزياء المتعلقة بأشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى من الشكل رقم (5-11) ، ثم نفعل نفس الشيء بعد ذلك لأشكال كالابي-ياو النهائية في الصف الأسفل في الشكل رقم (5-5) . فإذا لم تنشطر علاقات صور المرأة إلى أجزاء بواسطة التمزق في الصف العلوي لأشكال كالابي-ياو ، فإن هذين الشكلين النهائين من أشكال كالابي-ياو سيعطيان نفس الفيزياء ، تماماً مثل شكلي كالابي-ياو الأصليين اللذين جاءا منهما. (وتجربنا هذه الطريقة في صياغة المشكلة كل الحسابات الصعبة التي تتضمن أشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى عندما تبدأ في التمزق). ومع ذلك يتضح أن حسابات الفيزياء المتعلقة بأشكال كالابي-ياو النهائية في الصف الأعلى واضحة بشكل جيد. وتكون الصعوبة الحقيقة في إجراء هذا البرنامج أولاً في تصور الشكل الدقيق لفراغات كالابي-ياو النهائية في الصف الأسفل من الشكل رقم (5-11) - صورة المرأة المفترضة لأشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى - ثم بعد ذلك في استخلاص الفيزياء المعنية.

كان كانديلاس قد أنجز منذ بضع سنوات مضت طريقة لاستكمال المهمة الثانية : استخلاص الصفات الفيزيائية لفراغ كالابي-ياو النهائي في الصف الأسفل بمجرد معرفة شكلها بالضبط. كانت حساباته مكثفة ، الأمر الذي دفعنا للاعتقاد أن الموضوع يتطلب برنامج كمبيوتر ذكي لإجراء تلك الحسابات في مثالنا. كان آسيئنول مبرمجاً بارعاً بجانب كونه فيزيائياً متميزاً ، وقد أخذ على عاتقه إنجاز هذه المهمة. في هذا الوقت بدأنا أنا وموريسون استكمال المهمة الأولى لتحديد الشكل الدقيق لصورة المرأة المحتملة من فراغ كالابي-ياو.

وهنا ، شعرنا بأن أبحاث باتيريف يمكن أن تقدم لنا بعض الحلول الهامة. ومرة أخرى ، مع ذلك ، بدأ الانشقاق الثقافي بين الرياضيات والفيزياء - وفي هذه الحالة بيني وبين موريسون - في إعاقة التقدم. كنا في حاجة إلى تضافر قوى المجالين لإيجاد " الصيغة الرياضية " لأشكال كالابي-ياو في الصف الأسفل ، والتي يجب أن تعبّر عن نفس فيزياء العالم مثل أشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى ، إذا كان التمزق الفجائي من خصائص الطبيعة. لكن لم يكن أي منا ضليعاً في تخصص الآخر ليري بوضوح كيف يصل إلى نهاية هذا الموضوع. وقد اتضح لدينا أن علينا أن نتحمل : فكل منا يحتاج إلى منهج مكثف في مجال خبرة الآخر. وهكذا قررنا أن نمضي أيامنا في بذل أقصى ما يمكن في الحسابات بينما نمضي الأمسيات في هيئة أستاذ وطالب في نفس الوقت : فأحاضر أنا موريسون لساعة أو أكثر في الفيزياء الالزامية للموضوع ، ثم يقوم بدوره بتقديم محاضرة لي لمدة ساعة

أو أكثر في الرياضيات الازمة. كانت الدراسة تنتهي في هذه المدرسة حوالي الحادية عشرة مساء.

الترزمنا بهذا البرنامج يوماً بعد يوم. كان التقدم بطيناً لكننا كنا نشعر بأن الأمور بدأت تسير في مسارها الصحيح. وفي هذه الأثناء كان ويتن قد توصل إلى مقدمات ذات مغزى في إعادة صياغة النقاط الضعيفة التي حددتها من قبل. كانت أبحاثه تؤسس طريقة جديدة وأكثر قدرة على مزج فيزياء نظرية الأوّلار برياضيات فراغات كالابي-ياو. كنا نجتمع يومياً بصورة عفوية أنا وآسيبنول وموريسون مع ويتن حيث كان يعرض علينا الأفكار التي تجيء بها طريقته. وبمرور الأسابيع أصبح من الواضح تدريجياً، وعلى غير المتوقع، أن أبحاثه التي بدأت من نقطة مختلفة تماماً عن النقطة التي بدأنا منها، كانت تقترب من موضوع التحولات الفجائية. وشعرنا أنا وآسيبنول وموريسون أننا إذا لم نكمل على وجه السرعة حساباتنا فإن ويتن سيتغلب علينا بالضربة القاضية.

سادساً: ست علب والعمل في عطلة نهاية الأسبوع

لا شيء يدفع الفيزيائيين لتركيز انتباهم مثل المنافسة الشريفة، وهو بالضبط ما دفعنا للعمل بهمة أكبر أنا وآسيبنول وموريسون. كان ذلك يعني شيئاً ما بالنسبة لآسيبنول. كان آسيبنول مزيجاً غريباً من الإحساس البريطاني عند الشريحة العليا من الطبقة المتوسطة، وهو نتاج بقائه عقداً من الزمن في أوكسفورد كطالب للمرحلة الأولى الجامعية ثم طالب دراسات عليا، وقد تشرب خلال هذه الفترة قليلاً من الدهاء وروح الفكاهة. ولعل آسيبنول هو أكثر الفيزيائيين الذين أعرفهم تحضراً، إذا تناولنا عاداته في العمل. وبينما يعمل الكثير منا حتى وقت متأخر من المساء، فإنه لا يعمل إطلاقاً بعد الخامسة مساءً. وبينما يعمل الكثير منا أثناء عطلة نهاية الأسبوع، فإنه لا يفعل ذلك. ويتمكن آسيبنول من فعل ذلك لأنه حاد الذكاء وينظم وقته بكفاءة. ومعنى العمل بهمة أكثر عنده هو مجرد رفع مستوى كفاءة عمله إلى الأعلى.

أصبح الوقت أوائل كانون الأول/ديسمبر. كنا أنا وموريسون نحاضر بعضنا البعض لعدة شهور، ويدأنا نشعر بأننا نجني عائداً من ذلك. وأصبحنا قريين جداً من التمكن من تعريف الشكل الدقيق لفراغ كالابي-ياو الذي نبحث عنه. وفوق ذلك، فقد كان آسيبنول على وشك الانتهاء من برمجة الكمبيوتر، وكان في انتظار نتائجنا، التي كانت تمثل المدخلات المطلوبة لبرنامجه. كانت ليلة الخميس عندما أصبحنا أنا وموريسون على يقين بأننا نعرف كيف نُعرف الشكل كالابي-ياو الذي

كنا نبحث عنه. انتهى ذلك كله على طريقة تتطلب شفرة بسيطة نوعاً ما و خاصة بها. وبعد ظهر يوم الجمعة كنا قد كتبنا البرنامج، وفي ليلة الجمعة كنا قد حصلنا على نتائجنا.

غير أننا كنا قد تخطينا حاجز الخامسة مساء من يوم الجمعة، وكان آسبينول قد غادر إلى بيته ولن يعود قبل يوم الاثنين. ولم يكن في إمكاننا إنجاز أي شيء بدون برنامجه على الكمبيوتر. ولم تخيل أنا أنا أو موريسون ستقدر على الانتظار طوال عطلة نهاية الأسبوع. كنا على وشك الإجابة عن السؤال الذي طال حومنا حوله عن تمزق الفضاء في نسيج الكون، وكان القلق أكبر مما نحتمل. طلبنا آسبينول بالטלيفون في بيته. رفض في البداية أن يعمل في صباح اليوم التالي كما طلبنا منه. لكن وبعد فترة من التمنع وافق على مضض أن ينضم إلينا شريطة أن نشتري له صندوقاً من البيرة. وقد وافقنا.

سابعاً : لحظة من الحقيقة

التقينا جميعاً في المعهد صباح السبت كما خططنا لذلك. كان الصباح مشمساً وضاحاً. وكان الجو مريحاً. وكنت أنا نفسي غير متأكد من قدوم آسبينول، وعندما جاء أخذت على مدى ربع الساعة أطري أهمية وجوده معنا لأول مرة في عطلة نهاية أسبوع في المكتب. وقد أكد لي أن ذلك لن يتكرر مرة أخرى.

التفقنا نحن الثلاثة حول الكمبيوتر الخاص بموريسون في المكتب المشترك بيني وبينه. أخبر آسبينول موريسون عن كيفية استخراج برنامجه على شاشة الكمبيوتر وشرح لنا الصيغة الدقيقة للمدخلات المطلوبة. عدل موريسون بالطريقة المناسبة النتائج التي توصلنا إليها في الليلة السابقة وأصبحنا على استعداد لبدء العمل.

وخلال القول، كانت الحسابات التي نجريها تهدف إلى تحديد كتلة نوع معين من الجسيمات - نسق اهتزازي خاص لأحد الأوتار - عندما يتحرك خلال الكون الذي يحتوي شكل كالابي-ياو الذي أنفقنا كل الخريف لتحديده. كنا نأمل في ضوء الاستراتيجية التي نقاشناها من قبل - أن تتفق هذه الكتلة تماماً مع حسابات مماثلة أجريت على الشكل كالابي-ياو الذي نتج من التحول الفجائي الناجم عن تمزق الفضاء. كانت الحسابات الأخيرة هي الأسهل نسبياً وكنا قد فرغنا منها منذ بضعة أسابيع، وقد اتضح أن الإجابة هي 3، بنفس الوحدات التي كنا نستخدمها. وحيث أننا كنا نجري الحسابات العددية على صور المرأة المفترضة بالكمبيوتر، فإننا توقعنا الحصول على نتيجة قريبة جداً، لكن ليست 3 بالضبط،

كأن تكون مثلاً 3.00001 أو 2.999999 بالفارق الذي ينشأ عن تفريغ الخطأ.

جلس موريسون إلى الكمبيوتر وأخذ يحوم بإصبعه قرب زر "المدخل" (Enter) على لوحة الأزرار. وبتوتر متزايد قال "سبباً"، وضغط على الزر لتيبدأ عملية الحسابات. وفي غضون بضع ثوان جاء جواب الكمبيوتر بالعدد 8.999999. هبط قلبي في قدمي. هل من الممكن أن تشنط التحولات الفجائية، الناجمة عن تمزق الفضاء علاقات صور المرأة، مما يعني أنها لا يمكن أن تحدث بالفعل؟ وتيقنا في التو أن أمراً غريباً لا بد أن يكون قد حدث. فإذا لم يكن هناك في الواقع تطابق بين الفiziاء الناتجة من الشكلين، فمن غير المحتمل أبداً أن تجيء حسابات الكمبيوتر بإجابات على هذا القرب من عدد صحيح. فإذا كانت أفكارنا على خطأ، فليس هناك سبب واحد في العالم لتوقع أي شيء سوى عدد عشوائي. لقد حصلنا على نتيجة خاطئة، لكنها تعني أنها ربما تكون قد ارتكبنا خطأ حسابياً بسيطاً. توجهنا أنا وأسيبنيول إلى السبورة، واكتشفنا خطأنا في لحظة: لقد أغفلنا معامل 3 في حساباتنا "الأبسط" التي أجريناها منذ عدة أسابيع، والإجابة الحقيقة هي 9. وبذا كانت إجابة الكمبيوتر هي ما كنا نبتغيه فقط.

وطبعاً، لم يكن التوافق مع ما كنا قد حصلنا عليه سوى أمر هامشي في إقناعه. لأنك إذا كنت تعرف الإجابة التي تسعى وراءها، فغالباً من السهل أن تجد طريقاً للوصول إليها. ولذا تطلب الأمر مثلاً آخر. وحيث أننا كنا قد كتبنا كل البرامج الضرورية للكمبيوتر، لم يكن ذلك بالأمر الصعب. قمنا بحساب كتلة جسمية أخرى على أحد أشكال كالابي-ياو من الصنف الأعلى، متخذين حذرنا كيلا نقع في أي خطأ. كانت الإجابة 12. ومرة ثانية التفينا حول الكمبيوتر وبدأنا العمل. وبعد عدة ثوان ظهر الرقم 11.999999. إنه التوافق. لقد أثبتنا أن صورة المرأة المفترضة هي صورة المرأة بالفعل، وعليه فإن التحولات الفجائية الناجمة عن تمزق الفضاء هي جزء من فيزياء نظرية الأوتار.

وهنا قفزت من مقعدي، وركضت دورة النصر حول المكتب لأشعرورياً. أضاء وجه موريسون أمام الكمبيوتر، لكن كان رد فعل أسيبنيول مختلفاً. إنه أمر عظيم، لكنني كنت أعرف أن الأمور ستسير كذلك، ثم أضاف بهدوء: "أين البيرة؟".

ثامناً: منطلق ويتزن

ويوم الاثنين التالي، ذهبنا مزهوبين إلى ويتزن وأعلمناه بنجاحنا. كان مسروراً للغاية بتائجنا. اتضح أنه كان قد توصل بدوره منذ فترة وجيزة إلى طريقة تؤكد أن التحولات الفجائية تحدث في نظرية الأوتار. كانت أداته مختلفة تماماً عن أدلتنا،

وكان توضيح بجلاء إدراكتا لأسباب عدم حدوث أية كوارث نتيجة لتمزق الفضاء على المستوى المجهرى.

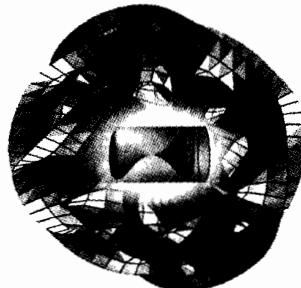
وقد ألقى منطلق ويتن الضوء على الفرق بين نظرية الجسيمة النقطة ونظرية الأوتار عندما يحدث مثل هذا التمزق. والتمييز الأساسي هو أن هناك نوعين من حركة الوتر بالقرب من موقع التمزق، لكن هناك نوعاً واحداً فقط من الحركة في حالة الجسيمة النقطة. وبالتحديد، يستطيع الفرد أن ينتقل مجاوراً للتمزق كما تفعل الجسيمة النقطة، لكنه يستطيع أيضاً أن يتلف حول التمزق أثناء حركته إلى الأمام، كما في الشكل رقم (11-6). وخلاصة القول، إن تحليل ويتن يكشف أن الأوتار التي تلتف حول التمزق، وهو الأمر الذي لا يمكن أن يحدث في نظرية الجسيمة النقطة، تحجب العالم المحيط عن التأثيرات الكارثية التي بدون ذلك كان سيتعرض لها. كما لو كان عالم الوتر الذي على شكل فرخ أو لوعة رقيقة - ولسترجع من الفصل 6 أن هذا العالم الذي ينزلق فيه الوتر أثناء حركته خلال الفضاء هو سطح ثانوي الأبعاد - يقدم حاجزاً حاماً يلغى تماماً السمات الكارثية للتحطم الهندسي في النسيج الفضائي.

وقد نتساءل ماذا لو حدث مثل هذا التمزق ولم يكن هناك أوتار بالقرب لتجهبه؟ وفوق ذلك، قد يعنيك أنه عند لحظة حدوث التمزق فإن الوتر - وهو حلقة في غاية الرقة - سيزودك بحماية في كفاءة ما يقدمه طوق الهولا هو布 للحماية من قبضة عنقودية. وحل هذين المسؤولين يمكن في سمة محورية في ميكانيكا الكم سبق أن ناقشناهما في الفصل الرابع.. وقد رأينا بناء على صياغة فينمان لميكانيكا الكم أن أي جسم مهما كان، جسيمة أو وترًا فإنه، ينتقل من موقع آخر عبر كل المسارات الممكنة.

والحركة الناتجة التي لاحظناها هي تجمع لكل الاحتمالات، مع المساهمة النسبية لكل مسار محتمل، التي تم تحديدها بدقة بواسطة رياضيات ميكانيكا الكم. فإذا ما حدث تمزق في نسيج الفضاء، فإن مسارات الأوتار التي تلتف حول التمزق ستكون من بين المسارات المحتملة - مسارات مثل تلك الموجودة في الشكل رقم (11-6). وحتى إذا بدا أنه لا توجد أوتار بالقرب من التمزق عندما يحدث، فإن ميكانيكا الكم تأخذ في الاعتبار التأثيرات الفيزيائية لكل المسارات المحتملة للأوتار، التي من بينها العديد (عدد لانهائي في الواقع) من المسارات الواقعية التي تلتف حول التمزق. إنها تلك المسارات التي بين ويتن أنها تلاشي بالضبط الكارثة الكونية التي كانت تحدث نتيجة للتمزق.

قدم ويتن وثلاثتنا أبحاثنا في كانون الثاني / يناير 1993 في نفس الوقت إلى

الشكل رقم (6-11)



عالم الفرج أو اللوح الذي يتكون من الوتر يقدم حاجزاً يلاشي التأثيرات الكارثية المحتملة والمرافقة لتمزق النسيج الفضائي.

الأرشيف الإلكتروني للإنترنت الذي من خلاله تناول مقالات الفيزياء في التو واللحظة في جميع أنحاء العالم. وقد وصفت المقالتان، من منظوريين جد مختلفين، الأمثلة الأولى للتحولات المتغيرة طوبولوجياً (Topology-Changing) (Transit) - وهو الاسم التقني لعمليات تمزق الفضاء التي اكتشفناها. وهكذا تم حل التساؤل الذي ظل قائماً مدة طويلة عما إذا كان في استطاعة الفضاء أن يتمزق، بطريقة كمية بواسطة نظرية الأوتار.

تاسعاً: النتائج

لقد أنجزنا الكثير على طريق التحقق من أن التمزق الفضائي يحدث دون كوارث فيزيائية. لكن ما الذي يحدث عندما يننشر نسيج الفضاء؟ وما هي النتائج التي يمكن ملاحظتها؟ لقد رأينا أن الكثير من خواص الكون من حولنا تعتمد على البنية التفصيلية للأبعاد المتعددة. وهكذا فإنك قد تظن أن التحول الراديکالي نسبياً من أحد أشكال كالابي-ياو إلى الآخر كما في الشكل رقم (5-11)، قد يكون له تأثير فيزيائي واضح. غير أنه في الحقيقة، فإن الأبعاد الموجودة في النصف الأسفل التي استخدمناها لتصوير الأشكال جعلت التحولات تبدو أكثر تعقيداً إلى حد ما مما هي عليه بالفعل. فإذا تصورنا أشكالاً ذات ستة أبعاد، فإننا قد نرى فعلاً أن النسيج يتمزق، لكنه يحدث بطريقة أكثر سلاسة. وهو أكثر شبهًا بحشرة العثة وهي تأكل الصوف في بنطلون متعدد بشدة عند الركبة.

وتبيّن أبحاثنا وأبحاث ويتمن أن الخواص الفيزيائية مثل عدد عائلات تذبذب الأوتار وأنواع جسيمات كل عائلة لا تتأثر بهذه العمليات. فإذا تطور الشكل

كالابي-ياو من خلال التمزق، فإن ما يمكن أن يتأثر هو القيم الدقيقة لكتلة الجسيمة وطاقة أنساق اهتزاز الأوتار المحتملة. وقد بينت أبحاثنا أن هذه الكتلة ستتغير باستمرار كرد فعل للتغير في الشكل الهندسي لمكونات كالابي-ياو في الفضاء، فبعضها سيتجه إلى أعلى والآخر إلى أسفل. ومع ذلك فإن ما يمثل الأهمية القصوى هو حقيقة أنه ليس هناك كارثة فجائية أو أي سمة غير عادية للكتل المتباعدة عندما يحدث التمزق بالفعل. ومن وجهاً نظر الفيزياء فإن لحظة التمزق ليس لها ما يميزها من خواص.

وثير هذه النقطة موضوعين. الأول، أنها قد ركزنا على التمزق في نسخ الفضاء الذي يحدث في الأبعاد الستة الإضافية لمكونات كالابي-ياو في العالم. هل من الممكن لمثل هذه التمزقات أن تحدث في الأبعاد الثلاثة الممتدة الأكثر ألفة؟ والجواب بكل تأكيد على الأغلب هو أجل. وفي النهاية الفضاء يظل فضاء - بصرف النظر عما إذا كان متوجعاً في أشكال كالابي-ياو بشدة أو ممتداً على طول الاتساع الهائل للعالم الذي نشاهده في ليلة صافية بادية النجوم. وفي الحقيقة، فقد رأينا من قبل أن الأبعاد الفضائية المألوفة قد تتوجع بنفسها على نفسها فعلاً في صورة أشكال عملاقة، سالكة طريقها في الناحية الأخرى من العالم، ولذا فإن التمييز بين أي الأبعاد متوجع وأيها ممتد ما هو إلا تمييز مصطنع. ومع أن تحليلاتنا وتحليلات ويتن تقوم على صفات رياضية خاصة لأشكال كالابي-ياو فالنتيجة - التي هي أن نسخ الفضاء يمكن أن يتمزق - هي بكل تأكيد ذات إمكانيات أوسع في التطبيق.

أما الموضوع الثاني فهو هل يمكن لمثل هذا التمزق الذي يغير من الطوبولوجيا أن يحدث اليوم أو غداً؟ وهل من الممكن أن يكون قد حدث في الماضي؟ أجل. فالقياسات التجريبية لكتلة الجسيمات الأولية تبين أن قيمتها ثابتة لفترات طويلة. لكن إذا عدنا للخلف إلى العصور المبكرة التي تلت الانفجار الهائل، فإنه حتى النظريات التي لا تعتمد على الأوتار توضح وجود فترات هامة تتغير أثناءها كتلة الجسيمات الأولية مع الزمن. وقد تتضمن هذه الفترات تمزقات تغير من الطوبولوجيا، كما ناقشنا في هذا الفصل، وذلك من منطلق نظرية الأوتار. وباقترابنا من الوقت الحاضر، فإن ثبات كتلة الجسيمات الأولية الذي نلاحظه يعني أنه لو كان العالم يعني تمزقات فضائية مغيرة للطوبولوجيا حالياً، فلا بد من أن يحدث ذلك في غاية البطء - من البطء بحيث يكون تأثيرها على كتلة الجسيمات الأولية من الصغر لدرجة أن حساسية أجهزتنا الحالية تعجز عن اكتشافها. ومن المثير للملاحظة أنه إذا كان ذلك هو ما يحدث فإن العالم قد يكون حالياً في

وسط عملية تمزق فضائي. فإذا كان ذلك يحدث ببطء كاف، فإننا لن ندرك ما إذا كان ذلك يحدث. ويمثل ذلك إحدى اللحظات النادرة في الفيزياء التي فيها يكون افتقاد الظاهرة المثيرة التي يمكن مشاهدتها، سبباً في إثارة عظيمة. وغيبة نتائج كارثية يمكن ملاحظتها عن مثل هذا التطور الهندسي الغريب مثل ميثاق يبين مدى التقدم الذي أحرزته نظرية الأوتار أبعد من توقعات آينشتاين.

الفصل الثاني عشر

ما بعد الأوتار

في البحث عن نظرية - M

فَكُّر آينشتاين، أثناء بحثه الطويل عن النظرية الموحدة، في "ما إذا كان أمكن الله أن يخلق الكون بطريقة مختلفة؛ أي ما إذا كانت ضرورة البساطة المنطقية تركت له أي حرية"⁽¹⁾. وبهذه الملاحظة يكون آينشتاين قد صاغ الصورة الحديثة لوجهة النظر التي يشاركه فيها كثير من الفيزيائيين حالياً: فإذا كانت هناك نظرية نهائية للطبيعة، فإن أكثر الأمور إنقاضاً لدعم صيغتها سيكون كونها لا يمكن أن توجد إلا على هذا الشكل. ولابد للنظرية النهائية أن تتخذ الشكل الذي هي عليه لأنها الإطار الفريد القادر على تفسير ووصف الكون من دون الاصطدام بأي عدم توافق داخلي أو غرابة منطقية. وتزعم مثل هذه النظرية أن الأشياء على ما هي عليه لأنها "يجب" أن تكون كذلك. فكل الاحتمالات مهما كانت صغيرة ستؤدي إلى نظرية مثل العبارة القائلة "هذه الجملة كاذبة"، فهي تغرس بذور تحطمها بنفسها.

وهكذا، فإن التوصل إلى مثل هذا الأمر الحتمي لبنيتنا العالمية، قد يؤدي بنا بعد رحلة طويلة إلى فهم بعض أعمق الأسئلة على مر العصور. وتؤكد هذه الأسئلة على الغموض الذي يحيط "بمن أو ما" الذي جعل هذه الاختيارات الظاهرة التي لا حصر لها، والتي يتطلبها تصميم عالمنا. وتجيب الحتمية عن هذه الأسئلة بأن تلغي الاختيارات. والاحتمالية هنا تعني في الواقع عدم وجود اختيارات، كما تزعم الحتمية أن العالم لا يمكن أن يكون شيئاً مختلفاً. وكما ستناقش في الفصل 14، لا يوجد شيء يؤكد أن العالم قد تم تصميمه على هذه الدرجة من الدقة. ورغم ذلك فإن السعي وراء مثل هذه الصرامة في قوانين الطبيعة يقع في قلب برنامج التوحد في الفيزياء الحديثة.

وبحلول نهاية ثمانينيات القرن العشرين، بدا للفيزيائيين أنه على الرغم من أن نظرية الأوتار قد اقتربت كثيراً من صياغة صورة فريدة للعالم، إلا أنها لم تصل

(1) آبرت آينشتاين في اقتباس عن: John D. Barrow, *Theories of Everything: The Quest for Ultimate Explanation* (New York: Fawcett-Columbine, 1992), p. 13.

لذلك. كان هناك سببان لهذا. السبب الأول، كما أشرنا باختصار إليه في الفصل السابع، اكتشف الفيزيائيون أن هناك بالفعل خمس صور لنظرية الأوتار. ولعلك تسترجع أننا قد أطلقنا عليها النموذج I، والنموذج II، IIA، IIB، وهيتروتيك-O (32) (واختصاراً هيتروتيك-O) وهيتروتيك-E₈ × E₈ (واختصاراً وهيتروتيك-E). وتشارك جميعها في صفات أساسية كثيرة - فأنساقها الاهتزازية تحدد الكتلة وشحذات القوى المحتملة، وتتطلب وجود ما مجموعه عشرة أبعاد للزمكان، ولابد لأبعادها المتعددة أن تكون أحد أشكال كالابي - ياو، .. الخ - ولهذا السبب فإننا لم نعر هذه الاختلافات اهتماماً في الفصول السابقة. إلا أن التحاليل التي أجريت في الثمانينيات من القرن العشرين قد أظهرت أن هذه الصور لنظرية مختلفة بالفعل. ويمكنك الاطلاع على المزيد من خواصها في الملاحظات الأخيرة، لكن يكفي أن تعرف أنها تختلف في كيفية تضمينها للتناظر الفائق وفي التفاصيل الهامة لأنساق الاهتزاز التي تعتمد عليها⁽²⁾.

(2) لنلخص الفرق بين نظريات الأوتار الخمس. وللقيام بذلك نلاحظ أن الحركات الاهتزازية على طول حلقة الوتر يمكن أن تنتقل في اتجاه عقارب الساعة أو ضد عقارب الساعة. وتختلف أوتار النوع IIA عن النوع IIB في أنه في النظرية الأخيرة تتطابق الاهتزازات في اتجاه عقارب الساعة وعكس اتجاه عقارب الساعة، بينما في حالة النظرية الأولى فإنها عكس بعضهما بالضبط في الشكل. وكلمة "عكس" هنا لها معنى رياضي دقيق في هذا المضمون، غير أنه من السهل أن تفك فيها من مطلع الحركة المغزالية للأساق الاهتزازية الناتجة في كل نظرية. وقد تضح أن الحركة المغزالية لكل الجسيمات في نظرية النوع IIB تقع جميعها في نفس الاتجاه (لها نفس الكافية)، بينما في نظرية النوع IIA تمارس الحركة المغزالية في كل الاتجاهين (لها كلا الكفيتين). ومع ذلك فإن كل نظرية تتضمن تناقضاً فانقاً. أما في حالة النظريتين الهيتروتيك فإنهما يختلفان بنفس الطريقة لكن بصورة أكثر حدة. وبshire اهتزاز أوتار كل منها في اتجاه عقارب الساعة ذلك الموجود في النوع II (وعند التركيز على الدوران في اتجاه عقارب الساعة فقط فإن نظرتي النوعين IIA، IIB، تساويان)، غير أن اهتزازاتها ضد عقارب الساعة هي تلك الخاصة بنظرية الأوتار البوزونية الأصلية. ومع أنه في الأوتار البوزونية مشاكل يصعب التغلب عليها عند اختيارها لاهتزازات الأوتار في اتجاه عقارب الساعة ضد عقارب الساعة، فقد أظهر كل من ديفيد غروس، وجيفري هارفي، وإميل مارتينيك، ورييان روم سنة 1985 (وكانتوا جميعاً وقتها في جامعة برنسنون، وقد أطلق عليهم "ريامي برنسنون الورقي")، أنظروا أنه من الممكن أن تتحقق نظرية معقوله للغاية إذا استخدمت نظرية الأوتار البوزونية بالتضارف مع نظرية النوع II للأوتار. وحقيقة فإن السمة الغريبة في هذا الاتجاه هي أن النظرية البوزونية تتطلب 26 بعداً للزمكان، بينما في حالة نظرية الأوتار الفائقة فإن الأمر يتطلب 10 أبعاد فقط للزمكان. وقد تم التوصل لذلك من أبحاث كل من كلود لافليس من جامعة روتجرز سنة 1971، وريشارد براور من جامعة بوسطن، وبيتر غودارد من جامعة كمبريدج، وشارلز ثورن من جامعة فلوريدا في جينسفيلد سنة 1972. وهكذا فإن بناء أوتار هيتروتيك هجين غريب - هيتروтиك Heterosis - يكون للأساق الاهتزازية ضد اتجاه عقارب الساعة فيها 26 بعداً، بينما الأنساق في اتجاه =

(فللنموذج I من النظرية مثلاً، أوتار مفتوحة أطرافها غير مثبتة بالإضافة إلى الحلقات المغلقة التي ركزنا عليها). كان ذلك أمراً مخجلاً بالنسبة لمنظري نظرية الأوتار، لأنه على الرغم من وجود اقتراح جاد بنظرية موحدة نهائية مؤثرة، فإن وجود خمسة اقتراحات تعرقل تقدم الأمور.

أما الانحراف الثاني عن الحتمية فهو أكثر دقة. وحتى ندركه تماماً، فإن عليك أن تقرّ بأن كل النظريات الفيزيائية تتكون من جزأين. الجزء الأول تجميع للأفكار الأساسية للنظرية، التي يعبر عنها عادة بالمعادلات الرياضية. أما الجزء الثاني للنظرية فيحتوي على حلول هذه المعادلات. وعموماً، فإن لبعض المعادلات حلّاً واحداً، وهو الحل الوحيد، بينما للبعض الآخر أكثر من حل (من المحتمل أن تكون هناك حلول كثيرة). (ومثال بسيط على ذلك، حاصل ضرب العدد 2 في عدد ما يعطي ناتج 10، فالإجابة حل واحد هو العدد 5. لكن في المعادلة "حاصل ضرب الصفر في عدد ما يعطي صفرًا" له عدد لا نهائي من الحلول، حيث أن حاصل ضرب الصفر في أي عدد يساوي صفرًا). وهكذا، وحتى لو أدى البحث إلى نظرية فريدة بمعادلات فريدة، فإن الحتمية قد تنتهي بوجود حلول وسط، لأنه قد يكون للمعادلات حلول كثيرة ممكنة ومختلفة. وبحلول نهاية ثمانينيات القرن العشرين بدا أن هذا هو الوضع بالنسبة لنظرية الأوتار. فعندما درس الفيزيائيون معادلات أية صورة من الصور الخمس لنظرية الأوتار وجدوا أن لها حلولاً كثيرة - فمثلاً هناك طرق عديدة مختلطة تحدد بها الأبعاد الإضافية - ويعادل كل حل عالم له خواص مختلفة. وعلى الرغم من أن معظم هذه العوالم تبدو كحلول صحيحة لمعادلات نظرية الأوتار، إلا أنها تظهر غير متوازنة مع العالم كما نعرفه.

وقد تبدو هذه الانحرافات عن الحتمية كخواص أساسية صادفها سوء الحظ لنظرية الأوتار. غير أن البحوث التي أجريت منذ منتصف تسعينيات القرن العشرين

= عقارب الساعة هناك 10 أبعاد! وقبل أن تقع في حيرة حتى تصل إلى إدراك معقول لهذا الاتحاد المبهر، فإن غuros وتعاونيه يبينا أن الأبعاد الستة عشر الزائدة في الجانب البوزوني لا بد وأن تتجعد في شكل من أحد شكلين خاصين جداً من أشكال الدونت (الكعكة) ذات الأبعاد الكثيرة، الأمر الذي يؤدي إلى نظرتي هيتروتيك -O، وهيتروتيك -E. وحيث أن الأبعاد الإضافية الستة عشر في الجانب البوزوني متجمدة بصرامة، فإن كل واحدة من هاتين النظريتين تسلك كما لو كان لها 10 أبعاد تماماً كما في حالة النوع II. ومرة أخرى فإن نظرتي هيتروتيك تتضمنان شكلاً من أشكال التناقض الفائق. وأخيراً فإن نظرية النوع الأول من أقارب نظرية أوتار النوع IIB، إلا أنه بالإضافة إلى الحلقات المغلقة للأوتار التي سبقت الإشارة إليها، فإن لها كذلك أوتاراً حرة النهايات - يطلق عليها "أوتار مفتوحة".

قد أعطت أملًا حاسماً جديداً في أن هذه الصفات قد تكون مجرد انعكاسات للطريقة التي حلل بها المنظرون النظرية. وباختصار فإن معادلات نظرية الأوتار على درجة من التعقيد بحيث لا يعرف أحد صيغتها بالضبط. وقد تمكّن الفيزيائيون من وضع الصيغ التقريرية فقط لهذه المعادلات. والصيغة التقريرية هي التي تختلف بوضوح من نظرية للأوتار إلى أخرى. وهي تلك المعادلات التقريرية الموجودة ضمن أية واحدة من النظريات الخمس للأوتار، التي تؤدي إلى عدد هائل من الحلول، أي وفرة من العوالم غير المرغوب فيها.

ومنذ العام 1995 (بداية ثورة الأوتار الفائقة الثانية)، أخذت تراكم أدلة على أن المعادلات الدقيقة، التي ما زالت صيغتها الصحيحة أبعد عن متناولنا، قد تقوم بحل هذه المشكلات، وبالتالي تساعد في جعل نظرية الأوتار حتمية. وفي الحقيقة، رسخت قناعة أرضاً معظم منظري نظرية الأوتار، بأنه عند فهم المعادلات الدقيقة، فإن تلك المعادلات ستظهر أن كل النظريات الخمس للأوتار هي في الواقع مرتبطة بعضها البعض بصورة حميمة. فهي جميعاً أجزاء لكيان واحد متصل - مثل أطراف نجمة البحر - تخضع خواصه التفصيلية حالياً لدراسة مستفيضة. وبدلاً من وجود خمس نظريات مختلفة للأوتار، فإن الفيزيائيين مقتنعون الآن أن هناك نظرية واحدة تنسج هذه النظريات الخمس في إطار نظري فريد. ومثل الوضوح الذي ينشق عندما تكتشف العلاقات الدفينة حتى الآن، فإن هذا الاتحاد بين النظريات الخمس يقدم نقطة مفاضلة جديدة وقوية لفهم العالم وفقاً لنظرية الأوتار.

وحتى نشرح وجهات النظر تلك، فإن علينا أن نستخدم بعض أحدث التطورات وأصعبها في نظرية الأوتار. علينا أن نفهم طبيعة التقرير المستخدم في دراسة نظرية الأوتار وحدودها الكامنة فيها. علينا أن نتعرف أكثر على التقنيات الذكية - والتي تسمى إجمالاً الثنائيات - التي استدعاهما الفيزيائيون للتغلب على هذه التقريريات. ثم علينا أن نتبع المنطق الدقيق الذي يستفيد من هذه التقنيات لاكتشاف التبصر الذي يؤدي إلى ما ذكرناه. لكن لا تزعج، فإن الجزء الشاق من العمل قد أجري بالفعل بواسطة منظري نظرية الأوتار، وسنقنع هنا بتفسير نتائجهم.

ومع ذلك، وحيث أن هناك في ما يبدو الكثير من القطع المترفرفة التي يجب تطويرها وجمعها، فإنه في الفصل الحالي يمكن بسهولة أن "تفقد الغابة وأن تتبّع الأشجار" (*). وهكذا إذا شعرت أن المناقشة في هذا الفصل قد أصبحت أعمق من اللازم وأنك مضطر للاندفاع إلى الثقوب السوداء (الفصل 13) أو إلى الكوسموЛОجيا

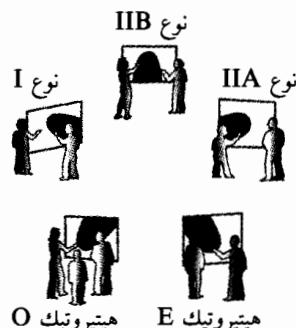
(*) مثل يُضرب لمن تستغرق التفاصيل فلا يلتفت لكلــ الأهم والأكبر (المترجم والمراجع).

(علم الكون - الفصل 14) فما عليك إلا أن تلقي نظرة سريعة على المقطع الآتي الذي يوجز أهم وجهات النظر في ما يتعلق بشورة الأوتار الفائقة الثانية.

أولاً: موجز الشورة الثانية للأوتار الفائقة

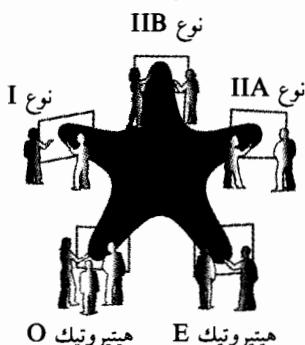
يوجز الشكلان رقمـا (1-12) و(12-2) النظرة الفاحصة الأولى لشورة الأوتار الفائقة الثانية. فنرى في الشكل رقم (12-1) الوضع قبل المقدرة الحديثة لخطيـ (جزئياً) الطرق التقريرية التي استخدـها الفيزيائيون تقليديـاً لتحليل نظرية الأوتار.

الشكل رقم (1-12)



اعتقد الفيزيائيون الذين كانوا يدرسون نظريات الأوتار الخمس لسنوات طويلة أنهم يتعاملون مع نظريات منفصلة تماماً.

الشكل رقم (2-12)



أظهرت نتائج الشورة الثانية للأوتار الفائقة أن كل النظريات الخمس للأوتار هي في الواقع أجزاء من إطار مفرد موحد، أطلق عليه مؤقاً نظرية-M.

ونرى هنا أن النظريات الخمس للأوتار منفصلة تماماً بعضها عن بعض. ولكن بواسطة الأفكار التي اكتشفت أخيراً وابتُثقت من البحوث الحديثة، كما يتضح من الشكل رقم (12-2)، فإننا نرى، كما في الأذرع الخمسة لنجم البحر، أن كل نظريات الأوتار ينظر إليها كنظيرية واحدة متشابكة في إطار مشترك. (وفي الحقيقة، وبنهاية الفصل الحالي سنرى نظرية سادسة - ذراعاً سادسة - ستندمج في هذا الاتحاد). وقد أطلق على هذا الإطار القوي مؤقتاً اسم نظرية-M، لأسباب ستتضمن مع تقدمنا في الكتاب. ويمثل الشكل رقم (12-2) علامة مميزة على طريق الإنجازات في ما يتعلق بالنظرية النهائية. أصبحت الخيوط المتقطعة ظاهرياً في نظرية الأوتار وكأنها قد نسجت مع بعضها الآن في سجادة مفردة وفريدة متضمنة كل النظرية التي بحثنا عنها لزمن طويل، نظرية كل شيء.

ومع أن هناك الكثير الذي ما زال لم ينجز بعد، إلا أن هناك سمتين أساسيتين لنظرية-M قد كشف عنهما الفيزيائيون. الأولى، أن لنظرية-M أحد عشر بعداً (عشرة أبعاد فضائية وواحد زمني). ويشبه الأمر بعض الشيء ما وجده كالوزا عند إضافة بعد فضائي يسمح بالاندماج غير المتوقع للنسبية العامة والكهرومغناطيسية، فقد أيدن منظرو نظرية الأوتار أنه بإضافة بعد فضائي إلى نظرية الأوتار - بخلاف الأبعاد التسعة الفضائية وبعد الزمانى التي نقشت في الفصول السابقة - سيسمح بالتوصل إلى كل الصور الخمس للنظرية بشكل مقنع تماماً. والأكثر من ذلك، فإن هذا بعد الفضائي الإضافي لم يأت من فراغ، والأحرى أن منظري نظرية الأوتار قد أدركوا أن الأسباب التي قادتهم في سبعينيات وثمانينيات القرن العشرين لاكتشاف بعد زمني واحد وتسعة أبعاد فضائية، كانت تقريبية، وأن الحسابات الدقيقة التي أصبح من الممكن إجراؤها الآن قد أظهرت أنهم قد أغفلوا حتى هذه اللحظة بعداً فضائياً آخر.

أما السمة الثانية التي اكتشفت لنظرية-M، فهي أنها تحتوي على أوتار متذبذبة، لكنها تحوي كذلك أشياء أخرى: أغشية ثنائية الأبعاد متذبذبة، وبقعاً ثلاثية الأبعاد متأرجحة (تسمى الأغشية الثلاثية Three-Branes)، وحزمة من مكونات أخرى كذلك. وتظهر هذه السمة من سمات نظرية-M، كما في حالة بعد العادي عشر، عندما تتحرر الحسابات من الاعتماد على التقرير المستخدم قبل منتصف تسعينيات القرن العشرين.

وعدا هذه السمات ومجموعة من الأفكار التي تم التوصل إليها في السنوات القليلة الماضية، فإن الكثير عن حقيقة نظرية-M ما زال غامضاً - وأحد المعاني المقترنة به "M". ويعمل الفيزيائيون في جميع أنحاء العالم بكل جهد للتوصل

إلى إدراك كامل لنظرية-M، وقد يكون عملهم هذا هو الذي سيشكل المعضلة المركزية لفيزياء القرن الواحد والعشرين.

ثانياً: طريقة تقريبية

ترتبط حدود الطرق التي دأب الفيزيائيون على استخدامها في تحليل نظرية الأوتار بما يسمى "نظرية الاضطراب". ونظرية الاضطراب اسم توضيحي لإجراء التقريب أثناء محاولة التوصل إلى إجابة تقريبية عن أحد الأسئلة، ثم يعقب ذلك بطريقة منهجية تحسين لهذا التقريب بالفحص الأدق للتفاصيل الصغيرة التي أهملت في البداية. وقد لعبت نظرية الاضطراب دوراً هاماً في مجالات عديدة من البحث العلمي، وكانت عنصراً أساسياً في فهم نظرية الأوتار، وكما سنوضح الآن فإنها تمثل كذلك شيئاً نتعامل معه كثيراً في حياتنا اليومية.

تخيل أن سيارتك أخذت يوماً ما تتعرض في أدائها وأنك أخذتها إلى الميكانيكي لفحصها. وبعد إلقاء نظرة على سيارتك، يخبرك الميكانيكي بالأخبار السائبة: فالسيارة تحتاج إلى محرك جديد، وسيكلفك هذا الجزء وأجر الميكانيكي حوالي 900 دولار وهذا المبلغ تقريري ومن المتوقع أن تعرف المبلغ بالضبط بعد أن تتضح تفاصيل العمل المطلوب. وبعد بضعة أيام وبعد إجراء الاختبارات الالزمة على السيارة يعطيك الميكانيكي تقديرأً أكثر دقة للتكلفة هو 950 دولاراً. وقد فسر الميكانيكي ذلك بأنك تحتاج كذلك إلى منظم جديد سيكلفك مع تركيبه حوالي 50 دولار. وأخيراً، عندما تذهب لإحضار سيارتك، وبعد أن قام الميكانيكي بتجميع كل المصنوفات، فإنه قدم لك فاتورة بمبلغ 984.93 دولاراً. وهو يفسر ذلك كالتالي: 950 دولاراً للموتور والمنظم، و27 دولاراً إضافية لسير المروحة، وعشرة دولارات لضفيرة البطارية، و99 ستانـاً لصمولـة معزولة كهربـياً. وهكذا تم تدقيق الرقم التقريري الأول 900 دولار بتضمينه تفاصيل أكثر وأكثر. وبمصطـلحـاتـ الفـيـزيـاءـ فإنـ هـذـهـ التـفـاصـيلـ يـشارـ إـلـيـهاـ بـأـنـهـاـ "ـاضـطـرـابـاتـ"ـ بـالـنـسـبةـ لـلتـقـدـيرـ المـبـدـئـيـ.

وعندما تطبق نظرية الاضطراب في موضعها وبكماءة، فإن التقدير المبدئي سيكون قريباً بشكل معقول من النتيجة النهائية، فالتفاصيل الدقيقة التي أهملت في التقدير المبدئي لن تؤدي إلى فروق كبيرة عند تضمينها في نظرية الاضطراب. لكن في بعض الأحيان عندما تذهب لدفع الفاتورة النهائية قد تجد اختلافاً مذهلاً عن التقدير المبدئي. ومع أنك قد تستخدم مصطلحـاتـ أكثرـ انفعـالـاـ، فإنـ ذلكـ يـسمـيـ فـيـاـ فـشـلـ نـظـرـيـةـ الـاضـطـرـابـ.ـ وـيعـنيـ ذـلـكـ أـنـ التـقـدـيرـ المـبـدـئـيـ لمـ يـكـنـ دـلـيـلاـ جـيدـاـ

للاجابة النهائية لأنه بدلاً من أن تؤدي "التحسينات" إلى انحرافات صغيرة، فإنها جاءت بغيرات كبيرة إلى التقدير التقريبي.

وكما أشرنا براجاز في الفصول السابقة، فإن مناقشاتنا لنظرية الأوتار حتى الآن قد اعتمدت على منطق اضطرابي بعض الشيء مشابه لما استخدمه الميكانيكي. و"للفهم المنقوص" لنظرية الأوتار، الذي أشرنا إليه أحياناً، جذور بشكل أو باخر في طريقة التقرير. ولنبدأ خطوة خطوة في فهم هذه الملاحظة الهامة، وذلك بمناقشة نظرية الاضطراب في مضمون أقل تجريداً لنظرية الأوتار، لكنه أقرب في التطبيق لنظرية الأوتار عن مثال الميكانيكي.

ثالثاً: مثال كلاسيكي على نظرية الاضطراب

يقدم فهم حركة الأرض في المجموعة الشمسية مثالاً كلاسيكيًا لاستخدام مقاربة الاضطراب. وفي حالة المسافات الشاسعة بهذا الشكل لا نأخذ في اعتبارنا إلا قوى الجاذبية، إلا إذا كان الأمر يتطلب تقريراً أكثر من ذلك، فإن المعادلات التي سنتعامل معها ستكون في غاية التعقيد. وللتذكرة أنه وفقاً لكل من نيوتن وأينشتاين، فإن كل شيء يبذل تأثيراً للجاذبية في كل شيء آخر، الأمر الذي يؤدي مباشرة إلى شد وجذب معقد يصعب تتبعه رياضياً ويتضمن الأرض والشمس والقمر والكواكب، وجميع الأجرام السماوية الأخرى من ناحية المبدأ. وكما نتصور فإن من المستحيل أن نأخذ كل هذه التأثيرات في الاعتبار ونعني الحركة الدقيقة للأرض. وفي الواقع، فإنك حتى لو استخدمت ثلاثة أجرام سماوية فإن المعادلات تصبح على درجة من التعقيد بحيث لم يتمكن أحد من حلها بشكل كامل⁽³⁾.

ومع ذلك، من الممكن أن نتبنا بحركة الأرض في المجموعة الشمسية بدقة كبيرة باستخدام منطق الاضطراب. والكتلة الهائلة للشمس، مقارنة بأي عضو آخر في المجموعة الشمسية، وقربها من الأرض إذا قورنت ببعدها عن أي نجم آخر، يجعلانها المؤثر السائد في حركة الأرض بشكل كبير. وهكذا يمكن أن نتوصل إلى

(3) عندما تتحدث عن الإجابات "الدقيرة" في هذا الفصل، مثل الحركة "الدقيرة" للأرض، فإننا نعني في الواقع التنبؤ الدقيق لبعض القيم الفيزيائية "في إطار نظري معين ومحظوظ". وحتى نتوصل إلى النظرية النهائية - ربما تكون قد توصلنا إليها الآن، أو ربما لن توصل إليها أبداً - فإن كل نظرياتنا ستكون مجرد تقرير للواقع. غير أن هذا المفهوم عن التقرير ليس له علاقة بمناقشاتنا في هذا الفصل. فنحن هنا مهتمون، في إطار نظرية محظوظة، بحقيقة أنه من الصعب غالباً بل ربما من المستحيل استخلاص النتائج الدقيقة الناتجة من النظرية. وبدلاً من ذلك، فإن علينا أن نستخلص مثل هذه النتائج مستخدمنا طرقاً تجريبية مؤسسة على منطق اضطرابي.

تقدير تجاهي آخر في الاعتبار تأثير جاذبية الشمس فقط. وهذا مناسب تماماً لعدة أسباب. فإذا استدعت الضرورة، يمكن تنفيذ هذا التقدير وذلك بإدخال تأثير الجاذبية للأجرام المجاورة للأرض بالتدريج، مثل القمر وأي كواكب تمر بالقرب منها في تلك اللحظة. وتبعد الحسابات في التعقيد كلما زادت شبكة تأثيرات الجاذبية تعقيداً، لكن لا تدع هذا الأمر يطمس فلسفة الاضطراب: فتبادل الجاذبية بين الشمس والأرض يعطينا تفسيراً تجاهياً لحركة الأرض، بينما تقدم التأثيرات الأخرى للجاذبية سلسلة من التقييمات أصغر فأصغر.

ويصلح المنطلق الاضطرابي في هذا المثال لوجود تأثير فيزيائي سائد يسمح بوصف نظري بسيط نسبياً. وليس هذا هو الحال دائماً. فمثلاً إذا كنا نتناول حركة ثلاثة نجوم كتلتها متساوية تدور بعضها حول بعض في نظام مثلثي، ولا يوجد هناك علاقة جاذبية مفردة لها تأثير يقزم النجمين الآخرين. وبالتالي لا يوجد هناك تداخل مفرد سائد يزودنا بالتقدير التجريبي، بينما يعطي الآخرين تأثيرات تؤدي إلى تقييمات صغيرة. فإذا حاولنا مثلاً استخدام المنطلق الاضطرابي بعزل الشد الجاذب بين نجمتين واستخدامه في التقدير، فسرعان ما سنجد أن هذا المنطلق سيفشل. وستكشف حساباتنا أن التقييمات التي أجريت على الحركة التي نتبناها نتيجة تضمين النجم الثالث، ليست صغيرة، بل في الواقع هي في حجم التقديرات المفترضة. وهذا أمر مأثور: فحركة ثلاثة أشخاص يرقصون رقصة الدببة (Bora) لا تشبه حركة اثنين يرقصان رقصة التانغو إلا بالكاد. وتعني التقييمات الكبيرة أن التقدير المبدئي كان بعيداً جداً عن الواقع وأن كل العملية كانت مثل بيوت واهية مبنية على الرمال. ولابد من الإشارة إلى أن الأمر ليس مجرد تضمين تقييمات كبيرة ناتجة من وجود النجم الثالث. ويشبه الأمر هنا قطع الدومينو التي يعتمد بعضها على بعض: فالتأثيرات الكبيرة لها تأثير واضح على حركة النجمين الآخرين، التي بدورها لها تأثير كبير على حركة النجم الثالث، والذي بدوره له تأثير محسوس على النجمين الآخرين، وهكذا. وكل الجداول في شبكة الجاذبية

الشكل رقم (3-12)



تدخل الأوتار بالالتحام والانتظار.

لها نفس الأهمية ويجب التعامل معها آنئـاً. وفي أغلب الأوقات وفي مثل هذه الحالة، فإن منهجنا الوحـد هو الاستفادة من المقدرة الجبارـة للكمبيوتر لمحاـكة الحركة الناتـجة.

ويـلقي هذا المثال الضـوء على أهمـية تحـديد ما إذا كان التـقدير التـقريـبي المقـترـح قـرـيبـاً من الحـقـيقـة عند تـطـيـقـ منـطـقـ الـاضـطـراـبـ، وإـذا كانـ الأمـرـ كـذـلـكـ، فـأـيـ التـفـاصـيلـ الـدقـيقـةـ وـكـمـ مـنـهـاـ يـجـبـ تـضـمـينـهـاـ لـتـوـصـلـ إـلـىـ مـسـتـوىـ الدـقـيـقةـ الـمـطـلـوبـ. وكـمـ نـتـنـاـوـلـ الأمـرـ الـآنـ، فإـنـ هـذـهـ الـمـوـضـوعـاتـ بـالـتـحـديـدـ لـهـاـ أـهـمـيـةـ قـصـوـيـ عـنـ تـطـيـقـ أـدـوـاتـ الـاضـطـراـبـ فـيـ الـعـمـلـيـاتـ الـفـيـزـيـائـيـةـ لـلـعـالـمـ الـمـيـكـروـيـ.

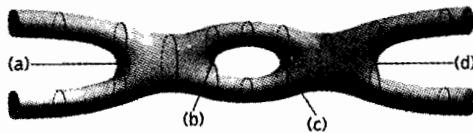
رابعاً: المقاربة الاضطرابية لنظرية الأوتار

تبـنىـ الـعـمـلـيـاتـ الـفـيـزـيـائـيـةـ عـلـىـ التـداـخـلـاتـ الـأسـاسـيـةـ بـيـنـ الـأـوـتـارـ الـمـتـذـبذـبةـ. وكـمـ نـاقـشـنـاـ فـيـ آـخـرـ الفـصلـ السـادـسـ^(*)ـ، فإـنـ هـذـهـ التـداـخـلـاتـ تـتـضـمـنـ اـنـشـطـارـ وـارـتـباطـ حـلـقـاتـ الـأـوـتـارـ كـمـ فـيـ الشـكـلـ رقمـ (6ـ7ـ)، الـتـيـ أـعـدـنـاـهـاـ فـيـ الشـكـلـ رقمـ (3ـ12ـ3ـ)ـ لـمـسـاعـدـةـ الـقـارـئـ. وـقـدـ بـيـنـ مـنـظـرـ نـظـرـيـةـ الـأـوـتـارـ كـيـفـ يـمـكـنـ لـمـعـادـلـةـ رـيـاضـيـةـ دـقـيـقةـ أـنـ تـرـتـبـطـ بـالـرـسـمـ التـخـطـيـطـيـ لـلـشـكـلـ رقمـ (3ـ12ـ3ـ)ـ الـمـعـادـلـةـ الـتـيـ تـبـرـعـ بـعـنـ تـأـيـيرـ كـلـ وـتـرـ يـسـتـجـدـ فـيـ حـرـكـةـ الـوـتـرـ الـآـخـرـ. (وـتـخـتـلـفـ تـفـاصـيلـ الـمـعـادـلـةـ فـيـ نـظـرـيـاتـ الـأـوـتـارـ الـخـمـسـ، لـكـنـنـاـ سـنـهـمـلـ فـيـ الـوقـتـ الـحـالـيـ مـثـلـ هـذـهـ الـاـخـتـلـافـاتـ الـدـقـيـقـةـ)ـ وـلـوـلاـ مـيـكـانـيـكاـ الـكـمـ لـكـانـتـ هـذـهـ الـمـعـادـلـةـ هـيـ نـقـطـةـ الـنـهـاـيـةـ فـيـ روـاـيـةـ كـيـفـيـةـ تـدـاـخـلـ الـأـوـتـارـ. غـيـرـ أـنـ الـجـيـشـانـ الـمـجـهـرـيـ الـمـفـرـوضـ بـوـاسـطـةـ مـبـدـأـ دـعـمـ الـتـيـقـيـنـ يـعـنـيـ أـنـ زـوـاجـ الـأـوـتـارـ/ـأـوـتـارـ الـمـضـادـةـ (وـتـرـانـ يـمـارـسـانـ اـنـسـاقـاـ اـهـتـزاـزـيـةـ مـضـادـةـ)ـ يـمـكـنـ أـنـ تـوـاجـدـ لـحـظـيـاـ، مـسـتـدـيـنـةـ طـاـقةـ مـنـ الـكـوـنـ، وـحـيـثـ أـنـهـمـاـ يـلـاشـيـانـ أحـدـهـمـاـ الـآـخـرـ بـسـرـعةـ كـافـيـةـ، وـبـالـتـالـيـ فـإـنـهـمـاـ يـعـيـدـانـ دـيـنـ الطـاـقةـ. وـمـثـلـ هـذـهـ الـأـزـوـاجـ مـبـدـأـ دـعـمـ الـأـوـتـارـ الـتـيـ تـنـتـجـ عـنـ الـجـيـشـانـ الـكـمـيـ وـتـعـيـشـ عـلـىـ الطـاـقةـ الـمـسـتـدـانـةـ، وـبـالـتـالـيـ عـلـيـهـاـ أـنـ تـتـحدـ بـسـرـعةـ فـيـ حـلـقـةـ مـفـرـدةـ، تـعـرـفـ بـاسـمـ "ـزـوـجـ الـأـوـتـارـ الـافـتـراـضـيـ"ـ. وـعـلـىـ الرـغـمـ مـنـ أـنـ وـجـودـ هـذـهـ الـأـزـوـاجـ وـقـتـيـ، إـلـاـ أـنـ الـوـجـودـ العـابـرـ لـهـذـهـ الـأـزـوـاجـ الـافـتـراـضـيـةـ الـإـضـافـيـةـ بـيـنـ الـأـوـتـارـ يـؤـثـرـ فـيـ الـخـواـصـ الـتـفـصـيلـيـةـ لـلـتـدـاـخـلـ.

وـقـدـ مـثـلـنـاـ هـذـهـ الـعـمـلـيـةـ بـرـسـمـ تـخـطـيـطـيـ فـيـ الشـكـلـ رقمـ (4ـ12ـ). يـصـطـدـمـ الـوـتـرـانـ الـأـصـلـيـانـ وـيـرـتـيـطـانـ بـعـنـفـ عـنـدـ النـقـطـةـ (aـ)، حـيـثـ يـنـدـمـجـانـ فـيـ حـلـقـةـ مـفـرـدةـ.

(*) قد يـجـدـ الـقـرـاءـ الـذـينـ أـهـمـلـوـ قـرـاءـةـ مـقـطـعـ "ـالـإـجـابـةـ الـأـكـثـرـ دـقـةـ"ـ مـنـ الفـصلـ السـادـسـ، أـنـهـ مـنـ الـمـفـيدـ أـنـ يـطـلـعـوـاـ عـلـىـ الـجـزـءـ الـأـوـلـ مـنـ هـذـهـ الـمـقـطـعـ [ـالـمـؤـلـفـ].

الشكل رقم (4-12)



يمكن أن يتسبب الجيshan الكمي في نشوء أزواج وتر/وتر مضاد (b) والتلاشي (c) مودياً إلى تداخل أكثر تعقيداً.

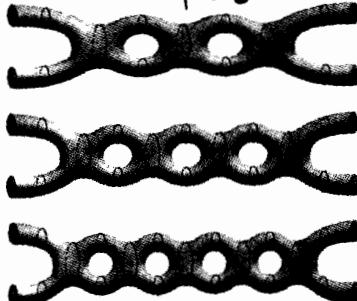
ترتحل هذه الحلقة مسافة صغيرة، غير أنه عند النقطة (b) تؤدي تأرجحات الجيshan الكمي إلى تكوين زوج أوتار افتراضي ينتقل مسافة ما ثم يتلاشى عند النقطة (c) منتجًا مرة أخرى وترًا واحدًا. وأخيرًا وعنده النقطة (d) يفقد هذا الوتر طاقته بالتفكك إلى زوج من الأوتار تتحرك في اتجاهات جديدة. ويطلق الفيزيائيون على هذه العملية عملية "الوتر الواحد" وذلك بسبب وجود الحلقة المفردة في مركز الشكل رقم (4-12). وكما في حالة التداخل الذي تخيلناه في الشكل رقم (4-12-3)، من الممكن ربط معادلة رياضية دقيقة بهذا الشكل لنوجز تأثير زوج الأوتار الافتراضي في حركة الوترين الأصليين.

لكن هذه ليست نهاية القصة لأن الاضطراب الكمي يمكن أن يسبب النشوء اللحظي للأوتار الافتراضية أي عدد من المرات، منتجًا سلسلة من أزواج الأوتار الافتراضية. وبؤدي ذلك إلى أشكال ذات حلقات أكثر وأكثر كما هو موضح في الشكل رقم (4-5). ويقدم كل من هذه الأشكال طريقة بسيطة وسهلة لتصور العمليات الفيزيائية المعنية: تندمج الأوتار القادمة معاً ويتسبب الاضطراب الكمي في إنتاج الحلقات التي تنشط بدورها إلى أزواج افتراضية من الأوتار، ثم تنتقل هذه الأزواج ليلاشى أحدهما الآخر بواسطة الاندماجمرة أخرى في حلقة مفردة تنتتج زوجاً آخر من الأوتار الافتراضية، وهكذا. وكما في حالة الأشكال الأخرى، هناك معادلة رياضية تقابل كل عملية من هذه العمليات، وهي توجز التأثير في حركة الأزواج الأصلية من الأوتار⁽⁴⁾.

والأكثر من ذلك، وتماماً كما في حالة الميكانيكي الذي حدد التكاليف النهائية لإصلاح سيارتك من خلال تنقيح التقدير المبدئي وقيمه 900 دولار بإضافة 50 دولاراً، و27 دولاراً، وعشرة دولارات، و93 سنتاً؛ وتماماً كما توصلنا إلى

(4) هذه الأشكال صور لنظرية الأوتار وتسمى أشكال فينمان، المبتكرة بواسطة ريتشارد فينمان لإجراء الحسابات الاضطرابية في نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة.

الشكل رقم (5-12)



يمكن للجيشان الكمي أن يتسبب في نشوء العديد من متوايلات أزواج الأوتار/الأوتار المضادة وكذلك الثلاثي.

فهم متنامي الدقة لحركة الأرض من خلال تنقية تأثير الشمس بتضمين التأثيرات الأصغر للقمر والكواكب الأخرى، فإن منظري نظرية الأوتار قد بينوا أنه من الممكن فهم التداخل بين وترین بواسطة إضافة كل من التعبيرات الرياضية للأشكال التي بلا حلقات (لا يوجد بها أزواج أوتار افتراضية)، وتلك التي لها حلقة واحدة (زوج واحد من الأوتار الافتراضية)، وذات الحلقتين (زوجان من الأوتار الافتراضية) وهكذا دواليك، كما هو موضح في الشكل رقم (12-6).

تطلب الحسابات الدقيقة أن نضيف معاً التعبيرات الرياضية المصاحبة لكل من هذه الأشكال، والتي لها أعداد متزايدة من الحلقات. وحيث أن هناك عدداً لانهائياً من مثل تلك الأشكال، وأن الحسابات الرياضية المصاحبة لكل منها تصبح متزايدة الصعوبة كلما زاد عدد الحلقات، فإن هذه مهمة مستحيلة. وبدلأً من ذلك قام منظرو نظرية الأوتار بصياغة هذه الحسابات في إطار اضطرابي مبني على

الشكل رقم (6-12)

$$0 \xrightarrow{\text{تداخل}} 0 + 0 = \text{شكل 5-12} + \text{شكل 5-12} + \dots$$

محصلة تأثير كل وتر قادم في الآخر تأتي من إضافة التأثيرات التي تتضمن أشكالاً لها حلقات متزايدة.

توقعهم بأن التقدير التقريبي المعقول ينبع عن البدء بعمليات بلا حلقات (Zero-loop)، وأن الأشكال ذات الحلقات تنتج بعد ذلك كتنيحات تقل أهميتها كلما زاد عدد الحلقات.

وفي الحقيقة، وكل ما نعرفه تقريباً عن نظرية الأوتار - بما في ذلك الكثير مما تناولناه في الفصول السابقة - قد تم اكتشافه بواسطة الفيزيائيين الذين استخدمو حسابات تفصيلية وتوضيحية مطبقين هذا المنطلق الأضطرابي. وحتى ثق في دقة النتائج التي توصلنا إليها، فإن على المرء أن يحدد ما إذا كان التقرير المفترض، الذي أهمل كل الرسوم في الشكل رقم (12-6) ما عدا عدد قليل من أولئلها، يقع بالفعل في الإطار المفترض. ويؤدي بنا ذلك إلى السؤال الهام: هل نحن في إطار التقرير السليم؟

خامساً: هل التقرير في الحدود المناسبة؟

يتوقف الأمر على الآتي. بالرغم من أن المعادلة الرياضية المتعلقة بكل رسم تصبح معقدة جداً كلما زاد عدد الحلقات، إلا أن منظري نظرية الأوتار قد تعرفوا على سمة أساسية وضرورية. وبشكل ما، وكما تحدد قوة الجبل مدى تحمله للشد حتى ينقطع إلى نصفين، هناك عدد يحدد ميل التأرجحات الكمية التي تتسبب في انقسام الوتر إلى اثنين لحظياً منتجاً زوجاً فعلياً. ويعرف هذا العدد بـ "ثابت ازدواج الوتر" (String Coupling Constant) (ويشكل أكثر دقة، فإن لكل نظرية من نظريات الأوتار الخمس ثابتًا لا زدواج الوتر خاصاً بها، كما سنشرح حالاً). والمصطلح معتبر تماماً: قيمة ثابت ازدواج الوتر تحدد قوة علاقة الجيشان الكمي لثلاثة أوتار (الحلقة الأصلية والحلقتان الفعليتان الناجتتان من انشطار هذه الحلقة) - أي مدى قوة ارتباطهما معاً. وبين العمليات الحسابية أنه كلما ازدادت قيمة ثابت ازدواج الوتر كلما زاد ميل الجيشان الكمي لإحداث انشطار للوتر الأصلي (وبالتالي إعادة الارتباط)؛ وكلما قلت قيمة ثابت ازدواج الوتر، قلت فرصة ميل الجيشان الكمي لنشوء الأوتار الافتراضية لحظياً.

وستتناول حالاً مسألة تحديد قيمة ثابت ازدواج الوتر ضمن آية نظرية من نظريات الأوتار الخمس، لكن دعنا أولاً نفسر ما نعنيه فعلاً بكلمة "صغير" أو "كبير" عندما نتناول قيمته؟ حسناً، تبين الرياضيات التي تقوم عليها نظرية الأوتار أن الخط الفاصل بين "صغير" و"كبير" هو العدد 1، كما سنوضح في ما يلي. فإذا كانت قيمة ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن أعداداً أكبر من أزواج الأوتار الافتراضية سيقل ميلها للنشوء اللحظي - مثل احتمالات الإصابة المتكررة

بالصواعق. أما إذا كان ثابت ازدواج الوتر مساوياً لـ 1 أو أكثر، فمن المرجح أن أعداداً أكبر من مثل هذه الأزواج الافتراضية ستظهر باندفاع لحظياً على الساحة⁽⁵⁾. وخلاصة القول أنه إذا كان ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن مساهمات شكل الحلقة تتناقص باطراد كلما زاد عدد الحلقات. وهذا بالضبط ما يحتاجه الإطار الاضطرابي، حيث يشير ذلك إلى أننا سنحصل على نتائج دقيقة بصورة معقولة حتى لو أهملنا كل العمليات ما عدا تلك التي لها عدد قليل من الحلقات. أما إذا لم يكن ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن مساهمات رسوم الحلقة تصبح أكثر أهمية كلما زاد عدد الحلقات. وكما في حالة نظام من ثلاثة نجوم فإن ذلك يتسبب في فشل منطق الاضطراب. وهكذا فإن التقرير المقترن - العملية التي ليس بها حلقات - ليس مناسباً. (ينطبق هذا النقاش بنفس الدرجة على كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس - حيث تحدد قيمة ثابت ازدواج الوتر في أية نظرية كفاءة طريقة التقرير الاضطرابي).

ويؤدي بنا هذا الإدراك إلى السؤال المحوري التالي: ما هي قيمة ثابت ازدواج الوتر (أو بشكل أكثر دقة، ما هي قيمة ثابت ازدواج الوتر في كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس؟) "وحتى الآن لم يستطع أحد أن يجيب عن هذا السؤال" وهذا واحد من أهم الموضوعات التي لم تلق حلاً في نظرية الأوتار حتى الآن. ولنا أن نتأكد أن الاستنتاجات المبنية على الإطار الاضطرابي صحيحة فقط إذا كان ثابت ازدواج الوتر أقل من 1. والأكثر من ذلك، فإن القيمة الدقيقة لثابت ازدواج الوتر لها تأثير مباشر في الكتلة وفي الشحنات التي تحملها الأساق الاهتزازية المتنوعة للأوتار. وهكذا، نرى أن الكثير في الفيزياء يتعلق بقيمة ثابت ازدواج الوتر. وللنلق نظرة عن قرب على التساؤل الهام: لماذا ظلت مشكلة قيمة هذا الثابت غير محلولة حتى الآن - في أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس.

سادساً: معادلات نظرية الأوتار

يمكن استخدام المنطق الاضطرابي لتحديد كيفية تداخل الأوتار بعضها مع بعض وكذلك في تحديد المعادلات الأساسية في نظرية الأوتار. وخلاصة القول،

(5) وبصورة أكثر دقة، فإن كل زوج افتراضي من الأوتار، أي كل حلقة في أي شكل تساهم - ضمن أمور معقدة أخرى - بعامل تضاغفي في ثابت ازدواج الوتر. وتؤدي الزيادة في الحلقات إلى معاملات أكبر لثابت ازدواج الوتر. فإذا كان ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن المضاعفات المتكررة تؤدي إلى تناقص في هذا الثابت، أما إذا كان الثابت 1 أو أكبر، فإن المضاعفات المتكررة تؤدي إلى مساهمة بنفس المقدار أو أكبر.

تحدد معادلات نظرية الأوتار كيف تتدخل الأوتار، وبالعكس تحدد طريقة تداخل الأوتار معادلات النظرية.

وكمثال أولى، هناك معادلة في كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس معنية بتحديد قيمة ثابت الازدواج في هذه النظرية. وحالياً لم يتمكن الفيزيائيون إلا من إيجاد تقرير لهذه المعادلة، في كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس، وذلك بالتقدير الرياضي لعدد صغير من أشكال الأوتار المناسبة باستخدام المنطلق الأرضي. وفي ما يلي ما تقول به المعادلات التقريرية: في أية نظرية من النظريات الخمس يتخد ثابت ازدواج الوتر قيمة إذا ضربت في الصفر فالنتائج صفر. وهذه معادلة محبطة بشكل رهيب؛ حيث أن ضرب أي عدد في الصفر سيعطي الصفر، وبذل فإن حل المعادلة يمكن أن يتم باستخدام أية قيمة لثابت ازدواج الوتر. وهكذا، فإن المعادلة التقريرية - في أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس - لثابت ازدواج الوتر لا تقدم أية معلومات عن قيمته.

وحيث أننا ما زلنا في الموضوع، فإن هناك معادلة أخرى في كل نظرية من النظريات الخمس، التي من المفترض أنها تحدد الشكل الدقيق لكل من الأبعاد الممتدة والمتجمدة للزمكان. والصيغة التقريرية لهذه المعادلة، التي نتناولها الآن، أكثر تحديداً بكثير من تلك المتعلقة بثابت ازدواج الوتر، غير أنها ما زالت تسمح بعديد من الحلول. وعلى سبيل المثال، فإن أربعة أبعاد زمكانية ممتدة مع أية ستة أشكال كالابي-ياو متجمدة الأبعاد تؤدي إلى فضيل كامل من الحلول، ولكن حتى هذا لا يستنفذ كل الحلول، وهو ما يسمح كذلك بالفصل بين عدد الأبعاد الممتدة والأبعاد المتجمدة⁽⁶⁾.

ما الذي يمكن استنتاجه من هذه النتائج؟ هناك ثلاثة احتمالات. الأول، ولنبدأ بالاحتمال الأكثر تشاوئاً، ومع أن كل نظرية من نظريات الأوتار تجاء مزودة بمعادلات تحدد قيمة ثابت الازدواج الخاص بها، كما تحدد نظام أبعادها والشكل الهندسي الدقيق للزمكان - الأمر الذي لا تدعيه أية نظرية أخرى - وحتى إذا لم تكن الصيغة الدقيقة لهذه المعادلات معروفة بعد، إلا أنها تتيح عدداً أكبر من الحلول، مما يضعف مقدرتها على التنبؤ بشكل كبير. وإذا كان ذلك صحيحاً

(6) بالنسبة للقارئ ذي الميلول الرياضية، نشير إلى أن المعادلة تنص على أن الزمكان لا بد أن يسمح بـ Ricci-Flat Metric. فإذا شطرنا الزمكان إلى ناتج ديكاري لزمكان مينكوفسكي رباعي الأبعاد، وفضاء كوهлер المنضغط سداسي الأبعاد، فإن Ricci-Flatness سيكافئ الأخير حيث أنه مخروط كالابي-ياو. وهذا هو السبب في أن أشكال كالابي-ياو تلعب مثل هذا الدور الهام في نظرية الأوتار.

فإنه نكسة، لأن ما وعدت به نظرية الأوتار هو إيجاد تفسير لسمات الكون هذه بدلاً من أن تتطلب منا تحديدها من المشاهدات التجريبية، ثم إدخالها اختيارياً بطريقة أو بأخرى في كيان النظرية. وسنعود لهذا الاحتمال في الفصل 15. أما الاحتمال الثاني فيتعلق بالمرونة غير المطلوبة في المعادلات التقريبية للأوتار التي قد تكون مؤشراً على خطأ طفيف في المنطق الذي تعاملنا به. ونحن نبذل المحاولات لاستخدام المنطلق الااضطرابي لتحديد قيمة ثابت ازدواج الأوتار نفسه. ولكن، كما سبق أن شرحنا فإن الطرق الااضطرابية تصبح ذات قيمة فقط إذا كان ثابت الازدواج أقل من الواحد الصحيح، وبالتالي فإن حساباتنا تكون قد وضعت افتراضياً في غير محله في ما يخص إجابتها - وبالتحديد ستكون النتيجة أقل من 1. وقد يشير هذا الفشل إلى خطأ ذلك الافتراض ، وربما يكون ثابت الازدواج في أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس أكبر من 1. والاحتمال الثالث هو أن المرنة غير المطلوبة ترجع إلى استخدامنا للمعادلات التقريبية بدلاً من المعادلات الدقيقة. ومثلاً، حتى لو كان ثابت الازدواج في نظرية معينة من نظريات الأوتار أقل من 1، فإن معادلات النظرية قد تظل معتمدة على المساهمات من "كل" الأشكال. ويعني ذلك أن التقنيات الصغيرة المتراكمة من الأشكال ذات الحلقات المتزايدة قد تتسبب في تعديل أساسي في المعادلات التقريبية - الأمر الذي يسمح بوجود حلول كثيرة - لتصبح معادلات دقيقة ذات مقدرة أكبر على التحديد.

بناءً على ما جاء به الاحتمالان الآخرين، وفي بداية تسعينيات القرن العشرين، أيقن معظم منظري نظرية الأوتار أن الاعتماد التام على الإطار الااضطرابي كان عائقاً في طريق تقدم النظرية. والتقدم التالي المطلوب الذي يتفق عليه معظم العاملين في هذا المجال يتطلب منطلاقاً غير اضطرابي - المنطلق الذي لا يتلزم بتقنية الحسابات التقريبية، وبالتالي يمكن أن يصل إلى حدود أبعد كثيراً من الإطار الااضطرابي. وحتى العام 1994، كان إيجاد مثل هذه الطريقة يبدو أملاً كاذباً. لكن أحياناً تحول الآمال الكاذبة إلى واقع.

سابعاً: الثنائية

يجتمع المئات من منظري نظرية الأوتار من جميع أنحاء العالم سنوياً في مؤتمر مخصص ليستعرضوا إنجازات العام المنصرم، وليقوموا العائد النسبي لاتجاهات البحث المحتملة المتنوعة. ويمكن عادةً التنبؤ بمستوى الاهتمام والإثارة في ما بين المؤتمرين، الأمر الذي يتوقف على مدى التقدم الذي أحرز في ذلك العام. وفي منتصف ثمانينيات القرن العشرين، وفي أوج ثورة الأوتار الفائقة الأولى

كانت المجتمعات مليئة بفرحلامحدود. وكان لدى الفيزيائيين آمال عريضة أنهم سيفهمون نظرية الأوتار فهماً تماماً في فترة وجيزة، وأنهم سيكتشفون أنها النظرية النهائية الحتمية للكون. وإذا استرجعنا ذلك الآن سنشعر أنه كان أمراً ساذجاً. وقد أظهرت السنوات بعد ذلك أن هناك الكثير من الأمور العميقة والدقيقة في نظرية الأوتار التي تستطلب بدون شك جهوداً مركزة وطويلة لفهمها. وقد أدت التوقعات غير الواقعية إلى التراجع؛ وذلك عندما لم تتفق النظرية مع كل الأمور، وعندما أصيب الكثير من الباحثين بالاكتئاب. وقد عكست مؤتمرات الأوتار التي أقيمت في أواخر ثمانينيات القرن العشرين المستوى المتدني لإزاله الوهم - قدم الفيزيائيون نتائج مثيرة لكن المناخ وقتها لم يكن ملهمًا، لدرجة أن بعضهم اقترح وقف إقامة المؤتمرات السنوية الخاصة بالأوتار. لكن الأمور أخذت تزدهر في بداية تسعينيات القرن العشرين. ومن خلال الإنجازات المفاجئة، التي ناقشنا بعضها في الفصول السابقة، كانت نظرية الأوتار تستعيد نشاطها، وبدأ الباحثون يستعيدون حماسهم وتفاؤلهم. لكن القليل فقط هو الذي بدأ يظهر أثناء مؤتمر الأوتار الذي أقيم في مارس 1995 بجامعة جنوب كاليفورنيا.

عندما جاء دور إدوارد ويتن للكلام في هذا المؤتمر توجه إلى المنصة وألقى محاضرة أشعلت فتيل ثورة الأوتار الفاقعة الثانية. أعلن ويتن استراتيجية حول تجاوز المنطق الاضطرابي في نظرية الأوتار مستلهماً في ذلك الأبحاث السابقة لكل من دوف وهول وتاونسند ، ووجهات نظر شوارتز ، والفيزيائي الهندي آشوك سين وأخرين. وكان مفهوم الثنائية يمثل الجزء الرئيسي في خطته.

يستخدم الفيزيائيون مصطلح "الثنائية" لوصف النماذج النظرية التي تبدو كأنها متباعدة. إلا أنه يمكن إثبات أنها تصف بالضبط نفس الفيزياء. وهناك أمثلة عادلة للثنائية التي تبدو فيها النظريات مختلفة ظاهرياً لكنها في الواقع واحدة، وتظهر متباعدة فقط للطريقة التي اتفق أن عرضت بها. وبالنسبة لشخص لا يعرف إلا الإنكليزية فإن النسبية العامة لآينشتاين لا يمكنه التعرف عليها إذا كانت مكتوبة باللغة الصينية. أما إذا كان هذا الفيزيائي ملماً تماماً باللغتين فمن السهل عليه ترجمتها من لغة إلى أخرى مبيناً بذلك تساويهما. وقد أطلقنا على هذا المثال صفة "عادي" ، لأننا لم نكتسب أي شيء من هذه الترجمة من وجهة نظر الفيزياء. وإذا كان شخص ما يجيد اللغتين الإنكليزية والصينية، ويدرس مشكلة صعبة في النسبية العامة ، فإن ما سيواجهه من تحديات سيكون على قدم المساواة من دون النظر لأية لغة استخدمها. فالتحول من الإنجليزية إلى الصينية أو العكس لن يقدم أفكاراً فيزيائية جديدة.

أما الأمثلة غير العادية على الثنائية فهي تلك التي فيها تؤدي الأوصاف المتمايزة لنفس الموقف الفيزيائي إلى وجهات نظر فيزيائية وطرق تحليل رياضية مختلفة ومكملة بعضها البعض. وفي الواقع فإننا قد تعرضنا لمثالين على الثنائية. فقد ناقشنا في الفصل 10 كيف وصفت نظرية الأوتار عالماً له بعد دائري بنصف قطر R بنفس الطريقة التي وصفت بها عالماً له نصف قطر $\frac{R}{2}$. وهما وضعان هندسيان متمايزان، لكنهما من خلال خواص نظرية الأوتار، في الواقع، متطابقان فيزيائياً. والمثال الثاني هو تناظر صور المرأة. وهنا فإن شكلين مختلفين من أشكال كمالبي - ياو لهما ستة أبعاد فضائية إضافية - وهي الأكوان التي تبدو لأول وهلة وكأنها متماثلة تماماً - يؤديان بالضبط إلى نفس الخواص الفيزيائية. وهما بذلك يعطيان أوصافاً ثنائية لنفس الكون. ومن الأمور ذات الأهمية القصوى، وعلى عكس حالة اللغة الإنجليزية في مواجهة الصينية، أن هناك وجهات نظر فيزيائية تنتج من استخدام هذه الأوصاف الثنائية، مثل الحد الأدنى للأبعاد الدائرية والعمليات متغيرة الطوبولوجيا في نظرية الأوتار.

وفي مؤتمر الأوتار 1995، قدم ويتن في محاضرته دليلاً على نوع مدُّو جديد من الثنائية. وكما أشرنا باختصار في بداية هذا الفصل، اقترح ويتن أن النظريات الخمس للأوتار هي مجرد طرق مختلفة لوصف نفس الأساس الفيزيائي، على الرغم من أنها تبدو مختلفة في بنيتها الأساسية. وبخلاف وجود خمس نظريات مختلفة للأوتار، فإن التعبير الأفضل هو أن هناك خمس نوافذ لهذا الإطار النظري المفرد.

وقبل التطورات التي وقعت في منتصف تسعينيات القرن العشرين، كان احتمال وجود مثل هذه الصورة العظيمة للثنائية مجرد حلم وردي يراود الفيزيائيين، الذين كان من النادر أن يتناولوه في حديثهم لأنه بدا لهم وكأنه شيء خرافي. فإذا اختلفت نظريتان من نظريات الأوتار في التفاصيل الواضحة لبنيتهما، فإنه من الصعب أن تخيل أنهما قد تكونان مجرد اختلاف في وصف نفس الأمر الأساسي في الفيزياء. إلا أنه ومن خلال القدرة الدقيقة لنظرية الأوتار، هناك أدلة متزايدة على أن كل النظريات الخمس للأوتار ثنائيات. والأكثر من ذلك، كما ستناقش في ما بعد فقد أعطى ويتن دليلاً على أن نظرية أوتار سادسة ستدخل ضمن الخليط.

وتدخل هذه التطورات بشكل حميم في نسيج الموضوعات المتعلقة بإمكانية تطبيق طرق الاضطراب التي تعاملنا معها في نهاية المقطع السابق. والسبب هو أن النظريات الخمس للأوتار تختلف بجلاء إذا كانت كل منها "ازدواجاً ضعيفاً" -

وهو اصطلاح يعني هنا أن ثابت ازدواج الوتر في النظرية أقل من 1. ولأن الفيزيائيين يعتمدون على طرق الاضطراب، فإنهم لم يتمكنوا لبعض الوقت من مواجهة السؤال حول خواص أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس لو كان ثابت الازدواج الخاص بها أكبر من 1 - وهو السلوك المعروف باسم "الازدواج القوي". وما يزعمه ويتمن آخرون، كما نناقش ذلك الآن، أن هذا السؤال المحوري يمكن الإجابة عنه الآن. وقد أدت أبحاثهم إلى اقتراح، أنه مع إضافة نظرية سادسة لم نتطرق إليها بعد، فإن المسلك الازدواجي القوي لأية واحدة من هذه النظريات له وصف ثانوي بمدلول مسلك الازدواج الضعيف لنظرية أخرى والعكس صحيح.

ولتكتسب إحساساً أكثر وضوحاً بما يعنيه ذلك، فإن عليك أن تأخذ في اعتبارك التشبيه التالي. تخيل أن هناك شخصين معزولين، يعشق أحدهما الثلج لكنه للغرابة لم ير الماء في صورته السائلة. والآخر يحب الماء، لكنه ولنفس الغرابة لم ير الثلج. وفي مقابلة تمت بينهما بالصدفة قررا أن يقوما بالتخييم في رحلة صحراوية. وعندما قررا بدء الرحلة كان كل منهما معجبًا بخبرة الآخر. فالشخص المحب للثلج كان مأخوذاً بالملمس الناعم كالحرير وشفافية السائل الذي يحبه الآخر، بينما كان الشخص المحب للماء السائل مأخوذاً بشدة بمكعبات البلورات الجامدة التي أحضرها محب الثلج. ولم يكن أي منهما على دراية بأن هناك ارتباطاً عميقاً فعلاً بين الماء السائل والثلج، فالنسبة لهما، كانوا مادتين مختلفتين تماماً. ولما بدأ رحلتهما في هجير الصحراء، أصابتهما صدمة عندما بدأ الثلج يتتحول ببطء إلى ماء سائل. وفي صقيع ليالي الصحراء أصابتهما صدمة مماثلة عندما وجدا أن الماء السائل يتتحول ببطء إلى ثلج جامد. وعندئذ أيقنا أنهما مادتان - وكانا يعتقدان في الأساس أن لا علاقة بينهما بالمرة - مرتبطتان بشكل حميم.

والثانية الموجودة بين النظريات الخمس للأوتار واحدة بشكل ما: يلعب ثابت ازدواج الوتر دوراً مشابهاً لدرجة الحرارة في التشبيه المتعلق بالصحراء. ولأول وهلة فإن أي نظريتين من النظريات الخمس للأوتار سيكونان مثل الماء السائل والثلج، تبدوان وكأنهما مختلفتان تماماً. لكن إذا قمنا بتغيير ثابت الازدواج في كل منهما فإن النظريتين تتبدلان الأوضاع. وتاماً كما يتتحول الثلج إلى ماء سائل عند رفع درجة الحرارة فإن إحدى نظريات الأوتار تتحول إلى أخرى إذا زادت قيمة ثابت الازدواج الخاص بها. وبأخذنا ذلك بعيداً في اتجاه تأكيد أن كل نظريات الأوتار هي أوصاف ثنائية لبنية أساسية واحدة - الأمر المشابه لـ H_2O .

العبر عن الماء والثلج.

ويعتمد المنطق الكامن وراء هذه النتائج كلية على استخدام الأدلة الموجودة في صلب مبدأ التأثير تقريرياً. ولمناقشة ذلك.

ثامناً: مقدرة التأثير

لم يحاول أحد على مر السنين أن يدرس خواص أية نظرية من نظريات الأوتار في حالة القيم الكبيرة لثبت ازدواج الوتر حيث أنه لم يكن أحد على دراية بكيفية القيام بذلك من دون الاستعانة بالإطار الإضطرابي. ومع ذلك فقد حقق الفيزيائيون تقدماً بطيئاً لكن ثابتاً في أواخر الثمانينيات وأوائل التسعينيات من القرن الماضي، وذلك في تحديد بعض الخواص المعينة - بما في ذلك كتل وشحذات قوى معينة - التي هي جزء من فيزياء الازدواج القوي لنظرية معينة من نظريات الأوتار، التي ما زال في مقدورنا حسابها. وقد لعبت حسابات هذه الخواص، والتي تخطت بالضرورة إطار الإضطراب، دوراً هاماً في دفع التقدم نحو الثورة الثانية للأوتار الفائقة، وهي متصلة بشدة في مقدرة التأثير.

تقدّم مبادئ التأثير أدوات نافذة لفهم أشياء كثيرة جداً عن العالم الفيزيائي. وقد نقاشنا على سبيل المثال الاعتقاد المدعم جيداً في أن قوانين الفيزياء لا تعامل مع مكان ما في العالم، ومع لحظة ما من الزمان بخصوصية معينة، لكنها تسمح لنا بأن نؤكّد أن القوانين التي تحكم مكاننا ولحظتنا هي نفس القوانين الصالحة لأي مكان وأي زمان. وهذا مثال رائع، غير أن مبادئ التأثير يمكن أن تكون بنفس الأهمية في ظروف أخرى ليست بهذه الروعة. فمثلاً إذا شهدت جريمة ولم تستطع أن ترى من المجرم سوى لمحة من جانب وجهه الأيمن، فإن فنان الشرطة يمكنه مع ذلك أن يرسم كل الوجه، مستغلاً المعلومات التي أدليت بها. وهذا هو التأثير. وعلى الرغم من وجود اختلافات بين الجانب الأيمن والجانب الأيسر لوجه أي شخص، إلا أن أغلبها متناهٍ بدرجة كافية بحيث يمكن عكس صورة الجانب الأيمن لتعطي صورة تقريرية جيدة للجانب الآخر.

وفي كل هذه التطبيقات شديدة الاختلاف تظهر قوة التأثير في مقدرته على تحديد الخواص بالضبط بطريقة غير مباشرة - وهو الأمر الذي غالباً ما يكون أسهل من الطريقة المباشرة. فيمكننا أن نعرف الفيزياء الأساسية لمجرة أندروميدا بالذهاب إليها وإيجاد كوكب حول أحد النجوم ثم بناء المعجلات وإجراء أنواع التجارب التي تقوم بها على الأرض. لكن الطريقة غير المباشرة التي تعتمد على التأثير تحت ظروف تغير المواقع أسهل بكثير. ويمكننا كذلك أن نعرف سمات

الجانب الأيسر من وجه مرتكب الجريمة بتعقبه والإمساك به ثم فحص وجهه، لكن غالباً ما يكون اللجوء لتناول يمين-يسار للوجه شيئاً أيسر كثيراً⁽⁷⁾.

وتناول الفائق مبدأ أكثر تجريداً لتناوله، وهو يفسر الخواص الفيزيائية للمكونات الأولية التي تحمل كميات مختلفة من الحركة المغزلية. وفي أحسن الحالات ليس هناك سوى بعض الإيماءات من نتائج التجارب عن أن العالم الميكروي يتضمن هذا التناول، لكن، ولأسباب سبق شرحها، هناك اعتقاد راسخ بأن هذا صحيح. ويمثل ذلك جزءاً متكاملاً من نظرية الأوتار بكل تأكيد. أيقن الفيزيائيون خلال تسعينيات القرن العشرين أن التناول الفائق يقدم أدلة قوية وحادة تستطيع الإجابة عن بعض الأسئلة الصعبة والهامة بطرق غير مباشرة، مسترشدين في ذلك بالأبحاث الرائدة لناثان سيرغ من معهد الدراسات المتقدمة.

وبدون إدراك للتفاصيل المعقّدة للنظرية، فكونها تحتوي على تناول فائق يسمح لنا أن نضع قيوداً واضحة على الخواص الخاصة بها. وباستخدام التشابه اللغوي، تصور أنك أعطيت مطروفاً مغلقاً به ورقة مكتوب عليها سلسلة من الحروف بحيث يتكرر الحرف "Y" ثلاث مرات. فإذا لم يكن هناك أية معلومات أخرى فلا توجد أية طريقة يمكن بها تخمين التسلسل - وكل ما يمكن معرفته هو ترتيب عشوائي للحروف يتكرر بها الحرف "Y" ثلاث مرات، مثل: mvcfojziyqidfqzyycdi، أو أي ترتيب آخر من الاحتمالات اللانهائية. وتخيل أننا قد أعطينا معلومتين آخرين: تكون الحروف المخبأة كلمة إنكليزية وإن بها أقل عدد من الحروف يمكن أن يكون الكلمة مع معرفتنا بالمعلومة الأولى عن تكرار الحرف "Y" ثلاث مرات. وتحتل هذه المعلومات الاحتمالات إلى كلمة واحدة بدلاً من العدد اللانهائي لتسلسل الحروف عند البداية - وأقصر كلمة إنكليزية تحتوي على الحرف "Y" ثلاث مرات هي: syzygy.

ويزوّدنا التناول الفائق بحلول مفسرة مماثلة لهذه النظريات التي تتضمن مبادئ التناول الخاصة بها. وحتى ندرك ذلك تصور أنك حصلت على أحجية فيزيائية مشابهة للأحجية اللغوية التي شرحناها حالاً. هناك شيء ما مخباً في صندوق - غير محدد الكنه - له شحنة قوة معينة. قد تكون هذه الشحنة كهربية أو مغناطيسية أو أيّاً من التعميمات الأخرى، لكن وحتى نكون محددين فإن لهذا الشيء ثلاثة

(7) من الطبيعي ألا يوجد أي شيء على الإطلاق يؤكد صحة هذه المنطلقات غير المباشرة. فمثلاً، كما ان بعض الوجوه ليست متناظرة في جانبيها الأيمن والأيسر، "فمن المحتمل" أن تختلف قوانين الفيزياء في مناطق شاسعة البعد من الكون، كما سنوضح في الفصل 14.

وحدات من الشحنة الكهربية. ولا يمكن تحديد كنه محتوى الصندوق بدون معلومات أخرى. فقد يكون ثلاث جسيمات شحنة كل منها 1، مثل البوزيترونات والبروتونات، وقد تكون أربع جسيمات شحنتها 1 وجسيمة لها شحنة $\frac{1}{3}$ (مثل الإلكترون)، حيث أن المحصلة ستكون شحنة مقدارها ثلاثة؛ وقد تكونت تسعة جسيمات لكل منها شحنة مقدارها (مثلاً الكوارك الأعلى)، وقد تكون نفس الجسيمات التسع مصحوبة بأي عدد من الجسيمات عديمة الشحنة (مثل الفوتونات). والحال هنا مثل تسلسل الحروف عندما لم تكن هناك معلومة سوى وجود ثلاثة حروف "Y"، وبالتالي فإن احتمالات محتوى الصندوق ستكون لانهائية.

ولتخيل الآن كما فعلنا في الأحجية اللغوية أننا قد زودنا بمعلومتين إضافيتين: النظرية التي تصف العالم - وبالتالي محتوى الصندوق - ذات تمايز فائق، وأن محتوى الصندوق له كتلة دنيا تتوافق مع المعلومة الأولى التي تتعلق بوجود ثلاث وحدات من الشحنة. وقد بين الفيزيائيون أن خصائص هذا الإطار التنظيمي المحكم (إطار التمايز الفائق، المماثل للغة الإنكليزية) وـ"التقييد الأدنى" (كتلة دنيا لكمية مختارة من الشحنة الكهربية المشابهة لأقل طول لكلمة تضم عدداً مختاراً من الحرف "Y") يعني أن كنه المحتوى المخباً قد تم تحديده تماماً، وذلك بالاعتماد على أفكار بوجومولني ومانوج براساد وشارلز سومرفيلد، وقد بين الفيزيائيون أن كنه محتويات الصندوق يمكن التعرف عليها تماماً بمجرد التأكيد على أنها أخف ما يمكن ومع الاحتفاظ بشحنته المحددة. وتعرف مكونات الكتلة الدنيا لقيمة مختارة من الشحنة باسم حالة BPS، على شرف الأحرف الأولى لأسماء المكتشفين الثلاثة⁽⁸⁾.

وأهم شيء يتعلق بحالات BPS هو أن خواصها تتعدد بالضبط بتفرد وسهولة من دون الرجوع إلى حسابات اضطرابية. وهذا أمر صحيح بغض النظر عن قيم ثابت الأزدواج. أي أنه حتى لو كان ثابت الأزدواج الوتر كبيراً، مما يعني أن منطلق الاضطراب لا يصلح للتطبيق، فإننا ما زلنا قادرين على استنتاج الخواص المضبوطة لتكوينات حالات BPS. ويطلق على هذه الخواص غالباً "الكتل والشحنات اللااضطرابية"، حيث أن قيمها تتجاوز مخطط التقريب الاضطرابي. ولهذا السبب يمكنك أن تعتقد أن BPS تشير إلى "ما بعد حالات الاضطراب".

وتتناول خواص BPS جزءاً صغيراً فقط من الفيزياء الكلية لنظرية الأوتار

(8) يعرف القارئ الخبر أن هذه المقولات تتطلب ما يسمى $N=2$ تمايز فائق.

المعنية عندما يكون ثابت الازدواج لتلك النظرية كبيراً، لكنها مع ذلك تقدم إدراكاً محسوساً لبعض خواص الازدواج القوي. وعندما يزيد ثابت الازدواج في إحدى نظريات الأوتار متخطياً المدى المتاح لتطبيق نظرية الاضطراب فإننا نلقي بفهمنا المحدود في حالات BPS. وكما رأينا بكلمات قليلة من لغة أجنبية، سنجد أنها تسهل الأمور علينا أكثر مما تخيل.

تاسعاً: الثنائية في نظرية الأوتار

بتبع خطوات ويتمنى لنبدأ بإحدى نظريات الأوتار الخمس، ولتكن نوع الأوتار I، ونتخيل أن كل الأبعاد الفضائية التسعة مسطحة وغير ملفوقة. وهذا أمر غير واقعي بالطبع، لكنه يجعل النقاش أبسط؛ وسنعود حالاً إلى الأبعاد المتعددة. ولنبدأ بافتراض أن ثابت ازدواج الوتر أقل كثيراً من 1. وفي هذه الحالة فإن أدوات الاضطراب صالحة، وبالتالي فإن العديد من تفاصيل خواص النظرية يمكن التوصل إليها بدقة، وقد تم ذلك بالفعل. فإذا زدنا من قيمة ثابت الازدواج لكنه ما زال أقل من 1 بشكل معقول، فإن الطرق الاضطرابية ستظل صالحة، لكن الخواص التفصيلية للنظرية ستتغير بعض الشيء - فمثلاً تتغير القيم العددية المصاحبة لتشتت وتر متعدد عن الآخر بعض الشيء لأن العمليات التي تجري للحلقات المتعددة في الشكل رقم (12-6) تسهم بشكل أكبر عندما يزداد ثابت الازدواج. وفي ما عدا هذه التغييرات في تفاصيل الخواص العددية فإن المحتوى الفيزيائي الكلي يظل هو نفسه ما دام ثابت الازدواج يقع في حدود تطبيق الاضطراب.

إذا زدنا من قيمة ثابت ازدواج الوتر من النوع I ليتخطى قيمة 1، ستصبح الطرق الاضطرابية غير صالحة، وبذل إفانتا سنركز فقط على المجموعة المحددة من الكتل والشحنات اللا اضطرابية - حالات BPS - التي ما زالت في مقدورنا إدراكها. وسنذكر هنا ما قاله ويتيين وتتأكد بعد ذلك من خلال بحوث مشتركة مع جو بولتشينسكي من جامعة كاليفورنيا - سانت باربارا: تتفق هذه الخواص الازدواجية القوية لنظرية الأوتار من النوع I تماماً مع الخواص المعروفة لنظرية الأوتار هيتيروتيك-O عندما يكون للأخر قيمة صغيرة لثابت ازدواج الوتر الخاص بها. أي أنه عندما يكون ثابت الازدواج لأوتار النوع I كبيراً، فإن الكتل والشحنات المعنية والتي نعرف كيف تستخلصها تساوي بالضبط تلك الخاصة بأوتار هيتيروتيك-O عندما يكون ثابت ازدواجه صغيرة. ويعطي ذلك إشارة قوية على أن هاتين النظريتين واللتان، لأول وهلة مثل الماء السائل والثلج - تبدوان

مختلفتين تماماً، بما في الواقع ثانئي. ويقترح ذلك - بقوة - أن فيزياء النظرية من النوع I في حالة قيم ثابت الأزدواج الخاص بها مماثلة تماماً لفيزياء نظرية هيتيروتيك-O عندما تكون قيم ثابت الأزدواجها صغيرةً. وتقدم المجادلات المشابهة أدلة مقنعة بنفس الدرجة على أن العكس صحيح: فيزياء النظرية من النوع I في حالة القيم الصغيرة لثابت الأزدواجها مماثلة لفيزياء نظرية هيتيروتيك-O عندما يكون ثابت الأزدواجها كبيراً⁽⁹⁾. ومع أن النظريتين تبدوان وكأنهما غير مرتبطتين عند تحليلهما باستخدام منطلق التقرير الاضطرابي، فإننا نرى الآن أن كل واحدة منهما تحول إلى الأخرى - الأمر الذي يشبه بعض الشيء التحول بين الماء السائل والثلج - عندما تتغير قيمة ثابت الأزدواجهما.

ويعرف هذا النوع الجديد من النتائج المحورية والذي فيه فيزياء الأزدواج القوي لإحدى النظريات يمكن التعبير عنه بفيزياء الأزدواج الضعيف لنظرية أخرى باسم "ثنائية قوي-ضعف" (Strong-Weak Duality). وكما في الثنائيات الأخرى التي نقاشناها سابقاً، فإن ذلك يدلنا على أن النظريتين المعنietين ليستا في الواقع متمايزتين. وبالآخر، فإنهما تقدمان توصيفاً مختلفاً لنفس أساس النظرية. وعلى عكس ثنائية اللغتين الإنكليزية - الصينية العادمة، فإن "ثنائية قوي - ضعيف" ذات مقدرة عظيمة. وعندما يكون ثابت الأزدواج لأحد أعضاء ثنائية النظرية صغيراً فإننا نستطيع تحديد خواصها الفيزيائية مستخدمنا الأدوات الاضطرابية المتطورة. أما إذا كان ثابت الأزدواج للنظرية كبيراً، وبالتالي لا تنبع الطرق الاضطرابية، فإننا يمكن أن نستخدم التوصيف الثنائي - التوصيف الذي يكون فيه ثابت الأزدواج المقابل صغيراً - ونعود لتطبيق أدوات الاضطراب. وقد نتج من هذا التحول أن حصلنا على طرق كمية لتحليل نظرية كنا نعتقد في البداية أنها خارج حدود إمكانياتنا النظرية.

وفي الواقع فإن البرهنة على أن فيزياء الأزدواج القوي لنظرية الأوتار من النوع I تناظر فيزياء الأزدواج الضعيف لنظرية هيتيروتيك-O، والعكس، عمل في غاية الصعوبة لم يتوصل إليه أحد بعد. والسبب في ذلك بسيط. فأحد أعضاء زوج ثنائي النظريات المفترض لا يخضع للتحليلات الاضطرابية حيث أن ثابت الأزدواج الخاص بها أكبر من اللازم. ويمنع ذلك الحسابات المباشرة للكثير من خواصها الفيزيائية. وفي الحقيقة، إنها هذه النقطة بالضبط التي تجعل الثنائية

(9) لو أردنا أن تكون أكثر دقة بعض الشيء، ورمزنا لثابت الأزدواج هيتيروتيك-O بـ g_{HO} ، ولثابت الأزدواج النوع I بـ g_I ، فإن العلاقة بين النظريتين تنص على أنهما متطابقتان فيزيائياً طالما كانت $g_{HO} = 1/g_I$ ، الأمر الذي يعني أن $g_{HO} = 1/g_I$. فإذا كان أحد الثابتين كبيراً كان الآخر صغيراً.

المفترضة ذات مقدرة عالية، لأنه إذا كانت صحيحة فإنها تقدم أداة جديدة لتحليل النظرية ذات الأزدواج القوي: تطبيق الطرق الاضطرابية على توصيف ثنائي الأزدواج الضعيف.

وحتى إذا لم نستطع أن نبرهن على أن النظريتين تكونان ثنائياً، فإن التوازن التام بين خواصهما الذي يمكن استخلاصه بكل ثقة يقدم دلائل مقنعة للغاية على أن علاقة ترابط أزدواج قوي-ضعيف بين النظرية من النوع I ونظرية هيتيرونيك-0-0 صحيحة. وفي الحقيقة جاءت كل الحسابات الذكية التي أجريت لاختبار الثنائية المقترحة بنتائج إيجابية. وقد اقتنع معظم منظري نظرية الأوتار بأن الثنائية أمر صحيح.

وباتباع نفس المنطق يمكن للمرء أن يدرس خواص الأزدواج القوي لنظرية أوتار أخرى، ولتكن من نوع أوتار IIB. وكما ارتبط الأمر أصلاً بكل من هول وتاونسند، وأيدته أبحاث عدد من الفيزيائيين، اتضاح أن هناك شيء ما بنفس الأهمية قد حدث. كلما زاد ثابت الأزدواج لنوع أوتار IIB أكثر وأكثر فإن الخواص الفيزيائية التي ما زلنا قادرین على فهمها تبدو أنها تتوافق تماماً مع خواص الأزدواج الضعيف للوتر من نوع IIB نفسه. وبمعنى آخر، فإن الوتر من نوع IIB يكون "ثنائياً ذاتياً" مع نفسه (Self-Dual⁽¹⁰⁾). وبالتحديد فإن التحاليل التفصيلية تقترح بإغراء أنه إذا كان ثابت أزدواج النوع IIB أكبر من 1، وإذا كان علينا أن نغير من قيمته إلى معكوسه (وبذلك ستصبح قيمته أقل من 1)، فإن النظرية الناتجة ستكون بالتأكيد مماثلة تماماً لتلك التي بدأنا بها. ويشبه الأمر هنا ما وجدناه عندما حاولنا اعتصار بعد دائري على طول أقل من طول بلانك، فإننا إذا حاولنا زيادة قيمة أزدواج النوع IIB إلى قيمة أكبر من 1، سيبين الثنائي الذاتي أن النظرية الناتجة مكافئة تماماً لنظرية النوع IIB ذات الأزدواج الأقل من 1.

عاشرًا: موجز ما تم حتى الآن

لنفحص الوضع الذي وصلنا إليه الآن. بحلول منتصف الثمانينيات من القرن العشرين كان الفيزيائيون قد توصلوا إلى خمس نظريات مختلفة للأوتار الفائقة. وتبدو هذه النظريات كلها مختلفة من منطلق التقرير في نظرية الاضطراب، غير

(10) وهذا الأمر قريب الشبه بثنائية R , $R/1$ التي نقاشناها مسبقاً. فإذا رمنا ثابت أزدواج الوتر من النوع IIB بـ g_{IIB} فإن المقوله التي تبدو صحيحة وهي أن قيم g_{IIB} , $1/g_{IIB}$ تتعلق بنفس الفيزياء. فإذا كان g_{IIB} كبيراً، كان $1/g_{IIB}$ صغيراً، والعكس صحيح.

أن طريقة التقريب صالحة فقط إذا كان ثابت ازدواج الوتر في نظرية معينة أقل من 1. كانت التوقعات تنبئ بأن الفيزيائيين سيتمكنون من حساب القيمة الدقيقة لثابت ازدواج الوتر في أي نظرية للأوتار، غير أن صيغة معادلات التقريب المتاحة في ذلك الوقت جعلت هذا الأمر مستحيلاً. ولهذا السبب اتجه الفيزيائيون لدراسة كل نظرية من النظريات الخمس للأوتار في مدى من القيم المحتملة لثابت الازدواج الخاصة بكل منها، للأقل من 1 وللأكثـر من 1 - أي للازدواج الضعيف والازدواج القوي. غير أن طرق الأضطراب التقليدية لا تقدم أفكاراً حول خصائص الازدواج القوي في أي من نظريات الأوتار.

وحدثياً، وباستخدام مقدرة التناظر الفائق، تعلم الفيزيائيون كيف يحسبون بعض خواص الازدواج القوي لنظرية معينة من نظريات الأوتار. ولدهشة أغلب العاملين في هذا المجال، تبدو خواص الازدواج القوي لنظرية الأوتار من نوع هيتيروتيك- O مطابقة لخواص الازدواج الضعيف للأوتار من النوع I، والعكس صحيح. والأكثر من ذلك، فإن فيزياء الازدواج القوي في أوتار النوع IIB تناظر خواصها نفسها عندما يكون الازدواج ضعيفاً. وقد شجعنا هذه الروابط غير المتوقعة أن نتبع خطوات ويتن ونهتم بالنظريتين الآخرين للأوتار، من النوع II، والنوع هيتيروتيك-E، لنرى مدى توافقهما مع الصورة العامة. وسنجد هنا مفاجآت أكثر غرابة. وحتى نستعد لهذه المفاجآت فإننا في حاجة إلى استطراد تاريخي موجز.

حادي عشر: الجاذبية الفائقة

في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن العشرين، وقبل موجة الاهتمام بنظرية الأوتار، بحث كثير من الفيزيائيين النظريين النظرية الموحدة لميكانيكا الكم والجاذبية والقوى الأخرى في إطار نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة. وكان الأمل أن عدم التوافق بين نظريات الجسيمات النقاط المتضمنة للجاذبية وميكانيكا الكم يمكن التغلب عليه وذلك بدراسة نظريات بها مزيد من التناظر. وفي العام 1976، اكتشف كل من دانيال فريدمان وسيرجي فيرارا وبيتر فان نيويهوزين، كانوا جميعاً وقتها في ولاية نيويورك في ستوني بروك، أن أكثر النظريات هي تلك المتضمنة للتناظر الفائق. حيث أن ميل البوتونات والفيرميونات لإعطاء تأرجحات كمية للتلاشي يساعد في تهدئة الجيشان المجهري العنif. وقد صك هؤلاء المؤلفون مصطلح "الجاذبية الفائقة" لوصف نظريات المجال الكمي فائقة التناظر التي تحاول أن تتضمن النسبية العامة. وقد باعت مثل هذه المحاولات

لمزج النسبة العامة مع ميكانيكا الكم في النهاية بالفشل. إلا أنه، وكما ذكرنا في الفصل 8، كان هناك درس نتعلم منه للمستقبل من هذه الدراسات، الدرس الذي يبشر بتطور نظرية الأوتار.

كان الدرس الذي ربما صار الأكثر جلاءً من خلال أبحاث كل من يوجين كريمر وبرنارد جوليا وشيرك، وجميعهم من دار المعلمين العليا (Ecole Normale Supérieure)، هو أن أقرب المحاولات إلى النجاح كانت نظريات الجاذبية الفائقة التي صيغت لأكثر من أربعة أبعاد. وبالذات كانت الواعدة منها أكثر من غيرها تلك التي بها عشرة أو حتى أحد عشر بعداً. وقد اتضحت أن تلك ذات الأحد عشر بعداً هي الأكثر احتمالاً⁽¹¹⁾. كان الاتصال بأربعة أبعاد قد استكمل في إطار كالوزا وكلاين مرة أخرى: كانت الأبعاد الإضافية متعددة. وفي نظريات الأبعاد العشرة، كما في نظرية الأوتار، كانت ستة من هذه الأبعاد متعددة بينما في حالة نظرية الأحد عشر بعداً كانت هناك سبعة متعددة.

وعندما عصفت نظرية الأوتار بالفيزيائيين سنة 1984، تغيرت النظرة إلى نظريات الجاذبية الفائقة للجسيمة النقطة رأساً على عقب. وكما أكدنا مراراً، إذا اختبرنا أحد الأوتار بالدقة المتاحة حالياً والمتحدة في القريب العاجل، سيبدو كأنه جسيمة نقطة. ويمكن صياغة هذه الملاحظة غير الرسمية بدقة كالتالي: عند دراسة العمليات منخفضة الطاقة في نظرية الأوتار - تلك العمليات التي لا تملك ما يكفي من الطاقة ليتمكنها من اختبار الطبيعة فوق المجهري الممتد للأوتار - يمكننا تقرير الوتر ليصبح جسيمة نقطة بلا بنية مستخدمين إطار نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة. ولا نستطيع استخدام هذا التقرير عندما نتعامل مع عمليات المسافات القصيرة أو تلك ذات الطاقة العالية لأننا نعرف أن الطبيعة الممتدة للوتر أمر حتمي لمقدرته على حل التناقض بين النسبة العامة وميكانيكا الكم الذي لا تقدر عليه نظرية الجسيمة النقطة. لكن عندما تكون الطاقة منخفضة بما فيه الكفاية - أي في المسافة الكبيرة بدرجة كافية - لن نصادف هذه المشكلات، ويُجرى مثل هذا التقرير غالباً لغرض تسهيل الحسابات.

ونظرية مجال الكم التي تقرب أفضل ما يمكن نظرية الأوتار على هذا المنوال ليست إلا الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة. وقد أدركنا الآن أن **الخواص المميزة للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة والتي اكتشفت في سبعينيات**

(11) إذا كانت كل الأبعاد متعددة ما عدا أربعة، فإن نظرية فيها أكثر من أحد عشر بعداً لا بد أن تعطي جسيمات لا كثلة لها ذات حركة مغزلية أكبر من 2، الأمر المستحيل عملياً ونظرياً.

وثمانينيات القرن العشرين ما هي إلا بقايا طاقة منخفضة للمقدمة الكامنة في أساس نظرية الأوتار. ولم يكتشف الباحثون الدارسون للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة إلا قمة جبل جليد هائل - وهو البنية الشريبة لنظرية الأوتار الفائقة. وقد اتضحت في الواقع أن هناك أربع نظريات مختلفة للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة، التي تختلف في تفاصيل الطريقة الدقيقة التي تتضمن التناظر الفائق. واتضح أن ثلاثة من هذه النظريات الأربع هي تقرير للجسيمات النقاط ذات الطاقة المنخفضة إلى أوتار من الأنواع IIA وIIB وهيتروتيك-E. أما النظرية الرابعة فتقدم التقرير للجسيمات النقاط ذات الطاقة المنخفضة لكل من أوتار النوع I وهيتروتيك-O، وفي هذا الصدد، كانت تلك أول إشارة إلى الارتباط القوي بين هاتين النظريتين للأوتار.

وهذه قصة عظيمة، إلا أنها وضعـت الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأحد عشر في موقف صعب. وليس في صياغة نظرية الأوتار ذات الأبعاد العشرة مكان لنظرية الأبعاد الأحد عشر. ولعدة سنوات كان الرأي العام لمعظم منظري نظرية الأوتار - وليس جميعهم - أن الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأحد عشر شذوذ رياضي لا علاقة له بالبـة بـفيزياء نظرية الأوتار⁽¹²⁾.

ثاني عشر: بصيص من نظرية M

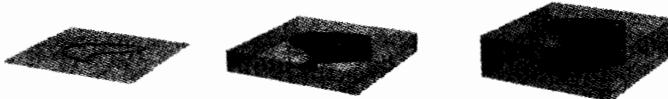
اختلف الوضع الآن. وفي مؤتمر الأوتار لعام 1992 دفع ويتـن بأنه إذا بدأنا بأوتار من النوع IIA، ورفعـنا ثابتـاً ازدواجـها من قيمة أقلـ كثـيراً من 1 إلى قيمة أكبرـ كثـيراً من 1، فإنـ الفـيزيـاءـ التيـ سنـقـدرـ علىـ تـحلـيلـهاـ (فيـ الأـسـاسـ تـلـكـ التيـ تـخـتـصـ بـالـبـنـىـ المـشـبـعـةـ لـBPSـ) لهاـ تـقـرـيرـ ذوـ طـاقـةـ مـنـخـفـضـةـ، أيـ أنهاـ جـاذـبـةـ فـائـقـةـ ذاتـ أحدـ عـشـرـ بـعـدـاـ.

أصابـ إعلـانـ ويتـنـ لـهـذاـ الاـكتـشـافـ المـؤـتمـرـينـ بـالـذـهـولـ، واهـتـزـ بـعـنـفـ مجـتمـعـ فيـزيـاءـ الأـوتـارـ مـنـذـ هـذـهـ اللـحظـةـ. لـقـدـ كانـ تـطـورـاـ لـمـ يـتوـقـعـهـ أحـدـ بـالـمـرـةـ فيـ هـذـاـ المـجـالـ. قدـ يـكـونـ أـوـلـ ردـ فعلـكـ صـدـىـ لـمـاـ قالـهـ مـعـظـمـ الـخـبرـاءـ فيـ هـذـاـ المـجـالـ: "كـيفـ يـمـكـنـ لـنـظـرـيـةـ مـعـيـنـةـ ذاتـ أحـدـ عـشـرـ بـعـدـاـ أـنـ تـوـاءـمـ مـعـ نـظـرـيـةـ مـخـتـلـفـةـ ذاتـ عـشـرـ بـعـدـاـ؟ـ".

(12) والاستثنـاءـ الجـديـرـ بـالـمـلاـحةـ هوـ الـأـبـحـاثـ الـهـامـةـ فيـ الـعـامـ 1987ـ الـتـيـ قـامـ بهاـ كـلـ منـ دـافـ، وـبـولـ هوـ، وـتاـكيـوـ إـيـتـاميـ، وـكـيلـيـ سـتـيلـ، حـيـثـ وـاـصـلـواـ أـفـكـارـ إـيرـيكـ بـيرـغـشـوـفـ، وـإـيرـجـينـ سـيـرجـيـنـ، وـتاـونـسـتـ، لـيـوكـدـواـ أـنـ نـظـرـيـةـ لـلـأـوتـارـ ذاتـ عـشـرـ بـعـادـ لـاـ بـدـ مـنـ أـنـ تـقـسـمـ بـعـدـاـ حـادـيـ عـشـرـ دـفـيـاـ.

والجواب ذو مغزى عميق. وحتى نفهمه لابد من أن نشرح نتائج ويتن بدقة أكثر. وفي الواقع من الأسهل أولاً أن نصور النتيجة المتعلقة بذلك والتي اكتشفت في ما بعد بواسطة ويتن وبستر هورافا - باحث منحة ما بعد الدكتوراه بجامعة برينستون - التي ركزت على أوتار هيتيروتيك-E. وجد الباحثان أن أوتار هيتيروتيك-E قوية الازدواج لها أيضاً صفة الأبعاد الأحد عشر، وبين الشكل رقم (7-12) لماذا يحدث ذلك. وفي أقصى يسار الشكل افترضنا أن ثابت ازدواج وتر هيتيروتيك-E أقل كثيراً من 1. إنه العالم الذي دأبنا على وصفه في الفصول السابقة وظل منظرو نظرية الأوتوار يدرسونه لأكثر من عقد من الزمان. وكلما تحركنا ناحية اليمين في الشكل رقم (7-12) نرفع بالتتابع من قيمة ثابت ازدواج. قبل العام 1995 كان منظرو نظرية الأوتوار يعرفون أن ذلك سيجعل عملية الحلقات ذات أهمية متزايدة⁽¹³⁾، وكلما زاد ثابت ازدواج سيزيد ذلك من عدم صلاحية الإطار الأضطرابي. غير أن الذي لم يتوقعه أحد هو أنه عند زيادة قيمة ثابت ازدواج سيظهر بُعد جديد! وهذا هو البعد "الرأسي" الموضح في الشكل رقم (12-7). ولنأخذ في اعتبارنا أنه في هذا الشكل تمثل الشبكة ذات البعدين التي بدأنا بها كل الأبعاد التسعة الفضائية لأوتار هيتيروتيك-E. وهكذا فإن البعد الرأسي الجديد يمثل بعدها فضائياًعاشرًا، الذي مع بعد الزمن يجعل من مجموع الأبعاد أحد عشر بعضاً زمكانياً.

الشكل رقم (7-12)



عندما يزيد ثابت ازدواج وتر هيتيروتيك-E ينشأ بعد فضائي جديداً، ويتمدد الوتر نفسه إلى شكل غشاء أسطواني.

وأكثر من ذلك، يوضح الشكل رقم (12-7) نتيجة عميقة لهذا البعد الجديد. وتغير "بنية" الوتر هيتيروتيك-E كلما نما هذا البعد. ويتمدد من حلقة ذات بعد واحد إلى شريط ثم يتحول إلى اسطوانة مشوهة بزيادة قيمة ثابت ازدواج! وبمعنى آخر فإن الوتر هيتيروتيك-E هو "في الواقع غشاء ذو بعدين" يتوقف عرضه (الامتداد الرأسي في الشكل رقم (12-7)) على قيمة ثابت ازدواج.

(13) انظر الشكل رقم (12-6).

ولأكثر من عقد، كان منظرو نظرية الأوتار يستخدمون بصورة دائمة الطرق الااضطرابية التي كانت متأصلة في افتراض أن ثابت الازدواج صغير جداً. وكما دفع ويتن، فإن هذا الافتراض قد جعل المكونات الأساسية تبدو وتسلك مسلك الأوتار ذات البعد الواحد مع أنها في الواقع تملك بعدها فضائياً ثانياً مختفيأ. وبالتالي عن افتراض أن ثابت الازدواج صغير جداً، والأخذ في الاعتبار فيزياء أوتار هيتيروتิก-E، عندما كان ثابت الازدواج كبيراً، فإن البعد الثاني يصبح واضحاً.

ولا يبطل هذا التيقن أبداً من الاستنتاجات التي توصلنا إليها في الفصول السابقة، لكنه يجبرنا على أن نراها في إطار جديد. فمثلاً، كيف يمكن لكل ذلك أن يتاسب مع بعد واحد زمني وتسعة أبعاد فضائية التي تتطلبها نظرية الأوتار؟ حسناً، لنسترجع من الفصل 8 أن هذا القيد ينتجه من إحصاء عدد الاتجاهات المستقلة التي يمكن للوتر أن يتذبذب فيها، ويطلب أن يكون هذا العدد مناسباً بالضبط ليؤكد أن الاحتمالات الكمية لها قيم معقولة. وبعد الجديد الذي اكتشفناه حالاً ليس أحد الأبعاد التي يمكن للوتر هيتيروتيك-E أن يتذبذب فيها، لأنه بعد محبوس داخل بنية "الأوتار" نفسها. ولتصبح الأمر بطريقة أخرى، حيث الإطار الااضطرابي الذي استخدمناه الفيزيائيون للتوصيل إلى أن المطلوب هو زمكان ذو عشرة أبعاد والمفترض منذ البداية أن يكون ثابت الازدواج لأوتار هيتيروتيك-E صغيراً. وقد دعمت المعلومة الضمنية التالية تقريرين يؤيد أحدهما الآخر على الرغم من عدم الاعتراف بذلك إلا بعد زمن طويل: اتساع الغشاء في الشكل رقم (12-7) صغير، الأمر الذي يجعله يبدو وكأنه وتر، وأن بعد الحادي عشر من الصغر بحيث يقع خارج نطاق حساسية معدلات الاضطراب. وفي سياق خطة التقريب هذه فإننا مجبون على أن تخيل عالماً ذو عشرة أبعاد ممثلاً بأوتار ذات بعد واحد. ونرى الآن أن هذا ليس إلا تقريراً لعالم ذي أحد عشر بعداً محظوظاً على أغشية ذات بعدين.

ولأسباب تقنية، وضع ويتن يده على البعد الحادي عشر أول مرة أثناء دراسته لخواص الازدواج القوي لأوتار النوع IIA، وتشابه القصة بعد ذلك، وكما في حالة مثال هيتيروتيك-E هناك بعد حادي عشر قيمته محكومة بثابت ازدواج النوع IIA. وعند زيادة قيمته فإن البعد الجديد يأخذ في النمو. وقد دفع ويتن بأنه عندما يحدث ذلك، فإن هذا البعد بدلاً من أن يتمدد على شكل شريط كما في حالة هيتيروتيك-E، فإنه يمتد متحولاً إلى "أنبوبة داخلية" كما في الشكل رقم (12-8). ومرة أخرى دفع ويتن بأنه على الرغم من أن النظريين يرون دائماً أوتار

النوع IIA على أنها أجسام ذات بعد واحد لها طول فقط وليس لها سمك، فإن هذه النظرة انعكاس لمخطط تقريب اضطرابي، يفترض أن يكون فيه ثابت ازدواج الوتر صغيراً. فإذا كانت الطبيعة تتطلب قيمة صغيرة لثابت الازدواج هذا، فإن ذلك تقريب جدير بالثقة. ومع ذلك، فإن أبحاث ويتن وفيزيائين آخرين أثناء الثورة الثانية للأوتار الفائقة تقدم دليلاً قوياً على أن "أوتار" النوع IIA والنوع هيتيروتيلك-E هي في الأساس أغشية ذات بعدين تعيش في عالم له أحد عشر بعداً. ولكن ماذا عن هذه النظرية ذات الأحد عشر بعداً؟ بين ويتن وأخرون أنه في ظروف الطاقات المنخفضة (منخفضة مقارنة بطاقة بلايك) فإن هذه النظرية قد تم تقريبها بإهمال البعد الحادي عشر لنظرية مجال الكم للجاذبية الفائقة. لكن كيف نصف هذه النظرية في ظروف الطاقات العالية؟ وي تعرض هذا الموضوع لدراسة مستفيضة حالياً. ونحن نعرف من الشكلين رقمي (12-7) و(12-8) أن النظرية ذات الأبعاد الأحد عشر تتضمن أجساماً ممتدة ذات بعدين - أغشية ذات بعدين. وكما سناقش حالاً، تلعب الأجسام الممتدة لأبعاد أخرى دوراً هاماً كذلك، ولكن في ما عدا مزيج الخواص، فلا أحد يعرف كنه نظرية الأحد عشر بعداً. فهل الأغشية هي مكوناتها الأساسية؟ وما هي خواصها المحددة؟ وكيف ترعم هذه النظرية أنها على صلة بالفيزياء التي نعرفها؟ فإذا كانت ثوابت الازدواج المعينة صغيرة فإن إجاباتنا الحالية عن هذه الأسئلة موجودة في الفصول السابقة، حيث أنه عند قيم صغيرة لثابت الازدواج فإننا نعود ثانية إلى نظرية الأوتار. أما إذا كان ثابت الازدواج ليس صغيراً فلا أحد يعرف الإجابة حالياً.

ومهما كانت نظرية الأبعاد الأحد عشر، فإن ويتن قد أطلق عليها مؤقتاً نظرية-M. وقد جاءت التسمية لتدل على أشياء كثيرة كما تشاء، وإليك بعض العينات: نظرية الغموض Mystery، والنظرية الأم Mother (مثل "أم كل النظريات")، ونظرية الغشاء Membrane (لأنه مهما كانت فإن الأغشية تمثل جزءاً

الشكل رقم (8-12)



بزيادة ثابت ازدواج أوتار النوع IIA تتمدد الأوتار من حلقات ذات بعد واحد إلى أجسام ذات بعدين تبدو كالإطار الداخلي للدراجة.

من الرواية)، نظرية المصفوفات Matrix (بناء على الأبحاث الحديثة بواسطة توم بانكس من جامعة روتجرز (Rugers)، وويلي فيشر من جامعة تكساس في أوستن، وستيفن شينكر من جامعة روتجرز، وساسكيند، الذين قدموا تفسيراً جديداً للنظرية). غير أنه حتى بدون فهم كامل لمغزى الاسم أو الخواص، فإنه من الواضح بالفعل أن نظرية-M هي الأرضية الموحدة لربط كل نظريات الأوتار الخمس معاً.

ثالث عشر: نظرية-M وشبكة الترابطات

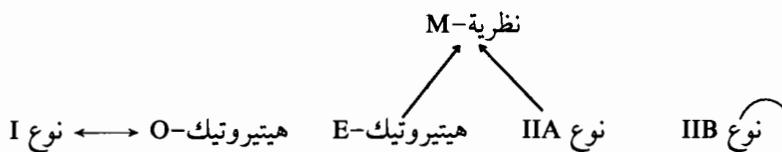
هناك مثل قديم عن ثلاثة عميان وفيل. أمسك الأول بباب العاج للفيل ووصف نعومته وصلابته التي يحسها. أما الثاني فقد أمسك بأحد أرجل الفيل وأخذ يصف المحيط الخشن ذا العضلات الذي يحسه. بينما أمسك الأعمى الثالث بذيل الفيل ووصف الزائدة القوية الرفيعة التي يحسها. وحيث أن وصف كل منهم يختلف عن وصف الآخرين، وأنه لا يرى أي واحد منهم الآخرين، فإن كلاً منهم يظن أنه قد أمسك بحيوان مختلف. ولعدة سنوات كان الفيزيائيون في ظلام مثلهم في ذلك مثل العميان، يظنون أن نظريات الأوتار المختلفة مختلفة جداً بالفعل. أما الآن وبواسطة البصيرة النافذة لثورة الأوتار الفائقية الثانية، فإن الفيزيائيين قد أيقنوا أن نظرية-M هي الشأن الموحد لنظريات الأوتار الخمس.

ناقشتنا في هذا الفصل التغيرات التي طرأت على مفهومنا لنظرية الأوتار التي ظهرت عندما غامرنا متخطين نطاق الإطار الاضطرابي - الإطار الذي كان يستخدم ضمنياً قبل هذا الفصل. ويوجز الشكل رقم (9-12) العلاقات المتباينة التي اكتشفناها حتى الآن، مستخدمنا الأسهم لبيان ثانويات النظريات. وكما ترى، فإن لدينا شبكة من الترابطات إلا أنها ليست مكتملة بعد. وبتضمين الثنائيات من الفصل العاشر يكون العمل قد اكتمل.

ولنعد إلى ثنائية نصف قطر الدائري الكبير/الصغير، الذي تتبادل فيه أنصاف قطرات بعد الدائري R مع أنصاف قطرات $\frac{1}{R}$. كنا سابقاً نفترس إحدى سمات هذه الثنائية تفسيراً خطأناً، وعلينا الآن أن نوضح ذلك. فلقد ناقشتنا في الفصل 10 خواص الأوتار في عالم ذي أبعاد دائيرية من دون أن نعني بتحديد أية صياغة من صيغ نظريات الأوتار الخمسة هي التي نستخدمها. وقد ذكرنا أن التبادل في أنماط الدوران والذبذبة للأوتار يسمح لنا بإعادة صياغة الوصف النظري لوثر في عالم ذي بعد دائري نصف قطره $\frac{1}{R}$ بمدلول آخر نصف قطره R . كانت النقطة التي أخطئنا في تفسيرها هي أن نظريات أوتار النوع IIA

والنوع IIB تبادل في الواقع بواسطة هذه الثنائية مثل ما يحدث بين أوتار هيتيروتيك-O و هيتيروتيك-E. أي أن المقوله الأكثر دقة لثنائية نصف القطر كبير/صغير هي: فيزياء أوتار النوع IIA، في عالم ذي بعد دائري نصف قطره $\frac{1}{R}$ ، مطابقة لفيزياء الأوتار من النوع IIB في عالم ذي بعد دائري نصف قطره $\frac{1}{R}$ (وتصدق نفس المقوله على أوتار هيتيروتيك-E و هيتيروتيك-O). وليس لهذا التناقض لثنائية نصف القطر كبير/صغير تأثير محسوس على استنتاجات الفصل 10، لكن لها بالفعل بصمة هامة على مناقشتنا الحالية.

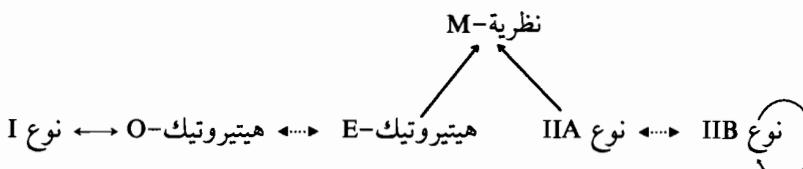
الشكل رقم (9-12)



تبين الأسماء أي النظريات ثنائية بالنسبة للأخريات.

وبسبب ذلك أنه يوجد رابطة بين نظريات الأوتار من النوع IIA والنوع IIB، وكذلك بين نظريتي هيتيروتيك-O و هيتيروتيك-E، فإن ثنائية نصف القطر كبير/صغير تكمل شبكة الترابط كما هو موضح بالخطوط المنقطة في الشكل رقم (10-12). وبين هذا الشكل أن كل نظريات الأوتار الخمس مع نظرية-M جميعها ثنائيات بعضها البعض، وقد حيكت جميعها في إطار نظري مفرد؛ وهي تقدم خمسة منطلقات مختلفة لوصف نفس الفيزياء الأساسية. ومن الممكن أن تكون إحدى الصياغات أكثر مواءمة من الأخرى في بعض التطبيقات. فعلى

الشكل رقم (10-12)



بتضمين الثنائيات المتضمنة الشكل الهندسي للزمكان (كما في الفصل 10)، فإن كل نظريات الأوتار الخمس ونظرية-M تتصل ببعضها في شبكة من الثنائيات.

سبيل المثال، فإنه أسهل كثيراً استخدام نظرية الازدواج الضعيف هيتروتيك-0 من استخدام نظرية الازدواج القوي من النوع I. ومع ذلك فالاثنتان تصفان نفس الفيزياء بالضبط.

ثالث عشر: الصورة الشاملة

والآن يمكننا فهم الشكلين - رقمي (12-1) و(12-2) - فهماً تماماً، وهما الشكلان اللذان أوردناهما في أول هذا الفصل لعرض النقاط الأساسية. من الشكل رقم (12-1) نرى أنه قبل العام 1995 ومن دون احتساب للثنائيات، كان لدينا خمس نظريات للأوتار متباعدة ظاهرياً. قام مختلف الفيزيائيين بالبحث في كل نظرية، ولكن من دون إدراك للثنائية، فبدت هذه النظريات مختلفة بعضها عن بعض. وكان لكل نظرية سمات متغيرة مثل قيمة ثابت الازدواج والشكل الهندسي وأطوال أبعاد التجعد. كان الأمل (وما زال) أن تتحدد هذه الخواص المميزة بواسطة النظرية نفسها، ولكن بدون المقدرة على تحديدها بمعادلات التقريب الحالية، فمن الطبيعي أن يقوم الفيزيائيون بدراسة الفيزياء التي تنتج من شتى الاحتمالات. وقد مثلنا هذا في الشكل رقم (12-1) بالمناطق المظللة - وتدل كل نقطة في مثل تلك المناطق على اختيار محدد لثابت الازدواج وهندسة التجعد. وبدون إقحام أية ثنائيات، فما زلنا نملك خمس نظريات منفصلة (مجموعة من النظريات).

غير أننا لو استخدمنا الآن كل الثنائيات التي ناقشناها، وبنغيير المؤشرات الازدواجية والهندسية، من الممكن أن نعبر من إحدى النظريات إلى الأخرى، طالما أنها نضمن المنطقة المركزية الموحدة في نظرية- M ؛ الأمر المبين في الشكل رقم (12-2). ومع ذلك، حتى إذا لم يكن لدينا سوى فهم قاصر لنظرية- M ، فإن هذه المجادلات غير المباشرة قدمت دعماً قوياً إلى الرعم القائل بأن النظرية تقدم أرضية موحدة لنظرياتنا الخمس للأوتار المتباعدة بسذاجة. والأكثر من ذلك، فقد علمنا أن نظرية- M ترتبط بشدة بنظرية أخرى سادسة - الجاذبية الفائقية ذات الأبعاد الأحد عشر - وهو الأمر المبين في الشكل رقم (12-11)، وهي صورة أكثر دقة للشكل رقم (12-2)⁽¹⁴⁾.

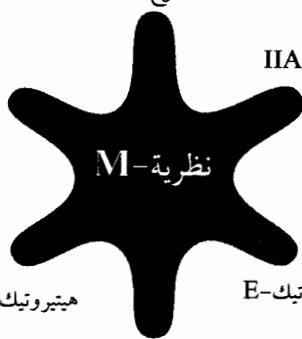
(14) وبشكل أكثر دقة، فإن هذا الشكل يجب أن يفهم كما نقول إن لدينا نظرية واحدة تعتمد على عدد من المؤشرات. وتضم المؤشرات ثوابت الازدواج بجانب مؤشرات الحجم والشكل الهندسيين. ومن ناحية المبدأ، فإننا لا بد أن تكون قادرین على استخدام النظرية لحساب القيم المحددة لكل هذه المؤشرات - قيمة معينة لثابت الازدواج وشكل معين لهندسة الزمكان - غير أنه في إطار فهمنا النظري الحالي، =

الشكل رقم (11-12)

نوع IIB

نوع I

نوع IIA



بتضمين الثنائية تندمج كل النظريات الخمس للأوتار والجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأحد عشر ونظيرية-M كلها معاً في إطارٍ موحد.

يصور الشكل رقم (11-12) أن الأفكار الأساسية ومعادلات نظرية-M توحد كل صيغ نظريات الأوتار، على الرغم من فهمنا الجزئي لهذه النظرية حتى هذه اللحظة. ونظيرية-M هنا بمثابة الفيل الذي فتح أعين منظري نظرية الأوتار على إطارٍ أعظم كثيراً للتوحد.

رابع عشر: السمة المفاجئة لنظرية-M: ديمقراطية متوسعة

عندما يكون ثابت ازدواج الوتر صغيراً في أي من مناطق أشباه الجزر الخمس العلوية للخربيطة النظرية في الشكل رقم (11-12)، فإن العناصر الأساسية للنظرية تبدو وكأنها وتر ذو بعد واحد. ومع ذلك فقد اكتسبنا حالاً منظوراً جديداً لهذه الملاحظة. فإذا بدأنا بأي من المناطق، هيتروتيك-E أو النوع IIA، ورفعنا قيمة ثابت ازدواج الوتر المعنى، فإننا ننتقل بذلك إلى منتصف الخريطة في الشكل رقم (11-12)، وإلى ما يbedo وكأنه تمدد أوتار ذات بعد واحد لتصبح غشاء ذا

= فإننا لا نعرف كيف نتوصل إلى ذلك. وهكذا، لفهم النظرية بشكل أفضل، درس منظرو نظرية الأوتار خواصها مثل تغيير قيم هذه المؤشرات لتغطي جميع الاحتمالات. فإذا كانت القيم المختارة للمؤشرات تقع في منطقة أي من أشباه الجزر الستة في الشكل رقم (11-12)، في سيكون للنظرية الخواص المتأصلة في إحدى نظريات الأوتار الخمس، أو تلك المتأصلة في الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعداً، كما هو موضح. أما إذا كانت القيم المختارة تقع في المنطقة الوسطى، فإن الفيزياء هنا ستكون محكمة بنظرية-M الغامضة.

بعدين. والأكثر من ذلك، ومن خلال تتابع علاقات الثنائية المعقدة إلى حد ما والمتضمنة كلاً من ثابت الأزدواج والصورة التفصيلية للأبعد المكانية المتتجعدة، فإننا نستطيع الانتقال بسهولة وبصورة مستمرة من أية نقطة في الشكل رقم (11-12) إلى أية نقطة أخرى. وحيث أن الأغشية ذات البعدين، التي توصلنا إليها من منظور هيتيروتิก-IIA، يمكن تتبعها بالانتقال إلى أي من صيغ نظريات الأوتار الثلاث الأخرى، فإننا بذلك نعرف أن كلاً من صيغ نظريات الأوتار الخمس تتضمن أغشية ذات بعدين كذلك.

ويشير ذلك سؤالين. السؤال الأول، هل الأغشية ذات البعدين هي العناصر الأساسية الحقيقية في نظرية الأوتار؟ والسؤال الثاني، وبعد أن حدثت الففزة الجريئة في سبعينيات وأوائل ثمانينيات القرن العشرين من الجسيمات النقاط عديمة البعد (البعد = صفر) إلى أوتار ذات بعد واحد، وكما رأينا الآن أن نظرية الأوتار تتضمن بالفعل أغشية ذات بعدين، فهل هناك عناصر ذات أبعاد أعلى من ذلك؟ وحتى كتابة هذا الكتاب لم تكن الإجابة عن هذين السؤالين معروفة تماماً، غير أن الموقف يبدو كما يلي.

نحن نعتمد بشدة على التناول الفائق ليزودنا بعض الإيضاح عن كل صياغة لنظرية الأوتار متخطفين بذلك مصداقية منطقة طرق التقريب الأضطرابي. وبالتحديد، فإن خواص حالات BPS، وكتلتها وشحنتها قواها، كلها تتحدد بصورة مترفة عن طريق التناول الفائق، الأمر الذي يسمح بهم بعض خصائص الأزدواج القوي الخاص بها من دون القيام بحسابات مباشرة ذات صعوبة لا يمكن تصورها. وفي الحقيقة، ومن خلال الجهود الأولية لكل من هورويتس وسترومنغر، وكذلك من خلال الأبحاث الرائدة التي تلت ذلك بواسطة بولتشينسكي ، فإننا الآن على دراية أكثر بحالات BPS. وتحديداً، فإننا لا نعرف فقط كتلتها وشحنتها القوى التي تحملها بل إننا ندرك بوضوح الشكل الذي هي عليه. وربما يكون الشكل هو أكثر الأمور في التطور مفاجأة على الإطلاق. فبعض حالات BPS أوتار ذات بعد واحد، وبعض الآخر أغشية ذات بعدين. وقد أصبحت هذه الأشكال مألوفة الآن. لكن المفاجأة أن هناك أخرى لها ثلاثة أبعاد وأربعة أبعاد - وفي الحقيقة فإن مدى الاحتمالات يتضمن كل بعد فضائي حتى الناسع. وتضم نظرية الأوتار في الواقع - أو نظرية-M، أو أي اسم اختاره لها في النهاية - أجساماً ممتدة ذات عدد واخر من الأبعاد الفضائية المختلفة. وقد صك الفيزيائيون المصطلح ثلاثة-بران (Three-Brane) ليصفوا الأجسام ذات الأبعاد الفضائية الثلاثة، وكذلك أربعة-بران (Four-Brane) للأجسام ذات الأبعاد الفضائية

الأربعة، وهكذا حتى نصل إلى تسعه-بران (Nine-Brane) للأبعاد الفضائية التسعة (وبشكل عام فإن أي جسم له عدد P من الأبعاد الفضائية، حيث P عدد صحيح، فقد صك الفيزيائيون له المصطلح الجامد-بران P -Brane). وتصف الأوتار أحياناً باستخدام هذه المصطلحات بأنها واحد-بران، والأغشية بأنها اثنان-بران. وحقيقة أن كل هذه الأجسام الممتدة تشكل جزءاً من النظرية قد أدت ببول تاوينستد أن يعلن عن "ديمقراطية البران" (Democracy of Branes).

وعلى الرغم من ديمقراطية البران، فإن الأوتار - أجساماً ممتدة ذات بعد واحد - حالة خاصة للأسباب الآتية. بين الفيزيائيون أن كتلة الأجسام الممتدة لكل بعد، ما عدا تلك ذات البعد الواحد، تتناسب "عكسياً" مع قيمة ثابت ازدواج الوتر المصاحب لها عندما تكون في أي من مناطق الأوتار الخمس في الشكل رقم (11-12). ويعني ذلك أنه مع الازدواج الضعيف للأوتار في أي من الصيغ الخمس، سيكون كل شيء هائل الكثافة ما عدا الأوتار - أنقل بصورة هائلة من كتلة بلانك. ولكونها على هذه الدرجة من الثقل، ولأن $E = mc^2$ ، فإن تكوينها يتطلب طاقة عظيمة لا يمكن تخيلها، وللبران (Branes) تأثير ضئيل على معظم الفيزياء (لكن ليس على كل الفيزياء، كما سنرى في الفصل القادم). ومع ذلك، إذا خاطرنا بالخروج من مناطق أشباه الجزر في الشكل رقم (11-12)، فإن البرانات ذات الأبعاد الأعلى تصبح أخف وزناً وبالتالي تتسبب أهمية متزايدة⁽¹⁵⁾.

وبذلك، فإن الصورة التي يجب أن تأخذها في اعتبارك هي كالتالي: في المنطقة الوسطى في الشكل رقم (11-12) هناك نظرية عناصرها الأساسية ليست فقط أوتاراً أو أغشية، ولكن على الأرجح "برانات" (Branes) لها أبعاد متنوعة جميعها تقف على قدم المساواة بصورة أو بأخرى. وليس لدينا حالياً إدراك كامل عن الكثير من السمات الأساسية لهذه النظرية الشاملة. غير أن هناك أمراً واحداً نعرفه بالتأكيد، وهو أننا إذا انتقلنا من المنطقة الوسطى إلى أي منطقة من مناطق شبه الجزيرة، فإن الأوتار فقط (أو الأغشية المتتجعدة لتبدو أشبه ما تكون بالأوتار، كما في الشكلين رقمي (12-7) و(12-8)) تكون على درجة من خفة الوزن لتدخل ضمن الفيزياء التي نعرفها - الجسيمات الواردة في الجدول رقم (1-

(15) مع ذلك، فليتنا أن نشير إلى أنه حتى في مناطق أشباه الجزر هناك بعض الوسائل الغربية والتي بواسطتها يمكن للأغشية (البران) أن تؤثر على الفيزياء المألوفة. فمثلاً، تم اقتراح أن الأبعاد الفضائية الثلاثة الممتدة قد تكون في الأصل أغشية ثلاثة (ثلاثة-بران) كبيرة وغير ملفوفة. وإذا كان الأمر كذلك، فإننا عندما نقوم بأعمالنا اليومية فإننا نسرى داخل غشاء ثالثي الأبعاد. وتجرى الآن دراسات لمثل هذه الاحتمالات.

(1) والقوى الأربع التي تتدخل من خلالها. ولم يتم تنقيح التحليل الاضطرابي الذي أجراه منظرو نظرية الأوتار على مدى ما يقرب من عقدين بدرجة كافية، ليكشف عن وجود الأجسام الممتدة فائقة الكتلة ذات الأبعاد الأخرى؛ فقد سادت الأوتار عملية التحليل وحصلت النظرية على تسمية أبعد ما تكون عن الديمقراطية - نظرية الأوتار. ومرة أخرى، فلنا كل الحق لبعض الاعتبارات في أن نحمل كل شيء في الشكل رقم (12-11) ما عدا الأوتار. وخلاصة العبارة فإن هذا ما فعلناه حتى الآن في هذا الكتاب. ونرى الآن، على الرغم من ذلك، أن النظرية في الواقع أكثر ثراءً من أي نظرية أخرى يمكن تخيلها.

خامس عشر: هل يجيب أي مما سبق عن الأسئلة التي ما زالت بدون حل في نظرية الأوتار؟

نعم ولا. لقد تمكنا من تعميق فهمنا بالتحرر من نتائج معينة، إذا استرجعناها لوجدناها ناتجة من التحليل التقريبي الاضطرابي وليس من فيزياء الأوتار الحقيقة. غير أن المدى الحالي لأدواتنا اللااضطرابية محدود جدًا. واكتشاف الشبكة الرائعة لعلاقات الثنائيات قد مدننا بصيرة أكثر عمقاً عن نظرية الأوتار، لكن ما زال الكثير من الموضوعات من دون حل. فعلى سبيل المثال، لا نعرف كيف تتجاوز المعادلات التقريبية لقيم ثابت ازدواج الأوتار - تلك المعادلات التي رأينا أنها تقريبية لدرجة أنها لا تقدم معلومات مفيدة. كما أنها لا نملك بصيرة أكبر من ذلك لمعرفة السبب وراء وجود ثلاثة أبعاد فضائية ممتدة فقط، أو كيف نختار الشكل التفصيلي للأبعاد المتعددة. وتتطلب هذه الأسئلة طرقاً لا اضطرابية قد نفتح بشدة أكثر من تلك التي عندنا الآن.

ولا نملك الآن سوى فهم أعمق كثيراً للبنية المنطقية والأسس النظري لنظرية الأوتار. وقبل إدراك الموجز الموجود في الشكل رقم (12-11) كان سلوك الازدواج القوي لكل نظرية من نظريات الأوتار مثل صندوق أسود تام الغموض. كان عالم الازدواج القوي غير واضح المعالم، مثل الخرائط القديمة التي كانت تملأها أساساً أشكال التنين وشياطين البحر. ولكننا نرى الآن أنه بالرغم من أن الطريق إلى الازدواج القوي قد يسلك بنا مناطق غير مألوفة لنظرية-M، لكنه في النهاية سيحيط بنا في جو مريح من الازدواج الضعيف - وإن يكن ذلك في لغة الثنائيات نظرية مختلفة للأوتار.

وتوحد الثنائية ونظرية-M النظريات الخمس للأوتار، وتقدم نتيجة هامة.

وربما لن تكون هناك مفاجآت أخرى بنفس أهمية تلك التي ناقشناها، وما زالت في انتظار أن تكتشفها. وعندما ينتهي رسام الخرائط من ملء كل المناطق على الكورة الأرضية تكون الخريطة قد أنجزت واتملت المعرفة الجغرافية. ولا يعني ذلك أن الاستكشافات في القارة القطبية الجنوبية أو في جزيرة ميكرونيزيا (Micronesia) غير ذات مغزى علمي أو ثقافي. وما تعنيه فقط هو أن عصر الاكتشافات الجغرافية قد انتهى. ويؤكد ذلك غياب النقاط السوداء المجهولة من خريطة الكورة الأرضية. وتلعب "خريطة النظرية" في الشكل رقم (12-11) دوراً مشابهاً بالنسبة لنظرية الأوتار. ويعطي هذا الشكل المدى الكامل للنظريات التي يمكن الوصول إليها إذا بدأنا من بنية آية نظرية من النظريات الخمس للأوتار. ومع أنها بعيدون عن الفهم التام للأرض المجهولة في نظرية-M، إلا أنه لا توجد نقاط خالية على الخريطة. ومثل رسام الخرائط، يستطيع منظرو نظرية الأوتار أن يزعموا بتفاؤل حذر أن طيف النظريات المقبولة منطقياً قد تم وضعه كله على الخريطة في الشكل رقم (12-11). وتتضمن هذه الخريطة الاكتشافات النظرية الأساسية للقرن الماضي وهي النسبية العامة والخاصة، وميكانيكا الكم، والنظريات القياسية للقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية والتناظر الفائق والأبعاد الإضافية لكالولزا وكلاين.

والتحدي الذي يواجه منظري نظرية الأوتار - أو قد نقول منظري نظرية-M - هو كيف يبينون أن بعض النقاط على خريطة النظرية في الشكل رقم (12-11) تصف فعلاً عالمنا. وحتى نفعل ذلك فإن الأمر يتطلب إيجاد المعادلات الكاملة والدقيقة والتي ستؤدي حلولها إلى استخلاص النقاط الممحورة من الخريطة، ثم تسمع بفهم الفيزياء المقابلة بدقة كافية لمضاهاة ذلك بالنتائج التجريبية. وكما قال ويتن "إن إدراك ما تعنيه نظرية-M في الواقع - الفيزياء التي تتضمنها - يعني نقلة جذرية في فهمنا للطبيعة تصاهي على الأقل النقلات التي صاحبت الطرفات العلمية العظمى في الماضي"⁽¹⁶⁾. ويمثل ذلك برنامجاً للتوحد في القرن الحادي والعشرين.

(16) مقابلة مع إدوارد ويتن في 11 أيار / مايو 1998.

الفصل الثالث عشر

الثقوب السوداء: منظور وتر / نظرية - M

كان التعارض الذي ساد قبل نظرية الأوتار بين النسبة العامة وميكانيكا الكم تحدياً لشعورنا العميق بأن قوانين الطبيعة لابد وأن تتوافق بعضها مع بعض بكل سلاسة في وحدة متكاملة. غير أن هذا التعارض أكثر من مجرد انتقال هائل. ومن غير الممكن إدراك الظروف الفيزيائية غير العادية التي حدثت عند لحظة الانفجار الهائل والتي تسود داخل الثقب السوداء، إلا بصياغة كمية لقوى الجاذبية. وباكتشاف نظرية الأوتار فإننا نأمل في التوصل إلى حل لهذا الغموض الكبير. وسنرى في هذا الفصل وفي الفصول القادمة إلى أي مدى تمكّن منظرو نظرية الأوتار من فهم الثقوب السوداء وأصل الكون.

أولاً: الثقوب السوداء والجسيمات الأولية

من الصعب لأول وهلة أن تخيل شيئاً يختلفان أحدهما عن الآخر بشكل حاد أكثر من اختلاف الثقوب السوداء والجسيمات الأولية. وعادةً ما نتصور الثقوب السوداء على أنها أعظم الأجرام السماوية ضخامة، بينما الجسيمات الأولية أكثر مكونات المادة ضآلة. غير أن أبحاث عدد من الفيزيائيين في نهاية السنتين وبداية السبعينيات من القرن العشرين قد بينت أن الثقوب السوداء والجسيمات الأولية قد لا تكون مختلفة بهذا الشكل بعضها عن بعض كما نتصور. كان من هؤلاء الفيزيائيين ديمتريوس كريستودولو، وويرنر إسرائيل، وريتشارد برايس، وبراندون كارتر، وروي كير، ودافيد روبنسون، وهوكنغ، وبنروز . وجد هؤلاء الفيزيائيون أدلة مقنعة بشكل متزايد لما أوجزه جون ويلر في العبارة: "ليس للثقب السوداء شعر". كان ويلر يعني بهذه العبارة أن كل الثقوب السوداء متشابهة ما عدا في بعض الصفات المميزة. فما هي تلك الصفات المميزة؟ ومن الطبيعي أن تكون كتلة الثقب الأسود هي إحدى تلك الصفات، فما هي الصفات الأخرى؟ كشفت الأبحاث أنها الشحنات الكهربية وشحنات بعض القوى الأخرى التي قد يحملها الثقب الأسود، وكذلك معدل الحركة المغزلية فيه. هذا هو

الوضع، فـأي ثقيبين أسودين لهما نفس الكتلة ونفس شحنات القوى ونفس الحركة المغزليـة سيكونان تامـي التـاظر. وليس للثقوب السوداء "تسريحة شـرـ" جميلـة - أي ليس لها مـمـيزـات ذاتـية - التي تمـيز بعضـها عن البعض الآخرـ. ولا بد من أن يـنبـهـنا هذا إلى شيءـ هـامـ. ولنـستـرـجـعـ أنـ هـذـهـ الصـفـاتـ بالـضـبـطـ - الكـتـلـةـ وـشـحـنـاتـ القـوـىـ وـالـحـرـكـةـ المـغـزـلـيـةـ - هيـ التيـ تمـيزـ الجـسـيـمـاتـ الـأـوـلـيـةـ بـعـضـهاـ عـنـ بـعـضـ. وقد أـدـىـ هـذـاـ التـشـابـهـ فيـ المـمـيـزـاتـ الـمـحدـدـةـ بـعـضـ الـفـيـزـيـائـيـنـ عـلـىـ مـرـ السـنـينـ لـلـاعـقـادـ الغـرـيبـ بـأـنـ الثـقـوبـ السـوـدـاءـ قـدـ تـكـونـ بـالـفـعـلـ جـسـيـمـاتـ أـوـلـيـةـ عـلـىـ اـعـلـاقـةـ.

وفيـ الحـقـيقـةـ، وـوـفقـاـ لـنظـرـيـةـ آـيـنـشـتاـينـ، لاـ يـوجـدـ حدـ أـدـنىـ لـكتـلـةـ الثـقـبـ الأـسـوـدـ. فإذاـ سـحـقـنـاـ وـضـغـطـنـاـ قـطـعـةـ مـنـ المـادـةـ لـهـاـ أيـ كـتـلـةـ إـلـىـ حـجـمـ صـغـيرـ بـمـاـ فـيـهـ الـكـفـاـيـةـ، فإنـ التـطـبـيقـ الـمـباـشـرـ لـلـنـسـبـيـةـ الـعـامـةـ يـبـيـنـ أـنـهـاـ سـتـصـبـحـ ثـقـيـباـ أـسـوـدـ. (وكـلـماـ قـلـتـ الـكـتـلـةـ اـضـطـرـرـنـاـ لـضـغـطـهـ إـلـىـ حـجـمـ أـصـفـرـ). وهـكـذاـ يـمـكـنـ أـنـ تـخـيلـ تـجـربـةـ ذـهـنـيـةـ نـبـأـ فـيـهاـ بـكـتـلـةـ مـنـ المـادـةـ مـتـنـاهـيـةـ الصـغـرـ وـسـحـقـنـاـهـاـ لـتـصـبـحـ ثـقـوبـاـ سـوـدـاءـ فـيـ غـاـيـةـ الـضـالـةـ، ثمـ بـكـتـلـةـ مـنـ المـادـةـ مـتـنـاهـيـةـ الصـغـرـ وـسـحـقـنـاـهـاـ لـتـصـبـحـ ثـقـوبـاـ سـوـدـاءـ فـيـ غـاـيـةـ الـضـالـةـ، ثمـ قـارـنـاـ خـواـصـ هـذـهـ الثـقـوبـ السـوـدـاءـ بـخـواـصـ الـجـسـيـمـاتـ الـأـوـلـيـةـ. وـتـقـوـدـنـاـ مـقـوـلـةـ وـيـلـرـ عنـ دـوـرـ الـشـعـرـ لـاستـنـتـاجـ أـنـ الثـقـوبـ السـوـدـاءـ ذاتـ الـكـتـلـةـ مـتـنـاهـيـةـ الصـغـرـ، وـالـتـيـ تـكـوـنـتـ بـهـذـهـ الـطـرـيـقـةـ، سـتـبـدـوـ مـشـابـهـةـ جـداـ لـلـجـسـيـمـاتـ الـأـوـلـيـةـ. وـسـيـشـبـهـ الـجـمـيـعـ كـتـلـاـ ضـيـشـلـةـ لـلـغاـيـةـ تـمـيـزـ كـلـيـةـ بـكـتـلـهـاـ وـشـحـنـاتـ قـواـهـاـ وـحـرـكـهـاـ الـمـغـزـلـيـةـ.

لـكـنـ هـنـاـ مـطـبـ. فالـثـقـوبـ السـوـدـاءـ الـمـرـصـودـةـ فـلـكـيـاـ ذاتـ الـكـتـلـةـ الـأـكـبـرـ كـثـيرـاـ مـنـ الـشـمـسـ، هيـ مـنـ الـضـخـامـةـ وـالـشـقـلـ بـحـيثـ تـصـبـحـ مـيـكـانـيـكاـ الـكـمـ غـيرـ مـنـاسـبـةـ، وـمـاـ نـحـتـاجـهـ هوـ استـخـدـامـ مـعـادـلـاتـ النـسـبـيـةـ الـعـامـةـ لـفـهـمـ خـواـصـهـاـ. (وـنـحـنـ هـنـاـ نـنـاقـشـ الـبـنـيـةـ الـعـامـةـ لـلـثـقـبـ الـأـسـوـدـ وـلـيـسـ نـقـطـةـ الـانـهـيـارـ الـمـرـكـزـيـةـ الـمـفـرـدـةـ دـاـخـلـ الـثـقـبـ الـأـسـوـدـ، وـالـذـيـ يـنـطـلـقـ حـجـمـهـ الـضـيـشـلـ وـضـعـاـ كـمـيـاـ بـكـلـ تـأـكـيدـ). وـفـيـ مـحاـولـاتـنـاـ لـلـحـصـولـ عـلـىـ ثـقـوبـ سـوـدـاءـ أـصـفـرـ فـأـصـفـرـ فـإـنـاـ سـنـصـلـ إـلـىـ نـقـطـةـ عـنـدـمـاـ تـكـوـنـ تـلـكـ الـثـقـوبـ صـغـيرـةـ وـخـفـيـفـةـ لـدـرـجـةـ أـنـ مـيـكـانـيـكاـ الـكـمـ يـمـكـنـ تـطـبـيقـهـاـ. وـيـحـدـثـ ذـلـكـ عـنـدـمـاـ تـصـلـ الـكـتـلـةـ الـكـلـيـةـ لـلـثـقـبـ الـأـسـوـدـ إـلـىـ كـتـلـةـ بـلـانـكـ تـقـرـيـبـاـ أوـ أـقـلـ مـنـ ذـلـكـ. (مـنـ وـجـهـ نـظـرـ فـيـزـيـاءـ الـجـسـيـمـاتـ الـأـوـلـيـةـ، تـعـتـبـرـ كـتـلـةـ بـلـانـكـ هـاثـلـةـ - بـضـعـ مـئـاتـ مـلـيـارـاتـ الـمـلـيـارـاتـ أـكـبـرـ مـنـ كـتـلـةـ الـبـرـوتـونـ). أـمـاـ مـنـ وـجـهـ نـظـرـ الـثـقـوبـ السـوـدـاءـ فـإـنـ كـتـلـةـ بـلـانـكـ، وـالـتـيـ تـسـاـوـيـ مـتوـسـطـ كـتـلـةـ حـبـةـ وـاحـدـةـ مـنـ الرـمـلـ، ضـيـشـلـةـ جـداـ). وهـكـذاـ، فـإـنـ الـفـيـزـيـائـيـنـ الـذـيـنـ تـصـوـرـوـاـ أـنـ الـثـقـوبـ السـوـدـاءـ الـضـيـشـلـةـ وـالـجـسـيـمـاتـ الـأـوـلـيـةـ قدـ تـكـوـنـ مـرـتـبـطـةـ اـرـتـبـاطـاـ وـثـيقـاـ بـعـضـهـاـ بـعـضـ قدـ اـصـطـدـمـوـاـ مـبـاـشـرـةـ بـعـدـ التـوـافـقـ بـيـنـ النـسـبـيـةـ الـعـامـةـ - الـلـبـ الـنـظـرـيـ لـلـثـقـوبـ السـوـدـاءـ - وـمـيـكـانـيـكاـ الـكـمـ. وـفـيـ الـمـاضـيـ، أـرـبـكـ عـدـمـ التـوـافـقـ هـذـاـ كـلـ التـقـدـمـ فـيـ ذـلـكـ الـاتـجـاهـ الـمـشـيرـ.

ثانياً: هل تسمح لنا نظرية الأوتار بالتقدم للأمام؟

أجل، إنها تسمح بذلك. تقدم نظرية الأوتار أول رابطة نظرية مدوية بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية من خلال الفهم الرفيع غير المتوقع للثقوب السوداء. كان الطريق إلى هذه الرابطة غير مباشر بعض الشيء، لكنه يأخذنا خلال بعض أكثر التطورات إثارة في نظرية الأوتار، مما يجعل الأمر رحلة تستحق العناء.

تبدأ الرحلة ببعض الأسئلة التي قد تبدو غير مرتبطة بالموضوع والتي حام حولها منظرو نظرية الأوتار منذ نهاية ثمانينيات القرن العشرين. كان الرياضيون والفيزيائيون يعلمون منذ مدة طويلة أنه عندما تتجعد ستة أبعاد فضائية لتكون أشكال كالابي-ياو، فإن هناك عموماً نوعين من الكرة المتضمنة في نسيج هذه الأشكال. وأحد هذين النوعين هو الكرة ذات البعدين مثل كرة الشاطئ التي لعبت دوراً حيوياً في تحولات تمزق الفضاء الفجائية في الفصل 11. أما النوع الثاني من الكرة فهو أصعب في تصوره، لكن له نفس الأهمية. فهي كرات ذات ثلاثة أبعاد - مثل أسطح كرات الشاطئ التي تزين الشواطئ الرملية للمحيط في عالم له أربعة أبعاد فضائية ممتدة. وكما ناقشنا في الفصل 11، من الطبيعي أن تكون كرة الشاطئ العادية في عالمنا هي جسم ذو ثلاثة أبعاد، لكن "سطحها" مثل سطح خرطوم المياه ذو البعدين: فأنت تحتاج فقط إلى عددين - خط عرض وخط طول مثلاً - لتحديد أي موقع على سطحه. غير أنها الآن تخيل أن هناك بعداً فضائياً آخر: كرة شاطئ لها أربعة أبعاد بينما لسطحها ثلاثة أبعاد. وحيث أنه يكاد يكون مستحيلاً أن تخيل مثل هذه الكرة في ذهنك، فإننا على الأغلب سنلجأ إلى التشبيه بأبعاد أقل، يمكن بسهولة تخيلها. لكن، وكما سررت الآن، فإن أحد عناصر السطح الكروي ذي الأبعاد الثلاثة له أهمية أساسية.

وقد أيدن الفيزيائيون، بدراساتهم لمعادلات نظرية الأوتار، أن هذا الأمر ممكن، بل الأكثر من ذلك، أنه يمرر الوقت فإن هذه الكرة ذات الأبعاد الثلاثة ستتقلص - تنهار - إلى حجم في غاية الصالة. ويتساءل منظرو نظرية الأوتار، ما الذي قد يحدث إذا ما انهار نسيج الفضاء بهذه الشكل؟ وهل سيكون هناك بعض التأثيرات الكارثية لهذا النوع من انكماش النسيج الفضائي؟ ويشبه ذلك كثيراً السؤال الذي واجهناه وتوصلنا لحله في الفصل 11، لكننا هنا نركز على انهيار كرات ذات ثلاثة أبعاد، بينما في الفصل 11، كان التركيز منصبًا فقط على انهيار الكرة ذات البعدين. (كما في الفصل 11، وحيث أنها تخيل قطعة من شكل كالابي-ياو تتقلص، وليس الشكل كله، فإن المعالجة "نصف القطر الصغير/

نصف القطر الكبير". الموجودة في الفصل العاشر لا تتطبق هنا). وهنا يمكن من الاختلاف الكيفي الأساسي الناتج عن التغير في الأبعاد⁽¹⁾. ولنستعد من الفصل 11 التقين الأساسي بأن الأوتوار يمكن أن تقتصر كرات ذات بعدين أثناء حركتها خلال الفضاء. أي أن عالم الشريحة ذا البعدين يمكن أن يلتقي تماماً حول كرة ذات بعدين كما في الشكل رقم (11-6). وقد ثبت أن ذلك كافٍ بالكاد للوقاية من أن تتسبب كرة ذات بعدين متقلصة ومنهارة في حدوث كوارث فيزيائية. لكننا الآن ندرس النوع الآخر من الكرات داخل فراغ كالابي-ياو، وهي كرات لها أبعاد أكثر بكثير لا تسمع بأن يلتقي حولها وتر متحرك. وإذا كان هذا من الصعب عليك أن تخيله، فإنه من الممكن تماماً أن تفك في التشبيه المتضمن بعضاً واحداً أقل (كل الأبعاد). ومن الممكن أن تتصور كرات ذات ثلاثة أبعاد على أنها سطح ذات بعدين لكرات الشاطئ العادي، طالما كنت تخيل أن الوتر ذا بعد الواحدعبارة عن جسمية نقطة لا بعد لها. وعندها، وبالتشبيه بحقيقة أن الجسمية النقطة عديمة البعد لا تستطيع أن تطوق أي شيء، فما بالك بكرة ذات بعدين، فإن الوتر ذا بعد الواحد لا يستطيع أن يطوق كرة ذات ثلاثة أبعاد.

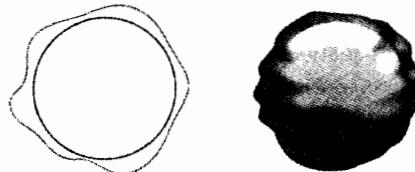
وقد أدى مثل هذا المنطق بمنظري نظرية الأوتوار إلى أن يخمنوا بأن على الكرات ذات الثلاثة أبعاد داخل فضاء كالابي-ياو أن تنهار، الأمر الذي بینت المعادلات التقريرية أنه من الممكن تماماً أن يحدث إن لم يكن تطوراً مألوفاً في نظرية الأوتوار، مما قد يؤدي إلى نتائج كارثية. وفي الحقيقة، فإن المعادلات التقريرية لنظرية الأوتوار التي تطورت قبل منتصف تسعينيات القرن العشرين يبدو أنها تشير إلى أن أحاديث الكون قد تنسحق إلى توقف تام إذا كان لمثل هذا الانهيار أن يحدث. وقد بینت تلك المعادلات أن بعض الالانهيات المعنية التي تم تطوريها بواسطة نظرية الأوتوار قد ينفك رباطها بمثل هذا التقلص للنسيج الفضائي. كان منظرو نظرية الأوتوار مضطرين للتباشير سنوات عدة مع هذا الفهم المقلق غير التام. غير أن أندرو سترومنغر في سنة 1995 بين أن هذه التخمينات عن الانهيار الشامل كانت خاطئة.

(1) سيعرف القارئ الخبير، انه في ظروف تنظر المرأة، فإن السطح الكروي ثلاثي الأبعاد المنهار على أحد أشكال كالابي-ياو سيرسم على شكل سطح كروي ثانوي الأبعاد منهار في مرآة فراغ كالابي-ياو - فيما يبدو أنه يرجعنا مرة ثانية إلى وضع الانقلابات التي ناقشتها في الفصل 11. غير أن الفرق هو أن إعادة الصياغة بواسطة المرأة لهذا النوع تؤدي إلى عدم التناظر لمجال $B_{\mu\nu}$ - القسم الحقيقي من صيغة كehler المرئية على مرأة شكل كالابي-ياو - المختلفة، وهذا نوع صارخ للتفرد أكثر مما ناقشناه في الفصل الحادي عشر.

وبتتبع أبحاث ويتين وسيبرغ التي مهدت الطريق استفاد سترومنغر من الإدراك بأنه عند تحليل نظرية الأوتار بالدقة المكتشفة حديثاً في ثورة الأوتار الفائقة الثانية، فإن هذه النظرية ليست مجرد نظرية وتر ذي بعد واحد. وقد فسر ذلك كالتالي. الوتر ذو البعد الواحد - أو واحد-بران باللغة الجديدة في هذا المجال - يمكن أن يطوق تماماً جزءاً ذا بعد واحد من الفضاء على شكل دائرة كما هو موضح في الشكل رقم (1-13). (لاحظ أن هذا مختلف عن الشكل رقم (6-11) الذي فيه الوتر ذو البعد الواحد يطوق كرة ذات بعدين أثناء حركته في الفضاء. ولابد أن ننظر إلى الشكل رقم (1-13) على أنه لقطة أخذت في لحظة ما من الزمن). وبالمثل فإننا نرى في الشكل رقم (1-13) غشاء ذا بعدين - اثنان- بران - يمكن أن يلتف حول كرة ذات بعدين ويغطيها تماماً مثل قطعة من البلاستيك التي تلتف بإحكام حول سطح برقالة. ومع أنه من الصعب أن تخيل، فإن سترومنغر قد تبع النسق وتيقن من أن المكونات ذات الأبعاد الثلاثة المكتشفة حديثاً في نظرية الأوتار - ثلاثة-بران - يمكن أن تلتف حول كرة ثلاثة الأبعاد وتغطيها تماماً. وبعد أن تبصر ذلك الأمر بوضوح بين سترومنغر أن الثلاثة-بران الملفوفة تقدم درعاً مفصلاً بالضبط ليلاشي كل التأثيرات الكارثية المحتملة التي تخوف منظرو نظرية الأوتار في السابق من حدوثها إذا كان للكرة ثلاثة الأبعاد أن تنهار، وذلك من خلال حسابات فيزيائية قياسية بسيطة.

كان ذلك نظرة ثاقبة هامة ورائعة. غير أن مقدرتها الكاملة لم تفتح إلا بعد فترة وجيزة.

الشكل رقم (1-13)



يمكن للوتر أن يطوق جزءاً من نسيج الفضاء ذا بعد واحد متجمد؛ أما الغشاء ذو البعدين فيمكن أن يلتف حول جزء ذي بعدين.

ثالثاً: تمزق نسيج الفضاء - عن اقتئاع

تعد الكيفية التي تتغير بها الحالة المعرفية بين يوم وليلة، بمعنى الكلمة، من أكثر الأمور إثارة في الفيزياء. فقد قرأت المقال الذي أرسله سترومنغر للنشر

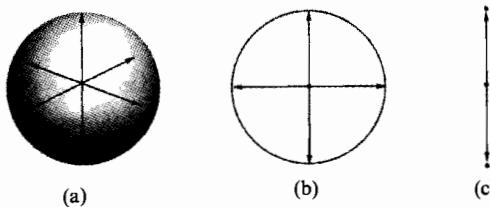
صبيحة اليوم التالي وذلك من أرشيف الإنترنت بعد أن استرجعته من الشبكة العالمية أثناء وجودي بمكتبي في جامعة كورنيل. وبصرية واحدة، تمكن سترومنغر من استخدام الأفكار المثيرة والجديدة لنظرية الأوتار في حل أحد الموضوعات الشائكة المتعلقة بتجدد الأبعاد الإضافية في أشكال كالابي-ياو. وعندما تمعنت في المقال فوجئت أنه ربما يكون قد حل نصف المشكلة فقط.

وفي أبحاث تمزق الفضاء في التحولات الفجائية المبكرة التي وصفناها في الفصل 11، قمنا بدراسة العملية ذات القسمين التي تتخلص بها كرة ذات بعدين إلى نقطة، مما يتسبب في تمزق نسيج الفضاء، ثم تستعيد الكرة ذات البعدين شكلها بطريقة جديدة تصلح من التمزق الذي حدث، وقد درس سترومنغر في هذا المقال ما الذي يحدث عندما تتخلص كرة ذات ثلاثة أبعاد إلى أن تصير نقطة، وبين أن الأجسام الممتدة المتكونة حديثاً في نظرية الأوتار تؤكّد أن الفيزياء ما زالت مثالية في سلوكها. وكان ذلك آخر ما انتهى إليه المقال. فهل ترى من الممكن أن يكون هناك نصف آخر للرواية متضمناً مرة أخرى تمزق الفضاء ثم إصلاحه من خلال استعادة الكرات لأشكالها؟

كان ديف موريسون في زيارة لي في جامعة كورنيل أثناء الفصل الدراسي في ربيع العام 1995، وقد أخذنا نقاشاً في مقال سترومنغر في فترة بعد الظهر. وفي غضون بعض ساعات توصلنا إلى إطار عام لما قد يbedo عليه "النصف الثاني للرواية". وبالاعتماد على بعض الأفكار الثاقبة التي ظهرت في أوآخر ثمانينيات القرن العشرين، أيقناً أنه عندما انهار كرة ذات ثلاثة أبعاد، فمن المحتمل أن يتمزق فراغ كالابي-ياو ثم يعيّد إصلاح نفسه باستعادة الكرة انتفاخها. كانت هذه الأفكار من أبحاث علماء الرياضيات هيرب كليمنسن من جامعة يوتا، وروبرت فريدمان من جامعة كولومبيا، ومايلز ريد من جامعة وارويك، كما استخدمها كانديلاس وغرين وترستيان هووش الذين كانوا في جامعة تكساس بـأوستين في ذلك الوقت. لكن كانت هناك مفاجأة هامة. في بينما كانت الكرة التي انهارت ذات ثلاثة أبعاد، كانت الكرة التي استعادت انتفاخها ذات "بعدين" فقط. ومن الصعب أن نتصور الشكل الذي يbedo عليه ذلك، لكننا يمكن أن نتخيل ذلك بالتركيز على التشبيه بالأشكال ذات الأبعاد الأقل. وبدلأً من الحالة التي يصعب تصورها لكرة ذات ثلاثة أبعاد في انهيارها لتحول محلها كرة ذات بعدين، فلتتصور كرة ذات بعد واحد انهار لتحول محلها كرة لا بعد لها.

وبادئ ذي بدء، ما هي الكرات ذات البعد الواحد، وتلك التي بلا بعد؟ حسناً، لنلجأ إلى التشبيه للإجابة عن السؤال. فالكرة ذات البعدين عبارة عن تجمع

الشكل رقم (2-13)



كرات ذات أبعاد يمكن بسهولة تخيلها - (a) بعدان، (b) بعد واحد، (c) بلا بعد.

نقاط فضاء ذي ثلاثة أبعاد على نفس المسافة من مركز مختار، كما هو مبين في الشكل رقم (2-13)، (a). وباتباع نفس الفكرة، فإن الكرة ذات البعد الواحد عبارة عن تجميع نقاط فضاء ذي بعدين (مثل هذه الصفحة) هي على نفس المسافة من مركز مختار. وكما هو مبين في الشكل رقم (2-13)، (b)، فهي ليست إلا دائرة. وفي النهاية، وباتباع نفس النسق، فإن الكرة التي بلا بعد عبارة عن تجميع نقاط لفضاء ذي بعد واحد (خط) على نفس المسافة من مركز مختار. وكما هو مبين في الشكل رقم (2-13)، (c)، فإن ذلك عبارة عن " نقطتين " لهما " نصف القطر " لكرة بلا بعد مساو للمسافة بين كل نقطة والمركز المشترك. وهكذا، فإن التشبيه بالأبعاد الأقل الذي أمحنا إليه في المقطع السابق يتضمن دائرة (كرة ذات بعد واحد) عندما تتخلص متبوعة بتمزق الفضاء، ثم إحلال كرة بلا بعد محلها (نقطتان). ويضع الشكل رقم (3-13) الفكرة المجردة في قالب عملي.

ولتخيل البداية على شكل سطح دونت (كعكة دائرية)، تضم كرة ذات بعد واحد (دائرة) كما هو واضح من الكرة المظللة في الشكل رقم (3-13). والآن لتخيل أنه بمرور الوقت تنهار الدائرة المظللة مسببة تخلص نسيج الفضاء. ويمكن إصلاح هذا التخلص بالسماح لنسيج الفضاء بأن يتمزق لحظياً ليحل محل الكرة المتخلصة ذات البعد الواحد - الكرة المنهارة - كرة بلا بعد - نقطتان - تسد الثقوب في الأجزاء العليا والسفلى في الشكل الناشئ عن التمزق. وكما هو موضح بالشكل رقم (3-13)، فإن الأشكال الناتجة تشبه ثمرة موز ملتوية، يمكن إعادة تشكيلها بطريقة هادئة (بلا تمزق للفضاء) إلى سطح كرة شاطئ. ولذا عندما تنهار كرة ذات بعد واحد ويحل محلها كرة بلا بعد، فإن طوبولوجية الكعكة الأساسية، أي شكلها الأساسي، يتغير جذرياً. وفي سياق حديثنا عن الأبعاد الفضائية المتعددة، فإن تسلسل تمزق الفضاء في الشكل رقم (3-13) قد يؤدي إلى العالم الذي تصورناه في الشكل رقم (8-8) والذي يتطور إلى ما تصورناه في الشكل رقم (7-8).

الشكل رقم (3-13)



قطعة دائيرية من كعكة (طارة) تنهار إلى نقطة. يتمزق السطح منفتحاً ومؤدياً إلى ثقبين. و"لتلتصق" مع بعضها (نقطتان) كرة بلا بعد لتحول محل الكرة الأصلية ذات البعد الواحد (الدائرة) مصلحة بذلك السطح الممزق. ويؤدي هذا إلى التحول إلى شكل مختلف تماماً - كرة الشاطئ.

ومع أن ذلك تشبيه بأبعاد أقل، إلا أنه يبين السمات الأساسية لما تنبأ به أنا وموريسون لنصف الرواية الثاني لسترومنغر. وبعد انهيار كرة ذات ثلاثة أبعاد داخل فراغ كالابي-ياو بذا لنا أن الفراغ يمكن أن يتمزق ثم يتبع ذلك إصلاح ذاتي وت تكون كرة ذات بعدين، الأمر الذي يؤدي إلى تغيرات طوبولوجية هائلة أكثر من تلك التي وجدناها نحن وويتن في أبحاثنا المبكرة (ناقشناها في الفصل 11). وخلاصة القول، من الممكن بهذه الطريقة أن يتحول أحد أشكال كالابي-ياو نفسه إلى شكل آخر من أشكال كالابي-ياو مختلف تماماً - بالضبط مثل تحول الدونت إلى كرة الشاطئ في الشكل رقم (3-13) - بينما تظل فيزياء الأوتار مثالية السلوك تماماً. وبالرغم من أن الصورة قد بدأت تتضح، إلا أنها كانت نعلم أن هناك أموراً هامة تحتاج للانتهاء منها قبل أن نعلن أن النصف الثاني من الرواية لا يقحم أي تفرد - أي له عواقب ضارة وغير مقبولة فيزيائياً. ذهب كل منا إلى بيته في هذا المساء بشعور مرتاح أنها قد وضعنا أيدينا على فكرة جديدة عظيمة.

رابعاً: فيض من البريد الإلكتروني

تلقيت في الصباح التالي بريدأ إلكترونياً من سترومنغر يسألني عن أي تعليقات أو ردود فعل على مقاله. وقد أشار بقوله "لابد أن يرتبط هذا البحث مع أبحاثكم أنت وأسبينول وموريسون"، لأنه وكما اتضح في ما بعد كان هو الآخر يستكشف الارتباط المحتمل مع ظاهرة التغير الطوبولوجي. أرسلت له في التو بريدأ إلكترونياً يصف المخطط التقريري الذي وصلنا إليه أنا وموريسون. وقد اتضح من رده على هذه الرسالة أنه كان متৎمساً بنفس درجة حماسنا أنا وموريسون منذ اليوم السابق.

وفي خلال الأيام القليلة التالية تبادلنا نحن الثلاثة سيلأً من البريد الإلكتروني بينما كان نبحث بحمة لنضع الأساس الكمي لأفكارنا حول التغيرات الطوبولوجية

التي تمزق الفضاء. وبيطء لكن بثقة اتخذت تفاصيل الأشياء مواضعها الصحيحة. ويحلول يوم الأربعاء التالي وبعد أسبوع من إعلان سترومنغر لأفكاره الأصلية، كان لدينا مسودة مقال مشترك يحدد التحولات الدرامية الجديدة لنسيج الفضاء الذي يتبع انهيار الكرة ذات الأبعاد الثلاثة.

كان سترومنغر على موعد لإلقاء محاضرة في جامعة هارفارد في اليوم التالي، ولذا غادر سانتا باربارا في الصباح الباكر واتفقنا نحن الثلاثة أن يقوم موريسون وأنا بوضع اللمسات الأخيرة للمقال وإرساله للنشر في الأرشيف الإلكتروني في نفس المساء - وبحلول الساعة 11.45 مساءً كنا قد راجعنا حساباتنا وأعدنا مراجعتها وبدأنا أن كل شيء متتسق بعضه مع بعض تماماً. وهكذا أرسلنا بمقالنا بالطريقة الإلكترونية وغادرنا مبني الفيزياء. وبينما كنا أنا وموريسون نسير في اتجاه سيارتي (كنت سأقوم بتوصيله لمنزله الذي استأجره لمدة فصل دراسي واحد) اتخذت مناقشتنا منحى نقدياً، حيث تخيلنا أكثر النقد قسوة الذي يمكن أن يجيء به أي أحد يرفض قبول نتائجنا. ومع مغادرتنا لساحة انتظار السيارات والخروج من حرم الجامعة أيقنا أنه على الرغم من أن حجاجنا قوية ومقنعة إلا أنها ليست محكمة تماماً. لم يشعر أي منا أن هناك آية فرصة حقيقة لأن يكون بحثنا على خطأ، لكننا أدركنا أن قوة ادعاءاتنا والأسلوب الذي اخترناه في كتابة المقال في بعض النقاط قد يسمح ببعض النقاش الموسوم بالحقد مما قد يحجب أهمية النتائج. وقد اتفقنا على أنه يكون من الأفضل أن نكتب البحث بطريقة أهداً، لتخفض من حدة زعمنا ونسمح لمجتمع الفيزياء بالحكم على البحث في جوهره بدلاً من الحكم على طريقة تقديمها.

وأثناء قيادة السيارة ذكرني موريسون بأن قواعد النشر في الأرشيف الإلكتروني تسمح لنا بتنقيح البحث حتى الثانية صباحاً، حين يكون قد أصبح متاحاً للمطلعين على شبكة الإنترنت. وفي هذه اللحظة استدرت بسيارتي لتعود إلى مبني الفيزياء، واسترجعنا المقال الأصلي وبدأنا في إعادة الصياغة. ولحسن الحظ كان الأمر سهلاً تماماً. وقد أدى مجرد تغيير بعض الكلمات في المقاطع الهامة إلى تخفيف وقع ما زعمناه دون المساس بالمحتوى الفني. وفي غضون ساعة أعدنا إرسال المقال واتفقنا ألا نتحدث عنه بالمرة طوال قيادي للسيارة وتوصيل موريسون لمنزله.

وبعد ظهر اليوم التالي كان واضحاً أن رد الفعل على مقالنا حماسي مشجع. ومن بين العديد من رسائل البريد الإلكتروني الذي استقبلناه كانت هناك رسالة من بلسيير تحتوي على أعلى مجاملة يمكن أن يحصل عليها فيزيائي من فيزيائي آخر،

بأن قال: "كنت أتمنى أن أفكر أنا في ذلك!" وبالرغم من مخاوفنا في الليلة السابقة، فإننا قد أقنعنا مجتمع نظرية الأوتار أنه ليس نسيج الفضاء فقط هو الذي يتمزق بهدوء كما اكتشف من قبل (الفصل 11)، ولكن يمكن أن تحدث تمزقات أكثر حدة كذلك كما هو مصور بشكل تقريري في الشكل رقم (3-13).

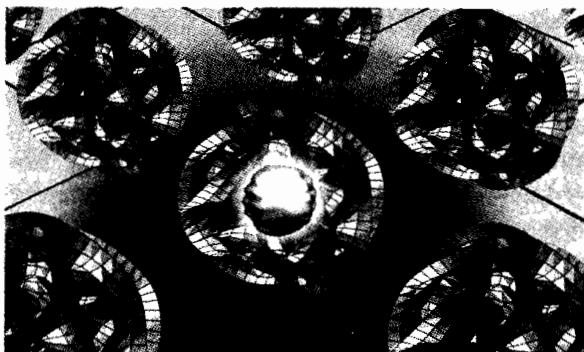
خامساً: العودة إلى الثقوب السوداء والجسيمات الأولية

ما علاقة هذا الأمر بالثقوب السوداء والجسيمات الأولية؟ الكثير. وحتى نرى ذلك علينا أن نسأل أنفسنا نفس السؤال الذي وضعناه في الفصل 11. ما هي النتائج الفيزيائية التي يمكن ملاحظتها نتيجة لمثل هذا التمزق لنسيج الفضاء؟ وبالنسبة للتحولات الفجائية، كما رأينا من قبل، فإن الإجابة المذهلة عن هذا السؤال هي أن لا يحدث الشيء الكثير بالمرة. أما بالنسبة للتحولات المخروطية Conifold Transitions - وهو الاسم التقني للتحولات الدرامية لتمزق الفضاء التي اكتشفناها الآن - فمرة أخرى لا تنتهي كارثة فيزيائية (مثل تلك التي قد تنتهي ببعض النسبية العامة المتفق عليها) غير أن هناك المزيد من النتائج المدوية التي يمكن ملاحظتها.

هناك مفهومان يتعلقان بهذه النتائج المشاهدة، وستقوم بتفسير كل منهما بدوره. الأول، كما شرحنا من قبل، كان التقدم المفاجئ في أبحاث سترومنغر الأصلية هو إدراكه أن كرة ذات ثلاثة أبعاد داخل فراغ كالابي-ياو يمكن أن تنها من دون إحداث كارثة، لأن الغشاء ثلاثة-بران الملفوف حولها يمنحها درعاً واقياً تماماً. لكن ما هو الشكل الذي عليه هذا الغشاء الملفوف؟ تكمن الإجابة عن هذا السؤال في الأبحاث المبكرة لكل من هورويتس وسترومنغر التي أظهرت للأشخاص من أمثالنا المدركين فقط للأبعاد الثلاثة الفضائية الممتدة، أن "ثلاثة-بران" المغلفة للكرة ثلاثة الأبعاد، سينتظر منها مجال للجاذبية يظهر على شكل ثقب أسود⁽²⁾. وليس هذا الأمر واضحأً لكنه سيتضاعف فقط من الدراسة المتصلة للمعادلات التي تحكم الأغشية. ومرة أخرى، من الصعب رسم الأشكال ذات الأبعاد الأعلى بدقة على صفحة من الورق، لكن الشكل رقم (4-13) يعطي فكرة تقريبية لتشابه أقل أبعاداً يتضمن كرات ذات بعدين. ونرى أن غشاء ذا بعدين يمكن أن يلف نفسه حول كرة ذات بعدين (هي نفسها موجودة داخل فراغ كالابي-ياو

(2) وبصورة أكثر دقة، فإن هذه أمثلة للثقب السوداء "القصوى" الطرفية، تلك الثقوب السوداء ذات الكتلة الدنيا التي تتواءم مع شحذات القوة الخاصة بها، تماماً مثل حالات BPS في الفصل الثاني عشر. وتسلّب ثقوب سوداء مماثلة دوراً حيوياً في مناقشة أنتروبيّة الثقوب السوداء التالية.

الشكل رقم (4-13)



عندما يلتف الـ "بران" حول كرة في حدود الأبعاد الممتدة، فإنها ستبدو مثل ثقب أسود من وجهة نظر الأبعاد الممتدة المعتادة.

في بعض المواقع في الأبعاد الممتدة). فإذا نظر أحد من خلال الأبعاد الممتدة تجاه هذا الموقع سيشعر بالغشاء الملفوف عن طريق كتلته وشحنات القوى التي يحملها، أي تلك الخواص التي بين هورويتس وسترومنغر أنها تشبه تماماً خواص الثقب الأسود. والأكثر من ذلك، زعم سترومنغر في مقاله عام 1995، الذي أحدث تقدماً فجائياً، أن كتلة الغشاء ثلاثة-بران - كتلة الثقب الأسود - ستتناسب طردياً مع حجم الكرة ذات الأبعاد الثلاثة التي تلتف حولها: كلما زاد حجم الكرة، أصبح الغشاء ثلاثة-بران أكبر ليتمكن من الالتفاف حول الكرة، وبالتالي ستزيد كتلتها. وبينما يكتفى كتلة الغشاء ثلاثة-بران الذي يلتف حولها، والذي يعتبر ثقباً أسود، يصبح أخف كثيراً. وعندما تنهار الكرة ذات الأبعاد الثلاثة لتصبح نقطة، فإن الثقب الأسود المصاحب لذلك - احبس أنفاسك - سيصبح عديم الكتلة. ومع أن ذلك يبدو في غاية الغموض - فما هو الثقب الأسود عديم الكتلة في هذا العالم؟ - سنقوم حالاً بربط هذه الأحجية بفيزياء الأوتار الأكثر ألفة لنا.

أما المفهوم الثاني الذي نحتاج لاسترجاعه فهو أن عدد الثقوب في شكل كالابي-ياو، كما هو وارد في الفصل التاسع، يحدد الأنساق الاهتزازية ذات الطاقة المنخفضة وبالتالي ذات الكتلة المنخفضة للأوتار، وهي تلك الأنساق التي من المحتمل أن تكون مسؤولة عن الجسيمات في الجدول رقم (1-1)، وكذلك عن حاملات القوة. وحيث أن التحولات المخروطية التي تمزق الفضاء تغير من

عدد الثقوب (كما في الشكل رقم (3-13) مثلاً، الذي استبعد منه ثقب الكعكة بواسطة عملية التمزق والإصلاح)، فإننا نتوقع تغيراً في عدد الأنساق الاهتزازية ذات الكتلة المنخفضة. وبالفعل، عندما درسنا، موريسون وسترومغر وأنا، هذا الأمر بالتفصيل، وجدنا أنه عندما تحل كرّة جديدة ذات بعدين محل الكرّة ذات الأبعاد الثلاثة المتقلّصة في أبعاد كالابي-ياو المتّجدة، فإن عدد الأنساق الاهتزازية للأوتار عديمة الكتلة يزيد بمقدار واحد بالضبط. (مثال الكعكة التي تحولت إلى كرّة شاطئ في الشكل رقم (3-13) قد يؤدي بنا للاعتقاد بأن عدد الثقوب - وكذلك عدد الأنساق - يتناقض، لكن انتصح أن هذه خاصية خادعة في التشبيه بالأبعاد الأقل).

وحتى نجمع بين المشاهدات المذكورة في المقاطعين السابقين فلتخيّل سلسلة من اللقطات لفراغ كالابي-ياو الذي فيه يتناقض حجم كرّة معينة ذات ثلاثة أبعاد أقل فأقل. وتتضمن الملاحظة الأولى أن الغشاء ثلاثة-بران الملتّف حول هذه الكرّة ذات الثلاثة أبعاد - الذي يبدو لنا كثقب أسود - ستتناقض كتلته إلى قيم أصغر فأصغر، وعند نقطة الانهيار النهاية سيصبح بلا كتلة. لكن، وكما تسأّلنا من قبل، ما الذي يعنيه ذلك؟ وتتصبّح الإجابة واضحة بالاستشهاد بالملاحظة الثانية. بيّنت أبحاثنا أن الأنساق الجديدة عديمة الكتلة لاهتزازات الأوتار الناتجة من التحوّلات المخروطية لتعزّق الفضاء هي "الوصف المجهري للجسيمة عديمة الكتلة التي تحول إليها الثقب الأسود". وقد استنتجنا أنه عندما يعني أحد أشكال كالابي-ياو من تحوّلات مخروطية ممزقة للفضاء، فإن الثقب الأسود الذي له كتلة في البداية سيصبح أخف فأخف حتى يصير بلا كتلة ثم يتحول إلى جسيمة عديمة الكتلة - مثل الفوتون عديم الكتلة - الذي هو في نظر الأوتار ليس إلا وتر منفرد له نسق اهتزاز معين. وبهذه الطريقة تكون نظرية الأوتار، ولأول مرة، قد أثبتت مباشرة بوضوح وبطريقة كمية ترابطاً لا جدال فيه بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية.

سادساً: الثقب السوداء "المتصهرة"

إن الارتباط بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية الذي اكتشفناه يشبه إلى حد كبير شيئاً مألوفاً لنا جميعاً من حياتنا اليومية، والمعرف به تقنياً باسم "التحول الطوري" (Phase Transition). والمثال البسيط للتحول الطوري هو ذلك الذي ذكرناه في الفصل السابق: يمكن أن يتواجد الماء على شكل جامد (ثلج) وسائل (الماء السائل) وغاز (بخار). وتعرف هذه الأشكال بأطوار الماء، ويسمى التحول

من شكل آخر " بالتحول الطوري ". وقد بینا موریسون وسترومنفر وأنا أن هناك تشابهاً رياضياً وفيزيائياً قوياً بين مثل هذه التحولات الطورية والتحولات المخروطية الممزقة للفضاء لأحد أشكال كالابي - ياو إلى شكل آخر. ومرة أخرى، وكما حدث لشخص لم ير في حياته الماء السائل أو الثلوج الجامد فلن يدرك في التو أنهما طوران لنفس المادة، فإن الفيزيائيين لم يدركوا في السابق أن أنواع الثقوب السوداء التي ندرسها والجسيمات الأولية ما هي إلا طوران لنفس المادة الورثية الأساسية في الواقع. فيما تحدد درجة الحرارة الطور الذي يوجد عليه الماء، فإن الصيغة الطوبولوجية - الشكل - لأبعاد كالابي - ياو الإضافية تحدد ما إذا كان تركيب فيزيائي معين في نظرية الأوتار سيظهر كثقب أسود أو جسمة أولية. أي أنه، في الطور الأول، الذي هو شكل كالابي - ياو الأصلي (المشابه لطور الثلوج مثلاً)، نجد أن هناك ثقباً سوداء معينة. وفي الطور الثاني، الذي هو شكل كالابي - ياو الثاني (المقابل لطور الماء السائل)، عانت هذه الثقوب السوداء تحولاً طورياً - أي أنها قد "انصهرت" مثلاً - إلى أنساق اهتزازية أساسية للأوتار. وبأخذنا تمزق الفضاء من خلال التحولات المخروطية من أحد أطوار كالابي - ياو إلى طور آخر. وأثناء ذلك نرى أن الثقوب السوداء والجسيمات الأولية، مثل الماء والثلج، وجهاز لعملة واحدة. ونرى أن الثقوب السوداء تتوازع بشكل صحيح داخل إطار نظرية الأوتار.

لقد استخدمنا عامدين نفس مثال التشبيه بالماء لهذه التحولات الجادة الممزقة للفضاء، وكذلك للتحولات من إحدى الصيغ الخمس لنظرية الأوتار إلى صيغة أخرى (الفصل 12) لأنها مرتبطة بشدة. ولنسترجع أننا قد عبرنا في الشكل رقم (11-12) عن أن النظريات الخمس للأوتار ثنائية بعضها البعض، ولهذا فإنها تتوحد تحت عنوان نظرية متفردة شاملة. ولكن هل تصمد المقدرة على التحرك المتصل من أحد الأوصاف إلى الآخر - لتنطلق من آية نقطة على الخريطة في الشكل رقم (12-11) لنصل إلى آية نقطة أخرى - حتى بعد أن سمحنا للأبعاد الإضافية بالتجدد إلى أي شكل من أشكال كالابي - ياو؟ وقبل اكتشاف نتائج التغير الطوبولوجي الهائل، فإن الإجابة المتوقعة هي لا، حيث أنه لم تكن هناك طريقة معروفة للتحول المستمر من أحد أشكال كالابي - ياو إلى آخر. أما الآن، فإننا نرى أن الإجابة هي نعم: من خلال هذه التحولات المخروطية الممزقة للفضاء والمعقوله فيزيائياً، يمكننا تغيير أي شكل من أشكال كالابي - ياو إلى الآخر بصفة مستمرة. ونرى أن كل البنى الورثية هي - مرة أخرى - أطوار مختلفة لنظرية واحدة، وذلك بتغيير ثوابت الأزدواج وهندسة فراغات كالابي - ياو. وحتى بعد

تجعد كل الأبعاد الإضافية فإن وحدة الشكل رقم (11-12) تظل متماسكة بقوة.

سابعاً: أنثروبية الثقوب السوداء

ظل بعض أكثر الفيزيائيين النظريين شهرة لسنوات كثيرة يخمنون احتمالات وجود عمليات تمزق للفضاء وكذلك وجود رابطة بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية. ومع أن مثل هذه التخمينات كانت تبدو كالخيال العلمي، إلا أن اكتشاف نظرية الأوتار ومقدرتها على دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم قد سمح لنا بغرس هذه الاحتمالات بشدة على جبهة العلم المتقدم. وقد تجرأنا بفضل هذا التجاج على التساؤل عما إذا كانت أية خواص غامضة أخرى لعالمنا استعانت بعناد على الحل لعقود طويلة يمكن لها أيضاً أن تخضع لمقدرة نظرية الأوتار. كان مفهوم "أنثروبية الثقوب السوداء" على رأس هذه الخواص. وكانت تلك هي الساحة التي استعرضت فيها نظرية الأوتار عضلاتها عندما حلت بنجاح معضلة ذات أهمية خاصة دامت على مدى ربع قرن.

والأنتروبية هي مقياس لعدم الترتيب أو العشوائية، فعلى سبيل المثال إذا كان مكتبك مزدحماً بكتب مفتوحة نصف مقرورة طبقات فوق طبقات وجرايد قديمة ورسائل دعائية، فإن المكتب يكون في حالة عدم ترتيب قصوى أو "أنثروبية مرتفعة". ومن جهة أخرى، إذا كان المكتب مرتبًا تماماً والموضوعات مرتبة أبجدياً في ملفاتها، والجرائد موضوعة بعناية بحسب تاريخها، والكتب مصنفة في ترتيب أبجدي تبعاً لمؤلفيها والأقلام مرصوصة في المكان المخصص لها، فإن مكتبك في هذه الحالة في غاية النظام أو له "أنثروبية منخفضة". ويوضح هذا المثال الفكرة الأساسية، لكن الفيزيائيين أعطوا للأنتروبية تعريفاً كمياً يسمح بوصف أنثروبية شيء ما باستخدام قيم عددية محددة: فتعني الأرقام الأكبر أنثروبية أعلى والأرقام الأصغر أنثروبية منخفضة. ومع أن التفاصيل معقدة بعض الشيء إلا أن هذه الأرقام تعني، بشكل ما، إعادة الترتيب المحتمل للمكونات في نظام فизيائي معين من دون المساس بمظهره العام. فعندما يكون مكتبك مرتبًا ونظيفاً، فإن أي إعادة ترتيب - تغيير نظام الصحف والكتب والمقالات ونقل الأقلام من موضعها - سيحدث اضطراباً في التنظيم عالي الترتيب. وهو ما يعني أن له أنثروبية منخفضة. وعلى العكس، عندما يكون مكتبك في حالة يرثى لها من عدم الترتيب، فإن أي إعادة ترتيب للصحف والمقالات والبريد سيدعه كما هو في نفس الحالة من عدم الترتيب، وبالتالي لن يغير من مظهره العام. وهو ما يعني أن له أنثروبية مرتفعة.

وطبعاً، فإن وصف إعادة ترتيب الكتب والمقالات والصحف فوق المكتب - وتقرير أي ترتيب "يدع المظهر العام كما هو" - تنقصه الدقة العلمية. ويتضمن التعريف الدقيق للأنتروبية في الواقع حساب أو إحصاء عدد مرات إعادة الترتيب المحتملة للخواص الكمية المجهوية للمكونات الأصلية لنظام فزيائي، والتي لا تؤثر في خواصه الماكروية العامة (مثل طاقته أو ضغطه). وليس التفاصيل أساسية طالما أنك تدرك أن الأنتروبية هي مفهوم كمي تماماً لميكانيكا الكم يقيس بدقة عدم الترتيب الشامل لنظام فزيائي.

قدم جاكوب بيكنشتاين اقتراحاً جريئاً سنة 1970، وكان وقتها طالب دراسات عليا تحت إشراف جون ويلر في جامعة برينستون. فقد اقترح فكرة مميزة عن أن الثقوب السوداء قد تكون لها أنتروبية - وقد تكون كميتها هائلة. كان بي肯شتاين مدفوعاً بالقانون الجليل الذي اختبر جيداً، "القانون الثاني للديناميكا الحرارية"، الذي ينص على أن أنتروبية أي نظام تتزايد باستمرار:

يميل كل شيء إلى درجة أعلى من عدم الترتيب. وحتى لو أنك نظرت ونظمت مكتبك المكدس لتنقص من أنتروبيته فإن الأنتروبية الكلية المتضمنة لأنتروربية جسمك وهواء الحجرة ستزداد في الواقع. ولكي ترتب مكتبك ستسهل لك طاقة، أي أنك ستحدث اضطراباً لبعض جزيئات الدهون في جسمك لتوليد هذه الطاقة من أجل عضلاتك، وبالقيام بعملية النظافة سيفقد جسمك حرارة ستتحرك جزيئات الهواء المحيط نحو حالة أعلى من الاضطراب وعدم الترتيب. فإذا أخذنا كل هذه التأثيرات في الاعتبار فإنها ستعرض وتزيد عن النقص في أنتروبية مكتبك، وبالتالي ستزداد الأنتروبية الكلية.

وقد تساءل بي肯شتاين عما يحدث إذا كان تنظيف المكتب يتم بالقرب من أفق الحدث لثقب أسود وقد وضع مضخة تفريغ لتسحب كل جزيئات الهواء المثاررة من جديد من الغرفة إلى الأعمق المستترة داخل الثقب الأسود؟ ويمكن أن نذهب أبعد من ذلك: ماذا سيحدث لو سحبت المضخة كل الهواء وكل ما على المكتب وحتى المكتب نفسه إلى داخل الثقب الأسود تاركة إياك في حجرة باردة لا هواء فيها في غاية الترتيب؟ وحيث أن الأنتروبية في حجرتك قد نقصت بالتأكيد، فإن بي肯شتاين قد فسر الطريقة الوحيدة للتتواءم مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية بأن يكون للثقب الأسود أنتروبية، وأن هذه الأنتروبية ستزيد كلما دخلت المواد إلى الثقب الأسود وذلك لتعادل النقص في الأنتروبية الملاحظ خارج الثقب الأسود.

وفي الحقيقة استطاع بيكنشتاين الاعتماد على نتائج أبحاث ستيفان هوكنغ الشهيرة لتفوره موقفه. فقد بين هوكنغ أن مساحة أفق الحدث لثقب أسود تتزايد باستمرار في أي تداخل فизيائي - للذكر، إن هذه منطقة اللاعودة التي تلف كل ثقب أسود. وقد شرح هوكنغ أنه إذا سقط شهاب في ثقب أسود أو التحتم غاز من نجم قريب مع ثقب أسود أو إذا تصادم ثقبان أسودان واتحدا، ففي كل هذه العمليات وفي العمليات الأخرى ستزيد المساحة الكلية لافق الحدث للثقب الأسود دائماً. وتبعاً لبيكنشتاين فإن التطور الحتمي تجاه مساحات كلية أكبر تشير إلى وجود ارتباط بالتطور الحتمي في اتجاه الأنتروربية الكلية الأعلى المتضمنة في القانون الثاني للديناميكا الحرارية. وقد اقترح أن مساحة أفق الحدث لثقب أسود تمثل مقاييساً دقيقةً لأنتروريته.

وبالفحص الأدق، اتضح وجود سببين وراء اعتقاد الفيزيائيين بأن فكرة بي肯شتاين يمكن أن تكون على خطأ. السبب الأول، تبدو الثقوب السوداء ضمن أكثر الأجسام ترتيباً وتنظيمًا في كل الكون. فبمجرد قياس كتلة ثقب أسود وشحنات القوى التي يحملها وحركته المغزالية فإن كنهه يكون قد تحدد بدقة عالية. وبمثل هذا العدد الضئيل من الصفات المحددة، فإن الثقب الأسود يبدو وكأنه تنقصه البنية اللازمة لحدوث عدم الترتيب. وتماماً مثل حركة المكتب إذا كان عليه فقط كتاب واحد وقلم واحد، فإن فرصة عدم الترتيب قليلة، كذلك الثقوب السوداء تبدو أبسط من أن يكون لها عدم ترتيب. أما السبب الثاني في أن اقتراح بي肯شتاين من الصعب هضمـه، هو أن الأنتروربية، كما ذكرنا آنـما هي مفهوم من مفاهيم ميكانيكا الكم، بينما كانت الثقوب السوداء، حتى وقت قريب، أسيرة المعسـكـرـ المـضـادـ للـنـسـيـةـ العـامـةـ الـكـلـاسـيـكـيـةـ بـعـنـفـ. وفي أوائل سبعينيات القرن العشرين، وبدون وسيلة لدمج النسـيـةـ العـامـةـ وـمـيـكـانـيـكاـ الـكـمـ، بدا من غير الملائم في أحسن الظروف أن نناقش الأنتروربية المحتملة للثقب الأسود.

ثامناً: كيف يكون الأسود أسود؟

ما مدى سواد الأسود؟

وكما اتضح في ما بعد، كان هوكنغ كذلك يفكر في التشابه بين قانونه الخاص بزيادة مساحة الثقب الأسود وقانون الزيادة الحتمية لأنتروربية، لكنه أهمل هذا التشابه على أنه ليس أكثر من مجرد مصادفة. وفي النهاية، واعتماداً على قانونه (هوكنغ) الخاص بزيادة المساحة والنتائج الأخرى التي توصل إليها هو

وجيمس باردين، وبراندون كارتر، دفع هوكنغ بأنه إذا أخذ شخص التشابه بين قوانين الثقوب السوداء وقوانين الديناميكا الحرارية مأخذ الجد، فلن يكون مضطراً لتحديد مساحة أفق الحدث للثقب الأسود والأنتروبية، بل اتضح أنه لا بد أن يحدد كذلك "درجة حرارة" الثقب الأسود (باستخدام القيمة الدقيقة المعينة بواسطة شدة مجال جاذبية الثقب الأسود عند أفق الحدث الخاص به). غير أنه إذا كانت درجة حرارة الثقب الأسود ليست صغيرة – مهما كانت صغيرة – فإن المبادئ الأساسية والمستقرة تماماً في الفيزياء تتطلب أن يبعث الثقب بالإشعاعات مثل قضيب متوهج. غير أن الثقوب السوداء، كما يعرف ذلك كل إنسان، هي سوداء، ومن المفترض أنها لا تشع أي شيء. ولذلك اتفق هوكنغ ومعظم الآخرين على أن اقتراح بيكنشتاين مستبعد تحديداً. وبدلاً من ذلك كان هوكنغ على استعداد لتقبل فكرة أنه عندما تسقط مادة لها أنتروبية داخل الثقب الأسود فإن الأنترóبية تفقد بكل بساطة، الأمر الذي يتعارض تماماً مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

كان هذا هو الحال حتى اكتشف هوكنغ في العام 1974 بالفعل شيئاً مثيراً للغاية. أعلن هوكنغ أن الثقوب السوداء "ليست" سوداء تماماً. فإذا أهملنا ميكانيكا الكم ولجأنا إلى القوانين الكلاسيكية للنسبية العامة، فإن الثقوب السوداء لا تسمح بكل تأكيد لأي شيء بالهرب من قبضة جاذبيتها – حتى الضوء، وهو ما كان قد اكتشف أصلاً منذ ستة عقود مضت. لكن تضمين ميكانيكا الكم يعدل من هذه الاستنتاجات بشكل مدقٍ. وبالرغم من أنه لم يكن تحت تصرفه صورة من ميكانيكا الكم للنسبية العامة، إلا أن هوكنغ تمكّن من إنجاز اتحاد جزئي ببراعة بين هاتين الأداتين النظريتين، الأمر الذي أدى إلى بعض النتائج المحدودة لكنها يمكن الاعتماد عليها. وكانت أهم نتيجة توصل إليها هي أن الثقوب السوداء تبعث بالفعل بإشعاعات تبعاً لميكانيكا الكم.

كانت الحسابات طويلة وشاقة، لكن فكرة هوكنغ الأساسية كانت بسيطة. وقد رأينا أن مبدأ عدم التيقن يؤكّد أنه حتى فراغ الفضاء الحالي تملؤه جسيمات حقيقية تدور بهياج وتتناثر لحظياً إلى الوجود ثم يلاشي بعضها بعضاً. ويحدث هذا السلوك الكمي العجیاش أيضاً في منطقة الفضاء المجاورة تماماً لأفق حدث الثقب الأسود. وقد أیقن هوكنغ مع ذلك أن المقدمة الهائلة لجاذبية الثقب الأسود من الممكن أن تحقّن طاقة في زوج حقيقي من الفوتونات، فتبعدهما بعضهما عن بعض بدرجة كافية بحيث يُسحب أحدهما داخل الثقب. وحيث أن الفوتون الآخر قد فقد رفيقه في غياب الثقب، فلن يكون له رفيق يتلاشى معه. وبدلاً من ذلك

فإن هوكنغ قد أوضح أن الفوتون المتبقى يحصل على جرعة من الطاقة من قوى جاذبية الثقب الأسود في الوقت الذي يتهاوى شريكه داخل الثقب، الأمر الذي يدفع بالشريك الحر بعيداً عن الثقب الأسود. كما أيقن هوكنغ أنه إذا نظر شخص ما إلى الثقب الأسود من مسافة آمنة، فإن التأثير الكلي لانفصال زوج الفوتونات الحقيقي والذي يتكرر حدوثه مرات متتالية حول أفق الثقب الأسود، سيظهر لهذا الشخص كتياً مستمراً من إشعاعات منبعثة للخارج. إن الثقوب السوداء "تتوهج".

وأكثر من ذلك، استطاع هوكنغ أن يحسب درجة الحرارة التي يقدرها المشاهد من مسافة آمنة وترتبط بالإشعاع الصادر، وقد وجد أنها تتحدد بشدة مجال الجاذبية عند أفق الثقب الأسود، الأمر الذي يشابه تماماً العلاقة بين قوانين فيزياء الثقوب السوداء وقوانين الديناميكا الحرارية المقترحة من قبل⁽³⁾. لقد كان بيكنشتاين على حق: فقد بينت نتائج هوكنغ أن هذا التشابه لابد أن يؤخذ مأخذ الجد. وفي الحقيقة، بينت هذه النتائج أن الأمر أكثر من مجرد تشابه - إنه "تطابق". وللثقوب السوداء أنتروبيّة، ولها كذلك درجة حرارة. وقوانين الجاذبية في فيزياء الثقوب السوداء ليست إلا إعادة صياغة لقوانين الديناميكا الحرارية في ظروف جاذبية فائقة الغرابة. وكانت تلك قنبلة هوكنغ في العام 1974.

ولكي يكون لديك إحساس بالمقاييس المتنضمة، فقد اتضح أنه عندما يأخذ المرء كل التفاصيل في اعتباره بعينه، فإن للثقب الأسود ذي الكتلة الأكبر من كتلة الشمس ثلاط مرات درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق بحوالى جزء من مائة من المليون من الدرجة. إنها ليست صفرًا، لكنها قريبة جداً منه. فالثقوب السوداء ليست سوداء، لكنها تكاد تكون سوداء. ولسوء الحظ، فإن هذا الأمر يجعل انبعاث الإشعاعات من الصندوق الأسود شحيحاً جداً ومن المستحيل اكتشافه تجريبياً. ومع ذلك هناك استثناء. وقد بينت كذلك حسابات هوكنغ أنه كلما قلت كتلة الثقب الأسود زادت درجة حرارته وبالتالي زاد انبعاث الإشعاعات منه. فمثلاً، إذا كان الثقب الأسود في خفة كويكب صغير فإنه سيبعث بإشعاعات تعادل الإشعاعات الصادرة عن قنبلة هيdroجينية مقدارها مليون ميغا طن. وتكون هذه الإشعاعات مركزة في نطاق أشعة غاما من الطيف الكهرومغناطيسي. وقد جاب الفلكيون السماء بحثاً عن مثل هذه الإشعاعات، لكنهم، في ما عدا بعض الاحتمالات، خرجوا خلو اليدين، الأمر الذي يدل على أن مثل هذه الثقوب السوداء منخفضة الكتلة، إذا

(3) لا بد أن يكون الإشعاع المنطلق من الثقب السوداء مشابهاً لذلك المنطلق من فرن ساخن - المشكلة نفسها التي نقاشناها في مستهل الفصل الرابع، والتي لعبت دوراً حيوياً في تطوير ميكانيكا الكم.

ووجدت، فهي نادرة⁽⁴⁾. ويشير هوكنغ إلى ذلك مداعباً بقوله، إن هذا أمر ليس طيباً، لأنه إذا كانت إشعاعات الثقوب السوداء التي تنبأ بها أبحاثه من الممكن اكتشافها، فإنه بلا شك كان سيحصل على جائزة نوبل⁽⁵⁾.

وعلى النقيض من درجة حرارة الثقب الأسود الأقل من جزء من المليون من الدرجة، فإن حساب الأنتروربية لثقب أسود كتلته ثلاثة أضعاف كتلة الشمس، ستعطي قيمة هائلة بكل تأكيد: واحد متبعاً بـ 78 صفرآ! وكلما زادت كتلة الثقب زادت الأنتروربية. وقد أرسست نجاحات حسابات هوكنغ بلا نزاع أن هذا الأمر يعكس في الواقع الكمية الهائلة من عدم الترتيب المتضمنة داخل الثقوب السوداء.

لكن عدم ترتيب ماذا؟ فإن الثقوب السوداء، كما رأينا، تبدو أجساماً في غاية البساطة، فما هو مصدر عدم الترتيب الطاغي المذكور؟ وبالنسبة لهذا السؤال فإن حسابات هوكنغ لم تأت عليه بالمرة. ومن الممكن استخدام الدمج الجزئي للنسبية العامة وميكانيكا الكم الذي جاء به هوكنغ لإيجاد القيمة العددية لأنتروربية الثقب الأسود، من دون أن يقدم ذلك أي نظرة ثاقبة للمعنى المجهرى للثقب الأسود. وقد حاول بعض أعظم الفيزيائيين على مدى ربع قرن تقريباً، أن يفهموا أي الخواص المجهرية للثقوب السوداء يمكن أن تكون مسؤولة عن الأنتروربية. لكن، من دون مزاج تام بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة، ما كانت لتكتشف اللمحات الخافتة للإجابة عن هذا السؤال. لكن الغموض ما زال قائداً.

تاسعاً: الدخول إلى نظرية الأوتار

أو، أنها قامت بذلك حتى كانون الثاني / يناير 1996 عندما أرسل سترومنغر وفافا بحثاً للأرشيف الإلكتروني للفيزياء - اعتماداً على وجهات النظر السابقة لكل من ساسكيند وسین - بعنوان "الأصل المجهرى لأنتروربية بيكنشتاين - هوكنغ". استطاع سترومنغر وفافا في هذا البحث أن يستخدما نظرية الأوتار لتحديد المكونات المجهرية لنوع معين من الثقوب السوداء ويعحسبا بدقة الأنتروربية المصاحبة لها. وقد اعتمد بعدهما على مقدرة مكتشفة حديثاً ليدر كا جرئياً التقريرات الاضطرابية المستخدمة في فترة ثمانينيات وتسعينيات القرن العشرين. وقد جاءت

(4) يتضح أنه لأن الثقوب السوداء التي تتضمنها التحولات المخروطية الممزقة للفضاء هي طرفية، فإنها لا تشع تبعاً لهوكنغ، مهما كانت خفية.

(5) محاضرة ستيفن هوكنغ، في ندوة أمستردام حول الجاذبية والثقوب السوداء والأوتار، في 21 حزيران / يونيو 1996.

النتائج التي وجداها مطابقة بالضبط لما تنبأ به بيكنشتاين وهوكتنغ، مما أدى في النهاية إلى اكتمال الصورة التي كانت مرسومة جزئياً منذ أكثر من عقدين.

ركز سترومنغر وفافا على نوع من الثقوب السوداء يسمى "الثقوب السوداء المتطرفة" (Extremal). وهي ثقوب سوداء مشربة بشحنة - يمكن تخيلها على أنها شحنة كهربية - كما أن لها فوق ذلك أقل كتلة ممكنة تناسب الشحنة التي تحملها. وكما يمكن أن نرى من هذا التعريف، فهي قريبة الصلة بحالات BPS التي ناقشناها في الفصل 12. وفي الواقع، استغل سترومنغر وفافا هذا التمازن لأقصى درجة. وقد بينا أن في إمكانهما بناء ثقب سوداء متطرفة معينة - بالطبع نظرياً - بادئين بمجموعة معينة من BPS بران (ذات أبعاد محددة) وربطها بعضها بعض تبعاً لمخطط رياضي دقيق. وذلك بنفس الطريقة التي يمكن أن تبني بها الذرة - ومرة ثانية، نظرياً - وذلك بادئين بحزمة من الكواركات والإلكترونات ثم تظميها بدقة لنجعل على بروتونات ونيوترونات محاطة بإلكترونات في مدارات حولها. وقد بين سترومنغر وفافا كيف أن بعض المكونات المكتشفة حديثاً في نظرية الأوتار يمكن صهرها بعضها مع بعض لتعطي ثقباً سوداء معينة.

وفي الواقع، فإن الثقوب السوداء هي الناتج النهائي المحتمل لتطور النجوم. فبعد أن يستهلك النجم كل وقوده النووي خلال مليارات السنين من الاندماج الذري، لا تعود لديه المقدرة - الضغط الموجه للخارج - لمواجهة قوى الجاذبية الهائلة إلى الداخل. وفي ظل ظروف متباعدة يؤدي ذلك إلى انهيار كارثي إلى الداخل للنجم ذي الكتلة الهائلة، فينهار بعنف تحت تأثير وزنه الهائل مكوناً ثقباً أسود. وعلى العكس من هذه الوسائل الواقعية لتكوين الثقوب السوداء، فإن سترومنغر وفافا دافعاً عن فكرة "تصميم" الثقوب السوداء. وقد غيرا مفهوم تكوين الثقب الأسود رأساً على عقب وذلك بأن وضحا كيف أنه من الممكن بناؤه منهجياً - في خيال النظريين - عن طريق نسج تركيبة من الأغشية (بران) بدقة وعناية وبطء وحرفية شديدة معًا، تلك الأغشية التي انبثقت عن الثورة الثانية للأوتار الفائقة.

صارت مقدرة هذا المنطلق جلية في التو واللحظة. وتمكن سترومنغر وفافا بسهولة وبطريقة مباشرة من إحصاء عدد مرات إعادة ترتيب المكونات المجهرية للثقوب السوداء، التي لا تؤثر في الخواص المشاهدة، أي أن كتلتها وشحنات القوى تظل من دون تغير؛ وذلك بالاحفاظ على التحكم النظري الكامل في التركيب المجهي للثقب السوداء. وعندئذ يمكن مقارنة هذا العدد بمساحة أفق الثقب الأسود - الأنتروربية التي تنبأ بها بيكنشتاين وهوكتنغ. وقد وجدا توافقاً تماماً

بينهما. وعلى الأقل بالنسبة لنوع الثقوب السوداء المتطرفة فقد نجحا في استخدام نظرية الأوتار للتوصل إلى المحتويات المجهرية والأنثروبية المصاحبة لها بالضبط. وهكذا تم حل اللغز الذي استمر لربع قرن⁽⁶⁾.

يرى الكثيرون من منظري نظرية الأوتار في هذا النجاح دليلاً هاماً ومقنعاً مؤيداً للنظرية. وما زال فهمنا لنظرية الأوتار ليس من الدقة بحيث يمكننا من إجراء اتصال دقيق و مباشر مع المشاهدات التجريبية، مثل كتلة الكوارك أو كتلة الإلكترون. لكننا نرى الآن أن نظرية الأوتار قد زودتنا بأول تفسير أساسي لخاصية مستقرة من زمن طويل للثقوب السوداء أربكت الفيزيائيين الذين استخدمو النظريات المتفق عليها لسنوات عديدة. وترتبط هذه الخاصية بشدة بتنبؤات هوكنغ حول أنها لا بد من أن تبعث بإشعاعات، وهو التنبؤ الذي يمكن مبدئياً أن يخضع للقياس التجاري. ويطلب ذلك بالطبع أن نجد ثقباً أسود محدداً في السماء ثم نبني أجهزة حساسة لدرجة تتمكن بها من اكتشاف الإشعاعات التي يبعثها. فإذا كان الثقب الأسود خفيفاً بما فيه الكفاية، فإن الخطوة الأخيرة تكون في متناول التقانة الحالية. ومع أن هذا البرنامج التجاري لم يصبه النجاح بعد، إلا أنه يعيد التأكيد على أن الصدع القائم بين نظرية الأوتار والمقولات الفيزيائية المحددة عن العالم الطبيعي يمكن رأيه. وحتى شيلدون غلاشو - الخصم الأكبر لنظرية الأوتار خلال الثمانينيات من القرن العشرين - قد صرخ حديثاً "عندما يتكلم منظرو نظرية الأوتار على الثقوب السوداء فإنهم غالباً ما يتكلمون على ظاهرة يرونها - الأمرالمثير للإعجاب"⁽⁷⁾.

(6) وجده ستورونغر وفافا في حساباتها الأصلية أن الرياضيات تصبح أسهل في حالة العمل على خمسة - وليس أربعة - أبعاد زمكانية ممتدة. وللغرباء، وبعد الانتهاء من حسابهما لأنثروبية مثل هذا الثقب الأسود خماسي الأبعاد، فإنهما أيقنا أنه لم يحدث أن قام أي عالم نظري من قبل بتصميم مثل هذا الثقب الأسود خفيفاً بما فيه الكفاية. وحيث أنه فقط بمقارنة نتائجهما مع منطقة أفق الحدث لمثل هذا الثقب الأسود الافتراضي، يمكنهما التأكد منها، فإن ذلك مكتنها من تصميم مثل هذا الثقب الأسود خماسي الأبعاد رياضياً. وقد نجحوا في ذلك. وبذلك أصبح الأمر بسيطاً لإظهار أن حساب الأنثروبية بواسطة نظرية الأوتار المجهرية متطابق مع ما يتبناه هوكنغ تأسيساً على مساحة أفق الحدث للثقب الأسود. غير أنه من المثير أن تبيّن أنه لأن حل معضلة الثقب الأسود قد وجده بعد ذلك، فإن ستورونغر وفافا لم يعرقا بالجواب الذي كانا يستهدفانه عندما قاما بحساب الأنثروبية. ومنذ ذلك الوقت، نجح العديد من الباحثين، على رأسهم كورتيس كالان الفيزيائي من جامعة برنسون، في تطبيق حسابات الأنثروبية على النظم الأكثر ألفة ذات الأبعاد الأربع الزمكانية الممتدة، واتفق أن جميعها تتفق مع تنبؤات هوكنغ.

(7) مقابلة مع شيلدون غلاشو في 29 كانون الأول / ديسمبر 1997.

عاشرًا: الأسرار المتبقية للثقوب السوداء

وحتى بعد هذه التطورات المثيرة ما زال هناك سرائر أساسيات يكتفان الثقوب السوداء. الأول يختص بتأثير الثقوب السوداء في مفهوم الحتمية. أعلن عالم الرياضيات الفرنسي بيير-سيمون دي لا بلاس في بداية القرن التاسع عشر أكثر النتائج صرامة وتأثيراً لعلم الكون الذي يشبه الساعة ونتج من قوانين نيوتن للحركة:

الذكاء الذي يمكن أن يدرك في لحظة معينة كل القوى التي بها تحيا الطبيعة، والوضع المتعلق بذلك للકائنات التي تكونها، إذا كانت هذه المكونات من الكبر بحيث يمكن إخضاع بياناتها للتحليل، فإنه (الذكاء) يمكن أن يتضمن في نفس المعادلة حركات الأجسام الكبرى في الكون وحركات أخف الذرات كذلك. ولمثل هذا الذكاء لا يوجد شيء غير مؤكد، فالمستقبل مثل الماضي مفتوح على مصراعيه أمام عينه⁽⁸⁾.

وبمعنى آخر، إذا كنت في لحظة معينة تعرف موقع وسرعة كل جسيمة في الكون فمن الممكن أن تستخدم قوانين نيوتن للحركة لتحديد - على الأقل من ناحية المبدأ - مكانها وسرعاتها في آية لحظة من الماضي أو المستقبل. ومن هذا المنظور فإن كل وجميع الأحداث، من تكون الشمس إلى صلب المسيح، إلى حركة عينيك عبر هذه الكلمة، تأتي بصرامة نتيجة لموقع وسرعة المكونات المعينة في الكون منذ اللحظة الأولى بعد الانفجار الهائل. وتثير هذه النظرة الجامدة والمغلقة لحركة الكون كل أنواع المعضلات الفلسفية المحرجة التي تتعلق بحرية الإرادة، غير أن أهميتها تناقصت بشكل ملحوظ بعد اكتشاف ميكانيكا الكم. فقد رأينا أن مبدأ عدم اليقين لهيزنبرغ ينسف حتمية لا بلاس، لأننا في الأساس لا نستطيع تحديد موقع وسرعة مكونات الكون بالضبط. وبدلاً من ذلك، فإن دوال الموجات الكمية قد حلّت محل هذه الخواص الكلاسيكية، الأمر الذي يعني بأنه لا يوجد إلا احتمالات لتواجد جسيمة ما في أي مكان، أو لأن تكون لها سرعة ما كذلك.

غير أن سقوط رؤية لا بلاس لم يترك مفهوم الحتمية فاشلاً تماماً. فتطور الدلالات الموجية مع الزمن - احتمالات الموجات في ميكانيكا الكم - وفقاً

Pierre Simone Laplace, *Philosophical Essay on Probabilities = Essai Philosophique sur les Probabilités*, Sources in The History of Mathematics and Physical Sciences ; 13 , Translated from the Fifth French Edition of 1825, with Notes by Andrew I. Dale (New York: Springer-Verlag, 1995).

لقواعد رياضية صارمة، مثل معادلة شرودنغر (أو مقابلها النسبي مثل معادلة ديراك ومعادلة كلاين - غوردون). ويدلنا ذلك على أن الحتمية الكمية قد حل محل حتمية لابلاس الكلاسيكية: تسمح معرفة الدالات الموجية للمكونات الأساسية للكون في لحظة معينة من الزمن بوسيلة ذكية "بما فيه الكفاية" لتحديد الدالات الموجية في أي لحظة سابقة أو لاحقة. وتبتنا الحتمية الكمية أن احتمال حدوث أي حدث معين في لحظة مختارة من المستقبل يمكن "تحديده تماماً" بمعرفة الدالات الموجية في أي لحظة سابقة. تخفف السمة الاحتمالية لميكانيكا الكم بشكل ملحوظ من حتمية لابلاس وذلك بالإزاحة الضرورية من المخرجات إلى مخرجات مثيلات لها، علماً بأن الأخيرة تتحدد تماماً ضمن الإطار المتفق عليه لنظرية الكم.

أعلن هوكنغ في العام 1976 أنه حتى هذه الصيغة الحتمية المخففة قد انتهكت بوجود الثقوب السوداء. ومرة أخرى، فإن الحسابات التي وراء هذا الإعلان معقدة، لكن الفكرة الأساسية مباشرة بشكل معقول. فعندما يسقط أي شيء في الثقب الأسود، فإن دالة موجته هي الأخرى في الثقب. غير أن هذا يعني أن البحث لإيجاد دالات موجية لكل الزمن المستقبل لا يمكن أن يتم باستخدام الوسائل الذكية "بما فيه الكفاية" لأنها ستكون خادعة وغير قابلة للإصلاح. وللتنبؤ بالمستقبل كلية تحتاج إلى معرفة كل الدالات الموجية اليوم معرفة تامة. لكن إذا أفلتت بعض هذه الدالات في غياب الثقوب السوداء فإن المعلومات التي تحملها ستفقد.

ولأول وهلة، قد لا تثير التعقيديات الناشئة عن الثقوب السوداء القلق. فحيث أن كل شيء وراء أفق حدث الثقب الأسود قد انقطعت صلته تماماً بباقي الكون، ألا نستطيع بذلك أن نحمل أي شيء أسلقه سوء الحظ داخل الثقب الأسود؟ وعلاوة على ذلك، ومن وجهة نظر الفلسفة، ألا نستطيع القول بأن الكون لم يفقد في الواقع المعلومات التي حملتها تلك الأشياء التي سقطت داخل الثقب الأسود؛ فهي ببساطة قد حُبست في جزء من الفضاء الذي اخترنا نحن العقلاء أن نتجنبه بأي ثمن؟ وقبل أن يتحقق هوكنغ من أن الثقوب السوداء ليست سوداء تماماً، كان الجواب عن هذه الأسئلة سيكون نعم. لكن الرواية تغيرت بعد أن أخبر هوكنغ كل العالم بأن الثقوب السوداء تصدر إشعاعات. وحيث أن الإشعاع يحمل طاقة، والثقوب السوداء تصدر إشعاعات، لذا فإن كتلتها تتناقص ببطء - أي أنها تتبخّر ببطء. وعندما تفعل ذلك فإن المسافة من مركز الثقب إلى أفق الحدث ستقل ببطء وينكشف الغطاء ببطء وتعود المناطق التي كانت معزولة في السابق إلى ساحة الكون. وهنا فإن على تأملاتنا الفلسفية أن تواجه الموسيقى:

هل سنسترجع المعلومات المتضمنة في الأشياء التي ابتعلتها الثقوب السوداء عندما تتبخر تلك الثقوب - البيانات التي تخيلنا وجودها داخل الثقوب السوداء؟ وهذه هي المعلومات المطلوبة لصحة الحتمية الكمية، وهكذا فإن هذا السؤال يتعلق بجوهر حقيقة ما إذا كانت الثقوب السوداء تشغل تطور الكون بما هو أعمق من مجرد حدث معين.

وحتى كتابة هذا الكتاب لا يوجد هناك إجماع بين علماء الفيزياء حول الإجابة عن هذا السؤال. فقد زعم هوكنغ بقوة وعلى مدى سنوات عديدة أن المعلومات لا تسترجع - أي أن الثقوب السوداء تحطم المعلومات وبالتالي فإنها "تدخل مستوى جديداً من عدم التيقن في الفيزياء"، بالإضافة إلى عدم التيقن "المعروف المصاحب لنظرية الكم"⁽⁹⁾. وفي الحقيقة فإن هوكنغ وكيب ثورن من معهد تقانة كاليفورنيا، قد راهنا جون بريسكيل من معهد تقانة كاليفورنيا كذلك، بخصوص ما حدث للمعلومات التي اقتتنصها ثقب أسود: قال هوكنغ وثورن أن المعلومات قد فقيرة إلى الأبد، في ما اتخذ بريسكيل الموقف المضاد وراهن أن هذه المعلومات تعود مرة أخرى عندما تصدر الثقوب السوداء إشعاعات وتتقلص. أما الرهان فقد كان المعلومات نفسها: كان على الخاسر (أو الخاسرين) مكافأة الفائز (أو الفائزين) بأية موسوعة يختارها.

ظل الرهان قائماً من دون تسوية، لكن هوكنغ اعترف مؤخراً أن المفهوم المكتشف حديثاً للثقوب السوداء من نظرية الأوتار - كما شرحنا ذلك سابقاً - يظهر أنه ربما تكون هناك طريقة لاسترجاع تلك المعلومات⁽¹⁰⁾. وال فكرة الجديدة تتعلق بأن نوع الثقوب السوداء الذي درسه سترومنغر وفافاً، وعدد كبير آخر من الفيزيائيين، منذ صدور بحثهما الأصلي، يمكن أن يختزن المعلومات ويسترجعها من المكونات الغشائية "بران". وقد صرخ سترومنغر حديثاً بأن "هذه النظرية أدت إلى أن يرغب بعض منظري نظرية الأوتار في الزعم بأنهم قد انتصروا - يزعمون أن المعلومات تسترجع عندما تتبخر الثقوب السوداء. وفي اعتقادي أن هذه النتيجة سابقة لأوانها، فما زال هناك الكثير من الجهد بذله لنرى ما إذا كان هذا صحيحاً"⁽¹¹⁾. وفي نفس الوقت قال فافاً: "أنا لا أدرى بالنسبة لهذا

Stephen Hawking and Roger Penrose, *The Nature of Space and Time*, The Isaac Newton Institute Series of Lectures (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996), p. 41. (9)

(10) ستيفن هوكنغ، محاضرة في ندوة أمستردام حول الجاذبية والثقوب السوداء والأوتار في 21 حزيران/يونيو 1997.

(11) مقابلة مع أندرو سترومنغر في 29 كانون الأول/ديسمبر 1997.

السؤال - فمن الممكن لأي الاحتمالين أن يحدث⁽¹²⁾. وتعد الإجابة عن هذا السؤال الهدف المحوري للأبحاث الحالية. وكما قال هوكنغ:

يرغب معظم الفيزيائيين في الاعتقاد بأن هذه المعلومات لم تفقد، لأن ذلك سيجعل العالم آمناً يمكن التنبؤ بأحداثه. لكنني أعتقد أنه إذا أخذ المرء النسبية العامة لآينشتاين مأخذ الجد، فإن عليه أن يسمح بإمكانية أن ينطوي الزمكان على نفسه في عقد تخفي المعلومات داخل ثناياها. وتحديد ما إذا كانت هذه المعلومات تخفي بالفعل أم لا هو من الأسئلة الكبرى في الفيزياء النظرية اليوم⁽¹³⁾.

أما السر الثاني في الثقوب السوداء الذي لم يحل بعد، فإنه يتعلق بطبيعة الزمكان عند نقطة مركز الثقب⁽¹⁴⁾. وبين التطبيق المباشر للنسبية العامة الذي يرجع إلى شوارتزشایلد في العام 1916 أن الكتلة والطاقة الهائلتين ينسحقان معاً في مركز الثقب الأسود مما يسبب دمار نسيج الزمكان وأعوجاجاً جذرياً يحوله إلى حالة من التحدب اللانهائي - أي يتخلص بفعل فردية الزمكان. وما يستنتجه الفيزيائيون من ذلك هو أن المادة التي تعبر أفق الحدث تسحب بacrار إلى مركز الثقب الأسود، وهناك لن يكون لها مستقبل، ولذلك فإن الزمان نفسه ينتهي في قلب الثقب الأسود. أما الفيزيائيون الآخرون الذين درسوا على مدى سنوات طويلة خواص قلب الثقوب السوداء مستخدمين معادلات آينشتاين فقد كشفوا الاحتمال غير المعقول بأنه قد تكون هذه الثقوب بوابة لعالم آخر يرتبط بعالمنا برباط دقيق عن طريق مركز الثقوب السوداء فقط، وتقريراً عندما ينتهي الزمان في عالمنا يبدأ الزمان في العالم الآخر المرتبط به.

سنعرض لبعض التضمينات للاحتمالات المحيرة للذهن في الفصل التالي، أما الآن فإننا سنركز على نقطة مهمة. علينا أن نسترجع الدرس الرئيسي: فالكتلة التي في غاية الضخامة والحجم المتناهي الصغر تؤدي إلى كثافة من الارتفاع بحيث لا يمكن تصوّرها، مما يعطّل صلاحية جوهر استخدام نظرية آينشتاين الكلاسيكية، ويطلب أن نحشد ميكانيكا الكم في هذا الشأن. ويؤدي بنا ذلك إلى التساؤل، ما الذي تقوله نظرية الأوتار عن تفرد الزمكان في مركز ثقب أسود؟ وهو

(12) مقابلة مع كومرون فافا في 12 كانون الثاني / يناير 1998.

(13) ستيفن هوكنغ، محاضرة في ندوة أمستدام حول الجاذبية والثقوب السوداء في 21 حزيران / يونيو 1998.

(14) يتعلق هذا الموضوع بشكل ما بمسألة فقد المعلومات، كما افترض بعض الفيزيائيين على مر السنين بأنه يمكن أن توجد "كتلة" مدفونة في عمق الثقب الأسود تخزن فيها كل المعلومات التي جاءت بها المادة التي اصطادها الثقب الأسود.

موضوع البحوث المكشفة في الوقت الحالي، لكنه مثل السؤال حول فقد المعلومات، هو أيضاً لم تستقر الإجابة عنه بعد. وتتعرض نظرية الأوتار ببراعة لمجموعة أخرى من التفردات - تمزقات وتشققات الفضاء التي نوقشت في الفصل 11 وفي الجزء الأول من الفصل الحالي⁽¹⁵⁾. لكنك إذا شاهدت تفرداً واحداً فإن ذلك "لا يعني" أنك قد شاهدت كل التفردات. ويمكن لنسيج كوننا أن يتشقق ويتبقب ويتمزق بطرق كثيرة و مختلفة. وقد أمدتنا نظرية الأوتار بصيرة عظيمة لبعض هذه التفردات، لكن هناك تفردات أخرى راوغت منظري نظرية الأوتار ومنها تفرد الثقوب السوداء، ومرة أخرى، فإن السبب الرئيسي في ذلك هو الاعتماد على الأدوات الاضطرابية في نظرية الأوتار، التي تؤدي تقريباتها، في هذه الحالة، إلى حجب مقدرتنا على تحليل ما يحدث في نقاط العمق الداخلي للثقب الأسود بشكل كلي يمكن الاعتماد عليه.

وعلى كلٍّ، وبعد التقدم الحديث الهائل في الطرق اللااضطرابية واستخدامها بنجاح في دراسة سمات أخرى للثقوب السوداء، فقد أصبح لمنظري نظرية الأوتار آمال عريضة في أنه لن يمضي وقت طويل قبل الكشف عن الأسرار الكامنة في مركز الثقوب السوداء.

(15) في الحقيقة، إن التحولات المخروطية الممزقة للفضاء التي ناقشناها في هذا الفصل تتضمن الثقوب السوداء، وعليه فإنها يمكن أن ترتبط بمسألة تفردتها. ولنسترجع تمزق المخروط الذي يحدث عندما يفقد الثقب الأسود كل كتلته، وبذلك فإنه لا يرتبط مباشرة بالمسألة المتعلقة بتفرد الثقب الأسود.

الفصل الرابع عشر

تأملات في علم الكون

كان هناك دافع متقد للبشرية طوال التاريخ نحو فهم أصل الكون. وربما لم يكن هناك سؤال مفرد آخر قد ألهم خيال أسلافنا القدامى وكذلك أبحاث علماء الكوسمولوجيا (علم الكون) المعاصرین عبر مختلف الثقافات والعصور. وهناك في الأعمق كانت تكمن رغبة جماعية لتفسير سبب وجود العالم، وكيف اتخذ شكله الذي نراه الآن، وما هو المنطق - المبدأ - الذي يقوده في تطوره. والأمر المثير هو أن البشرية قد توصلت الآن إلى نقطة عندها ينبعث إطار للإجابة علمياً عن بعض هذه الأسئلة.

وتعلن النظرية العلمية المقبولة حالياً لخلق الكون أنه قد عانى ظروفاً قصوى - طاقة ودرجة حرارة وكثافة هائلة - في لحظاته الأولى. وتتطلب هذه الظروف، كما هو معروف الآن، أن نأخذ في الاعتبار كلاً من ميكانيكا الكم والجاذبية، وبالتالي فإن ميلاد الكون يقدم لنا ساحة عظيمة للتعبير في نظرية الأوتار الفائقة. وستناقش هذا الفكر الوليد حالاً، لكن لنستعد بياجاز قصة الكون ما قبل نظرية الأوتار، التي كان يشار إليها عادة باسم النموذج القياسي للكوسمولوجيا (أو علم الكون).

أولاً: النموذج القياسي للكوسمولوجيا، أو علم الكون

يرجع ظهور النظرية الحديثة لأصل الكون لعقد ونصف بعد اكمال النسبية العامة لآينشتاين. ومع أن آينشتاين قد رفض أن يعطي نظريته قيمة الحقيقة ويواافق أنها تتضمن أن الكون ليس أبداً ولا ساكناً، غير أن ألكسندر فريدمان قد فعل ذلك. وكما ناقشنا في الفصل الثالث، فإن فريدمان قد وجد ما هو معروف الآن بأنه حل معادلات آينشتاين عن طريق الانفجار الهائل - وهو الحل الذي يعلن أن الكون قد انبعث عن حالة انضغاط لانهائية، وهو الآن في حالة تمدد بعد هذا الانفجار الأولي. كان آينشتاين على يقين لدرجة أنه نشر مقالاً قصيراً معلناً أن مثل هذه الحلول المتضمنة للتغيرات الزمنية ليست نتيجة لنظريته، وزعم أن هناك

خطأ فاتلاً في بحث فريدمان. إلا أنه بعد مرور ثمانية أشهر نجح فريدمان في إقناع آينشتاين بعدم وجود أخطاء، الأمر الذي جعل آينشتاين يسحب اعتراضه علينا لكن بأدب مصطنع. ومع ذلك، من الواضح أن آينشتاين لم يقتنع تماماً بأن نتائج فريدمان لها أية علاقة بالكون. غير أنه بعد حوالي خمس سنوات من ذلك، وبناء على مشاهدات هابل التفصيلية للعشرين من المجرات بواسطة تلسكوب ذي مرآة مئتي بوصة من مرصد ماونت ويلسون (Mount Wilson) فقد تأكد بما لا يدع مجالاً للشك أن العالم في حالة تمدد. وقد تمت إعادة صياغة أبحاث فريدمان بطريقة أكثر منهجية وكفاءة بواسطة الفيزيائيين هوارد روبرتسون وأرثر ووكر وهي ما زالت تشكل أساس الكosموлогيا الحديثة.

وبشيء أكثر من التفصيل فإن النظرية الحديثة عن أصل الكون تبدو كما يلي. منذ حوالي 15 مليار سنة انبعث الكون من حدث طاقيٌ فريد هائل، لفظ كل الفضاء والمادة. (وليس عليك أن تبحث بعيداً عن موقع حدوث الانفجار الهائل، لأنه حدث في الموقع الذي أنت فيه وفي كل مكان آخر، ففي البداية كانت كل المواقع التي نراها منفصلة الآن، كانت "نفس" المكان). كانت درجة حرارة الكون بعد 43 10 ثانية على حدوث الانفجار الهائل، وهي اللحظة التي أطلق عليها "زمن بلانك"، قد حسبت ووجدت حوالي 32 10 كلفن، أي أنها أسرخ بمقدار 10 تريليون تريليون مرة من أعمق مكان داخل الشمس. وبمرور الزمن تمدد الكون وأصبح أبرد، وأثناء ذلك بدأت المادة الكونية من البلازم الأولية المتجانسة والمتوهجة تشكل دوامات وتجمعات. وبعد حوالي جزء من مائة ألف جزء من الثانية تقريباً بعد الانفجار الهائل أصبحت الأشياء باردة بما يكفي (حوالي 10 تريليون كلفن - مليون مرة أسرخ من جوف الشمس) لتتجمع الكواركات معاً في مجموعات من ثلاثة، مكونة البروتونات والنيترونات. وبعد حوالي جزء من مائة من الثانية أصبحت الأمور صالحة لتكوين أنوية بعض أخف العناصر في الجدول الدوري لتبدأ في التجمد من بلازما الجسيمات التي تبرد. وخلال الدقائق الثلاث التالية، وعندما برد الكون الملتهب إلى حوالي مليار درجة، فإن الأنوية السائدة والتي انبثقت كانت أنوية الهيدروجين والهيليوم، مع كميات ضئيلة من الديوتيريوم (الهيدروجين "الثقيل") والليثيوم. وتعرف هذه الفترة باسم "التخليق النووي البدائي" (Primordial Nucleosynthesis).

ولم يحدث الكثير في المائة ألف عام التي تلت ذلك أكثر من استمرار التمدد والتبريد. غير أنه عندما انخفضت درجة الحرارة إلى بضع ألوف من الدرجات، أخذت الإلكترونات المتدفعه بلا نظام تتطابقاً للدرجة التي تمكنت عندها الأنوية

الذرية، غالباً الهيدروجين والهليوم، من اقتناصها لتكون أول الذرات المتعادلة كهربياً. كانت تلك اللحظة محورية: ومنذ تلك اللحظة أصبح العالم شفافاً على جميع المستويات. وقبل عصر اقتناص الإلكترونات كان الكون مليئاً بيلازما كثيفة من جسيمات مشحونة كهربياً - بعضها شحنته موجبة مثل الأنوية، بينما الأخرى لها شحنة سالبة مثل الإلكترونات. كانت الفوتونات المثاررة، التي لا تتدخل إلا مع الجسيمات المشحونة، تسحب بإصرار بواسطة الكتلة الكثيفة للجسيمات المشحونة، فلا تستطيع أن تنتقل إلا لمسافات ضئيلة جداً قبل أن تنحرف أو تمتضى. جعل حاجز الجسيمات المشحونة أمام الحركة الحرة للفوتونات الكون يبدو وكأنه معتم تماماً على الأغلب، تماماً مثل ما يمكن مشاهدته صباح يوم كثيف الضباب أو أثناء عاصفة ثلجية كثيفة جداً. غير أنه عندما دخلت الإلكترونات سالبة الشحنة في مداراتها حول الأنوية موجبة الشحنة مكونة ذرات متعادلة كهربياً، اختفى المانع المشحون وانقضع الضباب الكثيف. ومنذ تلك اللحظة أصبحت الفوتونات الناتجة عن الانفجار الهائل تنتقل من دون أية معوقات، وأصبحت تتضخ رؤية كل مدى الكون تدريجياً.

وبعد حوالي مليار سنة أخرى، وبعد أن هدا الكون بصورة محسوسة من البداية المجنونة، بدأت تنبثق المجرات والنجوم، وفي النهاية الكواكب كمجموعات للعناصر البدائية مرتبطة بواسطة الجاذبية. واليوم، وبعد ما يقرب من 15 مليار سنة من الانفجار الهائل يمكننا أن نبني دهشتنا بكل من عظمة الكون ومقدرتنا الجماعية على أن نجمع معاً نظرية منطقية من السهل اختبارها عن أصل الكون. لكن، إلى أي مدى يمكن أن نثق "حقيقة" في نظرية الانفجار الهائل؟

ثانياً: اختبار الانفجار الهائل

عندما ينظر الفلكيون في الكون بواسطة أقوى تلسكوباتهم، فإنهم يستطيعون أن يروا الضوء الذي انبعث من المجرات والكوازارات (Quasars) بعد بضعة مليارات من السنين منذ لحظة الانفجار الهائل. ويمكنهم ذلك من التحقق من تمدد الكون الذي تبأت به نظرية الانفجار الهائل في هذا الطور المبكر من الكون، ومن أن كل الأمور كما تنبأوا بها. ولاختبار النظرية في أزمنة سابقة على ذلك فعلى الفيزيائيين والفلكيين أن يستخدموا طرقاً أخرى غير مباشرة. وتتضمن إحدى هذه الطرق الأكثر دقة ما يعرف باسم الخلية الإشعاعية للكون.

إذا لمست بيديك إطار دراجة مباشرة بعد ملئه بالهواء بشدة فستشعر بأنه دافع الملمس. تحول بعض الطاقة التي أنفقتها في حركة ضخ الهواء إلى زيادة في درجة

حرارة الهواء داخل الإطار. ويعكس ذلك مبدأً عاماً: في ظروف مختلفة وعندما تضغط الأشياء، فإنها تسخن. والعكس صحيح، فعندما يسمح للأشياء أن تمدد فإنها تبرد. وتعتمد أجهزة التكييف والثلاجات على هذه المبادئ، فإذا عرّضنا مواد مثل الفريون إلى دورات من الانضغاط والتمدد المتكررة (وبالمثل البحر والتكييف) يحدث سريان للحرارة في الاتجاه المرغوب. ومع أن هذه حقائق بسيطة من حفائق الفيزياء الأرضية، فقد اتضح أن لها وجوداً مدوياً في الكون ككل.

وقد رأينا في ما سبق أن الإلكترونات والأنيونات بعد أن ترتبط معاً لتكون الذرات، فإن الفوتونات تصبح حرة في الانتقال من دون عائق خلال الكون. ويعني ذلك أن الكون مملوء "غاز" من الفوتونات التي تنتقل في جميع الاتجاهات وتتوزع بتجانس في جميع أنحاء الكون. وعندما يتمدد الكون، يتمدد كذلك هذا التيار من غاز الفوتونات الحرة، لأنه في الأساس يعتبر الكون وعاء لها. وتماماً كما تنخفض درجة حرارة غاز مألف (مثل الهواء في إطار دراجة) بالتمدد، كذلك تنخفض درجة حرارة غاز الفوتونات عندما يتمدد الكون. وفي الحقيقة أيدن الفيزيائيون منذ زمن بعيد - جورج غامو وتلاميذه رالف ألفر وروبرت هيرمان في خمسينيات القرن العشرين، وروبرت دايك وجيم بيلس في منتصف ستينيات القرن العشرين - أن الكون اليوم لا بد أن يكون منفذًا لفيض متجانس من هذه الفوتونات البدائية، التي بردت عبر الخمس عشرة مليار سنة الماضية من عمر تمدد الكون إلى بعض درجات فوق الصفر المطلق⁽¹⁾. في عام 1965 أنجز آرنو بنزياس وروبرت ويلسون من معامل بل بنويجرسي، عن طريق الصدفة، واحداً من أهم الاكتشافات في عصرنا، وذلك عندما اكتشفوا التوهج الذي تبع الانفجار الهائل بينما كانوا يعملان في ثبيت هوائي لاستخدامه في الاتصال بالأقمار الصناعية. قامت البحوث التي تلت ذلك بتتفقح كل من النظرية والتجربة، ووصلت إلى ذروة COBE Cosmic Background Explorer (NASA في أوائل تسعينيات القرن العشرين. وقد أكد الفيزيائيون والفلكيون بدرجة عالية من الدقة أن الكون مملوء بإشعاعات ميكروية، وذلك باستخدام هذه البيانات، (لو كانت علينا حساسة للموجات الميكروية لكننا شاهدنا وهجاً منتشرأً في كل العالم من حولنا) درجة حرارتها حوالي 2.7 درجة

(1) بصورة أكثر دقة، فإن الكون لا بد أن يكون مليئاً بالفوتونات الناتجة من الإشعاع الحراري المنبعث من جسم له القدرة على امتصاص الإشعاعات تماماً - "جسم أسود" في لغة الديناميكية الحرارية - في تواافق مع مدى درجة الحرارة. وهذا نفس طيف الإشعاع المنبعث بواسطة الثقوب السوداء تبعاً لميكانيكا الكم كما فسره هوكنغ، أو المنبعث من فرن ساخن كما وضحه بلانك.

فوق الصفر المطلق، الأمر الذي ينطبق تماماً مع توقعات نظرية الانفجار الهائل. وللتعمير عن ذلك بدقة فإن كل متر مكعب من الكون - بما في ذلك الحيز الذي تشغله أنت الآن - يحتوي في المتوسط على حوالي 400 مليون فوتون، تكون مجتمعة في المحيط الكوني الشاسع للإشعاعات الميكروية، الذي يمثل صدى لحظة الخلق. وعندما تفصل كابل الاتصال عن طريق التليفزيون لتحوله إلى محطة قد أنهت إرسالها، فإن ما تشاهده مما يشبه الثلج على شاشة التليفزيون، ما هو في الواقع إلا الإشعاع الخافت المتبقى منذ لحظة الانفجار الهائل. ويؤكد هذا التوافق بين النظرية والتجربة صورة الانفجار الهائل للكون منذ اللحظة الأولى لتحرك الفوتونات بحرية عبر الكون، حوالي بضع مئات الألوف من السنين بعد الانفجار، وتكتب اختصاراً ATB أي After The Bang .

هل نستطيع أن نجري اختباراتنا على نظرية الانفجار الهائل في أزمنة سابقة على ذلك؟ نعم نستطيع ذلك. فباستخدام المبادئ القياسية للنظرية النووية وللديناميكا الحرارية يستطيع الفيزيائيون التوصل إلى تنبؤات محددة حول الانتشار النسبي للعناصر الخفيفة التي أنتجت أثناء فترة تخلق الأنوية البدائية، أي بين جزء من مائة من الثانية وبضع دقائق بعد الانفجار ATB . وتبعاً للنظرية مثلاً، فإن حوالي 23٪ من الكون لا بد أن يتكون من الهليوم. وبقياس انتشار الهليوم في النجوم والسدوم وقع الفلكيون على دعم مؤثر، وبالفعل كان تنبؤهم في محله تماماً. وربما كان التنبؤ الأكثر دوياً هو التأكيد من نسبة انتشار الديوتيريوم، حيث إنه لا توجد في الأساس أية عملية فيزيائية فلكية سوى الانفجار الهائل يمكن أن يتحدد بها الوجود الضئيل لكن المؤكد في الكون. وتمثل التأكيدات لانتشار الهليوم والديوتيريوم، والليثيوم حديثاً، اختباراً حساساً لفهمنا لفيزياء الكون المبكر في أزمنة التخلق البدائي لها.

إن هذا شيء مؤثر بدرجة تدعوه للزهو. فكل البيانات التي نملكتها تؤكد أن نظرية الكوسموLOGIA قادرة على وصف العالم منذ جزء من المائة من الثانية ATB وحتى الآن، أي على مدى 15 مليار سنة. إلا أنه يجب ألا يغفل المرءحقيقة أن العالم حديث الولادة قد تطور بسرعة مذهلة. والكسور الضئيلة من الثانية الواحدة - الكسور الأقل "كثيراً" من جزء من المائة من الثانية - تشكل عصوراً كونية تشكلت خلالها سمات للعالم دامت بعد ذلك طويلاً. وهكذا، واصل الفيزيائيون الضغط محاولين تفسير الكون في أزمنة أبعد وأبعد (أقرب إلى لحظة الانفجار). وحيث أن الكون يصير أصغر وأسخن وأكثر كلما اتجهنا نحوه لحظة الانفجار الهائل، فإن الوصف الكمي الدقيق للمادة والقوى يصبح أكثر أهمية. وكما رأينا

من وجهات نظر أخرى في الفصول السابقة، فإن نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة صالحة حتى تصبح طاقة الجسيمات حوالي طاقة بلانك. وفي مفهوم كوني، يحدث ذلك عندما يصبح كل الكون المعروف في حجم مضخة لها حجم بلانك، الأمر الذي يؤدي إلى كثافة في غاية الارتفاع لدرجة أنها تستعصي على مقدرتنا في إيجاد استعارة أو تشبيه لها: كانت كثافة الكون في زمن بلانك ببساطة جباره. وفي ظروف مثل تلك الطاقة والكتافة الهائلة، لا يمكن التعامل مع الجاذبية وميكانيكا الكم كأمرین منفصلین كما في حالة نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة. وبدلاً من ذلك، فإن الرسالة الرئيسية لهذا الكتاب هي أنه عند هذه الطاقة وما فوقها لا بد من اللجوء لنظرية الأوتار. وبمصطلاح وقتی، فنحن نتعامل مع هذه الطاقات والكتافات عندما نختبر أزمنة سابقة لزمن بلانك، أي أقل من $^{43} 10$ ثانية ATB، وبذلك فإن هذا العصر المبكر هو الساحة الكونية لنظرية الأوتار.

ثالثاً: من زمن بلانك وحتى جزء من المائة من الثانية بعده

فلنذكر أن القوى الثلاث اللاجاذبية تبدو أنها تمتزج بعضها بعض في البيئة الساخنة جداً للكون المبكر، وذلك بالعودة إلى الفصل السابع (وبالخصوص الشكل رقم (1-7)). وتبيّن حسابات الفيزيائيين عن كيفية تغير شدة هذه القوى مع الطاقة ودرجة الحرارة، أنه قبل حوالي $^{35} 10$ ثانية ATB، كانت القوى القوية والقوى الضعيفة والكهرومغناطيسية كلها موحدة في "قوة عظيمة" أو "قوة فائقة". وفي هذه الحالة كان الكون أكثر تنازلاً بكثير مما هو عليه اليوم. ومثل التجانس الذي يحدث عندما نسخن مجموعة من الفلزات المختلفة لتتحول إلى مصهور سائل، فإن الاختلافات الملحوظة بين القوى كما نراها الآن كانت غير موجودة بسبب الطاقة ودرجة الحرارة الهائلتين في الكون المبكر جداً. وبمرور الوقت وتمدد الكون وتبریده، فإن صياغة نظرية مجال الكم تبيّن أن هذا التنازل كان لا بد أن يقل بحدة من خلال عدد من الخطوات الفجائية، مؤدية في النهاية إلى شكل غير متناظر بالمقارنة بما هو مألوف لنا.

وليس من الصعب إدراك الفيزياء التي تكمّن وراء مثل هذا الاختزال للتناول، أو كما يطلق عليه "انكسار التنازل" "Symmetry Breaking" بدقة أكثر. تخيل وعاء ضخماً مملوءاً بالماء. تتوزع جزيئات الماء بتتجانس في جميع أرجاء الوعاء، وبصرف النظر عن الزاوية التي ننظر منها فإن الماء سيظهر كما هو. ثم تابع وعاء الماء عند خفض درجة الحرارة. في البداية لن يحدث شيء، لكن على المستوى المجهري فإن متوسط سرعة حركة جزيئات الماء يتناقص، وهذا كل ما يحدث.

وعندما تنخفض درجة الحرارة إلى درجة الصفر السلزي^(*)، فإن شيئاً جذرياً سيحدث. سيبدأ الماء السائل في التجمد ويتحول إلى ثلج جامد. وكما ناقشنا في الفصل السابق، فإن هذا مثال للتحول الطوري. وأهم ما يعنيه الآن هو ملاحظة أن التحول الطوري يؤدي إلى انخفاض مقدار التناظر لجزيئات الماء. في بينما يبدو الماء السائل على نفس الشكل مهما تغيرت زاوية الرؤية - فهو يبدو متاناً دورانياً - لكن الثلج الجامد مختلف. فللثلج بنية بلورية، الأمر الذي يعني أنك إذا اختبرته بدقة معقولة، فإنه مثله مثل أية بلورة، سيبدو مختلفاً إذا نظرت إليه من زوايا مختلفة. وقد أدى التحول الطوري إلى نقص في مقدار التناظر الدوراني الظاهري.

ومع أننا قد ناقشنا مثلاً واحداً مألوفاً فقط، فإن هذا الأمر صحيح بشكل أكثر عمومية: عندما تنخفض درجة حرارة الكثير من الأنظمة الفيزيائية، فإنها ستتعاني تحولاً طورياً عند درجة معينة، وهو التحول الذي سيؤدي نمطياً إلى خفض أو "كسر" بعض التنازرات السابقة. وفي الواقع يمكن للنظام أن يعاني سلسلة من التحولات الطورية إذا تغيرت درجة حرارته في مدى واسع بما فيه الكفاية. فالماء - مرة ثانية - يعطي مثلاً بسيطاً على ذلك. فإذا بدأنا بالماء في درجة حرارة أعلى من 100 سلزية، فسيكون في هذه الحالة غازاً أو بخاراً. وفي هذا الشكل فإن للنظام تنازاً أكبر من الحالة السائلة، حيث أن الجزيئات المستقلة قد تحررت من حالة الالتصاق بعضها البعض في الحالة السائلة. وبدلاً من ذلك فإن كل الجزيئات ستدور في جميع الاتجاهات داخل الوعاء بنفس الدرجة، من دون أن تكون تجمعات "مختراء" أو مجموعات من الجزيئات المفردة التي تنتهي بعضها البعض لتكون ترابطاً قوياً على حساب المجموعات الأخرى. وتسود ديمقراطية الجزيئات في درجات الحرارة المرتفعة بما فيه الكفاية. ومن الطبيعي أنه عند خفض درجة الحرارة أقل من 100 سلزية تبدأ قطرات من الماء السائل في التكون أثناء العبور من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة، ويتناقض التنازلي. وباستمرار خفض درجة الحرارة يحدث شيء جوهري حتى نصل إلى درجة الصفر السلزي. وكما ذكرنا أعلاه، فإنه عند هذه الدرجة سيحدث التحول الطوري ماء سائل/ثلج جامد، الذي سيؤدي إلى تناقض آخر مفاجئ في التنازلي.

ويعتقد الفيزيائيون أن الكون في ما بين زمن بلانك وجزء من المائة من الثانية ATB، قد سلك مسلكاً مشابهاً، ماراً على الأقل بتحولين طوريين مشابهين لمثال الماء. فعند درجة حرارة أعلى من 10^{28} كلفن، تبدو القوى اللاجاذبية الثلاث كقوة

(*) نسبة إلى سليوس الذي اخترع ميزان الحرارة المثلوية (المترجم والمراجع).

واحدة، ومتناولة كما يمكن للتناظر أن يكون. (وستناقش في نهاية هذا الفصل تضمين نظرية الأوتار لقوى الجاذبية في هذا التجمع عند تلك الدرجات المرتفعة من الحرارة). وعندها تنخفض درجة الحرارة عن 10^{28} كلفن، يمر الكون بتحول طوري، حيث تتبلور كل قوة من القوى الثلاث خارجة من الاتحاد المشترك بطريقه مختلفة. ويبداً هذا الاختلاف النسبي في الشدة وتفاصيل تأثير كل منها على المادة في التمايز. وهكذا فإن التناول الواضح بين هذه القوى عند درجات الحرارة العالية ينكسر عندما يبرد الكون. ومع ذلك، فقد بينت أبحاث غلاشو عبد السلام ووبنبرغ⁽²⁾ أنه ليست كل تناولات درجات الحرارة العالية قد تلائمت: فما زالت القوى الضعيفة والقوى الكهرومغناطيسية متشابكة بشكل عميق. وبتوالي تمدد وتبريد الكون، لا شيء يحدث ظاهرياً حتى تنخفض درجة الحرارة إلى 10^{15} كلفن – حوالي 100 مليون مرة مثل درجة حرارة قلب الشمس – حيث يمر الكون بتحول طوري آخر يؤثر على القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة. وعند هذه الدرجة يتبلوران خارجين من اتحادهما السابق الأكثر تناولاً. وباستمرار التبريد يزداد الاختلاف بينهما. ويُعد التحولان الطوريان مسؤولين عن التمايز الظاهر بين القوى اللاجاذبية الثلاث أثناء تأثيرها في أحداث العالم، ومع ذلك فإن هذا العرض الموجز لتاريخ الكون يبين أن تلك القوى مرتبطة بعمق بعضها مع بعض في الواقع.

رابعاً: الأحجية الكوسمولوجيا (الكونية)

تقدّم الكوسمولوجيا لعصر ما بعد بلانك إطاراً أنيقاً ومتاماً من الممكن تتبعه حسابياً لفهم الكون منذ أدق اللحظات بعد الانفجار الهائل. لكن وكما هو الحال في معظم النظريات الناجحة، فإن بصيرتنا الجديدة ما زالت تثير المزيد من الأسئلة التفصيلية. وكما اتضح فإن بعض هذه الأسئلة لن تلغى السيناريو الكوني القياسي كما هو معروف الآن، إلا أنها تلقى الضوء على بعض الموضوعات الشائكة التي تشير إلى الحاجة إلى نظرية أكثر عمقاً. ولنركز على واحد من هذه الأسئلة، وهو ما يسمى بمعضلة الأفق Horizon Problem، وهي واحدة من أكثر الموضوعات أهمية في الكوسمولوجيا الحديثة.

بيّنت الدراسات التفصيلية للخلفية الإشعاعية الكونية أنه من دون النظر لأي اتجاه يُوجه إليه الهوائي الذي يقيس الإشعاع في السماء، فإن درجة حرارة الإشعاع كانت متطابقة في حدود جزء من 100000 جزء. وإذا فكرت في ذلك ولو للحظة

(2) انظر الفصل الخامس من هذا الكتاب.

قصيرة فستدرك أن هذا الأمر غريب تماماً. فكيف يتأتى لموقع مختلفة من الكون بعد بعضها عن بعض مسافات شاسعة نفس درجة الحرارة المتطابقة إلى هذه الدرجة من الدقة؟ والحل الطبيعي لمثل هذه الأحجية هو ملاحظة ما يلى. أجل، فإن مكانيين متضادين قطرياً في السماء بعيدان تماماً أحدهما عن الآخر الآن، إلا أنهما كتوأم انفصلا عند الولادة أثناء اللحظات المبكرة الأولى للكون، (وكل شيء أيضاً) كانا قريبين جداً أحدهما من الآخر. وحيث أنهما قد انبثقا من نقطة مشتركة، فإنه قد يقول إنه ليس غريباً على الإطلاق أن يقتسمما صفات مشتركة عامة مثل درجة الحرارة. ويفشل هذا الأمر في تفسير الانفجار الهائل القياسي في الكوسموLOGيا. وهنا سنذكر السبب في ذلك، يبرد وعاء الحسأة تدريجياً إلى أن يصل إلى درجة حرارة الغرفة لأنه في تماس مع الوسط المحيط الأبرد. فإذا انتظرت ما فيه الكفاية، فإن درجة حرارة الحسأة والهواء المحيط تتساوى من خلال تلامسهما المتبدال. فإذا وضعت الحسأة في ترموس فمن الطبيعي أنه سيحتفظ بحرارته لفترة أطول لأن التلامس أصبح أقل كثيراً مع الوسط المحيط. ويعكس ذلك أن التجانس في درجة الحرارة بين الجسمين يتوقف على الاتصال المستمر بلا عوائق. وحتى نختبر مقوله أن الواقع المنفصلة الآن بمسافات شاسعة من المكان لها نفس درجة الحرارة بسبب تماستها الأصلية، فإن علينا أن نختبر صحة تبادل المعلومات بينها في الكون المبكر. وفي البداية قد تعتقد أن الواقع كانت قريبة بعضها من بعض في الأزمنة المبكرة، ولذا كان الاتصال أسهل وأسهل. غير أن التقارب المكاني جزء واحد فقط من الرواية، أما الجزء الآخر فهو الفترة الزمنية لهذا التقارب.

وحتى نختبر هذا الأمر بشكل أشمل، فلتتصور أننا ندرس شريط سينمائياً لتتمدد الكون، لكن دعنا نراه في الاتجاه العكسي بأن ندير الشريط في الاتجاه العكسي للزمن بدءاً من اليوم ومتوجهين إلى لحظة الانفجار الهائل. وحيث أن سرعة الضوء تحدد سرعة أي إشارة أو معلومة من أي نوع أثناء انتقالها، فإن المادة في منطقتين من الفضاء تتبادل الطاقة الحرارية، وهكذا فإن أمامها فرصة تساوي درجة الحرارة فقط إذا كانت المسافة بينهما عند لحظة معينة أقل من المسافة التي قطعها الضوء منذ لحظة الانفجار الهائل. وهكذا، وعند استرجاع الشريط في الاتجاه العكسي من الزمن، سنرى تناقضاً بين مدى اقتراب المناطق الفضائية ومدى الزمن الذي ستقطعه في الاتجاه المضاد بالنسبة لهما ليصبحا في موقعهما. فمثلاً، وحتى تصير مسافة الفصل بين الموقعين الفضائيين 186000 ميل، فإن علينا أن نعيد الشريط إلى الخلف إلى زمن أقل من ثانية واحدة ATB، وحتى عندما يصيران على مسافة أقرب من هذه ، فإنهما ما زالا لا يؤثران بأي شكل بعضهما

في البعض، حيث أن الضوء قد يتطلب ثانية كاملة ليقطع المسافة بينهما⁽³⁾. ومن أجل أن تصبح المسافة الفاصلة بينهما أقل من ذلك كثيراً، ولتكن مثلاً 186 ميلاً، فلا بد من إرجاع الشرط إلى زمن أقل من جزء من ألف من الثانية ATB، وهنا سنحصل على نفس النتيجة مرة ثانية: لا يستطيعان التأثير في بعضهما، لأن الضوء لن يستطيع قطع المسافة 186 ميلاً في هذا الزمن. وعلى نفس المنوال، إذا استرجعنا الشرط لزمن أقل من جزء من المليار من الثانية ATB لكي تصبح هاتان المنطقتان على مسافة قدم واحد الواحدة من الأخرى، فإنهما لن تؤثرَا الواحدة في الأخرى كذلك لأنه لا يوجد زمن كافٍ منذ لحظة الانفجار للضوء ليقطع مسافة 12 بوصة (قدم واحد) بينهما. ويبين ذلك أنه ليس من الضرورة أن يؤدي الاقتراب المستمر لنقطتين في الفضاء إلى التلامس الحراري - مثل التلامس بين الحساء والهواء - الضروري ليصلَا إلى نفس درجة الحرارة.

بين الفيزيائيون أن هذه المشكلة قد نشأت بالضبط من النموذج القياسي للانفجار الهائل. كما أن الحسابات التفصيلية قد أظهرت أنه ليس هناك طريقة لتبادل الطاقة الحرارية بين مناطق الفضاء التي تفصلها مسافات كبيرة حالياً، الأمر الذي لن يؤدي إلى تساوي درجتي حرارتهما. وحيث أن كلمة أفق Horizon تشير إلى آخر مدى رؤيتنا - أي بعد مسافة يقطعها الضوء - فإن الفيزيائيين يطلقون على التجانس غير المفسر لدرجة الحرارة خلال المسافات الشاسعة للكون "معضلة الأفق". ولا تعني الأحجية أن النظرية القياسية للكون على خطأ. غير أن التجانس في درجة الحرارة يشير بشدة إلى أنها نفتقد جزءاً هاماً من الرواية الكونية. وقد قام الفيزيائي آلان جث في العام 1979، وهو من معهد ماساتشوسيتس للتكنولوجيا الآن، بكتابه *الفصل الناقص في الرواية*.

(3) تنقل المناقشة روح الموضوع على الرغم من أنها تناقض عن بعض السمات الدقيقة المتعلقة بحركة الضوء في عالم يتمدد، والتي تؤثر في القيم التفضيلية، وعلى وجه التحديد، وعلى الرغم من أن النسبة الخاصة تنص على أنه لا يمكن لأي شيء أن يتقلل أسرع من سرعة الضوء، فإن ذلك لا يحول دون تباعد فوتونين كل منهما عن الآخر في نسبي فراغ يتمدد بسرعة تفوق سرعة الضوء. فمثلاً، في اللحظة التي أصبح فيها الكون شفافاً لأول مرة، أي بعد حوالي 300 ألف سنة من لحظة الانفجار الهائل ATB، كان يمكن للمواقع في السماوات التي تبعد بعضها عن بعض بحوالي 900 ألف سنة ضوئية أن تؤثر بعضها في بعض حتى لو كانت المسافة بينها تتعدي 300 ألف سنة ضوئية. وقد جاء معامل الزيادة بمقدار ثلاثة أضعاف نتيجة أن الذي يتمدد نسبي فضائياً. يعني ذلك أننا لو أرجعنا الشرط الكوني للوراء بالنسبة للزمان، وبعودتنا إلى 300 ألف سنة ATB، فإن نقطتين في السماوات تحتاجان فقط إلى أن تكونا على بعد أقل من 900 ألف سنة ضوئية الواحدة عن الأخرى، ليكون لكل منهما تأثير في درجة حرارة الآخر. ولا تغير هذه التفاصيل من السمات الكيفية لموضوعات المناقشة.

خامساً: التضخم

تتلخص جذور مشكلة الأفق في أنه لكي تقرب بين منطقتين إحداهما على مسافة شاسعة من الأخرى لا بد من أن تسترجع الشريط الكوني إلى الخلف في اتجاه بداية الزمن. علينا أن نرجعه للخلف للدرجة التي لا يصبح عندها الوقت كافياً لأي تأثير فيزيائي كي يتقلل من منطقة أخرى. وتكمن الصعوبة لذلك في أنه عندما تسترجع الشريط الكوني للخلف وتقرب من الانفجار الهائل فإن الكون لا يتقلص بمعدل كاف.

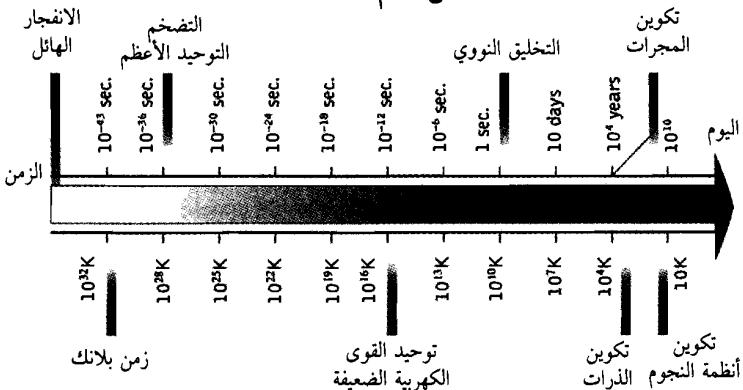
حسناً، إن هذه الأفكار تقريبية، لكنها تستحق أن نشحذها بعض الشيء. وتبعد معضلة الأفق من حقيقة أنها مثل كرة دفعت لأعلى، فإن قوى شد الجاذبية تتسبب في تباطؤ معدل تمدد الكون. ويعني ذلك، مثلاً، أنه لكي نقرب المسافة بين موقعين في الكون إلى النصف لا بد من أن تسترجع الشريط لأكثر من نصف الزمن في اتجاه البداية، وبالتالي فنحن نرى أنه لاختصار المسافة إلى النصف لا بد من أن تسترجع أكثر من نصف الزمن في اتجاه لحظة الانفجار الهائل. ويعني زمناً أقل منذ لحظة الانفجار - إذا تحدثنا نسبياً - أن اتصال المنطقتين سيزداد صعوبة، حتى ولو أصبحتا أكثر قرابة.

ويصبح من الأسهل الآن سرد مقوله جث عن معضلة الأفق. فقد وجد حلاً آخر لمعادلات آينشتاين والتي فيها يمر العالم المبكر جداً بفترة وجيزة من التمدد السريع الهائل - الفترة التي "يتضخم" فيها حجمه بمعدل غير مسبوق للتمدد الأسني. وعلى عكس حالة الكرة التي تباطأ بعد دفعها إلى أعلى، فإن التمدد الأسني يصبح أسرع بمرور الزمن. وعندما تسترجع الشريط للخلف، فإن التمدد السريع الذي يتتسارع يتحول إلى تقلص سريع متناقض. ويعني ذلك أنه لإنقاص المسافة إلى النصف بين موقعين في الكون (أثناء العصر الأسني) فإننا نحتاج لإرجاع الشريط للخلف فترة أقل من النصف - بل في الواقع أقل كثيراً. واسترجاع الشريط للخلف لزمن أقل يعني أن المنطقتين سيكون لديهما وقت أكبر للاتصال الحراري، ومثل الحساء الساخن والهواء، فإن لديهما الوقت الكافي بوفرة ليصلان إلى نفس درجة الحرارة.

ومن خلال اكتشاف جث التنجيحيات الهامة التي قام بها كل من أندريله ليند الموجود بجامعة ستانفورد الآن، وبول ستانيهارد وأندرياس ألبريخت اللذين كانوا موجودين في جامعة بنسلفانيا في ذلك الوقت وأخرين كثيرين، تجدد النموذج القياسي الكوني متحولاً إلى النموذج الكوني التضخيمي Inflationary . وفي هذا الإطار عدل النموذج الكوني القياسي في الفترة الوجيزه جداً من الزمن - من

حوالي 10^{-34} إلى 10^{-10} ثانية ATB - حيث يتمدد الكون خلالها بمعدل هائل يصل على الأقل إلى 10^{30} مرة أكبر من معامل قيمته حوالي 100 لنفس الفترة من الزمن في سيناريو النموذج القياسي - ويعني ذلك أنه في لحظة خاطفة من الزمن حوالي جزء من تريليون من جزء من تريليون من تريليون من الثانية ATB تضخم حجم الكون بنسبة مئوية أكبر مما تم خلال 15 مليار سنة منذ تلك اللحظة. كانت المادة الموزعة الآن في جميع أرجاء الكون أقرب بعضها من بعض كثيراً قبل هذا التمدد تبعاً للنموذج التضخمي أكثر مما هو عليه في النموذج القياسي، الأمر الذي يجعل من الممكن إرساء درجة حرارة واحدة. ومن خلال الانفجار اللحظي لتضخم الكون - والذي تبعه التمدد الأكثر اعتياداً في النموذج الكوني القياسي - تتمكن هذه المناطق من التباعد على مسافات شاسعة نشاهدها الآن. وهكذا فإن التعديل الموجز - لكنه تضخمي بشكل كبير - لنموذج الكون القياسي يحل معضلة الأفق (كما يحل عدداً آخر من المعضلات لم نناقشها) ويكتسب قبولاً عريضاً بين علماء الكون⁽⁴⁾.

الشكل رقم (1-14)



خط الزمن الذي يبين بعض اللحظات الهمة في تاريخ الكون.

يلخص الشكل رقم (1-14) تاريخ الكون منذ اللحظة التالية مباشرة لزمن بلانك وحتى الوقت الحاضر، وفقاً للنظرية الحالية.

من أجل مناقشة أكثر تفصيلاً وحيوية عن اكتشاف نموذج التضخم الكوسموولوجي والمعضلات التي قام بحلها، انظر : Alan H. Guth, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, With a Forward by Alan Lightman (Reading, MA: Addison-Wesley Publishing, 1997).

سادساً: الكوسمولوجيا ونظرية الأوتار الفائقة

ما زالت هناك شريحة صغيرة في الشكل رقم (14-1) بين الانفجار الهائل وزمن بلانك لم تتعرض إليها بعد. وبالتطبيق الحرفي لمعادلات النسبية العامة على هذه الشريحة، وجد الفيزيائيون أن الكون يستمر حجمه في التناقص ويستمر في السخونة وزيادة الكثافة كلما تحركنا خلال الزمن في اتجاه الانفجار الهائل. وفي لحظة الصفر من الزمن، وعندما يتلاشى حجم الكون، تندفع درجة الحرارة والكثافة إلى ما لا نهاية، لتعطينا إشارة في غاية القوة عن أن هذا النموذج النظري للكون، الذي هو جزء لا يتجزأ من الإطار الكلاسيكي للجاذبية في النسبية العامة قد تحطم تماماً.

وتدلنا الطبيعة بشكل مؤكد أنه تحت مثل هذه الظروف علينا أن ندمج النسبية العامة وميكانيكا الكم، وبتعبير آخر لا بد من الاستفادة من نظرية الأوتار. وتعد الأبحاث التي تطبق نظرية الأوتار في علم الكون في مرحلة مبكرة من تطورها الآن. و تستطيع الطرق الاضطرابية في أحسن الأحوال أن تقدم بصيرة هيكلية، لأن الطاقة ودرجة الحرارة والكثافة الهائلة تتطلب جميعها تحليلاً دقيقاً. وبالرغم من أن ثورة الأوتار الفائقة الثانية قد قدمت بعض التقنيات اللا اضطرابية، إلا أنه سيمر بعض الوقت قبل أن نتمكن من استخدامها في أنواع من الحسابات تتطلبهما العمليات الكوسمولوجيا (علم الكون). إلا أنه، وكما نعرف الآن، فإن الفيزيائيين خلال العقد الأخير قد اتخذوا الخطوات الأولى نحو فهم الكوسمولوجيا الورتية (علم الكون الورتري String Cosmology)، وسنعرض في ما يلي ما توصلوا إليه.

يبدو أن هناك ثلاث طرق أساسية تعدل بها نظرية الأوتار من النموذج الكوني القياسي. في الطريقة الأولى يتم ذلك بشكل يجعل البحوث الحالية تزداد وضوحاً، فنظرية الأوتار تعني أن الكون به ما يمكن أن يصل إلى أصغر حجم ممكن. الأمر الذي له نتائج مدوية لفهمنا للكون منذ لحظة الانفجار نفسه، عندما تزعم النظرية القياسية أن حجمه قد تقلص تماماً إلى الصفر. والطريقة الثانية أن لنظرية الأوتار ثنائية نصف القطر الصغير/نصف القطر الكبير (يرتبط ذلك ارتباطاً وثيقاً بكونه يملك أصغر حجم محتمل)، الأمر الذي له أهمية كونية عميقة، كما سنرى حالاً. وأخيراً الطريقة الثالثة، حيث لنظرية الأوتار أكثر من ثلاثة أبعاد زمكانية، ومن وجهة نظر الكوسمولوجيا، لا بد أن نتعامل مع تطورها جميعاً. ولمناقشة الآن هذه النقاط بتفصيل أكثر.

سابعاً: في البدء كانت هناك شذرة لها حجم بلانك

في أواخر ثمانينيات القرن العشرين، قام كل من روبرت براندنبيرجر وكامرون فافا بالخطوات الهامة الأولى تجاه فهم كيفية استخدام السمات النظرية للأوتار في تعديل استنتاجات الإطار الكوني التمودجي. وقد توصلوا إلى أمررين هامين. الأول أنه عند استرجاع الزمن للوراء تجاه البداية فإن درجة الحرارة تواصل الارتفاع حتى يصل حجم الكون في كل الاتجاهات إلى ما يقرب من طول بلانك. ولكن عندئذ، تكون درجة الحرارة قد وصلت إلى "النهاية العظمى". ثم تبدأ في الانخفاض". وليس من الصعب تصور السبب الحدسي وراء ذلك. تصور للتبسيط أن كل الأبعاد الفضائية للكون دائيرية (كما فعل براندنبيرجر وفافا). وكلما رجعنا بالزمن إلى الوراء وتقلص نصف قطر كل دائرة، فإن درجة حرارة الكون سترتفع. غير أنه كلما تناقص نصف القطر تجاه طول بلانك ثم خلاه، فإننا نعلم من خلال نظرية الأوتار، أن ذلك مطابق فيزيائياً لتقلص الأوتار إلى طول بلانك ثم ارتدادها للتزايد في الحجم، وحيث أن درجة الحرارة تتوجه للتناقص عندما يتمدد الكون فإننا نتوقع أن تكون المحاولة الشاقة لضغط الكون إلى حجم أصغر من بلانك تعني أن درجة الحرارة ستتوقف عن الارتفاع، لأنها وصلت إلى النهاية العظمى، ثم تبدأ في الانخفاض بعد ذلك. وقد استطاع براندنبيرجر وفافا مع بعض التحقق من أن هذا هو ما يحدث بالتأكيد.

وقد أوصل ذلك براندنبيرجر وفافا إلى الصورة الكونية التالية. في البداية كانت كل الأبعاد الفضائية في نظرية الأوتار متعددة بعضها مع بعض بشكل محكم في أدنى حجم ممكن، يصل تقرباً لطول بلانك. كانت درجة الحرارة والطاقة مرتفعتين لكنهما ليستا ما لا نهاية، حيث أن نظرية الأوتار قد تجنبت دهاليز الحجم المتناهي في الصغر والمنضغط عند نقطة البداية. وفي لحظة بداية الكون هذه تكون كل الأبعاد الفضائية في نظرية الأوتار على قدم المساواة - تامة التناظر - وكلها متعددة في شذرة متعددة الأبعاد لها حجم بلانك. ووفقأً لبراندنبيرجر وفافا، يمر الكون عندئذ خلال أولى مراحله لنقص التناظر عندما نصل إلى قرب زمن بلانك، تفرد ثلاثة أبعاد فضائية لتمتد بينما تحافظ بقية الأبعاد الأخرى بحجمها الأصلي القريب من بلانك. وعندئذ تُعرف هذه الأبعاد الثلاثة بأنها هي الموجودة في سيناريو التضخم الكوني، ويبداً زمن ما بعد بلانك في التطور كما في الشكل رقم (14-1) ليسود، وتمدد هذه الأبعاد الثلاثة لتصل إلى شكلها الحالي.

ثامناً: لماذا ثلاثة؟

والسؤال الملح الذي يطرح نفسه هو، ما الذي يدفع تناقض التناظر لتفاوت ثلاثية أبعاد فضائية بالضبط فقط لتمدد؟ أي أنه، من دون النظر للحقيقة التجريبية في أن ثلاثة أبعاد فضائية فقط هي التي تمدد إلى الحجم الكبير الذي نلاحظه، فهل تقدم نظرية الأوتار تعليلاً أساسياً لعدم تمدد عدد آخر (أربعة، أو خمسة، أو ستة، وهكذا)، أو حتى بتناول أكبر لماذا لم تمدد كل الأبعاد الفضائية كذلك؟ جاء براندنبورج وفافا بتفسير محتمل. ولنسترجع أن ثنائية نصف القطر الصغير/نصف القطر الكبير في نظرية الأوتار تقوم على حقيقة أنه عند تجعد أحد الأبعاد على شكل دائرة فمن الممكن للوتر أن يلتقي حولها. أدرك براندنبورج وفافا أنه كما تلتقي حلقة مطاطية حول الإطار الداخلي لدراجة، فإن الأوتار الملتفة تميل إلى تقييد الأبعاد التي تلتقي حولها وتمعنها من التمدد. ولأنه قد يبدو أن ذلك يعني أن كل واحد من هذه الأبعاد سيتلقى تقييده، حيث أن الأوتار تستطيع أن تلتقي حولها وتفعل ذلك بالفعل. ونقطة الضعف هنا أنه عندما يتماس وتر ملتف ورفيقه الوتر المضاد (الوتر الذي يلتقي حول البعد في الاتجاه المضاد) فإنهما يتلاشيان ليتباين وترًا غير ملفوف (Unwrapped). فإذا حدثت هذه العمليات بسرعة وكفاءة كافية فإن التقييد الذي يتسبب فيه ما يشبه الحلقة المطاطية سينعد مما يسمح للأبعاد بالتمدد. وقد اقترح براندنبورج وفافا أن هذا التناقض في التأثير الصارخ للأوتار الملتفة سيحدث فقط في الأبعاد الثلاثة الفضائية. وسنورد هنا السبب.

تصور جسيمين نقطتين تتدحرجان على طول خط ذي بعد واحد مثل المدى الفضائي للأرض الخط. فإذا لم يكن لأحدهما نفس سرعة الآخر فإنه عاجلاً أو آجلاً سيلحق أحدهما بالأخر ويصطدم به. لاحظ أنه مع ذلك، إذا كانت هاتان الجسيمان النقطتان يتدرجان عشوائياً في مستوى ذي بعدين مثل المدى الفضائي للأرض المنبسطة، فمن الأرجح أنهما لن تصطدموا الواحدة بالأخرى أبداً. فالبعد الفضائي الثاني يفتح عالمًا جديداً لمسار كل جسيمة منها، ولا تتقاطع هذه المسارات في معظم الأحيان مع بعضها في نفس النقطة ونفس اللحظة من الزمن. وفي حالة الأبعاد الثلاثة أو الأربع أو الأربعة فإن احتمال عدم تصادمها يزداد تأكيداً. أدرك كل من براندنبورج وفافا أن الفكرة المشابهة لذلك تتطابق لو أحللنا حلقة أوتار تدور حول أبعاد فضائية محل الجسيمة النقطة. ومع أنه من الصعب جداً أن نرى ما إذا كانت هناك أبعاد فضائية دائرة ثلاثة (أو أقل) فإن وجود وترتين متلفتين

حول تلك الأبعاد يزيد من احتمال تصادمها مع بعضهما - مشابهين في ذلك لما يحدث لجسيمتين تتحركان في بعد واحد. غير أنه في وجود أربعة أو أكثر من الأبعاد المكانية، فإن احتمال تصادم الأوتار المختلفة يصبح أقل فأقل - مشابهين في ذلك ما يحدث للجسيمات النقطات في بعدين أو أكثر⁽⁵⁾.

ويؤدي ذلك إلى الصورة التالية. في اللحظة الأولى من تاريخ الكون، تؤدي الاضطرابات الناشئة عن درجة الحرارة المرتفعة، لكنها محددة، إلى اندفاع كل الأبعاد الدائرية في محاولة للتمدد. وفي أثناء تلك المحاولات تقاوم الأوتار المختلفة هذا التمدد دافعة بالأبعاد إلى الوراء إلى حالتها الأصلية. بنصف قطر طول بلانك تقريباً. غير أنه إن عاجلاً أو آجلاً ستدفع التأرجحات الحرارية العشوائية لحظياً بثلاثة أبعاد لتنمو أكثر من غيرها. وهنا تظهر مناقشتنا أن الأوتار التي تلتقي حول هذه الأبعاد هي الأكثر احتمالاً في التصادم. وستتضمن نصف التصادمات تقريباً تصادم الأوتار/الأوتار المضادة التي تؤدي إلى التلاشي الذي سيؤدي بدوره للإقلال من التقييد مما يسمح لهذه الأبعاد الثلاثة بالاستمرار في التمدد. وكلما زاد التمدد، أصبح من الأصعب أن تلتقي حولها أوتار أخرى، حيث أن الأمر يتطلب طاقة أكبر للوتر حتى يتلقي حوله بعد أطول. وهكذا، يستهلك التمدد نفسه، ليصبح أقل تقييداً كلما زادت الأبعاد طولاً. ويمكننا الآن أن نتخيل أن تلك الأبعاد المكانية الثلاثة تواصل النمو بالطريقة التي وصفناها في المقطع السابق، وتمتد إلى حجم يماثل الكون أو هو أكبر من الكون الذي نشاهده الآن.

تاسعاً: الكوسموЛОجيا وأشكال كالابي - ياو

وللتبييض تصور براندنبيرجر وفافاً أن كل الأبعاد الفضائية دائرية. وفي الحقيقة وكما أشرنا في الفصل الثامن، طالما كانت الأبعاد الدائرية من الكبر بحيث أنها تتحني على نفسها لتلتقي أطرافها خارج مدى مقدرتنا الحالية على ملاحظة ذلك،

(5) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، نشير إلى أن الفكرة وراء هذه النتيجة هي كالتالي: إذا كان مجموع الأبعاد الزمكانية للمسارات التي يمسحها كل من الجسمين تساوي أو أكبر من الأبعاد الزمكانية للساحة التي يتحركان خلالها فإنهما عموماً سبقاطعان. فعلى سبيل المثال، إذا مسحت جسيمة نقطة مساراً زمكانياً أحادي البعـد - فإن مجموع الأبعاد الزمكانية لمداري جسيميتين من هذا النوع هو اثنان. وبعد الزمكاني للأرض الخط هو أيضاً اثنان، ولذلك فإن مساراتهما عموماً سبقاطع (مفترضين أن سرعتيهما الموهبة لم تتحدد بدقة لتساوي تماماً). وبالمثل، فالأوتار التي تمسح مسارات زمكانية ثانية الأبعاد (عالمها العشاء)، فإن المجموع لوترتين موضع الحديث هو أربعة. ويعني هذا أن الأوتار تتحرك في أربعة أبعاد زمكانية (ثلاثة فضائية وواحد زمني) وسبقاطع عموماً.

فالشكل الدائري يتمشى مع الكون الذي نلاحظه. أما بالنسبة للأبعاد التي ظلت صغيرة، فالسيناريو الأكثر واقعية هو ذلك الذي تتجدد فيه هذه الأبعاد في شكل أكثر تعقيداً من أشكال كالابي-ياو. ومن الطبيعي أن يكون السؤال الهام هو: أي أشكال كالابي-ياو؟ وكيف يتحدد الفضاء المعين هذا؟ لم يستطع أحد الإجابة عن هذا السؤال حتى الآن. لكن بربط نتائج التغير الطوبولوجي الحاد التي شرحت في الفصل السابق مع هذه الأفكار الكوسمولوجيا، يمكننا أن نقترح إطاراً لإنجاز ذلك. فنحن نعرف أنه من خلال التحولات المخروطية الممزقة للفضاء يمكن لأي شكل من أشكال كالابي-ياو أن يتتحول إلى شكل آخر. وهكذا يمكن أن نتخيل أنه خلال اللحظات المضطربة الساخنة بعد الانفجار الهائل ببرهه، تظل مكونات كالابي-ياو المتجمدة في الفضاء صغيرة لكنها تعاني من اهتزازات عنيفة حيث تتمزق أنسجتها وتعود للالتحام مرات ومرات لتأخذنا بسرعة عبر سلسلة من الأشكال المختلفة للكالابي-ياو. وكلما برد الكون وازدادت الأبعاد الفضائية طولاً يتباطأ معدل تحول أشكال كالابي-ياو بعضها إلى بعض، مع ثبات واستقرار الأبعاد الإضافية في أشكال كالابي-ياو التي تعطي بالتفاول السمات الفيزيائية التي نشاهدها في العالم من حولنا. والتحديات التي تواجه الفيزيائيين تمثل في فهم تطور مكونات كالابي-ياو في الفضاء بالتفصيل حتى يمكن التنبؤ بوجودها الحالي من المبادئ النظرية. وبواسطة مقدرة أشكال كالابي-ياو المكتشفة حديثاً على التحول بسهولة من شكل إلى آخر، فإننا نرى أن موضوع انتقاء أحد أشكال كالابي-ياو من أشكالها العديدة يمكن أن يختزل إلى مشكلة من مشاكل الكوسمولوجيا (علم الكون)⁽⁶⁾.

عاشرأً: قبل البداية؟

ولافتقدان براندنبيرجر وفافا لمعادلات دقيقة في نظرية الأوتار، فإنهما كانا مضطرين للقيام بالعديد من التقريرات والافتراضات في دراستهما الكوسمولوجيا (علم الكون). وكما قال فافا حديثاً:

تلقي أبحاثنا الضوء على الطريقة الجديدة التي بها تسمح لنا نظرية الأوتار

(6) باكتشاف نظرية -M- والإقرار بوجود البعد الحادي عشر، بدأ منظرو نظرية الأوتار دراسة وسائل تجدد كل الأبعاد السبعة الفضائية بطريقة تضعها جميعاً على قدم المساواة. وتسمى الخيارات المحتملة لمثل هذه المخروطات سباعية الأبعاد باسم مخروطات "جويس"، نسبة إلى دومينيك جويس من جامعة أكسفورد، الذي يرجع إليه الفضل في إيجاد التقنيات الأولى لتصميمها الرياضي.

بأن نبدأ بالتعامل مع المعضلات الملحة في المنطلق القياسي للكوسموLOGيا. فنحن نرى مثلاً، أن المفهوم الشامل لفرد أصلي يمكن تجنبه تماماً بواسطة نظرية الأوتار. ولكن لصعوبة القيام بحسابات جديرة بالثقة تماماً، في مثل هذه الحالات القصوى من مفهومنا الحالي لنظرية الأوتار، فإن أبحاثنا تقدم فقط النظرة الأولى على كوسموLOGية الأوتار، ويعيناً تماماً عن أن يكون ذلك هو آخر الكلمات⁽⁷⁾.

ومنذ ظهور أبحاثهما - براندنبيرجر وفافا - قطع الفيزيائيون شوطاً متقدماً في تعريف فهمهم للكوسموLOGيا الأوتار (علم الكون للأوتار)، الذي ابتدأ بواسطة غابرييل فينيزيانو ورفيقه ماوريتسيو غاسبريني من جامعة تورنتو، ضمن آخرين، حيث توصلوا إلى صورة خادعة للكوسموLOGية الأوتار التي تشتراك في بعض السمات المعينة مع السيناريو المذكور أعلاه، لكنها تختلف عنها بشكل ملحوظ. وقد اعتمد هذان الفيزيائيان، كما فعل براندنبيرجر وفافا، على أن لنظرية الأوتار حداً أدنى من الطول لتجنب درجة الحرارة اللاهائية والطاقة والكتافة التي تظهر في النظرية القياسية والنظرية التضخمية في الكوسموLOGيا (علم الكون). ولكن، بدلاً من أن يستنتجوا أن العالم قد بدأ على شكل شذرة في حجم بلانك في غاية السخونة، فإن غاسبريني وفينيتسيانو قد اقتربا أنه ربما يكون هناك عالم سابق على بداية الكون (Prehistory to the Universe) - كان قد بدأ منذ زمن بعيد قبل اللحظة التي نطلق عليها لحظة الصفر في الزمان - والتي تقودنا إلى الجنين الكوني بلانك.

وفي هذا السيناريو الذي يطلق عليه ما قبل الانفجار الهائل، بدأ الكون في حالة شديدة الاختلاف عن حالته في إطار الانفجار الهائل. ويقترح غاسبريني وفينيتسيانو في أبحاثهما أن العالم يبدأ أساساً بارداً ولا نهائياً في الفضاء وليس ساخناً بشكل هائل ومجدداً بشدة في قطع فضائية دقيقة. وفي هذه الحالة تشير معادلات نظرية الأوتار إلى أن هذا العالم - إلى حد ما كما في عصر جث التضخم - قد تعرض لعدم ثبات دافعاً كل نقطة في الكون إلى أن تبتعد بسرعة بعضها عن بعض. وبين غاسبريني وفينيتسيانو أن ذلك يتسبب في تحدب أكثر للفضاء مما يؤدي إلى زيادة هائلة في درجة الحرارة وطاقة الكثافة⁽⁸⁾. وبعد بعض

(7) مقابلة مع كومرون فافا في 12 كانون الثاني / يناير 1998.

(8) سيلاحظ القارئ ذو الخبرة، أن مناقشاتنا تجري في ما يسمى الإطار الوتري المرجعي، الذي فيه ينشأ التحدب المتزايد أثناء فترة ما قبل الانفجار الهائل من تزايد شدة قوى الجاذبية (مسوقة بالدليارات A Dilaton-Driven Tensional Expansion). أما في ما يطلق عليه إطار آيشتاين، فإن التطور يمكن أن يوصف على أنه طور تقلص متتابع.

الوقت ستبدو منطقة ثلاثة الأبعاد في حجم ملليمتر داخل هذا المدى الشاسع مثل كتلة كثيفة فائقة السخونة تماماً منبقة من تمدد جث التضخمى. وعندئذ ومن خلال التمدد القياسى فى الكوسموЛОجيا (علم الكون العادى) المتضمن لانفجار الهائل، يمكن أن تكون هذه الكتلة مسؤولة عن كل الكون المألف لنا. وفوق ذلك، ولأن عصر ما قبل الانفجار الهائل يتضمن التمدد التضخمى الخاص به، فإن الحل الذى اقترحه جث لمعضلة الأفق يصبح تلقائياً جزءاً من سيناريو الكوسمولوجي السابق على الانفجار الهائل. وكما قال فينزيانو: "تقدّم نظرية الأوتار لنا صورة من الكوسمولوجيّة التضخمّية على طبق من الفضة".⁽⁹⁾

وتصبح الدراسات الخاصة بـكوسمولوجية الأوتار الفائقة مجالاً خصباً ونشطاً للبحث العلمي. فمثلاً، ولد سيناريو ما قبل الانفجار الهائل بالفعل كمّا هائلّاً من الجدل الساخن والمثير، غير أنه ما زال بعيداً عن الدور الذي يمكن أن يكون له في إطار الكوسمولوجيّة التي ستنبع في النهاية من نظرية الأوتار. والتوصّل إلى هذه الأفكار في الكوسمولوجيّة سيعتمد بشدة على مقدرة الفيزيائيّين على أن يدركوا كل ما يتعلّق بالثورة الثانية للأوتار الفائقة. فما هي مثلاً نواتج الكوسمولوجيّة الناشئة عن وجود أغشية أساسية لها أبعاد أكثر؟ كيف تتغيّر الخواص الواردة في الكوسمولوجيّة، التي ناقشناها، إذا كان لنظرية الأوتار ثابت ازدواج قيمته تضعننا في مكان أقرب إلى مركز الشكل رقم (11-12) بدلاً من وجودنا في إحدى أشباه الجزر؟ أي ما هو تأثير الصورة الكاملة لنظرية M في اللحظات المبكرة الأولى للكون؟ وتجري الآن دراسات محمومة على هذه التساؤلات المحورية. وبالفعل ظهرت بصيرة ثاقبة هامة في هذا الصدد.

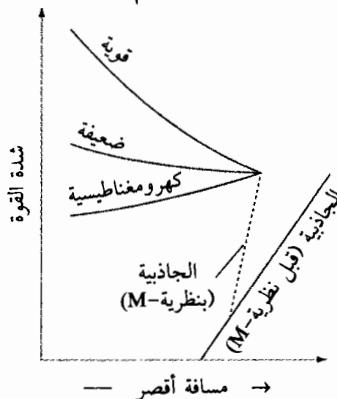
حادي عشر: نظرية-M واندماج كل القوى

بيانا في الشكل رقم (7-1) كيف تندمج شدة القوى اللاجاذبية معًا عندما ترتفع درجة حرارة الكون بما فيه الكفاية، وكيف تتواءم شدة قوى الجاذبية داخل هذه الصورة. فقبل ظهور نظرية-M كان في مقدور منظري نظرية الأوتار أن يبينوا أنه باستخدام أبسط الخيارات من أشكال كالابي-ياو في الفضاء تندمج قوى الجاذبية على الأغلب وليس تماماً مع القوى الثلاث الأخرى، كما هو موضح في الشكل رقم (2-14). وقد وجد منظرو نظرية الأوتار أنه يمكن تجنب عدم التوافق هذا وذلك بصياغة أشكال كالابي-ياو المختارة بعناية شديدة ضمن حيل أخرى،

(9) مقابلة مع غابرييل فينزيانو في 19 أيار/مايو 1998.

ولكن كما هو معهود فإن التدقيق الشديد بعد الصياغة يسبب عدم ارتياح للفيزيائيين. وحيث أنه لا يوجد حالياً من يستطيع التنبؤ بالشكل الدقيق لأبعاد كالابي-ياو، فإن الأمر يبدو من الخطورة أن نعتمد على حلول للمشكلات التي تتعلق بوهن بالتفاصيل الدقيقة لأشكال كالابي-ياو.

الشكل رقم (2-14)



يمكن أن تندمج شدة كل القوى الأربع بشكل طبيعي في إطار نظرية- M .

ومع ذلك، فإن ويتين قد بيّن أن الثورة الثانية للأوتار الفائقة قد قدمت حلاً أكثر تأثيراً بكثير. وقد وجد ويتين - بواسطة دراسة الكيفية التي تتغير بها شدة القوى عندما لا يكون ثابت ازدواج الأوتار صغيراً بالضرورة - أن تحدب قوى الجاذبية يمكن أن يدفع برفق للاندماج مع القوى الأخرى كما في الشكل رقم (2-14) دون قوله خاصة لأجزاء كالابي-ياو من الفراغ. ومع أن الأمر ما زال مبكراً جداً، فربما يشير ذلك إلى أنه يمكن التوصل إلى وحدة الكوسمولوجيا بسهولة أكثر باستغلال الإطار الأكبر لنظرية- M .

تمثل التطورات التي نقاشناها في هذا المقطع والمقاطع السابقة إلى حد ما أولى الخطوات المعنية بفهم الاستخدامات الكوسمولوجية لنظرية الأوتار- M . وخلال السنوات القادمة، وأثناء تتحقق الأدوات الاضطرابية لنظرية الأوتار- M فإن فيزيائيين يتوقعون أن تنبثق بعض أعظم وأهم الأفكار من تطبيقات هذه الأدوات في حل تساؤلات الكوسمولوجيا.

وبدون امتلاك وسائل لها القدرة الكافية للفهم التام للكوسمولوجيا وفقاً لنظرية الأوتار حالياً، فمن الجدير أن نفك في بعض الاعتبارات العامة المتعلقة

بالدور المحتمل للكوسموЛОجية أثناء بحثنا عن النظرية النهائية. وإننا نحذر بأن بعض هذه الأفكار ذات طبيعة تخمينية أكثر من الأفكار التي نوقشت من قبل، لكنها تشير بالفعل الموضوعات التي قد تتعرض لها أية نظرية نهائية متوقعة.

ثاني عشر: التخمينات الكوسمولوجيا والنظرية النهائية

للكوسمولوجية المقدرة على الإمساك بنا بشدة عند مستوى عميق ودقيق، لأنه إذا فهمنا كيف بدأت الأشياء فإن ذلك يشبه شعورنا بالاقتراب أكثر من أي وقت مضى من فهم لماذا حدثت بداية الأشياء، على الأقل للبعض منا. ولا يعني ذلك أن العلم الحديث يقدم ارتباطاً بين السؤال كيف والسؤال لماذا - وهو لا يفعل ذلك - وربما لن توجد أية علاقة علمية أبداً بينهما. غير أن دراسة الكوسمولوجيا تعد بإعطائنا فهما تاماً إلى أبعد ما يمكن لساحة السؤال لماذا - أي لماذا ميلاد الكون - ويسمح ذلك على الأقل بنظرية مزودة بالمعرفة العلمية للإطار الذي تصاغ فيه الأسئلة. وفي بعض الأحيان يكون الوصول إلى التألف العميق مع السؤال هو أحسن تعويض فعلي من الإجابة.

وفي سياق البحث عن النظرية النهائية، فإن هذه الانعكاسات القيمة على الكوسمولوجيا تفسح الطريق نحو اعتبارات أكثر صلاحة بكثير. والطريقة التي تبدو لنا بها الأشياء اليوم - الطريقة الموجودة في أقصى يمين خط الزمن في الشكل رقم (1-14) - تعتمد على القوانين الأساسية للفيزياء، ولتكن متأكداً، إنها قد تعتمد كذلك على خصائص تطور الكوسمولوجيا من أقصى يسار خط الزمن، والتي يحتمل أن تقع خارج نطاق حتى أكثر النظريات عمقاً.

وليس من الصعب تخيل كيف يمكن أن يكون ذلك. ولنفك في ما يحدث مثلاً عندما تُقذف بكرة في الهواء. فستتحكم قوانين الجاذبية في حركة الكرة، لكننا لا يمكن أن نتنبأ بموقع استقرار الكرة تماماً انطلاقاً من هذه القوانين. فلا بد لنا أن نعرف سرعة الكرة - السرعة والاتجاه - في لحظة خروجها من يده. أي أنها يجب أن نعرف "الظروف الأصلية" لحركة الكرة. وبالمثل فإن هناك سمات للكون لها كذلك احتمالات تاريخية - ويعتمد السبب في تكوين نجم في مكان ما وكوكب في مكان آخر على سلسلة معقدة من الأحداث التي، على الأقل من حيث المبدأ، يمكن أن تخيل افتقاء أثرها حتى نصل إلى بعض السمات عن الكيفية التي كان عليها الكون عندما بدأ كل ذلك. غير أنه من المحتمل أنه حتى السمات الأساسية للكون، وربما حتى الخواص الأساسية للمادة وجسيمات القوى، تعتمد مباشرة على التطور التاريخي - التطور الذي يتوقف هو نفسه على

الظروف الأصلية للكون.

وفي الحقيقة لقد لاحظنا بالفعل تجسيداً محتملاً لهذه الفكرة في نظرية الأوتار: عندما تطور الكون الساخن المبكر، ربما تكون الأبعاد الإضافية قد تحولت من شكل إلى آخر، لتسقى في النهاية عندما يبرد الكون بما فيه الكفاية في أحد أشكال كالابي-ياو. ومثل الكرة التي قذفت في الهواء، فإن نتيجة الرحلة من خلال العديد من أشكال كالابي-ياو قد تعتمد على تفاصيل كيفية بداية الرحلة في المقام الأول. ومن خلال تأثير أشكال كالابي-ياو الناتجة في كتلة الجسيمات وخواص القوى، فإننا نرى أن التطور الكосموولوجي وحالة الكون عند البداية يمكن أن يكون لهما وقع مدوٍ على الفيزياء التي نعرفها حالياً.

ونحن لا نعرف ماهية الظروف الأولى للكون، ولا حتى الأفكار والمفاهيم واللغة التي يجب استخدامها لوصف تلك الظروف. ونحن نعتقد أن الحالة الأصلية القصوى للطاقة، والكثافة ودرجة الحرارة اللانهائية التي تظهر في النموذجين الكوسمولوجيين القياسي والتضخمى، ما هي إلا إشارة إلى أن هاتين النظريتين قد انهارتتا بدلاً من أن تصبحا وصفاً صحيحاً للظروف الفيزيائية الموجدة فعلاً. تقدم نظرية الأوتار تصحيحاً لذلك بأن تبين كيفية تجنب مثل هذه الحالات اللانهائية القصوى، ومع ذلك فلا يملك أحد آية فكرة للإجابة عن السؤال عن بداية تلك الأحداث. وفي الحقيقة فإن جهلنا يتأكد حتى مستويات أعلى: فنحن لا نعرف ما إذا كان السؤال عن تحديد الظروف الأصلية سؤالاً ذا مغزى، أم أن هذا السؤال يقع بعيداً تماماً عن متناول آية نظرية إلى الأبد، كما في حالة توجّهنا بالسؤال إلى النسبة العامة للإجابة عن مدى قوة قذف الكرة في الهواء. قام الفيزيائيون من أمثال هوكنغ وجيمس هارتل من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارا بمحاولات شجاعية لإخضاع السؤال حول الظروف الأصلية الكوسمولوجيا تحت مظلة نظريات الفيزياء، إلا أن هذه المحاولات ظلت بلا نتائج نهائية. وفي سياق نظرية الأوتار/M- فإن فهمنا الكوسمولوجي حالياً ما زال بدائياً جداً ليتمكن من تحديد ما إذا كانت نظريتنا المرشحة لتكون "نظرية كل شيء" ترقى لاسمها حقيقة، وأنها تحدد ظروفها الأصلية الكوسمولوجيا، وبذلك تسمى بها إلى مرتبة قوانين الفيزياء. وهو سؤال أساسي للأبحاث المستقبلية.

ولكن حتى في ما عدا موضوع الظروف الأصلية ووقعها على التبع التاريخي للتطورات الكونية، فإن بعض المقترنات الحديثة عالية الافتراضية قد قدمت حدوداً محتملة أخرى للمقدرة التفسيرية لأية نظرية نهائية. ولا يعرف أحد ما إذا كانت هذه الأفكار صحيحة أم خاطئة، غير أنه من المؤكد أنها تقع على حدود

التيار الرئيسي للعلم. لكنها تلقي بالضوء فعلاً - إن لم يكن بطريقة مستفزة وافتراضية - على أي عائق قد تقابله النظرية النهائية.

وتعتمد الفكرة الأساسية على الاحتمال التالي. تخيل أن ما نسميه الكون هو في الواقع جزء ضئيل فقط من مدى كوسموLOGIي فسيح وشاسع، وواحد من عدد هائل من الجزر الكونية المنتشرة عبر أرخبيل كوسموLOGIي عظيم. ومع أن ذلك قد يبدو شيئاً غير معقول، وربما يكون كذلك في النهاية، إلا أن أندريه ليند اقترح آلية مُحكمة قد تؤدي إلى مثل هذا الكون العملاق. وقد وجد ليند أن التمدد التضخمي الموجز لكته محوري، الذي نقاشناه في الفصل السابق، قد لا يكون متفرداً، يحدث لمرة واحدة. وبدلًا من ذلك فإنه يدفع بأن ظروف التمدد التضخمي قد تكررت مرات ومرات في مناطق منعزلة منتشرة في الكون، تمر بدورها بتمدد تضخمي كالبانون، الذي يتطور إلى عوالم جديدة منفصلة. وفي كل واحد من هذه العوالم تتواصل عملية التمدد التضخمي حيث تنشأ عوالم أخرى من الأطراف البعيدة للشبكة الكونية اللاحنائية للمدى الكوني. وتصبح المصطلحات أكثر تعقيداً، ولكن لنتبع العصر ونطلق هذا المفهوم حول التمدد الهائل باسم "الكون المتعدد أو العالم المتعدد" (Multiverse) بحيث يكون كل جزء من مكوناته عالماً (Universe).

والملاحظة الرئيسية هي أنه بينما كنا قد أشرنا في الفصل السابع إلى أن كل شيء نعرفه يشير إلى فيزياء متجانسة ومتماستة خلال عالمنا، وقد لا يكون لذلك علاقة بالمتطلبات الفيزيائية في تلك العوالم الأخرى، طالما أنها منفصلة عنا، أو على الأقل أنها بعيدة كل البعد عنا للدرجة التي لا يملك فيها الضوء الزمن الكافي للوصول إلينا. وهكذا من الممكن أن نتخيل أن الفيزياء تختلف من عالم لأخر. وقد يكون الاختلاف دقيقاً في بعض هذه العوالم: فمثلاً قد تكون كتلة الإلكترون أو شدة القوى القوية أكبر أو أصغر بمقدار جزء من الألف بالمائة مما هي عليه في عالمنا. وفي البعض الآخر قد تختلف الفيزياء بشكل أكثر حدة: فقد يزن الكوارك الأعلى عشرة أضعاف ما يزنها في عالمنا أو تكون شدة القوى الكهرومغناطيسية عشرة أضعاف قيمتها التي نقيسها في عالمنا، مع كل ما يتبع ذلك من مظاهر وتطبيقات على النجوم وعلى الحياة كما نعرفها (كما أشرنا في الفصل الأول). وقد تختلف الفيزياء في العوالم الأخرى بشكل أكثر راديكالية: فقد تكون قائمة الجسيمات الأولى والقوى مختلفة تماماً عن عالمنا، أو إذا استعرضنا لمحة من نظرية الأوتار، فقد يكون عدد الأبعاد الممتدة مختلفاً مع وجود بعض العوالم المنضبطة ذات أبعاد فضائية قليلة أو حتى قد تصل إلى الصفر أو يكون لها بعد

واحد كبير، بينما هناك عوالم أخرى قد يكون لها ثمانية أو تسع أو حتى عشرة أبعاد فضائية ممتدّة. وإذا أطلقنا العنان لخيالنا حتى القوانين نفسها قد تتغيّر بشدة من عالم آخر. فمدى الاحتمالات هنا بلا نهاية.

وال مهم هنا هو أنه إذا استعرضنا هذه المتأهّلات الهائلة من العوالم، فإن الغالبية العظمى منها لن تكون ظروفها مواتية للحياة أو لأي شيء يمت بصلة ولو بعيدة للحياة التي نعرفها. وفي ما يتعلّق بالتغيّرات الحادّة في الفيزياء المألوفة فإن هذا الأمر واضح: فإذا كان عالمنا في الواقع يشبه عالم خرطوم المياه، فإن الحياة التي نعرفها لن تكون موجودة. فحتى مجرد التغيير البسيط في الفيزياء سيؤثّر في تكوين النجوم مثلاً، مما يحيد بمقدرتها على أن تعمل كأفران كونية لإنتاج الذرات الداعمة للحياة مثل الكربون والأوكسجين، اللذين عادة ما ينتشران خلال الكون بواسطة انفجارات المستعرات العظمى. وفي ضوء حساسية اعتماد الحياة على تفاصيل الفيزياء، إذا سألنا مثلاً لماذا كانت القوى والجسيمات في الطبيعة لها الخواص المعينة التي نعرفها، فمن الممكن أن تنتج الإجابة المحتملة الآتية: تختلف هذه السمات اختلافاً بيناً عبر كل العوالم المتعددة (Multiverses)؛ فمن الممكن أن تكون خواصها مختلفة وهي بالفعل مختلفة في العالم الآخر. والشيء المميز عن اتحاد الجسيمات وخواص القوى التي نائفها هي أنها تسمح للحياة بأن تنشأ. ولا بد من أن تكون الحياة، والحياة الذكية على وجه الخصوص، شرطاً مسقاً لإثارة التساؤل لماذا تكوننا الخواص المعروفة. وبلغة مباشرة فإن الأشياء على ما هي عليه في كوننا، لأنه لو لم تكن كذلك فلن تكون موجودين لنلاحظ ذلك. ومثل الرابحين في لعبة الروليت الروسيّة الجماعيّة، الذين يهدأ ذهولهم بإدراكهم أنه إذا لم يكونوا قد ربحوا، فإنهم لن يكونوا هناك ليشعروا بالذهول، فإن فرضية العوالم المتعددة لها المقدرة على التقليل من إصرارنا على شرح سبب ظهور كوننا على ما هو عليه.

وهذا النوع من الجدل صورة من فكرة لها تاريخ طويل معروفة باسم المبدأ البشري (Anthropic Principle). وكما هو معروض هنا، فإن هذا المنظور يقف على نقيس الحلم بنظرية قوية تامة المقدرة على التنبؤ وموحدة حيث تتواجد بها كل الأشياء على الحالة التي هي عليها لأن الكون لا يمكن أن يكون إلا كذلك. وبدلًا من أن يكون العالم المتعدد مثالاً شاعرياً تتوارد فيه كل الأشياء في مكانها معاً ب أناقة صارمة، فإن هذا العالم المتعدد والمبدأ البشري يرسمان صورة لمجموعة عريضة من العوالم التي لا يشبع نعهما للتغيير. وسيكون الأمر في غاية الصعوبة إن لم يكن مستحيلاً أن نعرف ما إذا كانت صورة العالم المتعدد صحيحة

أم لا. فحتى لو كانت هناك عوالم أخرى، فإننا يمكن أن نتخيل أنها لن تتمكن أبداً من الاتصال بأي منها. غير أنه بزيادة مجال "ما الذي يوجد في الخارج هناك" - الأمر الذي يقزم نتائج هابل عن أن درب اللبانة ليس إلا مجرة واحدة من العديد من المجرات - فإن مفهوم العالم المتعدد يحدونا على الأقل بأن هناك احتمالاً أنها تتخطى حدودنا بالتطبع إلى نظرية نهائية.

ولا بد أن نطلب في النظرية النهائية وصفاً متماسكاً لجميع القوى وكل المادة في إطار ميكانيكا الكم. كما لا بد أن نطلب من النظرية النهائية أن تعطي كوسموLOGIE مقنعة داخل عالمنا. غير أنه إذا كانت صورة العالم المتعدد صحيحة - وهو افتراض بعيد الاحتمال - فإننا نطلب الكثير من نظريتنا لشرح كذلك الخواص التفصيلية لكتلة قوة الجسيمات وشحتها وشدتها.

غير أنه لا بد من أن نؤكد على أنه حتى لو تقبلنا فرضية العالم المتعدد، فإن استنتاجنا الذي يهادن مقدرتنا التنبئية بعيد عن أن يكون خالياً من العيوب. وبساطة فإن السبب هو أنه إذا أطلقنا لأنفسنا العنوان في التخيل، وسمحنا لأنفسنا أن نتصور وجود العالم المتعدد، فعلينا أيضاً أن نطلق العنوان لمعتقداتنا النظرية ونفك في الطرق التي يمكن أن تروض من العشوائية الظاهرة نسبياً للعالم المتعدد. وبالتالي المحفوظ نسبياً، يمكن أن نتخيل - إذا كانت صورة العالم المتعدد صحيحة - أنها قادرون على مد نظريتنا النهائية إلى آخر مدى تصل إليه، وأن "نظريتنا النهائية الممتدة" قد تنبئنا بالضبط لماذا وكيف تبعثرت قيم المؤشرات الأساسية عبر مكونات العالم.

وقد جاءت أكثر الأفكار راديكالية من اقتراح لي سمولين من جامعة ولاية بنسليفانيا، الذي استلهم ذلك من التشابه بين ظروف الانفجار الهائل ومراكيز الثقوب السوداء - يتميز كل منهما بكثافة هائلة للمادة المسحوقة - فاقتصر أن كل ثقب أسود ما هو إلا نواة لعالم جديد يخرج للوجود من خلال انفجار هائل ، لكنه محتجب إلى الأبد عن أنظارنا بواسطة أفق حدث الثقب الأسود. وبجانب اقتراح سمولين لآلية أخرى من آليات توليد العالم المتعدد، فإنه قد أدخل عنصراً جديداً - صورة كونية من التطفر الجيني - وضع النهاية حول التقيد العلمي المرتبط بالمبدأ البشري⁽¹⁰⁾. وقد اقترح أنه لو تصورت عالماً يتبرع من لب ثقب أسود، فإن خواصه الفيزيائية، مثل كتلة الجسيمات وشدة القوى، ستكون قريبة

Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (New York: Oxford University Press, 1997).

لكتها ليست تماماً مثل تلك الموجودة في العالم الذي جاء منه. وحيث أن الثقوب السوداء تنشأ عن النجوم المستهلكة، وأن تكوين النجوم يعتمد على القيم الدقيقة لكتلة الجسيمات وشدة شحتها، فإن خصوبة أي عالم - أي عدد الثقوب السوداء الوليدة التي يمكن أن ينتجها - تعتمد بحساسية على هذه المؤشرات. وستؤدي التغيرات الطفيفة في مؤشرات العالم الوليدة بذلك إلى بعض العوامل الأخرى التي تصبح أكثر مواهمة لإنتاج الثقوب السوداء أكثر من العالم الذي جاءت منه، وستعطي عدداً أكبر من العالم الوليدة الخاصة بها⁽¹¹⁾. وبعد أجيال كثيرة، ستصبح أحفاد العالم أكثر مواهمة لإنتاج الثقوب السوداء التي ستتصبح من الكثرة بحيث تطغى على قاطني العالم المتعدد. وهكذا، وبدلاً من الاستدلال بالmbبدأ البشري، فإن اقتراح سمولين يقدم آلية ديناميكية تؤدي في المتوسط بمؤشرات كل جيل تال من العالم للاقتراب أكثر فأكثر من قيمة معينة - القيمة المواتمة لإنتاج الثقوب السوداء.

ويقدم هذا المنطلق طريقة أخرى بها يمكن تفسير المادة الأساسية ومؤشرات القوى، حتى في إطار العالم المتعدد. فإذا كانت نظرية سمولين صحيحة، وكنا نحن عضواً نموذجياً ناضجاً في عالم متعدد (وهذا افتراض خيالي جداً ويمكن دحضه من جهات عديدة بالطبع)، فإن مؤشرات الجسيمات والقوى التي نقيسها لا بد أن تتواءم لإنتاج الثقوب السوداء. ويعني ذلك أن أي عبث في هذه المؤشرات الخاصة بعالمنا لا بد من أن يجعل تكوين الثقوب السوداء أمراً أكثر صعوبة. وقد بدأ الفيزيائيون في دراسة هذه المفترضات، ولكن حتى الآن ليس هناك ما يؤكّد صحتها. غير أنه حتى لو اتضح أن مقترح سمولين غير صحيح، فإنه ما زال يقدم طريقاً آخر يمكن أن تتخذه النظرية النهائية. ولأول وهلة قد يبدو أن النظرية النهائية تفتقد التماسك. فقد نجد أنها تصف عدداً كبيراً من العالم، الكثير فيها ليس له علاقة بالعالم الذي نعيش فيه. والأكثر من ذلك، يمكننا أن نتخيل أن هذه الكثرة من العالم ربما يمكن إدراكها فيزيائياً، الأمر الذي يؤدي إلى عالم متعدد - الأمر الذي يؤدي لأول وهلة إلى تحديد مقدرتنا على التنبؤ للأبد. ومع ذلك ففي

(11) في إطار نظرية الأوتار مثلاً، يمكن إرجاع هذا التطور إلى تغيرات صغيرة في شكل الأبعاد المتجمدة من أحد العالم إلى ذريته. ومن ناتجنا المتعلقة بالتحولات المخروطية الممزقة للفضاء، فإننا نعلم أن تسلسلاً طويلاً بما فيه الكفاية من مثل هذه التغيرات الصغيرة يمكن أن يأخذنا من أحد أشكال كالابي-ياو إلى شكل آخر، ساماًحاً بذلك للعالم المتعدد بأن يحظى بكافأة تكاثر لكل العالم القائمة على الأوتار. وبعد أن يكون العالم المتعدد قد مر خلال مراحل عديدة بما يكفي من التكاثر، فإن فرضية سمولين قد تؤدي بنا إلى توقع أن يكون للكون النمطي مكون من كالابي-ياو مهيأ للإخصاب.

الحقيقة تصور هذه المناقشة أن التفسير النهائي يمكن على أية حال التوصل إليه طالما أدركنا أنه ليس فقط مجرد الوصول إلى القوانين النهائية، ولكن أيضاً تطبيقاتها على التطور الكосموولوجي في مدى عظيم بشكل غير متوقع، يمثل نهاية المطاف.

وبلا شك فإن التطبيقات الكوسمولوجية لنظرية الأوتار/ M ستكون مجالاً للدراسة في القرن الحادي والعشرين. وبدون معجلات قادرة على إنتاج طاقة بقيمة طاقة بلانك، سيزداد اعتمادنا على معجل الانفجار الهائل الكوسمولوجي ، والبقايا التي تحلفت في جميع أنحاء الكون، وذلك للحصول على بيانات تجريبية. وبشيء من الحظ والمثابرة قد نتمكن في النهاية من الإجابة عن بعض الأسئلة مثل كيف بدأ الكون ، ولماذا تطور إلى الشكل الذي نراه في السماء وعلى الأرض. وهناك بالطبع مناطق مجهولة بين ما نعرفه وموضع الإجابات الكاملة عن هذه الأسئلة الأساسية. غير أن تطوير نظرية كمية للجاذبية من خلال نظرية الأوتار الفائقة يدعم الأمل في أننا الآن نمتلك الأدوات النظرية لاقتحام المناطق الشاسعة من المجهول، وبلا شك فإننا سنحصل بعد نضال طويل على إجابات لأكثر الأسئلة عمقاً.

القسم الخامس

التوحيد في القرن الحادي والعشرين

الفصل الخامس عشر

آفاق مستقبلية

بعد قرون من الآن، ربما تكون نظرية الأوتار الفائقة، أو ما تطور منها في إطار نظرية-M، قد تطورت أبعد كثيراً من صياغتنا الحالية وللدرجة التي يمكن ألا يتعرف عليها أفضل رواد البحث العلمي اليوم. وبمواصلة بحثنا عن النظرية النهائية، فإننا قد نجد أن نظرية الأوتار ليست إلا واحدة من الخطوات الأساسية على الطريق نحو المفهوم الأعظم للكون - المفهوم الذي يتضمن أفكاراً تختلف جذرياً عن أي شيء تعاملنا معه في السابق. ويعلمنا تاريخ العلوم أنه في كل مرة نتصور أننا قد توصلنا إلى الفهم الكامل لتجربتنا الطبيعية بشكل جذري بما في جعبتها لنا مما يتطلب تغيرات أحياناً حادة وجوهرية في فهمنا لطريقة عمل الكون. ومرة ثانية، وفي لمحات من التأمل يمكن أن نتصور أيضاً، كما فعل السابقون من قبل وربما بسذاجة، أننا نعيش في فترة هامة في تاريخ البشرية، حيث فيها ستصبح القوانين النهائية للكون أخيراً في متناول أيدينا، وكما قال إدوارد ويتن:

إنني أشعر أننا قريبون جداً من نظرية الأوتار - في أعظم لحظات تفاؤلي - وأتصور أنه يوماً ما، سيسقط الشكل النهائي للنظرية من السماء ليهبط في حجر شخص ما. لكن ويشكل أكثر واقعية فإني أشعر أننا الآن في سياق عملية بناء نظرية أكثر عمقاً من أي شيء قمنا به من قبل، وربما أيضاً في القرن الواحد والعشرين، عندما سأكون من الكبر للدرجة التي لن أستطيع معها تقديم أية أفكار ذات قيمة في هذا الموضوع. وعلى الفيزيائيين الشبان أن يقرروا ما إذا كنا فعلاً قد توصلنا إلى النظرية النهائية⁽¹⁾.

ومع أننا ما زلنا نشعر بتواجد الثورة الثانية للأوتار الفائقة، وأننا نستوعب الأفكار الجديدة التي تولدت عن ذلك، فإن معظم منظري نظرية الأوتار يتوقفون على أنه من المحتمل أن الأمر قد يستغرق ثورة نظرية ثالثة وربما رابعة قبل أن تكشف المقدرة الكاملة لنظرية الأوتار ودورها المحتمل كما تقييمها النظرية النهائية. وكما رأينا، فإن نظرية الأوتار قد شكلت بالفعل صورة جديدة جديرة

(1) مقابلة مع إدوارد ويتن في 4 آذار / مارس 1998.

بالملاحظة لكيفية عمل الكون، لكن ما زال هناك معوقات ونهايات غير محبوكة ستكون بلا شك الموضوع المركزي لمنظري نظرية الأوتار خلال القرن الواحد والعشرين. وهكذا، في هذا الفصل الأخير لن نتمكن من وضع نهاية الرواية البشرية في بحثها عن أعمق قوانين الكون، لأن البحث ما زال متصلةً. وبدلاً من ذلك، لنوجه أبصارنا إلى مستقبل نظرية الأوتار، وذلك بمناقشة خمسة أسئلة محورية سيواجهها منظرو نظرية الأوتار عند مواصيلهم تعقب النظرية النهائية.

أولاً: ما هو المبدأ الأساسي في نظرية الأوتار؟

إن الدرس الكبير الذي تعلمناه خلال المائة عام الماضية هو أن القوانين المعروفة في الفيزياء تصاحبها مبادئ التنازلي. فالنسبية الخاصة تقوم على التنازلي الكامن في مبدأ النسبية – التنازلي بين النقاط التفاضلية ذات السرعة الثابتة. أما قوى الجاذبية كما هي متضمنة في نظرية النسبية العامة فتقوم على مبدأ التكافؤ – امتداد مبدأ النسبية ليضم كل النقاط التفاضلية الممكنة بصرف النظر عن درجة تعقيد حالة حركتها. كما تقوم القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية على مبادئ التنازلي القياسية الأكثر تجريداً.

ويميل الفيزيائيون، كما ناقشنا من قبل، إلى السمو بمبادئ التنازلي بوضعها في موقع مميز في وسط تفسير الأمور. ومن هنا المنظور فإن الجاذبية موجودة لكي تكون كل النقاط التفاضلية الممكنة التي شاهدتها على قدم المساواة تماماً – حتى يصبح مبدأ التكافؤ صحيحاً. وبالمثل، فإن القوى اللاجاذبية موجودة من أجل أن تحترم الطبيعة تنازلياتها القياسية المصاحبة لها. ومن الطبيعي أن يحول هذا المنطلق السؤال من لماذا توجد قوى معينة، إلى لماذا تحترم الطبيعة مبدأ التنازلي المرافق لها. لكن ذلك يبدو بالتأكيد وكأنه تقدُّم، وخاصة عندما يبدو التنازلي موضع السؤال طبيعياً بشكل جلي. فمثلاً، لماذا نتعامل مع إطار مرجعي لمشاهد معين بصورة مختلفة عن إطار آخر؟ وبينما الأمر أكثر منطقية أن تعامل كل قوانين الكون جميع النقاط التفاضلية التي شاهدتها بالتساوي؛ وهو ما يتم من خلال مبدأ التكافؤ وإدخال الجاذبية في بنية الكون. وعلى الرغم من أن الأمر يتطلب خلفية رياضية معينة لتنقلبه تماماً، كما أشرنا في الفصل الخامس، فإن هناك منطقاً مماثلاً وراء التنازليات القياسية التي تقوم عليها القوى اللاجاذبية الثلاث.

وتأخذنا نظرية الأوتار خطوة أخرى على درج أعمق التفسير لأن كل مبادئ التنازلي تلك، وكذلك التنازلي الفائق الآخر، تنبثق من بنيتها. وفي الحقيقة، لو أن

التاريخ اتخد مساراً آخر - وتمكن الفيزيائيون من التوصل إلى نظرية الأوتار منذ عدة قرون - فمن الممكن أن نتصور أن مبادئ التناظر تلك كانت ستكتشف جميعها عن طريق دراسة خواصها. غير أنه لو أخذنا في الاعتبار أنه بينما يقدم لنا مبدأ التكافؤ بعض الفهم عن سبب وجود الجاذبية، وأن التناظر القياسي يعطينا إيماءات عن سبب وجود القوى اللاجاذبية، فإن هذه التناظرات تكون في نظرية الأوتار "نتيجة لها". وعلى الرغم من أن أهمية هذه التناظرات لا تقل بأي شكل من الأشكال، إلا أنها تعتبر جزءاً من النتيجة النهائية لبناء نظرية أعظم كثيراً.

وتقود هذه المناقشة إلى السؤال التالي: هل نظرية الأوتار نفسها نتيجة حتمية لبعض المبادئ الأكثر عمومية - ولكنها ليست بالضرورة مبدأ للتناول - بنفس الطريقة تقريباً التي يؤدي بها مبدأ التكافؤ إلى النسبية العامة بإصرار، أو كما يفضي التناظر القياسي إلى القوى اللاجاذبية؟ وحتى كتابة هذا الكتاب لم يتمكن أحد من أن يدلي بأي شيء مفيد للإجابة عن هذا السؤال. وحتى ندرك أهميته، نحتاج فقط إلى أن نتصور آينشتاين وهو يحاول صياغة النسبية العامة بدون أن تكون لديه الأفكار السعيدة التي حصل عليها في مكتب برن للاحتراعات عام 1907، والتي أوصلته إلى مبدأ التكافؤ. فلم يكن من المستحيل أن يقوم بصياغة النسبية العامة من دون أن تكون لديه هذه البصيرة النافذة الأساسية، لكن الأمر كان سيصبح في غاية الصعوبة بكل تأكيد. ويمدنا مبدأ التكافؤ بإطار تنظيمي محكم ومنهجي وذي مقدرة عالية لتحليل قوى الجاذبية. فوصفنا للنسبية العامة في الفصل الثالث يعتمد بشكل أساسي، مثلاً، على مبدأ التناظر، أما دوره في الصياغة الرياضية الكاملة للنظرية فهو أكثر أهمية.

وحالياً، فإن منظري نظرية الأوتار في وضع مشابه لوضع آينشتاين بدون مبدأ التكافؤ. ومنذ الأفكار الثاقبة لفيزيانو عام 1968، أخذت النظرية تتخد شكلها شيئاً شيئاً بالاكتشافات المتالية وبثورة بعد ثورة. لكن ما زال المبدأ المحوري المنظم الذي يضم هذه الاكتشافات وكل السمات الأخرى للنظرية في إطار واحد شامل ومنهجي - الإطار الذي يجعل وجود كل المكونات المفردة حتمياً بصورة مطلقة - ما زال مفقوداً. وسيكون اكتشاف هذا المبدأ لحظة هامة في مسيرة تطور نظرية الأوتار، كما أنه سيكشف جوهر النظرية وطريقة عملها بوضوح غير متوقع. ومن الطبيعي أنه لا يوجد ضمان لوجود مثل هذا المبدأ، لكن تطور الفيزياء خلال المائة عام الماضية يشجع منظري نظرية الأوتار على أن يكون لديهم عظيم الأمل في وجوده. وعندما ننظر إلى الخطوة التالية في تطور نظرية الأوتار نجد أن "مبدأ الحتمية" (Principal of Inevitability) الخاص بها - الذي يمكن وراء الفكرة التي

نبعـت منها النـظرـية كـكـل بالـضـرـورة - لـه الأـولـيـة العـظـمـى⁽²⁾.

ثـانـيـاً: ما هو المـكان والـزـمان فـي الـوـاقـع ، وـهـل مـن المـمـكـن الـعـمـل بـدـونـهـمـا؟

في كـثـيرـ من الفـصـولـ السـابـقـةـ استـخـدمـناـ مـفـاهـيمـ الزـمـانـ وـالـمـكـانـ بـحـرـيـةـ.ـ فـيـ الفـصـلـ الثـانـيـ وـضـعـنـاـ تـيـقـنـ آـيـنـشـتاـينـ مـنـ أـنـ الزـمـانـ وـالـمـكـانـ مـنـسـوـجـانـ فـيـ نـسـيجـ واحدـ لـأـفـكـاـكـ مـنـهـ بـوـاسـطـةـ الـحـقـيقـةـ غـيرـ المـتـوقـعـةـ عـنـ أـنـ حـرـكـةـ الـجـسـمـ خـلـالـ المـكـانـ تـؤـثـرـ فـيـ مـسـارـهـ خـلـالـ الزـمـانـ.ـ أـمـاـ فـيـ الفـصـلـ الثـالـثـ فـقـدـ عـمـقـنـاـ فـهـمـنـاـ لـدـورـ التـفـصـيلـيـ لـنـسـيجـ الزـمـكـانـ يـنـقـلـ قـوـىـ الـجـاذـبـيـةـ مـنـ مـكـانـ لـآـخـرـ.ـ وـقـدـ أـسـتـ الـاضـطـرـابـاتـ الـكـمـيـةـ الـعـنـيفـةـ فـيـ الـبـنـيـةـ الـمـجـهـرـيـةـ لـنـسـيجـ،ـ كـمـ شـرـحـنـاـ فـيـ الفـصـلـينـ الثـالـثـ وـالـرـابـعـ،ـ الـحـاجـةـ إـلـىـ نـظـرـيـةـ جـدـيـدةـ،ـ الـأـمـرـ الـذـيـ أـدـىـ إـلـىـ نـظـرـيـةـ الـأـوـتـارـ.ـ وـأـخـيـرـاـ،ـ وـفـيـ عـدـدـ مـنـ الـفـصـولـ الـتـيـ تـلـتـ ذـلـكـ،ـ رـأـيـنـاـ أـنـ نـظـرـيـةـ الـأـوـتـارـ تـنـصـ عـلـىـ

(2) يـرىـ بـعـضـ النـظـرـيـنـ أـنـ هـنـاكـ إـشـارـةـ إـلـىـ هـنـاكـ فـكـرـةـ فـيـ "Holographic Principle"ـ مـبـداـ التجـسيـمـ،ـ وـهـوـ مـفـهـومـ أـوجـدهـ أـصـلـاـ سـاسـكـينـدـ وـالـفـيـزـيـاتـيـ الـهـولـنـدـيـ الـمـتـمـيزـ جـرـارـدـتـ.ـ هـوـفـتـ.ـ وـتـمـاماـ يـوـلدـ الـهـولـوـغـرـامـ صـورـةـ مـرـئـيـةـ ثـلـاثـيـةـ الـأـبـعـادـ مـنـ شـرـيطـ ثـانـيـ الـأـبـعـادـ مـصـمـ خـصـيـصـاـ لـذـلـكـ،ـ فـإـنـ سـاسـكـينـدـ وـتـ.ـ هـوـفـتـ قـدـ اـقـرـحـاـ أـنـ كـلـ الـأـحـدـاثـ الـفـيـزـيـاتـيـةـ الـتـيـ تـعـرـضـ لـهـاـ قـدـ تـكـوـنـ بـالـفـعـلـ مـشـفـرـةـ كـلـيـةـ فـيـ مـعـادـلـاتـ مـعـرـفـةـ فـيـ عـالـمـ ذـيـ أـبـعـادـ أـقـلـ.ـ وـبـالـرـغـمـ مـنـ أـنـ هـذـاـ قـدـ يـبـدوـ غـرـيـباـ مـثـلـ مـحاـوـلـةـ رـسـمـ صـورـةـ لـشـخـصـ مـاـ بـالـنـظـرـ إـلـىـ ظـلـهـ فـقـطـ،ـ فـإـنـاـ قـدـ نـدـرـكـ مـاـ يـعـنـيـهـ ذـلـكـ،ـ وـنـفـهـ جـزـءـاـ مـنـ دـافـعـ سـاسـكـينـدـ وـتـ.ـ هـوـفـتـ،ـ وـذـلـكـ بـاـعـمـانـ الـفـكـرـ فـيـ أـنـتـروـبـيـةـ الـتـقـوبـ السـوـدـاءـ كـمـ جـاءـتـ فـيـ الـفـصـلـ 13ـ.ـ وـلـنـسـتـرـجـعـ أـنـ أـنـتـروـبـيـةـ الـتـقـوبـ السـوـدـاءـ تـحـدـدـ "بـمـسـاحـةـ سـطـحـ"ـ أـفـقـ حـدـثـهاـ -ـ وـلـيـسـ بـالـحـجـمـ الـكـلـيـ لـلـفـضـاءـ الـذـيـ يـحـدـهـ أـفـقـ الـحـدـثـ.ـ وـلـذـلـكـ فـإـنـ عـدـمـ التـرـتـيبـ فـيـ الـتـقـوبـ الـأـسـوـدـ،ـ وـبـالـتـالـيـ الـمـعـلـومـاتـ الـمـقـاـبـلـةـ الـتـيـ يـحـتـويـهـاـ،ـ مـشـفـرـةـ فـيـ بـيـانـاتـ ثـانـيـةـ الـأـبـعـادـ مـسـاحـةـ السـطـحـ.ـ وـبـيـدـوـ الـأـمـرـ وـكـانـ أـفـقـ الـحـدـثـ لـلـتـقـوبـ الـأـسـوـدـ يـعـملـ مـثـلـ هـولـوـغـرـامـ،ـ وـذـلـكـ بـاـقـتـاصـ كـلـ مـحتـوىـ الـتـقـوبـ الـأـسـوـدـ ذـيـ الـثـلـاثـةـ أـبـعـادـ الدـاخـلـيـةـ مـنـ الـمـعـلـومـاتـ.ـ وـقـدـ عـمـ سـاسـكـينـدـ وـتـ.ـ هـوـفـتـ هـذـهـ فـكـرـةـ عـلـىـ كـلـ الـكـونـ،ـ وـذـلـكـ بـاـقـتـراحـ أـنـ كـلـ مـاـ يـحـدـثـ فـيـ "داـخـلـ"ـ الـعـالـمـ هـوـ مـجـرـدـ انـعـكـاسـ لـبـيـانـاتـ وـمـعـادـلـاتـ مـحدـدـةـ عـلـىـ سـطـحـ بـيـدـ يـحـدـهـاـ.ـ وـحـدـيـنـاـ،ـ فـإـنـ الـأـبـحـاثـ الـتـيـ أـجـراـهـاـ جـوـانـ مـالـدـاـسـيـنـاـ،ـ الـفـيـزـيـاتـيـ مـنـ جـامـعـةـ هـارـفارـدـ مـعـ الـأـبـحـاثـ الـهـامـةـ الـتـيـ تـلـتـ ذـلـكـ بـوـاسـطـةـ وـيـتنـ وـالـفـيـزـيـاتـيـنـ مـنـ جـامـعـةـ بـرـنـسـتونـ سـتـيفـنـ جـاسـبرـ،ـ وـإـيـغـورـ كـلـيـانـوفـ،ـ وـأـلـكـسـنـدـرـ بـولـياـكـوفـ،ـ قـدـ بـيـنـتـ أـنـهـ عـلـىـ أـفـقـ فـيـ حـالـاتـ مـعـيـنةـ،ـ تـضـمـنـ نـظـرـيـةـ الـأـوـتـارـ "مـبـداـ التجـسيـمـ"ـ.ـ وـبـطـرـيـقـةـ تـخـضـعـ حـالـياـ لـدـرـاسـاتـ مـسـتـفـيـضـةـ،ـ يـبـدوـ أـنـ فـيـزـيـاءـ الـكـونـ الـمـحـكـمـةـ بـنـظـرـيـةـ الـأـوـتـارـ تـمـيـزـ بـاـنـ لـهـاـ تـوـصـيـفـاـ مـكـافـيـاـ يـتـضـمـنـ فـقـطـ الـفـيـزـيـاءـ الـتـيـ تـجـرـىـ عـلـىـ مـثـلـ هـذـاـ سـطـحـ المـحـدـدـ -ـ سـطـحـ بـالـضـرـورةـ لـأـبـعـادـ أـقـلـ مـاـ فـيـ الـدـاخـلـ.ـ وـقـدـ اـقـرـحـ بـعـضـ مـنـظـرـيـ نـظـرـيـةـ الـأـوـتـارـ،ـ أـنـ الـفـهـمـ الـكـامـلـ لـمـبـداـ التجـسيـمـ وـدـورـهـ فـيـ نـظـرـيـةـ الـأـوـتـارـ قـدـ يـؤـديـ إـلـىـ الثـورـةـ الثـالـثـةـ لـلـأـوـتـارـ الـفـاقـحةـ.

أن للعالم أبعاداً كثيرة، أكثر مما كنا على دراية به، وبعض هذه الأبعاد متجمدة في أشكال دقيقة لكنها معقدة، يمكن أن تحدث لها تحولات غريبة تتخلص وتتمزق أثناءها هذه الأبعاد ثم تصلح من نفسها.

وقد حاولنا من خلال الرسوم التوضيحية مثل الأشكال أرقام (3-4)، (3-6)، و(8-10)، أن نصور هذه الأفكار بأن تخيل نسيج الفضاء والزمان كما لو كان قطعة من القماش ثم تفصيل الكون منها. ولهذه الصور مقدرة عالية على التفسير، فهي تستخدم بانتظام بواسطة الفيزيائيين كدليل مرئي في أبحاثهم التقنية. ومع أن التحديق في الأشكال مثل تلك التي ذكرناها الآن يعطي انطباعاً تدريجياً بالمعنى، إلا أن المرء ما زال يتساءل ما الذي تعنيه بالضبط بكلمة نسيج الكون؟

وهو سؤال وجيه كان مجالاً للجدل على مدى مئات السنين بشكل أو باخر. أعلن نيوتن أن المكان والزمان أبديان، وأنهما مكونان غير قابلين للتغيير في تركيب الكون، وأنهما بنية تقعان خارج حدود أية أسئلة أو تفسيرات. وكما كتب نيوتن في كتابه "برينسيبيا" (Principia)، "يظل المكان المطلق في طبيعته الخاصة من دون أية صلة بأي شيء خارجي، يظل دائماً هو نفسه وبلا حراك. ويناسب الزمن الرياضي المطلق وال حقيقي انتلاقاً من طبيعته وبرصانة من دون التأثر بأي شيء خارجي".⁽³⁾ لكن غوتفرайд لا يبنيز وآخرين قد اختلفوا مع نيوتن بشدة زاعمين أن المكان والزمان هما مجرد أمران لحفظ موجز العلاقات بين الأشياء والأحداث في نطاق الكون بشكل مريح. فموقع أي جسم في المكان والزمان يكتسب معنى فقط بعلاقته بالآخرين. وليس المكان والزمان إلا مفردات لهذه العلاقات ولا شيء آخر. ومع أن وجهة نظر نيوتن قد تدعمت بالنجاحات التجريبية لقوانين الحركة الثلاثة، واحتفظت بسلطتها لأكثر من مائتي عام، إلا أن مفهوم لا يبنيز، الذي طوره الفيزيائي النمساوي إرنست ماتش، أقرب كثيراً إلى الصورة الحالية. وكما رأينا فإن نظرية النسبية الخاصة وال العامة لأنشتاين قد أزاحتا بعيداً المفهوم الكوني المطلق للزمان والمكان. غير أننا نتساءل عما إذا كان المموج الهندسي للزمكان الذي يلعب دوراً أساسياً في النسبية العامة وفي نظرية الأوتار هو فقط وحده الاختزال المريح للعلاقات الفضائية والزمانية بين الواقع المختلفة، أم أننا يجب أن ننظر إلى أنفسنا على أننا ضمن "شيء ما" عندما نشير إلى انغماسنا في نسيج الزمكان.

Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*, 2 vols., Translated by Andrew Motte and Florian Cajori (Barkely, CA: University of California Press, 1962), vol. I, p. 6.

وبالرغم من أننا نتجه نحو منطقة تخمينية، إلا أن نظرية الأوتار تقدم إجابة على هذا السؤال. فالغرافيتون الذي يعتبر أصغر حزمة من قوى الجاذبية، هو نسق معين من أنساق الاهتزازات الوترية. وكما في حالة المجال الكهرومغناطيسي مثل الضوء المرئي الذي يتكون من عدد هائل من الفوتونات، فإن مجال الجاذبية يتكون هو الآخر من عدد هائل من الغرافيتونات - أي من عدد هائل من الأوتار التي تمارس النسق الاهتزازي للغرافيتون. وتشفر المجالات الجاذبية بدورها في اعوجاج (تشوهات) نسيج الزمكان، وعليه فإننا مضطرون لتحديد نسيج الزمكان نفسه بعدد هائل من الأوتار التي تمارس جميعها نفس أنساق الغرافيتون الاهتزازية المرتبة. وفي لغة مناسبة لهذا الموضوع، يطلق على مثل هذا العدد الهائل المرتب من الأوتار التي تتذبذب بنفس الشكل "حالة تماسك الأوتار" (Coherent State). إنها بالأحرى صورة شاعرية - فالأوتار في نظرية الأوتار مثل خيوط نسيج الزمكان - لكن لا بد من الإشارة إلى أن معناها الحقيقي ما زال علينا أن نتوصل إليه بشكل كامل.

ومع ذلك، فإن وصف نسيج الزمكان في إطار صورة هذه الأوتار المحاكاة بعضها مع بعض يقودنا إلى التعرض للسؤال التالي. فآية قطعة عادمة من نسيج هي نتاج نهائي لمجموعة من خيوط متفرقة تم نسجها بعناية ، وهي المادة الأولية للنسيج المألوف. وبالمثل يمكن أن نتساءل عما إذا كان هناك أسلاف أولية لنسيج الزمان - تشكيلة من أوتار نسيج الكون التي لم تلتئم بعد في الشكل المنظم الذي نعرفه باسم الزمكان. وتتجدر ملاحظة أن تصوير الكتلة غير المنتظمة للأوتار المتذبذبة المختلفة التي ما زالت لم تلتئم بعضها مع بعض بعد في نسيج مرتب يعتبر أمراً غير دقيق إلى حد ما، وذلك لأنه في إطار طريقتنا المعتادة في التفكير فإن ذلك يقترح مفهوماً مسبقاً للمكان والزمان - المكان الذي يتذبذب فيه الوتر وانسياب الزمن الذي يسمح لنا بتتبع التغير في الشكل من لحظة لأخرى. غير أنه في الحالة الأولية، وقبل أن تنتظم الأوتار التي تشكل النسيج الكوني في رقصة اهتزازية منتظمة ومتاغمة، ليس هناك "إدراك للمكان أو الزمان". وحتى لغتنا قاصرة عن التعامل مع هذه الأفكار، لأنه في الحقيقة لا يوجد مفهوم لكلمة "قبل". وبشكل ما، فإن الأوتار المتفرقة هي بمثابة "كسرات" من المكان والزمان، ولا يتضح المفهوم المتفق عليه للمكان والزمان إلا بعد أن تندمج هذه الأوتار في اهتزازات متجانسة.

ويقف المرء عاجزاً عن تخيل مثل هذه الحالة البدائية للوجود والتي بلا بنية معينة، تلك الحالة التي ليس لها مفهوم عن المكان أو الزمان كما نعرفهما (وهو

ما أعنيه أنا نفسي). وكما كتب ستيفن رايت عن المصور الذي كان مهووساً بالحصول على صورة من قرب للأفق، فإننا نواجه صداماً مع الأمثلة عندما نحاول تخيل عالم لا يحتوي بشكل أو بآخر مفاهيم للمكان أو الزمان. ومع ذلك، فمن الأرجح أننا لا بد من أن نتفق مع مثل هذه الأفكار ونفهم استخداماتها قبل أن ندرك تماماً نظرية الأوتار. والسبب في ذلك يمكن في أن صياغتنا الحالية لنظرية الأوتار تفترض مسبقاً وجود المكان والزمان اللذين تتحرك داخلهما الأوتار وتتذبذب (وكذلك بقية المكونات الموجودة في نظرية- M). ويسمح لنا ذلك باستنتاج الخواص الفيزيائية لنظرية الأوتار في عالم له بعد زماني واحد، وعدد معين من الأبعاد الفضائية الممتدة (عادة تؤخذ على أنها ثلاثة)، وأبعاد إضافية متعددة في أحد الأشكال التي تسمح بها معادلات النظرية. ويشبه ذلك إلى حد ما تقويم موهبة ابتكار فنانة يطلب منها أن تقوم بنقل لوحة من مجموعة مرقمة. فإنها بلا جدال ستضيف هنا وهناك لمسة شخصية، لكننا بتقييدنا لعملها بشدة ملزمة، لا نرى تماماً كل موهبتها ما عدا قدر ضئيل منها. وبالمثل، وحيث أن عظمة نظرية الأوتار تكمن في تضمينها الطبيعي لميكانيكا الكم والجاذبية، وحيث أن الجاذبية مرتبطة بشكل المكان والزمان، فلا يجب أن نقيد النظرية بإجبارها على العمل داخل إطار للمكان موجود بالفعل. فإذا سمحنا للفنانة بأن ترسم لوحتها على قطعة خيش بحرّية، فإن علينا أن نسمح لنظرية الأوتار بأن تضع لنفسها بنفسها ساحة الزمكان وذلك بالبدء من تركيبة لا مكان ولا زمان فيها.

والأمل معقود في أن النظرية ستتصف عالماً تطور إلى شكل ظهرت فيه خلفية متماسكة من الاهتزازات الوترية مؤدية إلى المفهوم المتفق عليه للمكان والزمان، وذلك بدءاً من نقطة البداية الخالية - التي من المحتمل أن تكون في عصر سابق للانفجار الهائل (إذا كان في استطاعتنا استخدام مصطلحات تتعلق بالزمان لعدم وجود إي إطار لغوي آخر). فإذا كان مثل هذا الإطار موجوداً، فإنه سيبين أن المكان والزمان، وبالتالي أيضاً الأبعاد، ليست كلها عناصر أساسية محددة للكون. وبالأخر فإنها مفاهيم مريرة نبعث من حالات أولية أساسية مغفرة في السلفية.

وقد أظهرت البحوث الرائدة حول سمات نظرية- M التي قادها عدد كبير من الفيزيائيين ومنهم ستيفن شينكر وإدوارد ويتن وتوم بانكس وويلي فيشر وليونارد ساسكيند، أن هناك شيئاً ما يعرف باسم الغشاء صفر (بران-صفر) - من المحتمل أن يكون هو العنصر الأساسي في نظرية- M ، وهو الشيء الذي يسلك إلى حد ما مثل الجسيمة النقطة في المسافات الكبيرة، لكن له صفات مختلفة جذرياً في المسافات القصيرة - يمكن أن يقدم لنا لمحات عن دنيا اللامكان

واللازمان. وقد كشفت أبحاثهم أنه بينما تبيّن لنا الأوتار أن المفاهيم المتفق عليها للمكان تعجز عن كشف ما تحت مقاييس بلانك، فإن الغشاء صفر (بران - صفر) يعطي نفس النتيجة في الأساس ويلقي بصيغة من الضوء على إطار جديد غير مألف والذي سيتسيد الموقف. وقد بنيت الدراسات التي أجريت على هذه الأغشية الصفرية أن الهندسة العادية ستحول محلها شيء ما يعرف باسم الهندسة اللاتبادلية (Noncommutative)، وهي قطاع من الرياضيات تطور في معظمها بواسطة عالم الرياضيات الفرنسي آلان كونز⁽⁴⁾. وفي هذا الإطار الهندسي تختفي المفاهيم المتفق عليها للمكان والمسافات بين النقاط وتتركتنا بمفاهيم مختلفة تماماً عن المكان. ومع ذلك، إذا ركزنا انتباها على أطوال أكبر من طول بلانك، أظهر الفيزيائيون أن مفهومنا التقليدي للمكان يعود إلى الظهور بالفعل. ومن المرجح أن إطار الهندسة اللاتبادلية ما زال بعيداً عن حالة بلانك الحالية التي أشرنا لها من قبل بعدة خطوات ملحوظة، لكنها تقدم إشارة من الإطار الأكثر شمولاً الذي من المحتمل أن يضم المكان والزمان.

ومن أهم الموضوعات التي تواجه منظري نظرية الأوتار إيجاد الأدوات الرياضية الصحيحة لصياغة نظرية الأوتار من دون العودة إلى مفهوم ما قبل وجود المكان والزمان. وفهمنا للكيفية التي يزعج بها المكان والزمان سيأخذنا خطوة عظيمة نحو الإجابة عن السؤال المحوري حول أي الصيغة الهندسية هي التي يزغت بالفعل.

ثالثاً: هل تؤدي نظرية الأوتار إلى إعادة صياغة ميكانيكا الكم؟

تحكم مبادئ ميكانيكا الكم في الكون بدقة خيالية. ومع هذا، فإن الفيزيائيين عند صياغتهم للنظريات على مدى نصف القرن الماضي، اتبعوا استراتيجية تضع ميكانيكا الكم في المرتبة الثانية إلى حد ما. وعند وضع النظريات، يبدأ الفيزيائيون غالباً في العمل بلغة كلاسيكية بحثة تهمل الاحتمالات الكممية والدلالات الموجية وما شابه ذلك - اللغة التي تناسب تماماً الفيزيائيين من عصر ماكسويل وحتى عصر نيوتن - ثم يأخذون بعد ذلك في وضع المفاهيم الكممية في الإطار الكلاسيكي. وليس هذا المنطلق مفاجأة بالتحديد، حيث إنه يعكس مباشرة خبراتنا.

(4) إذا كنت على دراية بالجبر الخطي، فإن إحدى الطرق البسيطة والمناسبة للتفكير في الهندسة اللاتبادلية هو استبدال المحاور الديكارتية المعروفة - التي تستبدل بعملية الضرب - بواسطة مصفوفات لا يحدث لها ذلك.

ولأول وهلة يبدو الكون محكوماً بقوانين متقدمة في المفاهيم الكلاسيكية مثل كون الجسيمة لها موقع محدد وسرعة محددة في آية لحظة من الزمن. ولم تتحقق من أن علينا أن نعدل مثل هذه الأفكار الكلاسيكية المألوفة إلا بعد عمل شاق على المستوى микروسكوبى التفصيلي. وقد تطورت عملياتنا للاستكشاف من الإطار الكلاسيكي إلى إطار آخر تم تعديله بواسطة الاكتشافات الكمومية، وقد ظهر صدى هذا التطور في الطريقة التي يبني بها الفيزيائيون نظرياتهم حتى يومنا هذا.

وهذا بالتأكيد هو الحال في ما يتعلق بنظرية الأوتار. فتبعد الصياغة الرياضية التي تصف نظرية الأوتار بمعادلات تصف حركة قطعة خيط تقليدية في غاية الدقة والصغر والرقة - المعادلات التي كان في مقدور نيوتن كتابتها منذ حوالي 300 سنة مضت. وقد تمت كنتمة (Quantized) هذه المعادلات بعد ذلك. أي أن المعادلات الكلاسيكية قد تحولت إلى إطار من ميكانيكا الكم يتضمن الاحتمالات وعدم التيقن والاضطرابات الكمومية وغيرها مباشرة، وذلك بطريقة منهجية طورها الفيزيائيون على مدى أكثر من خمسين سنة. وفي الواقع قد رأينا في الفصل 12 ممارسة هذه الطريقة بالفعل: عمليات الحلقة (في الشكل رقم (12-6)) تتضمن مفاهيم كمية - التخلص اللحظي الكمي لأزواج الأوتار الافتراضية - حيث يحدد عدد الحلقات الدقة التي تتحدد بها التأثيرات الكمومية.

كانت استراتيجية البدء بالوصف النظري الكلاسيكي ثم إتباعه بتضمين سمات ميكانيكا الكم ذات فوائد جمة لسنوات عديدة. فهذه الاستراتيجية مثلاً تكمن في أساس النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات. لكن من المحتمل أن تكون هذه الطريقة محافظة أكثر من اللازم، فهناك أدلة متنامية على ذلك عند التعامل مع نظريات متقدمة مثل نظرية الأوتار ونظرية- M . والسبب في ذلك أنه عندما نقر بأن العالم محكم بمبادئ ميكانيكا الكم، فإن على نظريانا أن تكون هي الأخرى خاضعة لمبادئ ميكانيكا الكم منذ البداية. ولقد نجحنا في البدء بالمنظور الكلاسيكي حتى الآن لأننا لم نختبر الكون عند مستويات بهذا العمق، وبالتالي فإن هذا المنطلق التقريري لم يكن يخدعنا في السابق. غير أنه على المستوى العميق لنظرية الأوتار/ M -، ربما تكون قد وصلنا إلى نهاية المطاف في استخدامنا لهذه الاستراتيجية.

ويمكن أن نجد أدلة معينة على ذلك بإعادة النظر في بعض الأفكار التي نبعت من ثورة الأوتار الفائقة الثانية (كما أوجزنا في الشكل رقم (11-12) مثلاً). وكما ناقشنا في الفصل 12، فإن الثانية الكامنة وراء وحدة نظريات الأوتار الخمس تبين أن العمليات الفيزيائية التي تحدث في آية صياغة لنظرية الأوتار، يمكن إعادة

تحليلها في سياق ثنائية أية نظرية أخرى. وستبدو إعادة الصياغة تلك، لأول وهلة لا علاقة لها بالوصف الأصلي، لكن، في الحقيقة، فهذا يمثل ببساطة مقدرة الثنائيات عند تطبيقها: فمن خلال الثنائيات يمكن وصف عملية فيزيائية معينة بعدد كبير من الطرق المختلفة. وهذه النتائج دقيقة وجديرة باللحظة، لكننا لم ننشر بعد إلى أكثر صفاتها أهمية.

فإذا أخذنا التحولات الثنائية، والتي غالباً ما تم خلال عمليات تعتمد بقوة على ميكانيكا الكم، التي يتم وصفها في إحدى النظريات الخمس للأوتار، (مثلاً العملية المتضمنة للتداخلات، التي لم تكن لتحدث إذا كان العالم محكماً بالفيزياء الكلاسيكية وليس الفيزياء الكمية) ونعيد تشكيلها كعملية تعتمد بشكل ضعيف على ميكانيكا الكم من منظور إحدى النظريات الأخرى للأوتار (مثلاً العملية التي تتأثر خواصها العددية التفصيلية بالاعتبارات الكمية، لكن صورتها الكيفية تناظر ما كان يمكن أن تكون عليه في عالم كلاسيكي بحت). ويعني ذلك أن ميكانيكا الكم متشابكة بشدة داخل تنازلات الثنائيات التي تكمن في أساس نظرية الأوتار /-M. إنها في صلبها تنازلات كمية، حيث أن أحد التوصيفات الثنائية يتأثر بشدة بالاعتبارات الكمية. ويشير ذلك بقوة إلى أن الصياغة الكاملة لنظرية الأوتار /-M، - الصياغة التي تتضمن أساساً تنازلات الثنائيات المكتشفة حديثاً - لا يمكن أن نبدأها بطريقة كلاسيكية ثم نعالجها بعد ذلك كمياً، بالطريقة التقليدية. فإن البدء بالطريقة الكلاسيكية سيحمل تماماً التنازلات الثنائية، حيث إنها تصبح صحيحة فقط عندما تؤخذ ميكانيكا الكم في الاعتبار. ويبدو أن الصياغة الكاملة لنظرية الأوتار /-M لا بد من أن تحطم القالب التقليدي وتتفز إلى الوجود على شكل نظرية كمية تامة البناء.

وحالياً لا يعرف أحد كيف ينجز ذلك. لكن الكثير من منظري نظرية الأوتار يرون أن إعادة صياغة الكيفية التي تتضمن بها المبادئ الكمية في الوصف النظري للعالم هي الطفرة العظمى القادمة في إدراكنا. وكما قال كومرون فافا، "إنني أعتقد أن إعادة صياغة ميكانيكا الكم بشكل يحل الكثير من أحجياتها قريب المنال جداً". وأعتقد أن الكثرين يشاركوني الرأي بأن الثنائيات المكتشفة حديثاً تشير إلى إطار هندسي جديد لميكانيكا الكم، فيه سيكون المكان والزمان والخواص الكمية مرتبطة برباط لا ينفصل⁽⁵⁾. أما إدوارد ويتن فقد قال، "إنني أعتقد أن الحالة المنطقية لميكانيكا الكم ستتغير بشكل يشبه الطريقة التي تغيرت بها الحالة

(5) مقابلة مع كومرون فافا في 12 كانون الثاني /يناير 1998.

المنطقية للجاذبية عندما اكتشف آينشتاين مبدأ التكافؤ. وهذه العملية لم تكتمل بعد لميكانيكا الكم، لكنني أعتقد أن الناس يوماً ما سينظرون إلى الوراء نحو عصرنا على أنه الفترة التي بدأت فيها هذه العملية⁽⁶⁾.

وبتفاؤل حذر يمكننا أن نتخيل أن إعادة صياغة إطار مبادئ ميكانيكا الكم داخل نظرية الأوتار قد تؤدي إلى صياغة أقوى بكثير لها المقدرة على الإجابة عن السؤال كيف بدم العالم، ولماذا توجد هناك أشياء مثل المكان والزمان - الصياغة التي ستأخذنا خطوة أقرب نحو الإجابة عن سؤال لا يميز عن لماذا يوجد شيء ما بدلأ من اللاشيء.

رابعاً: هل يمكن اختبار نظرية الأوتار تجريبياً؟

ومن بين السمات العديدة لنظرية الأوتار التي نقاشناها في الفصول السابقة قد تكون الصفات الثلاث الآتية هي أهمها والتي يجب أن نذكرها جيداً. الصفة الأولى، الجاذبية وميكانيكا الكم أجزاء متكاملة بعضها من بعض في كيفية سير الكون، وبالتالي فإن أيهـ نظرية موحدة ذات معنى لا بد أن تتضمنهما. وتنفي نظرية الأوتار بهذا. الصفة الثانية، كشفت دراسات الفيزيائيين خلال القرن الماضي أن هناك أفكاراً أخرى رئيسية - تم التتحقق من معظمها تجريبياً - تبدو مركبة في فهمنا للكون. وتتضمن هذه الأفكار مفاهيم الحركة المغزلية، وبنية عائلة جسيمات المادة، والجسيمات المراسلة، والانتاظر القياسي، ومبدأ التكافؤ، وانهيار التانتاظر، والانتاظر الفائق، وهي قليل من كثير. وتتبع كل هذه المفاهيم طبيعياً من نظرية الأوتار. الصفة الثالثة، وعلى عكس النظريات المتفق عليها، مثل النموذج القياسي الذي يضم 19 مؤشراً حراً من الممكن تعديلهـ لتؤكد التوافق مع القياسات التجريبية، فإن نظرية الأوتار ليس لها مؤشرات قابلة للتعديل. ومن ناحية المبدأ، فإن تضمينات النظرية لا بد من أن تكون محددة كلية - لا بد من أن تمدنا باختبارات لا غموض فيها حول ما إذا كانت النظرية نفسها صحيحة أم لا.

والطريق الذي ينقلنا من عبارة "من ناحية المبدأ" (النتائج النظرية) إلى عبارة "عملياً" في الحقيقة محفوف بالمخاطر. وقد شرحنا في الفصل 9 بعض هذه المعوقات التقنية مثل تحديد شكل الأبعاد الإضافية التي تتعرض طريقتنا. وقد شرحنا في الفصلين 12 ، 13 هذه المعوقات وغيرها بمفهومها العريض وفي ضوء حاجتنا لفهم دقيق لنظرية الأوتار، الذي يقودنا طبيعياً نحو نظرية-M وبلا شك

(6) مقابلة مع إدوارد ويتن في 11 أيار / مايو 1998.

فإن الوصول إلى الفهم الكامل لنظرية الأوتار / M يتطلب مجهوداً شاقاً وكماً كبيراً من التفوق الذهني.

وفي كل خطوة على الطريق كان منظرو نظرية الأوتار يبحثون وسيظلون يبحثون عن النتائج التي يمكن الحصول عليها تجريبياً من نظرية الأوتار. وعلينا ألا نغمض أبصارنا عن الاحتمالات البعيدة لإيجاد البراهين على نظرية الأوتار التي ناقشناها في الفصل 9. وغير ذلك، فإننا كلما تعمقنا في فهم هذه النظرية سيكون هناك بلا جدال عمليات أخرى نادرة أو صفات لنظرية الأوتار تقدم بسمات أخرى تجريبية غير مباشرة.

والأمر الأكثر جدارة باللحظة هو التأكد من التناظر الفائق عن طريق اكتشاف الجسيمات الشركاء الفائقة كما ناقشنا ذلك في الفصل 9، الذي يعد علامة بارزة على طريق نظرية الأوتار. ولنذكر أن التناظر الفائق قد تم اكتشافه في سياق الدراسات النظرية لنظرية الأوتار، وأنه جزء أساسي في النظرية. وسيكون التأكد منه تجريبياً دليلاً قاطعاً على صحة نظرية الأوتار وإن يكن ظرفياً. والأكثر من ذلك، فإن اكتشاف الجسيمات الشركاء الفائقة سيقدم خطوة عظيمة، حيث أن اكتشاف التناظر الفائق سيكون له أثر أكبر كثيراً من مجرد الإجابة عن السؤال بنعم أو لا حول ملامته لعالمنا. وستكشف كتل وشحنات الجسيمات الشركاء الفائقة الطريق التفصيلي لتضمين التناظر الفائق في قوانين الطبيعة. وفي هذه الحالة سيواجه منظرو نظرية الأوتار تحدياً حول ما إذا كان هذا التضمين يمكن إدراكه ككلية أو تفسيره بواسطة نظرية الأوتار. ومن الطبيعي أن تكون أكثر تفاؤلاً ونأمل خلال العقد القادم أن يكون إدراكتنا لنظرية الأوتار قد تقدم بما فيه الكفاية - قبل إطلاق معجل هادرون الكبير في جنيف Large Hadron Collider - ليمكننا من التنبؤ تفصيلاً بالشركاء الفائقيين قبل اكتشافهم المأمول. وسيكون التأكد من مثل هذه التنبؤات لحظة بارزة عظيمة في تاريخ العلم.

خامساً: هل هناك حدود للتفسير؟

يعتبر تفسير كل شيء، وحتى بالمعنى العام لفهم كل سمات القوى والمكونات الأولية للكون، واحداً من أعظم التحديات التي يواجهها العلم. ولأول مرة تمنحنا نظرية الأوتار الفائقة إطاراً يبدو أن له عمقاً كافياً لمواجهة هذا التحدي. لكن هل ستتحقق من كل ما تعدد به النظرية بالكامل، مثل حساب كتلة الكواركات أو شدة القوى الكهرومغناطيسية، وهي الأعداد التي تفرض قيمتها الكثير من عالمنا؟ وكما في المقطع السابق، فإن علينا أن نتخطى العقبات النظرية العديدة في

الطريق إلى هذه الأهداف - وأكثرها أهمية هو التوصل إلى صياغة لا اضطرابية كاملة لنظرية الأوتار / M-.⁽⁷⁾

ولكن هل من المحتمل ، حتى لو كان لدينا فهم دقيق لنظرية الأوتار / M- في إطار جديد لصياغة أكثر شفافية لميكانيكا الكم ، أن نفشل مع ذلك في مسألة حساب كتلة الجسيمات وشدة القوة؟ وهل من المحتمل أن نظل نعول على القياسات التجريبية بدلاً من الحسابات النظرية للتوصيل لهذه القيم؟ وما هو أكثر من ذلك ، هل من المحتمل أن هذا الفشل لا يعني أننا بحاجة إلى نظرية أعمق ، لكنه ببساطة يعكس عدم وجود تفسير لهذه الخواص الظاهرة في الواقع؟

وإحدى الإجابات اللحظية عن هذه الأسئلة هي نعم. وكما قال آينشتاين: "إن أقل الأشياء فهماً عن الكون هو كونه شاملًا".⁽⁷⁾ وفي عصرٍ سريع التقدم المؤثر سرعان ما تخبو دهشتنا تجاه مقدرتنا على فهم العالم كليّة. ومع ذلك فقد يكون هناك حد للفهم الشامل. وربما علينا أن نقبل أنه بعد الوصول لأعمق المستويات الممكنة التي يقدمها العلم ، ما زالت هناك مع ذلك أمور في الكون من دون تفسير. وربما علينا أن نقبل أن هناك سمات معينة للكون هي على ما هي عليه بالصدفة أو نتيجة حادث أو هي اختبار إلهي. وقد شجعنا نجاح المنهج العلمي في الماضي على أن نعتقد أنه لو توفر الزمن الكافي والجهد فإننا قادرّون على اكتشاف ما غمض من الطبيعة. لكن الوصول إلى الحد الأقصى المطلّق للتفسير العلمي - ليس عقبة تقنية ولا النهاية الحالية للفهم المتقدم عند الإنسان - سيمثل حدثاً متفرداً ، وهو الحدث الذي لا يمكن أن تكون مستعدّين له بخبرتنا الماضية.

ومع أن ذلك يتوااءم مع مسألة النظريّة النهايّة ، إلا أنه موضوع لا نستطيع التوصل إلى حل له بعد ، وبالفعل فإن احتمال وجود حدود للتفسير العلمي ، بالمعنى العريض الذي ذكرناه ، أمر يمكن ألا نصل إليه أبداً. ولقد رأينا على سبيل المثال ، أنه حتى المفهوم التخميني للكون المتعدد ، يبدو لأول وهلة أنه يقدم نهاية محددة للتفسير العلمي ، يمكن التعامل معه بتصور نظريّات على نفس القدر من التخمينيّة ، على الأقل من ناحيّة المبدأ ، تكون لها القدرة على استعادة المقدرة التنبئية.

وأحد الأمور الهامة التي بزغت من هذه الاعتبارات هو دور الكوسموLOGIA

(7) مقتطف من: Banesh Hoffman and Helen Dukas, *Albert Einstein: Creator and Rebel* (New York: Viking, [1972]), p. 18.

في تحديد تطبيقات نظرية نهائية. وكما ناقشنا، فإن كوسموЛОجية الأوتار الفائقة مجال حديث حتى بالمقاييس الحديثة لنظرية الأوتار نفسها. وبلا شك، ستكون مجالاً للأبحاث الأولية لعدة سنوات قادمة، ومن المرجح أن تكون واحدة من المناطق العظمى في هذا المجال. وباستمرار اكتسابنا لأفكار جديدة حول خواص نظرية الأوتار/-M فإن مقدرتنا على تقويم التطبيقات الكوسمولوجية لهذه المحاولة الشرية تجاه نظرية موحدة ستزداد حدة. وطبعاً أنه من المحتمل أن مثل هذه الدراسات قد تقنعنا يوماً ما بأن هناك بالفعل حداً للتفسير العلمي. غير أنه هناك احتمال عكسي آخر أن توصلنا إلى عصر جديد - عصر نستطيع فيه أن نعلن أننا قد اكتشفنا أخيراً التفسير الأساسي للكون.

سادساً: محاولة الوصول إلى النجوم

على الرغم من أننا مرتبطون تقانياً بالأرض وكذلك بغيرها المباشرين في المجموعة الشمسية، فإننا من خلال المقدرة على التفكير وعلى التجربة قد أخبرنا الآفاق البعيدة للفضاء الداخلي والخارجي. ومن خلال الجهود الجماعية للعديد من الفيزيائيين تم اكتشاف بعض أهم أسرار الطبيعة خلال المائة عام المنصرمة بصفة خاصة. وبمجرد اكتشافها، فإن تلك الجواهر التفسيرية قد فتحت آفاقاً على عالم كنا نتخيل أننا نعرفه، إلا أننا لم نقترب حتى من تخيل عظمته. وأحد مقاييس عمق آية نظرية فيزيائية هو المدى الذي تثير فيه تحديات جدية في مواجهة نظرتنا للعالم، التي بدأ في السابق وكأنها غير قابلة للتغيير. وبهذا المقاييس فإن ميكانيكا الكم والنظريتين النسبيتين لهما من العمق ما يتخطى أكثر توقعاتنا شططاً، مثل: الدلالات الموجية، والاحتمالات، والاتفاق الكمية، وجيشان وهياج التأرجحات التي لا تخدم في الفراغ، والالتحام بين الزمان والمكان، والطبيعة النسبية للتلقائية، وتشوه نسيج الزمكان، والثقوب السوداء، والانفجار الهائل. من كان يتصور أن المنظور الحدسي والميكانيكي الذي يعمل كال الساعة لنيوتن يمكن أن يتحول إلى منظور محدود تماماً - إن هناك عالماً جديداً يشير العقول موجود تحت سطح الأشياء المألوفة لنا مباشرة؟

لكن هذه الاكتشافات التي غيرت عالم الأنماط المألوفة، ما هي إلا جزء من رواية أكبر تشمل كل شيء. ويحاول الفيزيائيون بلا كلل الوصول إلى النظرية الموحدة المراوغة مسلحين بعقيدة قوية في أن القوانين التي تحكم الأشياء الكبيرة والأشياء الصغرى لا بد من أن تتلاءم معاً في وحدة متماسكة. لم ينته البحث بعد، لكن من خلال نظرية الأوتار الفائقة وتطورها إلى نظرية الأوتار/-M، بزغ

أخيراً إطار مقنع قوي يمزج ميكانيكا الكم والنسبية العامة والقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية معاً. والتحديات التي وضعتها هذه التطورات في مواجهة طريقنا السابق لرؤى العالم عظيمة مثل: حلقات الأوتار والكريات المتذبذبة، ودمج كل الكائنات في أنساق اهتزازية تكونت بدقة متناهية في عالم له أبعاد خفية متعددة قادرة على القيام بالتواءات حادة يتمزق خلالها نسيجها الكوني ثم يعيد إصلاح نفسه. من كان يتصور أن دمج الجاذبية وميكانيكا الكم في نظرية موحدة لكل المادة وكل القوى سيؤدي لمثل هذه الثورة في فهمنا لكيفية عمل الكون؟

وبلا شك ما زالت هناك مفاجآت أكبر في الجعبة، تنتظرنا في مواصلتنا البحث عن فهم كامل لنظرية الأوتار يمكن تتبعه حسابياً ، ومن خلال دراستنا لنظرية- M ، رأينا بالفعل لمحات خاطفة لمنطقة جديدة وغريبة من العالم مختبئة تحت طول بلانك، وهي المنطقة التي يحتمل ألا يوجد فيها مفهوم للمكان أو الزمان. وفي أقصى الناحية المضادة الأخرى رأينا أن عالمنا قد يكون واحداً من فقاعات رغوية لا حصر لها على سطح محيط كوني شاسع مضطرب يسمى العالم المتعدد. وتوجد هذه الأفكار في مقدمة التخمينات الحالية، لكنها قد تكون بشيراً بالقفزة القادمة نحو فهمنا للكون.

وإذا ما ركزنا أنظارنا على المستقبل، واستبقنا كل العجائب التي ما زالت في الجubble، فإن علينا أن نسترجع ما سبق ونندهش للرحلة التي قطعناها حتى الآن. فالبحث عن القوانين الأساسية للكون هو دراما بشريّة متميزة، الدراما التي فتحت العقول وأثرت في النفوس. وقد تضمن وصف آينشتاين الجلي لبحثه في فهم الجاذبية، بكل تأكيد كل النضال البشري - "سنوات البحث القلق في الظلام بكل ما فيها من تطلع شديد ولحظات التحول من الثقة إلى الإرهاق، ثم أخيراً الخروج إلى الضوء"⁽⁸⁾. وكلنا، كل واحد منا بطريقته، باحثون عن الحقيقة، وكل واحد منا يتطلع إلى الإجابة عن السؤال لماذا نحن هنا. وبصعودنا الجماعي نحو قمة جبل التفسيرات، فإن كل جيل يقف بثبات فوق أكتاف الجيل السابق متطلعين بشجاعة نحو القمة. فهل يا ترى سيحدث أن ينظر أحد أحفادنا من القمة ليتطلع إلى الكون الآني الشاسع بمنظور لانهائي الوضوح، إنه أمر لا نستطيع التنبؤ به. ولكن كلما صعد جيل لمسافة أعلى، ستدرك مقوله جاكوب برونوفسكي أن "هناك نقطة تحول في كل سن، وطريقة جديدة لرؤيه وتأكيد تماسك العالم"⁽⁹⁾.

R. W. Clark, "Einstein: The Life and Times," *Science*, no. 174, pp. 1315-1316. (Martin J. Klein) (8)

Jacob Bronowski, *The Ascent of Man* (Boston: Little, Brown, 1973), p. 20.

(9)

وهكذا، كما يندهش جيلنا برؤيتنا الجديدة للعالم - طريقتنا الجديدة لتأكيد تماسك العالم - فإننا ننفذ بذلك الجزء الخاص بنا، مساهمين بدرجة في سلم البشرية المتطلعة نحو النجوم.

الثبت التعريفي

Two-Brane

الثان بران (غشاء)
انظر بران (غشاء).

Weakly Coupled

الاذدواج الضعيف
النظيريات التي لها ثابت ازدواج الوتر أقل من 1.

Strongly Coupled

ازدواج بقوة (قوية الازدواج)
النظيرية التي فيها ثابت ازدواج الوتر أكبر من 1.

Radiation

إشعاع
الطاقة المحمولة على جسيمات أو موجات.

Electromagnetic radiation

الأشعاع الكهرومغناطيسي
الطاقة التي تحملها الموجة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Wave

Event Horizon

أفق الحدث

سطح الثقب الأسود الذي يمرر الأشياء في اتجاه واحد، فإذا اخترقه شيء ما فإن قوانين الجاذبية لن تسمح له بالعودة، فلا فكاك من قبضة الجاذبية الهائلة للثقب الأسود.

Electron

الإلكترون
جسيمة لها شحنة سالبة، توجد عادة تدور في مدارات حول نواة الذرة Atom.

Entropy

الأنتروبيا

مقياس عدم الترتيب في نظام فيزيائي؛ عدد مرات إعادة الترتيب لمكونات نظام تحقق عدم تغير مظهره العام.

Black-Hole Entropy

أنتروبيا الثقب الأسود

الأنتروبيا المتضمنة في الثقب الأسود Black Hole

Quantum Tunneling

الأتفاق الكمية

سمة من سمات ميكانيكا الكم Quantum Mechanics تبين أن الأجسام يمكنها أن تعبر من خلال الحاجز التي لا يمكن أن تسمح بمرور أي شيء تبعاً لقوانين نيوتن الكلاسيكية في الفيزياء.

Big Bang

الانفجار الهائل

النظرية المقبولة حالياً عن أن الكون المتمدد قد بدأ منذ حوالي 15 مليار سنة من حالة غاية في الطاقة والكتافة والانضغاط.

الانهيار الهائل

إحدى فرضيات المستقبل للعالم والتي يتوقف فيها التمدد الحالي ثم ينعكس ويؤدي إلى انهيار كل من الفضاء والمادة معاً، أي عكس الانفجار الهائل Big Bang.

الاهتزاز المتناظم (المتجانس)

الحركة الشاملة للوتر String حيث يتحرك من دون حدوث تغير في شكله.

ATB

"After the Bang"

ما بعد الانفجار الهائل، وتستخدم عادة في الرجوع إلى الزمن المنقضي بعد الانفجار الهائل (نشأة الكون).

Brane

بران (غشاء)

أي واحد من الأجسام الممتدة التي تنشأ من نظرية الأوتار String Theory. واحد - بران عبارة عن وتر String، واثنان - بران غشاء، وثلاثة - بران له ثلاثة أبعاد ممتدة، وهكذا. وعموماً، فإن P- بران له عدد P من الأبعاد الفضائية.

Proton

البروتون

جسيمة لها شحنة موجبة، توجد في نواة الذرة Atom، وتكون من ثلاثة كواركات Quarks (اثنان أعلى وواحد أسفل).

Dimension

بعد

محور مستقل أو اتجاه مستقل في الفضاء أو الزمكان Spacetime. وللفضاء المألوف حولنا ثلاثة أبعاد (يسار - يمين، وخلف - أمام، وأعلى - أسفل) وللزمكان المألوف أربعة أبعاد (الثلاثة السابقة بالإضافة إلى محول الماضي - المستقبل). وتتطلب نظرية الأوتار الفانقة Superstring Theory أن يكون للعالم أبعاد فضائية إضافية.

Curled-Up Dimension

البعد المتجمد

بعد فضائي Dimension ليس له امتداد فضائي ملحوظ، وهو بعد فضائي متعدد ومتغضض ومختلف ذو حجم غاية في الصالة، ولذلك يروغ من محاولات اكتشافه.

Extended Dimension

البعد الممتد

بعد فضائي Dimension (وزمكاني Spacetime) كبير واضح مباشرة، وهو بعد العادي المألوف لنا، عكس البعد المتجمد.

Boson

بوزون

جسيمة أو نسق من اهتزازات الوتر، ويحتوي على عدد صحيح لكمية الحركة المغزلية . Messenger Particle Spin، وهو جسيمة مرسل نموذجية.

Weak Gauge Boson

البوزون القياسي الضعيف

أصغر حزمة في مجال القوة الضعيفة Weak Force Field وهي جسيمة مرسل Weak Force Particle للقوة الضعيفة W أو Z.

Z Boson	بوزون Z
	انظر البوزون القياسي الضعيف . Weak Gauge Boson
W Bosons	بوزونات W
	انظر البوزون القياسي الضعيف . Wave Gauge Boson
Photoelectric Effect	التأثير الكهروضوئي
	الظاهرة التي تطلق فيها الإلكترونات Electrons من سطح فلزي إذا تعرض للضوء.
Quantum Fluctuation / Quantum Field Theory	التأرجحات الكمية
	السلوك المضطرب لنظام على المستوى المجهي بسبب مبدأ عدم التيقن Uncertainty Principle.
Tachyon	تاكيون
	جسيمة لها كتلة (مربع الكتلة) سالبة؛ ويؤدي ظهورها في نظرية ما عموماً إلى عدم الاستقرار.
Curvature	التحدب
	حيود جسم أو فضاء أو زمكان Spacetime من الشكل المستوي (المسطح) Flat وبذلك يحيد عن القواعد الهندسية التي صاغها إقليدس.
Phase Transition	التحول الطوري
	تطور نظام فيزيائي من طور إلى آخر.
Space-Tearing Flop Transition	التحول الفجائي الممزق للفضاء
	انظر التحول المفاجئ Flop Transition.
Conifold Transition	التحول المخروطي
	تطور الجزء الخاص بأشكال كالابي-ياو Calabi-Yau من الفضاء والذي فيه يتمزق نسيجه ثم يعاد إصلاحه، بطريقة متتابعة معقولة ومحبولة فيزيائياً ضمن إطار نظرية الأوتار String Theory، والتمزقات هنا أكثر عنةً من التمزقات الموجودة في التحولات الانقلابية Flop Transition.
Flop Transition	التحول المفاجئ
	تطور الجزء من الفضاء الذي يشغل كالابي-ياو Calabi-Yau والذي يتمزق فيه نسيجه ثم يعيد إصلاح نفسه مؤدياً إلى نتائج فيزيائية هادئة ومحبولة في إطار نظرية الأوتار.
Topology-Changing Transition	تحولات مغيرة للطوبولوجيا
	تطور في النسيج الفضائي يتضمن تمزقات تغير من طوبولوجيا Topology الفضاء.
Primordial Nucleosynthesis	تخليق الأنوية البدائي
	إنتاج الأنوية الذرية الذي يحدث خلال الدقائق الثلاث الأولى بعد الانفجار الهائل Big Bang.

Frequency	التردد عدد الدورات الكاملة التي تصنعها الموجات في الثانية.
Acceleration	تسارع - عجلة التغير في سرعة أو اتجاه جسم، راجع كذلك Velocity (السرعة المتجهة).
Inflation, Inflationary Cosmology	التضخم ، الكوسموЛОجيا التضخمية تعديلات أدخلت على اللحظات المبكرة في الكوسمولوجيا القياسية للانفجار الهائل Big Bang يمر فيها الكون بفترات قصيرة من التمدد الهائل.
Singularity	الفرد الموقع الذي فيه يعاني نسيج الفضاء أو الزمكان Spacetime من التمزق العنيف.
Lorentz Contraction	تضليل لورنس سمة تتبع من النسبية الخاصة Special Relativity يبدو فيها الجسم المتحرك أقصر في اتجاه الحركة.
Time Dilation	تمدد الزمن (استطالة الزمن) صفة تتبع من النسبية الخاصة Special Relativity، حيث يتباطأ سريان الزمن بالنسبة لراصد Observer متحرك.
Symmetry	تناظر خاصية من خواص النظام الفيزيائي التي لا تتغير عندما ينتقل النظام بشكل ما. فمثلاً، سطح الكرة متناظر منطقياً لأن مظهره لا يتغير عند الدوران.
Supersymmetry	التناظر الفائق مبدأ التناظر Symmetry الذي يربط خواص الجسيمات التي لها كمية من الأعداد الصحيحة للحركة المغزلية Spin (بوزونات Bosons) مع تلك الجسيمات التي لها كمية من نصف الأعداد الصحيحة (الفردية) للحركة المغزلية Spin (فيرميونات Fermions).
Strong Force Symmetry	تناظر القوة القوية التناظر القياسي Gauge Symmetry الذي يكمن في أساس القوة القوية Strong Force المصاحبة لعدم التغير في نظام فيزيائي يعاني إزاحة في شحنة اللون للكواركات Quarks.
Gauge Symmetry	التناظر القياسي مبدأ التناظر Symmetry الذي يكمن في أساس الوصف الكمي للقوى اللاحاذية الثلاث، ويتضمن التناظر عدم التغير في نظام فيزيائي في حالة الإزاحات المختلفة في قيم شحفات القوة Force Charges، وهي الإزاحات التي تتغير من مكان لأخر ومن لحظة لأخرى.
Weak Gauge Symmetry	التناظر القياسي الضعيف التناظر القياسي Gauge Symmetry الكامن في القوة الضعيفة Weak Force.

Electromagnetic Gauge Symmetry	التناظر الكهرومغناطيسي العياري Gauge Symmetry الذي يكمن في الكهروديناميكية الكمية Electrodynamics.
Mirror Symmetry	تناظر المرأة
	في سياق نظرية الأوتار String Theory، بين التناظر Symmetry أن شكلين مختلفين من أشكال كالابي-ياو Calabi-Yau Shapes، يُعرفان باسم زوج صورة مرآة، لهما نفس الفيزياء، عند تطبيقهما على الأبعاد المتعددة Curled-Up Dimensions لنظرية الأوتار String Theory.
Planck Tension	توتر (شد) بلانك وقيمه طن، وهو توتر وتر String نموذجي في نظرية الأوتار String Theory.
Grand Unification	التوحد العظيم فصيل من النظريات يدمج القوى اللاجاذبية الثلاث في إطار نظري منفرد.
Coupling Constant	ثابت الأزدواج انظر ثابت ازدواج الوتر String Coupling Constant.
String Coupling Constant	ثابت ازدواج الوتر عدد (موجب) يحكم ترجيح انشطار الوتر String إلى وترين، أو ترجح اتحاد وترتين في وتر واحد - العملية الأساسية في نظرية الأوتار String Theory. ولكل نظرية من نظريات الأوتار String Theory ثابت ازدواج الوتر الخاص بها، ولا بد أن تتحدد قيمة هذا الثابت بمعادلة، وحالياً تعتبر مثل هذه المعادلات غير مفهومة جيداً لنحصل منها على معلومات مفيدة. وتبين قيم ثابت الأزدواج الأقل من واحد أن الطرق الاضطرابية Perturbative Methods صحيحة.
Planck's Constant	ثابت بلانك يرمز له بالرمز \hbar ، وهو مؤشر أساسى في ميكانيكا الكم Quantum Mechanics، وهو يحدد قيمة الوحدات التي تكون الطاقة، والكتلة، والحركة المغزالية Spin، الخ، والتي يتكون منها العالم الميكروسكوبى. وقيمة هذا الثابت غرام-سم/ثانیة.
Cosmological Constant	ثابت الكосمولوجي (الكوني) تعديل للمعادلات الأصلية في النسبية العامة General Relativity، يسمح بأن يكون الكون ستاتيكياً، وكان يفسر بأنه ثابت كثافة الطاقة في الفراغ.
Black-Hole	الثقب الأسود جسم يقتضى مجال جاذبيته الهائل أي شيء يقترب منه، حتى الضوء (إلى مسافة أقرب من أفق الحدث Event Horizon للثقب الأسود).

الثقب الأسود عديم الكتلة

نوع معين من الثقوب السوداء Black Holes في نظرية الأوتار كان له كتلة كبيرة في الأصل ثم أخذت تتناقص كلما تقلصت قطعة من أشكال كالابي-ياو Calabi-Yau. وعندما يتقلص جزء الفضاء حتى يصير نقطة، لا تبقى كتلة – أي يصبح الثقب الأسود بلا كتلة. وفي هذه الحالة لا تظهر الخواص العادية للثقب الأسود مثل أفق الحدث Event Horizon.

Multidimensional Hole

الثقب متعدد الأبعاد

تعتمد للثقوب الموجودة في متصرف الدونت (الحكمة) على الصور ذات الأبعاد الأكثر.

Extremal Black Holes

الثقوب السوداء القصوى

الثقوب السوداء Black Holes ذات شحنة القوة Force Charge القصوى التي يمكن أن تحملها كتلة كليلة.

Three-Brane

ثلاثة بران (غشاء)

انظر بران (غشاء).

Dual, Duality, Duality Symmetries

ثنائي، ثنائية، تنازرات الثنائية

الوضع الذي تبدو فيه نظريتان أو أكثر وكأنهما مختلفتان (مختلفة) تماماً، ومع ذلك فهما يعطيان نتائج فيزيائية واحدة (التائج الفيزيائية نفسها).

Strong-Weak Duality

ثنائية قوي - ضعيف

الوضع الذي تكون فيه نظرية قوية الا زدواج Strongly Coupled Theory ثانوي – متطابق فيزيائياً – مع نظرية أخرى ضعيفة الا زدواج Weakly Coupled.

Wave-Particle Duality

ثنائية الموجة - الجسيمة

السمة الأساسية لفيزياء الكم Quantum Mechanics التي يبيدها الجسم في شكل خواص تشبه الموجات وخواص تشبه الجسيمات.

Second Superstring Theory

ثورة الأوتار الفائقة الثانية

فترة أثناء تطور نظرية الأوتار String Theory بدأت حوالي العام 1995 حيث بدأت بعض السمات اللااضطرابية Nonperturbative تصبح مفهومة.

Supergravity

الجاذبية الفائقة

طراز من نظريات الجسيمات – النقاط تجمع بين النسبية العامة General Relativity والتناظر Supersymmetry.

Eleven-Dimensional Gravity

الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعداً

نظرية الأبعاد الأكثر للجاذبية الفائقة Supergravity، التي تطورت في سبعينيات القرن العشرين، وأهملت جزءاً من نظرية الأوتار String Theory اتضحت أهميته في ما بعد.

Higher-Dimensional Superstring	الجاذبية الفائقة للأبعاد الأعلى فصيل من نظريات الجاذبية الفائقة Supergravity للأبعاد الزمكانية الأكثر من أربعة . Spacetime
Quantum gravity	الجاذبية الكمية نظرية تدمج بنجاح ميكانيكا الكم Quantum Mechanics والنسبية العامة Relativity، ومن الممكن أن تتضمن تعديلات على إحداهما أو على كليهما. ونظريه الأوتار String Theory مثال على نظرية في الجاذبية الكمية.
Wormhole	جحر الدودة منطقة من الفضاء لها شكل الأنبوية تصل بين منطقتين في الكون.
Virtual Particles	الجسيمات الافتراضية الجسيمات التي تنشأ لحظياً من الفراغ، وهي تتوارد على طاقة مستدامة، في توافق مع مبدأ عدم التيقن Uncertainty Principle، ثم تلاشى بسرعة، وبذلك تدفع دين الطاقة.
Messenger Particle	الجسيمة المرسال أصغر حزمة في مجال القوة Force Field، وهي الناقل المجهري للقوة.
Antiparticle	الجسيمة المضادة جسيمة من المادة المضادة.
Sum-Over-Paths	جمع المسارات صياغة لميكانيكا الكم Quantum Mechanics التي تخيل فيها الجسيمات تنتقل من نقطة لأخرى على طول كل المسارات المحتملة بينهما.
Product	حاصل الضرب نتيجة ضرب رقمين.
BPS States	حالات BPS الأشكال الواردة في نظرية التناظر الفائق Supersymmetric والتي تتحدد خواصها بدقة من أصل التناظر Symmetry.
Quantum Determinism	الحتمية الكمية خاصية من خواص ميكانيكا الكم Quantum Mechanics تنص على أن معرفة الحالة الكمية لنظام في لحظة ما معرفة تامة تحدد حالته الكمية في المستقبل والماضي. غير أن معرفة الحالة الكمية تحدد فقط احتمالية حدوث مستقبل معين.
Laplacian Determinism	حتمية لا بلس مفهوم عن عمل العالم مثل الساعة حيث المعلومات الكاملة عن حالة العالم في لحظة ما تتحدد في المستقبل والماضي.

الحركة المغزالية

صورة كمية لمفهوم مألوف له نفس الاسم، وللجزيئات كميات ذاتية من الحركة المغزالية لها قيمة عدد صحيح أو نصف عدد صحيح (مضاعفات ثابت بلانك Plank's Constant لا تتغير أبداً).

Schwarzschild Solution

حل شوارتزشيلد

حل معادلات النسبية العامة General Relativity في حالة التوزيع الكروي للمادة؛ وأحد تطبيقات هذا الحل هو إمكانية وجود الثقوب السوداء Black Holes.

Cosmic Microwave Background Radiation

الخلفية الإشعاعية الميكروية الكونية الإشعاعات الميكروية التي تغرس الكون، والتي نتجت أثناء الانفجار الهائل Big Bang وأخذت تقل كثافتها وتبرد بتمدد الكون.

Quantum Claustrophobia

الخوف من الأماكن المغلقة الكمي (الرهاب الكمي) راجع التأرجحات الكمية Quantum Fluctuations.

Wave Function

الدالة الموجية

الموجات المحتملة التي تقوم عليها ميكانيكا الكم.

Multi-Doughnut, Multi-Handled Doughnut

الدونت المتعددة، الدونت متعددة الثقوب

تعيم لشكل الدونت (طارة) التي لها أكثر من ثقب.

Thermodynamics

الديناميكا الحرارية

قوانين تطورت في القرن التاسع عشر لتصف سمات الحرارة والشغل والطاقة والأنتروربية Entropy وتطوراتها المتبدلة في نظام فزيائي.

Atom

ذرة

لبنة بناء المادة الأساسية، وتتكون من نواة (مكونة من بروتونات ونيترونات) وسراب من الإلكترونات يدور حولها.

Foam

الرغوة

انظر الرغوة الزمكانية Spacetime Foam.

Spacetime Foam

الرغوة الزمكانية

الخاصية الرغوية المنبعثة الملتوية لتسییح الزمان Spacetime على المستوى الميكروي الفائق Ultramicroscopic وفقاً لمنظور متفق عليه للجسيمة النقطة. وأحد الأسباب الرئيسية لعدم التوافق بين ميكانيكا الكم Quantum Mechanics والنسبية العامة General Relativity قبل ظهور نظرية الأوتار String Theory.

Quantum Foam

الرغوة الكمية

انظر الرغوة الزمكانية Spacetime Foam.

Resonance	الرنين إحدى الحالات الطبيعية للتردد في نظام فيزيائي.
Spacetime	الزمكان وحدة بين الزمان والمكان نبعت في الأصل من النسبة الخاصة Special Relativity . ويمكن اعتبارها "النسبية" الذي صنع منه العالم، ويشكل الساحة الديناميكية التي تدور عليها أحداث العالم.
Planck Time	زمن بلانك حوالى ثانية. وهو الزمن الذي عنده وصل حجم الكون بالتقريب إلى طول بلانك Planck Length ، أو بعبارة أكثر دقة ، الزمن الذي يستغرقه الضوء لينتقل مسافة طول بلانك Planck Length .
Light Clock	الساعة الضوئية ساعة خالية تقيس الزمن بإحصاء عدد الترددات الكاملة لفوتون Photon مفرد بين مرآتين.
Velocity	السرعة الموجهة سرعة واتجاه الجسم أثناء حركته.
Sphere	سطح الكرة السطح الخارجي لكرة. سطح كرة ثلاثة الأبعاد مألفة وله بعدين (ويمكن تمييزهما بأرقام مثل "خطوط العرض" و"خطوط الطول" كما هو الحال على سطح الأرض). ومفهوم سطح الكرة ينطبق بصورة عامة على الكرات وبالتالي على أسطحها في أي عدد من الأبعاد. وسطح الكرة ذو البعد الواحد اسم خيالي للدائرة أما سطح الكرة عديم البعد فهو نقطتان (كما هو مبين في متن الكتاب). ومن الصعب تخيل سطح كرة ذي ثلاثة أبعاد لأن سطح كرة رباعية الأبعاد.
Three-Dimensional Sphere	سطح كروي ثلثي الأبعاد انظر سطح الكرة Sphere .
Two-Dimensional Sphere	سطح كروي ثانوي الأبعاد انظر سطح الكرة Sphere .
Zero-Dimensional Sphere	سطح كروي لا بعد له انظر سطح الكرة Sphere .
Amplitude	سعة الموجة أقصى ارتفاع لقمة موجة أو أقصى عمق لقاع موجة.
Charge	شحنة انظر شحنة القوة Force Charge .

Force Charge	شحنة القوة
خاصية للجسيمات تحدد كيفية رد فعلها تجاه قوة معينة. فمثلاً تحدد الشحنة الكهربائية للجسيمة كيفية رد فعلها تجاه القوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force .	
Superpartners	الشركاء (الرفاق) الفائقون
الجسيمات التي تختلف حركتها المغزلية Spin بمقدار 1/2 وحدة، والتي تتزامن بواسطة Supersymmetry .	
Absolute Zero	الصفر المطلق
أصغر درجة حرارة ممكنة، وهي حوالي -273 درجة سلزية، أو صفر بمقاييس كلفن.	
Torus	طارة
سطح ثانوي الأبعاد للدونت.	
Winding Energy	طاقة الالتفاف
الطاقة المتضمنة في الوتر String الذي يلتقي حول البعد Dimension الدائري في الفضاء.	
Planck Energy	طاقة بلانك
تقدر بحوالي ألف كيلووات ساعة. وهي الطاقة اللازمة لسفر المسافات الصغيرة في طول بلانك Planck Length . وهي الطاقة النموذجية للوتر المتذبذب String في نظرية الأوتار . String Theory	
Topology	طوبولوجيا
تقسيم الأشكال في مجموعات يمكن تحويلها بعضها البعض من دون عنف أو تمزق في بنيتها بأي شكل.	
Phase	طور (صنف)
عند استخدام هذا اللفظ للمواد فإنه يصف الحالة الممكنة لها: طور جامد أو سائل أو غاز. وهو يشير عموماً للأوصاف الممكنة لنظام فيزيائي كخواص يعتمد عليها النظام (درجة الحرارة وقيمة ثابت ازدواج الوتر String Coupling Constant وشكل الزمكان Spacetime ، وهكذا) عند تغييرها.	
Planck Length	طول بلانك
حوالي ستيمتر، وهو الطول الذي تصبح تحته التأرجحات الكمية Quantum Fluctuations في نسبع الزمكان هائلة. وهو الطول النموذجي للوتر String في نظرية الأوتار . Theory	
Wavelength	طول الموجة
المسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعدين متتاليين للموجات.	

Initial Conditions	الظروف الأصلية البيانات التي تصف حالة البداية لنظام فزيائي.
Multiverse	عالم متعدد تكتب خيالي للكون حيث يمثل عالمنا واحداً فقط بين أعداد كثيرة لعالمنا منفصلة ومتميزة.
Families	العائلات ترتيب لجسيمات المادة في ثلاث مجموعات تعرف كل مجموعة منها باسم عائلة. وتحتاج الجسيمات في كل عائلة عن العائلة السابقة عليها بكونها أثقل، لكنها تحمل نفس الشحنة الكهربائية وشحنات القوة Force Charges التنووية.
Winding Number	عدد الالتفاف عدد المرات التي يلتف فيها الوتر String حول بعد فضائي دائري.
Vibration Number	عدد الاهتزاز رقم صحيح يعبر عن الطاقة في الاهتزاز المنتظم Uniform Vibration للوتر String ، الطاقة في الحركة الشاملة في مقابل تلك المصاحبة للتغير في الشكل.
One-Loop Process	عملية حلقة واحدة (أنشوطة واحدة) المُساهمة في حسابات النظرية الاضطرابية Perturbation Theory حيث تتضمن الحسابات زوجاً من الأوتار String (أو الجسيمات في نظرية الجسيمة النقطة).
Graviton	غرافيتون أصغر حزمة في مجال قوة الجاذبية Gravitational Force Field، وهي جسيمة مرسال Messenger Particle لقوة الجاذبية.
World-Sheet	الغشاء (الملاعة) العالمية سطح ثانوي الأبعاد يمسحه الوتر أثناء حركته.
Gluon	غليون أصغر حزمة في مجال القوة القوية messenger Strong Force Field، وهي جسيمة مرسال messenger Particle للقوة القوية.
Calabi-Yau Space, Calabi-Yau Shape	فراغ كالابي-ياو، شكل كالابي-ياو فراغ (شكل) يمكن أن تتبع فيه الأبعاد الفضائية الإضافية التي تتطلبها نظرية الأوتار String ، وتتفق مع معادلات النظرية Theory.
Photon	الفوتون أصغر حزمة في مجال قوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force Field، وهو جسيمة مرسال messenger Particle للقوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force ، وهو أصغر حزمة في الضوء.

الفيرميون

جسيمة أو نسخة اهتزاز للوثر String بكمية حركة مغزلية Spin نصف عدد فردي، وهي جسيمة مادة نموذجية.

القانون الثاني للديناميكا الحرارية
القانون الذي يقول أن الأنترودية Entropy الكلية تزداد دائماً.

قوانين الحركة لنيوتن

القوانين التي تصف حركة الأجسام وتقوم على مفهوم أن المكان والزمان مطلقاً وغير قابلين للتغير، وقد ظلت هذه القوانين صامدة حتى اكتشاف آينشتاين للنسبية الخاصة Special Relativity.

قوة الجاذبية

أضعف القوى الأربع الأساسية في الطبيعة. وقد وصفتها نظرية نيوتن العالمية للجاذبية ثم النسبية العامة General Relativity لآينشتاين.

القوه الضعيفه، القوه النووية الضعيفه
إحدى القوى الأساسية الأربع، وأكثر ما تعرف كوسطط في التحلل الإشعاعي.

القوه القويه، القوه النووية القويه
أقوى القوى الأساسية الأربع، وهي المسؤولة عن إبقاء الكواركات Quarks موصدة داخل البروتونات Protons والنيترونات Neutrons وعن إبقاء البروتونات والنيترونات داخل النواة الذرية.

القوه الكهرومغناطيسيه
واحدة من القوى الأساسية الأربع، وهي اتحاد القوى الكهربية والمغناطيسية.

كتلة بلانك
حوالى 10 ملايين المليارات من كتلة البروتون، حوالى جزء من مائة جزء من جزء من الألف من الجرام، حوالى كتلة حبة صغيرة من الغبار، وهي الكتلة النموذجية المكافئة لوتر يمتد في نظرية الأوتار.

الكروموديناميكيه الكميه
نظرية مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory للقوه القويه Force والكواركات Quarks، المتضمنة في النسبية الخاصة Special Relativity.

كسر التنااظر
إنماض كمية التنااظر Symmetry التي يبدو أن النظام يملكها، وهو عادة يرافق التحول . Phase Transition الطوري

Kelvin
. مقياس لدرجة الحرارة تبدأ فيه درجة الحرارة من الصفر المطلق Zero

كم - كوانتا

أصغر وحدة فيزيائية يمكن أن ينقسم إليها أي شيء تبعاً لقوانين ميكانيكا الكم. فمثلاً الفوتونات Photons هي كوانتا (ت) المجال الكهرومغناطيسي.

الكهروديناميكية الكمية

نظريّة مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory للقوة الكهرومغناطيسيّة Special Electrons المتضمنة في النسبية الخاصة Electromagnetic Force . relativity

Quark

جسيمة تؤثر فيها القوة القوية. وتتوارد الكواركات على ستة أنواع (أعلى، وأسفل، وأنبئ، وغريب، وقمة، وقاع) وثلاثة "ألوان" (الأحمر والأخضر والأزرق).

Chiral, Chirality

إحدى سمات فيزياء الجسيمات الأساسية والتي تميز صفة اليد اليمنى عن اليد اليسرى (الكف)، وهي تبين أن الكون ليس كله متناسقاً يمين - يسار.

Nonperturbative

سمة من سمات نظرية ما لا تعتمد صحتها على التقرير، الحسابات الأضطرابية Perturbative؛ السمة الدقيقة لنظرية ما.

Infinities

إجابة غير منطقية تنبثق من الحسابات التي تتضمن النسبية العامة General Relativity وميكانيكا الكم Quantum Mechanics في إطار الجسيمات - النقاط.

Antimatter

المادة المضادة

المادة التي لها نفس خواص الجاذبية مثل المادة العادية، لكن لها شحنة كهربية مضادة وكذلك شحنات قوة نووية مضادة.

Macroscopic

ماكروي

تشير إلى المقاييس التي نتعامل معها في حياتنا اليومية وهي كبيرة وبالنسبة عكس ميكروية.

Anthropic Principle

المبدأ البشري

القييدة التي تفسر سبب ما هي عليه خواص الكون التي نراها، بأنه لو كانت خواصه مختلفة فمن الأرجح أن الحياة لن تنشأ، وهكذا لن تكون هنا للاحظ هذا التغير.

Principle of Equivalence/Equivalence Principle

مبدأ التكافؤ

المبدأ المحوري (الأساسي) في النسبية العامة General Relativity، الذي يعلن أنه لا يمكن التفرقة بين الحركة المتسارعة والتواجد في مجال جاذبية (في مناطق صغيرة للملاحظة). وهو يعمم مبدأ النسبية Principle of Relativity بأن يبين أن كل الراصدين، بصرف النظر عن حالة حركتهم يمكن أن يزعم كل واحد منهم أنه في حالة سكون طالما اعترفوا بوجود مجال

جاذبية مناسب.

مبدأ عدم اليقين

مبدأ ميكانيكا الكم Quantum Mechanics الذي اكتشفه هيزنبرغ، والذي ينص على أن هناك سمات للكون مثل الموقع والسرعة الموجهة Velocity للجسيمة لا يمكن معرفتها بدقة تامة. وتزداد درجة عدم اليقين أكثر وأكثر كلما صغرت أكثر وأكثر المسافة والזמן اللذان نتعامل معهما. فتتراجع المجالات وتتفز الجسيمات بين جميع القيم الممكنة التي تناسب عدم اليقين الكمي. ويعني ذلك أن العالم المجهري يضطرب بجنون في بحر عاصف من التأرجحات الكمية Quantum Fluctuations.

Principle of Relativity

مبدأ النسبية

المبدأ المحوري (الأساسي) في النسبية الخاصة Special Relativity والذي ينص على أن كل الراصدين الذين يتحركون بسرعة ثابتة Velocity Observers يتعرضون لنفس مجموعة القوانين الفيزيائية، وبذلك فإن لكل واحد يتحرك بسرعة ثابتة الحق في الادعاء بأنه ساكن لا يتحرك. وقد تم تعليم هذا المبدأ في مبدأ التكافؤ Principle of Equivalence.

Topologically Distinct

متباين طوبولوجيًّا

شكلاً لا يمكن أن يتحول أحدهما للأخر من دون حدوث تمزق لبنيتهما بشكل ما.

Field, Force Field

المجال، مجال القوة

هو الوسيلة التي تنقل بها القوة تأثيرها من منظور ماكروي Macroscopic، وهو يتصرف بمجموعة من الأعداد عند كل نقطة في الفضاء تعكس شدة واتجاه القوة في هذه النقطة.

Electromagnetic Field

المجال الكهرومغناطيسي

مجال قوة القوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force، ويكون من خطوط قوى كهربية ومغناطيسية في كل نقطة من الفضاء.

Flat

سطح مستوي

تبعًا لقواعد الهندسة الإقليدية، هو شكل مثل سطح منضدة أملس تماماً وله نفس التعميمات للأبعاد الأكبر.

Observer

المشاهد، الملاحظ، الراصد

شخص مثالي أو جهاز، عادة خيالي، يقيس الخواص في نظام فزيائي.

Schrodinger Equation

معادلة شرودنجر

المعادلة التي تحكم تطور موجات الاحتمالات في ميكانيكا الكم Quantum Mechanics.

Klein-Gordon Equation

معادلة كلاين-غوردون

معادلة أساسية في نظرية مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory.

Accelerator

مجل

انظر مجل الجسيمات Particle Accelerator.

مجل الجسيمات

Particle Accelerator

جهاز (ماكينة) لدفع الجسيمات لتقترب سرعتها من سرعة الضوء ثم يقذفها بعضها على بعض وذلك بغرض دراسة تركيب المادة.

معضلة الأفق

Horizon Problem

أحتجاجة كосموЛОجية ترافق مع حقيقة أن المناطق البعيدة بعضها عن بعض بمسافات شاسعة في الكون لها مع ذلك تقربياً صفات واحدة مثل درجة الحرارة. وتقدم الكوسمولوجيـا التضخمية الحل . Inflationary Cosmology

المعكس

Reciprocal

معكس الرقم، فمثلاً معكس 3 هو $\frac{1}{3}$ ومعكس $\frac{1}{2}$ هو 2.

المنطلق الاضطرابي ، الطريقة الاضطرابية

Perturbative Approach,

Perturbative Method

. Perturbative Theory انظر النظرية الاضطرابية

الموجة الكهرومغناطيسية

Electromagnetic Wave

اضطراب الموجة في المجال الكهرومغناطيسي Electromagnetic Field وتنقل كل هذه الموجات بسرعة الضوء. ومن أمثلتها الضوء المرئي وأشعة X (الأشعة السينية) وال WAVES الميكروية والأشعة تحت الحمراء.

ميكانيكا الكم

Quantum Mechanics

إطار من القوانين التي تحكم العالم، حيث تصبح خواصها غير المألوفة مثل عدم التيقن Uncertainty والتآرجحات الكمية Quantum Fluctuations وثنائية الموجة-الجسيمة AtomsWave-Particle Duality تصبح الأكثروضوحاً في المستوى المجهرى للذرات والجسيمات تحت النووية.

النسبية الخاصة

Special Relativity

قوانين آيشتاين عن المكان والزمان في غياب الجاذبية (انظر كذلك النسبية العامة General Relativity).

نسق الاهتزاز

Vibration Pattern

العدد الدقيق للقمم والقيعان والسعنة أثناء تذبذب الورت String.

نسق التداخل

Interference Pattern

نسق الموجات الذي ينشق من تداخل وخلط الموجات الصادرة من مصادر مختلفة.

النسق التذبذبي

Oscillatory Pattern

انظر نسق الاهتزاز . Vibrating Pattern

النظرية الاضطرابية

Perturbative Theory

إطار لتبسيط المشاكل الصعبة بإيجاد حل تقريري يجري تنفيذه بعد ذلك كلما أدخلنا مزيداً

من التفاصيل، التي كانت مهملاً من قبل، ومتضمنة تنازلياً.

String Theory

نظريّة الأوتار

نظريّة موحّدة Unified Theory للكون، تفترض أن المكوّنات الأساسيّة للطبيعة ليست جسيمات نقاط صفرية الأبعاد، لكنها فنائل أحاديد الأبعاد تسمى أوتار Strings. ونظريّة الأوتار توحّد بتجانس ميكانيكا الكم Quantum Mechanics والنسبية العامة General Relativity وهي القوانيين المعروفة من السابق للأشياء الصغيرة والأشياء الكبيرة والتي بدون نظريّة الأوتار لا تتفق مع بعضها. وهي اختصار لاسم نظريّة الأوتار الفائقة Superstring Theory.

Bosonic String Theory

نظريّة الأوتار البوزوّنية

أول نظريّة أوتار عرفت، وتتضمن أنساقاً اهتزازية Vibrational Patterns كلّها بوزوّنات Bosons.

Type I String Theory

نظريّة الأوتار من النوع I

واحدة من النظريّات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theories، وتتضمن كلاً من الأوتار المفتوحة Open والمغلقة Closed Strings.

Type IIA String Theory

نظريّة الأوتار من النوع IIA

واحدة من النظريّات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theories، وتتضمن الأوتار المغلقة Closed Strings التي لها أنساق اهتزاز Vibronical Patterns تناظر يمين-يسار.

Type IIB String Theory

نظريّة الأوتار من النوع IIB

واحدة من النظريّات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theories، وتتضمن الأوتار المغلقة Closed Strings التي لها أنساق اهتزاز Vibronical Patterns لعدم التناظر يمين-يسار.

Heterotic-E String Theory

نظريّة الأوتار هيتيروتيك-E

(Heterotic E₈ × E₈ String Theory)

(نظريّة الأوتار هيتيروتيك)

إحدى النظريّات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theory وتتضمن أوتاراً مغلقة تشبه حرکة اهتزازها اليمني تلك في الأوتار من النوع Type II String Theory، بينما تتضمن حرکة اهتزازها اليسري تلك الاهتزازات الموجودة في الأوتار البوزوّنية Bosonic String. وتخالف هذه النظريّة عن نظريّة الأوتار هيتيروتيك-O Heterotic-O String Theory اختلافاً هاماً لكنه غير واضح.

Heterotic-O String Theory

نظريّة الأوتار هيتيروتيك-O

(Heterotic O(32) String Theory)

(نظريّة الأوتار هيتيروتيك O(32))

إحدى النظريّات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theory، وتتضمن أوتاراً مغلقة تشبه حرکة اهتزازاتها تلك الموجودة في أوتار النوع Type II String وتتضمن حرکة اهتزازاتها اليسري تلك الاهتزازات الموجودة في الأوتار البوزوّنية Bosonic String، وتخالف هذه النظريّة عن نظريّة الأوتار هيتيروتيك-E اختلافاً هاماً لكنه غير واضح.

نظريّة كالوزا - كلاين

فصيل من النظريّات يتضمّن أبعاداً فضائية إضافية متّجدة Curled-Up Dimensions مع ميكانيكا الكم Quantum Mechanics.

T.O.E. (Theory of Everything)

نظريّة في ميكانيكا الكم (نظريّة كمية) تشمل كل القوّة وكل المادّة.

Electroweak Theory

نظريّة مجال الكم النسبي التي تصف القوّة الضعيفة Weak Force والقوّة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force في إطار موحّد.

Quantum Electroweak Theory

انظر نظريّة مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory.

Unified Theory, Unified Field Theory

أيّة نظريّة تصف كل القوى الأربع وكل المادّة في إطار واحد يضمّ الجميع.

Maxwell's Theory, نظريّة ماكسويل ، النظريّة الكهرومغناطيسية لماكسويل

Maxwell's Electromagnetic Theory

النظريّة التي توحّد الكهرباء والمغناطيسية وهي تقوم على مفهوم المجال الكهرومغناطيسية Electromagnetic Field الذي أدخله ماكسويل في ثمانينيات القرن التاسع عشر، ويبين أن الضوء المرئي مثال للموجات الكهرومغناطيسية Electromagnetic Wave.

Supersymmetric Quantum Field Theory

نظريّة مجال الكم للتناظر الفائق Super Symmetry Quantum Field Theory المتضمنة للتناظر الفائق.

Relativistic Quantum Field Theory

نظريّة في ميكانيكا الكم عن المجالات مثل المجال الكهرومغناطيسى Electromagnetic Field المتضمن في النسبية الخاصة Special Relativity.

Newton's Universal Theory of Gravity

نظريّة الجاذبية التي تزعم أن قوّة التجاذب بين جسمين تناسب مع حاصل ضرب كثليتهما وتناسب عكسيّاً مع مربع المسافة بينهما. وقد أزاحتها وحلّت محلّها النسبية العامة General Relativity لأينشتاين.

M- Theory

النظريّة التي تنبثق من الثورة الثانية للأوتار الفائقة Second Superstring Revolution والتي توحّد النظريّات الخمس السابقة في إطار واحد شامل. ويبعد أن نظريّة M- Theory تنتمي إلى أحد عشر بعداً زمكانيّاً Spacetime Dimensions، على الرغم من أن الكثيّر من خواصها التفصيليّة غير مفهوم حتى الآن.

Winding Mode	نمط الالتفاف
	هيئه الوتر String الذي يلف حول بعد Dimension فضائي دائري.
Vibrational Mode	نمط الاهتزاز
	انظر نسق الاهتزاز Vibration Pattern .
String Mode	نمط الوتر
	هيئه ممكنة (نسق اهتزاري Vibrational Pattern ، هيئه لفافة-لولبية Winding Pattern) يمكن للوثر String أن يتخذها Configuration .
Supersymmetric Standard Model	النموذج القياسي فائق التمازج
	تصميم للنموذج القياسي لفيزياء الجسيمات Standard Model of Particle Physics لتتضمن التمازج الفائق Supersymmetry ، تتطلب مضاعفة أنواع الجسيمات الأولية المعروفة.
Standard Model of Particle Physics,	النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات ؛
Standard Model, Standard Theory	النموذج القياسي ، النظرية القياسية
	نظرية ناجحة بشكل كبير للقوى الثلاث اللاجاذبية وتأثيراتها في المادة. وهي اتحاد بين الكروموديناميكا الكميه Quantum Chromodynamics والنظرية الكهربية الضعيفة Electroweak Theory .
Standard Model of Cosmology	النموذج القياسي للكosمو لو جيا
	نظريه الانفجار الهائل Big Bang مع مفهوم القوى الثلاث اللاجاذبية كما يوجزها النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات Standard Model of Particle Physics .
Nucleus	نواة
	لب الذرة Atom الذي يتكون من بروتونات Protons ونيوترونات Neutrons .
Neutron	النيوترون
	جسيمة عديمه الشحنة، توجد في نواة الذرة Atom وتتكون من ثلاثة كواركات Quarks (اثنان أسفل واحد أعلى).
Neutrino	النيوترينو
	جسيمة عديمه الشحنة، توجد فقط في القوة الضعيفه Weak Force .
Smooth, Smooth Space	الهادئ، الفضاء الهادئ
	منطقة فضائية فيها النسيج الفضائي مستوي (السطح) أو محدب بنعومة ولا يحتوي على تمزقات أو تبعيدات من أي نوع.
Riemannian Geometry	هندسة ريمان
	إطار رياضي لوصف الأشكال المحدبة لأي بعد. وهي تلعب دوراً محورياً في وصف الزمكان Spacetime في النسبية العامة General Relativity .

الهندسة الكمية

Quantum Geometry

تعديل على هندسة ريمان Riemannian Geometry مطلوب لوصف فيزياء الفضاء على المقاييس المجهرى الفائق Ultramicroscopic حيث تصبح التأثيرات الكمية هامة.

String

جسم أساسى ذو بعد واحد هو المكون الأساسى في نظرية الأوتار String Theory .

Open String

الوتر المفتوح

نوع من الأوتار String له طرفان حران.

Closed String

وتر مغلق

نوع من الأوتار String على شكل أنشوطة أو حلقة.

ثبات المصطلحات

Dimensions	أبعاد
Lineland	الأرض الخطية
Virtual String Pairs	أزواج الأوتار المفترضة
Spheres	أسطح الكرة (مكورة)
X Rays	أشعة X (السينية)
Cosmic Rays	الأشعة الكونية
Infrared Radiation	أشعة تحت الحمراء
Event Horizon	افق الحدث
Entropy	الأنترودية
Black Hole Entropy	أنترودية الثقب الأسود
High Entropy, Low Entropy	إنتروبية مرتفعة، وإنترودية منخفضة
Interference Patterns	أنساق التداخل
Resonance Patterns	أنساق رنينية
Trinary Star Systems	أنظمة النجوم الثلاثية
Heavy String Modes	أنماط الأوتار الثقيلة
Light String Modes	أنماط الأوتار الخفيفة
Nuclei, of Atoms	أنوية الذرات
Strings	الأوتار
Antistrings	الأوتار المضادة
Wound Strings/wrapped strings	الأوتار الملففة
Unwrapped Strings	الأوتار غير الملففة
Two-Branes	اثنان بران (غشاء ثانوي)
Probability	الاحتمال
Reductionism	الاختزالية
Winding Mode	اسلوب (شكل) الدوران (الالتفاف)
Spacetime, Warping of	اعوجاج الزمكان
Fusion	الاندماج (الانصهار)
Big Bang	الانفجار الهائل (بداية الكون)
Big Crunch	الانهيار الهائل

Ordinary Vibrations of Strings	الاهتزاز العادي للأوتوار
P-Branes	-بران (غشاء)
After The Bang (ATB)	بعد الانفجار الهائل (بعد لحظة بداية الكون)
ATB	بعد لحظة الانفجار الهائل (بعد لحظة بداية الكون)
Extended Dimension	البعد الممتد
Z Boson	بوزون Z
W Boson	بوزون W
Weak Gauge Bosons	البوزونات القياسية الضعيفة
Time, Effect Of Motion On	تأثير الحركة في الزمن
Tachyons	التاكيونات
Taus	تاوات
Double-Slit Experiments	تجارب الشقوق المزدوجة
Curvature of Spacetime	تحدب الزمكان
Mirror Manifolds	تحدب المرايا
Radioactive Decay	التحلل الإشعاعي
Flop Transitions	التحولات الانقلابية (الفجائية)
Topology Changing Transitions	تحولات التغيرات الطوبولوجية
Phase Transitions	التحولات الطورية
Conifold Transitions	التحولات المخروطية
Primordial Nucleosynthesis	التخلقي النووي البدائي (الأولي)
Uniform Vibration	التبذبذب (الاهتزاز) المنتظم
Frequency Wave	تردد الموجة
Singularity	تفرد (غرابة)
Lorentz Contraction	تضيق (انكماش) لورنس
Time Dilation	تمدد الزمن
Spacetime, Tearing of	تمزق الزمكان
Symmetry	الانتظار
Rotational Symmetry	الانتظار الدوراني
Supersymmetry	الانتظار الفائق
Strong Force Symmetry	انتظار القوة القوية
Gauge Symmetry	الانتظار القياسي
Mirror Symmetry	انتظار المرأة (صورة المرأة)
Plank Tension	توتر (شد) بلانك
Grand Unification	التوحيد الأعظم

String Coupling Constant	ثابت ازدواج الوتر
Plank's Constant	ثابت بلانك
Cosmological Constant	الثابت الكوني (الكونسولوجي)
Wormholes	ثقب الدودة
Black Holes	الثقوب السوداء
“Designer”	الثقوب السوداء (ديزاینر)
Extremal Black Holes	الثقوب السوداء القصوى
Three-Branes	ثلاثة بران (غشاء ثلاثي)
Duality	الثنائية
Wave-Particle Duality	ثنائية الموجة-الجسيمة
First Superstring Revolution	ثورة الأوتار الفائقة الأولى
Second Superstring Revolution	ثورة الأوتار الفائقة الثانية
Super Gravity	الجاذبية الفائقة
Higher-Dimensional Supergravity	الجاذبية الفائقة كثيرة الأبعاد
Elementary Particles / Particles, Elementary	الجسيمات الأولية
Force Particles	جسيمات القوة
Messenger Particles	الجسيمات المرسال
Probe Particle	الجسيمات المسبار (جسيمات الاختبار)
Antiparticles	الجسيمات المضادة
Point Particles	الجسيمات النقط
BPS States	حالات BPS
Coherent State of Strings	الحالة المتماسكة للأوتار
Determinism	الحتمية
Accelerated Motion	حركة تسارعية
Constant-Velocity Motion	حركة ثابتة السرعة الموجهة
Force-Free Motion	الحركة الحرة (من دون تأثير من قوى خارجية)
Non-Constant Velocity Motion	الحركة متغيرة السرعة (غير ثابتة)
Spin	الحركة المغزالية (سبين)
Boson, Spin Of	الحركة المغزالية للبوzonات
Probing Sensitivity	حساسية الاختبار
Loops of Strings	حلقات (أنشوطات) الأوتار
Cosmic Background Radiation	الخلفية الإشعاعية الكونية
Wave Functions	الدلالات الموجية
Euler-Beta-Function	دالة يولر بيتا

Temperature of Black Holes	درجة حرارة الثقوب السوداء
Atoms	ذرات
Quantum Foam	الرغوة الكمية
Time	زمان، زمن، وقت
Spacetime	الزمكان
Plank Time	زمن بلانك
Light Clocks	الساعات الضوئية
Speed	السرعة
Sound, Speed of	سرعة الصوت
Light, Speed of	سرعة الضوء
Amplitude of Waves / Wave Amplitude	سعة الموجة
Squarks	سکوارکاٹ
Light-Years	السنوات الضوئية
Sneutrinos	سینیوٹرینوٹ
Selectrons	سیلیکترونٹ
Force Charges	شحنات القوة
Superpartners	الشراكاء (الرفاق) الفائقون
Sun	الشمس
Zero-Branes	صفر بران (غشاء)
Ultraviolet Light	الضوء فوق البنفسجي
Energy	الطاقة
Plank Energy	طاقة بلانك
Winding Energy of Strings	طاقة لف الأوتار (التفاف)
Plank Length	طول بلانك
Wavelength	طول الموجة
Quantum Wavelength	طول الموجة الكمية
Orbifolding	طي المدار
Photoelectric Effect	الظاهرة (التأثير) الكهروضوئية
Universe	العالم (الكون)
Garden-Hose Universe	عالٰم خرطوم المياه
Multiverse	عالٰم متعدد
Families of Elementary Particles	عائلات الجسيمات الأولية
Winding Number	عدد الدوران (الالتفاف)
Vibration Number	عدد الذبذبة

Momentum	العزم
Astronomers	علماء الفلك
Human Life Expectancy	العمر المتوقع للإنسان
Gravitons	الغرافيتونات
World Sheet	الغشاء العالمي
Gluinos	غلوبينات
Gluons	غليونات
Calabi-Yau Spaces (Shapes)	فراغات (أشكال) كالابي-ياو
Space	الفضاء (المكان)
Flat Space	الفضاء المستوي
Photons	فوتونات
Photinos	الفوتينوات
Fermions	الفيرميونات
Physics, Classical	الفيزياء الكلاسيكية (التقليدية)
Second Law of Thermodynamics	القانون الثاني للديناميكا الحرارية
Lumps of Energy	قطع (كتل أو قبس) من الطاقة
COBE (Cosmic Background Explorer)	القمر الصناعي لاختبار الخلفية
Satellite	الكونية-الإشعاعية COBE
Newton's Laws of Motion	قوانين الحركة لنيوتن
Physical Laws	القوانين الفيزيائية
Electroweak Force / Weak Force	القورة الضعيفة
Strong Force	القورة القوية
Forces, Fundamental	القوى الأساسية
Gravitational Force	قوى الجاذبية
Nuclear Forces	قوى النووية
Plank Mass	كتلة بلانك
Quantum Chromodynamics	الكروموдинاميكا الكمية
Symmetry Breaking	كسر التنااظر (إلغاء التنااظر)
Solar Eclipses	الكسوفات الشمسية
Quanta	كم (كوانتا)
Quantum Electrodynamics	الكهروموديناميكا الكمية
Charm Quark	الكوارك الأنثيق
Strange Quark	الكوارك الغريب
Quarks	الكواركات

Up-Quarks	الكواركات الأعلى
Down Quarks	الكواركات السفلية
Bottom Quarks	كواركات قاع
Top Quarks	كواركات القمة
Antiquarks	الكواركات المضادة
Quasars	الكوازارات
String Cosmology	космология альгебра
Inflationary Cosmology	الكونسماлиجيا التضخمية
Chirality	الكيرالية (الكلثمية)
Dark Matter	المادة الداكنة
Antimatter	المادة المضادة
Anthropic Principle	المبدأ البشري
Equivalence Principle	مبدأ التكافؤ
Uncertainty principle	مبدأ عدم اليقين
Principle of Relativity	مبدأ النسبية
Holographic Principle	المبدأ الهولوغرافي
Gravitational Field	مجال الجاذبية
Physics, Field of	مجال الفيزياء
Supersymmetric Quantum Field	مجال الكم فائق التناظر
Galaxies	ال مجريات
Milky Way Galaxy	مجرة درب اللبانة
“Sum Over Paths”	مجموع المسارات
Quantum Tunneling	المرور في نفق الكم
Light Paths	مسارات الضوء
Quantum Smearing	المسح الكمي (اللطخ، البقع)
Superconducting Supercollider	المصادم الفائق ذو التوصيل الفائق
Klein-Gordon Equation	معادلة كلain-غوردون
Large Hadron Collider	معجل الهايدرونات الكبير
Particle Accelerators	معجلات الجسيمات
Horizon Problem	معضلة الأفق
Magnetism	المغناطيسية
Waves	موجات
Electron Waves	موجات الإلكترون
Probability Waves	موجات الاحتمال

Sound Waves	موجات الصوت
Light Waves	موجات الضوء
Electromagnetic Waves	الموجات الكهرومغناطيسية
Water, Waves of	موجات المياه
Microwaves	الموجات الميكروية
Quantum Mechanics	ميكانيكا الكم
Muons	ميونات
Torus	نتوء
Stars	النجوم
Binary Stars	النجوم المزدوجة
Neutron Stars	النجوم النيترونية
Theories, Scientific	نظريات علمية
M-Theory	نظرية M-ال Dimensions
Perturbation Theory	نظرية الاضطرابية
String Theory	نظرية الأوتار
Bosonic, String Theory	نظرية الأوتار البوزونية
Superstring Theory	نظرية الأوتار الفائقة
Supersymmetric String Theory	نظرية الأوتار فائقة التناظر
Type I String Theory	نظرية الأوتار من النوع I
Type IIA String Theory	نظرية الأوتار من النوع IIA
Type IIB String Theory	نظرية الأوتار من النوع IIB
Newton's Universal Theory of Gravity	نظرية الجاذبية العالمية لنيوتن
Chaos Theory	النظرية الشواشية
Quantum Electroweak Theory	نظرية القوى الكهربائية-الكمية الضعيفة
Kaluza-Klein Theory	نظرية كالوزا-كلاين
Theory of Everything (T.O.E.)	نظرية كل شيء
Maxwell's Electromagnetic Theory	نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية
Quantum Field Theory	نظرية مجال الكم
Relativistic Quantum Field Theory	نظرية مجال الكم النسبي
Point-Particle Quantum Field Theory	نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة
Unified Field Theory	نظرية المجال الموحد
Special Theory of Relativity	نظرية النسبية الخاصة
General Theory of Relativity	نظرية النسبية العامة
Final Theory / Ultimate Theory	النظرية النهائية

Standard Model of Particle Physics	النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات
Standard Model of Cosmology	النموذج القياسي للكosمولوجيا
Neutrinos	نيوترونوات
Tau-Neutrinos	نيوترونوات تاو (تاونيونيتونوات)
Euclidean Geometry	الهندسة الإقليدية (المستوية)
Algebraic Geometry	الهندسة الجبرية
Riemannian Geometry	هندسة ريمان
Quantum Geometry	الهندسة الكمية
Noncommutative Geometry	الهندسة اللاتبادلية
One-Branes	واحد-بران (غشاء)

المراجع

Books

- Abbot, Edwin A. *Flatland: A Romance of Many Dimensions*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1991.
- Barrow, John D. *Theories of Everything: The Quest for Ultimate Explanation*. New York: Fawcett-Columbine, 1992.
- Bronowski, Jacob. *The Ascent of Man*. Boston: Little, Brown, [1974].
- Clark, Ronald W. *Einstein: The Life and Times*. New York: Avon Books, 1984.
- Crease, Robert P. and Charles C. Mann. *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*. Rev. ed. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1996.
- Davies Paul, *Superforce: The Search of a Grand Unified Theory of Nature*. New York: Simon & Schuster, 1984.
- . Paul (ed.). *The New Physics*. Cambridge, MA [Cambridgeshire]; New York: Cambridge University Press, 1989.
- . Paul and Julian Brown (eds.). *Superstrings: A Theory of Everything?* Cambridge, MA [Cambridgeshire]; New York: Cambridge University Press, 1988.
- Deutsch, David. *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes.. and Its Implications*. New York: Allen Lane, 1997.
- Einstein, Albert. *The Meaning of Relativity*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988.
- . *Relativity: The Special and the General Theory: A Popular Exposition=Uber die spezielle und die allgemeine relativitats theorie*. Authorized Translation by Robert W. Lawson. 17th ed. New York: Crown Publishers, [1961].
- Ferris, Timothy. *Coming of Age in the Milky Way*. New York: Anchor Books, 1989.
- . *The Whole Shebang: A State-of-the-Universe(s) Report*. New York: Simon & Schuster, 1997.
- Feynman, Richard P. *The Character of Physical Law*. Cambridge, MA:

- MIT Press, [1965]. (The MIT Press Paperback Series; 66)
- . *QED: The Strang Theory of Light and Matter*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988. (Alix G Mautner Memorial Lectures)
- Folsing, Albrecht. *Albert Einstein: A Biography*=*Albert Einstein: Eine Biographie*. Translated from The German by Ewald Osers. New York; London: Viking, 1997.
- Gamow, George. *Mr. Tompkins in Paperback*. Illustrated by the Author and John Hookham. Canto ed. Cambridge, MA; New York: Cambridge University Press, 1993.
- Gell-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. New York: W.H. Freeman, 1994.
- Glashow, Sheldon. *Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicist and the Matter of this World*. New York: Warner Books, 1988.
- Guth, Alan H. *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*. With a Forward by Alan Lightman. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing, 1997.
- Hawking, Stephen. *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. Introduction by Carl Sagan; Illustration by Ron Miller. Toronto; New York: Bantam Books, 1988.
- and Roger Penrose. *The Nature of Space and Time*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996. (The Isaac Newton Institute Series of Lectures)
- Held, A. (ed.). *General Relativity and Gravitation: One Hundred Years after the Birth of Albert Einstein*. New York: Plenum Press, 1980. 2 vols.
- Hey, Tony and Patrick Walters. *Einstein's Mirror*. Cambridge, MA; New York.: Cambridge University Press, 1997.
- Hoffman, Banesh and Helen Dukas. *Albert Einstein: Creator and Rebel*. New York: Viking Press, [1972].
- Howard, Don and John Stachel (eds.). *Einstein and The History of General Relativity: Based on the Proceedings of the 1986 Osgood Hill Conference, North Andover, Massachusetts, 8-11 May 1986*. Boston: Birkhauser, 1989. (Einstein Studies; 1)
- Kaku, Michio. *Hyperspace: A Scientific Odyssey through Parallel*

- Universes, Time Warps, and the Tenth Dimension.* New York: Oxford University Press, 1994.
- Kaku, Michio and Jennifer Trainer Thompson. *Beyond Einstein: The Cosmic Quest for The Theory of The Universe.* New York: Anchor Books, Doubleday, 1987.
- Kuhn, Thomas S. *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912.* Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1978.
- Laplace, Pierre Simon. *Philosophical Essay on Probabilities=Essai Philosophique sur les probabilités.* Translated from The Fifth French Edition of 1825, with Notes by the Translator, Andrew I. Dale. New York: Springer-Verlag, 1995. (Sources in the History of Mathematics and Physical Sciences; 13)
- Lederman, Leon and Dick Teresi, *The God Particle: If The Universe is the Answer, What is the Question?* Boston: Houghton Mifflin, 1993.
- Lindley, David. *The End of Physics: The Myth of a Unified Theory.* New York: Basic Books, 1993.
- . *Where Does the Weirdness Go?: Why Quantum Mechanics is Strange, but Not as Strange as You Think.* New York: Basic Books, 1996.
- Newton, Isaac, Sir. *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy, and His System of the World.* Translated into English by Andrew Motte in 1729. The Translations Rev., and Supplied with an Historical and Explanatory Appendix by Florian Cajori. Berkeley; CA: University of California Press, 1962. 2 vols.
- Overbye, Dennis. *Lonely Hearts of the Cosmos: The Scientific Quest for the Secret of the Universe.* New York: HarperCollins, 1991.
- Pais, Abraham. "Subtle Is the Lord--": *The Science and the Life of Albert Einstein.* Oxford [Oxfordshire]; New York: Oxford University Press, 1982.
- Penrose, Roger. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics.* Foreword by Martin Gardner. Oxford, New York: Oxford University Press, 1989.
- Rees, Martin J. *Before the Beginning: Our Universe and Others.* Foreword by Stephen Hawking. Reading, MA: Addison-Wesley,

1997. (Helix Books)
- Smolin, Lee. *The Life of the Cosmos*. New York: Oxford University Press, 1997.
- Stefano, Rosanne di. *Notes on The Conceptual Development of Supersymmetry*. New York: Institute of Theoretical Physics, State University of New York Stony Brook, [n.d.].
- Thorne, Kip S. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: W.W. Norton, 1994. (Commonwealth Fund Book Program Series)
- Weinberg, Steven. *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon Books, 1992.
- . *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Updated ed. New York: Basic Books, 1993.
- Wheeler, John Archibald. *A Journey into Gravity and Spacetime*. New York: Scientific American Library, 1990. (Scientific American Library Series; 31)

Periodicals

- Clark, R. W. "Einstein: The Life and Times." *Science*: no. 174, (Martin J. Klein).
- Cole, K. C. "A Theory of Everything." *New York Times Magazine*: 18 October 1987.
- Freedman, Daniel Z. and Peter Van Nieuwenhuizen. "The Hidden Dimensions of Spacetime." *Scientific American*: vol. 252, March 1985.
- Ginsparg, Paul and Sheldon Glashow. "Desperately Seeking Superstrings." *Physics Today*: May 1986.
- Witten, Edward. "Reflections on The Fate of Spacetime." *Physics Today*: April 1996.

Conferences and Meetings

- Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics, Munich, Fed. Rep. of Germany, August 4-10, 1988*. Edited by R. Kotthaus and J. H. Kühn. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1989.

The Superworld I: *Proceedings of the Twenty-Forth Course of the*

International School of Subnuclear Physics on the Superworld, Held August 7-15, 1986, In Erice, Sicily, Italy. Edited by Antonino Zichichi. New York: Plenum Press, 1990. (The Subnuclear Series; 24)

United States. Congress. Senate. Committee on Banking, Housing and Urban Affairs. Subcommittee on Financial Institutions: *Financial Structure and Regulation: Hearings, Ninety-Third Congress, First Session... November 6, 7, and 8, 1973.* Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1973.

الفهرس

- ١ -
- الأبعاد المكانية: 67-65، 82، 177،
392، 210، 184، 230، 278،
الأبعاد المتعددة: 244، 262، 278،
399، 360، 348، 325
الإثبات التجريبي: 124
الاحتمالية: 128-126، 131
الاختزالية: 32
الإدراك الحسي: 41
إدينغتون، أرثر: 97، 96،
أسبكت، آلان: 135
إسرائيل، ويرنر: 351
اعوجاج الزمان: 84، 93، 91،
99، 85، 96
اعوجاج الزمكان: 98، 100،
412، 150، 96، 92-88
اعوجاج الفضاء: 98، 92-88
اعوجاج المكان: 84، 85
أليريخت، أندريلاس: 387
ألفر، رالف: 380
أمالدي، أوجو: 201
أمبير، أندريله-ماري: 194
أنتروبية بيكنشتاين — هوكنغ: 34،
370-364
انكسار التماثل: 145، 382
أوفين، شاني: 13
أوليف، دافيد: 204، 205
أوليبيك، جورج: 193، 194
إيرهارت، أميلا: 206، 207
إيلينغرسورد، جير: 288
- آبوت، إدوين: 217، 220-219
آرشر، آلين: 14
آرشر، كارول: 13
آسبينول، بول: 13، 296، 297،
300، 299، 306-302
آماتي، دانياł: 34
آيشتاين، ألبرت: 11، 12، 20-17،
48، 46، 45، 42-39، 36، 30
، 69، 68، 66، 65، 59، 51، 49
، 107، 101، 100، 97-73، 71
، 123، 122، 117-114، 108
، 158، 149، 135، 134، 129
، 212، 210، 209، 192، 172
، 252، 235، 227، 222، 221
، 281، 264، 261، 259-257
، 302، 300، 296، 291، 286
، 352، 327، 318، 311، 310
-409، 387، 378، 377، 375
، 421، 419، 417، 411
الأبعاد الزمكانية: 389، 228
الأبعاد الفضائية: 91، 212، 213
-227، 222-220، 216، 215
، 274، 262، 261، 250، 231
، 316، 309، 281، 278، 275
، 413، 392-390، 346، 340، 333
الأبعاد المتعددة: 244، 245، 247،
357، 337، 325، 249

- ب -

- باتيريف، فيكتور: 298، 300، 303
باخ، جوهان سيباستيان: 198
بادامين، هسان: 13
باردين، جيمس: 367
باركر، بوب: 173
باركز، ليندا: 288
بانكس، توم: 342، 413
باولي، وولفغانغ: 22، 143، 180
براساد، مانوج: 332
براندنبورجر، روبرت: 275، 276، 280، 394-390
برايس، ريتشارد: 351
بروكمان، جون: 14
برونوفסקי، جاكوب: 421
بريسكل، جون: 374
البعد الدائري: 213، 215، 216، 219، 220، 223، 224، 262، 266-264
البعد الرأسي: 339
البعد الزماني: 65-67، 86، 91، 210، 221، 222، 230-228
بل، جون: 135
بلانك، ماكس: 39، 106، 108، 111، 114-111، 116، 117، 124
بليسيير، رونين: 13، 283-285، 288، 297، 359
بنوز، روجر: 293، 351
بنزياس، آرنو: 380
بوبيتس، مايكل: 13
بوراتي، ماسيمو: 13
بورن، ماكس: 126، 127، 129
بوز، ساتيندرا: 198
بوغومولني: 332
بولتشينسكي، جو: 333، 346
بولس، نيكولاوس: 13
بوليالي، غانوس: 259
بوليتس، دافيد: 200
بوهر، نيلز: 21، 108، 124، 126، 133
بوير، ويم دي: 201
بيلس، جيم: 380
بيكنشتاين، جاكوب: 365، 366، 370-368

- ت -
تاونسند، بول: 228، 327، 335
تاي، هنري: 13
تجربة الشق الطولي المزدوج: 118، 123، 132
تحدب الفضاء: 87، 90
تحدب المكان: 83، 84، 259
التحول الطوري: 362، 363، 383
التحولات المخروطية: 360
التلخيق النووي البدائي: 378
تشادويك، جيمس: 21
تشيرك، جول: 160، 170، 173، 195
التفاعل النووي: 28
تقلاص لورنس: 81
تقنية أورييفولدنغ: 283
تمدد الكون: 101، 379، 387، 388

- ترقى نسيج الفضاء: 291-294، 296
 جاذبية الشمس: 88
 الجاذبية الفائقة: 224، 225، 226-336
 جاذبية: 344، 338
 جاوس، كارل فريديريك: 259
 جايغر: 24
 جث، آلان: 386، 387، 394
 جندرسون، إيريك: 13
 جوليا، برنارد: 337
 جويس، جايمس: 21
 جيبنر، دورون: 283
 جيرمر، ليستر: 124، 125
 جيفرسون، تيدي: 13
 جيفيتال، ألكسندر: 289
 جيل-مان، موراي: 21، 29، 238
 جينزبارغ، بول: 237
 جيورجي، هوارد: 14، 201-199، 238

- ح -
 الحتمية: 372، 409
 - حتمية لا بلاس: 373
 - الحتمية الكمية: 374، 373
 حجم بلانك: 394، 382، 394
 الحدس: 40، 51
 حركة الأرض: 88، 91، 91، 318
 الحركة الثابتة: 79
 الحركة الحرّة: 44، 45
 حركة الضوء: 19
 الحركة المتسارعة: 45، 45، 75، 81-77
 84، 85، 87، 88، 93، 93
 الحركة المغزليّة: 80، 198-193
 204، 244، 248، 331، 351
 352، 366، 417

- ث -
 ثابت بلانك: 113، 116، 125، 137
 الثابت الكوني: 101، 252
 الثقوب الدودية: 294-292
 الثقوب السوداء: 18، 34، 100-97، 293، 252، 139، 314، 376-360، 353-351، 401
 420، 402
 الثقوب السوداء المتطرفة: 371، 370
 ثنائية جسمية-موجة: 123، 124
 ثنائية قوي-ضعيف: 334
 ثورن، كيب: 374

- ج -
 الجاذبية: 24، 25، 27، 28، 30، 81-71، 92-85، 97-94، 103
 137، 144، 149-147، 153
 157، 160، 161، 164، 167، 170، 173، 174، 180، 186
 187، 189، 192، 195، 198
 199، 205، 224-221، 235
 238، 244، 247، 253، 257
 281، 284، 294، 318، 319
 259، 281، 281، 281، 337، 337، 336، 389، 389
 397-395، 408، 408

- الحركة النسبية: 41، 46-44، 48،
الرياضيات: 11، 71، 161، 289،
414، 303، 299
- الرياضيات البحتة: 296
- الرياضيات الحديثة: 389
ريد، مايلز: 356
- ريان، جورج برنارد: 100، 107،
257، 259
- ز -**
- الزمكان: 63، 66، 84، 86، 90،
100، 150، 151، 158، 216، 258
312، 325، 262، 281، 420، 413-410،
375، 383، 382، 388، 390-388
- زومينو، برونو: 205
- س -**
- ساسكيند، ليونارد: 342، 369، 413
الساعة الساكنة: 56
الساعة الضوئية: 53-57
الساعة الضوئية الساكنة: 54، 55، 55،
57
الساعة الضوئية المترنقة: 54-57
الساعة الضوئية المترنقة: 55
الساعة المترنقة: 56، 57
سالز، أماندا: 13
ستانيهارد، بول: 387
سترايتر، لارس: 13
ستروغاتس، ستيفن: 13
ستروم، شتاين أريلد: 288
ستروممنغر، أندره: 13، 14، 231
-354، 346، 242، 244، 241
374، 370، 369، 361-358، 356
- الحركة النسبية: 41، 46-44، 48،
52، 59، 64، 81، 183، 185،
192، 192
- حل شوارتزشایلد: 98، 100
- د -**
- داف، مايكيل: 13، 228
دافيدسون، تشارلز: 96
دافيدسون، كليتون: 124، 125
الدلالات الموجية: 131، 132، 372
- دافت، مايكيل: 414، 420، 373
دايسون، فرانك: 96
دايسون، فريمان: 143
دايك، روبرت: 380
دريل، بيرسيس: 13
دوف، مايكيل: 327
دي غراف، فان: 39.
ديراك، بول: 143، 180، 187، 373
- ديكسون، لانس: 282-284
الديناميكية الحرارية (الtermodynamika):
367، 368، 367، 112، 367، 368
- القانون الثاني: 367-365
- ر -**
- رابي، إيزيدور إسحق: 22، 23، 197
راموند، بيير: 13، 204، 205
رأيت، ستيفن: 413
راينز، فريدريك: 22
رذفورد، إرنست: 21، 228
روان، شي - شير: 299
روبرتسون، هوارد: 378
روبنسون، ديفيد: 351
روس، غراهام: 284، 297

- السرعة الثابتة: 44-46، 50، 66،
67، 75، 79، 275
- السرعة الحرة: 44
- سرعة الضوء: 40، 41، 43، 46،
48، 52-55، 57، 58، 61، 63،
66-69، 71، 73، 92، 100،
125، 173، 180، 385
- السرعة المتسارعة: 79
- السماحي، كاترين-ماري: 9
- سمولين، لي: 401، 402
- سوسكيند، ليونارد: 159
- سومنفيلد، آرنولد: 79
- سومنفيلد، تشارلز: 332
- سيرغ، ناثان: 331، 355
- سيتير، ويليم دي: 48
- سيمونسيلي، بيرو: 13
- سين، آشوك: 327، 369
- سيثيا، جيم: 13
- ش -
- شتاينهاردت، دافيد: 13
- الشحنة الضعيفة: 167
- الشحنة القوية: 167
- الشحنة الكهربية: 167، 249، 250
- شروندر، إروين: 125-127، 129،
143، 373
- شفينغر، جولييان: 143
- شوارتز، جون: 14، 157، 159-161،
170، 195، 204، 205، 227، 249
- شوارزتشايد، كارل: 97، 98، 100،
375
- شيرك: 204، 337
- شيري، فريد: 13
- شيمرغ، رولف: 285
- شينكر، ستيفين: 342، 413
- ط -
- طاقة بلانك: 172، 174، 246،
341، 382، 403
- الطاقة الكلية: 108، 112، 114،
117
- طول بلانك: 153، 157، 158،
163، 164، 166، 171، 177، 241،
250، 257، 261، 265، 268،
280، 390، 414، 421
- طول الموجة الكمي: 176، 268
- طومسون: 21
- ظ -
- ظاهرة التداخل: 125
- الظاهرة الكهرومagnetية: 114،
116، 123
- ظاهرة المرور في نفق الكم: 135
- ع -
- عبد السلام: 145، 149، 384
- علم الكون: 9، 280، 281،
314، 377، 384، 385، 389،
392، 398-399
- علم الكون الحديث: 378، 384،
418
- علم الكون الوتري: 389، 394،
395
- عملية "الوتر الواحد": 321
- غ -
- غاسبريني، ماوريتسيو: 394
- غاليليو: 45
- غامو، جورج: 114، 380

- فريدمان، ألكسندر: 377، 378
- فريدمان، دانيال: 101، 336
- فريدمان، روبرت: 356
- الفضاء الخارجي: 44، 72، 80، 81
- فورستناو، هيرمان: 201
- فون درليب، أنجيلا: 14
- فيرارا، سيرجيو: 336
- فيرمي، إنريكو: 198
- الفيزياء: 9، 11، 12، 28، 20-18، 30، 103، 72، 71، 69، 33، 32، 30، 190، 140، 137، 128، 126، 299، 289، 285، 280، 223-397، 356، 347، 310، 303، 409، 400
- الفيزياء التجريبية: 222
- الفيزياء الحديثة: 12، 17، 20، 311، 226، 209، 189، 30
- الفيزياء الكلاسيكية: 110، 136، 135، 131، 126، 416، 240، 200، 182، 291، 200، 291، 416
- الفيزياء الكمية: 143، 31، 29، 14، 179، 162، 161، 103، 375، 252، 222، 199، 413، 342، 413، 158، 14، 13، 395، 394، 204، 159، 118، 107، 106، 143، 142، 132-129، 123، 307، 238، 180
- غانز، رفائيل: 13
- غروس، دافيد: 240، 177، 200
- غرين، بول: 288
- غرين، جوشوا: 13
- غرين، مايكيل: 14، 157، 160، 161
- غرين، ويندي: 13
- غرينسبون، آرثر: 13
- غلاشو، شيلدون: 14، 199، 145، 384، 371، 239-237
- غليوتسي، فيرياندو: 204، 205
- غودسميث، صمويل: 193، 194
- غوردون: 373
- غيتس، بيل: 260
- ف -**
- فاراداي، ميخائيل: 39
- فافا، كومرون: 13، 14، 238، 284-282، 276، 275، 390، 374، 370، 369، 302، 416، 394
- فان نيوونهوزن، بيتر: 336
- فاينبرغ، كين: 13
- فراغات كالابي-ياو (أشكال): 232، 233، 247-242، 251، 249، 294، 289، 287-282، 274، 304، 303، 301، 298، 296، 328، 325، 312، 309، 308، 360، 358، 356، 354، 353، 396، 395، 393، 392، 363، 398
- فرضية باولي: 252
- فرضية العالم المتعدد: 419، 402-399
- فرويد، سigmوند: 106

- ق -

قانون بلانك: 133

قانون الحركة: 19، 40، 124، 132،

411، 372

القوى الضعيفة: 24، 25، 27، 28،

30، 142، 147-144، 149، 199-

201، 223، 225، 349، 382،

384، 408، 421

القوى القوية: 24، 25، 27، 28،

30، 142، 149، 159، 160، 149-144،

201-199، 223، 225، 349، 382،

384، 408، 421، 399، 382

القوى الكهربية: 39، 200

القوى الكهربية الضعيفة: 145

القوى الكهرومغناطيسية: 24، 25،

27، 28، 144، 149-182، 182، 199-

201، 221، 223، 349، 382، 384،

408، 418، 421، 408، 399، 382،

409، 147-145، 147-145، 147-145،

القوى المغناطيسية: 39

القوى النووية: 25، 147، 158،

القياس التجاري: 371

- ك -

كانتس، شيلدون: 298

كارتر، براندون: 351، 367

كارستنس، فيكي: 13

كارلليب، ستيفن: 13

كاسبر، رفائيل: 13

كاسي، غاري: 13

كالابي، يوجينيو: 232

كالوزا، تيودور: 210، 212، 213،

- 225، 223-221، 216، 215،
316، 265، 262، 230، 228،
349، 337
كاميونكوفسكي، مارك: 13
كانتر، ياكوف: 13
كانديلاس، فيليب: 231، 241،
289، 288، 286، 285، 242،
356، 303، 298
كلير، جوهانس: 72
كتلة بلانك: 172، 174، 250،
352، 347
الكثافة الحرجة: 260
الكريوموديناميكية الكمية: 145
كروميلين، أندرو: 96
كريستودولو، ديتريوس: 351
كريغر، يوجين: 337
كسوف الشمس: 95، 96
كلاين، أوسكار: 210، 212، 213،
228، 223-221، 215، 215،
373، 349، 337، 285، 262،
356، 356
كليمنس، هيرب: 356
الكهرباء الديناميكية الكمية: 144،
145
الكهرباء وмагناطيسية: 19، 30، 114،
316، 225، 221، 199
كون، كلايد: 22
كوفاكس، أندراس: 13
كولمان، سيدني: 13، 193، 195
كومر، شيفا: 13
كونسيفيتش، مكسيم: 289
كونراد: 106
كونرز، ألان: 414
كونين، هيلين: 199-201-201
كير، رو: 351

- المبدأ البشري : 402–400
 مبدأ التكافؤ : 78 ، 192 ، 408 ،
 417 ، 409
 مبدأ التناظر : 408 ، 409 ،
 الانتظار الحدسي : 248
 الانتظار الدوراني : 193
 الانتظار الفائق : 190 ، 195
 ، 225 ، 224 ، 206–202 ،
 ، 331 ، 312 ، 249
 ، 346 ، 338 ، 336
 ، 418 ، 417 ، 408 ، 349
 الانتظار القياسي : 149–147
 ، 149 ، 409
 انتظار المرأة : 286 ، 288 ،
 328 ، 301 ، 298 ، 297
 الانتظار الموسيقي : 198
 مبدأ عدم التيقن : 137–135 ، 133
 ، 176 ، 172 ، 150 ، 142–140
 ، 372 ، 367 ، 320 ، 276 ، 266
 ، 415 ، 374
 مجال الجاذبية : 94 ، 98 ، 150 ،
 178 ، 412 ، 192
 الجال الكمي : 144
 الجال الكهربائي : 200
 الجال الكهرومغناطيسي : 39 ، 142
 ، 146 ، 144
 الجالات الكهربية الضعيفة : 145
 الجموعة الشمسية : 318
 مستجير، أحمد : 9
 مصطلح الرغوة الكمية : 150 ، 151
 معادلة بيتا : 158 ، 159
 معادلة ديراك : 373
 معادلة شرودنغر : 373
 معادلة كلاين — غوردون : 373
- كيكاكوا، كيجي : 265
 الكيماء : 33
 كينوشيتا، توبيتشiro : 144
 - ل -
- لا أوسا، زينادي : 288
 لا بلاس، بيرسيمون : 373 ، 372
 لاينيز، غوتفرайд : 417 ، 411
 لوباتشيفسكي، نيكولاي : 259
 لوتكن، آندي : 297
 لورنس، هنري克 : 189
 لويس، جلبرت : 116
 لويس دي برويل (الأمير) : 124 ،
 125 ، 127 ، 129
 لي، جون : 289
 لي، دافيد : 13
 ليان، بونغ : 289
 ليرشي، ولغانغ : 284–282
 ليند، أندرية : 387 ، 399
 لينكر، مونيكا : 285
 ليو، كيفن : 289
- م -
- ماتسون، كاتينكا : 14
 ماتش، إرنست : 411
 ماجلان : 274
 المادة المظلمة : 251 ، 261
 ماك إيون، ميغان : 13
 ماكسويل، جيمس كلارك : 39 ، 19 ،
 40 ، 43 ، 108 ، 121 ، 124 ،
 144 ، 414 ، 221
 ملي، روبرت : 13
 مانديولا، جيفري : 193 ، 195
 مانين، يوري : 289

- ، 160 ، 158 ، 157 ، 154 ، 153 ، 249 ، 248
 ، 180–176 ، 174 ، 172 ، 171 ، 418
 ، 205 ، 200 ، 195–193 ، 187 ، 386–384 ، 388
 ، 226 ، 224 ، 222 ، 216 ، 207 ، 395
 ، 253 ، 252 ، 247 ، 238 ، 227 ، 194
 ، 293 ، 273 ، 266 ، 264 ، 261 ، 348 ، 329–327
 ، 337 ، 336 ، 320 ، 307 ، 294 ، مفهوم الثنائية:
 ، 367–364 ، 352 ، 351 ، 349 ، مفهوم المكان الهندسي ناعم التحدب:
 ، 377 ، 375 ، 373 ، 372 ، 369 ، 175
 ، 417–413 ، 401 ، 389 ، 382 ، مقياس بلانك: 187 ، 175 ، 172
 .421–419 ، منطلق مجموع مسارات فينمان: 131 ، 132
 ميلز، روبرت: 149 ، 132
 ميند، بول: 177 ، 132
 مينكوفסקי، هيرمان: 66 ، 66 ، 129–127
 84 ، 131 ، 135
 - ن -
 نابي، تشارلز: 302 ، 117
 ناغل، تراسي: 14 ، 108–109
 نامبو، يوتيشiro: 159 ، 115
 النسبية: 79 ، 57–55 ، 46–43 ، 408 ، 192
 - النسبية الخاصة: 20 ، 19 ، 12 ، 408 ، 192
 -57 ، 52 ، 46 ، 43–40 ، 36 ، 112
 ، 75–73 ، 71 ، 65–63 ، 61 ، 110
 ، 92 ، 91 ، 85 ، 84 ، 80 ، 79 ، 115
 ، 107 ، 106 ، 103 ، 97 ، 95 ، 126
 ، 166 ، 144 ، 143 ، 124 ، 129–127
 ، 210 ، 209 ، 192 ، 181 ، 124
 ، 408 ، 349 ، 275 ، 253 ، 123
 .420 ، 411 ، 151–149 ، 145–139 ، 137
 - النسبية العامة: 12 ، 20–17 ، 12 ، 30
 ، 74 ، 71 ، 45 ، 36 ، 33 ، 29 ، 131 ، 129–127
 ، 100 ، 98–91 ، 89 ، 79 ، 78 ، 124
 ، 107 ، 106 ، 103 ، 101 ، 123

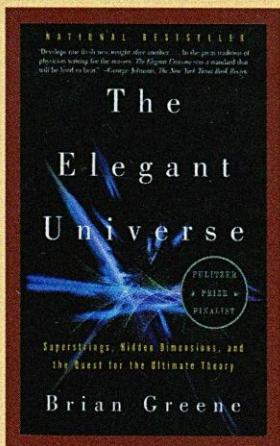
- نظرية-M: 122، 103
 317، 316، 311، 35، 349، 348، 346-341، 338، 407، 403، 398، 395، 351، 421، 420، 417-415، 413، نمط الحركة الدائرية: 263
 نموذج الانفجار الهائل القياسي: 280
 نموذج الفضاء المكان الهندسي الهادئ: 151، 150
 النموذج القياسي: 146، 161، 157، 200-196، 169، 165-163، 251، 249، 223، 205، 386، 417، 415، 386
 النموذج القياسي للكوسمولوجيا: 377
 398-387، 394، 389، 387
 النموذج الكوني التضخم: 387، 398، 394، 388
 نوسينوف، شوييل: 241
 نوفو، أندريه: 205
 نيلسن، هولغر: 159
 نيتوون، إسحق: 19، 49، 47، 40، 75-71، 92، 90-88، 86، 77، 119، 103، 97، 95، 94، 235، 191، 134، 132، 124، 415، 414، 411، 372، 318
 - - -
 هابل، إدرين: 101، 378، 260، 261-257، 279، 261-259
 هارتل، جيمس: 398
 هارفي، جيفري: 283
 هانسون، أندرو: 13
 الهندسة الإقليدية: 83
 هندسة ريعان: 151-149، 142، 140، 139، 161، 158، 154، 153، 187، 180-178، 175، 174، 209، 205، 192، 189، 227، 226، 221، 212، 257، 253، 252، 235، 293، 291، 285، 281، 337، 336، 327، 316، 360، 352، 351، 349، 375، 369، 366، 364، 411-409، 398، 389، 377، 421، 420
 نسق التدخل: 132
 النسيج الفضائي: 92، 157، 101، 179، 212، 213، 215، 411، 233
 النظام الشمسي: 21
 النظرية الأضطرابية: 245، 317، 320، 334، 330، 327-323، 346، 335
 نظرية الانفجار الهائل: 379، 381
 النظرية العشوائية: 32
 نظرية كالوزا كلاين: 223، 216
 نظرية الكم: 124، 144، 126، 181، 175، 161، 159، 147، 307، 251، 239، 222، 205، 382، 374، 373، 337، 336
 نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية: 19، 39، 47، 108، 124، 212، 221
 نظرية المجال الكمي فائق التناظر: 205
 نظرية المجال الموحد: 11، 30، 300
 نظرية نيتوون العالمية للجاذبية: 19، 97، 95، 94، 92، 75-71، 69

- الهندسة الكمية: 257، 258، 260، 268، 279
- الهندسة الالاتبالية: 414
- الهندسة المستوية الإغريقية: 83
- هوبش، تريستان: 356
- هورافا، بيت: 339
- هوروبيتس، غاري: 231، 341، 361، 360، 346، 242
- هوكنخ، ستيفن: 128، 139، 351، 398، 375-373، 371-366
- هول، كريس: 327، 228، 335
- هيرتز، هنريش: 114
- هيرمان، روبرت: 380
- هيزنبرغ، ويرنر: 11، 133، 134، 136، 140، 141، 172، 176
- هيوغيتز، كريستيان: 118
- وارنر، نيكولاوس: 302، 284-282
- وتفرايد، كورت: 13
- ووكر، آرثر: 378
- ويتن، إدوارد: 14، 34، 162
- ، 231، 229، 228، 207، 188، 244، 242، 241، 238، 235، 304، 302، 298، 283، 250، 333، 329-327، 309-306، 355، 349، 341-338، 336، 416، 413، 407، 396، 358
- ويس، جوليوس: 205
- ويل، هيرمان: 149
- ويلتسك، فرانك: 200
- ويلر، جون: 14، 90، 98، 150
- ويلسون، روبرت: 380
- وينبرغ، ستيفن: 13، 145، 199-
- 384، 201
- ي -**
- ياماساكى، ماسامي: 265
- يانغ، شينغ نينغ: 149
- ياو، شينغ تونغ: 232، 285، 289، 294
- يفشييمو، كوستاس: 13
- يولر، ليونارد: 158
- يونغ، توماس: 118
- و -**

الكون الأنيق

ليس هذا الكتاب كتاباً علمياً عادياً. إنه كتاب يعرض أحدث النظريات في الفيزياء وعلم الكون (الكونسومولوجي) في لغة تجمع بين الدقة العلمية والأسلوب الأدبي الرفيع. فيه أسلوب سلس، مشوق، مثلما هو الحال في الروايات أو في الأحداث الدرامية. لذلك فهو كتاب يتوجه إلى أوسع الأصناف من القراء: إلى المختصين وإلى الطلاب والمحققين وكذلك إلى من لهم رغبة في المعرفة العلمية من القراء العاديين.

- بريان غرين: أستاذ فيزياء ورياضيات في جامعة كولومبيا منذ عام 1996. ألقى المحاضرات العامة والتكنولوجية في أكثر من عشرين بلداً. وهو معروف بعدد من الاكتشافات التي قام بها في مجال نظرية الأوتار الفائقة.



- أصول المعرفة العلمية
- ثقافة علمية معاصرة
- فلسفة
- علوم إنسانية واجتماعية
- تقنيات وعلوم تطبيقية
- أداب وفنون
- لسانيات ومعاجم



المنظمة العربية للترجمة

الثمن: ١٥ دولاراً
أو ما يعادلها

ISBN 9953-0-0431-5
9 789953 0297933