منتدى إقرأ الثقافي
WWW.IQRA.AHLAMONTADA.COM

أساسيات الهندسة النووية

د. وجدي محمد الشارف الرتيمي
أستاذ
قسم الهندسة النووية

منشورات
مكتب البحوث والاستشارات الهندسية

بۆدابەزاندنی جۆرەها کتێب:سەردانی: (مُنتَدى إقرَأ الثَقافِي)

لتحميل انواع الكتب راجع: (مُنتَدى إقرَأ الثَقافِي)

براي دانلود كتابهاى مختلف مراجعه: (منتدى اقرأ الثقافى)

www. iqra.ahlamontada.com

www.iqra.ahlamontada.com

للكتب (كوردى ، عربي ، فارسي)

أساسيات الهندسة النووية

أساسيات
الهندسة النووية

تأليف
د. وجدي محمد الشارف الرتيمي
استاذ
قسم الهندسة النووية

منشورات
مكتب البحوث والاستشارات الهندسية

جميع الحقوق محفوظة

لا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات أو نقله أو استنساخه باي شكل من الأشكال دون إذن خطّي مسبق من الناشر.

All rights reserved.

No part of this book may be reproduced, or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopyings, recording or by any information storage retrieval system, without the prior permission in writing of the publisher.

الطبعة الأولى

2004/2003

ردمك (رقم الإيداع الدولي) ISBN 9959-816-26-5

دار الكتب الوطنية/ بنغازي ـ ليبيا

مكتب البحوث والاستشارات الهندسية

كلية الهندسة ـ جامعة الفاتح

ص.ب.: 13285 جامعة الفاتح ـ طرابلس ـ ليبيا

هاتف: 4628390 ـ 21 ـ 218+ بريد مصور: 4628391 ـ 21 ـ 218+

طبع الكتاب بدار الكتاب الجديد المتحدة

إلى والدي محمد الشارف

إلى والدتي حليمة

إلى شقيقي نوري

رحمة الله عليهم وعلى سائر المسلمين

تقديم

تأتي احتفالية كلية الهندسة بجامعة الفاتح بعيدها الأربعين مقرونة بخطوة علمية جادة، تجسدت في مشروع هذا الكتاب الهندسى، ليتحقق معها تكامل الأداء في الدور المناط بمؤسسة علمية جامعية عليا، فلقد استهدف هذا الكتاب محاولة سد الفراغ المعرفي بالمكتبة الهندسية العربية من خلال تواجده في شكل علمي منافس على المستوى العربي والعالمي، الأمر الذي كان معه جهد مكثف وخلاق للتأليف المتخصص والمراجعة العلمية الدقيقة.

هذا الكتاب تقدمه كلية الهندسة بجامعة الفاتح لطلاب المعرفة الهندسية كحق طبيعي، وهنا يغمر النفس كل الفخر في تقديم هذا الكتاب وتقدير الجهد وراء هذا الإنتاج العلمي المتميز والذي توج الدور العلمي لمكتب البحوث والاستشارات الهندسية من خلال دوره في رعاية هذا المشروع كأحد أهدافه في خطة نشر المعرفة العلمية الهندسية.

إن هذا المشروع يدين بالعرفان لجهود أسرة لجنة الكتاب الهندسي التي تضافرت لتمهيد الدرب خدمة للمعرفة.

أمين اللجنة الشعبية بكلية الهندسة

محتويات أساسيات الهندسة النووية

		الصفحة
	المحتويات	أ
	المقدمة	هـ
	الفصل الأول : البناء الإلكتروني للذرة	1
	Electronic Structure of an Atom	
1-1	نظرية بوهر	3
2-1	النظرية الموجية (نظرية دي برولیه وشرود نجر)	20
3-1	الأعداد الكمية	32
4-1	خريطة البناء الإلكتروني للذرة	38
5-1	ملخص	41
6-1	مسائل	41
	الفصل الثاني : مكونات و خواص النواة	43
	Constituents and Properties of the Nucleus	
1-2	خواص البنية الذرية والإلكترونية والنووية	45
2-2	فرضيتا البروتون - الإلكترون والبروتون - النيوترون	48
3-2	بعض الخواص النووية	63
4-2	ملخص	67
5-2	مسائل	67
	الفصل الثالث : النويّات والقوى النووية	69
	Nucleons and Nuclear Forces	
1-3	القوى الأساسية	71
2-3	نظرية الميزونات	76
3-3	الجسيمات عالية الطاقة	79
4-3	ملخص	88
5-3	مسائل	88

الفصل الرابع : نماذج البناء النووى Models of Nuclear Structure		89
1-4	طاقة الترابط النووية واستقرارية النوى	91
2-4	نموذج قطرة السائل (معادلة طاقة الترابط)	101
3-4	نموذج الأغلفة (خريطة البناء النويّاتى)	108
4-4	ملخص	126
5-4	مسائل	126
الفصل الخامس : التفاعلات النووية Nuclear Reactions		129
1-5	المقاطع المستعرضة للتفاعلات	131
2-5	أنواع التفاعلات	139
3-5	قيمة Q للتفاعل ومستويات طاقة الإثارة	141
4-5	نظرية النواة المركبة	147
5-5	معادلة برايت ويجنر للمقاطع المستعرضة المجهرية	154
6-5	ملخص	157
7-5	مسائل	158
الفصل السادس : النشاط الإشعاعي Radioactivity		161
1-6	النشاط الإشعاعي	163
2-6	نمذجة الانحلال الإشعاعي	165
3-6	اتزان النشاط الإشعاعي	176
4-6	تطبيقات الانحلال الإشعاعى	181
5-6	ملخص	185
6-6	مسائل	186
الفصل السابع : النيوترونات Neutrons		189

7-1 ماهية النيوترون	191
7-2 إنتاج النيوترونات	195
7-3 الكشف عن النيوترونات	197
7-4 تصنيف النيوترونات	215
7-5 استطارة النيوترونات فى نظامي المعمل ومركز الكتلة	215
7-6 تباطؤ النيوترونات و احتمالية الاستطارة	225
7-7 النيوترونات الحرارية	233
7-8 ملخص	236
7-9 مسائل	237
الفصل الثامن : الانشطار النووي Nuclear Fission	241
8-1 نظرية الانشطار	243
8-2 المقاطع المستعرضة للانشطار النووي	248
8-3 نواتج الانشطار	250
8-4 النيوترونات الفورية والمتأخرة	256
8-5 الطاقة الناتجة من الانشطار	260
8-6 دورة النيوترونات ومعامل التضاعف K	262
8-7 ملخص	264
8-8 مسائل	265
الفصل التاسع : منظومات التفاعل الانشطارى Nuclear Fission Systems	269
9-1 ثنائية اينشتين	271
9-2 التفاعل المتسلسل مع اليورانيوم	273
9-3 حسابات معامل التضاعف K_∞ وتصميم المفاعلات	276
9-4 الأنواع الأساسية للمفاعلات	305
9-5 فيزياء المفاعلات: استاتيكا وديناميكا المفاعلات	310
9-6 ملخص	317

7-9 مسائل 319

الفصل العاشر : الطاقة النووية وتطبيقاتها (نظرة شمولية) 323
Nuclear Energy and Its Applications (An Overview)
1-10 تمهيد 325
2-10 السكان والبيئة والتنمية 326
3-10 توليد الطاقة الكهربائية 332
4-10 تحلية المياه 334
5-10 تطبيقات النظائر المشعة 339
6-10 الوقاية من التأثير الإشعاعي 340
7-10 ملخص 348

المراجع 349
الملحقات 353
1. ملحق الكتل الذرية 353
2. ملحق الثوابت النووية والفيزيائية 359

بسم الله الرحمن الرحيم
والصلاة والسلام على محمد رسول الله

أما بعد،

اللغة هى أداة الاتصال بين بنى البشر. والكتابة باللغة الأم تسهم بالضرورة فى النهوض بالمجتمع. كما أن الانفجار المعلوماتي الذى نشهده يستلزم وجود آليات لمواكبة الكم الهائل من المعلومات. أحد الطرق المعتمدة هى التأليف والترجمة التى يقوم بها الأفراد. والطريقة الأخرى المستحدثة هى الترجمة الالية والتى تبنتها بعض الدول من بينها روسيا و اليابان. وحتى تصل الأخيرة الى مرحلة النضوج، فإنه يجب تبنى الأسلوب الأول لغرض نقل المعرفة والتقنية. لذا كان هذا الكتاب مساهمة متواضعة فى محاولة لإثراء المكتبة العربية ، والله أسأل أن يوفقنى الى ذلك ، إنه نعم المولى ونعم النصير.

الطاقة تعد مصدر حركية الدول، فمتى زاد استهلاكها للطاقة ازدادت رفاهية هذه الدول. وتتعدد مصادر الطاقة شاملة الوقود الأحفورى السائل والغاز والصلب وكذلك الوقود النووى ومصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة مساقط المياه.. الخ. كما أن العالم يشكو الآن من التأثيرات البيئية مثل تأثير البيت الأخضر بسبب انبعاث الغازات . وبمقارنة ما يتوفر من مصادر الطاقة فانه يوجد اتفاق اقتصادى وهندسى على أن الطاقة النووية مع الالتزام بالمحافظة على أعلى معايير الآمان فى محطات القدرة النووية تبشر بحل لمشكل الطاقة الكهربائية يتسم بكونه نظيف بيئيا وأوفر اقتصاديا. إن العالم مع العقود الأولى للقرن الواحد والعشرين سينتج نوويا طاقة كهربائية تكافىء حوالى 20% من مجمل الطاقة الكهربائية المنتجة عالمياً ، فى حين أن بعض الدول مثل فرنسا ستنتج نوويا ما يجاوز 80% من مجمل طاقتها الكهربائية المنتجة . أما فيما يخص الدول العربية فهى لا تملك الفحم ولكنها تملك النفط ولعل استخدام النفط يكون أجدى اقتصاديا إذا ما استخدم فى صناعة البتروكيماويات وكمحروقات لوسائل المواصلات، كما أن الطاقة الشمسية

منظورة تطبيقيا على مستوى محدود متمثل فى التطبيقات المنزلية، أما ونحن نتحدث على التطبيقات الشمولية كمصدر طاقة ضخم للمصانع العملاقة والمؤسسات الضخمة كالمستشفيات والمشاريع القومية ..الخ ، فإن البديل الحقيقى والمتوفر تقنيا هو مصدر طاقة الانشطار النووى الذى يجب أن يتبنى إقليميا وقوميا بالتوازى مع مصادر الطاقة الأخرى. لذلك كان هذا الكتاب مدخلا لوضع اللبنات الأساسية لهذا المجال الحيوى محاولا بذلك إنارة شمعة فى الطريق أمام راغبى التعرف على أسرار الطاقة النووية.

إن إعداد أى كتاب منهجى لابد وأن يكون نتاج جمع ورصد لتراكم معرفى والذى بالأساس يكون حصيلة إجتهادات السابقين فى حقل المعرفة ذاتها، وعليه فإن المادة العلمية المعروضة فى هذا الكتاب هى مزيج من تجميع هذه المعارف والإضافة اليها فى بعض المواقع وتقديمها بأسلوب وتنسيق للكاتب، ومن ثم فإن المراجع المذيلة فى آخر الكتاب هو الإعتراف الضمنى لجهد السابقين من العلماء والمؤلفين السابقين.

سمى هذا الكتاب بأساسيات الهندسة النووية لتبنيه ثلاثة أساسات رئيسة فى مجملها تشكل قاعدة مجال الهندسة النووية والذى يتشكل بنيانه بجدران مصاحبة لهذه الأساسات متمثلة فى شىء من الكيمياء والإلكترونيات والحراريات لإتمام منظومة المجال المتكاملة. هذا وسيصب جل تركيزنا فى هذا الكتاب على الثلاثة أساسات والتى هى ذاتها تعد خطاً من خطوط اهتمامات الفيزياء النووية ونعنى بذلك خط فيزياء الطاقة النووية المنخفضة ، حيث تهتم باقى خطوط اهتمامات الفيزياء النووية بفيزياء الطاقة النووية المتوسطة ، وفيزياء الطاقة النووية العالية، وفيزياء الجسيمات، والفيزياء النووية الكونية .

روعى فى إعداد مادة هذا الكتاب بأن يكون منهجيا، لتدريس طلبة الهندسة النووية خلال فصل دراسى واحد للسنة الثالثة الجامعية، كما أن المحتوى العلمى يمكن أن يستفيد به الطلبة غير المتخصصين فى مجال الهندسة النووية، وذلك كمادة اختيارية للسنوات الأخيرة من الدراسة الجامعية أو

السنة الأولى للدراسة العليا. يتطلب هذا الكتاب إلماماً مسبق بمبادئ الفيزيـــاء والرياضة الحديثة.

وحيث إنه فى اللغة العربية ، الجملة الفعلية المتكونـــة مـــن العنـــاصر الثلاث الفعل والفاعل والمفعول به تكون جملة مفيدة، فبناء على ذلك كانت أساســـات هذا الكتاب، على نفس السياق، هى الفعل(تفاعلات الانشطار النووي) والفـــاعل (النيوترون) والمفعول به (النواة)، حيث سيتم التجاوز فى تسلســـل الـــترتيب، بحيث نبدأ بتناول موضوع النواة ثم موضوع النيوترون ثم موضوع تفـــاعلات الانشطار النووي.

من خلال هذه الأساسات نتناول عدة فصول ففى الفصل الأول نتحـــدث عـــن البناء الإلكترونى للذرة، وفى الفصل الثانى عن مكونات وخـــــواص النـــواة، وفى الفصل الثالث عن النويّات والقوى النووية. فى الفصل الرابع، نتحدث عـــن نماذج البناء النووى، وفى الفصل الخامس عن التفـــاعلات النوويـــة . كمـــا نتناول فى الفصل السادس النشاط الإشعاعى. وفى الفصل السابع نتحدث عـــن النيوترونات بشئ من التفصيل . أما الفصـــل الثـــامن فيخـــص الانشـــطار النووى، ثم فى الفصل التاسع نعرج على منظومات التفاعل الانشطارى. فـــى الفصل العاشر نقدم حوصلة عن الطاقة النووية وتطبيقاتها، ونختـــم الكتـــاب بقائمة للمراجع وكذلك بعض الملاحق اللازمة للحسابات.

لقد كان دور الأستاذة الدكتورة مريم عتيق فى مراجعتها العلمية لمـــادة هـــذا الكتاب فعالاً جدا ، وذلك لما حضيت به من خبرة مرموقة فى تأليف العديـــد من الكتب المنهجية، ولذلك تم الاسترشاد بجميع تعديلاتها وملاحظاتها. وأنـــا جد شاكراً لها ذلك.

كما أسجل شكري للأستاذين محمد مسعود الرقيق وعيسى أحمد موسى نظـير مراجعتهما اللغوية المتأنية لنص هذا الكتاب.

الفصل الأول

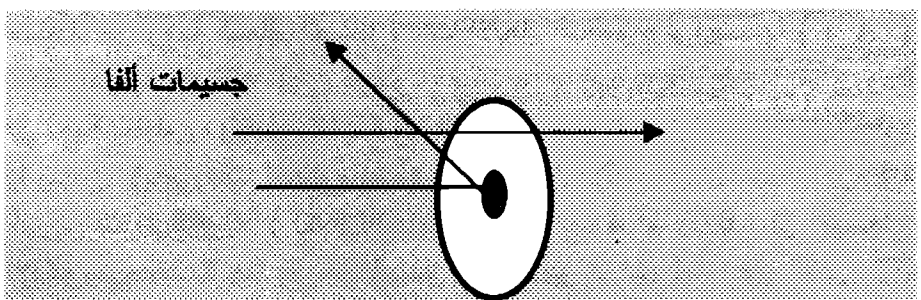
البناء الإلكتروني للذرة
Electronic Structure of Atom

1-1 نظرية بوهر.
1-2 النظرية الموجية (نظرية دي برولیه وشرودنجر).
1-3 الأعداد الكمية.
1-4 خريطة البناء الإلكتروني للذرة.
1-5 ملخص.
1-6 مسائل.

1-1 نظرية بوهر Bohr's Theory :

مع بدايات القرن العشرين كان للدراسات المعملية التى قام بها أرنست رذرفورد وزملاؤه الفضل فىإرساء تركيب بنائى جديد للذرة وبالتالى استبعاد نموذج ج.ثومسون المقترح فى أواخر القرن التاسع عشر والذى يفيد بأن الذرة عبارة عن إلكترونات مدفونة داخل كرة ذات شحنة موجبة. إن تجربة رذرفورد كانت تشمل تعريض رقائق من الذهب لقذائف من جسيمات الفا. لقد لوحظ من خلال هذه التجربة أن مجموعة من جسيمات الفا اخترقت الرقائق وأخرى ارتدت والبقية انحرفت عن مسارها. لذا فإن التركيب الحديث للذرة يشمل وجود نواة فى مركز الذرة ذات شحنةموجبة تلف من حولها مجموعة من الإلكترونات. لقد جاء هذا النموذج المقترح من قبل رذرفورد نتيجة انبهاره بحقيقة ارتداد بعض جسيمات الفا حيث قال: " لقد كان أكثر حدث صَعُب عليّ تصديقه فى حياتى، فهل كنت لتصدق لو أنك أطلقت قذيفة خمس عشرة بوصة صوب نسيج ورقى وأرتدت لتصدمك."

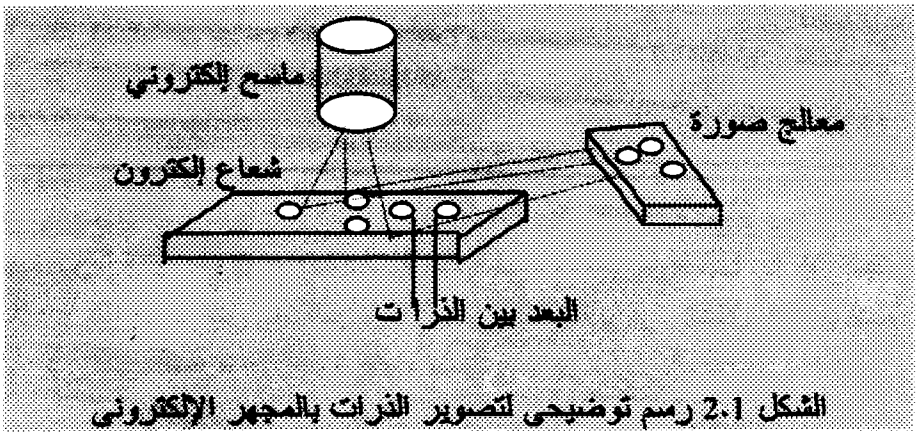
ومن معادلات التبعثر (الاستطارة) تمكن رذرفورد من استنتاج أن قطر مركز الاستطارة (النواة) أصغر 1000 مرة من قطر الذرة بحيث يكون نصف قطر النواة الذرية فى حدود 10^{-12}سم، و بالتالى يقارب حجم النواة من 10^{-36} سم^3 . فإذا كانت الكتلة (والتى أغلبيتها فى النواة) تقدر بحوالى 10^{-24} جرام وذلك للنوى الخفيفة، فإن ذلك يعنى أن الكثافة تقارب من 10^{12} جرام/سم^3 . الشكل1.1 يوضح استطارة الفا.



الشكل 1.1 استطارة أشعة الفا بالنسبة للذرات فى تجربة رذرفورد

إذًا، بمتابعة التاريخ، نجد أن الفيلسوف ديموكريتس في القرن الخامس قبل الميلاد قد فسر البناء الأولى للطبيعة بكون أن كل المواد يمكن تقليصها إلى ذرة غير قابلة للانقسام وتحمل مواصفات المادة. وفى العشرينيّات من القرن العشرين أنهى رذرفورد التساؤل عن ماهية هذه الذرة إلاّ أنه لم يتسن لأى أحد أن يلقى بنظرة الى ذرة بذاتها الا بحلول سنة 1970. وبحلول سنة 1990 تمكن أحد العلماء من إصدار صورة مباشرة لبناء ذرى معقد للمادة. هذا العالم هو ستيفن بينيكوك (Stephen Pennycook) من معمل أوكريدج القومى بأمريكا. لقد قام هذا العالم باقتراح تقنية جديدة وهى التصوير بتباين Z (Z -Contrast Imaging) حيث إن هذه التقنية تعد تطويرًا جذريًا فى مجال المجهرية الإلكترونية، فلقد كانت قبل هذه التقنية أساليب صعبة لإصدار الصورة مع صعوبة تفسيرها. إلاّ أنه باستخدام أسلوب بينيكوك سيتمكن العلماء من النظر الى التركيب الذرى مباشرة بالمجهر الإلكترونى الذى يميز ذرة ما عن أخرى بناءً على عدد البروتونات أو قيمة "Z" . وبالتالى فإنه باستخدام هذه الطريقة يمكن التحليل التفصيلى للمادة التى ستفتح آفاقًا جديدةً من أجل خزف قوى وحواسيب سريعة وأجهزة إلكترونية متضامة أكثر وكفاءة عالية لتقنيات الطاقة. لقد تم تسويق نظام بينيكوك تحت اسم HB501UX بمجاهر VG ، حيث إن النظام يرصد صورة بقدرة تمييز قدرها 2.2 انجستروم (1 انجستروم = 10^{-6} شعرة الإنسان = 10^{-8} سم). حيث إن هذه القدرة تفوق بـ 35% المعايير الصناعية. إلاّ أن سباق الانجستروم لا ينتهى هنا، حيث إن الهدف المطموح للمجهرية هو التعرف على أبعاد تصل الى 1 A° . ويتوقع بينيكوك أنه باستخدام تقنيته سيتمكن مستقبلاً من رؤية المعالم الصغيرة ذات الأبعاد المطموح لرؤيتها (1 A°) بتكلفة تقارب 1– 1.5 مليون دولار.

فى تقنية التصوير بتباين Z ، يتم الحصول على الصورة بعد تمرير شعاع دقيق من الإلكترونات لمسح مادة ما وبالتالى فإن الإلكترونات المبعثرة بزوايا كبيرة تستخدم لتخريط (MAPPING) تركيبة المادة. أما إذا كان الشعاع الإلكترونى دقيقًا جدًا بدرجة أقل من التباعد بين ذرات المادة فإن التخريط ينتج صور على مستوى الذرات. الشكل 2.1 يمثل رسمًا توضيحيًا لمفهوم تصوير الذرات بالمجهر الإلكترونى.



الشكل 2.1 رسم توضيحي لتصوير الذرات بالمجهر الإلكتروني

من خلال طرح رذرفورد فإن حجم الذرة يكبر عن حجم النواة بما يزيد عن $(1000)^3=10^9$) ضعفا ومن ثم فإن معظم حجم الذرة فراغ بحيث تدور الإلكترونات تحت تأثير قوتين متساويتين وهما جذب النواة والقوة المركزية الطاردة الناشئة عن دوران الإلكترونات. إن تفسير رذرفورد الكواكبى للذرة لم يكن صحيحا فالمقارنة بين حركة عالم الكواكب وحركة عالم الذرات مختلفة. لذا، وتبعا للديناميكا الكهربية فإن أى شحنة مسرعة (تشمل الإلكترون) متحركة فى دائرة حول النواة يجب أن تفقد طاقة بالإشعاع وسوف تنقص المنظومة فى الطاقة وأخيرًا يسقط الإلكترون فى النواة. إن طبيعة فقدان الطاقة هذه تجعل الضوء المنبعث له طيف مستمر، ولكنه لوحظ أن الضوء المنبعث مميز Discrete ، مما أدى بالعالم بوهر فى سنة 1913 لاستحداث نظريته المشهورة لحل تلك المعضلة.

لقد بين نيلز بوهر أنه باستخدام الميكانيكا التقليدية والديناميكا الكهربائية لا يمكن استنتاج مواقع مستقرة للإلكترونات فى الذرة. إن كل من نظرية بلانك لإشعاع الجسم الأسود وكذلك التأثير الكهروضوئى أكدتا لزوم تعديل قوانين الديناميكا الكهربائية. وبالتالى قدر بوهر صلاحية تطبيق الميكانيكا التقليدية للذرات فى حين وجوب تعديل الديناميكا الكهربائية. لقد افترض بوهر وجود مدارات إلكترونية مستقرة غير مشعة فى الذرة بقيم معينة للزخم الزاوى، ويحدث انبعاث أو امتصاص الفوتونات فى الانتقالات بين الحالات السلكنة أو

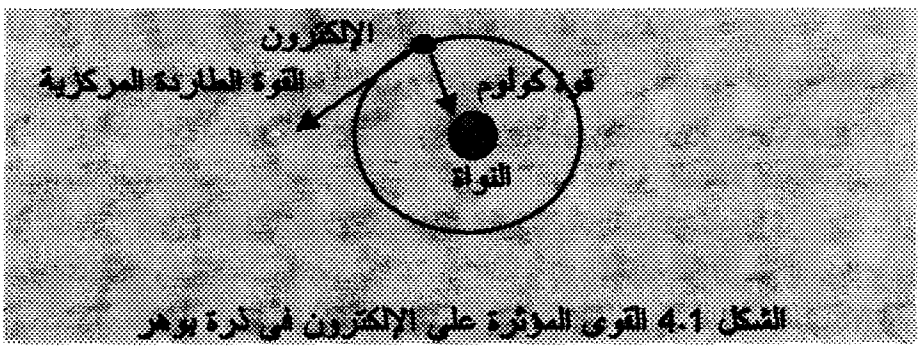
المستقرة. كما أن تردد الإشعاع ν ليس ذلك التردد الدورانى للإلكترونات فى أى من المدارين ولكن له علاقة بطاقة كل من المدارين أى أن:

$$h\nu = E_1 - E_2 \qquad (1.1)$$

حيث إن E_1 ، E_2 هما الطاقة الكلية فى المدارين، والثابت h هو ثابت بلانك. هذا الافتراض يعد المدخل الأساسى لنظرية بوهر. الشكل 3.1 يوضح النماذج التى افتـُرضت للذرة إنتهاء بنموذج بوهر

الشكل 3.1 نماذج للذرة

لقد افترض بوهر للتبسيط بأن الإلكترون يدور فى مدار دائرى وهو بـــدوره واقع تحت تأثير قوتين لبقائه فى هذا المدار. هاتان القوتان هما القوة الطـــاردة المركزية وقوة كولوم الجاذبة. الشكل 4.1 يوضح ذلك.



الشكل 4.1 القوى المؤثرة على الإلكترون فى ذرة بوهر

إن القوة الطاردة المركزية يمكن إيجادها باستخدام قانون نيوتن الثانى:

$$F = ma = mr\omega^2 \qquad (2.1)$$

حيث m هى الكتلة و $r\,\omega 2$ هى العجلة الدورانيـــة و r نصـــف القطـــر و ω السرعة الزاويّة، كما أن القوة الجاذبة الكولومية يعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$F_q = \varepsilon \frac{qe}{r^2} \qquad (3.1)$$

حيث إن الثابت ($\varepsilon = 1/4\pi\varepsilon_o$) يســـاوى 9×10^9 $C2/Nm2$ وe تمثـــل شحنة الإلكترون وتساوى 1.6×10^{-19} C و q هى شحنة النواة Ze .
إن التوازن بين القوتين يؤدى الى استنتاج المعادلة التالية:

$$mr\omega^2 = \varepsilon \frac{Ze^2}{r^2} \qquad (4.1)$$

وحيث إن السرعة الزاويّة تتناسب مع السرعة الخطية من خلال:

$$v = \omega r \qquad (5.1)$$

فإن معادلة 4.1 يمكن كتابتها كما يلى:

$$m\frac{v^2}{r} = \varepsilon \frac{Ze^2}{r^2} \qquad (6.1)$$

أو بطريقة أخرى:

$$m\frac{v^2}{2} = \varepsilon \frac{Ze^2}{2r} \qquad (7.1)$$

كما أن طاقة الوضع U للإلكترون يمكن التدليل عنها بالمعادلة التالية:

$$U = -\varepsilon \frac{Ze^2}{r} \qquad (8.1)$$

إذًا فى حالة المدارات الدائرية ومن خلال المعادلتين 7.1 و 8.1 يمكن استنتاج أن طاقة الحركة تساوى نصف القيمة المطلقة لطاقة الوضع. وحيث إن الطاقة الكلية يمكن التعبير عنها بحاصل جمع الطاقة الحركية مضافًا إليها طاقة الوضع ، أى أن:

$$E = \frac{mv^2}{2} + U \qquad (9.1)$$

إذًا وباستخدام 8.1 يمكن استنتاج:

$$E = -\varepsilon\frac{Ze^2}{2r} \qquad (10.1)$$

أيضا وبنظرة أخرى فإنه هناك تنافس بين الطاقة الحركية وطاقة كولوم حيث إن الفرق بين الطاقتين يعبر عن طاقة ترابط الإلكترون للنواة (Binding Energy)

$$B.E. = \frac{mv^2}{2} - \varepsilon\frac{Ze^2}{r} \qquad (11.1)$$

أى أن وباستخدام المعادلة 7.1 فإن:

$$B.E. = -\varepsilon\frac{Ze^2}{2r} \qquad (12.1)$$

النتيجة سالبة لأن الإلكترون ملازم للنواة فى مداره.

المعادلة 12.1 توضح الطاقة الدنيا اللازمة لتحرير الإلكترون ، فى حين أن المعادلة 8.1 تبين الطاقة الكفيلة بتحرير الإلكترون من الذرة نهائيًا . باستخدام معادلة 1.1 و المعادلة 10.1 فإن تردد الإشعاع الصادر نتيجة تحول الإلكترون من مدار 1 المناظر لنصف القطر r_1 إلى المدار 2 المناظر لنصف القطر r_2 يمكن الحصول عليه من المعادلة التالية:

$$\nu = \varepsilon \frac{Ze^2}{2h}\left[\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right] \qquad (13.1)$$

كما أن معادلة ريتز-بالمر Ritz-Balmer وهى المعادلة التى تحـــدد تـــردد الخطوط الطيفية Spectral Lines يمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية:

$$\nu = c\nu^{\bullet} = cR\left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right] \qquad (14.1)$$

حيث إن c سرعة الضوء ، و R ثابت ريدبيرج Rydberg . المقارنة بيـــن المعادلتين 13.1 و14.1 تفيد أن أنصاف أقطار المدارات المستقرة يجـــب أن تتناسب مع ضعف الأعداد الصحيحة ، بمعنى:

$$r_n = n^2 r_0 \qquad (15.1)$$

هذا يؤدى إلى تكمية الطاقة (Quantaizing Energy) للذرة، وبالنظر إلـــى المعادلة 10.1 والاستفادة من المعادلة 15.1 فالطاقة الكمية تعطى من المعادلة التالية:

$$E_n = -\varepsilon \frac{Ze^2}{2r_0}\frac{1}{n^2} \qquad (16.1)$$

وبالتالى فإن التردد للإشعاع الصادر عن تنقل الإلكترون من مدار إلى مـــدار يعطى بالمعادلة التالية:

$$\nu = \varepsilon \frac{Ze^2}{2hr_0}\left[\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right] \qquad (17.1)$$

حيث إن r_0 يمثل أصغر نصف قطر ممكن.

عندما تؤول n إلى عدد كبير جدًا (مالانهاية) ، فإن مستويات الطاقة تتقـــارب جدًا لبعضها البعض ويكون الفارق فى الطاقة بين المدارات المتجاورة تلـــك يقارب من الصفر، ومن ثم فإن تكمية الطاقة يكون تأثيرها ضئيلاً، والنتـــائج

تتقارب مع نتائج الفيزياء الكلاسيكية، وهذا ما يسمى بمبدأ بوهـــر للمطابقـــة. وبمقارنة المعادلة 17.1 والمعادلة 14.1 فإن ثابت ريدبـــــرج Rydberg ،R، لذرة الهيدروجين يعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$R = \varepsilon \frac{e^2}{2chr_0} = 96710758 \quad m^{-1} \qquad (18.1)$$

مثال 1.1

استخدم مبدأ بوهر للمطابقة لإيجاد القيمة العددية لأصغر نصـــف قطـــر ذرة الهيدروجين (نصف قطر بوهر) والذى يساوى 529. 0 انجستروم .

الحل:

لنفرض أن $n = n_1$ و $n-1 = n_2$ فإن :

$$\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} = \frac{2n-1}{n^2(n-1)^2} \qquad (1)$$

وحيث إن $1 << n$ فإن: $2n-1 \sim 2n$ و $n^2(n^2-2n+1) \sim n^4$

وبالتالى فإن المعادلة 1 تساوى $2/n^3$ ، وبـــالتعويض بـــهذه القيمـــة فـــى المعادلة 17.1 فإن التردد يعطى بالمعادلة التالية:

$$\nu \sim \varepsilon \frac{Ze^2}{hr_0 n^3} \qquad (2)$$

وحيث إن التردد الكلاسيكى (التقليدى) يمكن التعبير عنه بالآتى:

$$\nu_c = \frac{v}{2\pi r} \qquad (3)$$

وباستخدام المعادلة 6.1 لدلالة عن v^2 وباستخدام المعادلة 15.1 للتدليل علـــى r فإن

$$\nu_c^2 = \varepsilon \frac{Ze^2}{4\pi^2 m r_0^3 n^6} \qquad (4)$$

والآن وحسب مبدأ المطابقة لبوهر فإن ($\nu^2 = \nu_e^2$) ، لذا وبتربيع المعادلة 2 ومساواتها بالمعادلة 4 يمكننا استنتاج:

$$r_0 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m Z e^2} \qquad (5)$$

وفى حالة الهيدروجين فإن الشحنة Z=1 و كتلة الإلكترون $m=m_e$ وبالتالىفإن نصف قطر بوهر يعطى بالمعادلة التالية:

$$a_0 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \qquad (6)$$

وباستخدام قيم الثوابت:

$$m_e = 9.1091 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

$$1/\varepsilon_0 = 36\pi \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg}$$

$$h = 4.13556 \times 10^{-15} \text{ eV-sec} = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J.sec}$$

(لاحظ أن : $\text{Joule} = \text{N.m} = \text{Kg m}^2/\text{sec}^2$)

وبالتعويض بالقيم المعطية والانتباه للوحدات ، نجد أن نصف قطر بوهر هو:

$$a_o = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.529 \text{ A}^o$$

لقد نجحت نظرية بوهر فى تفسير طيف الهيدروجين وكل الأيونات ذات الإلكترون الواحد مثل He^+ و Li^{+2}، إلاّ أن النظرية لم تتمكن من تفسير أطياف ذرات أخرى أكثر تعقيدًا من ذرة الهيدروجين (ذرات متعددة الإلكترونات) .

مثال 2.1

ا- اوجد علاقة رياضية لنصف قطر الأيونات ذات الإلكترون الواحد

ب- اثبت أن طاقة الإلكترون الوحيد للأيون تتناسب طرديا مع Z^2

ج- احسب طاقة التأين اللازمة لكل من الهيدروجين و أيون الهيليوم He^{+} و أيون الليثيوم Li^{++}

الحل:

ا - باستخدام المعادلة 5 فى المثال السابق:

$$r_0 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m Z e^2} \qquad (1)$$

وهى تعبر عن المدار الأول للإلكترون الوحيد الذى يدور حول نواة ذات شحنة موجبة قدرها Ze ، ومن ثم يمكن التعبير عن نصف القطر بالتالي:

$$r_0 = \frac{a_0}{Z} \qquad (2)$$

وبالتالى فإن المدارات العليا تعطى من العلاقة:

$$r_n = n^2 \frac{a_0}{Z} \qquad (3)$$

ب- بالرجوع للمعادلة 1-16 وباستخدام المعادلة 2 من هذا المثال مع اعتبار q=Ze ، يمكننا الحصول على المعادلة:

$$E_n = -\varepsilon \frac{e^2}{2a_0} Z^2 \frac{1}{n^2} \qquad (4)$$

من المعادلة نلاحظ أن الطاقة تتناسب طرديا مع مربع العدد الذرى للذرة .

ج- لإيجاد طاقة التأين فعلى الإلكترون الخروج من المدار الأول (n=1) إلى المدار مالانهاية (الإنفكاك من جذب النواة $n=\infty$) ، وبالتالى تكون الطاقة اللازمة للتأين هى:

$$E = -\varepsilon \frac{e^2}{2a_0} Z^2 \left[\frac{1}{1^2} - 0\right] \qquad (5)$$

وباستخدام القيم التالية:

$$\varepsilon = 9x10^{9}\ Nm^2/C^2$$
$$e = 1.6x10^{-19}\ C$$
$$a_o = 0.529x10^{-10}\ m$$
$$eV = 1.6x10^{-19}\ J$$

نجد قيمة E بدلالة Z^2 هي:

$$E = -\varepsilon\frac{e^2}{2a_0}Z^2 = \frac{-9x10^{9}[\frac{Nm^2}{C^2}]x(1.6x10^{-19})^2[C^2]}{2x0.529x10^{-10}[m]}\ Z^2$$

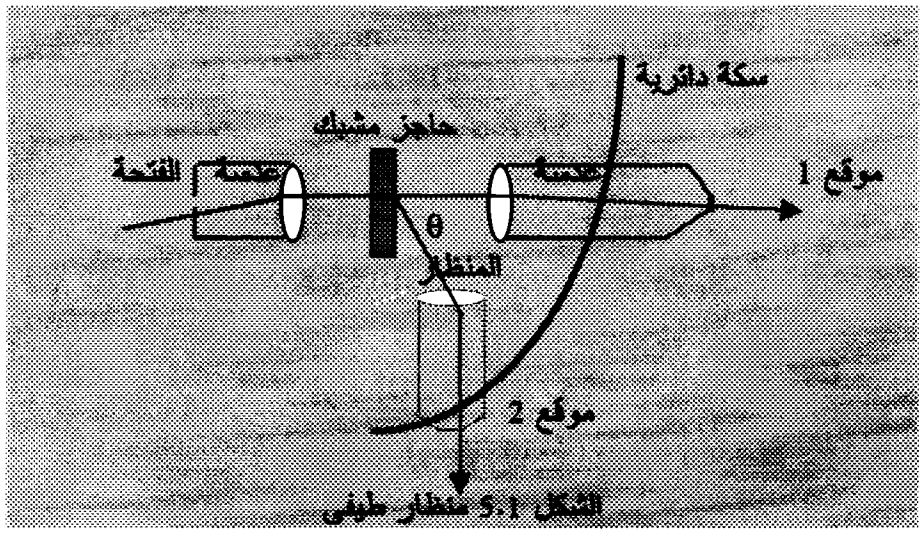
$$E = \frac{-2.17769x10^{-18}[J]}{1.6x10^{-19}[\frac{J}{eV}]}\ Z^2$$

$$E = -13.6\ Z^2\ [eV] \qquad (6)$$

الإشارة السالبة تفيد بأن علينا إيداع تلك الطاقة لتحرير الإلكترون . الآن يمكننا استخدام المعادلة 6 للتعويض مباشرة بدلالة Z و التى لها قيمة 1 للهيدروجين و 2 لأيون الهيليوم $^4He^+$ و 3 لأيون الليثيوم $^6Li^{++}$ ، وبالتالى تكون قيم طاقة التأين كما يلى:

الذرة	الرمز	Z	طاقة التأين E = -13.6 Z2 [eV]
الهيدروجين	^1_1H	1	−13.6
الهيليوم	$^4_2He^+$	2	− 54.4
الليثيوم	$^6_3Li^{++}$	3	− 122.4

إن الجهاز المستخدم لدراسة أطياف العناصر هوالمنظار الطيفى و الشكل 5.1 يوضح ذلك.



الشكل 5.1 منظار طيفى

إن الخطوط الطيفية الذرية المُراقبة أو المُصورة تُرصد إما باستخدام المنظار الطيفى ذى الحاجز المشبك أو المنشور ففى الشكل السابق لو أستبدل المنظار بآلة تصوير لتصوير الطيف فإن الجهاز بالتالى يسمى المصور الطيفى. إن الجهاز بحد ذاته هو آلة يتم بها بعثرة الضوء وله إمكانية قياس الطول الموجى أو التردد للضوء المبعثر. ففى الجهاز الضوء المنبعث من المصدر يشع على الشق وفى حالة ماإذا كان المصدر يعطى ضوءًا أحادى الطول الموجى فإن خيالاً واحدًا فقط للشق سوف يُرى بالمنظار عند توجيهه بزاوية معينة θ. أما إذا كان المصدر يعطى عددًا من أحادى الأطوال الموجية عند كل زاوية (موقع) للمنظار المتحرك على السكة الدائرية، فستتعدد الخيالات المختلفة للشق و تظهر للملاحظ كخطوط ضيقة متوازية، والتى سميت بالخطوط الطيفية. الشكل 6.1 يوضح الخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين.

فى سنة 1885 تمكن العالم بالمر من إيجاد علاقة لحساب التردد للخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين الظاهرة فى منطقة الضوء المرئى والقريبة من منطقة فوق البنفسجية ، والعلاقة هى:

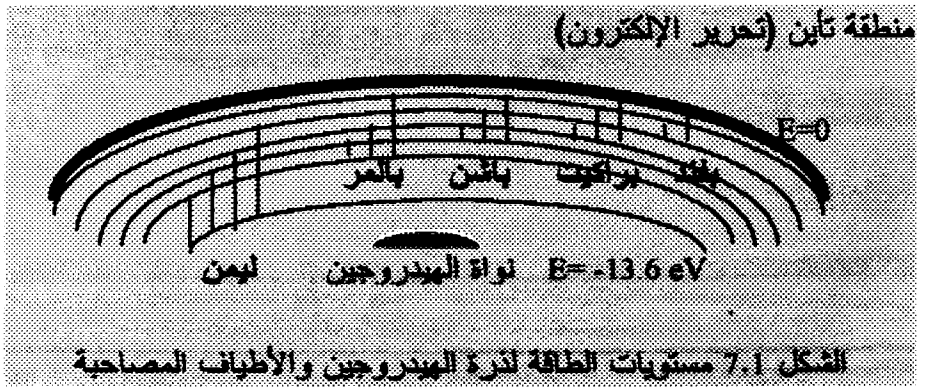
$$\nu = cR\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (19.1)$$

الشكل 6.1 الخطوط الطيفية لذرات الهيدروجين

وهى نفس المعادلة 14.1 فى حالة 2=m ، حيث إن n هو عدد صحيح له قيم 3، 4، 5،... بحيث كل منهم يمثل خطًا من خطوط الطيف. هناك سلسلات أخرى أكتشفت وهى تمثل خطوطًا طيفية خارج نطاق المنطقة المنظورة من الضوء وقد سميت بأسماء مكتشفيها. جدول 1.1 يسرد هذه السلسلات.

جدول 1.1 : سلسلات أطياف الهيدروجين بتردد $\nu = cR\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$

المنطقة	قيم n	قيمة m	اسم السلسلة
فوق البنفسجية	$2 < n$	1	ليمن Lyman
المنطقة المنظورة	$3 < n$	2	بالمر Balmar
تحت الحمراء	$4 < n$	3	باشن Paschen
تحت الحمراء	$5 < n$	4	براكيت Brackett
تحت الحمراء	$6 < n$	5	بيفند Pfund
ما تحت الحمراء	$7 < n$	6	همفرى Humphrey

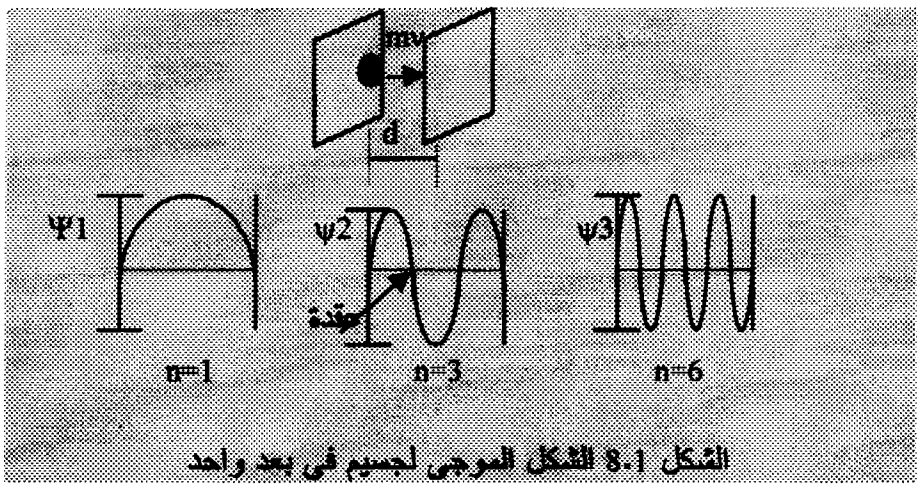
إن مقارنة معادلة 13.1 والتى تحدد تردد الإلكترون المنتقل من مـــدار إلـــى مدار والمعادلة 14.1 والخاصة بخطوط الطيف يحدد العلاقة بين مســـتويات الطاقة لذرة الهيدروجين بحيث إن انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلـــى إلى مستوى طاقة أقل يتطلب تسريح أشعة (قذفة) ذات طول موجى وتـــردد معين. الشكل 7.1 يبين مستوى الطاقة لذرة الهيدروجين والسلسلات المرافقـة لتسريح أشعة ذات تردد أو طول موجى معين.

الشكل 7.1 مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين والأطياف المصاحبة

لذا فإن الذرة المحايدة تحوى شحنة موجبة على النواة تكافئها فـــى المقـدار شحنة سالبة تحملها الإلكترونات التى تدور فى الفراغ الهائل حول النواة ولكن كيف تنتظم هذه الإلكترونات. إنها تنتظم فى مدارات بصفـــة الجســيمات أو كسحابة بصفة الموجية. إن عجز نظرية بوهر عن تفسير ذرات بـــأكثر مـــن إلكترون أدى بالعلماء إلى التفكير فى نظريات أخرى تساعدهم علـــى تحديـد مستويات الطاقة فى الذرات والجزئيات ففى سنة 1924 قام فيزيـــائى شـــاب يدعى لويس دى بروليه باقتراح الخاصية الثنائية للتصرف الجسيمى للموجـة والتصرف الموجى للجسيم، بحيث يكون الطول الموجى المصاحب لجســيم ذا كتلة m ويتحرك بسرعة v معطى بالمعادلة التالية :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \qquad (29.1)$$

وهو ما حققه عمليا كل من دايفسيون و جيبرمر بمعامل بيل للتلفونـــات بعـــد بعض من سنوات لاحقة لاقتراح دى برولیه. الشكل الموجى لحركة جســـيم فى بُعد واحد يمكن التعبير عنه بالشكل 8.1 .
يمكننا ملاحظة أن الطول الموجى λ للموجات المحتملة يمكن تحقيقـــها مـــن المعادلة التالية:

$$\lambda = \frac{2d}{J} \qquad (30.1)$$



الشكل 8.1 الشكل الموجى لجسيم فى بعد واحد

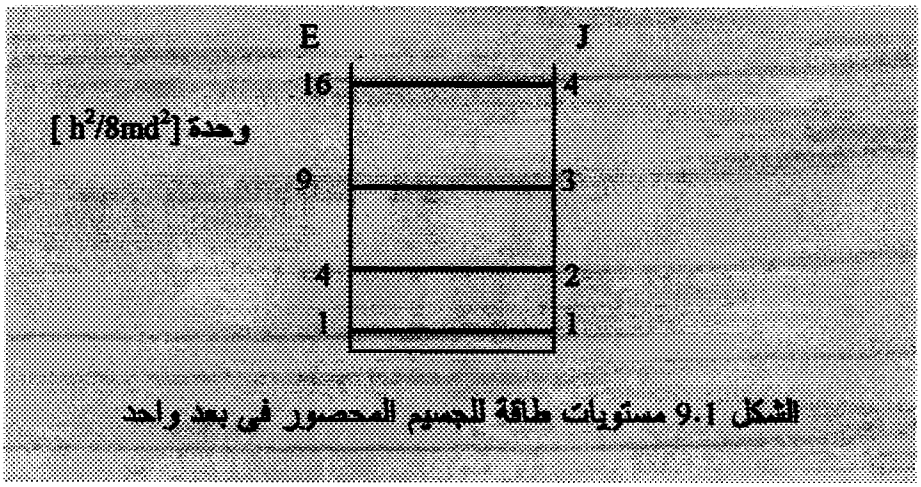
حيث d هى المسافة بين حائطى الصندوق و J هو عـــدد صحيـــح يســـاوى 1،2،3،....هذا العدد J هو عدد كمى للنظام تحت الدراسة وهو نتيجة حتمية لشرط احتواء الموجة فى الفضاء المسموح للجسيم وكما نرى فإن التوفيق بين المعادلتين 29.1 و 30.1 يمكن الحصول على التعبير التالى:

$$mv = \frac{Jh}{2d} \qquad (31.1)$$

وهذه المعادلة تقترح شرط كمى لزخم Momentum الجسيم ومن ثم تحديـــد طاقة الحركة لقيم معينة:

$$E_J = \frac{J^2 h^2}{8md^2} \qquad (32.1)$$

هذه المعادلة تبين لنا بأن أى جسيم محصور للحركة فى منطقة بأى بعد ستكون له طاقات محددة له. هذه الطاقات كما تشير له المعادلة السابقة تعتمد على كتلة الجسيم m والبعد d الذى يتحرك فيه الجسيم (له علاقة بالمدار فيما يقابل نظرية بوهر) والعدد الكمى J وبالتالى فمستويات الطاقة المسموحة للجسيم هى كما يعبر عنها بالشكل 9.1.



الشكل 9.1 مستويات طاقة الجسيم المحصور فى بعد واحد

لاحظ أنه كلما تعددت عقد الموجة فإن الطول الموجى يصغر وبالتالى يزداد التردد ومن ثم زيادة الطاقة. إن ما تقدم عرضه هو مدخل لنظرية ميكانيكا الموجات وهى النظرية التى تفسر تصرف الإلكترونات والذرات والجزئيات والمادة بصفة عامة.

إن معادلة 32.1 تبين بأن الجسيمات ذات كتلة صغيرة مثل الإلكترون موجودة فى حيز صغير مثل الذرة أو جزىء تقتنى طاقة دنيا (n =1) أكبر بكثير من تلك التى تقتنيها جسيمات أكبر مثل جزيئات غاز موجود فى حيز كبير مثل حجرة ما.

مثال 3.1

احسب نسبة الطاقة الدنيا لإلكترون ذرة الهيدروجين على الطاقة الدنيا لجزيء غاز النيتروجين يتحرك فى حجرة.

الحل:

بالنسبة لذرة الهيدروجين فإن القوة التى تبقى الإلكترون حول النواة هى قوة كولوم بدلاً من الحائط فى مسألة الجسيم فى الصندوق، كما أن الإلكترون لا يتحرك فى بعد أفقى بل يتحرك فى دائرة ومن ثم فيمكننا تبنى نموذج الجسيم فى الصندوق باعتبار البعد d يساوى 1 A^o (10^{-8} سم) وباعتبار كتلة الإلكترون m_e تساوى 9.1×10^{-28} جرام. ولحساب الطاقة الدنيا فإن J=1 . أيضا بالنسبة لجزيء النيتروجين فإن m_N تساوى $4.7x10^{-23}$ جرام وباعتبار بعد الحجرة حوالى 3 متر ($3x10^{10}$ A^o) فمن ثم، وباستخدام المعادلة فى حالة الطاقة الدنيا فإن :

$$E = \frac{h^2}{8md^2}$$

$$R = \frac{E_e}{E_N} = \frac{m_N}{m_e}\left(\frac{d_N}{d_e}\right)^2$$

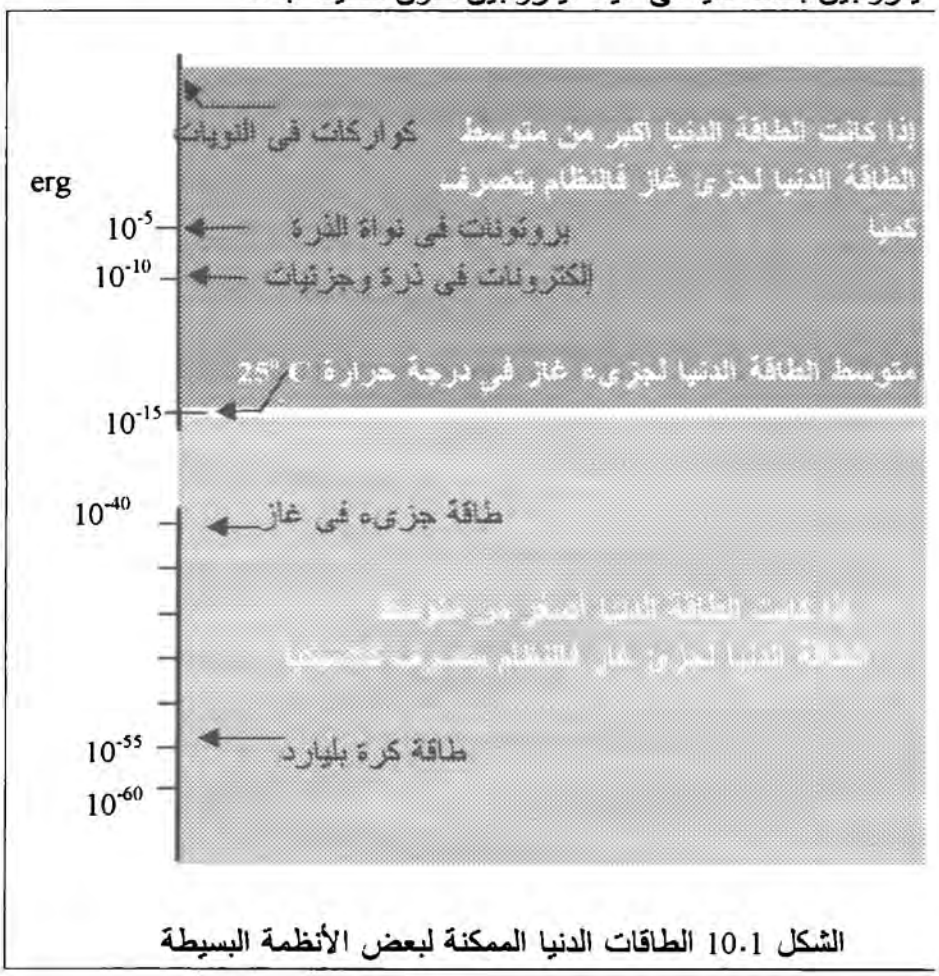
وبالتعويض بالقيم المعطية أعلاه نجد أن :

$$R = 0.5x10^{26}$$

أى أن طاقة الإلكترون تفوق طاقة النيتروجين بمقدار $0.5x10^{26}$ مرة

الشكل 10.1 يوضح الطاقات الدنيا الممكنة لبعض الأنظمة البسيطة وذلك للمقارنة . من الشكل نلاحظ أن الطاقة الدنيا الإنتقالية لجزيء النيتروجين أصغر بكثير من الطاقة المتوسطة لجزيء غاز فى درجة حرارة الحجرة العادية. هذا يعنى أن جزيء النيتروجين فى حالته الأرضية (G round State) يكتسب طاقة نتيجة التصادم وبالتالى يرتفع العدد الكمى

J من 1 إلى عدد كبير جدًا وبالتالى فإن احتمالية الحصول علـــى جـزىء نيتروجين بطاقة دنيا فى عينة نيتروجين تكون ضئيلة جدًا.



الشكل 10.1 الطاقات الدنيا الممكنة لبعض الأنظمة البسيطة

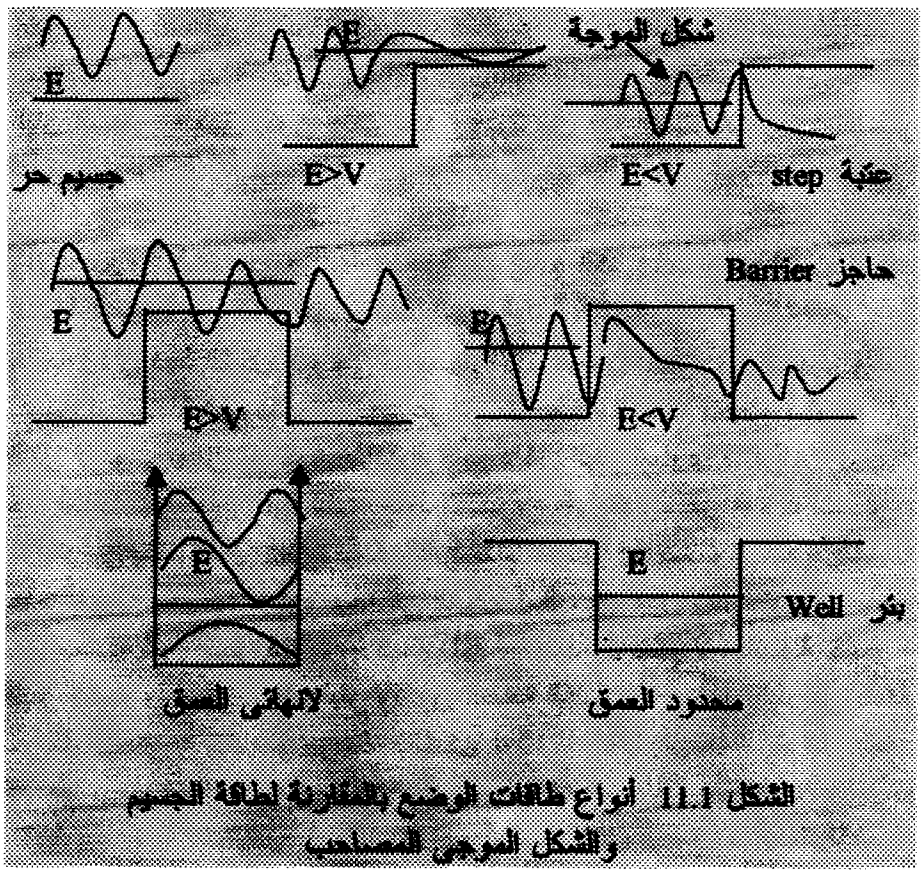
2-1 النظرية الموجية (نظرية دي برولیه وشرودنجر):

فى سنة 1926 قام أروين شرودنجر بتطبيق فكرة دى برولیه و اســـتنتج مـــا يسمى الآن بمعادلة شرودنجر للموجة التى مكنته من تحديد مستويات الطاقـــة وكذلك الخصائص الموجية لذرة الـــهيدروجين. ولقـــد إتضـــح أن معادلـــة شرودنجر يمكن تطبيقها لذرات أخرى غير الهيدروجين وأيضا للجزئيات على

الرغم من التعقيدات الجسيمة فى حلها. إن معادلة شرودنجر الموجية لجسيم واحد (الإلكترون فى ذرة الهيدروجين) هى:

$$\nabla^2\Psi + \frac{8m\pi^2(E-V)\Psi}{h^2} = 0 \qquad (33.1)$$

حيث E ، V هما الطاقة الكلية وطاقة الوضع على التوالى. كما أن m ، ψ هما كتلة الجسيم و دالة الموجة على التوالى، أيضا ∇^2 هى التفاضل الثانى للإحداثيات (المتغيرات المستقلة) المستخدمة فى المعادلة وتسمى Laplacian و h هو ثابت بلانك. الشكل التالى يبين صور متعددة لحالة طاقة الوضع بالنسبة لطاقة الجسيم الساقط مع شكل الموجة:



الشكل 1.1 أنواع طاقات الوضع بالمقارنة لطاقة الجسيم والشكل الموجى المصاحب

حيث يبين الشكل السابق عددًا من الحالات الممثلة:

1- للجسيم الحر الذى يتحرك بطاقة ولا توجد قوة تؤثر عليه ومن ثم فإن V=0.

2- حالات تصادم حيث تكون Vموجبة وممكن أن تكون طاقة الوضع فى صورة عتبة مع كون E إما أكبر من أو أصغر من V.

3- طاقة الوضع تكون حاجزًا Potential barrier مع كون E إما أكبر من أو أصغر من V.

4- الجسيم محصور فى بئر وقد يكون هذا البئر لانهائى (لا يمكن للجسيم أن يتواجد خارج البئر) أو محدود العمق.

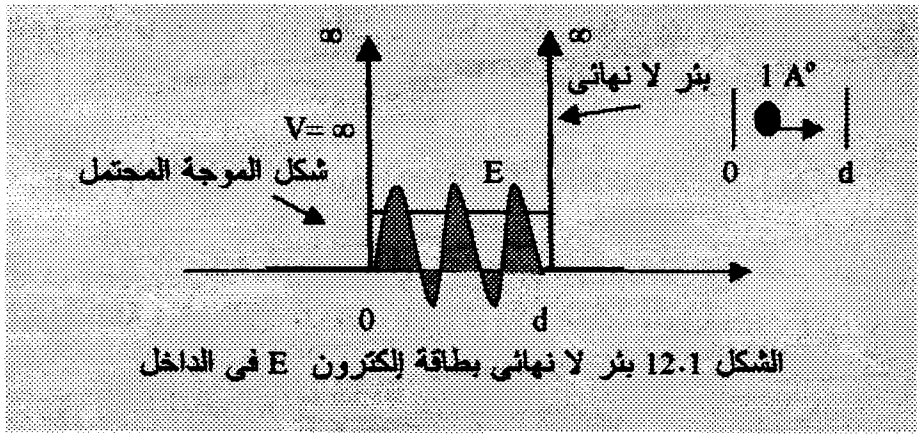
يلاحظ من الإشكال وجود موجة نافذة Transmitted وموجة منعكسة Reflected. كما أنه فى حالة البئر اللانهائى العمق هناك عدد لا نهائى من مستويات الإرتباط Infinite number of bound states. فى حين أنه فى حالة البئر المحدود العمق يكون هناك عدد محدود من هذه المستويات يعتمد على عمق البئر.

والأن لنعرج قليلاً على دراسة العلاقة بين العدد الكمى للمدارات (مستويات الطاقة الرئيسة n والعدد الكمى لعقد الموجة J .

سنحاول أن نجد الشكل الموجى لجسيم الإلكترون فى ذرة الهيدروجين باستخدام معادلة شرودنجر، ونجد عرض بئر طاقة الوضع بحيث نفترض أن البئر لا نهائى ومن ثم تكون طاقة الوضع داخل البئر تساوى صفرًا.

كما أسلفنا ذكره فإن القوة التى تحفظ الإلكترون فى مداره هى قوة كولوم وأن الإلكترون يتحرك فى دائرة فيمكن استخدام الجسيم فى صندوق كمدخل لحل هذه المسألة وهو ما تم توضيحه فى الشكل 8.1 . إن هذا الافتراض ينظر حل معادلة شرودنجر فى بئر لانهائى أى أن طاقة الوضع لا نهائية خارج البئر وتساوى صفر داخل البئر وتكون الطاقة الكلية E داخل البئرهى طاقة حركة الإلكترون كما هو موضح بالشكل 12.1 .

إذًا فنتوقع أن حل معادلة شرودنجر لهذه المسألة سيعطى أشـــكال الموجـــات السالفة الذكر (باستخدام بعد واحد). ومن ثم فمعادلة شـــــرودنجر (33.1) يمكننا تطبيقها باعتبار V تساوى صفرًا داخل البئر لنحصل على الآتى:



الشكل 12.1 بئر لا نهائى بطاقة إلكترون E فى الداخل

$$d^2\psi / dx^2 + L^2 \psi = 0 \qquad (34.1)$$

حيث إن $L^2 = 8\pi^2 m E / h^2$ وهى كمية موجبة ($0 < L$) . يمكننا حل المعادلة التفاضلية ذات الرتبة الثانية و بمعاملات ثابتة باستخدام المعادلة المميزة $\zeta^2 = -L^2$ ، والحل سيكون :

$$\psi = A \sin Lx + B \cos Lx \qquad (35.1)$$

فى خارج البئر $E << V$ (طاقة الوضع لانهائية) ومن ثم فإن المعادلة هى:

$$d^2 \psi / dx^2 + \kappa^2 \psi = 0 \qquad (36.1)$$

حيث إنه من المعادلة 33.1 فإن $\kappa^2 = -8 \pi^2 mV / h^2$ وهى كمية ســـــالبة . يمكننا حل المعادلة التفاضلية ذات الرتبة الثانية و بمعاملات ثابتة باســـــتخدام المعادلة المميزة $\zeta^2 = \kappa^2$ والحل سيكون:

$$\psi = C e^{kx} + D e^{-kx} \qquad (37.1)$$

وحتى يكون معنى للدالة فلابد أن تكون C تساوى صفرًا وأيضا وبحكم القيمة الكبيرة جدًا للثابت κ خارج البئر فإن الدالة تؤول إلى الصفر بجوار حدود البئر وهذا ما يقترحه الحد الثانى من الحل العام. لذا يمكننا استنتاج الشروط الحدودية التى يجب أن نستخدمها لحل دالة الموجة داخل البئر وهى:

$$\psi(0) = \psi(d) = 0 \qquad (38.1)$$

لذا وبتطبيق الشرط الحدودى الأول $\psi(0) = 0$ على معادلة الحل العام داخل البئر معادلة 35.1 فإن $B = 0$ ومن ثم فإن الحل سيكون:

$$A \sin Lx = \psi \qquad (39.1)$$

وباستخدام الشرط الحدودى الثانى $\psi(d) = 0$ فإن العلاقة الناتجة $A \sin Ld = 0$ صحيحة فقط إذا كان الشرط التالي صحيحًا بدوره:

$$Ld = \pi J \qquad (40.1)$$

وبالتالى فإن الحل الخاص لهذه الحالة سيكون:

$$\psi = A \sin(\pi J x / d) \quad ; J = 1, 2, 3, \ldots \qquad (41.1)$$

إن هذا الحل الرياضى هو الذى يعبر عن الأشكال الموجية فى الشكل 8.1 وذلك حسب قيم J الممثلة لعدد العقد للموجة. ولإيجاد الطاقة التى يحملها الإلكترون حسب تموجه داخل البئر نستخدم $E_J = \frac{J^2 h^2}{8 m_e d^2}$.

والآن لنحسب عرض البئر الذى يناسب ذرة الهيدروجين. يمكننا ذلك بمعرفة

أن طاقة الحالة الأرضية لذرة الهيدروجين هى 13.6 eV – وهى ما تتـــاظر طاقة 13.6 eV للإلكترون فى المدار الأول (n=1) ، أى أن $|E_n| = E_J$

ومن خلال المعادلتين 16.1 و 32.1 لقيم J= n=1 فيمكننا القول بأن:

$$\varepsilon \frac{e^2}{2r_0} = \frac{h^2}{8m_e d^2} = 13.6 \text{ eV} \qquad (42.1)$$

وبالتعويض بالقيم للثوابت نجـــد أن $d=1.66419x10^{-10}$ m ~ 1.664 Ao ، وبمقارنة هذا العدد مع نصف قطر بوهر 0.529 Ao فإن :

$$\frac{d}{r_0} = \frac{1.664}{0.529} = 3.1455 \sim \pi \qquad (43.1)$$

أى أن عرض البئر يناظر نصف محيط ذرة بوهر وليس محيط الذرة الكليـــة بمعنى :

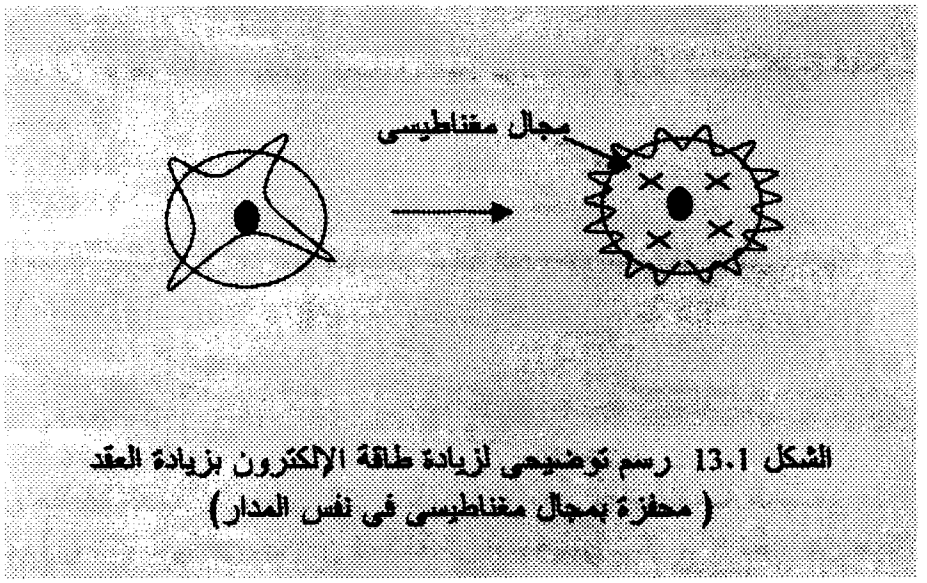
$$d = \pi r_O \qquad (44.1)$$

ويمكننا استنتاج أن عرض البئر فى حالة المدارات العليا لذرة الهيدروجين (باستخدام $r_n = r_O\ n^2$)هى :

$$d_n = \pi n^2 r_O \qquad (45.1)$$

لاحظ أن العلاقة الرياضية التى تمثل E_J تعبر عن طاقـــة الجســيم فـــى صورته الموجية فى حين أن العلاقة الرياضية التى تمثل E_n تعبر عن طاقة الجسيم فى صورته الجسيمية. لذا نلاحظ أن هناك تكميـــة للطاقـــة بالنســـبة للجسيم على حسب عدد عقد الموجة (J-1) أو عدد قمم الموجة فكلمـــا زادت العقد (زيادة فى التموج) قل طول الموجة معادلة 30.1، وبالتالى زاد الـــتردد ومن ثم يزداد الزخم (معادلة 31.1) الذى يقابله زيادة فى الطاقة. فى حيـــن أن معادلة بوهر تقترح أن التكمية للطاقة مبنية على العدد الكمى n ، فكلمـــا زاد العدد الكمى n المناظر لمستويات الطاقة أو المدارات الرئيسة فى الذرة قلـــت

طاقة الإلكترون بمعنى أنه كلما كان الإلكترون قريبا من النواة زادت طاقته الحركية ليبقى فى ذلك المدار مقاوما القوة الكولومية التى تحاول جذبه للداخل، ومن ثم فإن العدد الكمى n يختلف عن العدد الكمى J من حيث التفسير الفيزيائى لكل منهما، والذى للتو قد تم تقديمه . فلو أن نفس جسيم الإلكترون إزداد تموجه (تزداد عدد العقد J-1) وهو فى نفس المدار n ، فإن طاقة الإلكترون تزداد وفق المعادلة 32.1 . يمكننا تخيل ذلك بتحفيز زيادة العقد بوضع الذرة فى مجال مغناطيسى، ومن ثم يشكل المجال المغناطيسى قوة جذب إضافية للشحنة داخل المركز تسبب فى زيادة حركة الإلكترون للتغلب على ذلك الجذب الإضافي. الشكل 13.1 يوضح رسمًا توضيحيا لتقريب المفهوم.



الشكل 13.1 رسم توضيحي لزيادة طاقة الإلكترون بزيادة العقد (محفزة بمجال مغناطيسى فى نفس المدار)

والآن قد يتبادر للذهن بأنه هل هناك علاقة بين العددين الكميين n ، J ؟ . للإجابة على هذا السؤال فلنرجع إلى ما تم استنتاجه فى المثال السابق، فقد تم استنتاج العلاقة المهمة وهى بأن عرض البئر d تتناسب طرديا مع نصف محيط الذرة وثابت التناسب هو $n2$ (المعادلة 45.1) . فلنحاول أيضا أن نستنتج العلاقة بين n ، J من خلال مساواة طاقة الإلكترون فى ذرة

الهيدروجين باستخدام معادلة بوهر 7.1 مع طاقة الإلكترون باستخدام معادلة ميكانيكا الموجات 32.1 ($|E_n| = E_J$) أى أن:

$$\varepsilon \frac{e^2}{2n^2 r_0} = \frac{h^2 J^2}{8 m_e d^2} \qquad (46.1)$$

وباستخدام المعادلة 45.1 للتعويض بقيمة عرض البئر $d = \pi\, n2\, r_o$ ،

فإنه يمكن استنتاج (لاحظ أن $\varepsilon = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$) :

$$\frac{e^2}{\varepsilon_0} = \frac{J^2 h^2}{\pi m r_0 n^2} \qquad (47.1)$$

ومن ثم فإن العلاقة بين n ، J هى:

$$\frac{J^2}{n^2} = \frac{m\pi r_0 e^2}{\varepsilon_0 h^2} \qquad (48.1)$$

وبالتعويض بالقيم:

$r_o = 0.529 \times 10^{-10}$ m , $m_e = 9.1091 \times 10^{-31}$ Kg , $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C,

$\varepsilon o = 8.8419 \times 10^{-12}$ C^2/Nm^2, $h = 6.6256 \times 10^{-34}$ N.m.sec

نجد أن $J = n$ ، أى أن:

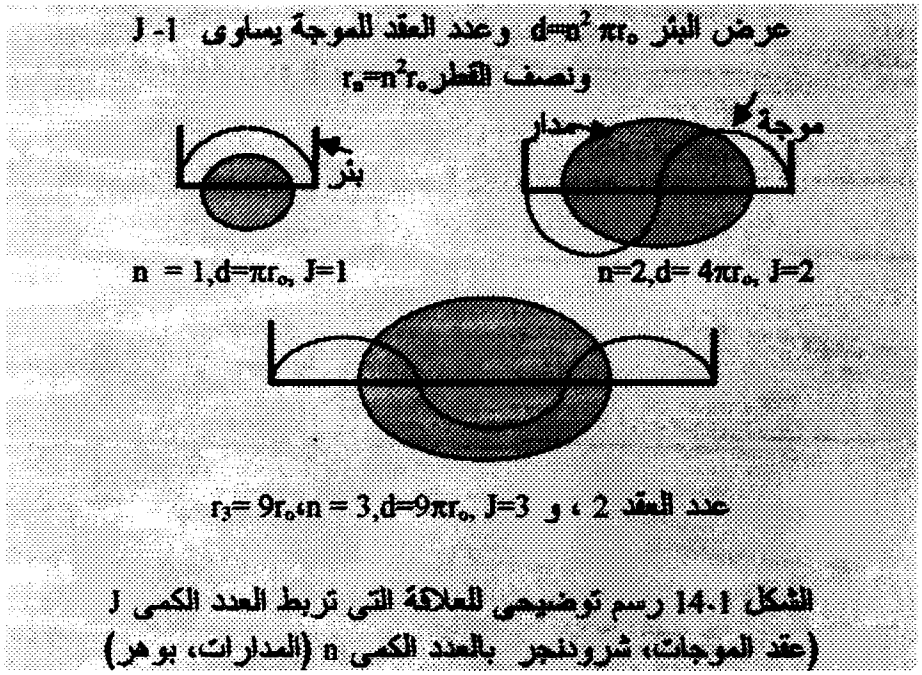
$$1 = \frac{m\pi r_0 e^2}{\varepsilon_0 h^2} \qquad (49.1)$$

وهى بحذافيرها المعادلة التى يمكننا التعبير بها عن نصف قطر بوهر(المعادلة 6 فى المثال 1.1). لذا فإنه يمكننا استنتاج ما يلى:

1 – إن العددين الكميين n ، J متساويان

2– باستخدام العلاقة 45.1 و 49.1 ،مع إعتبارأن J=n ، فإنه يمكننا استنتاج طاقة الإلكترون بصيغة بوهر من صيغة ميكانيكا الموجات والعكس أيضا صحيح.

الشكل 14.1 يوضح العلاقة الموجية للإلكترون ومدارات بوهر. نلاحظ أن مجال البئرأو عرضه أكثر بقليل من ثلاثة أضعاف نصف قطر المدار المعنى وبالضبط تناظر نصف محيط المدار المعنى:



الشكل 14.1 رسم توضيحى للعلاقة التى تربط العدد الكمى J (عقد الموجات، شرودنجر بالعدد الكمى n (المدارات، بوهر)

مثال 4.1

حور العلاقة الرياضية لطاقة الإلكترون المعطية بنظرية بوهر إلى تلك المناظرة لها بنظرية ميكانيكا الموجات

الحل:

بوهر إقترح أن طاقة الإلكترون هى :

$$E_n = \varepsilon \frac{e^2}{2n^2 r_0} = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0 n^2} \qquad (1)$$

وبإعادة كتابة المعادلة 49.1 حسب ما يلي:

$$\frac{e^2}{\varepsilon_0} = \frac{h^2}{m\pi r_0} \qquad (2)$$

وبالتعويض بها فى المعادلة 1 نحصل على

$$E_n = \frac{h^2}{8m\pi^2 r_0^2 n^2} \qquad (3)$$

بضرب الطرف الأيمن من المعادلة 3 فى $\frac{J^2}{n^2}$ والتى تساوى واحدًا صحيحًا نحصل على:

$$E_n = \frac{h^2 J^2}{8m\pi^2 r_0^2 n^4} \qquad (4)$$

وباستخدام العلاقة 45.1

$$d = \pi n^2 r_0$$

نحصل على المطلوب إثباته:

$$E_J = \frac{J^2 h^2}{8md^2} \qquad (5)$$

وأخيرًا كيف نستطيع رسم مستويات طاقة ذرة الهيدروجين بالاستفادة من معادلة طاقة الصورة الموجية(الطرف الأيمن من المعادلة 46.1) بدلا من معادلة طاقة الصورة المدارية لبوهر(الطرف الأيسر من المعادلة 46.1). نلاحظ أنه باستخدام العلاقة $d=\pi n2r_O$ فى المعادلة 32.1 مع اعتبار أن J=n فإنه يمكننا القول بأن :

$$E_J = \frac{h^2}{8m\pi^2 r_0^2}\frac{1}{n^2} \qquad (50.1)$$

أو

$$E_J = |E_n| = \frac{E_0}{n^2} \qquad (51.1)$$

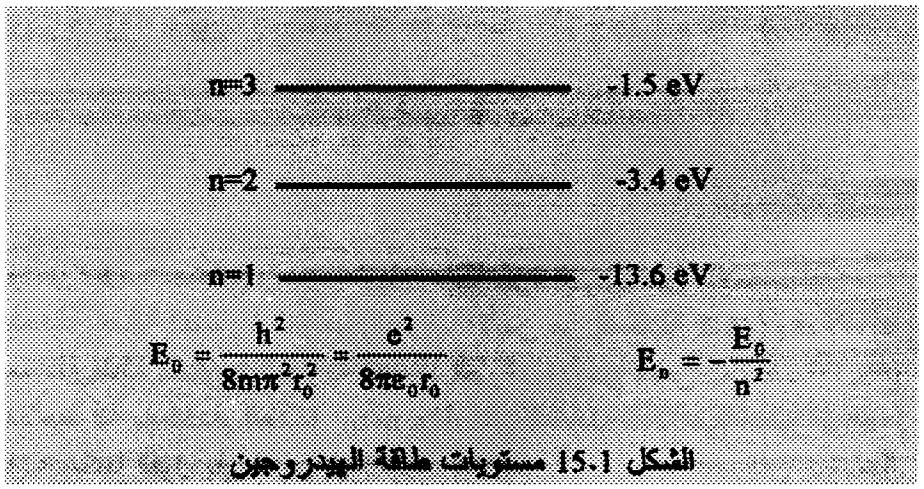
وهى تساوى عدديا ما أستنتجه بوهر أى أن:

$$|E_n| = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0}\frac{1}{n^2} \qquad (52.1)$$

أى أنه من المعادلتين 50.1 و 52.1 يمكننا استنتاج العلاقة المهمة:

$$E_0 = \frac{h^2}{8m\pi^2 r_0^2} = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0} \qquad (53.1)$$

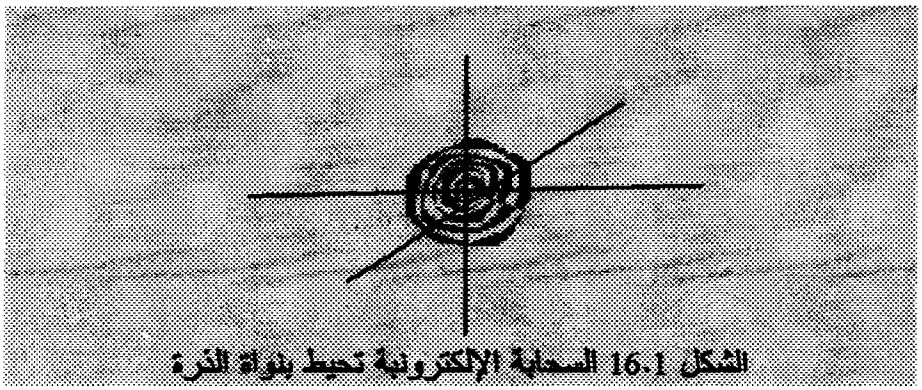
لاحظ أنه وبإضافة ضعف قيمة E_0/n^2 بالسالب (كطاقة وضع) فإنه يمكن ايجاد الطاقة الكلية وهى حاصل جمع طاقة حركة الإلكترون مضاف اليه طاقة الوضع حسب المعادلة 9.1 وبالتالى فإنه يمكن رسم مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين كما هو موضح بالشكل 15.1.



الشكل 15.1 مستويات طاقة الهيدروجين

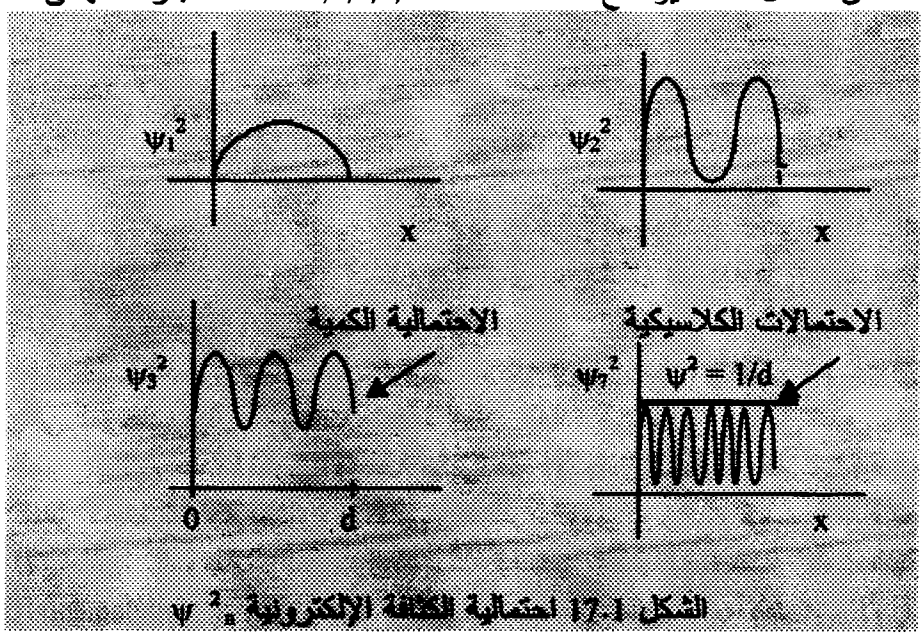
والآن لنخوض معًا فى التفسير الموجى للجسيم. إن تفسير دالة الموجة Ψ فى حالة معينة هو أن $\Psi 2$ عند نقطة ما فى الفضاء تتناسب مع احتمالية وجود الجسيم عند تلك النقطة . فى المسائل التى تحوى إلكترونات يمكننا تفسير قيمة $\Psi 2$ على كونها تتناسب مع كثافة الشحنة الكهربائية عند تلك

النقطة أو " السحابة الإلكترونية" electron cloud التـــى تحيـــط بـــالنواة فـــى ذرة ما. الشكل 16.1 يوضح سحابة الإلكترون.



الشكل 16.1 السحابة الإلكترونية تحيط بنواة الذرة

كما أن الشكل 17.1 يوضح $\Psi 2$ لعدد n=1,2,3,4,.... لحالة بئر لا نهائى



الشكل 17.1 احتمالية الكثافة الإلكترونية ψ^2

وكما نلاحظ من الشكل السابق وبناء على مبدأ بوهر للمطابقة ، فإن الاحتمالية الكمية تؤول إلى الاحتمالية الكلاسيكية عندما تكون n أو J كبيرة جدًا حيـــث

تكون الاحتمالية لها توزيع يحمل عدد J من القمم وبالتالى فعندما يكون العدد J كبيرًا جدا تتقارب هذه القمم لبعضها بعضًا. ومع وجود مسافة صغيرة جدًا تحويها فإن المتوسط لهذا التوزيع يمكن قياسه وهو ما يوافق التوزيع الكلاسيكى.

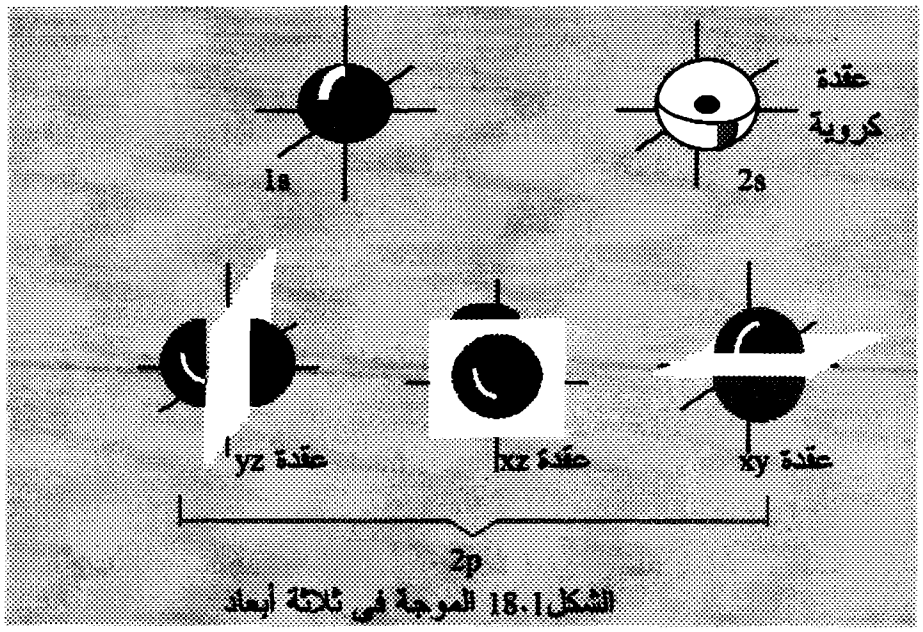
3-1 الأعداد الكمية :

والآن لدراسة كيفية توزيع الإلكترونات فى الذرة علينا أن نستفيد بنظرية الكم وميكانيكا الموجات. فى الوقت الذى قام فيه شرودنجر بحل معادلته لذرة الهيدروجين ومن ثم تحديد نفس مستويات الطاقة التى حددها بوهر من قبله إلا أنه حدد أيضا الدالات للموجة وكذلك الأعداد الكمية المصاحبة لكل المستويات الممكنة فى الذرة. وبالتالى فإن شرودنجر اكتشف بأن الإلكترون فى ذرة الهيدروجين يمكن وصفه بثلاثة أعداد كمية والتى تسمى الآن بـ n، l، m_l حيث إن العدد الكمى الأساسى n له دور كبير فى تحديد طاقة الإلكترون وفى حالة الذرات الأخرى فيتم إضافة عدد كمى آخر وهو m_s وبالتالى يتم وصف الإلكترونات من خلال أربعة أعداد كمية (اسم رباعى لكل إلكترون).

وحتى نفهم هذه الأعداد الكمية فلنناقش مرة أخرى الموجات وخصوصا تلك التى فى الثلاثة أبعاد. راجع الشكل 8.1 الذى يبين شكل الموجة فى بعدين . كل الأشكال المبينة تعبر عن موجة واحدة بغض النظر عن درجة الحركة. الموجة فى أقصى اليسار تمثل الموجة الواقفة (بدون عقد) ، فى حين أن باقى الموجات تمثل الموجات متعددة العقد. العقدة هى النقطة فى المحور السينى والتى عندها تكون الإزاحة صفرًا فى الإتجاه الصادى. كلما زادت العقد كانت الموجة قصيرة وبالتالى زاد التردد ومن ثم زادت قيمة طاقة الارتعاش. الموجة الواقفة بدون عقد يعبر عنها بالموجة الأساسية (Fundamental)، وفى وجود عقدة واحدة نحصل على النغم الإضافى الأول (Overtone) للموجة الأساسية، وهكذا.. . أما الموجات فى الثلاثة أبعاد فيمكن بناؤها من خلال الموجة الأساسية، بحيث يمكن الحصول على الموجات ذات الطاقات الأعلى من خلال إدخال العقد. إن العقد فى ثلاثة

أبعاد يمكن أن تكون كرات، أو مستوى، أو مخـــاريط . الشـــكل18.1 يبيـــن الموجة الأساسية وموجات بعقد . وللحصول على ارتعاشات أكثر فى ثلاثـــة أبعاد يمكن إضافة مزيدًا من العقد المستوية.

يمكننا ملاحظة أنه بالنسبة للموجة الأساسية تحصلنـــا علـــى شـــكل واحـــد (1 =1^2)، وفى حالة النغم الأول وذلك بإضافة عقدة تحصلنا علـــى أربعـــة أشكال (2^2=4) ، وفى حالة النغم الثانى وذلك بإضافة عقدتين نحصل علـــى (3^2=9) تسعة أشكال وهكذا. لذا يمكننا استنتاج أن:



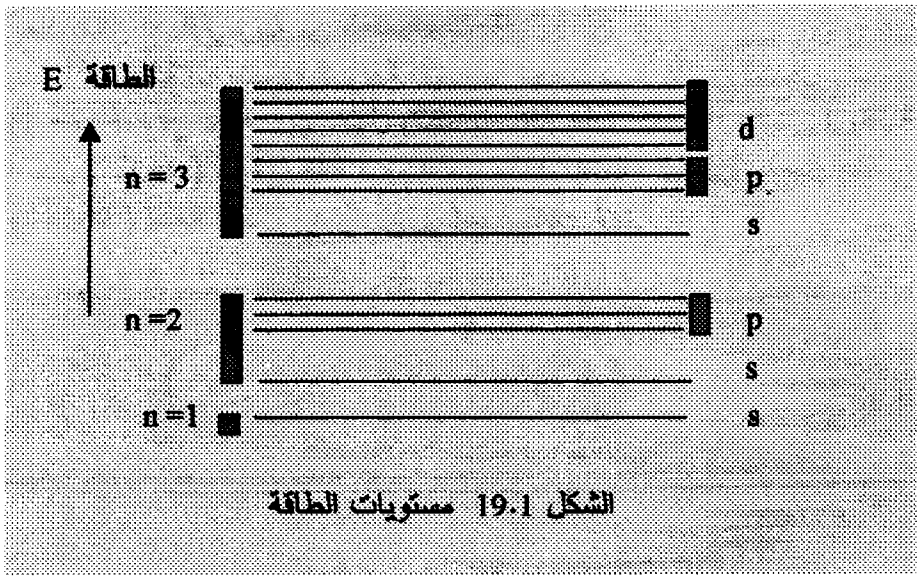
الشكل18.1 الموجة فى ثلاثة أبعاد

عدد الأشكال = (عدد العقد + 1) 2

عدد الأشكال هذه يعبر عن عدد مستويات الطاقة الداخلية لكل مستوى طاقـــة أساسى n ، وبالتالى فإنه لمستوى الطاقة n=1 هناك مســـتوى داخلـــى واحـــد (1^2) ، ولمستوى الطاقة الثانى n=2 فهناك عدد أربعة مســـتويات طاقـــة داخلية (2^2) ، ولمستوى الطاقة الثـــالث n=3 فـــهناك عـــدد تســـعة مـــن المستويات الداخلية للطاقة (3^2)، ومن ثم فيمكننا استنتاج :

عدد مستويات الطاقة الداخلية = n^2

الشكل 19.1 يوضح مستويات الطاقة المدفونة فى كل مستوى أساسى



الشكل 19.1 مستويات الطاقة

لقد تم تسمية هذه المستويات الداخلية أو الفرعية Sublevels بالمسميات التالية:

sharp , principal , diffuse , fundamental

وقد تم الاحتفاظ بالحروف الأولى للتسمية وهى كالتالى:

s, p, d ,f, g, h, i, j, k....

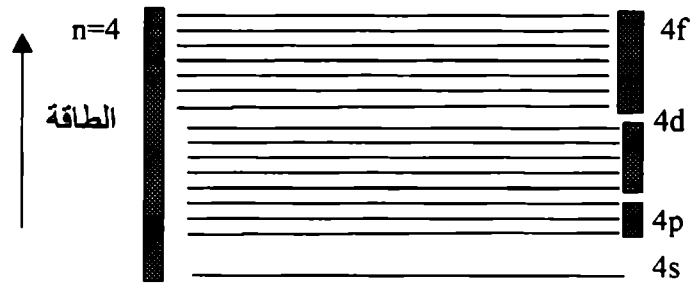
أى مدارات ذات شكل كروى أعطت اسم s وبالتالى فإن الموجة الأساسية ، وهى كروية، لها اسم s ، فى حين أنه لمستوى الطاقة الرئيسى الثانى فإن أحد العقد هى كروية وبالتالى فهذا المدار اسمه s، وباقى العقد ثلاثة مستويات (انظر الشكل18.1) يُعبر عنهم بمدارات p، وهكذا تتسلسل التسميات الحرفية.

مثال 5.1

ارسم مستويات الطاقة لمستوى الطاقة الرئيس الرابع

الحل :

حيث إن n=4 فإن المدارات الفرعية هى 4^2= 16 ، حيث نبدأ الترتيب مثل ذلك الموجود فى المستوى الرئيس الثالث وهى تسعة مستويات فرعية وباقى المستويات 16 – 9 = 7 تسمى بمدارات f و يكون ترتيب المدارات كما هو موضح فى الشكل التالى



وحيث إن المستويات الفرعية s, p, d, f موجودة فى المستوى الرئيس الرابع لذا نعبر عن هذه المستويات بالتسميات التالية: 4s, 4p, 4d,4f .

والأن نلاحظ أننا قمنا بتسمية رزمات من المستويات الفرعية ، ومن ثم يتوجب علينا تسمية كل مستوى مستقل حتى يمكننا التمييز بينها، وبمقدورنا فعل ذلك إذا أعدنا تسمية الحروف السابقة بأعداد صحيحة منضوية تحت العدد الكمى l بحيث تكون التسمية حسب المناظرة التالية:

	s	p	d	f	g	h	i	j	k....
l =	0	1	2	3	4	5	6	7	8....

ومن ثم نجد أن عدد المستويات الفرعية يمكن ان نحصل عليه من العلاقة التالية:

عدد المستويات الفرعية = $2l + 1$

لذا نجد أن عدد المستويات الفرعية عندما $l = 0$ (مدار s) هى 1، وعندما $l = 1$ (مدارات p) يكون العدد 3، كما أنه فى حالة $l = 2$ (مدارات d) هى 5 مدارات، وهكذا. هذه المدارات الفرعية فى ذاتها يمكن إعطاؤها تسمية العدد الكمى m_l حيث يكون عددهم $2l + 1$ ويحملون قيم عددية تتراوح من بين $+l$, $-l$. لذلك بالنسبة لمدارات p فإن $l = 1$ وبالتالى m_l تساوى $2l + 1$ وهى عدديا تساوى 3 وتكون قيمها +1, 0, -1 . بهذا أمكننا تمييز كل المستويات التى تحمل الإلكترونات. تبقى لنا معرفة أن كل مستو يمكنه حمل فقط عدد اثنين من الإلكترونات وذلك بسبب مبدأ الإقصاء لباولى Pauli exclusion principal والذى يفيد مايلى:

1- لا يمكن لعدد اثنين من الإلكترونات فى نفس الذرة ان يكون لهما نفس الأربعة أعداد الكمية وهى (n , l , m_l , m_s) .

2- إذا أحتل إلكترونان نفس المدار، فلابد أن يكون لهما احدى القيمتين التاليتين إما m_s =+1/2 أو m_s = -1/2 .

الآن وبالأربعة أعداد n ,l, m_l , m_s يمكننا تمييز كل الإلكترونات فى الذرة، وهذه الأعداد تسمى بالأعداد الكمية.

مثال 6.1

سمى كل الإلكترونات الموجودة فى رزمة المدارات الفرعية f الموجودة فى المستوى الرئيس n=4 .

الحل

لوصف الإلكترونات المعنية لابد من استخدام الأربعة أعداد كمية وهى n , l , m_l , m_s . من المعطيات n=4 ، والرزمة f تعنى أن $l = 3$ وبالتالى فإن $m_l = 2l + 1 = 7$ هى عدد المدارات وتكون قيمه العددية بين 3+, 3- ، وكل مدارمن هذه المدارات السبعة تحوى إلكترونين بحيث العدد الكمى m_s لهذين الإلكترونين يساوى 1/2+ أو 1/2- وبالتالى فالعدد الكلى للإلكترونات الموجودة بالمدار الرئيسى الرابع بالرزمة f هو $2 \times 7 = 14$.

الجدول التالى يبين تفصيليا وصف للإلكترونات الأربعة عشر

جدول وصف للإلكترونات الأربعة عشر الموجودة فى المدارالرئيس الرابع بالرزمة f

n	l	ml	m_s
4	3	+3	+1/2
4	3	+3	-1/2
4	3	+2	+1/2
4	3	+2	-1/2
4	3	+1	+1/2
4	3	+1	-1/2
4	3	0	+1/2
4	3	0	-1/2
4	3	-1	+1/2
4	3	-1	-1/2
4	3	-2	+1/2
4	3	-2	-1/2
4	3	-3	+1/2
4	3	-3	-1/2

مثال 7.1

ما هو عدد الإلكترونات الموجودة فى رزم المدارات الفرعية

s p d f g h i j

الحل

الجدول التالى يوضح تفصيليًا حساب عدد الإلكترونات الموجودة فى الـــــرزم المدارية المذكورة

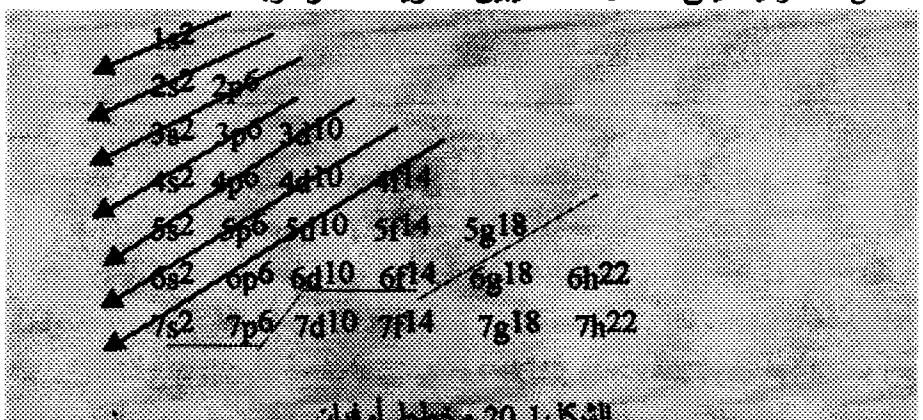
	s	p	d	f	g	h	I	j
l	0	1	2	3	4	5	6	7
ml =2l + 1	1	3	5	7	9	11	13	15
عدد الإلكترونات								
2ml =	2	6	10	14	18	22	26	30

من الحروف المستخدمة لترميز المدارات الفرعية (مستويات الطاقة الفرعية) وعدد الإلكترونات المحتواة بتلك المدارات يمكننا تلخيص الجدول السابق إلى ما يلى:

s2 p6 d10 f14 g18 h22 i26 j30

4-1 خريطة البناء الإلكتروني للذرة :

من المثال السابق وبتسبيق العدد الكمى n للحروف الترميزية للرزم المدارية والتى هى مرأسة (superscripted) بعدد الإلكترونات يمكننا إنشاء خريطة لتعبئة الإلكترونات بمدارات أى ذرة وهى ما تسمى بمخطط أوفبان Aufban diagram، وفيما يلى الشكل 20.1 يبين الخريطة المرغوبة:



الشكل 20.1 مخطط أوفبان

والآن ما هو التسلسل اللازم اتباعه حتى يمكننا تعبئة مدارات الذرة ؟. للإجابة على هذا السؤال علينا أن ندرك أن هناك أربعة شروط يتم استخدامها في ملء المدارات بالإلكترونات وهى:

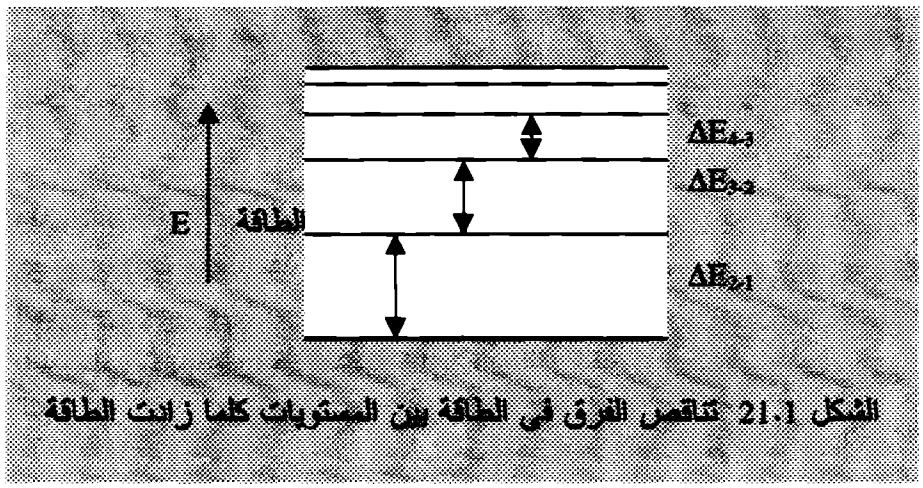
1- فى نفس مستوى الطاقة الرئيس يعتبر المدار s فى أقل طاقة وتزداد الطاقة تباعًا أى أن:

$$s < p < d < f < g < h < i < j$$

(انظر الشكل التابع لمثال 5.1)

2- إن ΔE بين مستويات الطاقة تتناقص كلما ازدادت الطاقة (انظر الشكل 21.1) أى أن :

$$\Delta E_{2-1} > \Delta E_{3-2} > \Delta E_{4-3} > .....$$



الشكل 21.1 تناقص الفرق فى الطاقة بين المستويات كلما زادت الطاقة

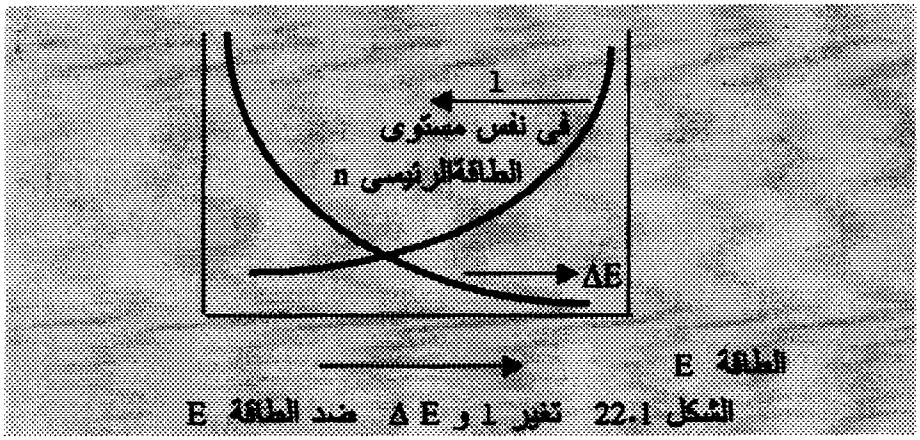
الشكل 22.1 يبين العلاقة بين كل من l (لنفس المستوى الرئيس للطاقة n) و ΔE ضد الطاقة E . لاحظ تزايد l كلما زادت الطاقة، فى حين أن ΔE تتناقص بزيادة الطاقة.

3- الإلكترونات تعبأ تباعا كلما زادت مستويات الطاقة (انظر اتجاه الأسهم بالخريطة مع الترتيب). هذا الشرط يسمى مبدأ أوفبان Aufban Principle ، وبالتالى فالتعبئة تكون كما يلى:

1s 2s 2p 3s 3p 4s 3d 4p 5s 4d 5p 6s 4f 5d 6p 7s

4- كل مدار يحوى إلكترونا واحدًا قبل أن يحمل أى مدار آخر اثنين وهذا ما يسمى بقانون هوند Hund's Rule

بالطبع لكل قاعدة شواذ وهذا ما يلاحظ فى تعبئة بعض الذرات الشاذة عن هذه القاعدة.



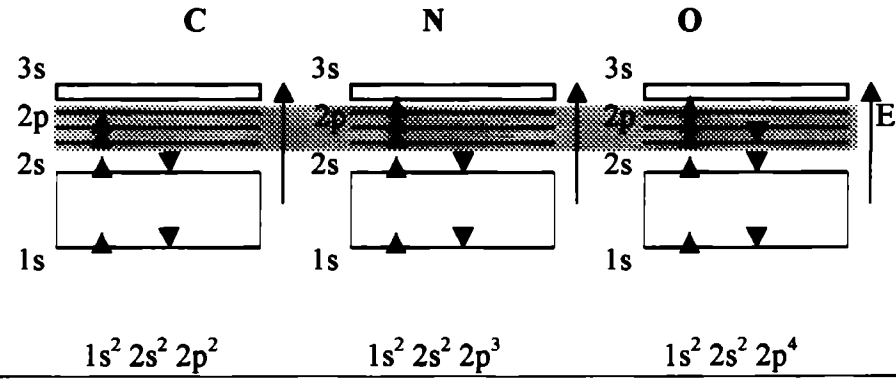
الشكل 22.1 تغير l و Δ E ضد الطاقة E

مثال 8.1

عبّء بالإلكترونات مدارات كل من $_6C$ و $_7N$ و $_8O$

الحل:

باستخدام الأربعة شروط المذكورة أعلاه يمكننا تلخيص الحل فى الشكل التالى:



▲ العدد الكمى ms=+1/2
▼ العدد الكمى ms= -1/2
لاحظ أنه قد تحققت الشروط الأربعة:
1 – الطاقة تتزايد من أسفل إلى أعلى حسب توزيع العدد الكمى الرئيسى n
2 – ΔE تتناقص كلما أزدادت E
3 – تحقق مبدأ أوفبان
4 – تحقق قانون هوند (فى كل رزمة لا يمكن تعبئتها بإلكترون ثان إلا بعد شغل كل مدارات تلك الرزمة بإلكترون واحد

1-5 ملخص :

فى هذا الفصل تم تناول البناء الإلكترونى للذرة مبتدئين بنظرية بوهر وهى صالحة لتفسير ذرة الهيدروجين أو أيون بإلكترون واحد فى مداره الخارجى. وحيث إن نظرية بوهر فشلت فى تفسير البناء الإلكترونى لذرات معقدة ، فإن ذلك تطلب خروج نظريات جديدة لحل تلك المعضلة. كان الحل فى النظرية الموجية والتى أنتجت تسمية رباعية للإلكترون تتمثل فيما يسمى بالأعداد الكمية، والتى تمت مناقشتها بشئ من التفصيل. أيضًا، تم عرض تصميم خريطة بناء التركيب الإلكترونى لأى ذرة، والتى ستكون مدخلاً مهمًا للبناء النويّاتي للنواة والمتمثل فى استنتاج خريطة بناء البروتونات والنيوترونات فى النواة من خلال نموذج الأغلفة الذى سيأتى ذكره لاحقًا.

1-6 مسائل :

1.1 – احسب أصغر مدار للإلكترون الوحيد الموجود فى ذرة أيون الهيليوم $_{2}^{4}He^{+}$.

(الحل: 0.2645 Ao)

2.1 – اثبت بأن تحديد أنصاف أقطار مدارات ذرة الهيدروجين تعطى بالعلاقة $r_n = a_o n^2$.

3.1 – احسب طاقة المستوى n=1 فى ذرة الهيدروجين.

4.1 – استنتج معادلة لثابت ريدبرج R_O لذرة الهيدروجين ثم إحسب قيمته.

5.1 – احسب ثابت ريدبرج لأيون الهيليوم $^4He_2^+$.

(الحل: $R = Z^2R_o$)

6.1 – استنتج معادلة نصف قطر بوهر باستخدام معادلتى E_J و E_n .

7.1 – اثبت أن الطاقة الدنيا للإلكترون فى ذرة الهيدروجين تعطى بإحدى العلاقتين التاليتين إما

$$E_0 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_0} \qquad \text{أو} \qquad E_0 = \frac{h^2}{8m\pi^2 r_0^2}$$

8.1 – احسب E_O لذرة الهيدروجين باستخدام المعادلتين المذكورتين بالمسألة السابقة.

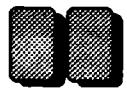
(الحل: 13.6 eV)

9.1 – صف جميع الإلكترونات الموجودة فى المستوى الرئيس n =4 (4s,4p,4d,4f).

10.1 – اكتب التركيب الإلكترونى لذرة Xe (Z=54) باستخدام خريطة تعبئة المدارات (مخطط أوفبان).

11.1 – اكتب التركيب الإلكترونى لذرة Ta (Z=73) باستخدام خريطة تعبئة المدارات.

(الحل: $[Xe]\ 6s^2\ 4f^{14}\ 5d^3$)



الفصل الثانى

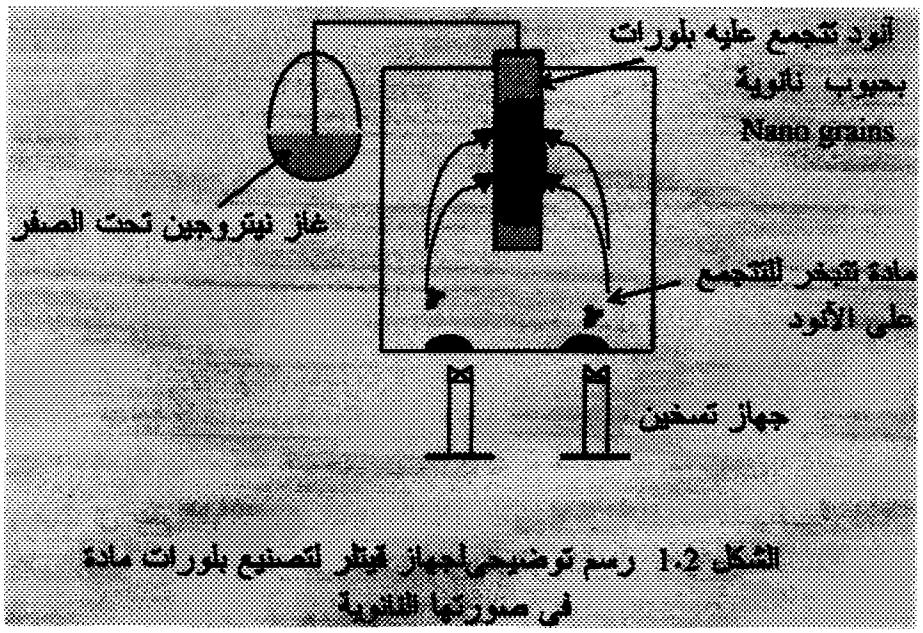
مكونات وخواص النواة

Constituents and Properties of the Nucleus

2-1 خواص البنية الذرية والإلكترونية والنووية.
2-2 فرضيتا البروتون-إلكترون و البروتون- نيوترون.
2-3 الخواص النووية.
2-4 ملخص.
2-5 مسائل.

1-2 خواص البنية الذرية والإلكترونية والنووية:

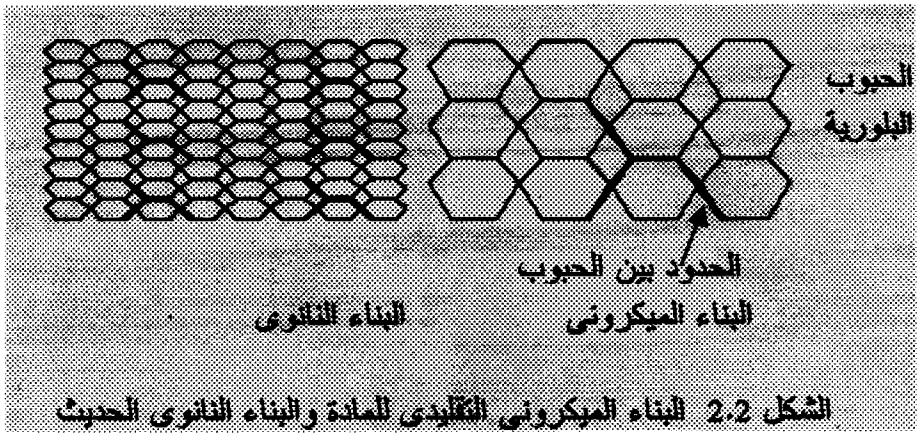
كما نعلم أن علم المواد يهتم بالتركيب الذرى للمادة وكيفية تنسيق تلك الـذرات فى بلورات ودراسة خواص تلك التركيبات. إن مجمل تركيبات تلك المـــواد فى صورها البلورية كانت إلى زمن قريب (الثمانينيات) تتشكل فى مجـــاميع أو حبوب (Grains) ذات أحجام ميكرونية .وخلال جولة اســـتجمامية فـــى منطقة تتساقط عليها ثلوج إكتشف قيتلر (Githler) فى أوائل الثمانينيـــات أن الغبار متجمع فى تشكليات على الثلج ولم ينتشر خلال الثلج، وبالتالى خطـوت له فكرة إجراء تجارب معملية لتصنيع مواد ذات مجاميع لبلورات أكثر دقـــة من الميكرونية، وفيما يلى رسم توضيحى للجهاز المعملى الذى أنتج مجـــاميع أو حبوب دقيقة (nanometer grains) لبلورات المادة:



الشكل 1-2 رسم توضيحى لجهاز قيتلر لتصنيع بلورات مادة فى صورتها النانوية

لقد تم الاهتمام بهذا الاكتشاف مما أدى البحاث إلى تطوير أســـاليب تصنيـــع المواد ببلورات فى صورتها النانوية ، وعلى ســـبيل المثـــال فقـــد اســـتحدث الشريك وزملاؤه أسلوب التغطية بالبلورات النانوية بالتحليل الكهربى النبضى

(Electrolysis pulse nanocrystalline coating) . هذا المجال الحديث في علم المواد فتح أفاقاً جديدة لإعادة اكتشاف المواد من جديد، حيث إن النيكل مثلا في صورته النانوية له مواصافات جديدة تختلف عن تلك للنيكل التقليدى، وكذلك غيره من المواد، فله ميزات فى الصلابة والخواص المغناطيسية والبيادة (wearings) ، والصدأ تميزه عن النوع التقليدى. ولعل الجدير بالذكر أن التغطية للمواد بطبقات نانوية تفيد فى عدم انتشار التشقق (crack propagation) وهذا ما أستفادت من تطبيقه شركة هايدرو أنتوريو الكندية فى المفاعلات النووية وبالتالى ساهمت فى حصر الإشعاعات واحتوائها مدة أطول. كما أن الآن قد تم الاهتمام بتصنيع صفائح كاملة من المادة فى صورتها النانوية. الشكل 2.2 يوضح التركيب البلورى للمجاميع أو الحبوب الميكرونية والنانوية.



الشكل 2.2 البناء الميكرونى التقليدى للمادة والبناء النانوى الحديث

وحيث إن علم المواد يهتم بنسق وتشكيل الذرات فى بناء ات متنوعة، فإن علم الكيمياء يتوغل أكثر فى المادة ومن ثم إلى الذرات ذاتها ويتعامل مع السحابات الإلكترونية أو بالإلكترونات فى مداراتها وبالتالى تتم التفاعلات الكيميائية من خلال الروابط الأيونية والروابط التساهمية، هذا وقد ساهمت النظرية الكمية فى نجاح تفسير الكيمياء بشك قدره النسبة بين طول شعرة والمسافة بين العراق وليبيا. لقد خرجت صناعات كيميائية كنتاج طبيعى لفهم البناء الإلكترونى لذرات المادة وكذلك توليد الطاقة . أما المجال النووى فهو

يغوص أكثر فى أعماق الذرة ليصل إلى قلبها وهى النواة ، وبفهم حيثيات هذه الكتلة الصغيرة المتمركزة فى وسط الذرة تمت التطبيقات النووية سواء الإشعاعية أو تلك المتعلقة بتوليد الطاقة ، حيث تمثل الطاقة النووية مليون ضعف تلك الطاقة الكيمائية. ومن يدرى لعل المستقبل يخبىء لنا الغوص أكثر فى النواة إلى البناء الكواركى (quarks) لنويّات النواة ذاتها ومن ثم تفجير طاقة كواركية تفوق تلك النووية ! .

إن دراستنا للنواة من خلال خواصاها وتركيبها وتفاعلاتها ستكون أسا سا ت لتطبيقات مباشرة لتلك المفاهيم، فمثلا دراسة الخواص النووية مثل العزم المغناطيسى (Magnatic moment) ، يمكننا من الدخول فى مجال الفصل الليزرى لليورانيوم-238 و اليورانيوم-235 ، أيضا بدراسة تركيبات النواة نجد أن النيوترونات لها مقدرة فائقة فى شطر النوى الثقلية (اليورانيوم مثلا) وبالتالى تحرير طاقة هائلة، كما أنه بدراسة خواص النيوترونات نجد أن النوع المتأخر (الخارج كنتاج للإنشطار) هو لب وأساس التطبيق السلمى لتوليد الطاقة النووية وذلك لإمكانية بناء مفاعلات نووية حيث بسبب وجود النيوترونات المتأخرة يمكننا تصنيع أنظمة تحكم يكون زمن استجابتها متوافقـًا مع الزمن الديناميكى للنظام . أيضا وبدراسة كيفية انحلال النوى، أى النشاط الإشعاعى، يمكن فتح آفاق للتطبيقات الصناعية والطبية للنظائر المشعة وكذلك التعرف على حسابات ما يسمى باحتراق الوقود (Burn up calculation) فى المفاعلات، وأيضا الوقاية من الإشعاع (Shielding) .

إن التجارب المعملية الاعتيادية وكذلك الطرق النظرية تضع صعوبات كثيرة فى تحديد خواص النواة وكذلك تركيب النوى. وبالرغم من ذلك، فإن معلومات كثيرة قد توفرت بسبب التجارب المعملية من عدة مجالات مثل:

1 - القياسات الدقيقة لكتل الذرات

2- الانحلال الإشعاعى

3 - التحويل (Transmutation) الاصطناعي للنوى

4 - المطيافية الضوئية

5 - القياس المباشر لبعض الخواص النووية مثل خاصية اللف (Spin) والعزم المغناطيسى

إن المشكل الرئيس فى الفيزياء النووية هو التوفيق بيـــن النتـــائج المعمليـــة و التنظير و النمذجة للنوى.

قانون العدد الصحيح لأستون Aston whole number rule :

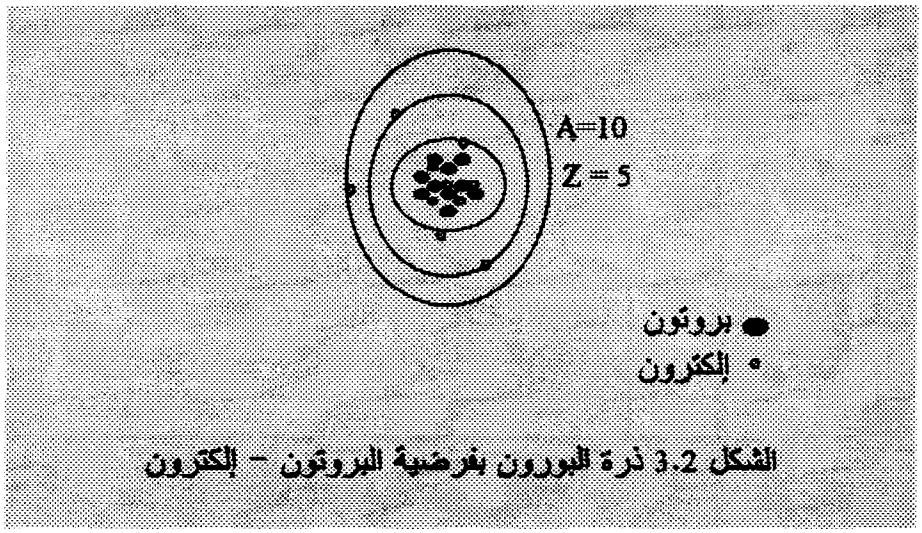
الحقيقة بأن بعض الذرات المشعة تشع جسيمات α و β أدت إلى الإفتراض بأن الذرات متكونة من مكونات ابتدائية. اقترح براوت Prout فى ســنة 1816 بأن كل الأوزان الذرية هى أعداد صحيحة ، وبأنها يمكن أن تكون مضاعفات صحيحة (Integral multiples) للوزن الذرى للهيدروجين. هذا الإفـــتراض أهمل عندما اكتشف أن بعض العناصر مكونة من أوزان جزئية مثل الكلـــور (35.46) والنحاس (63.54). مع القرن العشرين بدأت تظهر تـــأيدات جديـــدة لأفكار براوت، عندما اكتشفت النظائر من خلال أبحاث النشاط الإشـــعاعى. لقد وجد أن معظم العناصر عبارة عن خليط من النظائر، وان الكتل الذريـــة للنظائر قريبة جدا من أعداد صحيحة. لذلك اقترح أستون قانونـــه للأعـــداد الصحيحة " كل الأوزان الذرية قريبة جدا من الأعداد الصحيحـة وأن الأوزان الذرية الموجودة بالطرق الكيميائية مسببة بإحتواء نظيرين فأكثر ، كل منهم له وزن ذرى قريب من العدد الصحيح". كثير من العمل المعملى تناول تحليـــل الجسيمات الموجبة من عدة عناصر، وقد كان أخف جسيم قد أكتشـــف فـــى سياق هذه التجارب هو مايسمى بالبروتون الذى له شحنة موجبة تساوى فـــى المقدار لشحنة الإلكترون.

2-2 فرضيتا البروتون-إلكترون والبروتون-نيوترون

Proton-electron and proton-neutron hypothesis :

للتعبير عن كتلة النواة التى وزنها الذرى قريبا من العدد الصحيح A ، كـــان لزاما أن نفترض بأن النواة تحوى A بروتونات. ولكن إذا كان هذا صحيحًـا فإن شحنة النواة تكون أيضا A ؛ أى تكون قريبة من الكتلة الذريـــة وليســـت

للعدد الذرى Z ، التى هى نصف أو أقل من الكتلة الذرية. وحتى يتم تفادى هذا الإشكال، فقد إفترض أن النواة تحوى على A-Z من الإلكترونات، بالطبع هذا سيضيف وزنا مهملا للوزن الذرى ولكن ستجعل الشحنة تساوى A- (A-Z) = +Z .بهذا النموذج ستكون ذرة البورون B-10 كماهو مبين بالشكل 3.2.



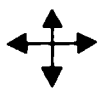
الشكل 3.2 ذرة البورون بفرضية البروتون – إلكترون

قبل دحض فرضية البروتون– إلكترون، لنستريح قليلا من خلال عرض بعض المفاهيم الضرورية حتى نتمكن من إثبات عدم صلاحية هذه الفرضية.

مفهوم اللف (المغزلية) Spin Concept :

إن مفهوم اللف للجسيم (Particle Spin) كما ورد فى كتاب " مختصر تاريخ الزمن" لستيفن هاوكينق Stephen W. Hawking هو كيف يبدو الجسيم من عدة اتجاهات. الجدول التالى يوضح اللف (Spin; S) للجسيم :

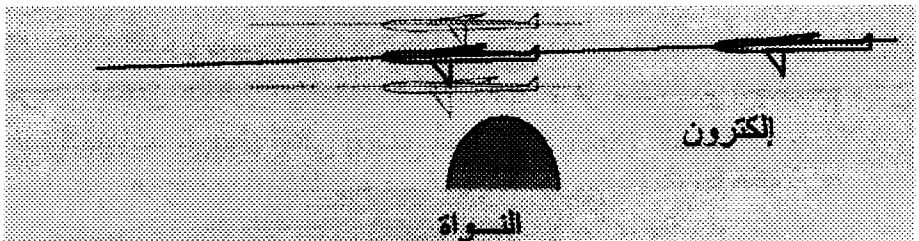
الجدول 1.2 مفهوم اللف للجسيم وأرقامه المناظرة

المفهوم	قيمة S	الوصـــــــــــف
	0	إن شكل الكرة دائما يبدوكما هو من أى إتجاه نظرت إليه
	1	هذا السهم يمكننا رؤيته بنفس الشكل إذا لف دورة كاملة
	2	هذا السهم يمكننا رؤيته بنفس الشكل إذا لف نصف دورة
	4	هذا الشكل يمكننا رؤيته بنفس الشكل إذا لف ربع دورة
	1/2	هذا الشكل يقرب لنا مفهوم S=1/2 ، حيث إن الكرة لها نصفان أسود وأبيض وخلال دورانها تمرعلى نصف دائرة مسننة. نلاحظ أننا نحصل على نفس اللون بعد دورتين كاملتين.

التركيب عالى الدقة لخطوط الطيف Hyperfine structure of spectral lines :

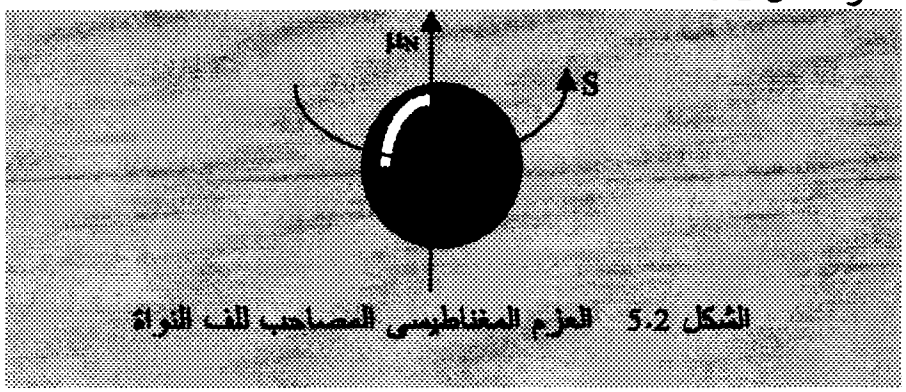
هل حدث وأن ركبت طائرة، وخلال الرحلة مرت الطائرة بمنطقـــة جبليـــة وطلب منكم ربان الطائرة بأن تشدوا الأحزمة؟ ماذا يحدث للطـــائرة خـــلال عبورها فوق الجبال؟

.....تهتز أليس كذلك؟ أنظر الشكل 4.2 للتوضيح.



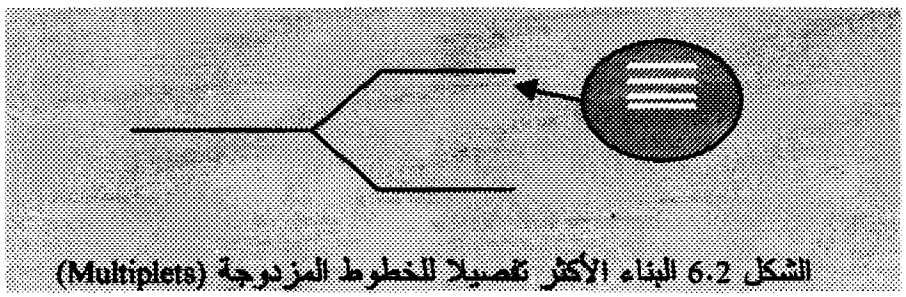
الشكل 4.2 مفهوم لتوضيح سبب التركيب عالى الدقة لخطوط الطيف

الدراسة الدقيقة لخطوط الطيف بينت أن النـــواة لـــها زخـــم زاوى Angular Momentum و لف spin الذى يصاحبه عزم مغناطيسى مثل ذلك للإلكـترون أنظر الشكل 5.2 .



الشكل 5.2 العزم المغناطيسى المصاحب للف النواة

الخطوط المزدوجة تم فحصها بأجهزة مطيافية متناهية الدقة، وقد وجد أن هذ الخطوط تنقسم إلى مجموعة خطوط أخرى. هذا الانفصال يســـمى بالبنـــا عالى الدقة Hyperfine Structure . الشكل 6.2 يوضح هذا الانفصال:

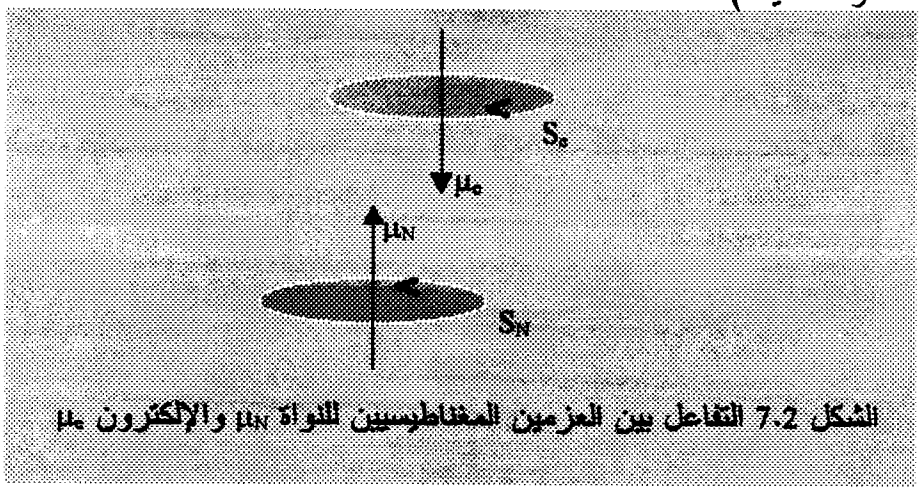


الشكل 6.2 البناء الأكثر تفصيلا للخطوط المزدوجة (Multiplets)

البناء التفصيلى لخطوط الطيف لم يمكـــن تفســيره فقـــط بالاعتمـــاد علـــى الإلكترونات الخارجية للذرة، ومن ثم كان لزاما أن تفسر باستخدام خـــواص نواة الذرة. الخواص التى لها علاقة بالبناء التفصيلى هـــى الكتلـــة والعـــز الزاوى (اللف S) للنواة.

نظرا لأن النواة والإلكترون لهما حركة آنية حول مركز مشترك للجاذبية، فإن ثابت ريدبيرج للعنصر يعتمد على كتلة النواة. لذلك إذا كان العنصر له أكـــثر من نظير، فإن ثابت ريدبيرج للنظائر سيكون مختلفا قليلاً وبالتـــالى ســـتكون

خطوط الطيف مختلفة. إلا أن هذا التفسير ليس كافيا وحده لتفسير ظاهرة البناء التفصيلى، لأن عدد الخطوط فى البناء التفصيلى أكثر عددا من النظائر، وأيضا العناصر بنظير واحد مثل البيزمث (Bismuth) أظهرت بناء تفصيليا. لذلك إذا افترضنا بأن النواة لها زخم زاوى (S) ، فإنه يمكننا تفسير البناء التفصيلى بإعتبار العزم المغناطيسى المصاحب للنواة سيتفاعل مع نظيره للإلكترون، ومن ثم فإن طاقة التفاعل هذه ستغير من طاقة الإلكترون الكلية، وبالتالى يحدث انفصال فى مستويات طاقة الذرة .الشكل 7.2 يوضح تفاعل العزمين المغناطيسيين للنواة والإلكترون (لا تنسى الربط بين رحلة الطائرة والشكل 7.2 لتثبيت مفهوم البناء عالى الدقة لخطوط الطيف) .



الشكل 7.2 التفاعل بين العزمين المغناطيسيين للنواة μ_N والإلكترون μ_e

إن العزم المغناطيسى للنواة يتناسب مع الزخم الزاوى الكلى I ، أى أن:

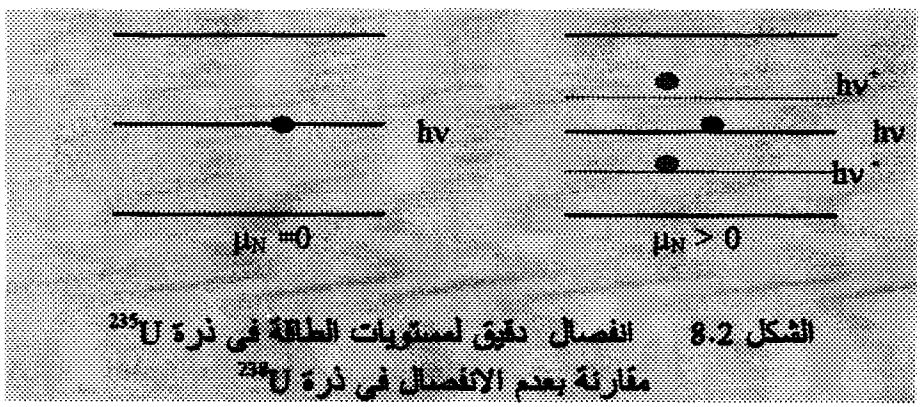
$$\mu_N \propto I$$

إن النوى التى تحوى عددا زوجيًا من البروتونات وكذلك النيوترونات(التى سيأتى ذكرها قريبا)وجد أن لها $I=0$ ومن ثم فإن $\mu_N=0$ (للنوى زوجية النيوترونات-البروتونات).

هذا يعنى أن هذه النوى ليس لها عزم مغناطيسى، ومن ثم فلن يكون لذرات هذه النوى ظاهرة البناء التفصيلى للخطوط الطيفية، وعلى نقيض ذلك، فإن العزم المغنطيسى له قيمة لتشكيلات أخرى مثل تركيبة فردية-زوجية، ومن

ثم فإن الانفصال فى مستويات الطاقة موجود لذرات تلك النـــوى أى أن لـــها ظاهرة البناء عال الدقة للخطوط الطيفية. هذه الأفكار تعد مدخلاً مهمًا لتصميم تقنية فصل النظائر مثل اليورانيوم-235 واليورانيوم-238 . ولنأخذ بعـــض الوقت لشرح كيفية الاستفادة من فهم أحد خواص النواة وهو العزم المغنطيسى لتمكيننا من التصميم الهندسى لجهاز فصل نظيرىّ اليورانيوم 235 و238 .

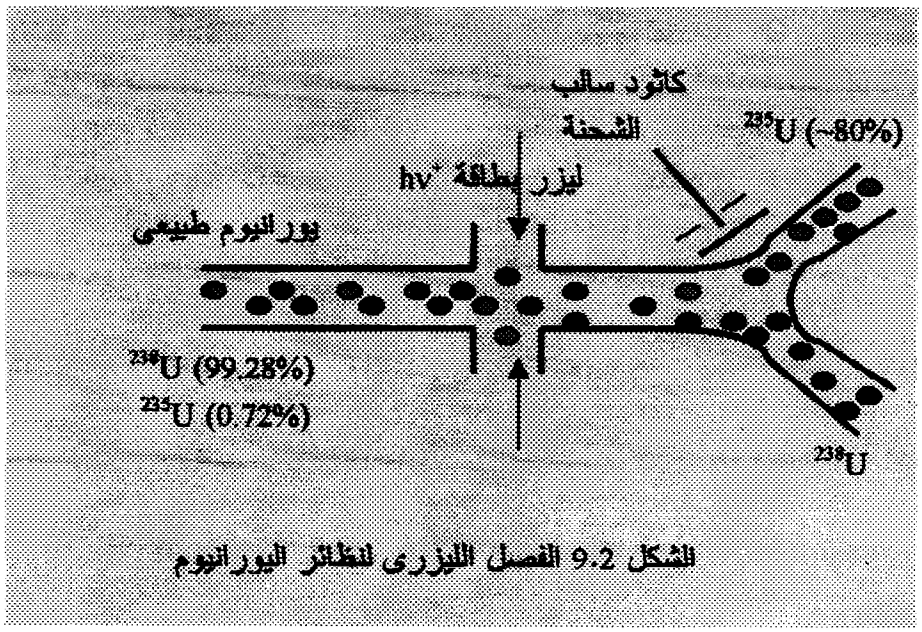
نظرا لأن U^{238} يحوى عددًا من البروتونات Z=92 وعددًا من النيوترونـــات N=146 فهى تحوى عددا زوجيا مـــن النيوترونـــات وعـــددا زوجيـــا مـــن البروتونات، لذلك فإن العزم المغناطيسى لنواة هذا النظير يساوى صفرا كمـــا أسلفنا ذكره سابقا، ولذلك لن يكون هناك انفصالا دقيقا فى مســـتويات طاقـــة الإلكترونات لذرة هذا النظير. فى حين أن U^{235} يحوى عددا من البروتونـــات Z=92 وعددا من النيوترونات N=143 وبالتالى فإن العزم المغناطيسى لنـــواة هذا النظير لا تساوى صفرا ($\mu_N > 0$) ، ولذلك سيكون هناك انفصالا دقيقـــا فى مستويات طاقة الإلكترونات لذرة هذا النظـــير(Hyperfine structure)، أنظر الشكل 8.2 لتوضيح انفصال مستويات الطاقة ليورانيوم -235 مقارنـــة بعدم وجود هذا الانفصال فى مستويات الطاقة لذرة اليورانيوم -238.



الشكل 8.2 انفصال دقيق لمستويات الطاقة فى ذرة U^{235} مقارنة بعدم الانفصال فى ذرة U^{238}

فبسبب الانفصال فى مستويات الطاقة فى ذرة اليورانيوم -235 فإنـــه تباعـــا لذلك تكون الإلكترونات بطاقات مجاورة أى $h\nu^+$ أو $h\nu^-$. الفكـــرة الهندســـية التى تمكننا من فصل هذين النظيرين هو اختيارنا لطاقة دقيقة جـــدا تتـــاظر

الطاقة المناظرة للمستوىالمنفصل ونقذف بها الإلكترون الموجود فـــى ذلـــك المستوى ومن ثم يمكن طرد ذلك الإلكترون وبالتالى يحدث التأين لهذا النظير (اليورانيوم-235). هذه الذرات المتأينة يمكننا جذبـــها إذا بكـــاثود مشـــحون بالسالب. إنه بسبب التكمية فى مستويات الطاقة فإن اختيارنـــا لتلـــك الطاقـــة المحددة وقذفها إلى الذرات المختلطة بالنظرين لن تطرد أى من الإلكترونـــات فى ذرات اليورانيوم-238 وبالتالى لن تتأين تلك الذرات. طبعا يمكننا تحديـــد تلك الطاقة الدقيقة من خلال إستخدام أشعة الليزر، ومن ثم كـــانت التســـمية؛ الفصل الليزرى للنظائر. الشكل 9.2 يوضـــح رســـما توضيحيـــا للأســـلوب الهندسى لفصل نظيرى اليورانيوم (235 و 238).



الشكل 9.2 الفصل الليزرى لنظائر اليورانيوم

وبالتالى لتطبيق هذا العمل يجب مراعاة مايلى:

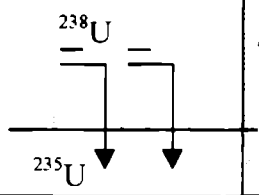
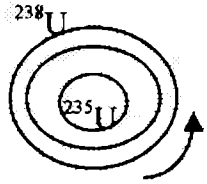
1- الدراية بمستويات الطاقة لكل من اليورانيوم -235 و اليورانيوم -238 .

2- اختيار التصميم الليزرى اللازم ذا الطاقة الكافية لتأين الإلكترونـــات فـــى المستويات المنفصلة.

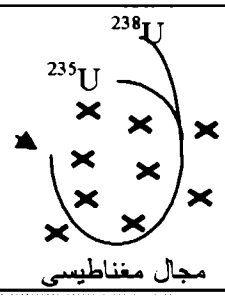
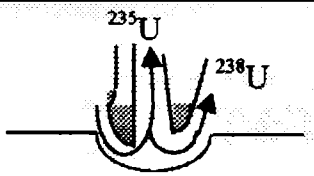
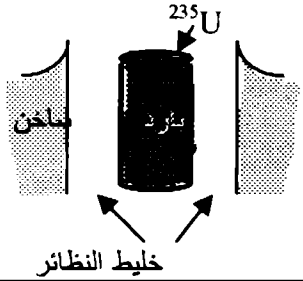
3- تصميم الجهاز المناسب للأخذ فى الاعتبار النقاط المذكورة مع الكيفية لتجميع الذرات المنفصلة.

نود الإفادة هنا أن فصل النظائر مهم بخصوص موضوع تثرية الوقود حيث إن المفاعلات النووية كثير منها يتعامل مع تثرية 3% من اليورانيوم-235 فما فوق علما بأن التثرية الطبيعية لليورانيوم هى 0.72% . والجدير بالذكر أن هذا ليس الأسلوب الوحيد للتثرية بل هناك عدة طرق أخرى والجدول 2.2 يلخص بعضا منها.

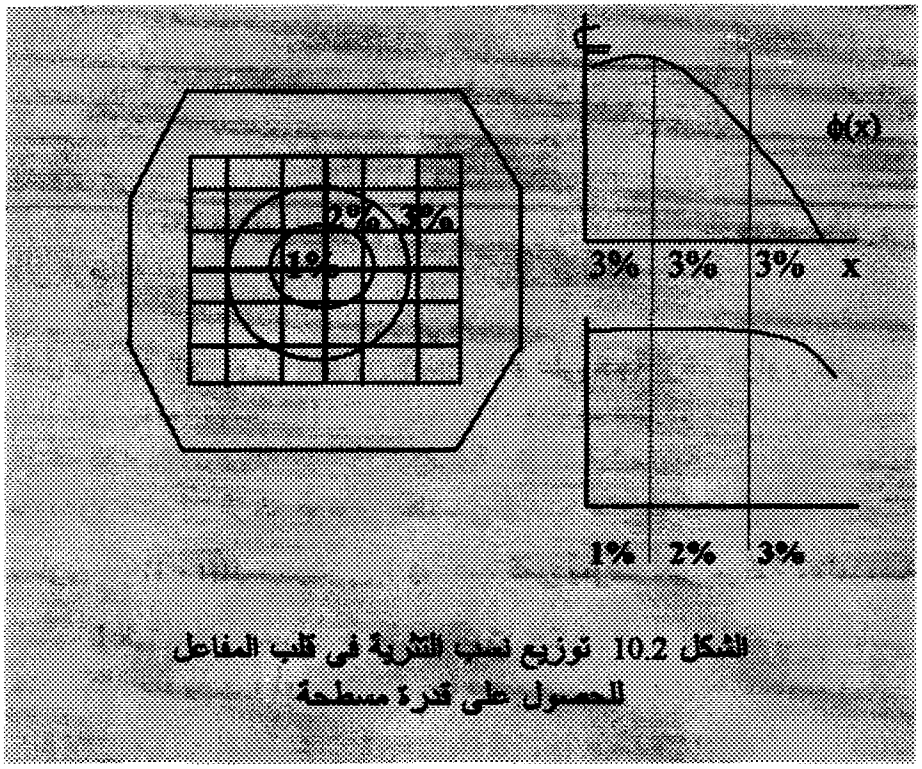
الجدول 2.2 بعض الطرق المستخدمة فى التثرية

الوصف	الشكل المميز للطريقة
الانتشار الغازى Gaseous diffusion ^{235}U تتحرك أسرع من ^{238}U وبالتالى تفصل	أغشية نفاذة Membranes 
الطرد المركزى Centerifuge خلال الدوران النظير الأثقل ^{238}U يستقر إلى الخارج وبالتالى يمكننا استخلاص ^{235}U من المركز.	

يتبع الجدول 2.2

مطياف الكتلة Mass spectrometer في وجود المجال المغناطيسي فإن ^{235}U تنحني في نصف قطر أقل من ذلك للنظير ^{238}U.	
الفوهة Nozzel نظرا لسرعة ^{235}U مقارنة بالنظير ^{238}U فيمكننا فصل النظيرين	
فارق الحرارة **Temperature gradient** بتمرير خليط النظائر في التجويف فإن فارق الحرارة بين السطحين كفيل بتجميع ^{235}U في أعلى الجهاز	

إن برنامج التثرية يعد أحد الحلول الناجعة لتصميم المفاعلات النووية لغرض المحافظة على التفاعل المتسلسل ، كما أنه فى المفاعلات يتم توزيع نسب تثرية متنوعة فى مناطق متعدد من المفاعل، حيث تكون نسب التثرية فى المنطقة الوسطى قليلة وتزداد نسب التثرية تدريجيا مع الخروج من وسط المفاعل إلى أطرافه. وهذا التوزيع يعزو إلى محاولة تسوية القدرة الناتجة من المفاعل Power Flattening . فيما يلي يوضح الشكل مفهوم تسوية إنتاج القدرة فى قلب المفاعل.



الشكل 10.2 توزيع نسب الثروة فى قلب المفاعل للحصول على قدرة مسطحة

فشل فرضية البروتون-إلكترون (p-e) بناء على حجة العزم المغنطيسى:

الآن حان الوقت لدحض فرضية البروتون-إلكترون بعد أن هيأنا ما يلزم لذلك. لقد كانت قياسات العزوم المغناطيسية لعديد من النوى تعطى قيما 1/1000 من قيم العزوم المغناطيسية للإلكترونات والتى لها القيمة العددية لعزم بوهرللإلكترون:

$$\mu_B = eh/(4\pi m_e C) = 0.92x\ 10^{-20} \quad erg/gauss \qquad (1.2)$$

كل القيم المقاسة لعزوم النوى فى إطار القيمة 10^{-23} erg/gauss ويعبر عنها:

$$\mu_N = eh/(4\pi m_H C) = 0.505 \times 10^{-23} \quad erg/gauss \qquad (2.2)$$

القيم المقاسة للعزوم المغناطيسية النووية تتراوح بين 0 و μ_N 5 . وبالتالى فلو كانت الإلكترونات موجودة بداخل النواة ، إذًا لوجدنا أن العزم المغناطيسى النووى فى إطار μ_B (عزم الإلكترون) على الأقل لتلك النوى التى بها عدد فردى من الإلكترونات. لذلك وبحكم أن العزم المغناطيسى للنوى فى إطار μ_N فإن فرضية البروتون-إلكترون p-e قد أثبتت فشلها.

فشل فرضية البروتون-إلكترون (p-e) بناء على حجةالزخم الزاوىالكلى I :

الزخم الزاوى للنوى له خواص ميكانيكية كمية شبيهة لتلك الخاصة بالإلكترونات. إن الزخم الزاوى الكلى $\underline{I}$ هو متجه له قيمة عددية تساوى $\sqrt{I(I+1)}\,\frac{h}{2\pi}$، حيث إن I هو عدد كمى يُعرَّف أكبر مركبة محتملة للمتجه $\underline{I}$على محور معين بناء على القانون $I_z = I\, h/2\pi$. إن I تعتمد على عدد الكتلة الذرية A ، أى أن:

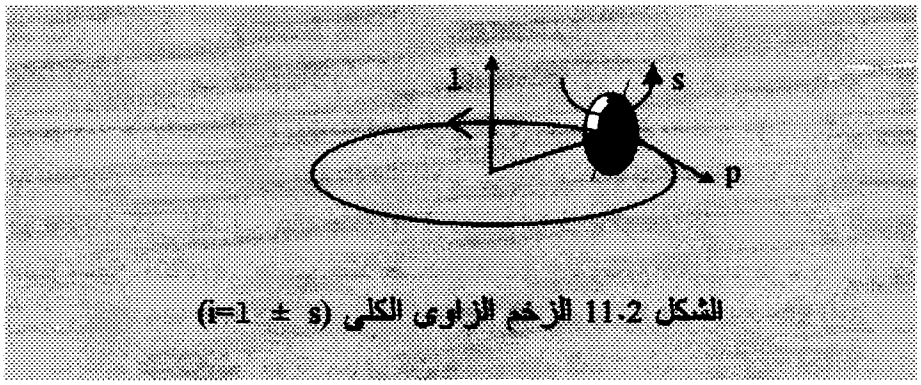
إذا كانت A زوجية فإن I تكون عددًا صحيحًا بوحدة $h/2\pi$ ، بمعنى:

$$I = (0,1, 2, 3, 4, ...)\, h/2\pi$$

أما إذا كانت A فردية فإن I تكون نصف عدد صحيح فردى بوحدة $h/2\pi$ ، بمعنى:

$$I = (1/2, 3/2, 5/2 , ...)\, h/2\pi$$

إن الزخم الزاوى الكلى i لجسيم ما مكون من زخم اللف s (spin) مضافا اليه الزخم المدارى l (orbital angular momentum) ، أنظر الشكل 11.2



الشكل 2-11 الزخم الزاوى الكلى (s ± l=i)

حيث يعرف اللف إما بأنه مواز (+) أو ضد مواز (−) لمحور معين ويحسب بوحدة $h/2\pi$. وعندما تحوى النواة أكثر من نويّة (nucleon) ، فإنه يمكننا التعبير عن ذلك كما يلى:

$$\Sigma i=\Sigma l +\Sigma s \qquad (3.2)$$

أو

$$I = L + S \qquad (4.2)$$

حيث إن L هىعدد صحيح ، و S تكون نصف عدد صحيح زوجى إذا كان عدد النويات زوجيًا، وتكون نصف عدد صحيح فردى إذا كان عدد النويات فرديا. لذلك ستكون I عددا صحيحًا عندما تكون A زوجية، وتكون نصف عدد صحيح فردى عندما تكون A فردية ، متفقة بذلك مع النتائج المعملية.

الآن يمكننا دحض فرضية البروتون −إلكترون من خلال الحجة المستندة على الزخم الزاوى الكلى I . إن النيتروجين له العدد الذرى Z مساويا 7 وعدد الكتلة الذرى A مساويا 14، ومن ثم وحسب فرضية البروتون−إلكترون فإن نواة النيتروجين تحوى عدد 14 − 7 = 7 إلكترونات وبملاحظة أنه:

إذا كانت A زوجية فإن $I = (0, 1, 2, 3, 4, \ldots\ldots\ldots\ldots) h/2\pi$

إذا كانت A فردية فإن $I = (1/2, 3/2, 5/2, \ldots\ldots\ldots\ldots) h/2\pi$

فإننا إذا تعاملنا مع البروتونات على حدة، فإن الزخم الزاوى سيكون عددًا صحيحًا لأن عدد البروتونات زوجى يساوى 14 ، ونظرًا لأن الزخم الزاوى للإلكترون (spin) يساوى 1/2 ، لذا وبوجود 7 إلكترونات مجموع زخمها الزاوى سيكون نصف عدد صحيح فردى . إذًا فإن الزخم الزاوى الكلى لنواة النيتروجين سيكون نصف عدد صحيح فردى . ولكن معمليا، الزخم الزاوى للنيتروجين وجد أنه عدد صحيح I =1 . إذًا ففرضية البروتون-إلكترون أثبتت عدم صلاحيتها مرة أخرى من خلال هذه المناقشة.

فشل فرضية البروتون-إلكترون (p-e) بناء على حجة ميكانيكا الموجات :

فى سنة 1900 قام العالم الألمانى ماكس بلانك باقتراح أن الضوء، وأشعة إكس، وموجات أخرى لا يمكن أن تشع بمعدل عشوائى، ولكن بحِزَم محددة تسمى "كمّات quanta " . لقد نجح الافتراض الكمى فى تفسير معدل إشعاع الأشعة من الأجسام الساخنة . وفى سنة 1926 قام عالم المانى آخر يسمى ويرنر هايسنبيرغ بعرض مبدأه المشهور" اللاتأكدية"(Uncertainty principle) . حتى يمكن أن يُتنبأ بالموقع والسرعة المستقبلية لجسيم، يجب أن تتم عملية القياس الدقيقة للموقع والسرعة الحالية للجسيم. الطريقة البديهية لفعل ذلك هو أن تشع ضوءًا على الجسيم، حيث إن جزءًا من موجات الضوء ستتبعثر بواسطة الجسيم وبالتالى هذا سيحدد موقعه. إلاّ أنه لا يمكننا تحديد الموقع اكثر دقة من المسافة بين قمم موجة الضوء، لذا يحتاج استخدام ضوء بطول موجى قصير لقياس موقع الجسيم بدقة. الآن وبفرضية بلانك الكمية، لا يمكن استخدام قدر من الضوء متضائل الصغر؛ فعلى الأقل يجب استخدام كَمَىّ " quantum " واحد. هذا الكَمَىّ سيسبب إضطرابًا للجسيم ويغير من سرعته بطريقة لايمكن التنبؤ بها. بالإضافة إلى ذلك، كلما أردنا دقة فى حساب الموقع، نحتاج موجات ضوء بطول موجى أقصر وبالتالى طاقة أعلى لكل كَمَىّ ، ومن ثم سيحدث إضطرابا للسرعة بقدر أكبر. وبمعنى آخر، كلما أردنا حساب الموقع بدقة أكبر حسبنا سرعته بأقل دقة والعكس صحيح. أوضح هايسنبيرغ أن قيمة اللاتأكد فى الموقع مضروبة فى قيمة اللاتأكد

فى السرعة ضرب الكتلة (قيمة اللاتأكد فى زخم الجسيم) لا يمكن أن تكون أقل من قيمة معينة وهى ثابت بلانك. كما أن هذه النهاية لا تعتمد على كيفية حساب السرعة أو الموقع للجسيم أو نوعية الجسيم. إن مبدأ اللاتأكدية لهايسنبيرغ هو أساسى وخاصية كونية لامفر منها . يمكن التعبير عن مبدأ اللاتأكدية بالمعادلات التالية:

$$\Delta X \ \Delta p \geq h \qquad (5.2)$$

$$\Delta E \ \Delta t \geq h \qquad (6.2)$$

حيث X تمثل الموقع و p تمثل الزخم وE تمثل الطاقة وt تمثل الزمن . الآن لنطبق مبدأ اللاتأكدية على إلكترون بالنواة. اللاتأكدية فى الموقع ΔX للإلكترون هى تقريبا قطر النواة ولنفرضه يساوى $2x10^{-12}$ cm ، وباستخدام المعادلة 5.2 يمكننا حساب Δp.

$$\Delta p \cong h/\Delta X = 6.6x10^{-27} / 2x10^{-12} = 3.3x10^{-15} \ \text{erg.sec/cm}$$

بافتراض أن زخم الإلكترون p لا يفوق قيمة اللاتأكدية فى الزخم Δp ونظرًا لأن الإلكترون يتحرك بطاقة عالية فإنه يمكننا استخدام قوانين النسبية لحساب طاقة الإلكترون داخل النواة، بمعنى:

$$E^2 = p^2 C^2 + m_o^2 C^4 \qquad (7.2)$$

حيث m_o كتلة السكون للإلكترون ($9x10^{-28}$ g) و C تعبر عن سرعة الضوء ($3x10^{10}$ cm/sec) ، و الزخم $p = 3.3x10^{-15}$ erg.sec/cm ، وبالتعويض بالقيم نجد أن حد الزخم أكبر بكثير من حد طاقة السكون ومن ثم فإن $E^2 = 10^{-8}$ erg^2 ، أو $E = 10^{-4}$ erg أو $E = 60$ MeV . بناءً على هذه النتيجة فإن الإلكترون الحر المُحتوى فى هذا الحجم من الفضاء ستكون طاقته 60 MeV . إلاّ أن القياسات لطاقة

الإلكترونات المنبعثة بسبب الانحلال الإشعاعى لا تتعدى 4 MeV . لذلك فقد أثبتث هذه المناقشة عدم صلاحية فرضية البروتون- إلكترون.

اكتشاف النيوترونات (Neutrons) :

من خلال الحجج السابقة فإنه لا يوجد إلكترونات حرّة داخل النواة وبالتالى سقطت فرضية البروتون- إلكترون. الفرضية التى تلى ذلك هى أن الإلكترون ملتصق بالشحنة الموجبة وليس له وجود مستقل داخل النواة. مع العشرينيات (1920-) اقترح رذرفورد تكوين جسيم متعادل وذلك بإتحاد البروتونات مع الإلكترونات وهذا الجسيم الإفتراضى سمى بالنيوترون . فى سنة 1932 اكتشف شادويك النيوترون خلال تجاربه فى التحويل الإصطناعى للنوى بمقذوفات جسيمات الفا. دراسات إضافية بينت أن كتلة النيوترون هى أكبر قليلا من البروتونات، حيث إن كتلة النيوترون تساوى 1.00898 amu ، فى حين أن كتلة البروتون تساوى 1.00758 amu (وحدة كتلة ذرية : amu).

فرضية البروتون- نيوترون Proton-neutron hypothesis (p-n) :

بهذه الفرضية فإن العدد الكلى للنويات هو A وهو الكتلة الذرية، فى حين أن عدد البروتونات هو العدد الذرى Z . وتتأكد هذه الفرضية من خلال نفس الحجج التى استخدمت لدحض فرضية البروتون-إلكترون:

1- كل من النيوترون والبروتون له لف spin يساوى [h/2π] 1/2 . وبالتالى فإن اللف الكلى للنواة سيكون إما عددًا صحيحًا لعدد نويات زوجى، أو نصف عدد صحيح فردى إذا كان عدد النويات فرديا. هذا موافق للتجارب المعملية.

2 - إن العزم المغناطيسى للنيوترون هو حوالى $2\mu_N$ وهى معاكسة فى الإشارة ومساوية فى القيمة للعزم المغناطيسى للبروتون.

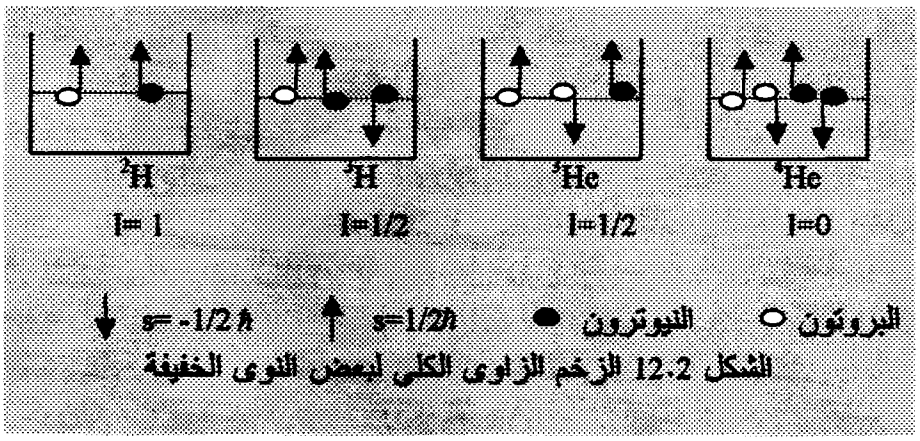
3 – النيوترون يوجد حر داخل النواة ، وهذا يمكننا ببساطة إثباته باستخدام حجة ميكانيكا الموجة، فنجد أن $E = 1.51x10^{-3}$ erg أو E = 941 MeV . كما أن طاقة السكون للنيوترون هى 931MeV/amux1.00898amu=939MeV . إن الرقمين قريبان لبعضهما مما يؤيد وجود النيوترون حرًا داخل النواة.

3-2 بعض الخواص النووية Nuclear properties :

الزخم الزاوى Angular momentum :

قد ناقشنا سابقا الزخم الزاوى الكلى بأنه حاصل جمع الزخم المدارى وزخم اللف (المغزلية)؛ I = L + S . فى مستويات الطاقة الدنيا ، يتوقع أن الزخم الزاوى المدارى يساوى صفرًا، ومن ثم فإن الزخم الزاوى الكلى يكون بسبب زخم اللف. أى أن: $I = \Sigma s = S$ ، حيث إن للبروتون s= ½ ومثله للنيوترون . وكمثال لذلك فإن الزخم الزاوى الكلى لذرات ^{2}H, ^{3}H, ^{3}He, ^{4}He هى 0 ,1, ½, ½ بوحدة $\hbar = h/2\pi$. أنظر الشكل 12.2 (لاحظ أن اتجاه السهم العلوى يعبرعن $s=1/2\ \hbar$ فى حين أن اتجاه السهم السفلى يعبر عن $s= -1/2\ \hbar$).

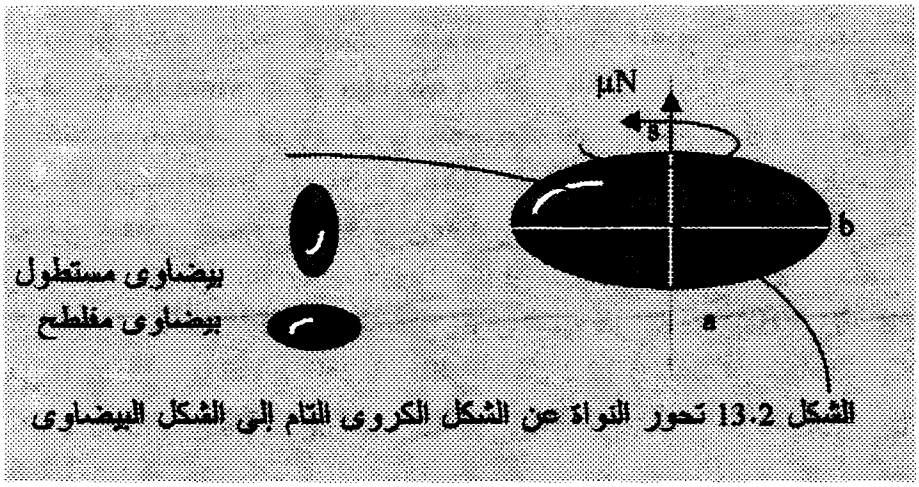
لاحظ أن I تساوى عدد صحيح لقيم A الزوجية، فى حين I تساوى نصف عدد صحيح فردى لقيم A الفردية ، وهو ما يوافق التجارب المعملية.



الشكل 12.2 الزخم الزاوى الكلى لبعض النوى الخفيفة

العزم الكهربى رباعى الأقطاب Electric quadrupole moment :

إن العزم الكهربى رباعى الأقطاب هو مقياس لمدى انحراف النواة من التماثل الكروى.



الشكل 13.2 تحور النواة عن الشكل الكروى التام إلى الشكل البيضاوى

بتوزيع الشحنة على النواة بشكل متسق فإن العزم الكهربى رباعى الأقطاب يعطى من العلاقة التالية:

$$Q = 2/5\ (b^2-a^2)\ Z \qquad (8.2)$$

حيث تمثل كل من b و a أبعاد أطراف الشكل البيضاوى. إن العزم الكهربى رباعى الأقطاب Q للديتوريوم ببروتون واحد ونيوترون واحد هى $Q=+0.00274x10^{-24}\ cm^2$ ، فى حين نواة اللوتيسيوم والتى لها 176 من النويات فإن لها $Q=7x10^{-24}\ cm^2$. عندما تتوزع الشحنة بشكل بيضاوى مستطول (Prolate ellipsoid) (a<b) فإن Q موجبة، و عندما تتوزع الشحنة بشكل بيضاوى مفلطح (Oblate ellipsoid) (b<a) فإن Q سالبة ، وتكونQ تساوى صفرًا عندما تتوزع الشحنة بشكل متماثل أي كروى تماما

Spheroid . كما أن العزم المغناطيسى الموازى للف يسمى عزمًا مغناطيسيًا موجبًا، فى حين يكون سالبا إذا كان العزم الغناطيسى ضد التوازى للف. الجدول 3.2 يوضح الخواص التى ذكرت حتى الآن وذلك لبعض النوى:

الجدول 3.2 بعض الخواص النووية لبعض النوى

النواة	الكتلة amu	اللف s ħ	العزم المغناطيسى μ_N	العزم رباعى القطبية Q barn=10^{-24} cm^2
^1_0n	1.0086654	1/2	-1.91315	0
^1H	1.0078252	1/2	+2.79276	0
^3H	3.016049	1/2	+2.9787	0
^3He	3.0160299	1/2	-2.1274	0 كروية
^7Li	7.016005	3/2	+3.2560	42 - مفلطحة
^{235}U	235.04393	7/2	+0.5	+40 مستطولة

التناظر واللاتناظر لدالة الموجة

: Symmetrical and asymmetrical wave function

هناك نوعان من أساليب الأحصاء لتفسير تصرف عدد كبير من الجسيمات؛ أحدهما إحصاء فيرمى- ديراك والذى يستخدم لنظام من الجسيمات له دالة موجية لاتناظرية، والتى تعنى؛ أن دالة الموجة تغير من إشارتها عندما يحدث تبادل كل الإحداثيات (ثلاثة للموقع وواحد للف) لجسيمين متماثلين. هذا يعنى أن كل حالة (state) معّرفة تماما يمكن أن تُشغل فقط بجسيم واحد. ومن ثم فإن مبدأ الإقصاء لباولى Pauli exclusion principle يطبق على الجسيمات التى تخضع لإحصاء فيرمى- ديراك. إن الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات وأيضا كل النوى ذات عدد الكتلة الذرى الفردى تمتثل لإحصاء فيرمى-ديراك. النوع الثانى من الإحصاء هو إحصاء بوزى-اينشتين والتى

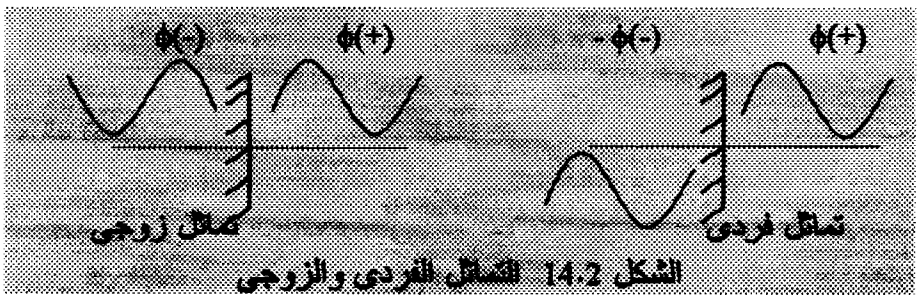
لها علاقة بالحالة التناظرية لدالة الموجة ، والتى تعنـــى؛ أن دالـــة الموجـــة لاتتغير من إشارتها عندما يحدث تبادل كل الإحداثيات لجسيمين متماثلين. وفى هذه الحالة يمكن لاثنين أو أكثر من الجسيمات أن يحتلا نفس الحالـــة الكميـــة (quantum state) . كل النوى ذات عدد الكتلة الذرى الزوجى تمتثل لإحصـــاء بوزى-اينشتين.

التماثل Parity :

بإعتبار أن دالة الموجة يمكن فصلها وتعتبر حاصل ضرب دالتين إحداهمـــا دالة فى الموقع والأخرى دالة فى اللف أى أن:

$$f(x,y,z,s) = \phi(x,y,z)\ \psi(s) \qquad (9.2)$$

ومن ثم فإن حركة النواة توصف بأنها ذات تماثل زوجـــى إذا كـــانت دالـــة الموقع ϕ لاتتغير فى حالة استبدال إحداثيات الموقـــع x,y,z بـــــ $-x,-y,-z$. كما أن الحركة توصف بأن لها تماثلاً فرديًا إذا تغيرت إشارة دالة الموقـــع ϕ عند استبدال الإحداثيات x,y,z بـــ $-x,-y,-z$. الشكل 14.2 يوضح التمـــاثل بدلالة الموجة ذات بعد واحد x .



الشكل 14.2 التماثل الفردى والزوجى

إن قانون الاختيار للعديد من التحويلات النووية يعتمد على التمـــاثل وكذلـــك الزخم الزاوى الكلى.

4-2 ملخص :

علمنا فى هذا الفصل أن فهم البنية المادية لتشكيل الذرات فى بنـــاء بلـــورى Crystal structure للعنصر مكنت من نشوء علم المواد الذي يـــهتم بتشـــكيل المادة ببنيتها المايكرونية وحديثا ببنيتها النانوية. كما أن الغوص فى كيفية بنية الذرة والتي هي نواة بالمركز تطوف حولها مجموعة من الإلكترونات ، مـــع الفهم الصحيح لتوصيف هذه الإلكترونات الدوارة، عن طريق ميكانيكا الكـــم، كان فتحًا فى علم الكيمياء الذي مكن من التفسير الدقيق للتفاعلات الكيميائيـــة التي بنيت عليها الصناعات الكيميائية الحديثة. أخيرا، أصبح الفهم الدقيق للبنية النووية من حيث مكوناتها (البروتونات و النيوترونات) و كذلـــك خواصـــها النووية، فتحًا آخر فى إنتاج الطاقة النووية وغيرها من التطبيقات، فعلى سبيل المثال لا الحصر لاحظنا فى هذا الفصل كيف أنـــه بفـــهم خاصيـــة العـــزم المغناطيسى للنواة تم التمكن من استغلال ذلك فى تثرية الوقود النووى عـــن طريق الليزر، ومن ثم الاستفادة من ذلك فى تصميم المفاعلات النووية التـــى بدورها قد تستغل لتوليد الطاقة أو إنتاج النظائر المشعة.

5-2 مسائل :

1.2 – احسب مستندا على حجة ميكانيكا الموجات طاقة البروتون الحر داخل النواة. (الحل: 940 MeV)

2.2 – ماذا يعنى مبدأ الإقصاء لباولى؟

3.2 – ماذا يعنى مبدأ اللاتأكد؟

4.2 – تحدث عن علاقة البناء العالى الدقة Hyperfine Structure وفصل نظائر اليورانيوم.

5.2 – اذكر الحجج التى استخدمت لدحض فرضية البروتون– إلكترون كمكونات لنواة الذرة .

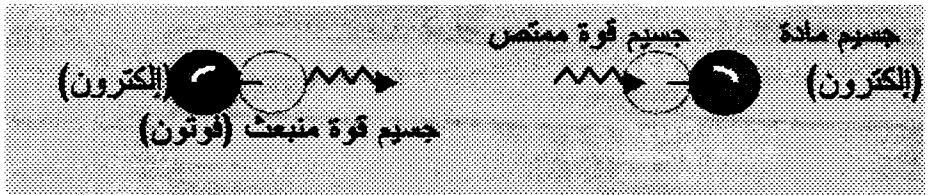
الفصل الثالث

النويّات والقوى النووية
Nucleons and Nuclear Forces

3-1 القوى الأساسية.
3-2 نظرية الميزونات.
3-3 الجسيمات عالية الطاقة.
3-4 ملخص.
3-5 مسائل.

1-3 القوى الأساسية The Universal Forces :

فى ميكانيكا الموجات، يتم تفسير قوة التنافر بين إلكترونين (يعتبران جسيمى مادة Matter particles كلاً منهما له لف $\hbar$ ½) على أن هناك جسيما حاملا قوة (Force-carrying particle) وهو فوتون بلف $1\hbar$ مسؤول على ذلك التنافر بين الإلكترونين . ما يحدث؛ هو أن جسيم المادة (الإلكترون) يشع فوتون وهو جسيم القوة ، هذا التشعيع يسبب تغيرا فى سرعة جسيم الإلكترون ليتحرك فى الاتجاه المعاكس لإتجاه الفوتون. الجسيم الحامل للقوة يصطدم بالإلكترون الآخر الذى يقوم بامتصاصه ليندفع فى نفس الاتجاه بسرعة ما. هذا النوع من التفاعل يبين كأن هناك قوة بين جسيمى المادة، أنظر الشكل 1.3 .



الشكل 1.3 قوة التنافر الكهربية بين جسيمى مادة(إلكترونين) محمولة بجسيم حامل قوة (فوتون)

إن خاصية عدم امتثال الجسيمات حاملات القوة لقاعدة الإقصاء لباولى يعد من الأهمية بمكان بحيث يجعل أن هناك عدد غير محدودٍ من جسيمات القوة التى يتم تبادلها بين جسيمات المادة، ومن ثم تظهر لنا القوة العظيمة Strong) (Force . إلا أنه إذا ما كانت الجسيمات حاملات القوة لها كتل كبيرة ، سيكون من الصعب انتاجها وتبادلها على مدى مسافات طويلة ، وبالتالى فإن القوى المحمولة بهم ستكون ذات مدى قصير (Short range force) . فى حين لو كانت الجسيمات حاملات القوى ليس لها وزن، فإن القوة ستكون ذات مدى طويل (Long range force) . إن الجسيمات حاملات القوة المتبادلة بين جسيمات المادة تدعى جسيمات افتراضية (Virtual particle) ، وهى تخالف

الجسيمات الحقيقية فى أنها أى الجسيمات الافتراضية لا يمكن الكشف عنها مباشرة. هذه الجسيمات فعلا موجودة بسبب تأثيراتها المقاسة. فى بعض الحالات، فإن الجسيمات ذات اللف 0 أو 1 أو 2 توجد كجسيمات حقيقية عندما يتم الكشف عنها مباشرة. حيث تظهر لنا كما يسميها الفيزيائيون التقليديون بالموجات، مثل موجات الضوء وموجات الجاذبية.
والآن يمكننا تبويب الجسيمات حاملات القوى إلى أربعة أنواع بناءً على مدى القوة المحمولة وكذلك على الجسيمات التى تتفاعل معها.

قوة الجاذبية (F_g (Gravitational force) :

النوع الأول يدعى قوة الجاذبية (F_g (Gravitational force) ؛ هذه القوة تعتبر عامة، بحيث إن كل جسيم يحس بقوة الجاذبية بناءً على كتلته أو طاقته . هذه القوة تتصف بأنها قوة جاذبة وتعمل على مدى طويل كما تعد من أضعف القوى الأربعة قوةً. هذا يعنى أن قوة الجاذبية الضعيفة جداً بين الجسيمات المستقلة فى جسمين عظيمين مثل الأرض والشمس تتجمع، بسبب عدد الجسيمات الهائل فيهما، وتصبح قوة كبيرة. إن وجهة نظر ميكانيكا الموجات لمجال الجاذبية تتمثل فى اعتبار أن القوة بين جسيمى مادة محمولة من قبل جسيم بلف يساوى 2 ويدعى جرافيتون (Graviton) . هذا الجسيم ليس له كتلة فى ذاته ومن ثم فإن القوة التى يحملها تعتبر ذات مدى طويل. إن قوة الجاذبية بين الشمس والأرض متمثلة فى تبادل الجرافيتون بين الجسيمات التى تكون هاتين الكتلتين وهذه الجرافيتونات هى المسؤولة عن بقاء الأرض تدور حول الشمس. الجرافيتونات الحقيقية تمثل موجات الجاذبية كما يسميها الفيزيائيون الكلاسيكيون وهى من الضعف وصعوبة الكشف عنها بمكان لدرجة أنه لم يتم اكتشافها حتى الآن.

القوة الكهرومغناطيسية F_e (Electromagnatic force) :

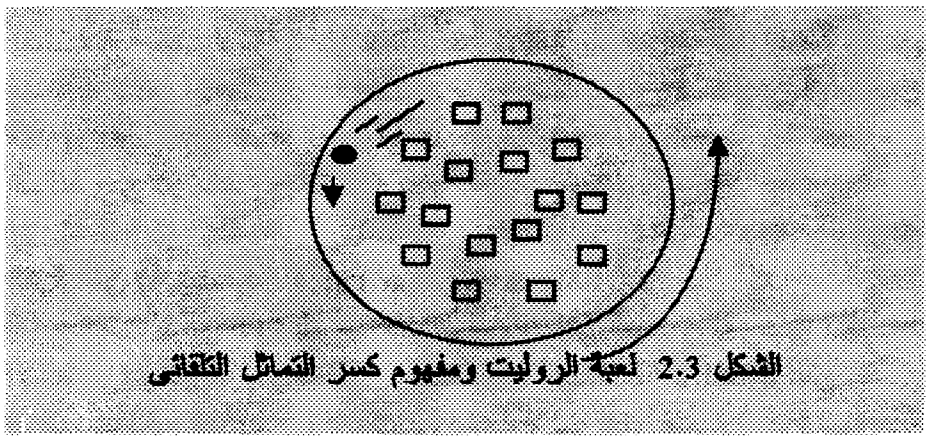
النوع الثانى هى القوة الكهرومغناطيسية F_e (Electromagnatic force) ، وهى تتفاعل مع الجسيمات المشحونة كهربائيا مثل الإلكترونات والكواركات. وهى أكثر قوة من قوة الجاذبية بحيث إن $F_e / F_g = 10^{42}$. وهناك بالطبع قوة التنافر فى حالة تساوى شحنتى الجسيمين أو قوة تجاذب فى حالة اختلاف

الشحنتين. بالنسبة للأجسام الكبيرة مثل الأرض و القمر فإنهما يحتويان على عدد متساو تقريبًا من الشحن الموجبة والسالبة، وبالتالى فإن قوى الجذب والتنافر تلغى بعضهما بعضًا وبالتالى هناك محصلة ضئيلة جداً للقوة الكهرومغناطيسية. وعلى النقيض من ذلك، على مستوى الذرات والجزئيات، فإن القوة الكهرومغناطيسية تتفوق. إن قوة الجذب الكهرومغناطيسية بين الإلكترونات سالبة الشحنة و البروتونات موجبة الشحنة داخل النواة تسبب دوران الإلكترونات حول نواة الذرة. وذلك شبيه بقوة الجذب التى تمكن من دوران القمر حول الأرض أو الأرض حول الشمس. إن القوة الكهرومغناطيسية يرجح سببها إلى تبادل لعدد كبير من جسيمات افتراضية عديمة الكتلة ذات لف يساوى 1 وتدعى فوتونات.إن الفوتونات المتبادلة هى جسيمات افتراضية، إلاّ أنه عندما يقفز إلكترون من مدار إلى مدار آخر قريب من النواة فإن قذفة طاقة تتحرر ويشع تبعا لذلك فوتون حقيقى، والذى يمكن الكشف عنه كضوء مرئى من خلال عين الإنسان لو كان له الطول الموجى المناسب لذلك. وبالمثل إذا ما اصطدم فوتون حقيقى بذرة فيمكن أن ينتقل إلكترون قريب من النواة إلى مدار أبعد وبالتالى هذا سيستنفذ طاقة الفوتون الساقط ومن ثم يُمتص.

القوة النووية الضعيفة Weak Nuclear Force :

النوع الثالث يدعى القوة النووية الضعيفة، وهى المسؤولة عن النشاط الإشعاعى، وتأثيرها يكون على الجسيمات ذات لف 1/2 ، وليس على الجسيمات ذات لف 0، 1 ، 2 مثل الفوتونات والجرافيتونات. إن القوة النووية الضعيفة لم تفهم تماما حتى سنة 1967، عندما قام العالم الباكستانى عبد السلام بكلية إمبيريال بجامعة لندن و ستيفن واينبيرغ بجامعة هارفرد بأمريكا بطرح نظريتهما التى توحد هذه القوة مع القوة الكهرومغناطيسية، مثل ما قام ماكسويل بتوحيد الكهربية والمغناطيسية منذ ما يزيد عن مائتى عام قبل ذلك. لقد إقترحا بأنه بالإضافة إلى الفوتون فهناك ثلاثة جسيمات ذات لف يساوى 1 تدعى البوزونات Bosons وهى التى تحمل القوة النووية الضعيفة. هذه الجسيمات هى W^+, W^-, Z^o كل منهم له كتلة تقارب من 100 GeV . إن نظرية عبدالسلام-واينبيرغ تمتلك خاصية تدعى كسر التماثل

التلقائي(Spontaneous symmetry breaking). هذه الخاصية تعنى أن الـــذى يبدو بأنه العديد من الجسيمات المختلفة فى طاقات منخفضة، هو فى الحقيقـــة نفس النوع من الجسيم ولكن فى حالات مختلفة (Different states) . فى مدى الطاقات العالية كل هذه الجسيمات تتصرف مثل بعضها. هـــذا يشـــابه لعبـــة الروليت Roulette (أنظر الشكل 2.3)، ففى حالة دوران الصحـــن بســـرعة عالية فإن الكرة تتصرف بطريقة وحيدة وهى الدوران بسرعة عاليـــة، وفـــى حالة انخفاض سرعة الكرة فإن الكرة ستستقر أخيرا فى إحدى الفتحات، بمعنى أنه فى مدى الطاقات المنخفضة فإن هناك عددًا من الحالات(states) ينـــاظر عدد الفتحات التى يمكن للكرة أن تتواجد فيها . أى أن لو كنا نراقب الكرة فقط فى حالات الطاقة المنخفضة لظننا أنه هناك عددًا من أنواع الكـــرات يســـاوى عدد الفتحات أى نوع 1 ، نوع 2 ، نوع3 ... الخ.



الشكل 2.3 لعبة الروليت ومفهوم كسر التماثل التلقائى

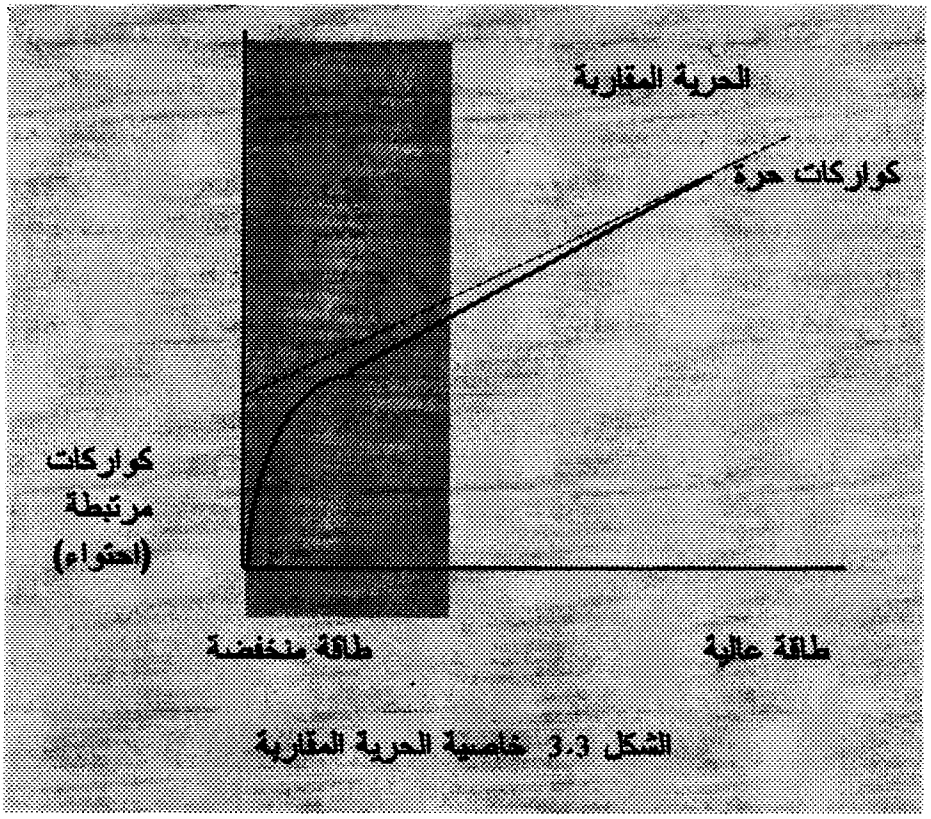
نظرية واينبيرغ-عبدالسلام توضح أيضا أنه فى حالة طاقات أعلى مـــن 100 GeV، فإن الجسيمات الثلاثة والفوتون تتصرف بنفس الطريقـــة، ولكـــن فـــى الطاقات المنخفضة التى تحدث فى معظم الحالات الطبيعية، فإن هذا التشابه أو التماثل ينكسر؛ بمعنى الجسيمات W^+, W^-, Z^o تمتلك كتل أكـــبر وبالتـــالى تجعل القوة التى تحملها تكون ذات مدى قصير جداً. فى سنة 1979 تحصل كل من عبد السلام وواينبيرغ على جائزة نوبل فى الفيزيـــاء. فـــى ســـنة 1983 بالمركز الأوروبـــى للبحـــث النـــووى European Centre for Nuclear)

(Research ; CERN تم اكتشاف الجسيمات الثقيلة الثلاثة رفاق الفوتون ، ونظير ذلك تحصل فى سنة 1984 كل من كارل روبيا قائد فريق الفيزيائيين وكذلك المهندس سايمون فان ديرميير على جائزة نوبل.

القوة النووية القوية Strong Nuclear Force :

النوع الرابع هو القوة النووية القوية المسؤولة عن ترابط الكواركات داخل البروتون والنيوترون، وأيضا المسؤولة عن ترابط البروتونات والنيوترونات معاً داخل نواة الذرة. يعتقد أن هذه القوة محمولة بجسيم له لف يساوى 1 ويدعى غرون (Gluon) ، وهى التى تتفاعل مع ذاتها أو مع الكواركات. إن القوة النووية القوية تتميز بخاصية تدعى الإحتواء (Confinement) ؛ بمعنى أن هذه القوة تربط الجسيمات معاً فى مجموعات ليس لها لون (Colour) . فمثلا لا يمكن أن نحصل على كوارك مستقل لأن له لون (أحمر، أخضر، أو أزرق)، ولكن كوارك أحمر يتحد مع كواركين آخرين أخضر وأزرق عن طريق الغرونات فينتج عن هذا الإتحاد لون أبيض للمجموعة. هذه التشكيلة كما أوردناها سالفا تكون إما بروتوناً أو نيوتروناً. تشكيلة أخرى محتملة هى إتحاد زوج من الكوارك وضديده ؛ أى أحمر+ ضديد أحمر، او أخضر + ضديد أخضر، أو أزرق + ضديد أزرق، حيث إن كل زوج ينتج لوناً أبيض. هذه التشكيلات الأخيرة تكون الجسيمات التى تدعى الميزونات (Mesons) وهى غير مستقرة لأن الكوارك وضديد الكوارك يفنيان بعضهما بعضًا منتجين إلكترونات وجسيمات أخرى. وأيضا مفهوم الإحتواء يمنع تواجد غرون مستقل بذاته لأن له هو أيضا لون ،إلا أن مجموعة من الغرونات تتواجد بحيث يكون مجموع الوانها أبيض، هذا التشكيل يكون جسيم غير مستقر يدعى قلوبول(Glueball) . إن حقيقة مفهوم الإحتواء التى تمنع كشف كوارك مستقل أو غرون مستقل قد تدعو إلىإعتبار أن الكواركات والغرونات تعتبر من الميتافيزيقيات، ولكن هناك خاصية أخرى للقوة النووية القوية تدعى الحرية المقاربة (Asymptotic Freedom) ، التى تجعل من الكواركات والغرونات معرفة تماماً ، حيث إن فى مدى الطاقات الإعتيادية تكون القوة النووية القوية فعلا قوية ومن ثم فتربط الكواركات بشدة ، وفى الطاقات العالية جدا تولد نوعا ما حرية للكواركات (أنظر الشكل التالى)، حيث إن التجارب فى

المعجلات الكبيرة أوضحت أنه عند الطاقات العالية فإن القوة القوية تضحى أضعف كثيراً ، وبالتالى فالكواركات والغرونات تتصرف وكأنها تقريبا جسيمات حرة ففى تصادم بين بروتون بطاقة عالية وضديد البروتون تولد عنه العديد من الكواركات الحرة نوعا ما.



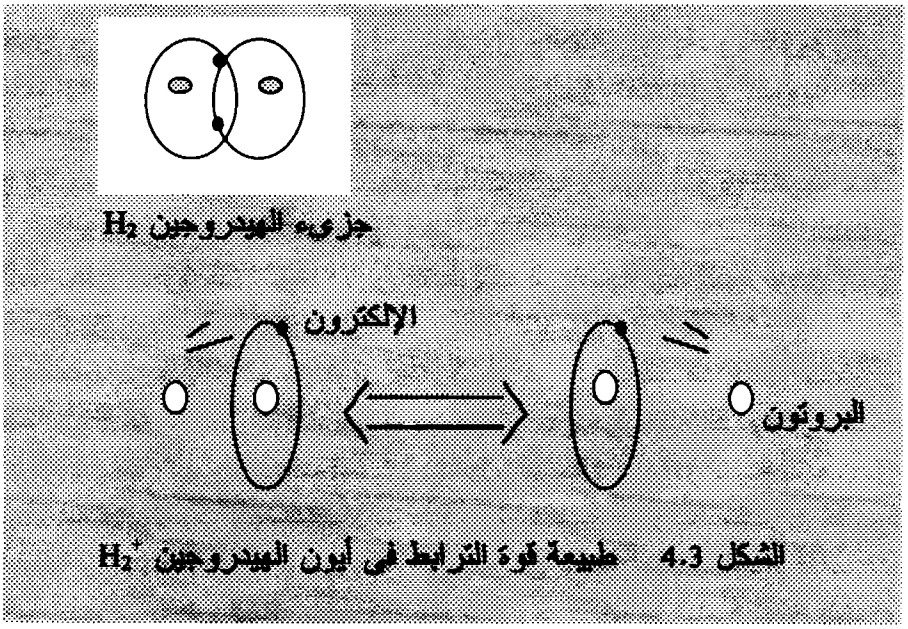
الشكل 3.3 خاصية الحرية المقاربة

3-2 نظرية الميزونات Mesons Theory :

إن نظرية الميزونات ظهرت لأجل فهم القوة الموجودة داخل النواة. هذا وتجدر الإشارة هنا أن قوة الجاذبية(لاحظ أن الجرافيتون مسؤول على قوة التجاذب بين الكواكب السيّارة) بين الجسيمات المشحونة ضئيلة يمكن تجاهلها

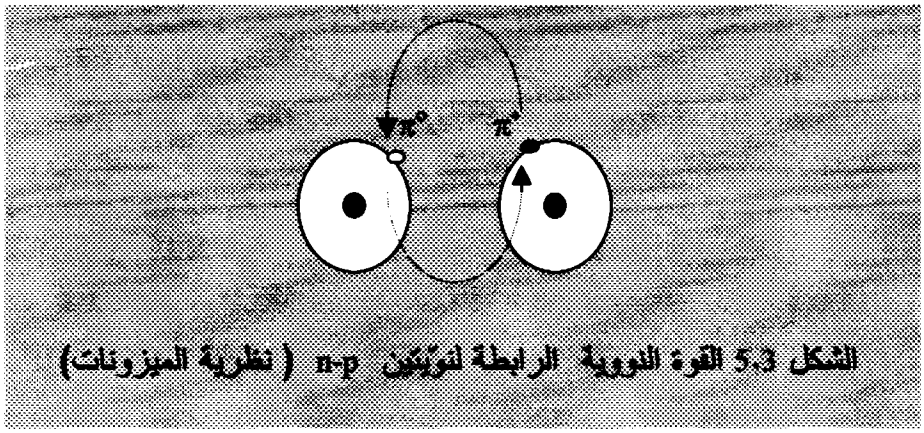
وذلك مقارنة بالقوة الكهرومغناطيسية، وهذه الأخيرة تعد ضئيلة مقارنة بـــالقو النووية الرابطة للنوّيات داخل نواة الذرة.

فى سنة 1935 ظهرعالم يابانى يدعى يوكاوا Yukawa بمحاولة لتفسير القو النووية القصيرة المدى بين النوّيات، اقترح هذا العالم بأن القوة النوويـــة هـــ ذات طبيعة تبادلية مثلها مثل تلك الطبيعة الترابطية لجزىء أيون الـــهيدروجين H_2^+، أنظر الشكل التالى ، حيث إن الإلكترونات تُبدل مواقعـــها مـــن حـــول البروتونـــات.، وبالتـــالى ظـــهر مصطلـــح القـــوة النوويـــة التبادليـــ Exchanged Nuclear Force .



الشكل 4.3 طبيعة قوة الترابط فى أيون الهيدروجين H_2^+

لذا فإن النظرية تقترح بأن البروتون والنيوترون متكونان من قلـــب متمـــاث ويتميزان فقط من خلال ميزونات ، حيث إن قلب البروتون يـــدور حولـــ ميزون موجب π^+ ، فى حين أن قلب النيوترون يدور حوله مـــيزون متعـــاد π^o، وحتى يتم الترابط يحدث تبادل المواقع للميزونين انظر الشكل 5.3 .



الشكل 5.3 القوة النووية الرابطة لنوكليون n-p (نظرية الميزونات)

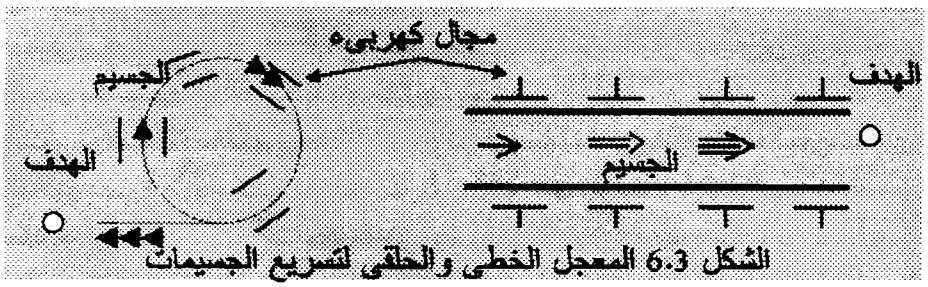
لذلك فقد تنبأ يوكاوا بوجود جسيمات حاملة قوة تدعى الميزونات ولـــها كتلـــة سكون Rest mass تتراوح بين كتلة الإلكترون والكتلة النووية، والنظرية التـــى استحدثها باستخدام هذه الميزونات تدعى نظرية الميزونات للقوى النووية. لقـد تم بعد ذلك الاكتشاف المعملى لأنواع من الميزونات.

إن الطبيعة التبادلية لهذه القوة تجعلها حيناً تجاذبية وأحياناً أخرى تنافرية بنـاءً على حالة الجسيمات المتعامل معها. على الرغم من أنه ليس هنـــاك الدليـل القاطع على وجود هذه القوة، الاّ أن التحليلات الرياضية لهذه القوة تؤدى إلـــى خاصية التشبع.

فى الحقيقة وعلى الرغم من توفر عدد ضخم من المعلومـــات فـــى متنـــاول العلماء، إلاّ أنه لم يحن الوقت بعد للفهم النهائى عن حيثيـــة القـــوة الرابطـــة للنيوترونـــات والبروتونـــات فعلـــى ســـبيل المثـــال ؛ إن دراســـة التبعـــثر Scattering بسبب الجسيمات ذات طاقات منخفضة أظهرت تســـاوى القـــوة الرابطة بين $n-p \approx n-n \approx p-p$، فى حين أن التبعثر بإســـتخدام طاقـــات عالية أظهرت بعض التناقضات. وبسبب عدم وجود نظرية شاملة تفسر البنـــاء النووى للنواة الذرة، فقد اجتهد العلماء لتخيُرالعديد من النماذج النووية لتفســـير العديد من الظواهر النووية المُلاحَظة، وقد نجحت الكثير من هـــذه النمـــاذج الفيزيائية والرياضية لخدمة الأغراض التى استنتجت من أجلها.

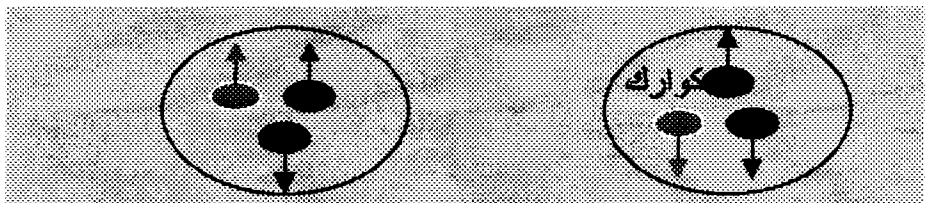
3-3 الجسيمات عالية الطاقة High Energy Particles :

لقد تم الاعتقاد وحتى أواخر الستينات بأن البروتونات والنيوترونات تعتبر جسيمات "إبتدائية" Elementary particles ولكن فى التجارب المعملية التى تم فيها تصادم البروتونات مع بروتونات أخرى أو مع إلكترونات بسرعات عالية أوضحت بأن هذه الجسيمات مكونة من جسيمات أصغر تدعى " كواركات quarks " ، حيث تمت التسمية من قبل الفيزيائى مورى قيلمان والذى تحصل على جائزة نوبل فى سنة 1969 بسبب عمله مع الكواركات. هناك عدة أنواع من الكوار كات ويعتقد بأن هناك على الأقل ست " نكهات flavors " تدعى " فوق up " و " تحت down " و " غريب strange " و " فاتن charmed " و " أسفل bottom " و " علوى top " ، كما أن كل نكهة تأتى بثلاث " الوان colors " وهى؛ " أحمر red " و "أخضر green " و " أزرق blue " . يجب أن ينتبه إلى أن هذه تسميات فقط حيث إن الكواركات صغيرة مقارنة بالطول الموجى للضوء المنظور وبالتالى ليس لها اللون بالمفهوم المعتاد لنا ، إن الفيزيائين الجدد يبدو أنهم لم يحصروا أنفسهم بإستخدام التسميات الإغريقية وأنتقلوا إلى التسميات باللغة الإنجليزية. إن الأجهزة التى تجرى فيها التجارب على الجسيمات عالية السرعة تسمى المعجلات accelerators ، وهى تعد مجاهر حديثة للرؤية التحت-ذرية حيث بها يمكن سبر أغوار النويات ذاتها للكشف عن ماهيتها. هناك المعجلات الخطية والمجلات الحلقية (معجل فيرمى الحلقى يبلغ قطره حوالى 2 كيلومتر ويوجد تحت الأرض بست أمتار)، حيث إن الجسيم يدخل المعجل بسرعة ما وخلال رحلته يمر بتعجيل فتزداد سرعته ويستقبل بالسرعة المطلوبة عند مخرج المعجل، الشكل 6.3 يبين رسما توضيحيا للنوعين من المعجلات.



الشكل 6.3 المعجل الخطى والحلقى لتسريع الجسيمات

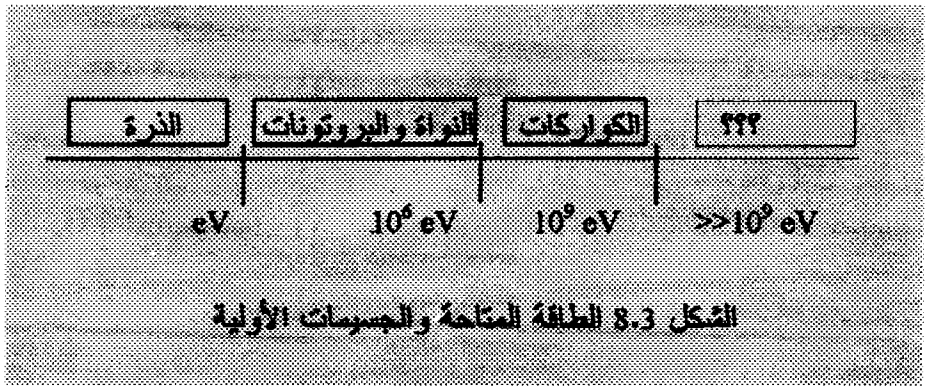
إن البروتون أو النيوترون مكون من ثلاثة كواركات أنظرالشكل 7.3 ؛ كل منهم له لون، فالبروتون يحوى اثنين من الكواركات "الفوقية" وواحد " تحتى"، كما أن النيوترون يحوى اثنين من الكواركات "التحتية" وواحد "فوقي"، . جسيمات أخرى يمكن تركيبها باستخدام النكهات الأخرى؛ غريب ، فاتن، علوى، سفلى ، ولكن هذه لها كتل أكبر ومن ثم تنحل بسرعة إلى بروتونات ونيوترونات.



الشكل 7.3 تركيب النيوترون والبروتون من الكواركات الملونة

لقد وصلنا إلى معرفة أن حتى البروتونات والنيوترونات تتكون من جسيمات أصغر. فما هىأصغر المكونات الأساسية التى تتكون منها الأشياء؟ . نظراً لأن الطول الموجى للضوء أكبر بكثير من حجم الذرة، لذا فإنه لا يمكننا رؤية مكونات الذرة بالطريقة الاعتيادية، بمعنى أننا يمكننا الرؤية بأطوال موجية أصغر. ونظراً لأن ميكانيكا الموجات بينت لنا أن كل الجسيمات هى موجات وأنه كلما زادت طاقة الجسيم صغر الطول الموجى لموجة الجسيم. وبالتالى فالإجابة على السؤال تكمن فى مدى طاقة الجسيم المتاحة لنا، لأن ذلك سيبين لنا مدى صغر الأبعاد التى يمكننا رؤيتها. فى القرن التاسع عشر كانت الطاقة المتاحة تناظر عددا من الإلكترون–فولت eV ، مما نتج عنه الاعتقاد بأن أصغر مكونات المادة هى الذرة. مع العقد الثانى من القرن العشرين استخدم رذرفورد جسيمات الفا بطاقات ملايين إلكترون–فولت 10^6 eV . فيما بعد تم استخدام المجالات الكهرومغناطيسية وتم الحصول على طاقات فى مدى الملايين ثم البلايين إلكترون–فولت 10^9 eV . لذا لاحظنا أن الجسيمات التى ظنناها ابتدائية وجدنا أنها مكونة من جسيمات أصغر. والتى من المحتمل أن

تكون هذه بدورها مكونة من مكونات أصغر إذا ما ذهبنا إلى طاقات أعلـــى، انظر الشكل 8.3.



الشكل 8.3 الطاقة المتاحة والجسيمات الأولية

بناءً على ثنائية الجسيم–الموجة، فإن كل شيء في العالم يمكن وصفه كجسـيم وحتى الضوء والجاذبية، وهذه الجسيمات لـــها خاصيـــة اللـــف (المغزليـــة) spin والتي تم عرضها سابقا. كل الجسيمات المعروفة فـــي الكـــون يمكـــن تقسيمها إلى مجموعتين؛ جسيمات بلف ½ وهـــي التـــي تكـــون المـــادة فـــي الكون(جسيمات مادة). أما المجموعة الثانية من الجسيمات فهي(جسيمات قـوة) وهي تحمل لف 0، 1، 2 والتي تعبر عن القـــوة بيـــن جســـيمات المـــادة. إن جسيمات المادة تـــمثل لمبدأ الإقصاء لباولي ، والذي يفيد كما ذكرنا سابقا بأنه لا يمكن لجسيمين متشابهين أن يحتلا نفس الحالة (state) ؛ أي أنه لا يمكن أن يكون لكليهما نفس الموقع ونفس السرعة في حدود قانون اللا تأكدية. إن مبدأ الإقصاء يعد أساسًا، لأنه يشرح لماذا لا تتحطم جسيمات المادة إلى حالة كثافة عالية جداً تحت تأثير القوى المنتجة بسبب جسيمات القـــوة التـــي لـــها لـــف 0 ، 1،2 ؛ أي أن إذا كان لجسيمات المادة نفس الموقع سيكون لهما ســـرعات مختلفة ومن ثم فلن يبقيا في نفس الموقع لمدة طويلة. في حال عدم صلاحيـــة قاعدة الإقصاء فإن الكواركات لا يمكنها أن تكون البروتونات والنيوترونـــلت، ولا هذين مع الإلكترونات أمكنهما تكوين ذرات محددة منفصلة. بل لتحطمـــت الأشياء إلى نوع ما من الرغوة الكثيفة . إن الفهم الصحيح للإلكترون وكذلـــك للجسيمات التي تحمل لف 1/2 حان سنة 1928 عندما تقـــدم بـــول ديـــراك

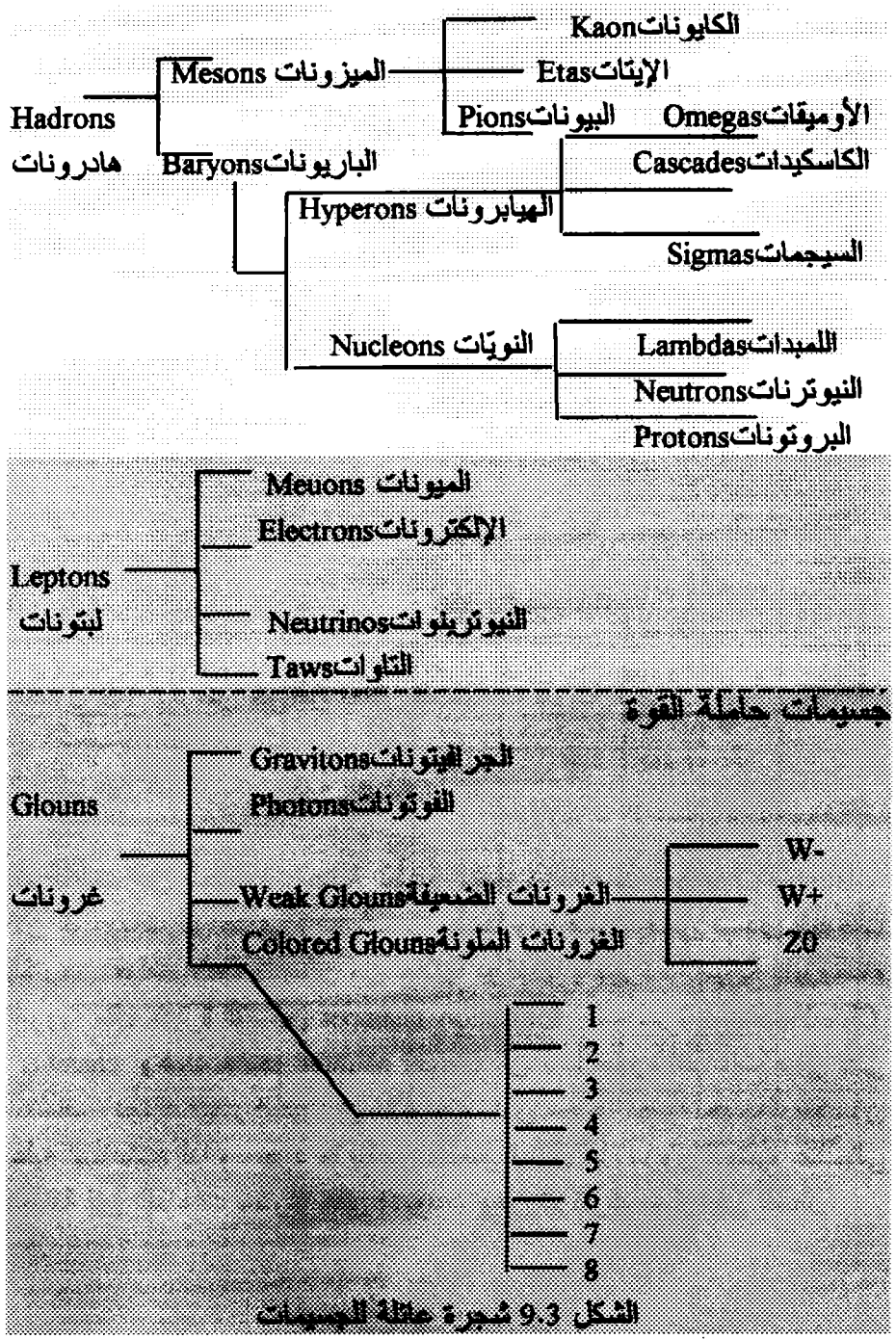
بنظريته والتى كانت الأولى من نوعها التى وفقت بين ميكانيكا الموجات ونظرية النسبية الخاصة. لقد أوضحت النظرية رياضيا لماذا الإلكترون له لف 1/2 ؛ لماذا لا يرى الإلكترون بنفس الشكل إلا بعد دورتين .

أيضا تنبأت النظرية بأن الإلكترون له رفيقه وهو ضديد الإلكترون ويدعى البوزيترون positron . إن اكتشاف البوزيترون سنة 1932 أكد نظرية ديراك وبالتالى تحصل على جائزة نوبل بدوره سنة 1933 . ألآن نعلم بأن لكل جسيم ضديده (antiparticle) ، وكلاهما يتسمان بخاصية التلاشى annihilate عندما يلتقيان .

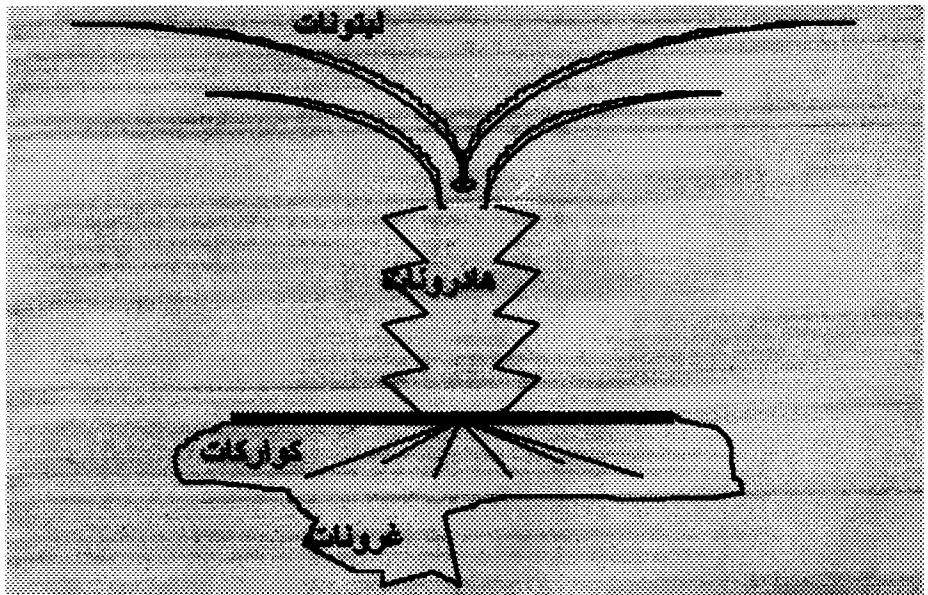
إن التفاعلات النووية التى تحدث فى غرفة التأين و المعجلات والأشعة الكونية بينت بأن هناك العديد من الجسيمات ، التقسيم التالىفى الشكل 9.3 يلخص شجرة العائلة للجسيمات عالية الطاقة والتى أعمارها طويلة ($\tau \sim 10^{-23}$ sec) .

فىالشكل 9.3 يوضح تصنيف الجسيمات إلى ثلاثة تصنيفات رئيسة هى الهادرونات واللبتونات والغرونات. يلاحظ أن الغرونات Glouns هى عبارة عن جسيمات حاملة القوة وهى الجرافيتون Graviton المسؤول على قوة الجاذبية، والفوتون Photon المسؤول على القوة الكهرومغناطيسية، ومجموعة الغرونات الضعيفة المسؤولة على التفاعلات النووية الضعيفة(القوة النووية الضعيفة)، وأخيرا، الغرونات الملونة Coloured Glouns المسؤولة على التفاعلات النووية القوية (القوة النووية القوية).

هذا وأن أقل بنية أساسية هى الكواركات. لذا يمكن تشبيه شجرة العائلة للجسيمات بالشكل 10.3، حيث يمثل جريد النخلة اللبتونات، وجذعها الهادرونات، وجذورها الكواركات(الأصل)، فى حين تمثل التربة الغرونات (الجسيمات اللاصقة أو المثبتة).



الشكل 9.3 شجرة عائلة الجسيمات



الشكل 10.3 شجرة الجسيمات

الجدول 1.3 يعرض خواص بعض الجسيمات طويلة العمر.

الكشف عن الجسيمات عالية الطاقة :

يتم الكشف عن الجسيمات عالية الطاقة بحجرة الفقاعات Bubble Chamber ، لأن الجسيمات تتواجد فى زمن قصير جدا وبطاقات فى مدى الجيجا إلكترون-فولت GeV لا يمكن من خلالها دراستها بأجهزة كلاسيكية للفيزياء النووية مثل حجرة التأين Ionization chamber وحجرة السحابةCloud chamber وعداد جايجر Geiger counter .إن مبدأ حجرة الفقاعات مبنى على اكتشاف دونالد قليسر؛ حيث إن الأيونات تكوّن سطحا أجنبيًا بحيث تتكون عليه الفقاعات. لذا وبمجرد ما ينقص ضغط السائل قبل مرور الجسيم عالى الطاقة فإن الفقاعات ستتولد على الأيونات ومن ثم تترك مساراً فى السائل.

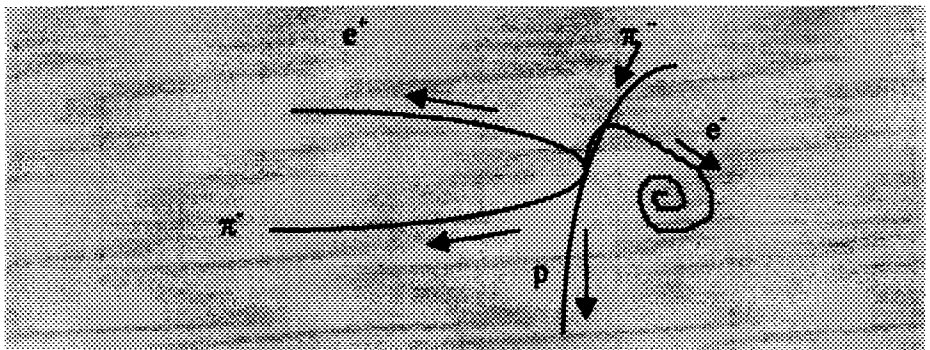
الجدول 1.3 خواص الجسيمات طويلة العمر

الجسيم Particle	الرمز Symbol	الكتلة Mass MeV	الشحنة Charge state 4.803×10^{-10} esu	المغزلية Spin $\hbar$	الغرابة Strangeness	العمر life time sec	نواتج الإنحلال Decay product
جرافيتون	g	0	0	2	0	∞	مستقـــر
فوتون	γ	0	0	1	0	∞	مستقـــر
النيوترينو	ν_e $\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	0	∞	مستقـــر
	ν_μ $\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	0	∞	مستقـــر
إلكترون	e^+ e^-	0.511	+1 −1	1/2	0	∞	مستقـــر
ميون	μ^+ μ^-	105.66	+1 −1	1/2	0	2.2×10^{-6}	$\nu\,\varepsilon\,\nu$
البايون	π^+ π^-	139.57	+1 −1	0	0	2.6×10^{-8}	$\mu\nu$
	π°	134.96	0	0	0	0.8×10^{16}	2γ
كايون	K^+ K^-	493.67	+1 −1	0	+1 −1	1.2×10^{-8}	$\pi^+\mu\nu$, $\pi\pi^\circ$, $\pi^+\pi^-$
	K° $\bar{K}^\circ$	497.67	0	0	+1 −1	0.9×10^{-10}	$2\pi^\circ$, $3\pi^\circ$, , $\pi^-\pi$
إيتـا	η	548.8	0	0	0	2.5×10^{10}	
البروتون	p $\bar{p}$	938.28	+1 −1	1/2	0	∞	مستقـــر
النيوترون	n $\bar{n}$	939.57	0	1/2	0	918	مستقـــر
لامبدا	$\wedge$ $\bar{\wedge}$	1115.6		1/2	+1 −1	2.6×10^{-10}	$\pi\,\pi$, $\nu\,\pi^\circ$
سيجما	Σ^+ $\bar{\Sigma}^+$	1189.4	+1 −1	1/2	−1 +1	0.8×10^{-10}	$\pi\,\pi^\circ$, $\nu\,\pi^+$
	Σ° $\bar{\Sigma}^\circ$	1192.5	0	1/2	−1 +1	5.8×10^{-20}	$\wedge$ γ
	Σ^- $\bar{\Sigma}^-$	1197.4	−1 +1	1/2	−1 +1	1.5×10^{-10}	$\nu\,\pi^\pm$

طويلة العمر تعنى أن العمر أكبر من 10^{-23} ثانية

كتلة الإلكترون 9.1×10^{-31} كجم

الشكل 11.3 يوضح رسما توضيحيًا لتفاعل بين بايون سالب π^- وبروتـــون p والذى هو مبدئيا فى سكون وذلك حسب مسارات سجلت بحجرة الفقاعات.



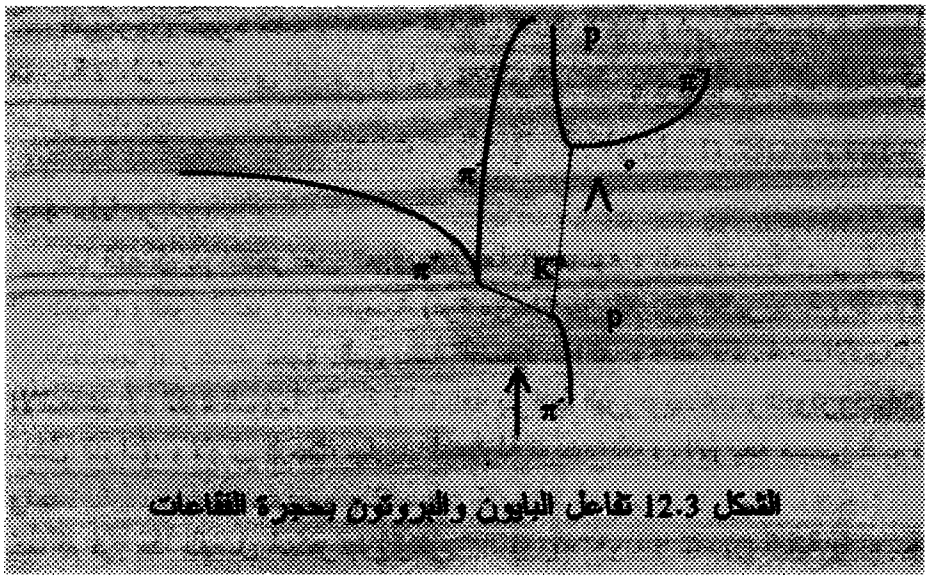
الشكل 11.3 تفاعل البايون والبروتون فى حجرة الفقاعات

نلاحظ أن نتيجة التصادم تكون بايونا متعادلا والذى بدوره إنحل فوريـــاً إلـــى زوج بوزيترون -إلكترون . إن البايون المتعادل والفوتونين النـــاتجين فـــى مرحلة لاحقة لا تترك مسارات بالحجرة.

مثل آخر للكشف عن الجسيمات فى حجرة الفقاعات تمثل التفاعل التالى:

$$\pi^- + p \rightarrow K^\circ + \Lambda^\circ$$
$$\Lambda^\circ \rightarrow p + \pi^-$$
$$K^\circ \rightarrow \pi^- + \pi^+$$

فيما يلي الشكل 12.3 يوضح مسارات الجســـيمات المـــأخوذة عـــن حجـــرة الفقاعات:



الشكل 12.3 تفاعل البايون والبروتون بحجرة الفقاعات

هذا وقد أجريت تفاعلات نووية بين البروتون وضديد البروتون بسرعات عالية حيث كان المنتوج مجموعة من كواركات حرة تقريبا .

نظراً لأن الجسيمات تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء ، ومن ثم يمكن حساب العمر من خلال حساب المسار شريطة أن يسجل كل المسار بحجرة الفقاعات.

مثال 1.3

احسب المسافة المقطوعة للجسيمات n و Σ^- و π° ، على إفتراض أن متوسط العمر t هو 10^{3} ثانية و10^{-10} ثانية و 10^{-16} ثانية وذلك على التوالى.

الحل :

باعتبار أن سرعة الضوء هى $c = 3x10^{8}$ m/sec فإن المسافة هى $d = c \cdot t$ ، ومن ثم فإن $d_n = 3x10^{11}$ m و $d_\Sigma = 3$ cm و $d_\pi = 30 \times 10^{-9}$ m.

لاحظ أن المسافة التى يمكن حصرها بحجرة الفقاعات هى d_{Σ} ، فى حين أن تلك للنيوترون كبيرة جدا، وبالنسبة للبايون صغيرة جداً وهى صغيرة جدا مقارنة بالطول الموجى للضوء، لذا لا يمكن حساب عمر البايون عن طريق حجرة الفقاعات.

4-3 ملخص :

فى هذا الفصل تم استعراض القوى الأربعة الأساسية ، المتمثلة فى قوة الجاذبية ، والقوة الكهرومغناطيسية (قوة موحدة بين القوة الكهربية والقوة المغناطيسية)، وكذلك القوة النووية الضعيفة(القوة المتعلقة بالانحلال الإشعاعى) والقوة النووية القوية (المتعلقة بترابط البروتونات والنيوترونات داخل النواة). ولازال البحث جاريا لمحاولة توحيد القوى الأربعة فى قوة واحدة.

كما تم فى هذا الفصل استعراض نظرية الميزونات وذلك لتفسير كيفية طبيعة القوة النووية التبادلية (القوة النووية القوية) التى تربط بين النيوترونات و البروتونات فى النواة.

أيضاً، تم التوضيح فى هذا الفصل أنه ربما لن تكون النيوترونات والبروتونات والإلكترونات هى الجسيمات الوحيدة الدقيقة المكونة للذرة، بل إن الكواركات تبدو أنها المكونات الاساسية للبروتونات و النيوترونات .إذا هناك العديد من الجسيمات الموجودة والتى تم تصنيفها تحت مسميات أساسية تشمل اللبتونات، والهادرونات، و الكواركات، وكذلك الغرونات.

5-3 مسائل :

1.3 – احسب المسافة المقطوعة للجسيمات الواردة بالجدول 1.3 ، وبين أيهم يمكن الكشف عنه باستخدام حجرة الفقاعات.

2.3 – الجرافيتون له علاقة فى تجاذب الكواكب كما أنه حسب الجدول 1.3 يعتبر مستقرًا، ماذا يحدث لو قدر الله سبحانه وتعالى أن ينحل هذا الجسيم؟

3.3 – تحدث عن مفهوم كسر التماثل التلقائي وخاصية الحرية المقاربة.

الفصل الرابع

نماذج البناء النووى
Models of Nuclear Structure

4-1 طاقة الترابط النووية واستقرارية النوى.
4-2 نموذج قطرة السائل (طاقة الترابط).
4-3 نموذج الأغلفة (خريطة البناء النويّاتى).
4-4 ملخص.
4-5 مسائل.

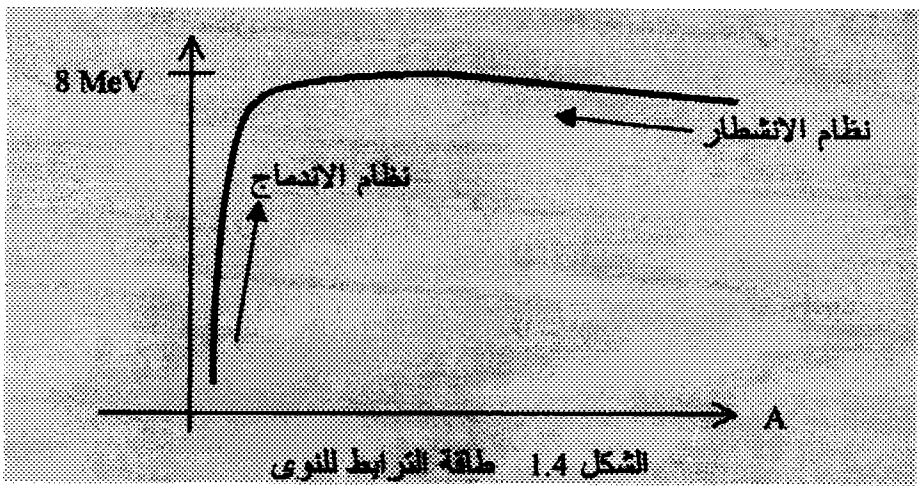
1-4 طاقة الترابط النووية واستقرارية النوى
: Nuclear Binding Energy and Stability of Nuclei

إن فهم طبيعة القوة النووية يتم من خلال الدراسة بأسلوبين:

1- دراسة التفاعل بين نويّتين لاستخلاص ماهية القوة النووية الرابطة
2- أو دراسة مجموعة من النوى والتى من خلالها نسعى لفهم طبيعة الترابط والتفاعل.

من خلال هاتين الدراستين استنتج العديد من النماذج للنواة يهدف كل منها لغرض معين.

الشكل 1.4 يوضح طاقة الترابط لكل نويّة B.E./ nucleon كدالة فى عدد الكتلة A . من الشكل، نلاحظ أن متوسط طاقة الترابط لكل نويّة فى النوى يبدو تقريبا ثابتًا لكل النوى فيما عدا النوى الخفيفة. بمعنى أن طاقة الترابط الكلية تتناسب طرديا مع عدد نويّات النواة ($y = c\,x$ ⟵ $dy/dx = c$).



الشكل 1.4 طاقة الترابط للنوى

إضافة لذلك فإن أعلى قيمة لمعدل طاقة الترابط لكل نويّة للنوى الموجودة فى منتصف المنحنى تدل على أعلى استقرارية لهذه النوى. ومن ثم نرى أن اندماج النوى الخفيفة الموجودة فى يسار المنحنى يؤدى إلى إنتاج نوى أكثر

استقرارًا وينتج عن ذلك أيضا طاقة (طاقة الاندماج النووى)، فى حيـــن أن انشطار النوى الثقيلة الموجودة فى يمين المنحنى يؤدى ذلك إلى إنتاج نـــوى أكثر استقرارًا مع تحرير طاقة (طاقة الانشطار النووى). كما أننا نلاحظ أن درجة ميل المنحنى فى الجهة اليسرى أكثر حدة من نظيرتها فى الجهة اليمنى وبالتالى فإن الطاقة المحررة بسبب الاندماج تكون أعظم من تلـك المحـررة بسبب الانشطار. ونلاحظ أن هذا المنحنى هو أساس كل من تقنية مفـاعلات الإنشطار النووية بنوعيها الحرارى والسريع المتوزعة فى أنحاء المعمـورة، وكذلك أساس لتقنيـة مفـاعلات الاندمـاج النوويـة التجريبيـة التوكمـاك (Tokamak) .

القوة النووية ذات المدى القصير وخاصية التشبع
: Short Range Nuclear Force and Saturation Property

إذا كانت كل نوّية تتفاعل مع النوّيات الأخريات فى النواة، فإن طاقة الـترابط ستتناسب مع عدد الأزواج المتفاعلة. وحيـث إن أى نوّيـة سـتتفاعل مـع A-1 من النوى ، فإن عدد الأزواج المتفاعلة A(A-1)/2 ، وبالتالى فإن طاقـة الترابط ستتناسب مع هذا العدد. الشكل 2.4 يوضح عدد الأزواج المتفاعلة.

الشكل 2.4 عدد الأزواج المتفاعلة

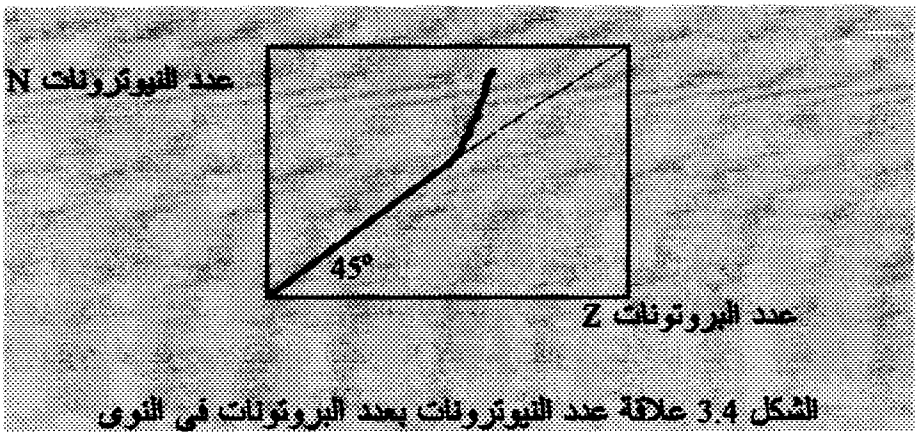
بخصوص النوى الثقيلة، فإن A يمكن تجاهلها مقارنة بـ A^2 ،أى؛ $B.E. \propto A^2$ ، وهذا يناقض ما أثبتته التجارب من أن $B.E. \propto A$. ولتجنب هذه الصعوبـة، يستلزم افتراض أن النوّية لا تتفاعل مع كل النوى، أى أن؛ قوة الترابط هـى ذات مدى قصير. إن القوة النووية يمكـن التعبـير عنـها بـترابط قطبـى

Homo-polar شبيه بالهيدروجين، بمعنى أنه هناك تجاذبًا قويًا بين ذرتى هيدروجين لتكوين جزىء H_2 ، ولكن ذرة ثالثة لا يمكن أن ترتبط بقوة للجزىء. فى هذه الحالة يقال بأن جزىء الهيدروجين متشبع. وبالتالى مجموعة من ذرات الهيدروجين مثل تلك الموجودة فى قطرة هيدروجين سائل لها طاقة ترابط تتناسب تقريبا مع عدد جزئيات الهيدروجين ومن ثم فهى تتناسب تقريبا مع عدد ذرات الهيدروجين الموجودة. لهذا فإن طاقة الترابط بين نوّيتين ستتضاءل بسرعة كلما تباعدت النوّيتان. أى أن النوّية تتفاعل مع النوّيات المجاورة وليس مع تلك البعيدة. لذا فإن مدى هذه القوة النووية r يجب أن يكون أصغر من نصف القطر R لأى من النوى ما عدا النوى الخفيفة.

على نقيض ذلك فإن القوة الكولومية Coulomb Force تعتبر قوة ذات مدى بعيد وهى تعد ضئيلة ، فباعتبار أن الطاقة الكولومية $E_c=e^2/4\pi\varepsilon_o r$ وأن المسافة بين بروتونين هى $3x10^{-13}$ cm فإن $E_c \sim 0.5$ MeV وهى صغيرة بالنسبة لـ 8 MeV (طاقة الترابط لكل نوّية ، الشكل 1.4). إن القوة الكولومية تكتسب أهمية أكثر بالنسبة للنوى الثقيلة حيث إن القوة النووية متشبعة ، فى حين أن القوة الكولومية غير ذلك فهى تتناسب مع عدد أزواج البروتونات بالنواة ، كما أن نسبة الطاقة الكولومية إلى تلك النووية E_c/E_N تتناسب طرديا مع $A^{2/3}$. وكنتيجة لذلك فإن زيادة أهمية القوة الكولومية للنوى ذات عدد كتلة A كبير تجعل طاقة الترابط لكل نوّية تتناقص نسبيا ، وهذا ما ينعكس فى انحدار المنحنى فى الجهة اليمنى لشكل 1.4 .

الاستقرار النووى والقوى بين النويّات
: Nuclear Stability and Forces among Nucleons

بالنسبة للنوى الخفيفة فإن $A \sim 2Z$ ، ولكن بالنسبة للنوى الأثقل فإن A تزداد أسرع من 2Z ، ومن ثم فإنه بالنسبة للنوى الخفيفة فإن عدد البروتونات يساوى عدد النيوترونات، ولكن بالنسبة للنوى الثقيلة فإن عدد النيوترونات يزداد أسرع مقارنة بعدد البروتونات. الشكل 3.4 يوضح هذه الظاهرة.



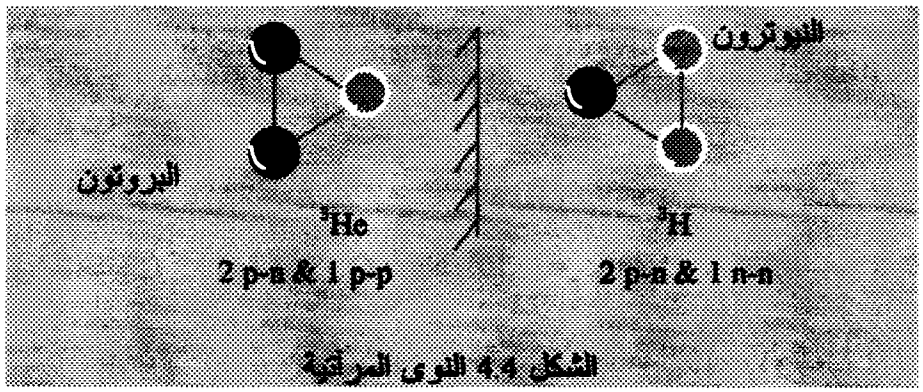
الشكل 3.4 علاقة عدد النيوترونات بعدد البروتونات في النوى

إن تساوى عدد البروتونات بعدد النيوترونات فى النوى الخفيفة يعنـــى بـــأن هناك قوة جذب قوية بين النيوترون والبروتون، لذا يمكن أن يقترح بأن هنـلك قوة متساوية بين النيوترون والنيوترون n-n وكذلك بين البروتون والـبروتون p-p بغض النظر عن قوة كولوم الإلكتروستاتيكية بين البروتونين. فلو كانت n-n أكبر من n-p أو n-n أكبر منp-p لكان هناك عدد أكثر من النيوترونات فى النوى الخفيفة المستقرة بدلا مـــن تســاوى عــدد النيوترونــات وعــدد البروتونات. كما أنه لا يمكن أن تكون p-p أكبر من n-p أو من n-n لأنه فى تلك الحالة سنجد فى النوى الخفيفة أن عدد البروتونات يفوق عدد النيوترونات بدلا من تساويهما. كما أن وجود القــوة يفســر مــن خــلال زيــادة عــدد النيوترونات كلما زاد عدد البروتونات ، وذلك ما يعرضه المنحنى فى الجهــة اليمنى من الشكل 3.4 . كلما زادت القوة الكولوميـــة تــزداد نســبة عــدد النيوترونات إلى البروتونات من 1 إلى حوالى 1.6 بالنسبة لليورانيــوم Z=92 . هذه الزيادة فُسرت على أنها زيادة ضرورية فى القوة النووية الكلية اللازمة للتغلب على قوة التنافر الكولومية. لذلك يمكن أن نفـــترض بالنســبة لقــوة الترابط بين النوّيات مايلى:

$$n - p \approx n - n \approx p - p \quad - 1$$

$$n\text{-}p >> n\text{-}n \; ; \; n\text{-}p >> p\text{-}p \; ; \; n\text{-}n \sim p\text{-}p \quad - 2$$

فى الافتراض الثانى قوة الترابط بين n-p محبذة على غيرها من القوى بسبب تساوى عدد النيوترونات والبروتونات فى النوى الخفيفة. الإفـــتراض الأول يسمى بالقوة النووية المستقلة عن الشحنةCharge independence of nuclear forces ، فى حين أن الافتراض الثانى يسمى بـــالقوة النوويـــة ذات تمـــاثل الشحنة Charge symmetry of nuclear forces . فيما يلى مناقشة للاســتدلال على الافتراض الأول وهو تساوى قوة الترابط بين نوّيات النـــواة، بمعنـــى؛ n-p ~ n-n ~ p-p . ففى المتكاتلات Isobars وهى النويات المتساوية فى عـــدد الكتلة A مثل ^3H و ^3He واللتان تسميان بـــالنوى المرآتيـــة Mirror nuclei أنظر الشكل 4.4 .



الشكل 4.4 النوى المرآتية

إن طاقة الترابط يمكن حسابها من الآتى:

$$B.E. = (Z\, m_p + (A-Z)\, m_n - M) [\text{amu}] \times 931 [\text{MeV/amu}] \quad (1.4)$$

حيث إن m_p كتلة البروتون و m_n كتلة النيوترون و M كتلة النواة المعنيـــة، وبالتالى فإن طاقة الترابط للتريتيوم تساوى 8.482 MeV ، وطاقـــة الـــترابط للهليوم تساوى 7.711 MeV .الفرق يساوى 0.771 MeV وهو له علاقة بقـــوة التنافر الكولومية لـــ p-p فى نواة الهيليوم.

مثال 1.4

باستخدام المعادلة $E_c = \frac{3Z(Z-1)e^2}{5R}$ للتعبير عن الطاقة الكولومية الكلية وباعتبار أن الشحنة تساوى $4.8x10^{-10}$ esu ، إثبت أن الفارق بين طاقتى الترابط التريتيوم والهيليوم هى بسبب طاقة التنافر الكولومية فى نواة الهيليوم.

الحل :

نظرا لأن الفارق بين طاقتى الترابط التريتيوم والهيليوم يساوى 0.771 MeV ، فنساوى ذلك للطاقة الكولومية، حيث إن Z للهيليوم تساوى 2، أى أن:

$$0.771[\text{MeV}]x1.6x10^{-6}\ [\text{erg/MeV}]=(6/5)x(4.8x10^{-10})^2\ [\text{esu}]^2/R$$

$$R= 2.24124x10^{-13}\ \text{cm} \sim 10^{-13}\ \text{cm}$$

أو باستخدام المعادلة الاعتيادية بين شحنتى البروتونين لحساب الطاقة الكولومية:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{R}$$

وباستخدام $e=1.6x10^{-19}$ C و $1/4\pi\varepsilon_o = 9x10^9\ Nm^2/C^2$ ، يمكننا حساب R :

$$.771\ \text{MeV}x1.6x10^{-13}\ \text{joule/MeV}=9x10^9\ Nm^2/C^2 x\ (1.6x10^{-19})^2 C^2/R$$

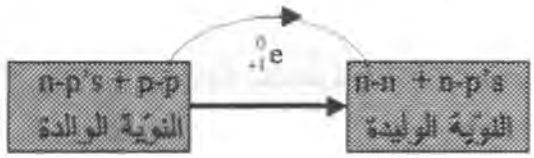
$$R =1.87\ x10^{-15}\ m\sim 10^{-13}\ cm$$

وهذا يعتبر نصف قطر مناسب للنوى الخفيفة مثل الهيليوم.

كما يمكننا الاستدلال على تساوى $n-p \approx n-n \approx p-p$ من خلال دراسة النوى المرآتية (مشعات البوزيترونات) ، حيث إن الأمهات Parents تزيد ببروتون عن الوليدات Daughters كما أن الوليدات تزيد بنيوترون عن الأمهات. إن مشعات البوزيترون هى ${}^{A}_{Z}X$ ، حيث إن A=2Z-1 ، ومعادلة التحول هى:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z-1}X + ^{0}_{+1}e \qquad (2.4)$$

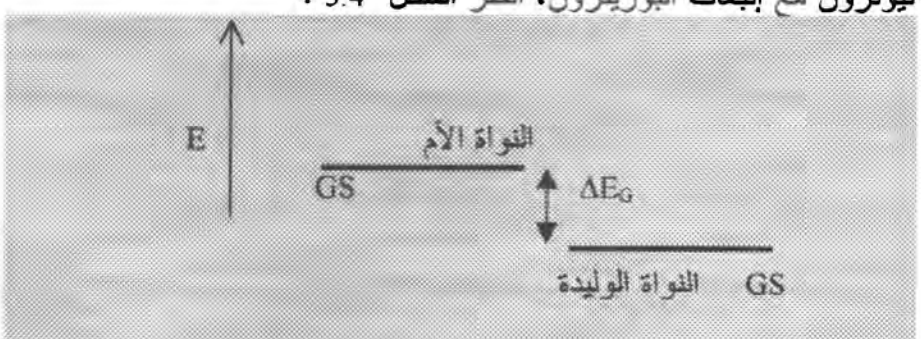
فى مثل هذه النوى تكون للأم والوليدة نفس عدد الروابط n-p ، فى حين أن الأم تكون لها رابطة p-p زيادة ورابطة n-n أقل، أى أن:



إذًا وبإفتراض تساوى رابطة n-n ورابطة p-p يمكننا حساب ΔE_G وهى الفرق بين طاقتى الحالة الأرضية Ground State Energy (GS) للنوّيتين من الآتى:

$$\Delta E_G = (\Delta E_C - \Delta m_{np})[\text{amu}]\text{x } 931[\text{MeV/amu}] \qquad (3.4)$$

بحيث إن ΔE_C تمثل الفارق بين طاقتى التنافرالكولومية للنوّيتين و $\Delta m_{np} = m_n - m_p$ تمثل الفارق بين كتلتى النيوترون والبروتون. أى أن الفرق بين مستويات الطاقة للحالتين التحتيتين يكون بسبب الرابطة فى النوّية الوالدة المسببة لتنافر كولومى إضافى وأيضاً بسبب تحول البروتون إلى نيوترون مع إنبعاث البوزيترون، أنظر الشكل 5.4 .



الشكل 5.4 الفرق بين مستوىّ الطاقة الأرضية للنوى المرآتية

وبالتعويض بالقيم المناسبة فى المعادلة (3.4) وكذلك باعتبار أن نصفى قطر نويتىّ الأم والوليدة متساويان لأن A متساوية ومن ثم فإن $R=1.42A^{1/3} \times 10^{-13}$ cm ، نتحصل على المعادلة التالية:

$$\Delta E_G = \frac{1.22(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - 0.78 \quad MeV \qquad (4.4)$$

حيث إن A, Z للنواة الأم .إن ΔE_G المحسوبة والمقاسة معمليا متقاربتان، كما أن دراسة الفارق بين مستويات الطاقة الأرضية لمتكاتلات أخريات أظهرت تساوى الروابط $n-p \approx n-n \approx p-p$.

مثال 2.4

إذا علمت بأن الفارق المقاس معمليا بين المستوى الأرضى للطاقة لكل من السيليكون والألومنيوم هو 4.78 MeV ، احسب ذلك الفارق نظريا وقارنه بالمعملى.

الحل:

السيليكون-27 والألومنيوم-27 يعتبران متكاتلتين أو نويتن مرآتين لأن السليكون يشع بوزيترون ونيوترينو ليتحول إلى الومنيوم وذلك كما يلى:

$$^{27}_{14}Si \rightarrow ^{27}_{13}Al + \beta^{+} + \upsilon$$

بالتعويض فى المعادلة 4.4 وذلك باعتبار قيم $A=27, Z=14$ للوالدة ^{27}Si ، نجد أن:

$$\Delta E_G = \frac{1.22(13)}{27^{\frac{1}{3}}} - 0.78 \quad MeV = 4.51 MeV$$

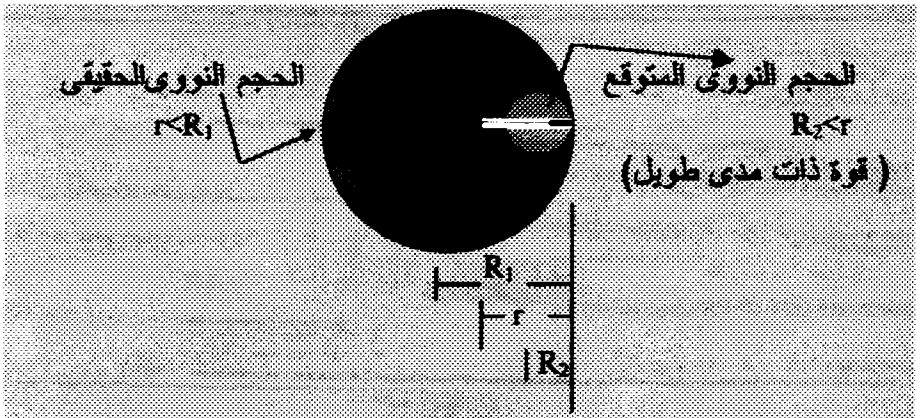
وبالتالى نجد أن هناك اختلافا بنسبة 6% فقط بين النظرى والمعملى مما يؤكد صحة افتراض تساوى الروابط $n-p \approx n-n \approx p-p$.

إن حيثية القوة النووية وخصوصا بالاستناد على دراسات التفاعل بين اثنين من الجسيمات النووية يمكننا التعبير عنها بأنها ذات صبغة تجاذبية، وذات مدى يقارب من $2x10^{-13}$ cm وتعتمد على اللف، وليست مركزية تمامًا، ولا تعتمد على نوع النوّية، كما أنها قوة غير معتمدة على الشحنة، أى أن:

$$n - p \approx n - n \approx p - p$$

معضلة التشبع Saturation Dilemma :

إن الدراسات المعتمدة على مجموعات من النوى أوضحت أن طاقة الترابط لكل نوّية تكاد تكون ثابتة كما أوردنا ذكره فيما سبق، وكذلك فإن نصف القطر يتناسب مع $A^{1/3}$ ، والذى يعنى بدوره أن حجم النواة يتناسب مع A ، ومن ثم نستنتج أن القوة النووية ذات خاصية تشبعية، تماما كخاصية التشبع التى يتصف بها جزىء الهيدروجين الذى نوهنا عنه سابقا. إلاّ أنه قد تبين بأن لو كانت القوة النووية تجاذبية، وذات مدى قصير، لا يمكن أن تكون لها خاصية التشبع المستنتجة من قبل طاقة الترابط وكذلك من قبل أنصاف أقطار النوى. إن الدراسة المستندة على طاقات الوضع والحركة للنوى كدالة فى نصف القطر أظهرت بأنه تحت ظروف قوة جذب نقية فإن النواة تكون مستقرة فقط إذا كان نصف القطر R حوالى نصف مدى تلك القوة r ، أى أن $R \approx (1/2)\, r$. هذا يعنى أن طاقة الترابط تتناسب مع A^2 ؛ بمعنى أن كل نوّية تتفاعل مع نوّيات أخرى ليست بالضرورة مجاورة لها، وهذا يناقض الحقيقة بأن طاقة الترابط تتناسب مع A ، كما أن تناسب طاقة الترابط مع A^2 ($R_2 < r$) سيجعل أنصاف الأقطار النووية أصغر من القيم المتحصل عليها معمليًا، أنظر الشكل 6.4 .



الشكل 6.4 الأحجام النووية عندما تكون القوة النووية ذات مدى طويل وذات مدى قصير

هذه المعضلة حلّت جزئيا بافتراض أن القوة ، أو جزءًا منها بين النوّيات فـــى بعض الأحيان يكون تجاذبى وفى بعض الأحيان يكون تنافرى، وذلـــك بنـــاء على حالة النوّيات بالنسبة لبعضها البعض. إقترح هايســـنبيرغ Heisenberg بأنه عند التفاعل (Interaction) بين البروتون والنيوترون، فإن الشحنة علـــى البروتون تقفز على النيوترون ويحدث التحول، أى أن؛

$$p \xrightarrow{\beta^+ + \upsilon} n \quad \& \quad n \xrightarrow{\beta^- + \overline{\upsilon}} p$$

هذا يعنى أن النيوترون سيتفاعل مع بروتون واحد فى كل لحظة وليس مـــع العديد من الجسيمات، ومن ثم فإن القوة الرابطة n-p لها خاصية التشـبع. الا أن هذه النظرية لم تفلح لأن القوة النووية المحسوبة كانت قيمها متدنية عـــن المتوقعة (Underestimated).

2-4 نموذج قطرة السائل(معادلة طاقة الترابط)
: Liquid Drop Model (Binding Energy Formula)

أحد النماذج النووية التى استهدفت تفسير طاقة الترابط النووية والذى يعد كثير الأهمية هو نموذج قطرة السائل والذى نجح فى استخراج الصيغة شبه التجريبية Semi-empirical formula لطاقة الترابط . إن كتلة وطاقة الترابط للنواة استحوذت على كثير من الاهتمام وبالتالى وجود صيغة تمكن من حساب الكتلة وطاقة الترابط كان جد مفيد. لقد تم اشتقاق هذه الصيغة الرياضية بناءً على نموذج قطرة السائل. لقد وجد أن بعض الخصائص للقوة النووية مثل التشبع والمدى القصير واللتين إستنتجتا بناءً على التناسب الخطى بين كل من طاقة الترابط والحجم مع عدد النوّيات بالنواة ، وجد أن هذه القوة تشابه كثيراً تلك القوة الرابطة لقطرة السائل. لذا يمكننا إعتبار أن النواة مكونة من مائع غير قابل للإنضغاط Incompressible fluid ذى كثافة عالية حوالى 10^{14} g/cm^3 . بهذه الفكرة مع الأخذ فى الاعتبار التنافر الكهروستاتيكى و كذلك الشد السطحىSurface tension تم استخلاص صيغة شبه تجريبية للكتلة وكذلك لطاقة الترابط فى النواة. هذه الصيغة الرياضية مكونة من عدد من الحدود التى تؤثر فى طاقة الترابط وكل حد منها له وزنة ثابتة weight Constant إما تكون قد استنتجت نظرياً أو معملياً. ولنستخلص الآن الصيغة من خلال الحدود التى ذكرناها.

1- حد الطاقة الحجمى Volume Factor

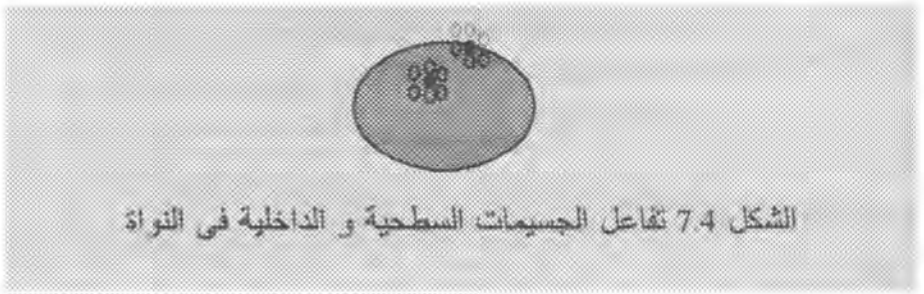
حيث إن طاقة الترابط تتناسب كما أوردنا سابقا مع عدد الكتلة ،أى أن؛ $B.E. \propto A$ (لا حظ أن هذا صحيح بالنسبة للنوى المتوسطة والثقيلة)ونظرا لأن الحجم أيضا يتناسب مع عدد الكتلة $V \propto A$ $(R \propto A^{1/3} \Rightarrow R^3 \propto V \propto A)$ ، فإن هذا الحد قد سمى حد الطاقة الحجمى ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$E_V = a_V A \qquad (5.4)$$

حيث إن a_V يمثل ثابت التناسب.

2- حد الطاقة السطحى Surface factor

الجسيمات الموجودة على سطح النواة تتفاعل فـــى المتوســـط مـــع نصـــف الجسيمات التى تتفاعل معها الجســـيمات المحصـــورة فـــى النـــواة، أنظـــر 7.4 للتوضيح.



الشكل 7.4 تفاعل الجسيمات السطحية و الداخلية فى النواة

وحيث إن حد الطاقة الحجمى يحوى كل الجسيمات، علينا أن نُنَحى تأثير هـذا الحد وبالتالى يكون تأثيره سلبيًا، وحيـــث إن $R \propto A^{1/3}$ وكذلـــك نظـــراً لأن المساحة السطحية S تتناسب مع مربع نصف القطر ($S \propto R^2 \propto A^{2/3}$)، لـــذا فسيعرف حد الطاقة السطحى من العلاقة التالية:

$$E_s = - a_s A^{2/3} \qquad (6.4)$$

3- حد الطاقة الكولومى Coulomb factor

إن الطاقة الكولومية تسعى إلى تخفيض طاقة الترابط الكليـــة بســـبب تنـــافر البروتونات، وبالتالى فتأثيرها سلبى، أى أن :

$$E_c = -a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \qquad (7.4)$$

4 – حد الطاقة لتأثير اللاتناظر Asymmetry effect term :

لكل قيمة من A ، هناك قيمة Z التى تتاظر النويـــدة ذات أعلـــى اســتقرار، فبالنسبة للنويدات الخفيفة حيث Z= A/2 (راجع الشكل 3.4) والتـــى توافـــق النويدات الأكثر استقرارًا، فإن القوة الكولومية ذات تأثير جد ضيئل . وبالتالى ففى غياب القوة الكولومية فإن أى ابتعاد من شرط Z= A/2 يؤدى إلى عـــدم استقرارية وبالتالى إلى قيمة أقل لطاقة الترابط ، لذا يجب وضع حـــد تـــأثير اللاتناظر فى الحسبان والذى له أيضا قيمة سلبية. إن الحد المطلوب يتناســـب مع $(A-2Z)^2$ ، حيث إن (A-2Z) تمثل فائض النيوترونات ، كما أن القـــوة التربيعية لضمان صفرية الحد وتفاضله بالنسبة لـــ Z عند Z= A/2 . الحد المرغوب فيه يعطى بالمعادلة التالية :

$$E_{AS} = -a_{AS}\frac{(A-2Z)^2}{A} \qquad (8.4)$$

5 – حد الطاقة للتأثير الفردى الزوجى Odd-even effect

النوى ذات الأعداد الزوجية من البروتونات والنيوترونات (e,e) تعد الأكـثر وفرة والأكثر استقرارًا، فى حين أن تلك النـــوى بـــأعداد فرديـــة مـــن البروتونات والنيوترونات (o,o) تعد الأقل اســـتقرارًا ، كمـــا أن التركيبـــات الفردية –زوجية بين البروتونات والنيوترونـــات(e,o أو o,e) فـــى نويـــات أخرى تعبر عن وسطية الاستقرارية . لذلك وجب إضافة هذا الحد للصيغـــة النهائية لمعادلة الترابط ، وهذا الحد يعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$E_\delta = \begin{pmatrix} a_{O-E}A^{-3/4} & (e,e) \\ 0 & (e,o) \\ 0 & (o,e) \\ -a_{O-E}A^{-3/4} & (o,o) \end{pmatrix} \qquad (9.4)$$

6 – حد الأغلفة η Shell term :

هذا الحد يأتى من علمنا بأنه عند كون عدد البروتونات أو النيترونات يساوي عددا سحريا تكون النواة أكثر استقرارًا، وبالتالى يكون هذا الحد موجبا.

لقد تم عرض الحدود حسب كبر مساهمتها فى طاقة الترابط، الحدود 4،5،6 تعد أقل مساهمة ، وطبيعيا الحد السادس أصغرهم ومن ثم سنتجاهله.

الصيغة النهائية لمعادلة طاقة الترابط بوحدة MeV يتم الحصول عليها بتجميع تأثير كل الحدود المذكورة أعلاه فيماعدا الحد السادس هى:

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{AS} \frac{(A-2Z)^2}{A} + E_\delta \qquad (10.4)$$

الجدول التالي يوضح قيم الثوابت اللازمة للمعادلة 10.4:

الجدول 1.4 قيم الثوابت لمعادلة طاقة الترابط

الحد	رمز الثابت	القيمة
الحجمى	a_v	15.76
السطحى	a_s	17.81
الكولومى	a_c	0.71
تأثير اللاتناظر	a_{AS}	23.7
التأثير الفردى–الزوجى	a_{O-E}	34

كما أنه يمكننا استخدام المعادلة 10.4 لتحديد الكتلة النووية وذلك بالتعويض بها فى المعادلة التالية:

$$M_{nuclear}(A,Z) = Zm_p + (A-Z)\, m_n - B(A,Z)/c^2 \qquad (11.4)$$

حيث إن m_p تمثل كتلة البروتون ، وm_n تمثل كتلة النيوترون، و$M_{nuclear}$ كتلة النواة (كل الكتل بوحدة الكيلوجرام) ، فى حين أن B(A,Z) بوحدة الجول ($1MeV=1.6x10^{-13}$ J) و c سرعة الضوء تساوى $2.998x10^8$ m/sec .

وفى حالة حساب الكتل الذرية، فيتم إضافة كتل الإلكترونات وذلك حسب المعادلة التالية وهى المعادلة التى اشتهرت باسم صيغة ويزساكر Weizsacker الشبه تجريبية للكتلة.

$$M(A,Z) = Zm_p + (A-Z)m_n + Zm_e - a_V A + a_S A^{2/3} + a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_{As} \frac{(A-2Z)^2}{A} + E_\delta \qquad (12.4)$$

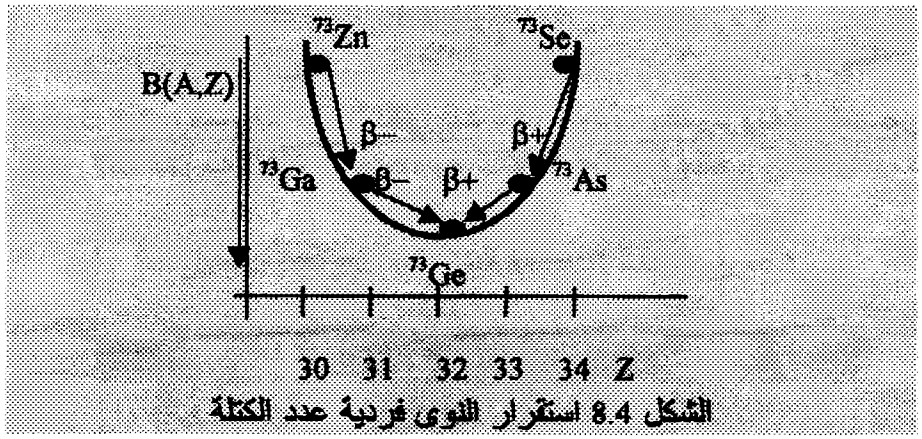
الجدول 2.4 يوضح قيم كتل الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات وبعض التحويلات اللازمة لتطبيقات صيغة ويزساكر شبه التجريبية.

الجدول 2.4 بعض القيم اللازمة لاستخدام معادلة ويزساكر

الجسيم	الكتلة Kg	الكتلة amu
الإلكترون	$9.109x10^{-31}$	0.000549
البروتون	$1.673x10^{-27}$	1.00782519
النيوترون	$1.675x10^{-27}$	1.00866520
التحويلات		
1amu=$1.661x10^{-27}$ Kg		
1MeV=$1.602x10^{-13}$ J		
1amu=931 MeV		
c=$2.998x10^8$ m/sec		

تطبيقات نموذج قطرة السائل Application of Liquid Drop Model :

لقد كان لطاقة الترابط دور فعال فى فهم طبائع خصائص الاستقرار للنـــوى، وخصوصًا النشاط الإشعاعى لجسيمات بيتا، وكذلـــك خصـــائص اســـتقرار المتكاتلات. فلو اخترنا مجموعة نويدات بعدد كتلة فردى A ومتغيرة فـــى Z ، ثم قمنا برسم طاقة الترابط لهذه النوى ضد العدد الذرى Z ، سنحصل علـــى منحنى بشكل قطع مكافىء . ستكون النويدة الأكـــثر اســـتقرارًا فـــى قـــاع المنحنى، وتلك على اليسار ستتحل بإشعاع جسيمات بيتا β^- ، فى حين تلـــك التى على اليمين ستتحل بإشعاع جسيمات البوزيترون β^+ ، أنظر الشكل 8.4.



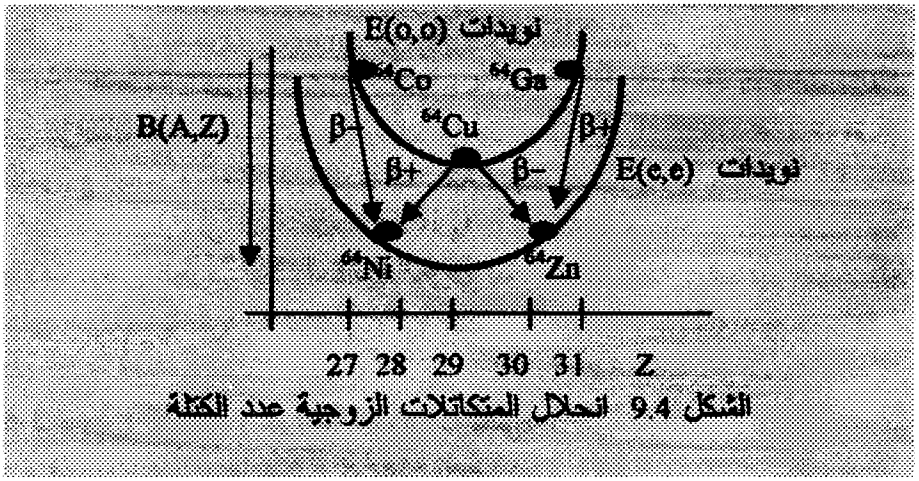
الشكل 8.4 استقرار النوى فردية عدد الكتلة

وبصيغة معادلات الانحلال يمكننا كتابة ما يلى:

$$^{73}_{30}Zn \xrightarrow{\beta^-} {}^{73}_{31}Ga \xrightarrow{\beta^-} {}^{73}_{32}Ge$$ جرمانيوم مستقر (Stable)

$$^{73}_{34}Se \xrightarrow{\beta^+ \text{ or } K\text{-capture}} {}^{73}_{33}As \xrightarrow{\beta^+} {}^{73}_{32}Ge$$ مستقر (Stable)

أما فى حالة عدد الكتلة A الزوجى فإن سبب وجود الحد الزوجى–الفردى E_δ فى معادلة طاقة الترابط يجعلنا نتحصل على زوج من المنحنيات بشكل القطع المكافىء كما هو موضح فى الشكل التالى:



الشكل 9.4 انحلال المتكاتلات الزوجية عدد الكتلة

ففى الشكل 9.4 نلاحظ أن المتكاتلات زوجية عدد الكتلة مكونة من عدد فردى لكل من عدد البروتونات والنيوترونات (o,o) أو مكونة من عدد زوجى لكل من عدد البروتونات والنيوترونات (e,e) ، وبحكم أن قيمة الحد الفردى- الزوجى فى معادلة طاقة الترابط إما موجبة فى حالة (e,e) أو سالبة فى حالة (o,o) ، لذا كان لنا المنحنيان الواردان فى الشكل السابق وعلى الشكل أيضا نرى طبيعة انحلال النويدات سواء بإشعاع β^- أو β^+ . ومن الشكل وبسبب المنحنى السفلى نلاحظ أنه لا يمكن الحصول على نويدة مستقرة يكون عدد كتلتها زوجيًا وعددها الذرى Z فرديًا (النحاس ^{64}Cu)، وذلك لانحلالها الفورى إما بإشعاع جسيمات بيتا السالبة (الإلكترونات) β^- لتتحول إلى الزنك ^{64}Zn أو بإشعاع جسيمات β^+ (البوزيترونات) لتتحول إلى النيكل ^{64}Ni .

أليس هذا التحليل والشرح المتعلق بانحلال المتكاتلات سواء الفردية أو الزوجية كان ممكناً بسبب تمكننا من إيجاد صيغة رياضية لطاقة الترابط فى النوى؟ بلى. وهذا هو السبب فى محاولة إيجاد النماذج المختلفة لتفسير ما يكتنف النواة من غموض، هذا ويستخدم نموذج قطرة السائل فى تفسير نظرية النواة المركبة Compound nucleus وكذلك فى نظرية الانشطار التى تفسر الانشطار كأنه إرباك وتقسيم فى قطرة السائل. كما أنه هناك نماذج أخرى

مثل النموذج الشمولى Collective model والمستند على دراسات فى العـــزم رباعى القطبية الكهربية وكذلك النموذج البصرى Optical model والمســتخدم فى دراسات التفاعلات النووية وذلك من خلال تكوين النواة المركبـــة، ففـــى النموذج البصرى يعتقد أن النواة المركبة لا يحدث فوريا، وأيضا ليس بضمان أكيد، حيث يظن أن النواة تتصرف كأنها كرة رمادية Gray sphere حيث تقوم بالامتصاص الجزئى و الإنعكاس الجزئى للموجة الساقطة (الجسيم الســـاقط على النواة).

3-4 نموذج الأغلفة (خريطة البناء النويّاتى)
The Shell Model (Nuclear Structure)

إن غياب نظرية للبناء النووى أدى إلى محاولات لإيجاد علاقات بين البيانـات النووية من خلال النماذج المناسبة. النماذج المقترحة مبنية على افتراضـــات بسيطة وهذه النماذج ذات فائدة فى أطر محدودة ، أى لاستيفاء الغرض الـذى استنتجت من أجله.

إن نموذج الأغلفة يعد من أهم النماذج والأكثر أهمية من غـيره بخصـوص البناء النووى. لقد تم فى السنوات الأخيرة ملاحظة أن الخصـــائص النوويـــة تتغير دوريا (Periodical Variation) . حيث إن كثـــيرًا مـــن الخصـــائص أظهرت انقطاعـــات (Discontinuities) قـــرب قيـــم زوجيـــة مـــن أعـــداد النيوترونات أو البروتونات. أوضحت التجارب بأن النوى المستقرة تتصـــف بأن عدد بروتوناتـــها Z أو عـــدد نيوتروناتـــها N يســـاوى عـــددا ســـحريا Magic Number . هذه الأعداد السحرية هى:

2, 8, 20, 50, 82, 126,....

لقد تم تفسير هذه الأعداد السحرية علـــى أنـــها تكـــون أغلفـــة مغلقـــة مـــن النيوترونات أو البروتونات، كما أن أغلفة البروتونات وأغلفـــة النيوترونـــات تبدو مستقلة عن بعضها بعضًا. إن دراسة النوى المستقرة أظهرت دلائل عـن حقيقة هذه الأعداد السحرية. فمثلا نواة ^4He التـــى لـــها نفـــس العـــدد مـــن البروتونات Z=2 و النيوترونات N=2 ، وأيضا نواة الأكسجين ^{16}O تحتـــوى على نفس العدد من البروتونات والنيوترنات وهو العـــدد 8 . كلتـــا النواتيـــن

تعتبران أكثر استقرارًا من النوى المجاورة لهما. كما أن الأعداد 14، 28 ،40 فى بعض الأحيان تدعى أعداد شبه سحرية Semimagic Numbers .

تتسم النوى المستقرة باحدى الخصائص التالية منفردة أو مجتمعة:

1- قوة ترابط عالية.

2- الوفرة الطبيعية.

3- وجود عدد كبير من النظائر المستقرة للعنصر الواحد.

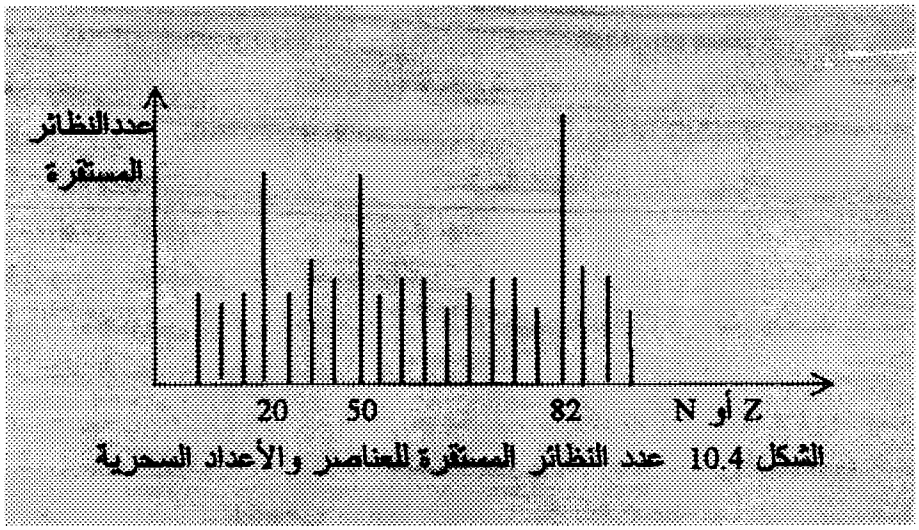
فمثلا بخصوص الوفرة الطبيعية، لوحظ أن قيما عالية للوفرة تتواجد عند الأعداد السحرية، أنظر الجدول 3.4 .

الجدول 3.4 وفرة العناصر الحاملة للأعداد السحرية

العنصر	N	Z
^{16}O	8	8
^{40}Ca	20	20
^{118}Sn		50
$^{88}Sr, ^{89}Y, ^{89}Zr$	50	
$^{139}La, ^{138}Ba, ^{140}Ce$	82	
^{208}Pb	126	82

فكما نلاحظ من الجدول أن العنصر ^{16}O هو أحد أخف العناصرعلى منحنى طاقة الترابط، حيث إن له طاقة ترابط ضعيفة نسبياً مقارنة بالعناصر المتوسطة والثقيلة، لذا فإن الوفرة الطبيعية تعد مقياسًا لمدى استقرارية العناصر، وهذه العناصر التى لها وفرة عالية تحمل أعداداً سحرية.

أيضا الاستقرارية النسبية لعناصر مختلفة يمكن تمحصها واستبيانها من خلال عدد النظائر المستقرة لكل عنصر. فلو أحصينا عدد النظائر المستقرة للعناصر ورسمناها مقابل عدد البروتونات أو عدد النيوترونات، فستظهر أن العناصر التى لها أكبر عدد من النظائر المستقرة تتميز بحملها أعدادًا سحرية إما لعدد البروتونات أو لعدد النيوترونات. أنظر الشكل 10.4 للتوضيح.



الشكل 10.4 عدد النظائر المستقرة للعناصر والأعداد السحرية

إن طاقات جسيمات الفا المنبعثة من انحلال النوى الثقيلة تؤكد الدلالة القوية للأعداد السحرية 82 و 126 ، حيث إن أكبر طاقات جسيمات الفا المنبعثة ترجع إلى انحلال النوّية إلى عنصر يحمل عددا سحريا. فمثلا الرصاص ^{206}Pb Lead وهو العنصر الأخير المستقر لسلسلة انحلال طبيعية، وهذا العنصر له Z= 82 . كما أن الأكتينيوم ^{213}At Actinium و البولونيوم ^{212}Po Polonium لهما عدد من النيوترونات يساوى 128 ويشعان جسيمات الفا بطاقات 9.4 MeV و 8.78 MeV . كل منهما يتحول إلى نويدة لها عدد 126 من النيوترونات وهو عدد سحرى. هناك دراسات مماثلة لانحلال العناصر بإشعاع جسيمات بيتا ، وقد أوضحت هذه الدراسات أن جسيمات بيتا الأكثرُ طاقةً تُشَعُ عند تحول النويدة إلى نويدة وليدة Daughter Nuclide تحمل عددا سحريا.

نستنتج من كل هذا أن النيوترونات والبروتونات تتجمع فى أغلفة شبيهة بتلك التى تتجمع فيها الإلكترونات فى الذرة، وعندما تمتلىء هذه الأغلفة بعدد سحرى،فإن البناء المتكون يكون مستقرا (لا ينحل بإشعاع جسيمات مثل الفا وبيتا) وله طاقة ضئيلة جدا. إن فى ذلك تشابهًا لما يسمى فى البناء الإلكترونى للذرة بالعناصر الخاملة (النبيلة) التى لا تتفاعل كيميائيا بسبب إمتلاء مدارات الذرة الخارجية بعدد من الإلكترونات تساوى 2 (الهيليوم) و8

(النيون ^{20}Ne) و 8 (الأرجون ^{40}Ar)، و18 (الكريبتـــون ^{84}Kr).. الـــخ، وهى موجودة فى أقصى يسار الجدول الدورى الحديث للعناصر.

إن نموذج الأغلفة يفترض أن :

1- كل نويّة nucleon تتحرك فى مدارها فى النواة مستقلة تماما عـــن بـــاقى النويّات.

2- تحكم كل جسيم دالة طاقة وضع (Potential Energy) V(r) ممثلة لتـأثير كل التفاعلات Interactions مع باقى النويّات ، كما أن هذه الدالة هى نفســـها لكل نويّة أو جسيم فى النواة.

3- تـُبنى أغلفة البروتونات والنيوترونات كل منها مستقلا عن الأخر ولكـــن بنفس الطريقة.

4- وحيث إن كل نويّـــة لـــها لـــف Spin ، فقـــد افـــترض بـــأن النويّـــات يتزاوجان Pair off بلف مضاد لبعضهما بعضًا.

5-كل نويّة تعد جسيما مستقلا، وأن التفاعلات بين النويّات تعتبر اضطرابا أو تحورا Perturbation صغيراً على التفاعل بين النويّة و مجال طاقة الوضـــع Potential Field .

فكما أشرنا سابقا ، فإنه هناك تشابهًا بين البناء الإلكـــترونى للـــذرة والبنـــاء النويّاتى للنواة. الجدول 4.4 يوضح أوجه التشابه والخلاف للبنائين الإلكترونى والنويّاتى.

من دراسات انحلال النوى المشعة، نعلم طاقة الانحلال الكلية (قيمة Q) لذات النوع من النويدات لها قيمة محددة ، كما أن إنبعاث أشعة γ من النوى يكـون ذا قيم محددة مميزة Discrete definite values . هذه الحقائق جميعها تشـــابه الإشعاع الكمى للإشعاعات الكهرومغناطيسية من الذرة مثـــل أشـــعة إكـــس والأشعة الفوق البنفسجية وأشعة الضوء المرئى ،..الـــخ . لذلـــك فقـــد تـــم الاستنتاج بأن انحلال النوى المشعة سواء بإنبعاث الفا(α) أو بيتـــا (β) أو جاما (γ) له علاقة بإنتـــــقالات بيـــن مســـتويات طاقـــة كميـــة ممـــيزة Discrete Quantized Energy Levels .

الجدول 4.4 أوجه الشبه والاختلاف بين البناء الإلكترونى للذرة والبناء النويّاتي لنواة

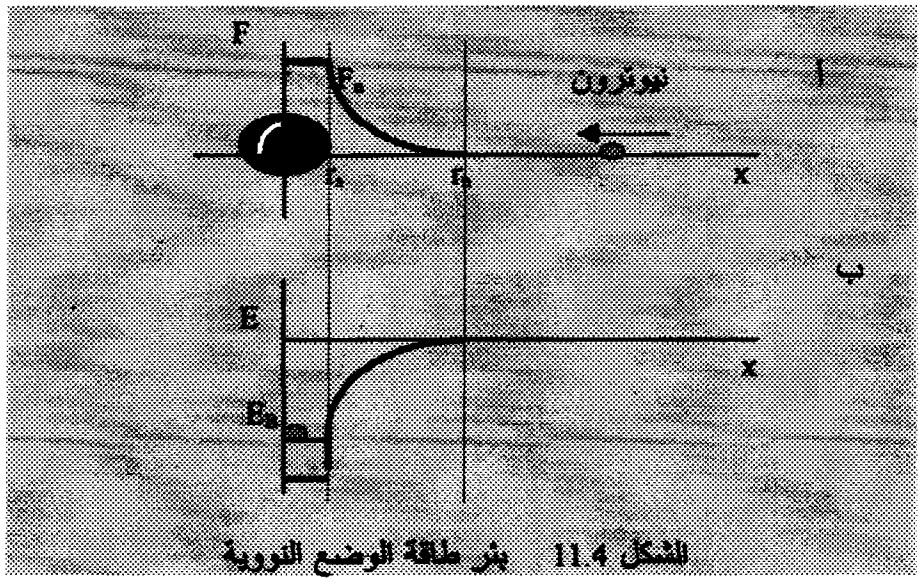
أوجه الشـــابه		أوجه الاختلاف	
النويّات	الإلكترونات	النويّات	الإلكترونات
طاقة وضع	طاقة كولومية	طاقةالوضع: $V(r) = -V_o$ -1 $V(r) = -V_o + a r^2$ -2	طاقة كولوم: $E(r) \propto \frac{1}{r}$
مدارية (حالة كميّة)	مدارية (حالة كميّة)	نوعين من الجسيمات (البروتون و النيوترون)	نوع واحد (إلكترون)
إشعاع α, β, γ بسبب إنتقالات بين مستويات طاقة كمية	إشعاع فوق البنفسجية و أشعة X بسبب إنتقالات بين مستويات طاقة كمية		

بئر طاقة الوضع النووية The Nuclear Potential Energy Well :

لنتصور أن نيوترون بطاقة حركية ضعيفة يقترب من نواة مـــا، ونظـــرًا لأن النيوترون غير مشحون فسوف لن يكون هناك تأثير من قبل المجال الكولومى للنواة، ومن ثم فإن النيوترون سوف يقترب بدون أى تفاعل حتـــى تقـــترب بكفاية وتظهر عند ذلك تأثيرات القوة النووية الجاذبة $F_n > 0$ عنـــد البعـــد r_n وبالتالى يتم امتصاصه بالنواة عند ســـطحها r_s ، أنظـــر الشـــكل 11.4 (أ). عندما يتم امتصاص النيوترون فسيتم تحرير طاقة تتبعث فى صورة كم جاما. طاقة جاما المنبعثة تحسب من المعادلة التالية:

$$E\gamma = -931.5 \, (M_{A+1} - M_A - M_n) \qquad (13.4)$$

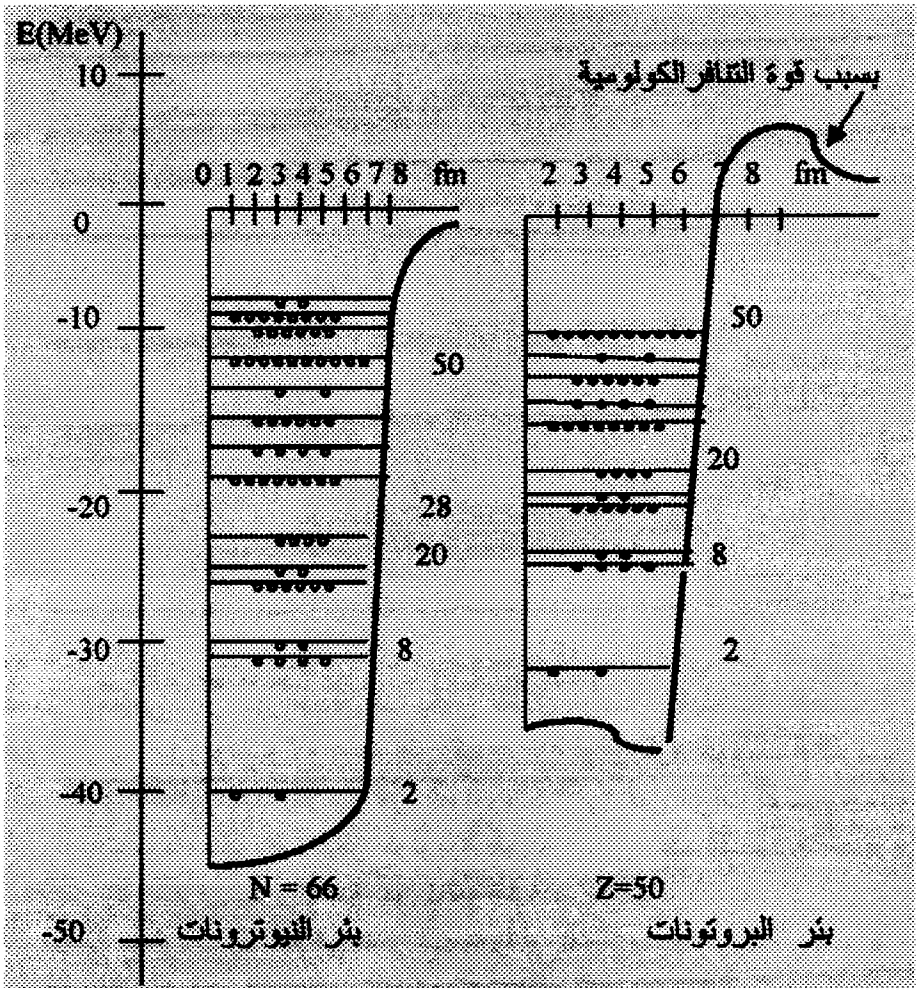
الطاقة المتحررة هى طاقة الترابط للنيوترون فى النواة E_B . وتبعا لذلك فـــإن الطاقة الكلية للنواة تنخفض بذات القيمـــة، أنظـــر الشـــكل 11.4 (ب)، هـــذا الانخفاض يشار اليه عادة ببئرطاقة الوضع Potential EnergyWell .



الشكل 11.4 بئر طاقة الوضع النووية

يمكننا إذًا اعتبار أن النويّات تحتل مستويات طاقة مختلفة فى هذا البئر. إن الشكل الحقيقى للبئر غير محقق فقد يكون الشكل مربعًا أو قطعًا ناقصًا أو غيره. أيضاً البروتونات تقع تحت ظروف مماثلة لهذه القوة النووية القوية ذات المدى القصير عند اقترابها من النواة، ولكن فى نفس الوقت تقع هذه البروتونات تحت تأثير قوة تنافر كولومية طويلة المدى. هذه القوة الأخيرة تمنع بئر الوضع أن يكون أعمق من نظيره الخاص بالنيوترونات.

ففى تعبئة مستويات الطاقة فى البئر لنتصور أن النواة بها نويّة واحدة ، وهناك نيوترون قادم الذى بدوره سيقع تحت تأثيرالقوة النووية ومن ثم يتم امتصاصه وحصره داخل النواة، هذه العملية توافق لطاقة ترابط معينة E_B ومن ثم تناظر مستوى طاقة معين. فيما بعد، تلك النويّتان الحبيستان بالنواة ستؤثران بقوة نووية جديدة على النيوترون القادم الجديد، وبالتالى يتم امتصاصه نظير طاقة ترابط جديدة وبالتالى يكون هناك مستوى طاقة جديد، وهكذا تتكرر العملية .إذًا وبتتابع تجمع النيوترونات داخل النواة ستتوزع فى مستويات طاقة مختلفة. الشكل 12.4 يوضح مستويات الطاقة للنيوترونات والبروتونات فى نواة Sn^{116}.



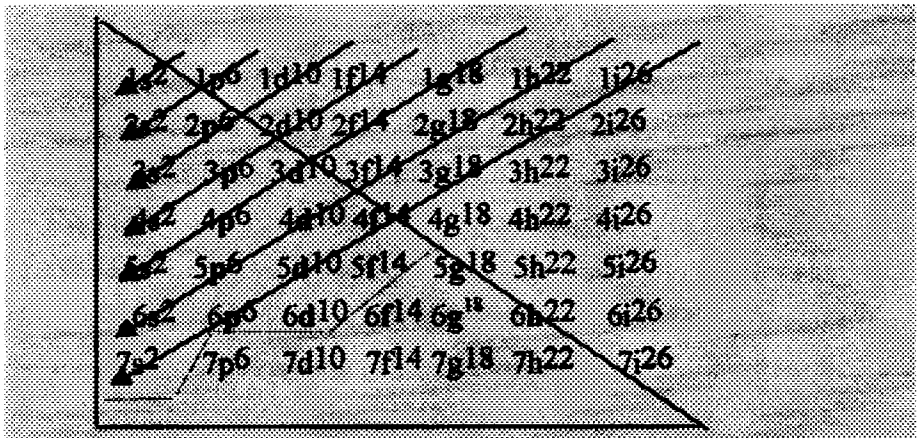
الشكل 12.4 البناء الغلافي للنيوترونات والبروتونات لنويدة ^{116}Sn في بئر طاقة الوضع

ونظرًا لأن الاستقرارية Stability تعنى عدم انبعاث أشعة وجسيمات من النواة، فإن ذلك يعنى أنه لابد من وجود غلاف يمنع حدوث ذلك. وهذا هو مفهوم نظام الأغلفة، حيث إن هذه الأغلفة تحمل أعدادًا سحرية. ومن ثم وحتى يتسنى لنا وصف كيفية توزيع النويّات داخل النواة، تمت محاولة الربط مع أسلوب البناء الإلكترونى الذى قمنا بعرضه فى احد الفصول السابقة بشيء

من التفصيل الذى يؤهلنا لمتابعة النقاش للوصول إلى البناء النويّاتى للنـــواة. إن إتباع خريطة البناء الإلكترونى مكنت من ملء مستويات الطاقة بالنوّيـــات ولكن لم يُـــتمكن من إظهار كل الأعداد السحرية. لحل هذه المشكلة ، وجـــب استحداث طريقة لفصل Split هذه المستويات المستخلصة من أسلوب البنـــاء الإلكترونى، بحيث يتم ملء هذه المستويات الجديدة بنوّيات. لقد تم التمكن مـن إحداث هذا الفصل باعتبار أن البئر شكله قطع ناقص Parabolla ، ولكن هـــذه الطريقة لم تُمكن من حل المشكلة كلياً، فلذلك تم اقتراح التقارن Coupling بين الزخم الزاوى المـــدارى Orbital angular momentum و الزخـــم الـــزاوى المغزلى Spin Angular Momentum ، أى أن $i = l \pm s$ ، هذا الحل مكّن مـن فصل مستويات الطاقة وكذلك أنتج الأعداد السحرية.

لقد أوجزنا فى السطور السابقة التدرج فى استنباط الكيفية التى تمكننـــا مـــن استنتاج الأعداد السحرية وذلك من خلال تطور نموذج الأغلفة عبر سلســـلة من الأفكار التى أوصلت أخيراً إلى استنتاج الأعداد الســـحرية، والآن لنـــأخذ بعض الوقت للغوص بشىء من التفصيل لما أوجزناه فى السطور السابقة.

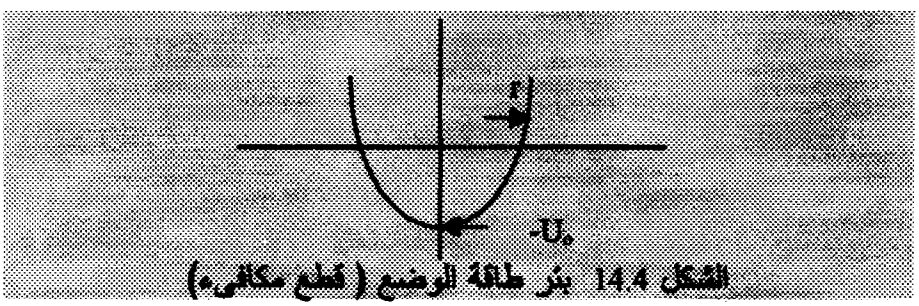
سنعيد عرض خريطة البناء الإلكترونى للذرة هنا مرة أخرى ولكـــن بشـــكل موسع أكثر حتى يمكننا الاستفادة منها فى استخلاص البناء النويّاتي تبعا لذلك. لاحظ أن شكل الخريطة مستطيل ، وأن الجزء المشار اليه بالمثلث (المحتوى على الحروف الداكنة) هو الذى أوردناه فى الفصل الأول من هـــذا الكتـــاب لغرض البناء الإلكترونى للذرة ، كما أن الأسهم الواردة (الجزء المحصـــــور داخل المثلث فقط) توضح تسلسل البناء الإلكترونى، كما يشير الخط المنكسر فى الخريطة إلى الحد النهائى لملء أغلفة المدارات الإلكترونيـــة للعنـــاصر المتوفرة فى الطبيعة أو المصنعة، حيث إن أحدث العنـــاصر المكتشـــفة هـــو العنصر $Z=106$.



الشكل 13.4 مثال لاستنتاج خريطة البناء النويّاتى للنواة المشابهة لخريطة البناء الإلكترونى

وبالرجوع إلى الجدول 5.4 الذى يبين الحالات الكمية Quantum states وعدد الجسيمات المحمولة فى كل مستوى كمى مع تتبع الأسهم الواردة فى الخريطة بالشكل 13.4 و ذلك من منبت السهم من خارج المثلث نتحصل على بناء نويّاتى ولكن لم نتمكن من التوفيق فى استظهار الأعداد السحرية للنوى ... 2, 8, 20, 28, 50, .

وفى محاولة لحل المشكلة تم حل معادلة شرودنجر لجهد له شكل قطع مُكافىء Parabolic ، وتتغير طاقة النويّة بين طاقة الوضع وطاقة الحركة مثل المتذبذب التوافقى Harmonic oscillator ، أنظر الشكل 14.4 لتوضيح بئر طاقة الوضع المفترضة(منخفض الجهد المفترض).



الشكل 14.4 بئر طاقة الوضع (قطع مكافىء)

الجدول 5.4 الأعداد الكمية والبناء النويّاتى

الحالة الكمية	العدد الكمى l	العدد الكمى ml =-l ..+l	عدد الجسيمات بالمستوى # = 2(2l +1)	العدد التراكمى للنويّات = $\# \sum_{0}^{l} 2(2l+1)$
s	0	0	2	$(1s^2)$ 2
p	1	-1,0,+1	6	$(1p^6\ 2s^2)$ 8
d	2	-2,-1,0,1,2	10	$(1d^{10}\ 2p^6\ 3s^2)$ 18
	3	-3,-2,-1 ,0,1,2,3	14	$(1f^{14}\ 2d^{10}\ 3p^6\ 4s^2)$ 32
g	4	-4,-3,-2, −1,0,1,2,3,4	18	50
-	l	-l,...,+l	2(2l+1)	$\sum_{0}^{l} 2(2l+1)$

إن حل معادلة شرودنجر لمثل طاقة الوضع هذه تعطى من المعادلة التالية:

$$E_{nucleon} = h\sqrt{\frac{2U_0}{mr^2}}[2(n-1)+\ell] = h\omega[2(n-1)+\ell] \qquad (14.4)$$

حيث إن U_o تمثل طاقة الوضع عند نصف قطر r =0 ، و m تمثل كتلة النويّة ، و n,l تمثلان حالتين (عددين كميين) ، كما أن تردد المتذبذب ω يساوى $\sqrt{\frac{2U_0}{mr^2}}$.

وبناء على تلك المعادلة فإن مستويات الطاقة تعطى كماهو موضح فى الجدول 6.4:

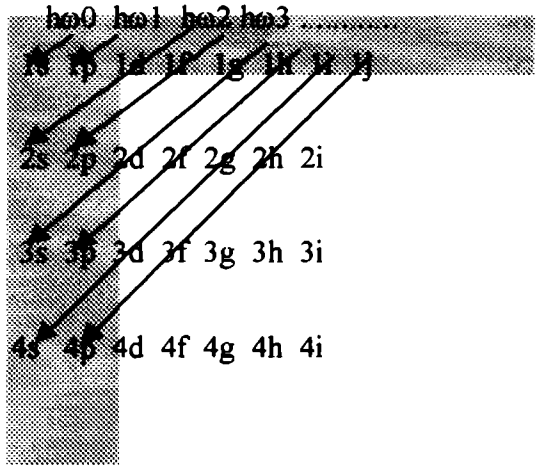
الجدول 6.4 ملء مستويات الطاقة باستخدام بئر القطع المكافيء

طاقة المستوى $h\omega(2(n-1)+l)$	n	l	المستويات الفرعية	عدد نويات المستوى	العدد التراكمى
$h\omega 0$	1	0	1s	2	2
$h\omega 1$	1	1	1p	6	8
$h\omega 2$	1 2	2 0	1d 2s	12	20
$h\omega 3$	1 2	3 1	1f 2p	20	40
$h\omega 4$	1 2 3	4 2 0	1g 2d 3s	30	70
$h\omega 5$	1 2 3	5 3 1	1h 2f 3p	42	112

لاحظ

	s	p	d	f	g	h
l	0	1	2	3	4	5

الشكل 15.4 يوضح خريطة أسلوب ملء المستويات المختلفة ، لاحظ أن منبت الأسهم يبدأ من الصف الأول وينتهى بالتبادل بين العمود الأول والعمود الثانى، فمثلا السهم الأول يبدأ بخانة الصف الأول والعمود الأول(1,1) 1s ثم السهم الثانى يبدأ وينتهى فى الخانة المشتركة للصف الأول والعمود الثانى(1,2) 1p ، ثم يبدأ السهم الثالث من الخانة (1,3) 1d وينتهى فى الخانة (2,1) 2s ، والسهم الرابع يبدأ من الخانة (1,4) 1f وينتهى فى الخانة (2,2) 2p ، وهكذا.



الشكل 15.4 تعبئة مستويات الطاقة بالنوّيات استنادًا على بئر القطع المكافىء

هذا الأسلوب المستند على بئر القطع المكافىء مكن مستويات الطاقة من الانفصال Splitting بأعداد كثيرة وهى حالة وجود نويتين بنفس الطاقة شريطة حملهما لأعداد كمية مختلفة(لاحظ أن مبدأ باولى يفيد أن النظام لا يمكنه حمل جسيمين لهما نفس الأعداد الكمية).

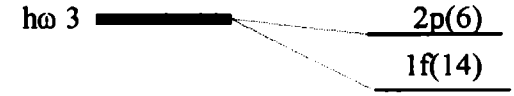
مثال 3.4

بين مفهوم الفصل Splitting لمستوى الطاقة $E=h\omega[2(n-1)+1] = h\omega\ 3$.

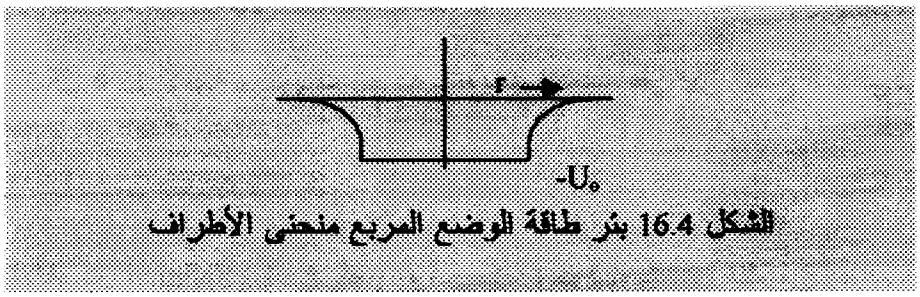
الحل:

باختيارنا لقيمة n=1 و 3= l يمكننا من المعادلة الحصول على طاقة مستو تساوى $h\omega\ 3$ وهذه وحسب الجدول 6.4 تناظر الحالة 1f- State ، وهذه الطاقة يمكن الحصول عليها لو عوضنا فى المعادلة بقيمة n=2 و l= 1 وهى حسب الجدول 6.4 تناظر الحالة 2 p-state . وحيث إن 1f- يمكنها حمل 14

نوّية ، كما أن 2p يمكنها احتواء 6 نوّيات، لذا فإن المستوى المنفصل يمكنه حمل 20=6+14 نوّية .

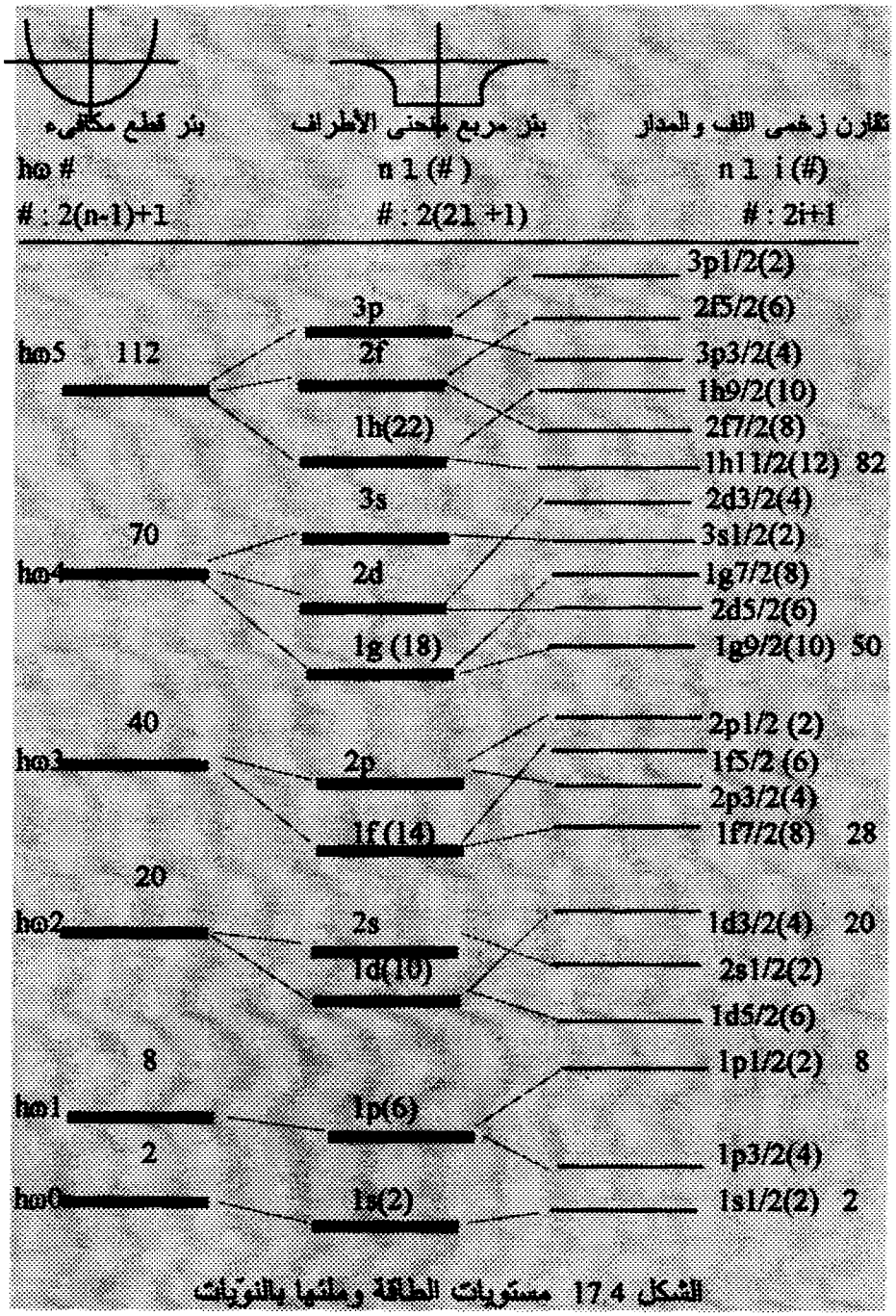


وعلى الرغم من أن استخدام بئر القطع المكافيء مكن من فصل المستويات وبالتالى تحميل نوّيات أخرى لم يتمكن بهذا الأسلوب من استظهار كل الأعداد السحرية. للتحسين أكثر تم افتراض أن بئر الوضع يحمل شكل البئر المربع المنحنى الأطراف الشكل 16.4



الشكل 16.4 بئر طاقة الوضع المربع منحنى الأطراف

ساعد هذا الافتراض بعض الشيء ولكن لم يف بالغرض كلية ، ومن ثم كانت الحاجة إلى تحسين أخر والذى كان بافتراض تقارن زخم اللف الزاوى مع الزخم الزاوى المدارى l -s coupling ، حيث إن i=l + s ويكون الزخم الزاوى الكلى I=Σi . بهذه الطريقة كل مستويات الطاقة ما عدا مستوى s انفصلت إلى مستويين بقيم كمية تساوى l+1/2 و l -1/2 ، بحيث أن المستوى ذا اللف الموجب له قيمة طاقة أقل(يكون تحت الآخر عند رسم مستويات الطاقة للنوّيات ، أنظر الشكل 17.4 المبين لتعبئة المستويات المستند على فصل المستويات. إن الحل الأخير لفصل المستويات مكن من تجميع المستويات بطريقة أظهرت الأعداد السحرية متفقة بذلك مع النتائج المعملية. ومن ثم اعتمد هذا الطرح كأسلوب لملء النواة بالنويات المختلفة.



الشكل 17.4 مستويات الطاقة وملئها بالنوترونات

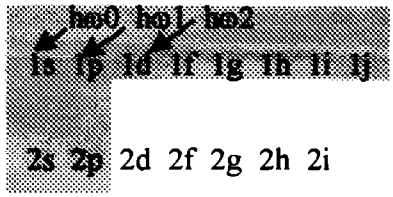
لتوضيح الشكل 17.4 ، نلاحظ فى أقصى يسار الشكل مستويات الطاقة المستنتجة من حل معادلة شرودنجر وذلك لبئر طاقة الوضع ذات القطع المكافىء ، حيث وردت فى الشكل مستويات الطاقة من hω0 إلى hω5 ، ونلاحظ عدد النوّيات التراكمية 2 ،8 ، 20، 40، 70، 112، و 168 لا تمثل كل الأعداد السحرية، وعلى يمين هذه المستويات نلاحظ عملية فصل هذه المستويات، كما أوردنا فى مثال 3.4 ، فمثلا وباستخدام المعادلة 14.4 نجد أن مستوى الطاقة hω1 يعبر عنها بمستوى 1p ، فى حين مستوى الطاقةhω2 يمكن التعبير عنه بمستوى 2s و1d وهكذا تتم عملية انفصال المستويات ، كما نلاحظ أنه وضعنا على هذه المستويات وصف ذلك المستوى مع عدد النوّيات التى يحملها (#) n l ، حيث إن n, l تعبران عن الأعداد الكمية و(# = 2(2l +1) تعبر عن عدد النوّيات فى ذلك المستوى ، فمثلا 2p(6) تعنى أن n تساوى 2 و أن l تساوى 1 (أو بالحروف p ؛ أنظر الجدول6.4) كما أن (6) تعنى أن هناك عدد 6 نوّيات بذلك المستوى . وبتقارن زخمىّ اللف والمدار تم الفصل أكثر وأستُظهرت الأعداد السحرية كما هو مدون فى أقصى يمين الشكل. أيضا نلاحظ أنه تم وصف المستويات فى أقصى يمين الشكل من خلال الأعداد الكمية وكذلك عدد النوّيات المحمولة بتلك المستويات n l i # حيث إن n, l تعبران عن الأعداد الكمية و i تمثل التقارن بين زخمىّ اللف والمدار أى أن i=l ± s ، أما (# =2i+1) فتمثل عدد النوّيات المحمولة بالمستوى. فمثلا 1g 7/2 (8) تفيد أن n تساوى 1 وأن l تساوى 4 (أو g حسب الجدول 6.4) ،فى حين أن 7/2 تمثل i=l – s أو ½ – i=4 ، وأخيراً (8) تمثل عدد النوّيات فى هذا المستوى 2i+1= # أو 8=1+ 7/2 x 2 = # . وهكذا باستخدام خريطة البناء النوّياتى الواردة بالشكل 15.4 مع استخدام التقارن بين زخمى اللف والمدار يمكننا رسم مستويات الطاقة للنوّيات مع العلم أنه فى حالة التقارن فإن 1/2+l تكون ذات طاقة أقل من 1/2-l وبالتالى يرسم مستوى 1/2+ l تحت مستوى طاقة 1/2- l (لاحظ أن بئر طاقة الوضع سالب) ومن خلال n l i # يمكننا وصف كل مستوى مع ما يحمله من نوّيات.

مثال 4.4

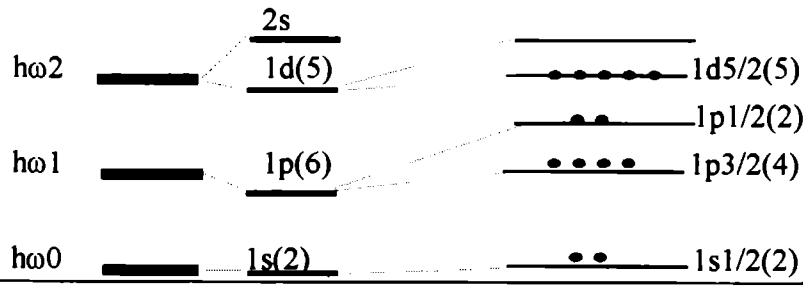
ارسم مستويات الطاقة للبروتونات فى نواة الألومنيوم ^{27}Al مع وصف تلك المستويات من خلال الاسم الرباعى # n l i .

الحل:

تحوى نواة ^{27}Al على عدد 13 من البروتونات وبالتالى وحسب خريطة البناء النويّاتى لا يمكننا تعبئة أكثر من المستويات 1s, 1p , 1d (مجمل حمولتها 2+6+10=18 وهو أكثر من عدد البروتونات 13 لنواة الألومنيوم)، أنظر الشكل المرافق من الخريطة.

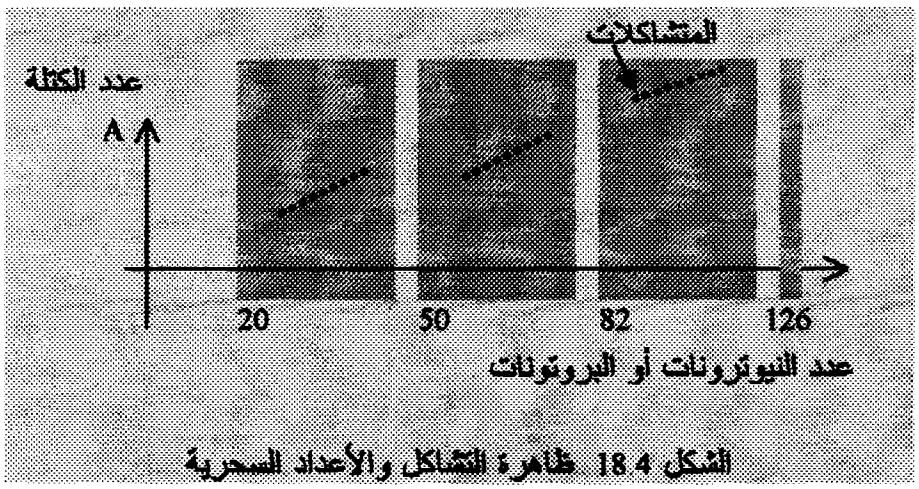


وباستخدام التقارن بين زخمىّ اللف(المغزلية) والمدار فإن كل من المستويين p و d يحدث لهما انفصال ، فى حين أن المستوى s لا ينفصل، وباستخدام معادلة تعبئة المستوى # n l i يكون وصف المستوى 1s هو 1s1/2(2) ، والمستوى 1p ينفصل إلى مستويين 1p3/2(4) و1p1/2(2) كما أن المستوى 1d ينفصل هو أيضا بسبب تقارن زخمىّ اللف والمدار إلى المستويين 1 d5/2(6) و 1d3/2(4) ، ولكن ونظرًا لأن عدد البروتونات يساوى 13 فنلاحظ أن مستويات s و p تعبأ تماما (العدد الكلى8=2+6)،فى حين أن ما تبقى من البروتونات وهو عدد 5=8-13 يتم به تعبئة المستوى1d5/2(5) ، بحيث يكون إجمالى البروتونات المتواجدة بالمستويات هو 13 ، أنظر الشكل المرفق للتوضيح.



تطبيقات نموذج الأغلفة Application of Shell Model :

من مزايا نموذج الأغلفة هو إمكانية التنبأ بالزخم الزاوى الكلى للنوى والـذى يتوافق تماما مع التجارب المعملية، ومن ثم يمكننا تحديد زخـم زاوى كلـى لنوى لم يتم تحديد زخمها الزاوى الكلى معمليا. كما أمكن باستخدام نمـوذج الأغلفة من دراسة ظاهرة التشاكل Isomerism ، حيث ظاهرة التشاكل تعنـى وجود حالات مثارة ذات عمر طويل وذلك لأن مستويات الطاقة المتجاورة فى النواة تتميز بفارق كبير بينها فى الزخم الزاوى الكلى مما يجعل انتقال النـوى بين هذه المستويات صعبًا للغاية فتبقى النواة فى حالة مثارة لأمد طويل. لقد تم رسم المتشاكلات Isomers ذات عدد الكتلة A الفـردى بالنسـبة لأعدادهـا الفردية من البروتونات أو النيوترونات، فوجد أن تجمعات مـن المتشـاكلات تتواجد وتنقطع تماما عند الأعداد السحرية ولا تبدأ فى الظهور من جديـد إلا بعد أن يمتلىء الغلاف إلى نصفه من النوّيـات. الشـكل 18.4 يمثـل رسـم توضيحى لظهور المتشاكلات وإنقطاعها عند الأعداد السحرية.

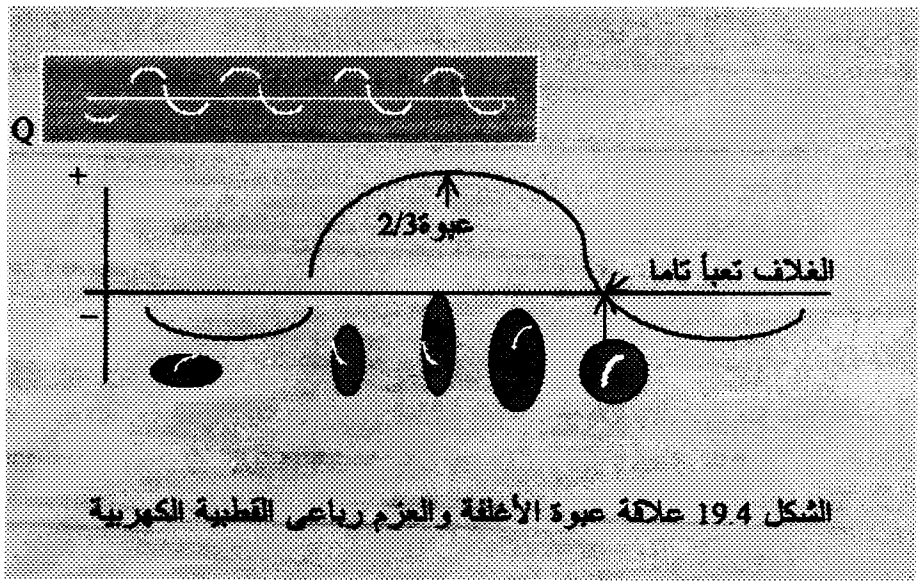


الشكل 18.4 ظاهرة التشاكل والأعداد السحرية

فنلاحظ على سبيل المثال أن نظـائر عنصرالزينـون Xenon (Xe) ذات أعداد الكتلة الفردية 127، 129، 131، 133، 135 بعدد النيوترونـات 73، 75، 77، 79، 81 كلها تظهر التشاكل، فى حين أن النظيرين بعددى الكتلـة 137 و

138 الحاملين لعدد النيوترونات 83 و 85 لا تظهران ظاهرة التشاكل. وهـــو تماما ما يحدسه نموذج الأغلفة من كون ظهور ظاهرة التشاكل تحت الأعـداد 50و 82 و 126 وعدم ظهورها مباشرة بعد هذه الأعداد.

أيضا النتائج المعملية حول العزوم المغناطيسيةMagnatic moments وكذلـــك العزوم رباعية القطبية الكهربية Electric-quadrupole moments تم تفسيرها بشيء من النجاح وذلك من خلال نموذج الأغلفة. فمثلا عند عدد البروتونـلت 2، 8، 20، 50، و 82 فإن رباعى القطبية Quadrupole : Q يكـــون صفـرًا (الغلاف كروى تماما) وعند الشروع فى بناء غلاف جديد فـإن Q تكـون سالبة (الغلاف ذو شكل أهلولج مفلطح)، وبزيادة إمتلاء الغلاف بالبروتونـلت فإن Q تصبح موجبة(الغلاف ذو شكل أهلولج مستطول) وتصل إلـى القمـة عندما يكون الغلاف قد امتلأ إلى الثلثين (2/3) من النوّيات ثم يبدأ فى التناقص حتى الصفر عند عدد سحرى جديد ويكون الغلاف قد أخذ الشكل الكروى من جديد. أنظر الشكل 19.4 لتوضيح علاقة تشكيل الغلاف وقيمة العزم الكـهربى رباعى الأقطاب.



الشكل 19.4 علاقة عبوة الأغلفة والعزم رباعى القطبية الكهربية

4-4 ملخص :

فى هذا الفصل تمت دراسة طبيعة القوة النووية والتى أدت إلى استنتاج أن القوة النووية تتميز بأنها متساوية $n-p \approx n-n \approx p-p$ وهى ذات مدى قصير، ولها خاصية التشبع، وكذلك هى قوة تبادلية. وحيث إنه ليس هناك نظرية شاملة موحدة لتفسير العديد من الظواهر النووية ، لذا ظهرت بعض النظريات كل منها تفسر بعض من تلك الظواهر. أحد هذه التفسيرات قدمه ما يسمى بنموذج قطرة السائل والذى كان قادرًا على تفسير طاقة الترابط للنوى وساعد فى حساب الكتل النووية والذرية للذرات المتنوعة غير الخفيفة، وكذلك فى تفسير الانحلال الإشعاعى لجسيمات بيتا. كما نجح نموذج الأغلفة فى تفسير البنية النووية للنواة ومن ثم تفسير ظاهرة استقرار النوى.

5-4 مسائل :

1.4 – باعتبار أن القوة الكولومية ذات مدى طويل بحيث إن الطاقة الكولومية $Ec \propto Z(Z-1)\, e^2/R$ ، وأن $R \propto A^{1/3}$ ، وأن Z فى حدود القيمة العددية A (order of) ، وأن القوة النووية هى ذات مدى قصير، احسب E_c/E_N .

2.4 – احسب طاقة التنافر الكولومية بين شحنتى بروتونين بوحدتى Joule , MeV

(الإجابة : 7.68×10^{-14} Joule)

3.4 – احسب الفرق بين مستوىَ الطاقة الأرضية للأم والوليدة مع مقارنة النتائج بذلك الفارق المعملىكما هو مذكورفى الجدول التالى:

النويدة الوالدة	النويدة الوليدة	فارق الطاقة المعملى MeV
^{11}C	^{11}B	1.98
^{19}Ne	^{19}F	3.26
^{39}Ca	^{39}K	6.45

4.4 – اكتب معادلة انحلال – α لكل من الأكتينيوم ^{213}At والبولونيوم ^{212}Po ، وما علاقة هذا الانحلال بالأعداد السحرية، وبطاقة جسيما الفا إذا علمت أن طاقة الفا المصاحبة للأكتيوم هى 9.4MeV ، والأخرى 8.78 MeV .

5.4 – اوجد الأغلفة البروتونية لنواة الزينون $_{20}Xe$ ، وما عدد البروتونات فى المستوى الطاقة الرئيس n=1 .

(الإجابة : 1s1/2(2) 1p3/2(4) 1p1/2(2) 1d5/2(6) 1d3/2(4) 2s1/2(2)
عدد البروتونات = 18)

6.4 – عبِّ كلا من بروتونات ونيوترونات نواة اليورانيوم ^{238}U
فى مستويات طاقاتها المناسبة حسب
أ) خريطة البناء النويّاتى،
ب) ثم بتقارن زخمىّ اللف والمدار.
ج) احسب عدد البروتونات فى مستويات الطاقة الرئيسة
(n=1,2,...) ،
د) استخدم خريطة البناء الإلكترونى لتوزيع الإلكترونات فى مداراتها
هـ) احسب عدد الإلكترونات فى مستويات الطاقة الرئيسة
(n=1,2,... التى تتاظرالأسماء الحرفية K,L,M,N,...).

(الإجابة:
أ) $1s^2\ 1p^6\ 1d^{10}\ 2s^2\ 1f^{14}\ 2p^6\ 1g^{18}\ 2d^{10}\ 3s^2\ 1h^{22}$

ب) افصل المستويات وذلك بتقارن بين زخمى اللف والمدار

ج) عدد البروتونات فى المستوى الرئيس الأول هو 72 وفى المستوى الثانى هو 18 و فى المستوى الرئيس الثالث هو 2 . المجموع الكلى هو 92.

د) استخدم جزء المثلث السفلى من خريطة البناء العامة (راجع الشكل 13.4 وأحصر منبت السهم من على وتر المثلث)

هـ) تتوزع الإلكترونات فى المدارات الرئيسة مبتدئين بالمدار K (n=1) وذلك على النحو التالى:

K(2) , L(8), M(18), N(32), O(22), p(8), Q(2)

7.4 – احسب الكتلة الذرية لنويدة U^{238} ، ثم احسب طاقة الترابط لهذه النويدة ، ثم احسب طاقة الترابط لكل نوّية وحدد موقع هذه القيمة على منحنى طاقة الترابط، ثم بين هل نحتاج إلى تشطير هذه النويدة أم تدميجها للحصول على طاقة مع التعليل.

8.4 – علل لماذا لا يمكننا استخدام معادلة طاقة الترابط أو معادلة الكتلة الذرية لتحديد طاقة الترابط أو كتلة الهيدروجين.

9.4 – اكتب برنامجًا حاسوبيًا لحساب الكتل الذرية والنووية للعناصر التى تخضع لنموذج قطرة السائل، مع مقارنتها بالقيم الموجودة فى الملحق1 من هذا الكتاب، احسب أيضا .B(A,Z) والـ B(A,Z) لكل نوية مع الرسم.

الفصل الخامس

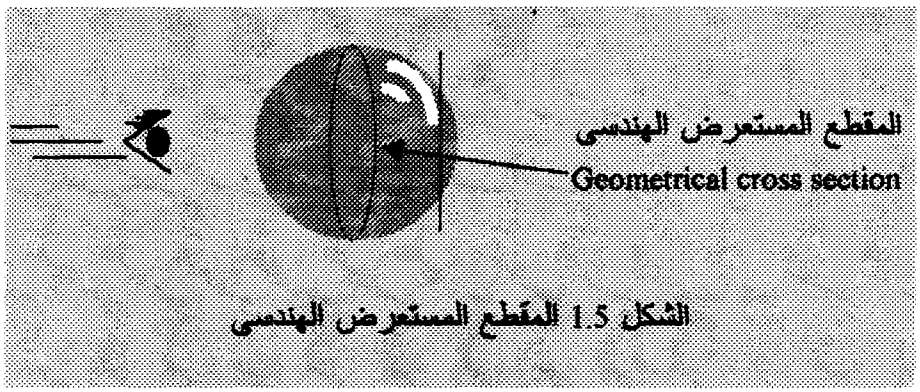
التفاعلات النووية Nuclear Reactions

5-1 المقاطع المستعرضة للتفاعلات.
5-2 أنواع التفاعلات .
5-3 قيمة Q للتفاعل ومستويات طاقة الإثارة.
5-4 نظرية النواة المركبة.
5-5 معادلة برايت ويجنر للمقاطع المستعرضة المجهرية .
5-6 ملخص.
5-7 مسائل.

1-5 المقاطع المستعرضة للتفاعلات Reactions' Cross sections

لحساب احتمالية التفاعلات النووية تم تعريف ما يسمى بالمقطع المستعرض المجهرى Microscopic cross section (σ) كدليل على تلك الاحتمالية. ويمكننا تعريف المقطع المستعرض الهندسى بأنه المقطع المستعرض للنواة الهدف التى يراها الجسيم الساقط ، وباعتبار النواة الهدف كروية الشكل ، فإن المقطع المستعرض هو مساحة الدائرة المرئية للجسيم الساقط، وهى πr^2 حيث إن r تمثل نصف قطر النواة الهدف. من هذا يمكننا استنتاج أن وحدة المقطع المستعرض الممثلة لاحتمالية التفاعل هى وحدة مساحة مثلا cm^2، و تقاس قيم المقاطع المستعرضة بوحدة البارن ($1Barn=10^{-24}\ cm^2$) .

الشكل 1.5 يوضح المقطع المستعرض الهندسى كقياس لاحتمالية تفاعل الجسيم الساقط مع النواة الهدف. حيث تمثل المساحة المرئية للنواة الهدف بالنسبة للجسيم الحيز الذى يحتمل فيه حدوث التفاعل.



الشكل 1.5 المقطع المستعرض الهندسى

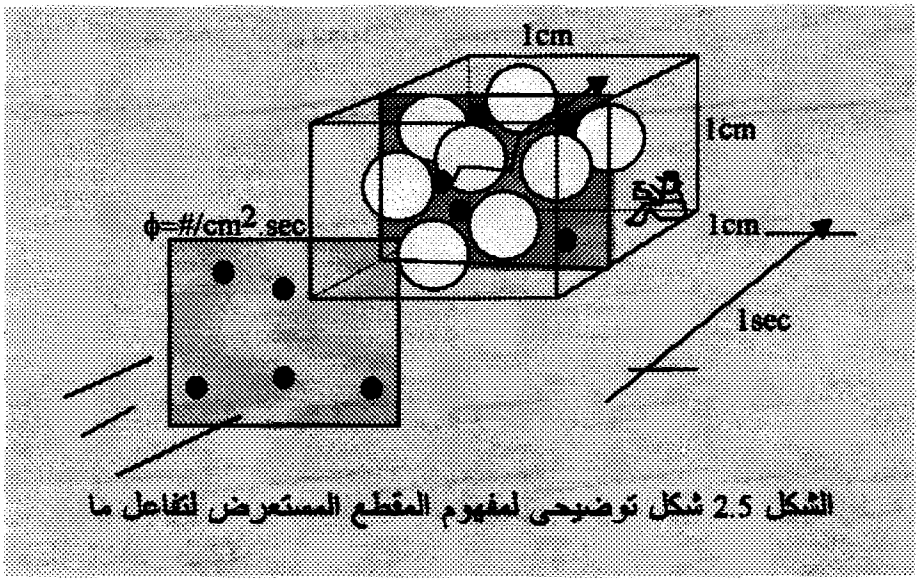
ولكن يمكننا تعريف المقاطع المستعرضة بصورة أدق من خلال معرفة معادلة التفاعل التالية:

$$R[\frac{\#}{cm^3.sec}]=\phi[\frac{\#}{cm^2.sec}]\sigma[cm^2]N[\frac{\#}{cm^3}] \qquad (1.5)$$

حيث تمثل R عدد التفاعلات لكل سم3 لكل ثانية، و تمثل ϕ فيض flux الجسيمات الساقطة، و N تمثل عدد نوى الهدف فى كل سم3، وσ تمثل المقطع المستعرض للتفاعل.
ومن ثم، فإن المقطع المستعرض لتفاعل ما، يمكن استنتاجه كما يلى:

$$\sigma[cm^2] = \frac{R}{N\phi} \qquad (2.5)$$

ومن ثم فإن المقطع المستعرض لتفاعل ما يعرف بأنه: عدد التفاعلات فى سم3 فى الثانية لكل وحدة فيض من الجسيمات الساقطة ولكل وحدة كثافة ذرية من النوى الهدف.
الشكل التالى يوضح مفهوم تعريف المقطع المستعرض لتفاعل ما.



الشكل 2.5 شكل توضيحى لمفهوم المقطع المستعرض لتفاعل ما

كما يوضح الشكل بان هناك مكعبًا حجمه 1سم3 به نوى الهدف وكأن صفيحة مساحتها 1 سم2 بها عدد من الجسيمات الساقطة تمر خلال ثانية واحدة للتفاعل مع النوى بالمكعب. إن حساب عدد التفاعلات بين الجسيمات والنوى

في زمن ثانية واحدة في المكعب يمثل R . وبقسمة R على الكثافة الذرية للنوى N وعلى فيض الجسيمات الساقطة ϕ نحصل على المقطع المستعرض للتفاعل الحادث σ.

بالتأكيد لو تم حساب عدد الاستطارات المرنة، فإن المقطع المستعرض المقاس سيكون المقطع المستعرض للاستطارة المرنة σ_s. ولو تم حساب عدد الانشطارات مثلا فإن المقطع المستعرض المقاس سيكون المقطع المستعرض لانشطار النوى الهدف σ_f . وهكذا يمكن حساب المقاطع المستعرضة للأسر الإشعاعي σ_γ والاستطارة اللامرنة σ_{is}، و الامتصاص σ_a . في حين أنه لو تم حساب كل هذه التفاعلات جميعا فإن المقطع المستعرض المقاس يسمى المقطع المستعرض الكلى.

هذا ويمكننا معرفة القيمة العددية للمقاطع المستعرضة المجهرية σ_t من خلال حساب بسيط للمقطع المستعرض المجهرى الهندسى بدلالة رقم الكتلة A حسب المعادلة التالية:

$$\sigma = \pi R^2 = \pi(1.5A^{1/3} x 10^{-13} cm)^2$$

فمثلا إذا كانت A تساوى 125 فإن σ تساوى $1.8 \times 10^{-24} cm^2$ أو 1.8 b . المقاطع المستعرضة الهندسية فى بعض الحالات تساوى المقاطع المستعرضة للاستطارة ومن ثم فإن القيم المقاسة معمليا يمكن استخدامها لحساب أنصاف أقطار النوى باستخدام المعادلة السابقة.

إن الحسابات الحقيقية للمقاطع المستعرضة تأتى من قياسات عدد الأحداث (التفاعلات) فى السنتميتر المكعب لكل وحدة فيض ولكل وحدة كثافة ذرية. إن مدى المقاطع المستعرضة يتراوح فيما بين أجزاء من البارن إلى 10^5 بارن.

المثال التالى يوضح كيفية استخدام المقاطع المستعرضة المجهرية فى الحسابات.

مثال 1.5

أ) عرف المقطع المستعرض المجهرى لإمتصاص جسيمات الفا

ب) رقيقة من الألومنيوم ذات كثافة $\rho = 2.79\ g/cm^3$ وتزن 5 جرامات وللرقيقة مقطع مستعرض يساوى $10\ cm^2$ قد تم تعرضها لفيض من جسيمات الفا قدره $10^5\ \#/cm^2.sec$ لمدة دقيقة واحدة. أوجد عدد الإمتصاصات الحادثة فى ذلك الزمن علما بأن $\sigma_{Al} = 20\ b$.

الحل:

أ) المقطع المستعرض المجهرى للإمتصاص هو عدد الامتصاصات لكل وحدة حجم لكل وحدة زمن وذلك لوحدة فيض من جسيمات الفا ووحدة كثافة ذرية من النوى الهدف.

ب) عدد الامتصاصات=معدل التفاعل R x الحجم x زمن التعرض للجسيمات

عدد ذرات الألومنيوم هو :

$$NV = \frac{m_{Al}}{M_{Al}} N_{Av} = \frac{5g}{27g/mole} 0.6x10^{24}\ atom/mole = 0.111x10^{24}\ atom$$

وعدد الامتصاصات هو: $\#absorption = \sigma_a NV\phi t$

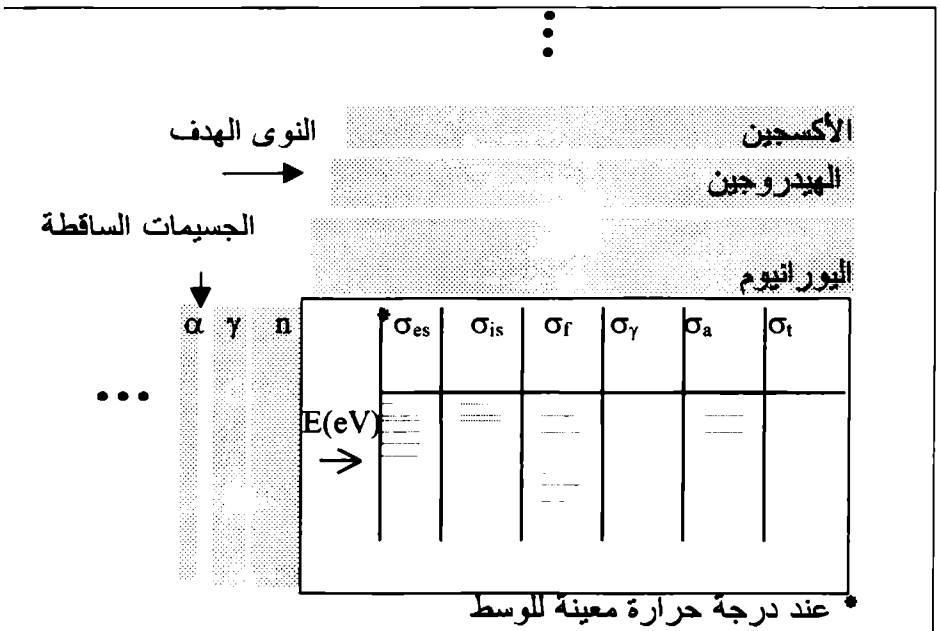
$$\#absorptions = 20x10^{-24}\ cm^2 x.111x10^{24}\ atom \quad x$$

$$10^5 \frac{\#}{cm^2.sec} x60sec = 13.3x10^6$$

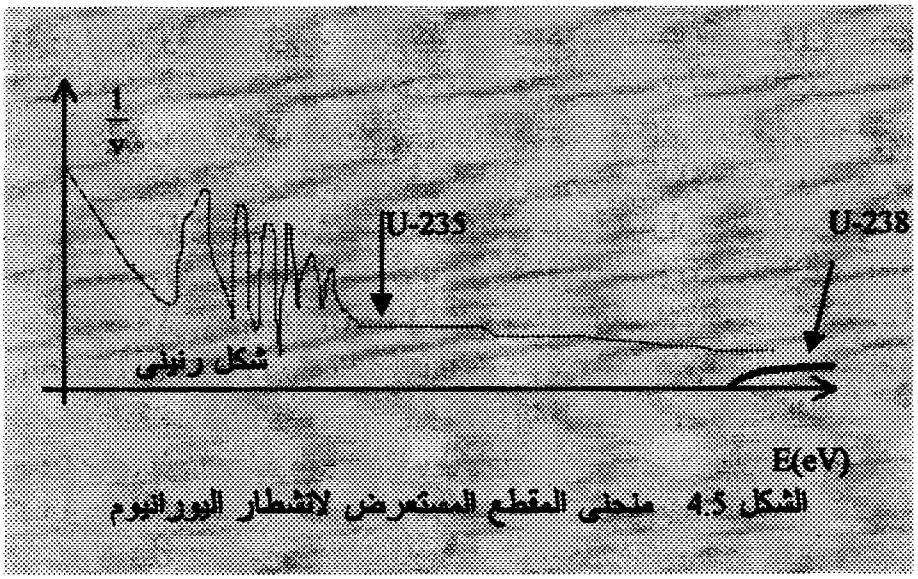
كما تم توضيحه فإن هناك العديد من التفاعلات التى يحدثها النيوترون مثل الانشطار، والاستطارة المرنة والاستطارة اللامرنة والامتصاص والأسر الإشعاعى. هذا وأن المقاطع المستعرضة النووية تم حسابها للعديد من النوى، مثل الهيدروجين ونظائره والأكسجين ، والليثيوم والكربون

واليورانيوم والبلوتونيوم، ...الخ. كما أن التفاعلات ليست مقصورة على النيوترونات فقط بل تتعدى إلى غيره مثل جسيمات الفا والبروتونات، وأشعة جاما، ..الخ. كما أن هذه الجسيمات تتنوع طاقات سقوطها، وعليه فتم حساب المقاطع المستعرضة كدالة فى الطاقة. ليس هذا فحسب ، بل أن حساب المقاطع المستعرضة يعتمد أيضا على درجة الحرارة التى تقاس فيها هذه المقاطع. كل هذه التداخلات أدت إلى إنشاء ما يسمى بمكتبة المقاطع المستعرضة أو ENDF- Library (مكتبة ملفات البيانات النووية المقيمة Evaluated Nuclear Data File Library) . وقد وثقت هذه البيانات للمقاطع المستعرضة فى شكل جداول أو رسومات. الشكل 3.5 يبين مفهوم البيانات الموثقة للمقاطع المستعرضة السالف ذكرها.

كما أن المقاطع المستعرضة يمكن عرضها فى شكل منحنيات، الشكل 4.5 يوضح المقطع المستعرض لانشطار اليورانيوم 235 واليورانيوم 238 بسبب النيوترونات كدالة فى طاقة النيوترونات الساقطة.



الشكل 3.5 بيانات المقاطع المستعرضة المجدولة



الشكل 4.5 منحنى المقطع المستعرض لانشطار اليورانيوم

الشكل يبين أن المقطع المستعرض لانشطار اليورانيوم 235 يعتمد كثيرا على طاقة النيوترون الساقط ، حيث إن المقطع المستعرض يعتمد على الطاقة فى منطقة النيوترونات الحرارية (طاقة ضيئلة) بشكل $\frac{1}{v}$ أو $\frac{1}{\sqrt{E}}$ ، كما أن هناك الشكل الرنينى للمقطع المستعرض Resonance cross section ، حيث إن المقطع المستعرض يعبر عنه بـ :

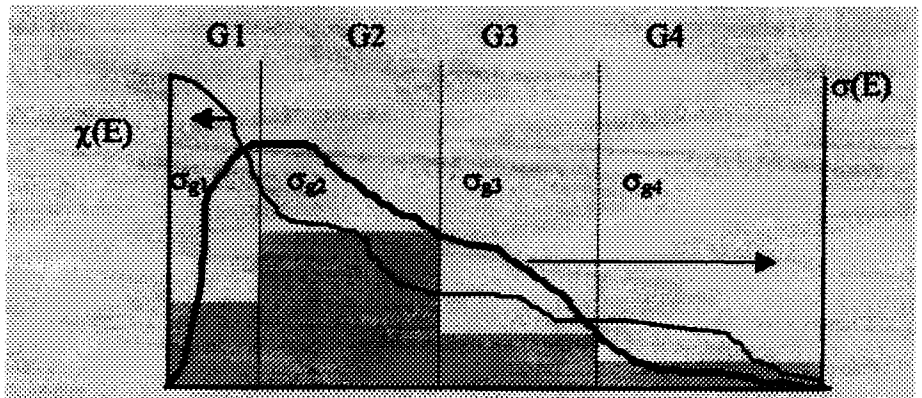
$$\sigma(x,y) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\Gamma_x \Gamma_y}{(E-E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$

هذا ويلاحظ أن المقطع المستعرض لليورانيوم 238 يساوى صفراً حتى تصل طاقة النيوترونات إلى 1MeV حيث يبدأ اليورانيوم 238 فى الانشطار وذلك لارتفاع قيمة المقطع المستعرض للانشطار عن قيمة الصفر، وذلك كما يوضحه الشكل. إن ما تم عرضه يبين مدى أهمية المقاطع المستعرضة وتنوعها واعتمادها على طاقة الجسيمات الساقطة، ويلاحظ ذلك جليا فى حسابات المفاعلات. إن اعتماد المقاطع المستعرضة على الطاقة يتطلب التعامل مع المقاطع المستعرضة بأسلوب يوفر الوقت فى الحسابات ، حيث

إنه لا يمكن إدخال المقاطع المستعرضة كدالة فى الطاقة كما هو مبين بالشكل 4.5، بل يتطلب، لإجراء الحسابات العملية، تقليص قيم المقاطع المستعرضة إلى عدد محدود يعتمد على عدد من طاقات النيوترون المختارة. يتم ذلك بعملية التوسيط Averaging . ولإيجاد متوسط المقاطع المستعرضة لعدد مختار من مجموعات طاقة للنيوترونات Neutron energy groups ،يتم اختيار دالة موازنة weighing function ممثلة بدالة الطيف النيوترونى Neutron Spectrum χ (E) . المعادلة التالية تبين كيفية إيجاد متوسطات المقاطع المستعرضة لعدد من مجموعات طاقة النيوترونات.

$$\sigma_g = \frac{\int_{E_{g-1}}^{E_g} \sigma(E)\chi(E)dE}{\int_{E_{g-1}}^{E_g} \chi(E)dE} \qquad (3.5)$$

حيث يمثل الطرف الأيسر من المعادلة القيمة المتوسطة للمقطع المستعرض للمجموعة g المحصورة بين الطاقتين Eg و Eg-1 . الشكل التالى يوضح نتيجة إجراء حساب توسطة (إيجاد متوسط) المقاطع المستعرضة باستخدام المعادلة 3.5 للحصول على أربع مقاطع مستعرضة متوسطة المعطاة بالشكل المظلل.



الشكل 5.5 متوسطات المقاطع المستعرضة

متوسط المسار الحر (λ) Mean Free Path
والمقطع المستعرض العينى (Σ) Macroscopic Cross Section :

لقد تم التحدث فيما سبق عن المقاطع المستعرضة المتنوعة، هذا وتوجد قيمة مستنتجة من المقاطع المستعرضة وهى متوسط المسار الحر ، والمعرف بمتوسط المسافة التى يسبرها الجسيم حراً قبل أن يحدث له تفاعل ما (مثل الاستطارة، امتصاص،..الخ). هذا التفاعل قد يكون استطارة مرنة، أو انشطار، وهكذا. إذا يمكن تعريف متوسط المسار الحر للاستطارة بأنه متوسط المسافة التى يسيرها الجسيم حرا قبل أن تحدث له استطارة . وتكون وحدة المسار الحر بالطبع هى وحدة مسافة. ويمكن إذا تعريف معادلة المسار الحر من خلال المقطع المستعرض المجهرى σ والكثافة الذرية N كما يلى:

$$\lambda = \frac{1}{\sigma N} = \frac{1}{\Sigma}[cm] \qquad (4.5)$$

هذا ويعرف المقطع المستعرض العينى Macroscopic Cross Section بقيمة Σ وهى معكوس متوسط المسار الحر وله وحدة معكوس مسافة $[cm^{-1}]$.
إذا فهناك مسار حر للاستطارة λ_s ومسار حر للامتصاص λ_a وكذلك مسار حر للتنقل λ_{tr} ، والذى له علاقة بالمسار الحر للاستطارة حسب المعادلة التالية:

$$\lambda_{tr} = \frac{\lambda_s}{(1-\mu)} = \frac{1}{\Sigma_s(1-\overline{\cos\theta})} = \frac{1}{\Sigma_{tr}}[cm] \qquad (5.5)$$

حيث إن ،

$$\overline{\cos\theta} = \frac{2}{3A} \qquad (6.5)$$

وحسب المعادلة السابقة فإن المسار الحر للتنقل للنوى الثقيلة يساوى المسار الحر لاستطارتها $\mu=0$ ،فى حين أنه فى حالة النوى الخفيفة مثل نواة الهيدروجين $A=1$ (إستطارة أمامية) فإن $\lambda_{tr}=3\lambda_s$. وأيضا بناء على نظرية الحركية Kinetic Theory ، فإن معامل الانتشار Difffusion Coefficient (D) بدلالة السرعة يساوى:

$$D = \frac{\lambda_{tr}}{3} v \qquad (7.5)$$

2-5 أنواع التفاعلات :

تتنوع التفاعلات النووية كما هو موضح فيمايلي:

$$X + x \Rightarrow \left\{ \begin{array}{c} X + x \\ X^{*} + x \\ Y + y \\ W + Z + x's \\ etc... \end{array} \right\} \qquad (8.5)$$

حيث يمثل التفاعل الأول استطارة مرنة Elastic Scattering، والثانى استطارة لامرنة Inelastic Scattering، حيث تبقى النواة X^* فى حالة إثارة ،أما الثالث فيمثل تفاعل تحويل Transmutation ، يليه تفاعل الانشطار Fission ، وغيره.

الجدول التالى يبين المقاطع المستعرضة لعدد من النوى (المقاطع المستعرضة الحرارية Thermal لنواة حرة):

الجدول 5-1 مقاطع مستعرضة للاستطارة بوحدة البارن ($b=10^{-24}$ cm^2)

النواة Nuclide	المقطع المستعرض σ_s عند الطاقات التالية		
	حرارى Thermal	0.1 MeV	1.0 MeV
^{1}H	20.4	12.5	4.3
^{2}H	3.39	3.4	3.0
^{4}He	0.76	0.8	(6.2)
^{6}Li	0.72	1	1.1
Be	6.14	5.3	3.5
^{10}B	2.2	2.5	2.4
C	4.75	4.5	2.6
O	3.76	4	(7)
Fe	10.9	(5.2)	(2.3)
^{232}Th	12.7	12	6.8
^{233}U	8.2	8.5	4.5
^{235}U	13.8	10	5.4
^{238}U	8.9	12	7
^{239}Pu	7.7	10	5

الأرقام بين القوسين لطاقات بقرب الرنين (Resonances)

الجدول التالى يبين بعض المقاطع المستعرضة لبعض من التفاعلات:

الجدول 5-2 بعض المقاطع المستعرضة لبعض من التفاعلات

التفاعل	σ	التفاعل	σ	التفاعل	σ
$^{1}H(n,\gamma)$	332 mb	$^{113}Cd(n,\gamma)$	19900 b	$^{233}U(n,\gamma)$	47 b
$^{6}Li(n,\alpha)$	940 b	$^{115}In(n,\gamma)$	202 b	$^{235}U(n,\gamma)$	99 b
$^{10}B(n,\alpha)$	3837 b	$^{135}Xe(n,\gamma)$	2.65Mb	$^{238}U(n,\gamma)$	2.7 b
$^{233}U(n,f)$	531 b	$^{197}Au(n,\gamma)$	99.8 b	$^{239}Pu(n,\gamma)$	269 b
		$^{235}U(n,f)$	582 b	$^{239}Pu(n,f)$	743 b

3-5 قيمة Q للتفاعل ومستويات طاقة الإثارة

فى التفاعل التالى :

$$x + X \Rightarrow Y + y \qquad (9.5)$$

يمكن الإستدلال على قيمة Q للتفاعل من خلال معادلة حفظ الطاقة التالية:

مجموع الطاقة للمتفاعلات = مجموع الطاقة للناتج

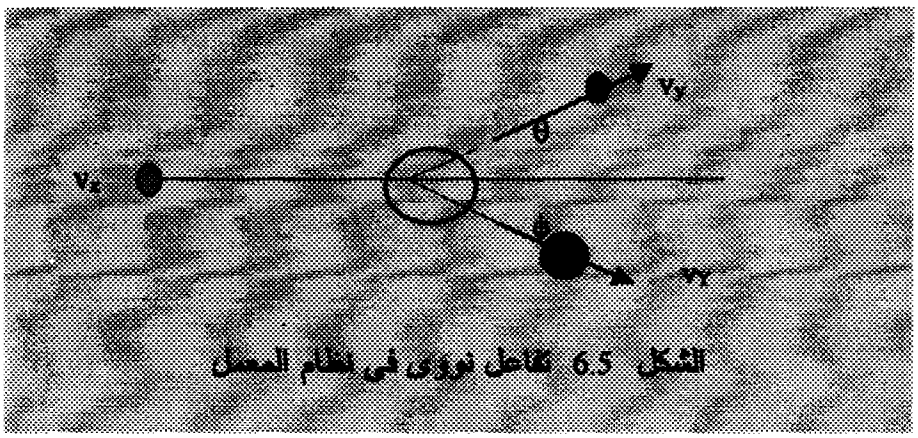
$$E_Y + M_y c^2 + E_y + m_y c^2 = M_X c^2 + E_x + m_x c^2 \qquad (10.5)$$

حيث أفترض أن النواة الهدف ساكنة (طاقتها الحركية E =صفر، ولها فقط طاقة الكتلة الساكنة فقط $M c^2$) .
يمكن حساب قيمة Q من المعادلة التالية:

$$Q = E_Y + E_y - E_x = (M_X + m_x)c^2 - (M_Y + m_y)c^2 \qquad (11.5)$$

من المعادلة يعرف التفاعل بأنه تفاعل ماص للطاقة Endoergic عندما تكون Q سالبة ، فى حين يكون تفاعل منتج للطاقة Exoergic عندما تكون Q موجبة.

وحيث إنه من الصعب قياس الطاقة الحركية للنواة الناتجة E_Y (أحد حدود معادلة 11.5) ، فيمكن الاستعاضة عنه عن طريق استخدام معادلة حفظ الزخم (كمية الحركة) . الشكل التالى يستعان به لإيجاد المعادلات المناسبة:



الشكل 6.5 تفاعل نووى فى نظام المعمل

معادلة حفظ الزخم الأفقى هى:

$$m_x v_x = m_y v_y \cos\theta + M_Y v_Y \cos\phi \qquad (12.5)$$

معادلة حفظ الزخم العمودى هى:

$$m_y v_y \sin\theta = M_Y v_Y \sin\phi \qquad (13.5)$$

بتربيع معادلتى الزخم وجمعهما ثم إضافة الحد $(m_y v_y)^2 \cos^2\theta$ وطرحه نحصل على:

$$(M_Y v_Y)^2 = (m_x v_x)^2 + (m_y v_y)^2 - 2(m_y v_y)^2 \cos^2\theta - 2m_y M_Y v_y v_Y \cos\theta \cos\phi \qquad (14.5)$$

وباستخدام معادلة حفظ الزخم الأفقى للتعبير عن الحد $M_Y v_Y \cos\phi$ فى المعادلة السابقة، وأيضا $E = \frac{1}{2}mv^2$ نتحصل على:

$$E_Y = E_x \frac{m_x}{M_Y} + E_y \frac{m_y}{M_Y} - \frac{2}{M_Y}\sqrt{E_x E_y m_x m_y}\cos\theta \qquad (15.5)$$

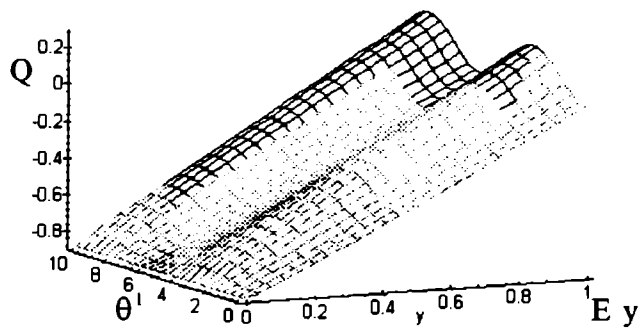
وبالتعويض فى معادلة قيمة Q (11.5) نحصل على:

$$Q = E_y\left[1+\frac{m_y}{M_Y}\right] - E_x\left[1-\frac{m_x}{M_Y}\right] - \frac{2}{M_Y}\sqrt{E_x E_y m_x m_y}\cos\theta \qquad (16.5)$$

وفى حالة التفاعل X(x,y)Y مثل $^{27}Al(\alpha,p)^{30}Si$ ولطاقة سقوط جسيم معينة (1MeV) فإنه يمكن كتابة قيمة Q كدالة فى طاقة الجسيم الناتج وزاوية ارتداده كما يلي:

$$Q = aE_y - b - c\sqrt{E_y}\cos\theta \qquad (17.5)$$

وبرسم العلاقة السابقة لتغير فى طاقة الجسيم ما بين 0-1 MeV ، وتغير فى زاوية الارتداد مابين 0-10 درجات ، نحصل على الشكل التالى:



الشكل7.5 Q كدالة فى Ey و θ

فى العديد من التفاعلات النووية قد تنتج العديد من الجسيمات بطاقات مختلفة، ومن ثم فإن أعلى قيمة Q (Q_{max}) تناظر الحالة الأرضية Ground State للنواة الناتجة Product Nucleus ،وهى تصاحب خروج الجسيمات بأعلى طاقة ($E_y(max)$ ، فى حين أن باقى قيم Q تناظر مستويات طاقة الإثارة لتلك النواة.كما تُحدد مستويات طاقة الإثارة بحساب الفارق بين Q_{max} و Q التالية . الشكل التالى يوضح ما سلف ذكره.

الشكل 8.5 مستويات طاقة الإثارة للنواة الناتجة

مثال 2.5

فى التفاعل التالى :

$$^{27}_{13}AL+^{4}_{2}\alpha \rightarrow \left[^{31}_{15}P\right]\rightarrow ^{30}_{14}Si+^{1}_{1}H+Q$$

إذا علمت أن طاقة جسيمات الفا هى 7.3 MeV، وكانت طاقات البروتونات المنبعثة عند زاوية 0° وكذلك قيم Q حسب ما يعرضه الجدول التالى:

طاقة البروتونات MeV	قيمة Q MeV
9.34	2.22
6.98	-.06
5.55	-1.44
4..65	-2.4

ارسم مستويات الطاقة للنواة الناتجة Si .

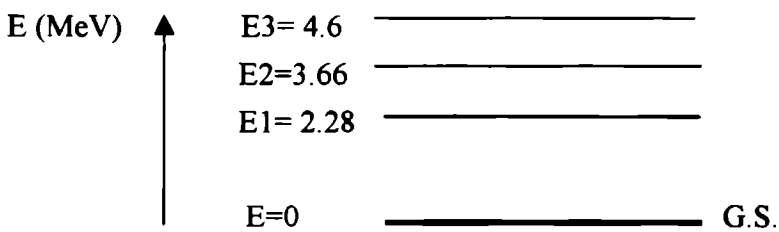
الحل:

أعلى قيمة لـ Q تناظر الحالة الأرضية E_0، كما أن مستوى طاقة الإثارة الأول E1 يمكن حسابه من الفارق بين Qmax والتى تليها بمعنى:

$$E_1=2.22-(-.06)=2.28 \text{ MeV}$$

وعلى نفس المنوال يمكن حساب باقى مستويات الإثارة $E_2 = 3.66$ MeV و $E_3 = 4.6$ MeV.

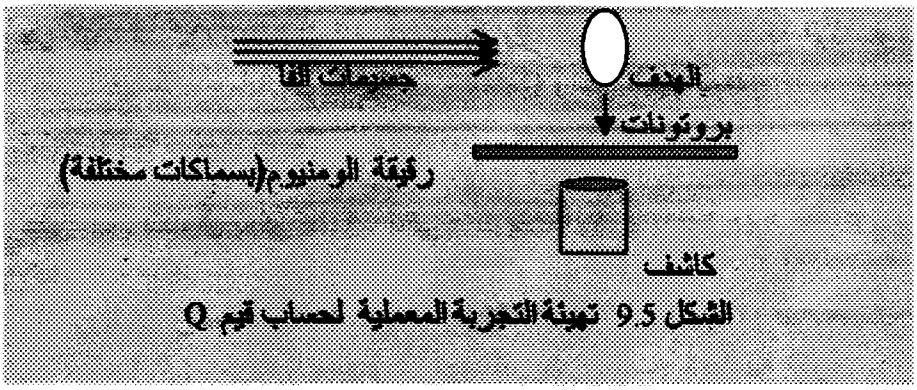
وبالتالى يمكن رسم مخطط مستويات الطاقة للنواة الناتجة كما هو موضح فى الشكل التالى ،بحيث المستوى الأسود العريض يمثل الحالة الأرضية والمستويات الأعلى تمثل مستويات الإثارة .



(لوحظ فى هذه التجارب أن البروتونات عالية الطاقة لم يصحبها أى أشعة جاما، فى حين أن البروتونات منخفضة الطاقة صاحبتها أشعة جاما، وعليه فإن ذلك يؤكد أن البروتونات منخفضة الطاقة تكون مصاحبة لحالات إثارة نواة السليكون Si ، فى حين أن البروتونات الأعلى فى الطاقة تصاحب الحالة الأرضية لنواة السليكون).

حسابات Q من التجارب المعملية :

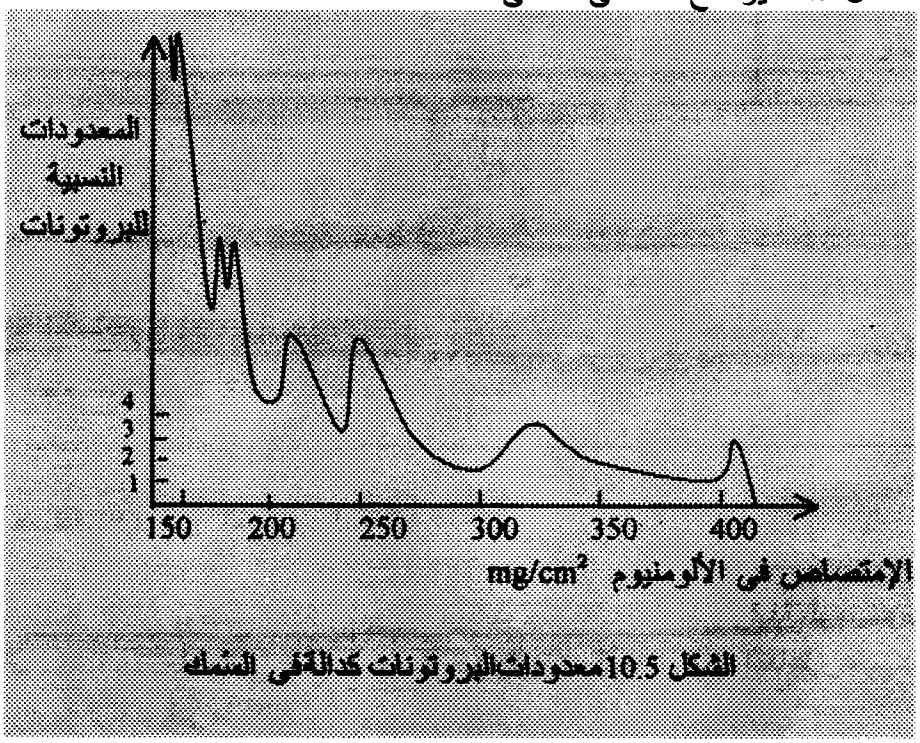
الشكل التالى يوضح إعداد تجربة إسقاط جسيمات الفا على رقيقة الومنيوم بسمكات مختلفة والتى تنتج جسيمات البروتونات كأحد نواتج التفاعل عند زاوية ارتداد قدرها 90° .



الشكل 9.5 تهيئة التجربة المعملية لحساب قيم Q

وبرسم المعدودات كدالة فى سمك رقيقة الألومنيوم(كتلة وحدة المساحة $g.cm^{-2}$) تظهر مجموعة من القمم فى المنحنى لها علاقة بالمدى أو الطاقة للمجموعات المختلفة من البروتونات

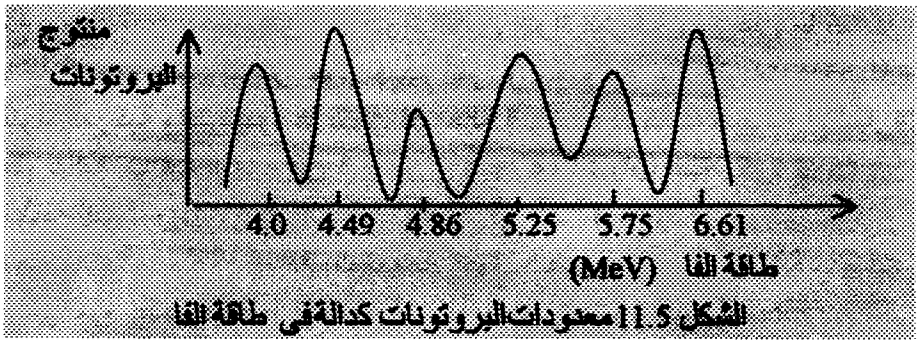
الشكل 10.5 يوضح المنحنى المعنى.



الشكل 10.5 معدودات البروتونات كدالة فى السمك

وحيث إن كل قمة تناظر طاقة معينة للبروتونات فيمكن إذاً حساب قيم Q ومن ثم حساب مستويات طاقة الإثارة للنواة الناتجة فى ذلك التفاعل، كما تم شرحه فى السابق.

هذا وقد لوحظ فى تجارب قذف رقائق الألومنيوم بجسيمات الفا، أن منتوج البروتونات Protons Yield له قمم عند طاقات لألفا(بوحدة MeV) قدرها 4.0 و4.49 و4.86 و5.25و 5.75 و 6.61 . هذه الطاقات تدعى طاقات الرنين Resonance energies . النتائج المتحصل عليها باستخدام طاقات الرنين أفضل، ذلك لأنه عند طاقات الرنين تحدث أحداث (تفاعلات) أكثر من تلك التى تحدث عند طاقات بينية (بين عدد من الرنينات). الشكل 11.5 يوضح ذلك.



الشكل 11.5 معشودات البروتونات كدالة فى طاقة الفا

4-5 نظرية النواة المركبة :

تتنوع منتوجات تفاعل ما مما استوجب إيجاد تفسير لذلك فمثلا يتفاعل البروتون مع الألومنيوم منتجاً عددا من العناصر حسب ما يلي:

$$^{27}_{13}AL+^{1}_{1}H\rightarrow^{24}Mg$$

$$^{27}_{13}AL+^{1}_{1}H\rightarrow^{27}Si$$

$$^{27}_{13}AL+^{1}_{1}H\rightarrow^{28}Si$$

$$^{27}_{13}AL+^{1}_{1}H\rightarrow^{24}Na$$

لذا اقترح بوهر أن هناك خطوتين لحدوث تفاعل نووى ما، وهما:

1- سقوط الجسيم على النواة الهدف وتكون النواة المركبة
2- انحلال النواة المركبة الى منتوجات التفاعل (نواة ناتجة+جسيم ناتج)
فمثلا:

الخطوة الأولى
$$^{27}_{13}AL+^{4}_{2}\alpha \rightarrow \left[^{31}_{15}P\right]\rightarrow ^{30}_{14}Si+^{1}_{1}H+Q$$
الخطوة الثانية

إذًا بمجرد أسر الجسيم من قبل النواة تتكون النواة المركبة وسرعان ما تنتشر طاقة الجسيم حتى تتركز حول جسيم آخر أو مجموعة من النويّات داخل النواة المركبة والتى بدورها تكون فى حالة إثارة، فإذا كانت طاقة الإثارة هذه عالية بما فيه الكفاية فإن الجسيم أو مجموعة النويّات المتمركزة حولها الطاقة تتبعث وبذلك تتحل النواة المركبة إلى النواة الناتجة والجسيم أو الجسيمات المنبعثة. الطاقة المتجمعة حول الجسيم أو مجموعة الجسيمات والتى تقوم بتحريرها من النواة المركبة تسمى طاقة الفصل Separation energy أو طاقة التفكك Dissociation energy .
إنه بمجرد أسر الجسيم الساقط فإنه يمنح طاقة إثارة للنواة المركبة والتى تساوى طاقة ترابط الجسيم الساقط للنواة مضافة إلى طاقته الحركية، وكمثل لذلك ففى التفاعل التالى:

$$^{A}_{Z}X+^{1}_{0}n \rightarrow \left[^{A+1}_{Z}X\right] \qquad (18.5)$$

فإن طاقة إثارة النواة المركبة $E_{excit.}$ تحسب كما يلى:

$$E_{exci.} = m(^{A}X) + m(^{1}n) - m(^{A+1}X) + \underbrace{E_{K.E.}}_{\text{طاقة حركة الجسيم}} \qquad \underbrace{\qquad\qquad}_{\text{طاقة ترابط الجسيم}} \qquad (19.5)$$

وبمجرد تكون النواة المركبة فإن الطاقة المتمركزة حول الجسيم سريعا ما تتوزع. فبعد حين قد تتمركز حول جسيم آخر أو حول مجموعة من الجسيمات. إذا كانت طاقة الإثارة عالية، فإن الجسيم أو مجموعة الجسيمات يمكنها الهروب ومن ثم فإن النواة المركبة تتحل إلى النواة الناتجة والجسيم أو الجسيمات الهاربة. الطاقة المحررة والمتمركزة حول الجسيم او الجسيمات تسمى بطاقة الفصل Seperation Energy .

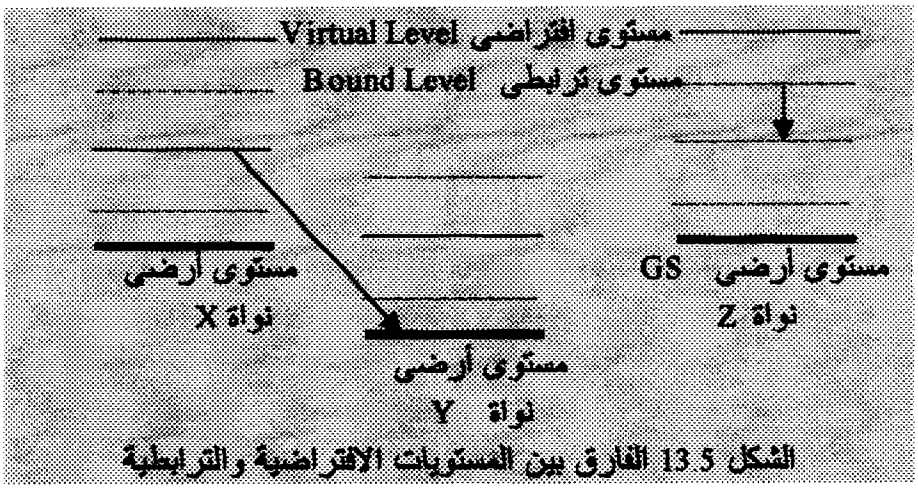
وكنتيجة لتوزع طاقة الإثارة حول جسيم بعينه أو حول مجموعة جسيمات بطريقة عشوائية، لذا فإن النواة المركبة لها زمن عمر نسبيا أطول مقارنة بالزمن النووى الطبيعى (زمن اختراق الجسيم الساقط للنواة) ، أنظر الشكل التالى:

الشكل 12.5 الزمن الطبيعي النووى

وبقسمة قطر النواة على سرعة الجسيم الساقط فنحصل على الزمن الطبيعى النووى t_n .

ففى حالة طاقة الجسيم تساوى 1MeV فإن سرعته هى 10^9 cm/sec، وبقطر نواة قدره 10^{-12} cm فإن زمن الاختراق حوالى 10^{-21}sec ، وفى حالة النيوترونات البطيئة فيحتاج إلى 10^{-17} sec لاختراق النواة. الا أن عمر النواة المركبة يتراوح ما بين 10^{-15} sec إلى 10^{-14} sec وهذا يعنى أنه زمن كبير نسبيا مقارنة بزمن اختراق النواة. إذاً ، فإنه خلال هذا الزمن الطويل فإن النواة المركبة (تنسى) كيف تكونت ومن ثم تتحل بطريقة مستقلة عن

كيفية تكونها، وهذا ما يفسر تنوع نواتج الانحلال على الرغم من سقوط نفس الجسيم كما ذكر أعلاه فى تفاعل الألومنيوم مع البروتون.
وعلى الرغم من طول زمن عمر النواة المركبة النسبى، فإنها تنحل عن طريق تحرير جسيم أو أكثر، ويقال إن النواة المركبة فى حالة شبه ساكنة Quasi-stationary . هذه الحالات شبه ساكنة تناظر ما يسمى بالمستويات الافتراضية Virtual Levels ، والتى تختلف عن مستويات الترابط Bound Levels . حيث إن المستويات الافتراضية تؤدى إلى انحلال النواة عن طريق تحرير جسيم ما ، فى حين أن المستويات الترابطية تنحل عن طريق تحرير أشعة جاما. الشكل التالى يوضح الفارق.



الشكل 13.5 الفارق بين المستويات الافتراضية والترابطية

الشكل يوضح أن النواة X تنحل بتحرير جسيم إلى النواة Y فى حالتها الأرضية Ground State وذلك من مستوى افتراضى، فى حين أن النواة Z تفقد أشعة جاما لتتحول إلى مستوى إثارة أقل لنفس النواة Z .

و عليه، ونظرًا للطرق المختلفة التى تتوزع فيها طاقة الإثارة فى داخل النواة، فإن هناك عددًا من المستويات الافتراضية المناظرة (كل واحدة منها تناظر كيفية توزيع طاقة الإثارة). هذه المستويات الافتراضية لها علاقة قريبة بظاهرة الرنين Resonance Phenomena . إذا كانت طاقة الجسيم

الساقط x كافية بقدر يجعل الطاقة الكلية للجسيم والنواة X تساوى طاقة إثـارة أحد المستويات للنواة المركبةCN، فإن احتمالية تكون النواة المركبـة تكـون أعلى بكثير بالمقارنة بحالة قصور تلك الطاقة عن مساواتها لأحد المستويات. ومن ثم يمكن القول بأن طاقة الإثارة لمستوىما للنواة المركبة يساوى الطاقـة الحركية للجسيم الساقط مضافـًا اليه طاقة ترابط الجسيم للنواة الهدف، وذلـك حسب المعادلة التالية:

$$E_{excit.} \cong KE_{Particle} + BE_{particle} \qquad (20.5)$$

وحتى تكون المعادلة أكثر دقة فإن جزءًا من طاقة الجسيم الساقط تسبب فـى حركة للنواة المركبة، وعليه فإن قيمة تلك الطاقة يمكن استنتاجها عن طريـق استخدام قانون حفظ الزخم وحفظ الطاقة. فباعتبار أن النواة الهدف ساكنة فإن قانون حفظ الزخم يبين أن زخم الجسيم الساقط يساوى زخم النواة المركبـة، ومن ثم فإن سرعة النواة المركبة يمكن حسابها من المعادلة التالية حيث V_{CN} و v_x تمثلان سرعتى النواة المركبة وسرعة الجسيم الساقط علـى التوالـى، كما أن M_{CN} ، و m_x تمثلان كتلتى النواة المركبة والجسيم الساقط.

$$V_{CN} = \frac{m_x v_x}{M_{CN}} \qquad (21.5)$$

إذًا الطاقة التى ستساهم فى إثارة النواة المركبة ستكون الفارق بيـن الطاقـة الحركية للجسيم والطاقة الحركية للنواة المركبة، وباعتبـار أن كتلـة النـواة المركبة هى حاصل جمع كتلة الجسيم الساقط m_x والنواة الـهدف M_X فـإن الطاقة الفعلية 'E الداخلة فى إثارة النواة المركبة تكـون حسـب المعادلـة التالية:

$$E' = \frac{M_X}{m_x + M_X} E_x \qquad (22.5)$$

حيث E_x تمثل الطاقة الحركية للجسيم الساقط. لذلك يمكننا الآن إعادة كتابـة المعادلة الممثلة لطاقة الإثارة (20.5) بحيث تكون أدق حسب المعادلة التالية:

$$E_{excit.} = E' + BE_{particle} \qquad (23.5)$$

عرض المستوى Γ Level Width :

كل حالة إثارة للنواة المركبة سواءً كانت افتراضية أو ترابطية لـــها متوســط عمر τ، وهذا يعنى أنه فى المتوسط توجد فترة زمنية والتى فيها تبقى النــواة فى حالة إثارة قبل أن تتحل بانبعاث إما جسيم أو أشعة جاما. لقد تم التعــارف فى حالة التعامل مع مستويات الطاقة على استخدام كمية تتناسب مع متوســط العمر وهى كمية عرض المستوى Γ تحمل وحدة الطاقة (مثــلا MeV). هذا ويعبر عن عرض المستوى(باســـتخدام مبــدأ اللاتــأكد Uncertainty Principle) بالمعادلة التالية:

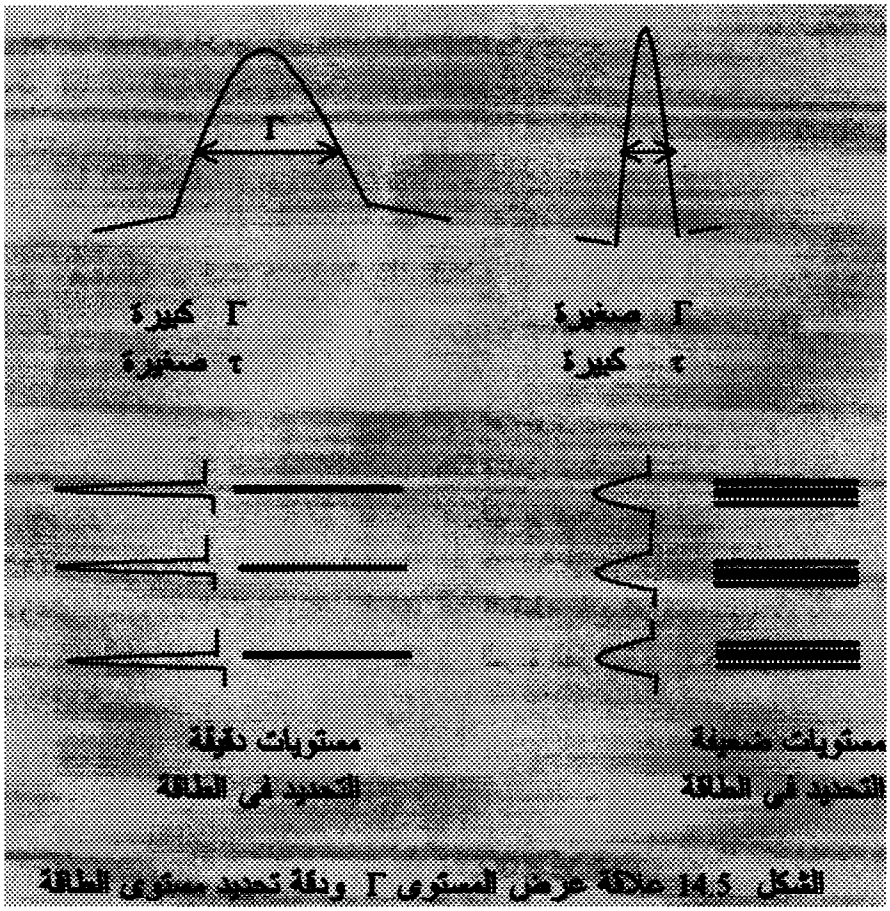
$$\Gamma = \frac{h}{2\pi\tau} \qquad (24.5)$$

المعادلة تبين أنه عندما تكون الحالة State ذات متوسط عمر τ صغيرفــإن Γ تكون كبيرة وهذا يعنى أن الحالة ضعيفة التحديد فى الطاقة، وعلى عكس مــن ذلك فإن الحالة ذات متوسط عمر كبير تعنى صغر قيمة Γ ممــا يعنــى أن الحالة دقيقة التحديد فى الطاقة، الشكل التالى يفسر هذه الفروقات.

إن مفهوم عرض المستوى مفيـــد لأن مــن قياســات الرنيــن Resonance (كامل العرض عند منتصف قمة الرنين Γ Full width at half maximum) يمكن حساب τ متوسط العمر لحالة الإثارة، وذلك حسب المعادلة التالية:

$$\tau(\text{sec}) = \frac{6.6\text{x}10^{-16}}{\Gamma(\text{eV})} \qquad (25.5)$$

وعليه ففى حالة المستوى العريض فإن 10^4 eV = Γ للنوى الخفيفــة فــإن $\tau=6.6\text{x}10^{-20}$ sec ، فى حين أنه فى حالة المستوى الدقيــق 1eV. = Γ ممــا يعنى أن$\tau=6.6\text{x}10^{-15}$ sec. أيضا متوسط المسافة بين مستويات الطاقة تدعــى تباعد المستوى Level Spacing .



الشكل 14.5 علاقة عرض المستوى Γ ودقة تحديد مستوى الطاقة

لكل حالة انحلال توجد احتمالية لذلك الانحلال، ومن ثم يناظر ذلك عـــرض مستوى جزئى Γy Partial width ، مما يبين أن العـــرض الكلـــى يســـاو المجموع الجزئى، بمعنى:

$$\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_\alpha + \Gamma_p + ... \qquad (26.5)$$

حيث الرموز التحتية تبين نوعية الجسيم الخارج من النواة المركبة مثل جام والفا وبروتون على سبيل المثال.

إن دراسة ظاهرة الرنين فى التفاعلات النووية تتضح أهميتها الآن لأنها تعطى بيانات عن عرض المستويات وكذلك تباعد المستويات، وهذا ما حدا بكل من العالمين برايت و ويجنر Breit and Wigner لاستنتاج المعادلة الرياضية التى تحكم الرنين.

5-5 معادلة برايت و ويجنر للمقاطع المستعرضة المجهرية : Breit and Wigner Formula

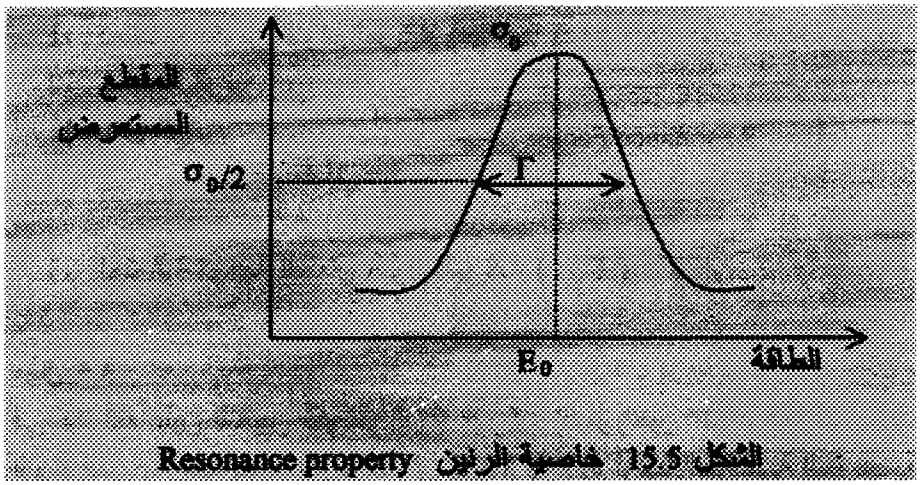
إن مفهوم المقاطع المستعرضة و عرض المستوى يمكن تطبيقه على الرنين Resonance بطريقة حسابية Qualitative وليس فقط بطريقة وصفية؛ حيث إن احتمالية التفاعل X(x,y)Y يمكن تعريفها بواسطة المقطع المستعرض σ (x,y) . وبالرجوع إلى نظرية النواة المركبة فإنه ونتيجة للخطوتين اللازمتين لحدوث التفاعل يمكن التعبيرعن المقطع المستعرض للتفاعل بأنه حاصل ضرب المقطع المستعرض لتكوين النواة المركبة و الاحتمالية النسبية لانبعاث الجسيم y ، وذلك كما يلي:

$$\sigma(x,y) = \sigma_c(x)\frac{\Gamma_y}{\Gamma} \qquad (27.5)$$

وفى حالة الرنين؛ فقد قام برايت و ويجنر باستنتاج معادلة نظرية لحساب المقطع المستعرض لتفاعل ما وذلك لمستوى أحادى لرنين تفاعل جسيم ساقط بزخم زاوى صفرى Zero angular momentum ، ويعبر عن ذلك المقطع المستعرض بالمعادلة التالية:

$$\sigma(x,y) = \frac{\lambda^2}{4\pi}\frac{\Gamma_x\Gamma_y}{(E-E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \qquad (28.5)$$

حيث E و E_0 تمثلان طاقة النيوترون الساقط والطاقة المناظرة لقمة الرنين (أنظر الشكل الموضح).



الشكل 15.5 خاصية الرنين Resonance property

أيضا λ هى الطول الموجى لدى بروليه للجسيم الساقط والذى يساوى:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \qquad (29.5)$$

وبالتعويض عن كتلة النيوترون m_n وبقيمة ثابت بلانك h فإن الطول الموجى للنيوترون بالسنتميترات يمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$\lambda(cm) = \frac{2.87x10^{-9}}{\sqrt{E(eV)}} \qquad (30.5)$$

لذا فنيوترون بطاقة 10^4 eV له طول موجى $\lambda=2.87x10^{-11}$cm فى حين أن النيوترون بطاقة 1MeV يكون طوله الموجى $\lambda= 2.87x10^{-12}$ cm .
وحيث إن σ تتناسب طرديا مع λ^2 نجد من حسابات الطول الموجى أن قيمة المقطع المستعرض σ فى حدود 10^{-24} cm^2، أو البارن. القيمة الفعلية للمقطع المستعرض تعتمد على باقى حدود المعادلة (28.5) . حيث إن المعادلة تحمل فى طياتها ثلاثة عوامل وهى:

1. احتمالية تكوين النواة المركبة (حد λ)
2. خاصية الرنين

(معامل الرنين $\frac{1}{(E-E_0)^2+\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$ Resonance Factor)

3. احتمالية نوعية انحلال النواة المركبة (Γ_y)

مثال 3.5

فى كلا التفاعلين التاليين تكونت النواة المركبة للنيتروجين-14 ، فإذا كانت النواة المركبة عند طاقة إثارة تساوى 12 .8 MeV، أوجد الطاقة الحركية اللازمة للجسيم الساقط لكلا التفاعلين:

التفاعل الأول $^{10}B(\alpha,n)^{13}N$

التفاعل الثانى $^{12}C(d,p)^{13}C$

الحل:

التفاعل الأول $^{10}B+^{4}\alpha \Rightarrow [^{14}N] \Rightarrow ^{1}n+^{13}N$

التفاعل الثانى $^{12}C+^{2}d \Rightarrow [^{14}N] \Rightarrow ^{1}p+^{13}C$

طاقة ترابط الفا BE (α) :

$$BE(\alpha) = m_B + m_\alpha - m_{^{14}N}$$

$$= (10.016109 + 4.0038727 - 14.0075179)[amu] x \frac{931Mev}{amu}$$

$$= 11.6 \quad MeV$$

طاقة ترابط الديوتيريوم BE (d) :

$$BE(d) = m_c + m_d - m_{^{14}N}$$

$$= (12.0038065 + 2.0147361 - 14.0075179)[amu] x \frac{931Mev}{amu}$$

$$= 10.26 \quad MeV$$

وحسب معادلة طاقة إثارة النواة المركبة (23.5):

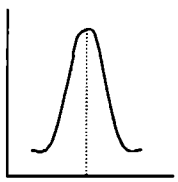
$$E_{excit.} = \frac{M_X}{m_x + M_X} E_x + BE_{particle}$$

فإن طاقة الفا هى:

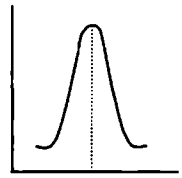
$$12.8 = \frac{10}{10+4} E_\alpha + 11.6 \Rightarrow E_\alpha = 1.68 \quad MeV$$

وكذلك طاقة الديوتيريوم هى:

$$12.8 = \frac{12}{12+2} E_d + 10.26 \Rightarrow E_d = 2.96 \quad MeV$$



E_α=1.68MeV



E_d=2.96 MeV

6-5 ملخص :

لقد تم استعراض التفاعلات النووية فى هذا الفصل مستهلين عرض تعريف المقاطع المستعرضة المجهرية والتى تمت دراستها باستفاضة من قبل العلماء حول العالم مما أدى إلى نشوء ما يسمى بمكتبة البيانات النووية المقيمة ENDF Library . هذا وقد تم استنتاج المعادلات اللازمة لحساب قيمة Q لتفاعل ما عن طريق قانونى حفظ الزخم وحفظ الطاقة. وأخيرًا تم عرض نظرية النواة المركبة وتفسيرها للتفاعلات النووية.

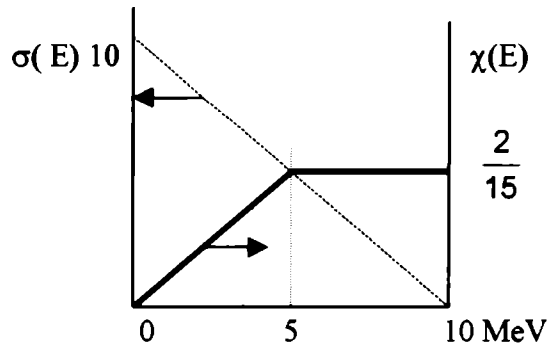
7-5 مسائل :

1.5 -عرف المقطع المستعرض لتفاعل الاستطارة المرنة.

2.5 - الشكل التالى يوضح المقطع المستعرض المرن كدالة فى الطاقة ، وأيضا يوضح $\chi(E)$ كدالة فى الطاقة، اوجد:

أ) متوسط المقطع المستعرض لمجموعة طاقة واحـــدة G1 تمثـل المدى من 0 إلى 10 MeV .

ب) متوسط المقطعين المستعرضين لمجموعتين G1,G2 فى المدى مابين 0 و 5 MeV لمجموعة G1والمدى مابين 5 و 10 MeV لمجموعة G2.



(الحل: أ- σ_{G1}= 3.9 b ، ب- σ_{G1}= 6.7 b , σ_{G2}= 2.5b)

3.5 - فى حالة قياس الجسيمات عند زاوية 90 درجة ، استنتج المعادلة التى تحكم Q .

4.5 - استنتج المعادلة (22.5)، واوجد جزء الطاقة الذى يكون سببا فى حركة النواة المركبة.

5.5 - اثبت باستخدام المعادلة (28.5) أن المقطع المستعرض عندما $E=E_0$ يعتبر قيمة قصوى(Maximum σ)

6.5 – في التفاعلين التاليين تكونت النواة المركبة للنيتروجين–15 . فإذا كانت طاقة الديوتريوم الساقط في التفاعل الأول هي 2 . 45 MeV ، وباعتبار أن طاقة النواة المركبة في التفاعل الأول هي نفس طاقة الإثارة لنفس النواة المركبة في التفاعل الثاني، اوجد الطاقة الحركية لجسيم الفا الساقط في التفاعل الثاني.

التفاعل الأول $^{13}C(d,p)^{14}C$

التفاعل الثاني $^{11}B(\alpha,n)^{14}N$

7.5–في التفاعل التالي:

$$x + X \rightarrow [CN] \rightarrow Y + y$$

$$^{4}He + ^{10}B \rightarrow [^{14}N] \rightarrow ^{13}N + ^{1}n$$

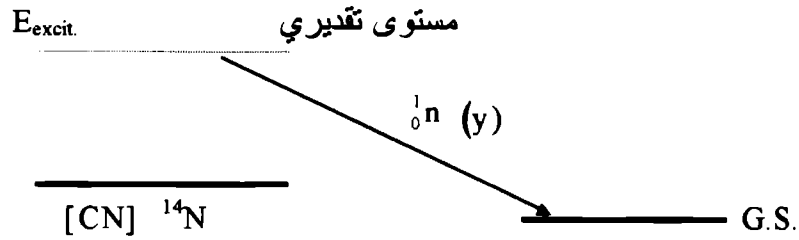
مع الكتل التالية (amu) [1amu=931MeV]:

M_Y	m_y	M_X	m_x
13.0098617	1.008983	10.016109	4.0038727

أ) ما هي قيمة Q للتفاعل المذكور؟

ب) إذا كانت طاقة الجسيم (^4He) x هي 1.68 MeV ، وقيست الجسيمات الناتجة عند زاوية قدرها 90^0 عن الأفقي، احسب طاقة هذه الجسيمات الناتجة.

ج) في الشكل التالي للتفاعل المذكور أعلاه، احسب طاقة إثارة النواة المركبة:



الفصل السادس

النشاط الإشعاعى Radioactivity

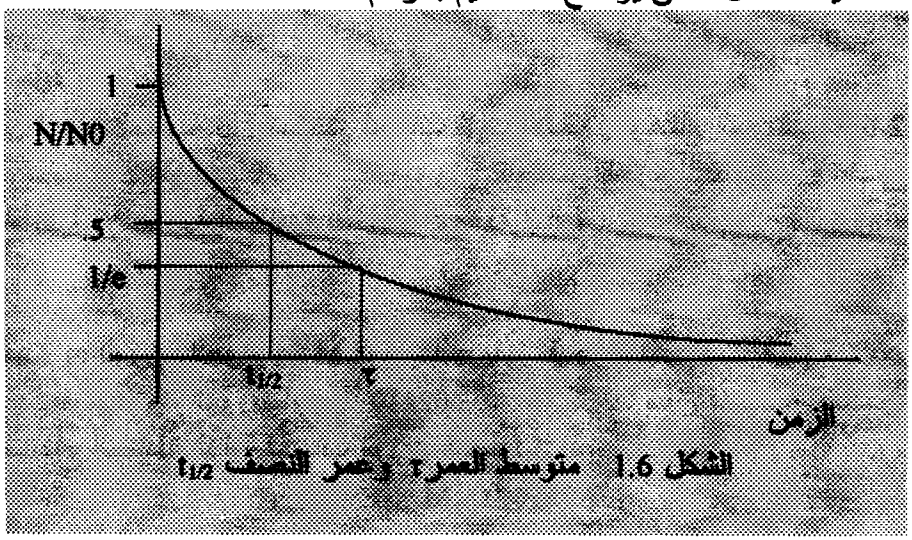
6-1 النشاط الإشعاعى.
6-2 نمذجة الانحلال الإشعاعى.
6-3 اتزان النشاط الإشعاعى.
6-4 تطبيقات الانحلال الإشعاعى.
6-5 ملخص.
6-6 مسائل.

1-6 النشاط الإشعاعى Radioactivity :

تتعدد الانحلالات الإشعاعية للنوى بحسب نوع الإشعاع أو الجسيم المنبعث من النواة المثارة فهناك انحلال جاما وانحلال بيتا وانحلال البوزيترون و الانحلال بأسر الإلكترون وانحلال النيوترون .
هذا ويتعامل مع العناصر المشعة من خلال بعض المصطلحات مثل عمر النصف half life $t_{1/2}$ والذى يعنى أن المادة تفقد نصف عدد ذراتها أو كتلتها خلال ذلك الزمن. أيضا هناك مصطلح ثابت الانحلال Decay constant λ والذى يعكس معدل الانحلال لكل وحدة زمن للعنصر، والذى يرتبط مع عمر النصف من خلال العلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} \qquad (1.6)$$

كما أن هناك تعريفا لمتوسط عمر المادة المشعة وهو معكوس ثابت الانحلال $\tau=1/\lambda$ وهو الزمن اللازم لتغير عدد الذرات إلى 1/e من عدد الذرات الأصلية. الشكل التالى يوضح هذه القيم بالرسم.



الشكل 1.6 متوسط العمر τ وعمر النصف $t_{1/2}$

أيضا هناك مصطلح آخر وهى الفاعلية الإشعاعية Activity والتى تمثل عـــدد الذرات المنحلة للعنصر N (عدد الانحلالات) لكل وحدة زمن والذى يعبر عنه من خلال المعادلة التالية:

$$A = \lambda N \qquad (2.6)$$

ومن وحدات قياس الفاعلية الإشعاعية البيكرل Bq والذى يمثل انحلالة لكـــل ثانية ، وأيضا الكورى Ci والذى يناظر $3.7x10^{10}$ انحلالة لكل ثانية. ولعـــل أحدًا ما يتساءل ما علاقة الفاعلية الإشعاعية بأعمار النصف أو بصورة أخـرى ماهو وزن المادة المشعة اللازمة للحصول على فاعليـــة اشـــعاعية معينـــة؟ لتوضيح هذه الإجابة لهذه التساؤلات فلنتابع المثال التالى.

مثال 1.6

احسب الأوزان اللازمة للحصول على فاعلية إشعاعية قيمتها 1Ci لعنصـــرى الرصاص ^{214}Pb واليورانيوم ^{238}U علما بأن عمر النصف للرصاص يساوى 26.8 دقيقة، وعمر النصف لليورانيوم يساوى $4.5x10^{9}$ سنة.

الحل:

حيث إن المعادلة 1.6 تستخدم لحساب ثابت الانحلال وكذلك المعادلـــة 2.6 لحساب عدد الذرات. كما أنه لحساب وزن العنصر اللازم للحصـــول علـــى الفاعلية الإشعاعية المطلوبة نستخدم المعادلة التالية :

$$N = \frac{m}{M} N_{Av.}$$

حيث m الوزن بالجرام و M الوزن الجزيئي (جرام لكل جـــزىء) و $N_{Av.}$ عدد أفوجادرو والذى يساوى $0.602x10^{-24}$. من كل ما سبق فإنـــه يمكـــن استنتاج المعادلة التالية لحساب الوزن المطلوب:

$$m = \frac{3.7x10^{10} t_{1/2} M}{0.693 N_{Av}}$$

وباعتبار أن M للرصاص تساوى 214 ، فى حين أن M لليورانيوم تساوى 238 . وبالتعويض فى معادلة الوزن المستنتجة نحصل على الأوزان التالية بالجرامات من العناصر المشعة ذات الفاعلية الإشعاعية 1Ci .

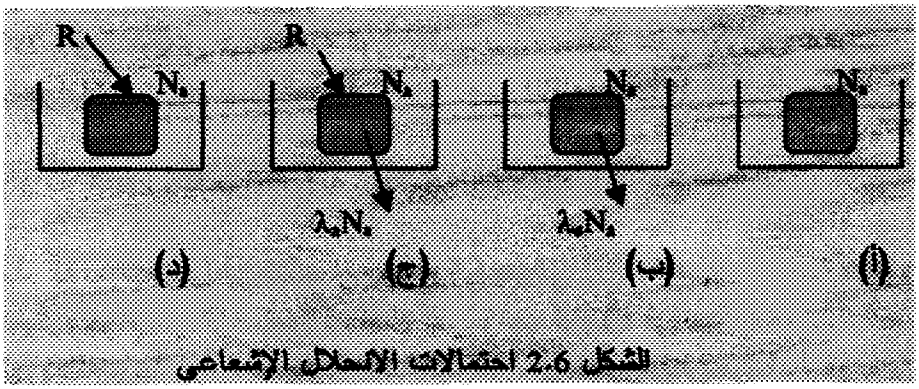
$m_{Pb} = 3.\times10^{-9}$ gram و $m_U = 3\times10^{6}$ gram

هذه الحسابات تبين أن الشخص يحتاج إلى حوالى ثلاثة من المائة من الميكروجرام من الرصاص ليحصل على واحد كورى، فى حين أنه يحتاج إلى ثلاثة ميجا جرام أو ثلاثة الأف كيلوجرام أو ثلاثة أطنان من اليورانيوم ليحصل على نفس الفاعلية الإشعاعية.

النتيجة : التعامل مع العناصر ذات أعمار النصف القصيرة مثل الرصاص-214 أخطر بكثير من تلك ذات أعمار النصف الكبيرة مثل اليورانيوم-238.

2-6 نمذجة الانحلال الإشعاعى
: Modelling of radioactive decay

حتى يمكننا معرفة عدد النوى لعدد من العناصر المشعة التى تتحل إشعاعيا كدالة فى الزمن، فإن ذلك يتطلب وضع أساس نظري لكيفية الانحلال رياضيا. هناك أربع أساسات من خلالها يمكننا وضع نموذج رياضى لأى عدد من النوى التى تتحل إشعاعيا.
فقد يكون العنصر مستقرًا، أوقد ينحل العنصر فقط، أو قد يُنتج العنصر بمعدل وينحل بمعدل، أو قد ينتج العنصر فقط. الشكل 2.6 يوضح الحالات الأربع المذكورة:



الشكل 2.6 احتمالات الانحلال الإشعاعي

من الشكل السابق ومع اعتبار أن معدل تغير العنصر يساوى معدل إنتاجه منقوصا من معدل انحلاله، فإنه يمكننا كتابة النماذج الرياضية للحالات الأربع:

(أ) حالة استقرار العنصر تعنى أن معدل تغير العنصر يساوى صفرًا.

$$\frac{dN_a}{dt} = 0 \qquad (3.6)$$

(ب) حالة انحلال فقط للعنصر

$$\frac{dN_a}{dt} = -\lambda_a N_a \qquad (4.6)$$

(ج) معدل التغير يساوى معدل الإنتاج مطروحا منه معدل الانحلال

$$\frac{dN_a}{dt} = R - \lambda_a N_a \qquad (5.6)$$

(د) معدل التغير يساوى معدل الإنتاج فقط

$$\frac{dN_a}{dt} = R \qquad (6.6)$$

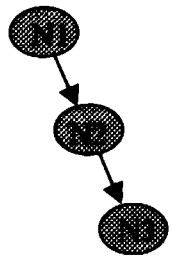
مثال 2.6

لديك ثلاثة أنوع من العناصر الأول ينحل إلى الثاني والثاني ينحل إلى الثالث والثالث عنصر مستقر، حيث إن ثابتى الانحلال للأول والثانى هما على التوالى λ_1 وλ_2 . أيضا عند الزمن صفر فإن عدد ذرات العنصر الأول يساوى $N_1(0)=N_{10}$ ، فى حين أن عدد ذرات العنصرين الآخرين يساوى صفرًا.

(أ) اوجد النموذج الرياضى الذى يحكم الانحلال الإشعاعى
(ب)حل النموذج الرياضى واوجد عدد ذرات كل من العناصر الثلاث كدالة فى الزمن.
(ج) ارسم شكل هذه الدوال للعناصر الثلاثة.

الحل:

(أ)



بالرجوع إلى الشكل 2.6 نرى أن النماذج الرياضية (ب) ، (ج)، (د) يمكن تطبيقها على N_1، N_2 ، N_3 على التوالى، بمعنى:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \qquad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \qquad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \qquad (3)$$

لاحظ أن معدل انحلال العنصر الأول هو معدل إنتاج للعنصر الثانى كما أن معدل انحلال العنصر الثانى هو معدل إنتاج العنصر الثالث، كما أن الإشارة السالبة تفيد الفقد فى حين أن الإشارة الموجبة تفيد الإضافة.

(ب)

المعادلة الأولى تحل بطريقة فصل المتغيرات حيث نتيجة التكامل تعطى:

$$N_1 = N_{10}e^{-\lambda_1 t} \qquad (3)$$

بتعويض المعادلة 3 فى المعادلة 2

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10}e^{-\lambda_1 t} \qquad (4)$$

بضرب طرفى المعادلة 4 فى $e^{\lambda_2 t}$ ، نحصل على:

$$\frac{d}{dt}N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_{10}e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \qquad (5)$$

بإجراء التكامل على طرفى المعادلة 5 :

$$N2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}e^{-\lambda_1 t} + Ce^{-\lambda_2 t} \qquad (6)$$

وباستخدام الشرط الابتدائي $N_2(0)=0$، يمكننا إيجاد قيمة C ، ومن ثم فإن الحل النهائى لعدد ذرات العنصر الثانى كدالة فى الزمن هو:

$$N2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right] \qquad (7)$$

أخيرًا لإيجاد العنصر الثالث، يتم التعويض بالمعادلة 7 في المعادلة الأخيرة من النموذج الرياضي مع إجراء التكامل:

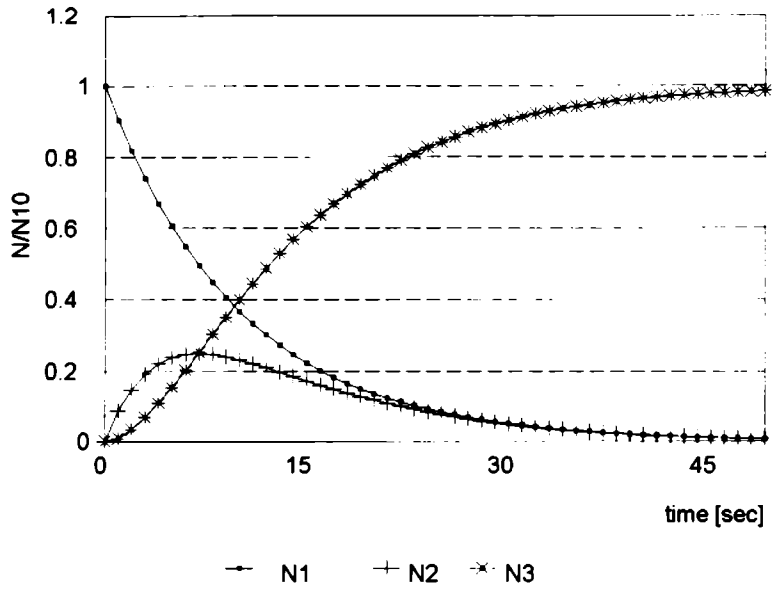
$$N_3 = \int \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}\left[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right]dt + C \qquad (8)$$

$$N_3 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}e^{-\lambda_1 t} + C \qquad (9)$$

وبالتعويض بالشرط الابتدائى $N_3(0)=0$ ، نجد أن $C=N_{10}$ ، ومن ثم فإن الحل النهائى للعنصر الثالث كدالة فى الزمن هو:

$$N_3 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}e^{-\lambda_1 t} + N_{10} \qquad (10)$$

(ج) شكل الدوال الثلاث المعبرة عن عدد ذرات العناصر الثلاث كدالات في الزمن، وذلك باعتبار أن: $\lambda_1=0.1\ sec^{-1}$ و $\lambda_2=0.2sec^{-1}$.



إذا كانت السلسة المنحلة للمثال 2.6 ممتدة إلى عدد n من العناصر يمكن كتابة المعادلة التفاضلية التالية للتعبير عن معدل تغير كل عنصر:

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1}N_{n-1} - \lambda_n N_n \quad ; \qquad (7.6)$$
$$N(0) = N_{10}\ , N_2(0) = N_3(0) = \ldots\ldots N_n(0) = 0$$

حيث إن $\lambda_0=0$ عندما n=1 (العنصر الأول)، وكذلك $\lambda_n=0$ للعنصر الأخير n المستقر.

حل هذه المعادلة لكل عنصر n هو:

$$N_n(t) = \sum_{i=1}^{n} C_i e^{-\lambda_i t} \qquad (8.6)$$

بحيث إن؛

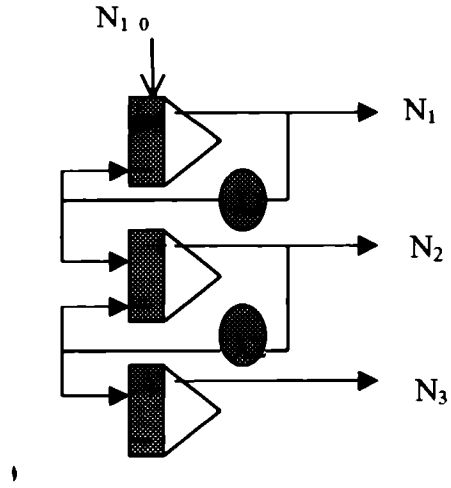
$$C_i = \frac{\lambda_1\lambda_2.....\lambda_{i-1}}{(\lambda_1-\lambda_i)(\lambda_2-\lambda_i).....(\lambda_{i-1}-\lambda_i).}N_{10} \quad ; i = 1,2,...n \quad (9.6)$$ ،

على أن نعتبر ما يلى:
الحد $(\lambda_i-\lambda_i)$ ملغى فى المقام، و $\lambda_n=0$ لأن العنصر الأخير مستقر، كما أن $C_1=N_{10}$ للعنصر الأول فقط.

الحلول التحليلية والتشابهية(التوافقية) و العددية للانحلال الإشعاعى

: Analytical, analogue, and numerical, solutions for radioactive decay

أى نموذج رياضى يمكن إيجاد حل له بأحدى الطرق التالية؛ إما تحليليا وقد أوردنا ذلك فى المثال السابق، أو باستخدام الحل التشابهي (Analogue solution) ، والذى يعنى بتصميم دارات إلكترونية لحل المعادلات التفاضلية المعنية بحيث يمكن تشابه(توافق) زمن الحل مع الزمن الحقيقى، وأخيرا يمكن استخدام الحل العددى وذلك بكتابة برنامج حاسوبى بإحدى اللغات المعروفة مثل الفورتران (FORTRAN) أو الـ سى (C). وحيث إن فى الحالات التطبيقية مثل حسابات احتراق الوقود Fuel burnup والتى تتبع سلسلة انحلالات طويلة للمواد النووية داخل المفاعل مثل اليورانيوم والبلوتونيوم والزينون والسامريوم وغيرهم. فإن حل النماذج الرياضية عدديا يعد أفضل وأكفأ الطرق الثلاث. وإتماما للموضوع سنأخذ نفس حالة الانحلال المذكورة فى المثال 2.6 ونوضح كلا من الحل التشابهى والحل العددى لها.
فى الحل التشابهى نحتاج إلى دارة إلكترونية لإجراء التكامل وهى مانعبر عنها بالمكامل Integrator ونحتاج أيضا إلى دارة لإجراء عملية الضرب فى ثابت Potentiometer وبتركيب هذه القطع مع بعض ننتج الدارة الكفيلة بحل المسألة وهو ما يوضحه الشكل 3.6. هذا وتوجد الآن برامج جاهزة لتصميم الدارة على الحاسوب فى معدة رياضية تابعة لبرنامج MatLab وهى ما تسمى بمعدة SimuLink، وهى تقوم مقام الدارة الكهربية المصممة.



الشكل 3.6 الحل التشابهى Analogue solution للمثال 2.6

بالنسبة للحل العددى لنفس المسألة الواردة فى مثال 2.6 فإنه يمكننا كتابة برنامج حاسوبى بلغة الفورتران مثلا كما هو موضح في الشكل 4.6 . هذا ويمكننا أن ننوه هنا أن نفس البرنامج يمكن كتابته بعدد من الأساليب ، حيث يفترض أن يكتب البرنامج بكفاءة عالية بحيث يوفر عدد العمليات الحاسبية وكذلك استخدام الذاكرة. كما أن الملاحظات المرافقة للبرنامج تعد مهمة لمن يريد تتبعه، خصوصا فى البرامج الكبيرة. إذا كان لديك الوقت الكافى لماذا لا تحاول تطبيق الحل التشابهى (باستخدام نفس التصميم الوارد فى الشكل 3.6 فى برنامج SimuLink) والحل العددى وتقارن نتائجهما بنتائج الحل التحليلى الوارد فى المثال 2.6 .

هذا ونود الإشارة هنا إلى أن حل مثل تلك المعادلات بل ومعادلات أكثر تعقيدا منها لم يعد رهين كتابة المستخدم برنامجا لفعل ذلك ، فكما كانت الآلة الحاسبة تستخدم لإجراء العمليات الحسابية بدل من إجرائها يدويا، فقد خرجت مع نهايات القرن العشرين نتيجة للثورة المعلوماتية برامج حسابية جاهزة تجرى لك حسابات أعقد التكاملات والتفاضلات وكذلك حل المعادلات

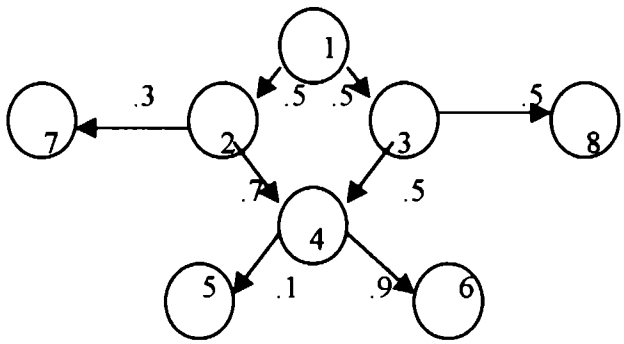
```
C * * A PROGRAM FOR RADIOACTIVE DECAY *
 READ (*,*) X10,R1,R2
 T=0.0
 DT=.1
X1=X10
X2=0.0
 X3=0.0
1  WRITE(*,*)T,X1/X10,X2/X10,X3/X10
T=T+DT
 F1=-R1*X1
 F2=R1*X1-R2*X2
 F3=R2*X2
X1=X1+F1*DT
X2=X2+F2*DT
X3=X3+F3*DT
IF(T.LT.50.) THEN
GO TO 1
ELSE
 ENDIF
 STOP
 END
```

الشكل 4.6 برنامج فورتران لحساب الانحلال الإشعاعي للمثال 2.6

التفاضلية المتنوعة من خلال برامج سلسة الاستعمال مثل Maple وMathLab و NAG-Library و Mathematica و MATH CAD ، وغيرها.

مثال 3.6

اكتب النموذج الرياضى للانحلال الإشعاعى الوارد فى الشكل التالى، حيث القيم الواردة على الأسهم تمثل النسبة المئوية للانحلال فى ذلك الاتجاه



الحل:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = .5\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = .5\lambda_1 N_1 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = .5\lambda_3 N_3 + .7\lambda_2 N_2 - \lambda_4 N_4$$

$$\frac{dN_5}{dt} = .1\lambda_4 N_4$$

$$\frac{dN_6}{dt} = .9\lambda_4 N_4$$

$$\frac{dN_7}{dt} = .3\lambda_2 N_2$$

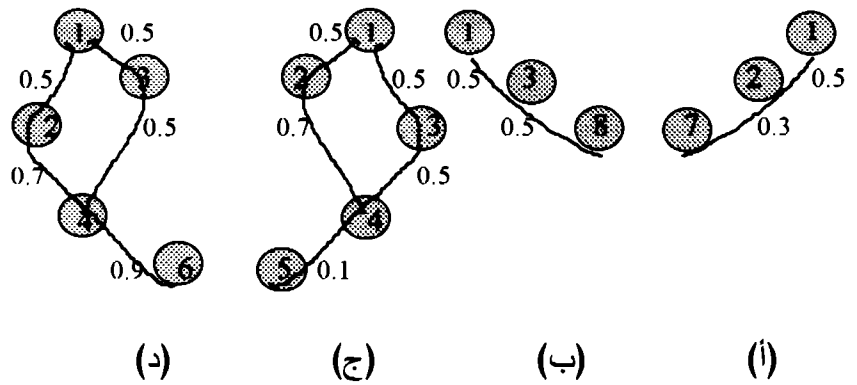
$$\frac{dN_8}{dt} = .5\lambda_3 N_3$$

مثال 4.6

فى المثال السابق وبدون حل المعادلات التفاضلية، احسب النسبة المئوية لكل من العناصر المستقرة (5،6،7،8) بعد انتهاء الانحلال الإشعاعى لباقى العناصر.

الحل:

فى المثال 3.6 وردت نسبة الانحلال على مسارات الانحلال المختلفة. لذا فإن هذه النسب هى التى تلعب الدور الرئيس فى حساب النسبة المئوية من عدد ذرات N10 الأصلية للعناصر المستقرة. حيث إن العنصر الأول سينحل تماما لتظهر العناصر المستقرة حسب نسب الانحلال الواردة على مسار انحلال العناصر. فيما يلى نورد مسارات الانحلال المؤدية إلى العناصر المستقرة



(د) (ج) (ب) (أ)

من الأشكال السابقة يمكن حساب العناصر المستقرة كما يلى:

الشكل (أ) يوضح أن نسبة العنصر السابع هى:

0.5x0.3=0.15 أى 15%

الشكل (ب) يوضح أن نسبة العنصر الثامن هى:

0.5x0.5=.25 أى 25%

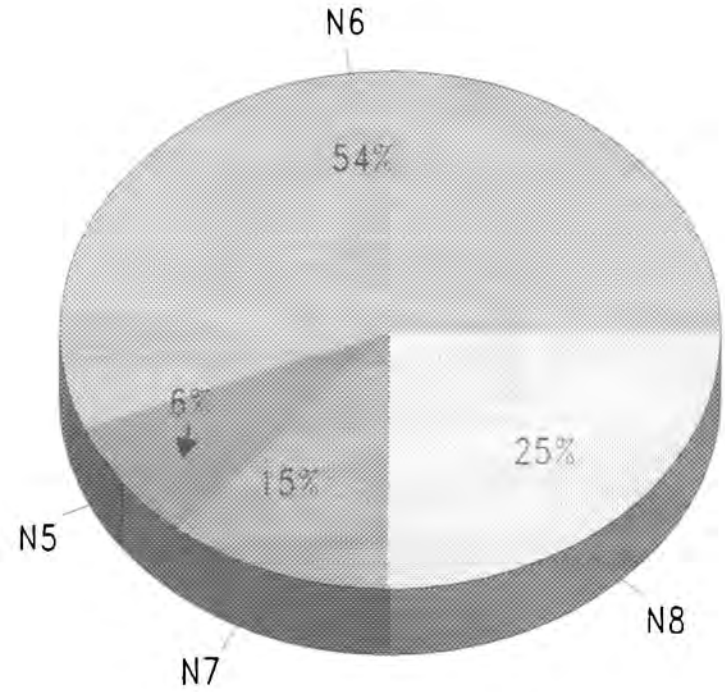
الشكل (ج) يوضح أن نسبة العنصر الخامس هى:

0.5x0.5x0.1+0.5x0.7x0.1= .06 أى 6%

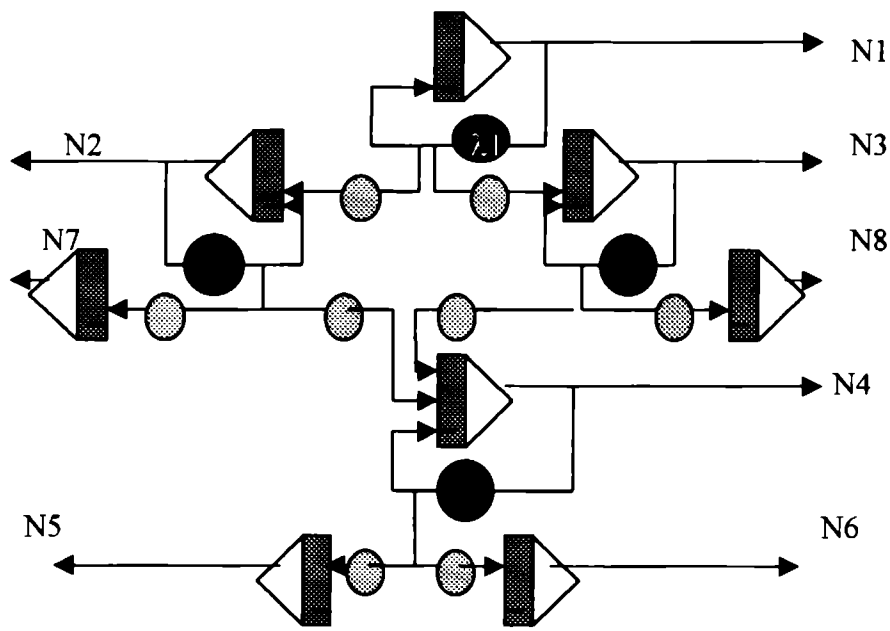
الشكل (د) يوضح أن نسبة العنصر السادس هى:

0.5x0.5x0.9+0.5x0.7x0.9=.54 أى 54%

الشكل التالى يوضح توزيع هذه النسب المئوية للعناصر المستقرة.



الشكل التالى يمثل الحل التشبيهى للمثال 3.6، الدوائر الكبرى تمثل ثوابت الانحلال لكل عنصر، فى حين أن الدوائر الصغيرة تمثل نسبة التفرع من كل عنصر حسب ما هو وارد فى المعادلات التفاضلية. هذا ويمكن تطبيق نفس التصميم لايجاد الحل باستخدام Simulink.



الشكل 5.6 الحل التشابهى Analogue solution أو باستخدام Simulink للمثال 3.6

3-6 اتزان النشاط الإشعاعى Radioactivity Equilibrium:

إن الاتزان بصفة عامة يعبر عنه رياضيا بأن معدل التغير يساوى صفرًا. أى أن:

$$\frac{dN}{dt} = 0 \qquad (10.6)$$

وسوف نورد فيما يلى نوعين من الاتزانات وهما الاتزان القرنـــى والاتـــزان العابر.

الاتزان القرنى Secular equilibrium :

بالرجوع إلى مثال 2.6 لعدد n من النوى المنحلة فإن حالة الاتزان تحـــدث عندما تكون كل معدلات تغير النوى بالنسبة للزمن تساوى صفرًا. وعليه فإن:

$$\begin{aligned} &\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 = 0 \\ &\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \\ &\vdots \\ &\lambda_{n-1} N_{n-1} = \lambda_n N_n \end{aligned} \qquad (11.6)$$

إذا كانت N_1 مشعة فإن المعادلة الأولى من مجموعة المعادلات 11.6 تعنـــى أن $\lambda_1=0$، وهذا يعنى أن N_1 مستقرة (تناقض يجب التخلص منه، فلا يمكـــن أن يكون العنصر مشعا ومستقرا فى نفس الوقت). للخروج من هذا المـــأزق نعتبر أن النوى الأم تتحل ببطء شديد مقارنة بأى من أعضاء سلسلة الانحلال، أى أن عمر النصف للأم أكبر بكثير من عمر النصف للوليدة. بهذا الاعتبـــار، فإن N_1 تكون قريبة جدا من الاستقرار وأن λ_1 أصغر بكثير من باقى ثوابـــت الانحلال $\lambda_2, \lambda_3, \ldots$. وبالتالى فإنه يمكن القول إن:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \approx 0 \qquad (12.6)$$

وتكون باقى المعادلات المعروضة فى المعادلة 11.6 صالحة. هذا النوع من التوازن يسمى التوازن القرنـــى Secular equilibrium. وحيـــث إن ثـــابت

الانحلال λ يتناسب عكسيا مع عمر النصف $t_{1/2}$ ، لذا يمكن وصف هذا التوازن بالمعادلات التالية:

$$\frac{N_1}{{}^1t_{1/2}} = \frac{N_2}{{}^2t_{1/2}} = \ldots \frac{N_n}{{}^nt_{1/2}} \qquad (13.6)$$

الشرط المذكور أعلاه يمكن إذا تطبيقه فى حالة وليدة قصيرة العمر ناتجة من أم طويلة العمر، مع الافتراض بأن كل المادة محفوظة ولن تفقد بسبب سحبها أو السماح لها بالهروب. الطريقة المذكورة أعلاه تمكن من حساب عمر النصف للأم المشعة طويلة العمر، وذلك حسب المعادلة التالية:

$${}^1t_{1/2} = \frac{N_1}{N_2}\,{}^2t_{1/2} \qquad (14.6)$$

والآن يمكننا القيام بشيء من التحليل لحالة الاتزان القرنى وذلك باعتبار أن مادة الأم ومادة الوليدة فى حالة اتزان من هذا النوع. هناك افتراضان مهمان فى هذه الحالة، وهما:

$$\lambda 1 \sim 0\,, \quad \lambda 1 << \lambda 2 \qquad (15.6)$$

وبالرجوع إلى حل مثال 2.6 فقرة ب فإن المعادلة 3 و المعادلة 7 تصبحان المعادلتين التاليتين وذلك مع الاستفادة من الفرضية المذكورة فى المعادلة 12.6 :

$$N_1 \approx N_1^0$$
$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \qquad (16.6)$$

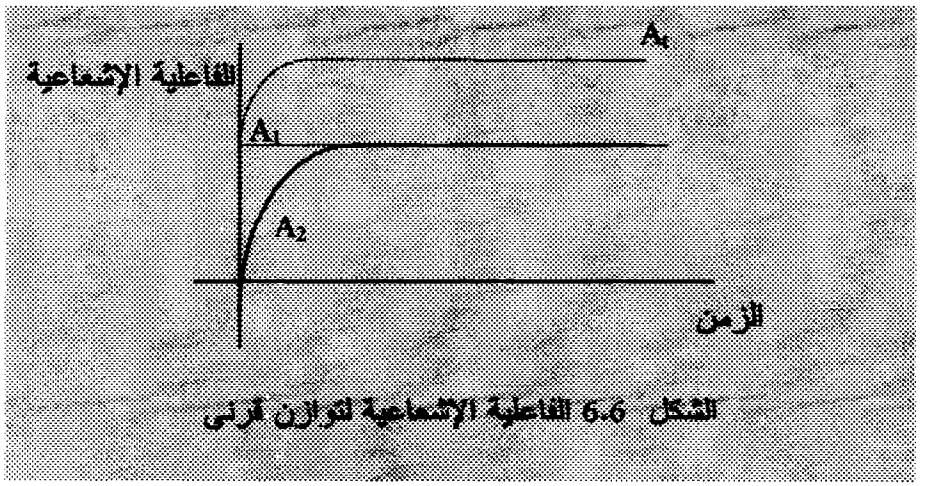
وبدلالة الفاعلية الإشعاعية(A=λN) Activity يمكن التعبير عن الفاعلية الإشعاعية الكلية A_t :

$$A_t = A_1 + A_2 = \lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2 \qquad (17.6)$$

وبالاستفادة من المعادلة 16.6 ، فإن:

$$A_t \approx 2\lambda_1 N_1^0 - \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_2 t} \qquad (18.6)$$

من المعادلة السابقة نلاحظ أنه بعد زمن طويل (عدد من أعمار النصف للوليدة) فإن الفاعلية الإشعاعية للوليدة A_2 تقارب الفاعلية الإشعاعية للأم A_1. الشكل التالى يوضح التصرف للفاعلية الإشعاعية لكل من الأم أو الوليدة. الشكل يوضح أنه بعد زمن طويل تكون الفاعلية الإشعاعية ثابتة (اتزان إستاتيكى) مخالفا لما سيأتى ذكره وهو الاتزان العابر Transient equilibrium (اتزان ديناميكى).



الشكل 6.6 الفاعلية الإشعاعية لتوازن آنى

الاتزان العابر Transient equilibrium (اتزان ديناميكى) :

فى هذا الاتزان تكون الأم طويلة العمر أيضا مقارنة بالوليدة ($\lambda_1<\lambda_2$) إلا أن عمر النصف للأم ليس كبيرجدا بمعنى أن $\lambda_1 \sim 0$ لا يجوز تطبيقه كما فى حالة الاتزان القرنى. أيضا بعد زمن كبير يمكن تجاهل الحد

$\exp(-\lambda_2 t)$ مقارنة بالحد $\exp(-\lambda_1 t)$. وعليه فإن المعادلتين 3 و7 فى المثال 2.6 فقرة ب تكونان كما يلى:

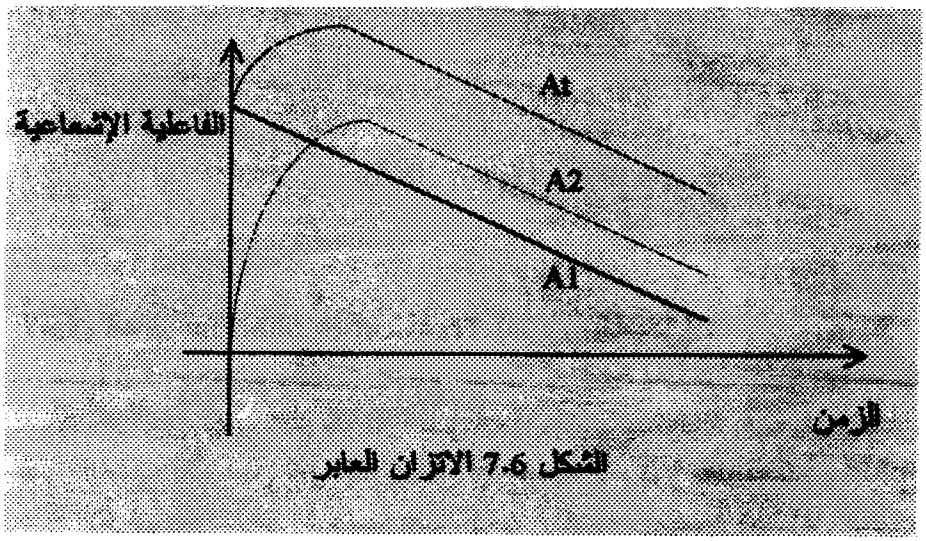
$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \qquad (19.6)$$

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \qquad (20.6)$$

وبدلالة الفاعلية الإشعاعية $A=\lambda N$ ، فإن المعادلة 20.6 يمكن كتابتها كما يلى (وذلك بعد زمن طويل) :

$$\frac{A2}{A1} \approx \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \qquad (21.6)$$

يلاحظ من المعادلة الأخيرة بأن الفاعلية الإشعاعية للوليدة أكبر من الفاعلية الإشعاعية للأم وذلك بقدر ثابت محدد بقيمة الطرف الأيمن من تلك المعادلة. وكما سيبين الشكل التالى فإن هناك اتزان ديناميكى للفاعلية الإشعاعية وذلك ما يوضحه انحدار المنحنى مع ثبات الفارق فى الفاعلية الإشعاعية بين الأم والوليدة.



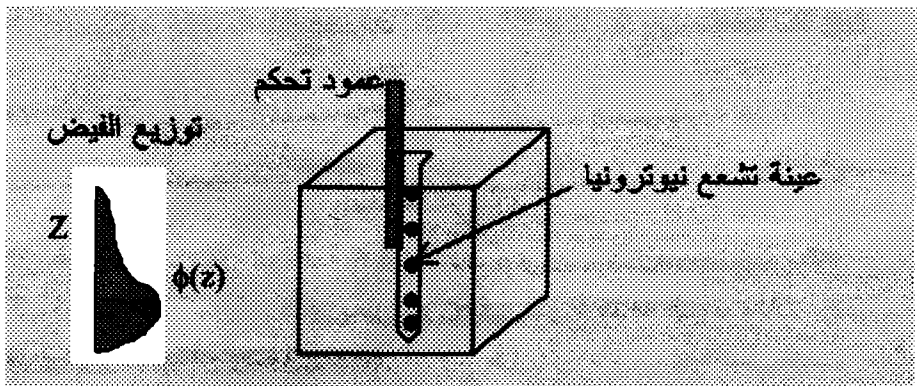
الشكل 6-7 الاتزان العابر

4-6 تطبيقات الانحلال الإشعاعى
: Application of Radioactive Decay

فى هذا القسم نعرج بعجالة على تطبيقات الانحلال الإشعاعى، حيث يمكن بسهولة استخدام الأساسيات التى وردت فى هذا الفصل لإجراء تحليلات التنشيط الإشعاعى Activation Analysis ،و إنتاج النظائر المشعة، وحسابات احتراق الوقود Fuel burnup calculations فى المفاعل النووى.

قياس الفيض النيوترونى :

من أحد تطبيقات التنشيط الإشعاعى Activation Analysis تحديد فيض النيوترونات الحرارية Thermal neutron flux داخل المفاعل. نقصد بالفيض النيوترونى الحرارى هو عدد النيوترونات الحرارية العابرة لمساحة قدرها سم2 عند كل ثانية. فى مثل هذه التجربة توضع عينات من عنصر ما N فى المواضع المطلوب قياس الفيض النيوترونى فيها. الشكل 8.6 يوضح توزيع مجموعة العينات على المحور الرأسى لقلب المفاعل فى وجود عمود تحكم مجاورتم إدخاله جزئيا .



الشكل 8.6 حساب الفيض النيوترونى الحرارى داخل المفاعل

يمتص العنصر N المكون لهذه العينات النيوترونات الحرارية ليتحول إلى عنصر آخر N_b بمعدل إنتاج $R = \Sigma_a \phi = \sigma_a(v)\, N\, \phi = \sigma_a(v)\, N\, v\, n(v)$ الذى بدوره ينحل بمعدل $N_b\lambda_b$. إذا يمكننا كتابة معادلة رياضية تحكم معدل تغير N_b كما يلى:

$$\frac{dN_b}{dt} = R - \lambda_b N_b \qquad (22.6)$$

والآن وبالتركيز على حد معدل الإنتاج R ، وباعتبار أن المقطع المستعرض المجهرى يتناسب عكسيا مع سرعة النيوترونات الحرارية بمعنى أن $\sigma_a(v) = \sigma_{a0}\, v_0/v$ ، وبالتالى فإن:

$$R = v\, n(v)\, N\sigma_{a0}\, v_0/v = n(v)\, N\sigma_{a0}\, v_0 \qquad (23.6)$$

وبالتعويض بالتوزيع الماكسويلى للنيوترونات الحرارية مع إجراء التكامل على كل السرعات المحتملة يمكن إذا كتابة المعادلة 23.6 بالصورة التالية:

$$R = N\sigma_{a0} v_0 \int_0^\infty 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi KT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}} dv \qquad (24.6)$$

وباعتبار أن:

$$\int_0^\infty v^2 e^{-\beta^2 v^2} dv = \frac{\sqrt{\pi}}{4\beta^3} \qquad (25.6)$$

فإن قيمة التكامل فى المعادلة 24.6 تساوى n . هذا يعنى أن التوزيع النيوترونى الماكسويلى الذى يعبر عن كيفية توزع كثافة النيوترونات بالنسبة للسرعات المختلفة عندما يتم إجراء التكامل عليه بالنسبة لكل السرعات المحتملة فستكون النتيجة هى n أى الكثافة النيوترونية. لذلك فإن معدل الإنتاج R هو:

$$R = N \sigma_{a0} v_0 n = \Sigma_{a0} \phi_0 \qquad (26.6)$$

حيث ϕ_0 يمثل الفيض النيوتروني الحراري. الآن يمكن التعريج مرة أخـــرى للمعادلة 22.6 ، وبالاستفادة من المعادلة 26.6 ، فإنه يمكن القول بأن:

$$\frac{dN_b}{dt} + \lambda_b N_b = \Sigma_{a0} \phi_0 \qquad (27.6)$$

لحل هذه المعادلة التفاضلية ذات الرتبة الأولى وغيرالمتجانسة، يمكن استخدام حل المعادلة المتجانسة (وذلك بتسوية الطرف الأيمن بصفر) لإيجاد مايسـمى بالحل المتجانس ثم يضاف اليه الحل غير المتجانس، أى أن

$$N_b = N_{bh} + N_{bnh} \qquad (28.6)$$

المعادلة التفاضلية التى تحكم الحل المتجانس هى:

$$N_{bh} = Ce^{-\lambda_b t} \qquad (29.6)$$

أما الحل غير المتجانس نفترضه ثابتا وبالتعويض به فى المعادلة 27.6، نجد أن :

$$0 + \lambda_b N_{bnh} = \Sigma_{a0} \phi_0 \qquad (30.6)$$

ومن ثم فإن حل المعادلة التفاضلية هو:

$$N_b = Ce^{-\lambda_b t} + \frac{\Sigma_{a0} \phi_0}{\lambda_b} \qquad (31.6)$$

وباعتبار الشرط الابتدائى $N_b(0)=0$ ، فإن ثابت التكامل يمكن إيجاده ويكـــون الحل النهائى كما يلى:

$$N_b = \frac{\Sigma_{a0}\phi_0}{\lambda_b}(1 - e^{-\lambda_b t}) \qquad (32.6)$$

كما أن الفاعلية الإشعاعية Activity هى $A=N_b\lambda_b$ ، و t زمن الإشعاع داخل المفاعل. أما إذا أخرجت العينة من المفاعل فإن الفاعلية الإشعاعية المقاسة $A_{measured}$ ستتضاءل مع الزمن على الصورة التالية:

$$A_{measured} = \Sigma_{a0}\phi_0(1 - e^{-\lambda_b t})e^{-\lambda_b t'} \qquad (33.6)$$

حيث t' تمثل الزمن المقاس بعد إخراج العينة من المفاعل. من المعادلة 33.6 نرى أنه يمكننا حساب الفيض ϕ_0 داخل قلب المفاعل عند النقاط الموجودة بها العينات إذا ما قمنا بقياس الفاعلية الإشعاعية لكل عينة على حدة. وكما نرى من الشكل 8.6 فإن الفيض المحورى له قيمة منخفضة عند المنطقة التى بها عمود التحكم بسبب امتصاص عمود التحكم للنيوترونات عند تلك المواقع.

تحليلات المواد :

كما يمكن استخدام أسلوب التنشيط الإشعاعى فى تحليلات المواد (مثل تحديد المواد المكونة لشعرة رأسك!) وذلك بدراسة مطيافية أشعة جاما المنبعثة من العناصر الناتجة من التشعيع، ومقارنة هذه الأطياف بتلك الناتجة من مصادر قياسية لعناصر معروفة.

إنتاج النظائر المشعة :

وعلى نفس المنوال يمكن إنتاج بعض النظائر المشعة بتعريضها للفيض النيوترونى ، وبشئ من الحسابات المشابهة التى وردت فى حسابات الفيض يمكن تعيين الزمن اللازم لإنتاج كمية مناسبة للنظير المشع.

حسابات احتراق الوقود :

عند البداية الأولى من التشغيل للمفاعلات النووية تكون تلك المفاعلات نظيفة بحيث تحوى فقط على وقود اليورانيوم الطبيعى أو المثرى مع عناصر أخرى محدودة مثل الأكسجين والهيدروجين والكادميوم و الألومنيوم. الا أنه وبعد التشغيل لفترة زمنية يتحول المفاعل إلى مفاعل ساخن بمعنى أنه يحوى العديد من العناصر المشعة. حيث تتكون العديد من النوى بسبب انشطار الوقود، ثم لا تلبث هذه النوى أن تتحل إلى عناصر أخرى وذلك بانبعاث جسيمات بيتا. قد تكون هذه العناصر الناتجة من التعرض للنيوترونات أو تكون أحد نواتج الانشطار. بعض من هذه النوى تعتبر ذات أهمية كبيرة مثل البلوتونيوم نتيجة أسر اليورانيوم-238 لنيوترون، أو الزينون الذى يعتبر أحد العناصر الفتاكة (الماصة للنيوترونات) والتى يجب أخذها فى الحسبان بسبب تأثيرها السلبى الكبير على مفاعلية المفاعلات ومن ثم على تشغيله. ولغرض تحليل مثل هذه الحالات يتطلب معرفة سلسلة الانحلال التى تؤدى إلى ظهور مثل تلك العناصر، ومن ثم نمذجتها كما سبق توضيحه، ثم حساب عدد النوى ومن ثم مقدار كتلة المادة ذات الاهتمام.

5-6 ملخص :

فى هذا الفصل تطرقنا إلى أسس حسابات الانحلال الإشعاعى وهى تحكم بالمعادلة الرئيسة والتى تفيد أن معدل التغير يساوى معدل الإنتاج مطروحا منه معدل الانحلال، والتى يمكن أن تفسر أربع حالات رئيسة وهى حالة الاستقرار، وحالة الإنتاج فقط وحالة الفقد (الانحلال) فقط ، أو حالة الفقد مع الإنتاج. هذا وتم تعريف مفاهيم عمر النصف ، وكذلك ثابت الانحلال، وكذلك الفاعلية الإشعاعية المقاسة بالبيكريل وهى انحلالة لكل ثانية ، أو بدلالة وحدة أكبر تدعى الكيورى والتى تساوى $3.7x10^{10}$ بيكريل. كما أمكن وضع نموذج رياضى لأى سلسلة انحلال للنوى مهما تعاضمت من خلال تطبيق معادلة الانحلال لكل عنصر. هذا النموذج الرياضى يمكن حله تحليليا أو عدديا أو باستخدام برامج خاصة مثل Simulink . كما تم فى الفصل تبيين مفهوم

الاتزان وخصوصا القرنى Secular والعابر Transient. إن سلسلة الانحـــلال يمكن تتبعها لعنصر ما ، مثل انحلال اليورانيوم وهى ما أشتهرت باسم سلسلة انحلال اليورانيوم ، وأيضا هناك سلاسل أخرى مثل سلسلة الثوريوم وغيرها. حسابات احتراق الوقود أو إنتاج النظائر المشعة تستند بالأساس على سلســـلة انحلال يمكن نمذجتها رياضيا وحلها كما ورد ذكره، وذلك لحساب عدد النوى المرادة ومن ثم كتلتها . أيضا من خلال التنشيط الإشعاعى يمكـــن حســـاب الفيض النيوترونى الحرارى فى المفاعلات النووية.

6-6 مسائل :

1.6 – اوجد حل مثال 2.6 بالشروط الإبتدائية التالية:

$N_1(0)=N_{10}, N_2(0)=N_{20}, N_3(0)=N_{30}$.

2.6 – اكتب برنامجا حاسوبيا لحل المعادلات التفاضلية الواردة بالمثـــال 3.6 علما بأن:

الشروط الابتدائية هى: $N_1(0)=N_{10}, N_2(0)= N_3(0)= \ldots = N_8(0)= 0$.

3.6 –طبق حل المعادلة 8.6 على المثال 2.6 لإيجاد كل من: N_1 وN_2 وN_3.

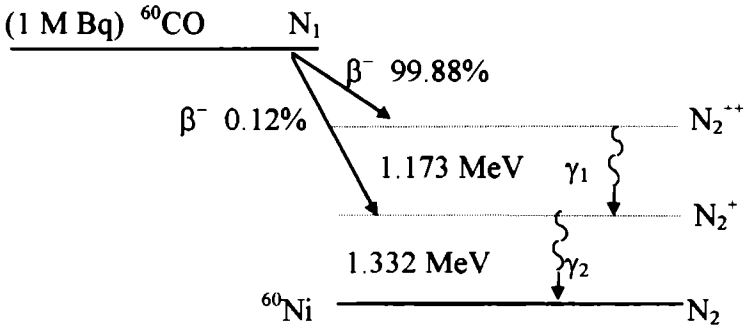
4.6 – طبق حل المعادلة 8.6 على سلسلة انحلال متكونة من 7 عناصر.

5.6 – استنتج المعادلتين الخاصتين بتعريف عمر النصف $t_{1/2}$ وكذلك متوسط العمر τ، ثم وضح بالرسم التعريفين على شكل محوره الزمنى عادى ومحوره الصادى لوغاريتمى، ثم بين إلام يشير ميل الخط المستقيم للرسم الناتج؟

معلومة مساندة: $\tau = \frac{\int_0^\infty tA(t)dt}{\int_0^\infty A(t)dt}$; $A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$

6.6 – إذا كانت إحتمالية عدم انحلال نواة ما حتى الزمن t هى $e^{-\lambda t}$ ، كما أن الاحتمالية بان تلك النواة ستنحل فى الفترة dt التالية هى λdt ، فإذا كان هناك عدد نوى ابتدائى N_0 ، احسب إحتمالية أن نواة ما ستنحل بعد زمن لانهائى ، وإذا كانت $\lambda = .1\ [day^{-1}]$ ، احسب احتمالية الانحلال عند نهاية اليوم الخامس. احسب احتمالية الانحلال عند نهاية اليوم العاشر. ارسم شكلا يعبر عن عدد النوى المتبقية (غير المنحلة) كدالة فى الزمن.

7.6 – الشكل التالى يمثل مخطط انحلال ^{60}CO إلى ^{60}Ni



أ) ارسم سلسلة الانحلال الممثلة للنويدات $N_1, N_2, N_2^+, N_2^{++}$ ، بحيث تدل إشارة + إلى حالة إثارة للنواة .

ب) هل مستويات طاقة النواة المثارة تمثل مستويات طاقة ترابطية Bound states أو مستويات تقديرية Virtual، ولماذا.

ج) إذا كان ثابت انحلال N_1 (^{60}CO) هو λ_1 (sec^{-1}) وثابت انحلال N_2^{++} هو $\lambda_{2^{++}}$، وثابت انحلال N_2^+ هو λ_2، أكتب المعادلات الرياضية التى تحكم سلسلة الانحلال.

د) ارسم التصرف الزمنى لكل النويدات.

هـ) ما هى الفاعلية الإشعاعية لأشعة γ_1 (1.173MeV) بالبيكريل (Bq) وبالكورى (Ci) ؟

الفصل السابع

النيوترونات
Neutrons

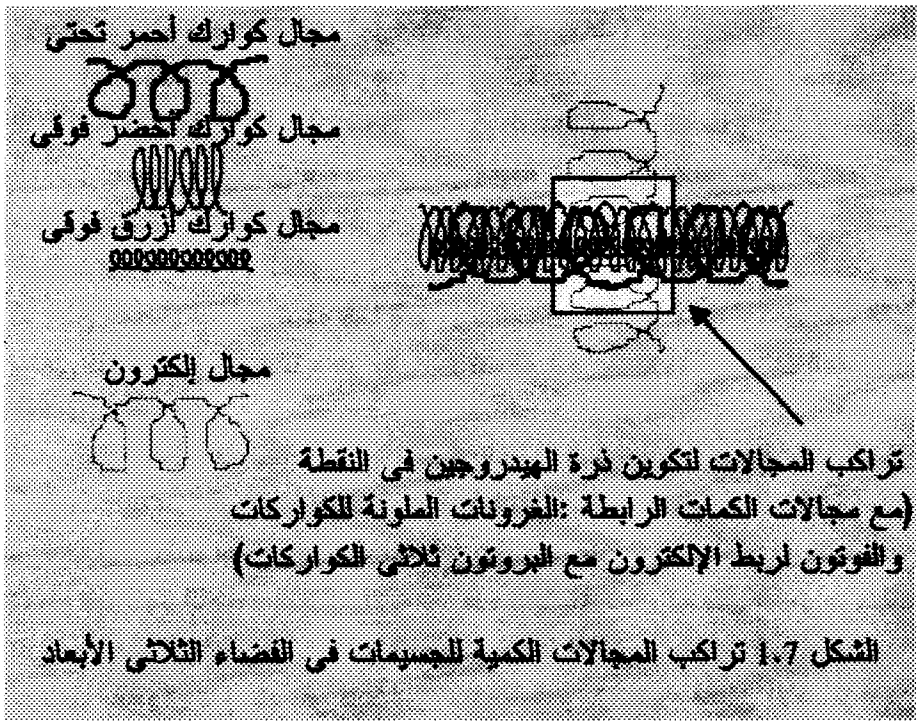
7-1 ماهية النيوترون.
7-2 إنتاج النيوترونات.
7-3 الكشف عن النيوترونات.
7-4 تصنيف النيوترونات.
7-5 استطارة النيوترونات فى نظامي المعمل ومركز الكتلة.
7-6 تباطؤ النيوترونات و احتمالية الاستطارة.
7-7 النيوترونات الحرارية.
7-8 ملخص.
7-9 مسائل.

1-7 ماهية النيوترون :

توجد هناك نظرية المجال الكمية النسبية الحديثة Relativistic Quantum Field Theory والتى تفسر الكون بأنه مجموعة من المجالات الخاضعة لقواعد النسبية الخاصة والميكانيكا الكمية، وبالتالى أمكن رؤية كل شيء على أنه مجالات كمية متفاعلة. هذا وتفسر شدة المجال عند نقطة بأنها الاحتمال الإحصائى لإكتشاف الكمات المرتبطة به (الجسيمات) عند تلك النقطة، وهذا يعتبر أحد أهم نتائج النظرية. هذا وقد ورد فى أحد أخبار المحطات الفضائية العالمية حديثا أن مجموعة من العلماء بدولة النمسا وعلى رأسهم العالم زلينجر تمكنوا من تزويد خواص معينة لفوتون ثم ظهر هذا الفوتون فى مكان آخر. إن ما حققه هذا الفريق هونتاج لدراسات سابقة فى أوائل التسعينيات من القرن العشرين قام بها العالم تشارلز مينت . ويعد هذا تطورا قد يفتح المجال لنقل الأشياء كما يتصوره الخيال العلمى، فالخطوة القادمة التى يسعى لها زلينجر وزملاؤه هو نقل الذرات ثم الجزيئات وذلك خلال العقدين القادمين.

أشار هينز باجلز فى كتابه القيم " رموز الكون" المترجم للعربية من قبل د.محمد البيومى إلى تفسير تخيلى يُمكننا من استشعار نظرية المجال الكمى من خلال ربط نوابض springs بعضها ببعض على شكل سلسلة مترامية الأطراف لتعم الفضاء الثلاثى الأبعاد. هذه السلسلة تمثل المجال الكمى . وعند نقر أحد هذه النوابض فى السلسلة فسيهتز وهذا الاهتزاز يقابل كمًا أو جسيمًا مرتبطا بالمجال ، وعند نقر نابضين منفصلين ومتباعدين فان الاهتزازين الناشئين يمثلان كمين أو جسيمين عند تلكما النقطتين. قد تكون تلك السلسلة معبرة عن مجال إلكترونى، ويمكن تخيل سلسلة أخرى ذات نوابض أثقل لتعبر عن مجال فوتونى وأخرى لمجال كواركى بحيث تكون اهتزازتها تعبر عن الجسيمات المناظرة لها فى موقع ذلك الاهتزاز. وعند إرتباط هذه السلاسل بعضها ببعض أحدها ممثلا الكواركات وأخرى لبتونات وأخرى غرونات فى الفضاء الواسع فإننا سنلاحظ اهتزازات تنتقل من سلسلة إلى أخرى . الآن بعد أن تخيلت هذه السلاسل المهتزة والمتشابكة والمترامية

الأطراف فى الفضاء ، قلص حجم النوابض لا نهائيا، بحيث يكون هناك عدد لانهائى منها عند نقطة ما فى الفضاء، ثم أحجب رؤية النوابض، فما يتبقى لنا من هذه السلاسل (المجال) الا الاهتزازات المحتملة عند كل نقطة، فتظهر هذه الكمات كجسيمات مختلفة. ويمكن أن تتحرك هذه الجسيمات فى الفضاء وتتفاعل بعضها مع بعض، وهذا يعد تفسير الفيزيائين النظريين للمجال الكمى ، أنظر الشكل 1.7 للتوضيح.



الشكل 1.7 تراكب المجالات الكمية للجسيمات فى الفضاء الثلاثى الأبعاد

وكما كان السؤال سابقا وهو ماهى الجسيمات الأولية والذى تمت الإجابة عليه لحد الآن على أن الكواركات واللبتونات والغرونات تعد كمات لأدنى مستويات المادة ، كما تمت الإشارة إليه فى الفصل الثالث من هذا الكتاب. أيضا هناك سؤال مشابه وهو ما هى المجالات الأساسية ؟ وتباعا لما ورد، فإن مجالات هذه الكمات تكون هى المجالات الأساسية.

هذا وتعد نظرية الديناميكا الكهربية الكمية والديناميكا اللونية الكمية احدى النظريات التى توظف النماذج الرياضية لوصف تفاعل المجالات الكمية.

بالنظر إلى الكون عينيًا Macroscopically (الكواكب والنجوم) أو مجهريًا Microscopically (الذرات) فإن وجود المادة هو الإستثناء حيث يبدو الخواء يعم الفضاء. وبظهور نظرية المجال الكمية النسبية فإن هذا الخواء غير خاو بل ممتلئ، إذ يتكون من الجسيمات وضديداتها التى تخلق وتندثر تلقائيًا فى أزمنة ومسافات قصيرة جدًا. وهذا الفراغ يشبه المحيط الهادر الذى نراه من علو هادئ وإذا ركبناه لاحظنا موجاته العاتية. وحتى على مستوى الذرات فقد رصد العلماء التقلبات التى تحدث فى فراغات الذرة وإذا تم التوغل أكثر فى الكشف فسيجدونه أيضا بحرًا مضطربًا من جميع الكمات. ويمكن تفسير الفراغ بالإستناد على مبدأ اللاتأكدية لهينزبيرج بإن الفراغ عبارة عن سلسلة من النوابض التى تهتز دون مستوى اهتزازات نوابض سلسلة الكمات الحقيقية أو الجسيمات الحقيقية Real particles التى ذكرناها سابقا وبالتالى وبسبب هذا الاهتزاز الضعيف فإن الكمات فى هذه السلسلة تعتبر كمات افتراضية Virtual Quanta أو جسيمات افتراضية ، فإذا ما تم تزويد هذه الاهتزازات بطاقة حقيقية لزادت إلى المستوى الذى تتحول عنده إلى جسيمات حقيقية . هذا وقد تم تفسير الإزاحات الضئيلة التى تحدث فى مدارات الإلكترون حول النواة بأن تأثير المجال الكهربى الذى يربط بين الإلكترون والنواة يمكنه خلق إلكترون وبوزيترون من الفراغ الخالى بين المدارات الذى يعد محيطًا هادرًا من الكمات الافتراضية ، هذا الزوج من الجسيمات الحقيقية سرعان ما يندثر على الفور ويعمل هذا التأثير المسمى باستقطاب الفضاء Space polarization على تغير مدار الإلكترون حول النواة وقد استطاع العالم ويليس لامب القياس بدقة هذه التغيرات المدارية فى ذرة الهيدروجين . لقد كان لتصنيع آلة تصادم حزمتى الإلكترونات (المادة) والبوزيترونات (ضديد المادة) فى السبعينيات من القرن العشرين عظيم الأثر لتأكيد مفهوم تأثيرات استقطاب الفضاء ،حيث تم التصادم المباشربين المادة وضديدها الذى أمد الطاقة اللازمة لإظهار أزواج الجسيمات الافتراضية القابعة فى الفراغ . لقد كانت هذه إحدى الطرق التى اكتشفت بها الكواركات الجديدة كالكوارك الفاتن وضديده.

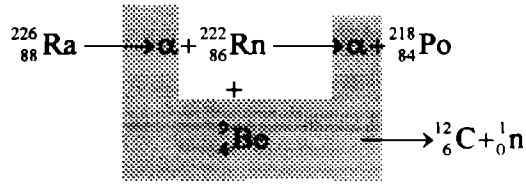
النيوترون الذى تنبأ به رذرفورد هو أحد أوائل الهادرونات المكتشفة، حيث أكتشفه شادويك سنة 1932 . والنيوترون مكون من ثلاث كواركات ، اثنتان منهما تحتية وآخر فوقى كما أن لكل منهم له لون (أحمر، أخضر، أزرق) هذه الكواركات ترتبط بنوع من الغرونات والمسمى بالغرونات اللونية التى هى مسؤولة عن ترابط القوى النووية القوية. الجدول 1.7 يوضح بعض خواص الكواركات والتى من بعضها يتكون النيوترون، حيث إن لو جمعنا الشحنات الكهربية على كواركات النيوترون 2 تحتى + 1 فوقى ستكون 2 (-1/3) + (2/3) = 0 ، أى أن النيوترون ليس له شحنة ومن ثم فهو نوّية محايدة. الكواركات تعتبر حبيسة وإذا ما حاولنا أن نشطر النيوترون فإن الطاقة التى نزودها ستُمطط النيوترون بكواركاته الداخلية وطاقة التمطيط هذه ستظهر كواركات أخرى داخلية ومن ثم ينشطر النيوترون إلى هادرون جديد مشكل من كواركات ولكن لا سبيل للحصول على كوارك حر، وهذا ما تشرحه نظرية رباط الحذاء Shoe ties حيث إن السعى للغوص أكثر فى بنية الهادرونات تسبب إظهار هادرونات جديدة وهذا هو التفسير للعدد الهائل المكتشف من الهادرونات التى من أعضائها البروتون والنيوترون.

الجدول 1.7 خواص الكواركات

الإسم	الرمز	الإسم الإنجليزى	الكتلة m_q/m_e	الشحنة بالنسبة للإلكترون
فوق	u	up	2	2/3
تحت	d	down	6	-1/3
غريب	s	strange	200	-1/3
فاتن	c	charm	3000	2/3
قاع	b	bottom	9000	-1/3
قمة	t	top	-	2/3

2-7 إنتاج النيوترونات Production of Neutrons :

التفاعلات النووية تعد المصدر الوحيد للنيوترونات، حيث إن تفاعلات (α,n) على النوى الخفيفة التى أدت إلى اكتشاف النيوترون لازالت مصدرا مهما لإنتاج هذه الجسيمات. إن ما قيمتة جرام واحد من الراديوم (1 كورى : 1Ci ؛ أى الكمية التىلها نشاط إشعاعى لجسيمات الفا ينظر $3.7x10^{10}$ انحلالة لكل ثانية) مضافا إليه عدد من الجرامات من مسحوق البريليوم سيؤدى إلى إنتاج 10^7 من النيوترونات السريعة لكل ثانية .



حيث الراديوم ينحل إلى الرادون بإشعاعه لجسيمات الفا α كما أن الرادون ينحل بدوره إلى البولونيوم مشعًا جسيمات الفا . تتفاعل جسيمات الفا مع البريليوم لتنتج الكربون والنيوترونات ويمكن صياغة التفاعل رمزيا بـ $^{9}Be\ (\alpha,n)^{12}C$. وحيث إن الراديوم له عمر النصف(الزمن اللازم لانحلال نصف عدد ذرات العينة) حوالى 1600 سنة ، فإن خليط الراديوم-بريليوم Ra-Be يمكنه إنتاج النيوترونات بمعدل ثابت(أى التغير فى عدد الذرات خلال إعداد التجارب والقياسات الإشعاعية غير ملحوظ وبالتالى فالنشاط الإشعاعى $A=\lambda N$ تعد ثابتة لأن عدد الذرات N يكاد يكون ثابتًا و $\lambda=.693/t_{1/2}$ ، حيث $t_{1/2}$ تمثل عمر النصف) ومن ثم يمكن استخدام هذا المصدر كمصدر قياسى Standard Source.

أيضا هناك مصدر الرادون-بريليوم Rn-Be ، والذى له عمر النصف يقارب من 3.8 أيام مما يصنفه من المصادر سريعة الانحلال. مصدر آخر هو البولونيوم- بريليوم Po-Be (ينتج حوالى $3x10^6$ نيوترون لكل ثانية) ويستخدم هذا المصدر عند الرغبة فى الحصول على إشعاعات جامية ضئيلة مصاحبة الانحلال، ولكن لهذا المصدر عيوب متمثلة فى قصر عمر النصف

(حوالى 140 يوم) كما أن عناية فائقة مطلوبة لتحضير البولونيوم بدرجة نقاوة عالية. وعند الرغبة فى الحصول على نيوترونات أحادية الطاقة Monoenergetic فإن المصادر الفوتونيوترونية Photoneutronic sources (γ,n) يمكن استخدامها. هذه المصادر لا تعتمد بالضرورة على المادة المشعة طبيعيًا، ومثال ذلك $^{9}Be(\gamma,n)^{8}Be$ و $^{2}H(\gamma,n)^{1}H$ ، كما أن طاقة الترابط للنيوترون الأخير ضعيفة بالنسبة لكل من ^{2}H و^{9}Be. أيضا تعد طاقة الاستحثات Threshold Energy صغيرة بالنسبة لتفاعلات (γ,n) ، فمثلا طاقة الاستحثات للتفاعل $^{2}H(\gamma,n)^{1}H$ تساوى 2.23 MeV ، فى حين تلك للتفاعل $^{9}Be(\gamma,n)^{8}Be$ تساوى 1.67 MeV . إن مشعات جاما الكثيفة جدًا يمكن إنتاجها برخص فى المفاعلات النووية وبالتالى يمكن استخدامها لتصنيع مصادر نيوترونات كثيفة تفوق تلك المنتجة من المشعات الجامية الطبيعية. هناك طريقة أخرى لإنتاج النيوترونات وذلك عبر المعجلات ومثالاً لذلك التفاعلات التصادمية التالية:

(أحد تفاعلات الاندماج النووى) $^{3}_{1}H+^{2}_{1}H\longrightarrow^{4}_{2}He+^{1}_{0}n$

$^{7}_{3}Li+^{1}_{1}H\longrightarrow^{7}_{4}Be+^{1}_{0}n$

لاحظ أن التفاعل الأول يعد أحد التفاعلات الأساسية فى المفاعلات الاندماجية النووية، فى حين أن التفاعل الثانى يمكن استخدامه فى المفاعلات الاندماجية فيما يسمى ببطانية اليورانيوم ^{238}U blanket 238- لإنتاج البلوتونيوم-239 . النيوترونات البطيئة يمكن إنتاجها من التفاعلات السابقة بعد تمرير النيوترونات السريعة خلال مهدىء مثل البارفين أو الجرافيت أو الماء.

إن المصدر الأكثر أهمية لإنتاج النيوترونات بلا منازع هو المفاعلات النووية، فإذا كان المفاعل مصممًا بحيث يحدث الانشطار فيه بسبب النيوترونات البطيئة، فإن خليط من النيوترونات السريعة والمتوسطة والبطيئة سينتج ، وهذا التعدد فى طاقات النيوترونات يناسب إنتاج النويّات المشعة الإصطناعية داخل ذلك المفاعل، إلاّ أنه هناك كثير من التجارب تتطلب النيوترونات البطيئة، وهذه يمكن الحصول عليها عبرما يسمى بالعمود الحرارى Thermal column وهو ببساطة عبارة عن كتلة ضخمة من

الجرافيت المهدىء توضع بجوار المفاعل ، ومن ثم فالنيوترونات الهاربة إليه ستهدأ سرعتها وبعد الانتشار فى مسافة محددة تدعى الطول الانتشارى Diffusion Length داخل العمود الحرارى تتحول إلى نيوترونات بطيئة، أنظر الشكل 2.7 للتوضيح.

الشكل 2.7 المفاعلات كمصدر رئيس للنيوترونات

3-7 الكشف عن النيوترونات Neutron Detection:

إن تعادل النيوترون لكونه لا يحمل شحنة كهربائية تجعله متميزا فى تفاعله مع المادة ، على خلاف تفاعلات الجسيمات المشحونة وأشعة جاما مع المادة. وحيث إن النيوترون معدوم الشحنة فليس هناك دور للقوة الكولومية فى التفاعل سواء مع الإلكترونات الدوارة أو النواة ذاتها. لذا وحتى يتفاعل النيوترون مع المادة عليه أن يخترق النواة أو يقترب كثيرًا منها ليمكن القوة النووية من التأثير. عندما يمتص النيوترون داخل النواة الهدف تتكون النواة المركبة Compound nucleus فى حالة مثارة ، وتتوزع طاقة الإثارة (المتضمنة طاقة الترابط والحركة للنيوترون) على مكونات النواة المركبة. وبعد انقضاء العمر الافتراضى للنواة المركبة والذى يتراوح بين 10^{-20} إلى 10^{-12} من الثوانى فإن الطاقة الزائدة تتحرر بإنبعاث جسيم أو أكثر من النواة

المركبة. لأى نواة مركبة فى حالة إثارة ، فإن هناك العديد من التفاعلات النووية المحتملة والتى تعتمد على طاقة الإثارة وموقع مستويات الطاقة فى النواة المركبة والنواة الناتجة، وبالتالى فإن احتمالية أى نوع من الامتصاص للنيوترون يعتمد على طاقة النيوترون الساقط وتركيبة المادة الماصة . هذه الاحتمالات تتغير كثيرا حتى بين النظائر المختلفة لنفس العنصر، وذلك لأن كل نويدة لها خواصها النووية الخاصة بها. ونظرًا لأهمية طاقة النيوترون فى تفاعلات النيوترون مع المادة، فإن تميز النيوترونات من وجهة نظر الطاقة يعد مهمًا، فهناك النيوترونات البطيئة والتى تتراوح طاقتها بين 0-1 eV والمتوسطة 1- 100 KeV والسريعة أكبر من 100KeV. ولنسرد الآن قائمة بتفاعلات النيوترونات بالمادة والتى فى مجملها تعد أساس طرق الكشف عن النيوترونات.

1- الاستطارة المرنة Elastic scattering (n,n)

2- الاستطارة اللامرنة Inelastic scattering (n,n), (n,γn), (n,2n) ؛ هذا التفاعل ممكن طاقيا فقط للنيوترونات السريعة ، فى التفاعل (n,n) تترك النواة فىحالة إثارة ، وفى التفاعل (n,γn) تتحرر طاقة الإثارة عن طريق أشعة γ ، والتفاعل (n,2n) ممكن عند سقوط النيوترون بطاقة تساوى أو أكبر من 10 MeV .

3- الأسر الإشعاعى Radiative capture (n, γ) ؛ هذا التفاعل يعد من أهم تفاعلات النيوترون مع المادة، حيث إن النيوترونات البطيئة يمكنها استحداث هذا التفاعل تقريبا فى كل النويدات. كما أن احتماليته عالية بالنسبة لبعض النويدات ولبعض طاقات معينة للنيوترونات فى مدى الطاقات المتوسطة ، وهذا النوع يسمى بالأسر الرنينى Resonance capture .

4- تحرر الجسيمات المشحونة ..., (n,α), (n,d), (n,p) ؛ وحيث إن هذا التفاعل يتطلب من الجسيم المشحون التغلب على الحاجز الكولومى قبل الإنفلات من النواة ، فتتميز هذه التفاعلات باحتمالية عالية للنوى الخفيفة، وكذلك بالطاقات العالية للنيوترونات الساقطة. يستثنى من ذلك تفاعل (n,α) الباعث للطاقة Exoergic حيث تتحرر جسيمات الفا بسقوط نيوترونات بطيئة على النوى الخفيفة مثل الليثيوم-6 والبورون-10 .

5- الانشطار (n,f) Fission ؛ فى هذا التفاعل تنشطر النواة المركبة إلى شظيتين مع تحرر نيوترون أو أكثر. الانشطار يحدث بسبب النيوترونات البطيئة فى ^{233}U, ^{239}Pu, ^{235}U ، فى حين أن النيوترونات السريعة تحدث انشطارا لكثير من النوى الثقيلة.

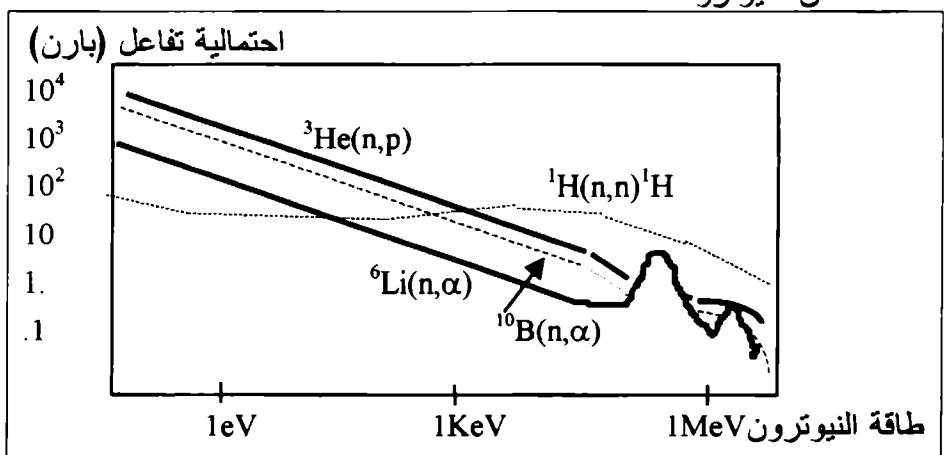
6- التفاعلات عالية الطاقة ؛ عند سقوط نيوترونات بطاقة عالية تزيدعن 100 MeV فقد تسبب فى انبعاث رش من الجسيمات المختلفة.

إن من أهم الطرق للكشف عن النيوترون، تبوب كما يلى:

1- التحولات النووية المحدثة بالنيوترونات Neutron induced transmutation حيث يمكن الكشف عن الجسيم الناتج؛ مثال ذلك تفاعلات (n,p), (n,γ), (n,α) , (n,f)

2- التحولات النووية المحدثة بالنيوترون والمنتجة لنوى مشعة، بحيث يستدل بانحلال هذه النوى عن الفيض النيوتروني المراد قياسه.

3- الاستطارة المرنة للنيوترونات، بحيث يكون الجسيم المرتد Recoil particle مشحونا ومن ثم يمكن الكشف عنه؛ مثال ذلك استطارة النيوترون من قبل البروتون. الشكل 3.7 يبين احتمالية التفاعل (المقاطع المستعرضة Cross sections) كدالة فى طاقة النيوترونات لأهم أربع تفاعلات تستخدم فى الكشف عن النيوترونات.

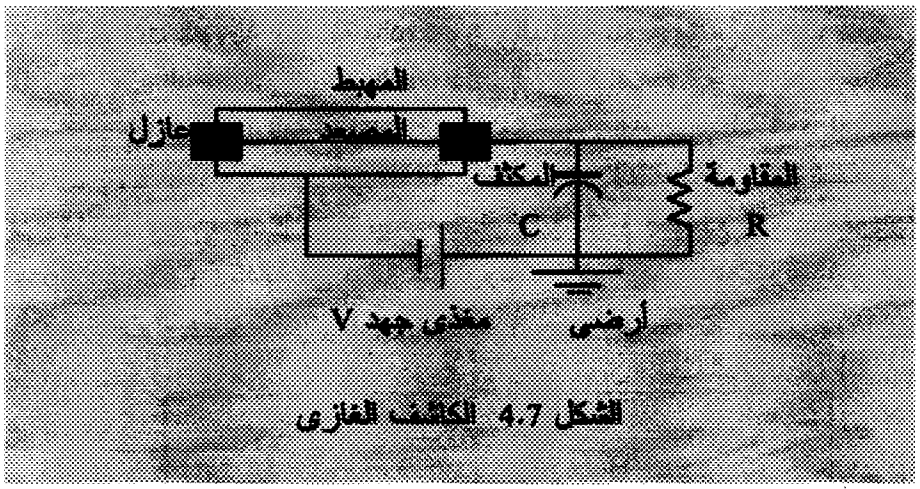


الشكل 3.7 احتمالية التفاعل للنيوترون كدالة فى طاقته

وكما أوردنا سابقا فإن الكشف عن النيوترونات ليس مباشرًا بل يتم الكشف عنه عن طريق مادة محولة ، وهناك عدة كاشفات ذات العلاقة منها:

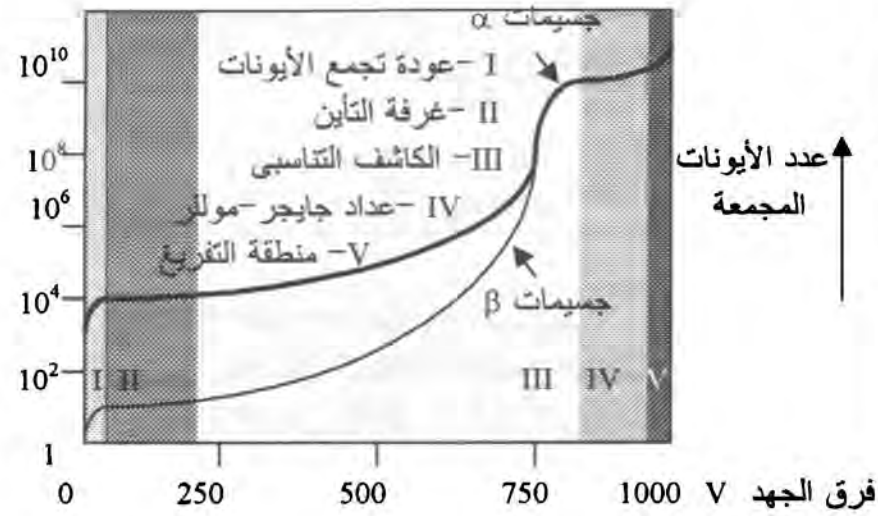
أولاً: الكاشفات الغازية:

فى هذه الكاشفات الجسيمات المشحونة تسبب تأين خلال مسارها فى غرفة الكشف المملوءة بالغاز، حيث يتوسط غرفة الكشف سلك المصعد Anode المعزول من أطرافه عن المهبط Cathode المتمثل بحاوية الغرفة. وتغذى الغرفة بفرق جهد بين المصعد والمهبط عن طريق المقاومة R المتصلة بالتوازى مع المكثف C ، أنظر الشكل 4.7 للتوضيح.



الشكل 4.7 الكاشف الغازى

وبتغيير فرق الجهد المغذى للكاشف تتنوع مسميات الكاشف مثل؛ غرف التأين والكاشفات التناسبية وأنابيب جيجر- موللر، وذلك حسب المنحنى المبين فى الشكل 5.7 .



الشكل 5.7 مناطق استخدام الكاشفات الغازية

كاشفات البورون :

وكمثال للتفاعل اللازم للكشف عن النيوترونات فهو تفاعل $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ يرافقه تحرير لطاقة تساوى 2.78 MeV ، وقد تنتج نويدة الليثيوم مباشرة فى الحالة الأرضية Ground state باحتمالية 064. للنيوترونات البطيئة أو باحتمالية 7. للنيوترونات بطاقة 1.8 MeV وباحتمالية 5. للنيوترونات بطاقة 2.5 MeV ، وفى هذه الحالة تتوزع الطاقة المتحررة بين الليثيوم والفا. وعلى نقيض ذلك قد تنشأ نويدة الليثيوم فى حالة استثارة ، والتى تتخلص منها النويدة بتحرير أشعة جاما ذات طاقة 48. MeV . ونظرا لأن مدى جسيمات الفا قصير فإن الكاشفات تتطلب أن يكون البورون ^{10}B فى صورة طبقة رقيقة جدا تغلف جدار الكاشف ومن ثم تتوفر الحرية فى اختيار نوع مناسب من الغاز لملء الكاشف، أو أن يكون البورون أساسا فى مركب غازى مثل غاز

ثالث فلوريد البورون BF_3 . هذا ويمكن حساب حساسية(S) Sensitivity الكاشف وكذلك كفايته (ε) Efficiency من المعادلتين التاليتين:

$$S = \frac{3840x10^{-24} NV}{1.128} \qquad (1.7)$$

$$\varepsilon = 1 - e^{-N\sigma_a d}; \sigma_a = \sigma_{a0}(\frac{.025}{E})^{\frac{1}{2}} \qquad (2.7)$$

حيث إن N تمثل عدد ذرات البورون لكل سم^3 ، و V تمثل الحجم الحساس للكاشف، و σ_{a0} تمثل احتمالية امتصاص النيوترون البطئ من قبل البورون وهى حسب المنحنى بالشكل 3.7 تساوى 3840 b ،والرقم 1.128 يمثل نسبة $\bar{v}/v_0$ للنيوترونات ذات توزيع ماكسويل بولتزمن فى الطاقة عند درجة حرارة $20^\circ C$ و E تمثل طاقة النيوترون الساقط فعليا على الكاشف، و d تمثل طول الحجم الحساس الموازى لمحور الكاشف.

مثال 1.7

احسب حساسية كاشف BF_3 للنيوترونات البطيئة، بحيث إن الحجم الحساس يساوى 58 cm^3 وكثافة ذرات البورون ^{10}B هى $N= 4.1x10^{18}$ atom/cm^3 . أيضا احسب كفاية الكاشف للنيوترونات البطيئة المتحركة موازية لمحور الكاشف، علما بأن طول الحجم الحساس يساوى 15.2 cm .

الحل :

$$S = \frac{3840x10^{-24} X4.1x10^{18} X58}{1.128} = 0.81$$

أى أن حساسية الكاشف تساوى 0.81 عدة لكل ثانية لكل وحدة فيض flux (ϕ) نيوترونى.

كما أن الكفاية للكاشف هى:

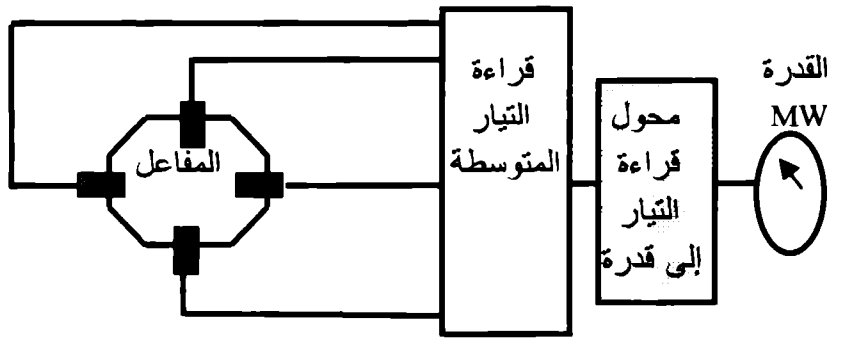
$$\varepsilon = 1 - \exp\left[- 4.1x10^{18} * 3840x10^{-24} * \left(\frac{.025}{E}\right)^{\frac{1}{2}} * 15.2 \right]$$

وبالتعويض بطاقة النيوترون الحرارى E=.025 eV فإن ε= 22% .

وعند التعامل مع فيض نيوترونى عال (مثل ذلك الموجود بالمفاعلات النووية) فإن الكاشف النيوترونى يمكن تشغيله كغرفة تأين من نوع التيار الكهربئ، فعلى افتراض أن الطاقة الناتجة 2.3 MeV من التفاعل B(n,α)Li* ستنتج تأين وذلك بفقد 35eV لإنتاج زوج أيونى، حيث إن Li* تعتبر نويدة ليثيوم مثارة ستفقد تلك الإثارة بتحرير أشعة جاما بطاقة 2.78-2.3=.48 MeV، فإن كل تفاعل لكل ثانية سينتج $1.02x10^{-14}$ أمبير (amp) . وبالتالى فإن التيار بوحدة الأمبيرالناتج لفيض من النيوترونات ϕ فى غرفة التأين بحساسية S يعطى من المعادلة التالية:

$$I = 1.02x10^{-14} \phi S \qquad (3.7)$$

وبالتالى فلو كانت الغرفة لها حساسية تفاعل واحد لكل ثانية لكل وحدة فيض نيوترونى فإن الغرفة ستنتج تيارا كهربائيا قدره 1 مللى أمبير لفيض نيوترونى فى مفاعل قدره 10^{11} نيوترون لكل ثانية لكل سم^2 . وفى المفاعلات النووية يتم وضع هذه الغرف الأيونية موزعة حول القالب وتتجمع قراءتها ويؤخذ متوسط قراءات الغرف الأيونية تم تمرر على محول من قراءات تيار كهربى إلى قدرة المفاعل، أنظر الشكل التالى للتوضيح.



الشكل 6.7 قراءة قدرة المفاعلات باستخدام غرف التأين

كاشفات الهيليوم :

هناك أيضا التفاعل $^{3}He(n,p)^{3}H$ محررا طاقة قدرها 765 MeV. وهذا التفاعل له احتمالية تفاعل قدرها 5400 b للنيوترونات البطيئة، ومن مميزات هذا التفاعل أنه ليس هناك وليدات تفاعل فى حالة مثارة وبالتالى فإن نواتج التفاعل (البروتون والتريتيوم) يحملان كل الطاقة المتاحة وهى طاقة النيوترون الساقط و الطاقة المتحررة من التفاعل، كما أن عيب هذا التفاعل هو تأثير استطارة النيوترون بالتريتيوم الذى له احتمالية تضاهى ضعف تفاعل $^{3}He(n,p)^{3}H$. وللكشف عن النيوترونات السريعة يحاط الكاشف بمادة مهدئة للنيوترونات ، بحيث يتم وصولها إلى الكاشف بسرعات بطيئة ومن ثم يتم الكشف عنها.

كاشفات الانشطار Fission chamber :

الكاشفات أو الغرف الانشطارية هى الكاشفات المعتمدة على الانشطار بحيث يتم الكشف عن النيوترونات عن طريق الأيونات المتولدة خلال رحلة توقف نواتج الانشطار وذلك خلال غرف التأين أو الغرف التناسبية أو يتم الاستدلال عن النيوترونات بتتبع النشاط الإشعاعى لنواتج الانشطار . من مزايا استخدام غرف الانشطار Fission chambers ، وجود التنوع فى المواد المنشطرة ومن ثم يتم اختيار اعتمادية الطاقات، فمثلا ^{238}U تستخدم فى الكشف عن النيوترونات السريعة فى حين ^{235}U تستخدم فى الكشف عن النيوترونات

البطيئة. كما أن الطاقات العالية الناتجة لكل تفاعل تساعد على التمييز ضد فيوض عالية من أشعة جاما مقارنة بتلك الكاشفات المعتمدة على تفاعل (n,α) أو ما يماثله. وفى العادة يتم استخدام المادة المنشطرة فى هيئة رقائق نحيفة بدلا من غازات. هذا وقد وجد أن كاشفات البورون تعتبر أكثر حساسية للكشف عن النيوترونات من الكاشفات الانشطارية.

كاشفات ارتداد البروتون Proton recoil detectors :

إن أكثر الكاشفات الشائعة الاستخدام فى الكشف عن النيوترونات السريعة تلك التى تعنى بتفاعلات الاستطارة (n,p) ، حيث إن فى هذه التفاعلات يعطى النيوترون على الأقل جزءا من طاقته إلى البروتونات، ومن ثم فالتأين أو الإثارة التى يسببها الأخير (البروتون) تمكن من عملية الكشف.

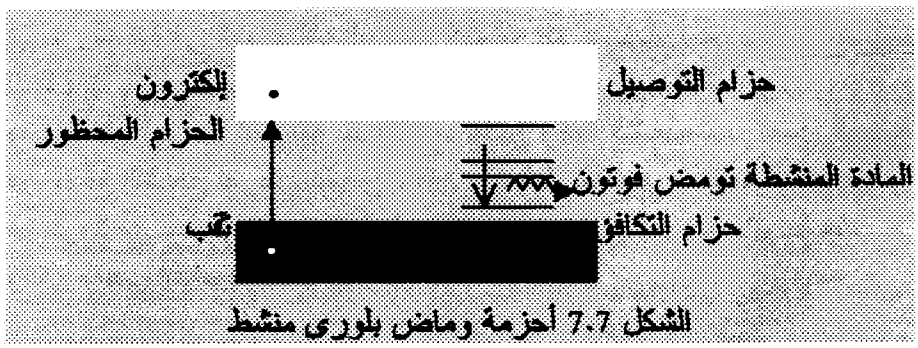
ثانيا: الكشف عن طريق التنشيط الإشعاعى

Detection by induced activity :

عند تعريض نويدات ما مستقرة إلى النيوترونات لفترة معينة يحدث تحويل لتلك النويدات مولدا بذلك نويدات ذات نشاط إشعاعى. وبعد توقف التشعيع النيوترونى يتم الكشف عن النشاط الإشعاعى والذى يتم من خلاله الكشف عن الفيض النيوترونى المسبب لذلك النشاط . تسمى هذه الكاشفات بكاشفات النشاط الإشعاعى. من مميزات هذه الطريقة إنه بالاختيار المناسب للمادة التى ستشعع يمكن قياس فيوض تتراوح من 1 نيوترون/سم2 /ثانية إلى أعلى فيوض ممكنة فى المفاعلات النووية. كما أنه يتم استخدام أحجام صغيرة للكاشفات ، بحيث يمكن أن تكون رقائق صغيرة أو كريات صغيرة.
ونظرا لأن فى هذه الطريقة يتم تتبع مرحلتين وهما التشعيع ، ثم فصل العينة من موقع التشعيع لغرض القياس ، فإن هذه الطريقة غير صالحة للكشف عن فيوض تتغير مع الزمن. فى هذه الحالة يجب استخدام الغرف الأيونية مثلا والتى تعطى القياسات الآنية للفيض.

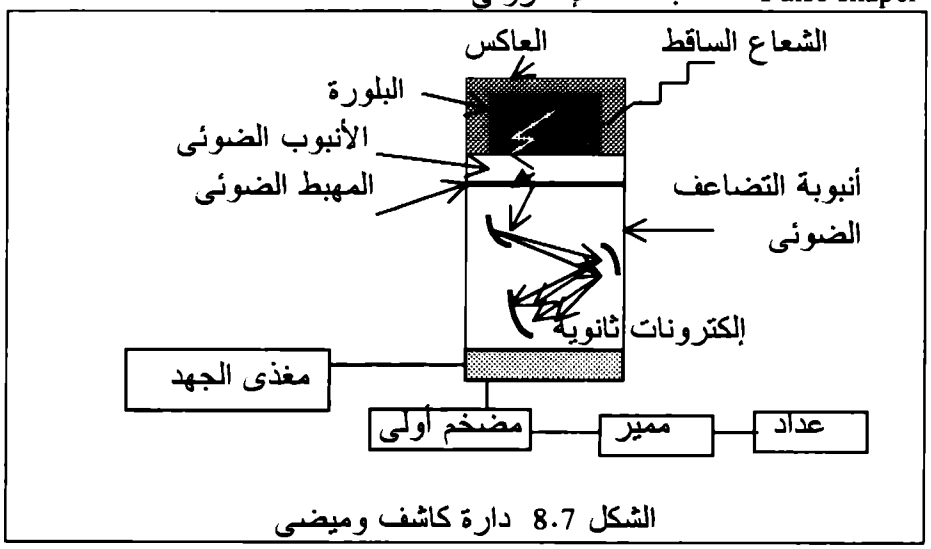
ثالثـــًا: الكاشفات الوميضية Scintillation detectors :

فى الوقت الذى تعتبر فيه غرف التأين والكاشفات التناسبية وكاشـــفات أشـــباه الموصلات (الآتى ذكرها) ذات فائدة فى قياس الجسيمات ذات المدى القصير مثل الفا و بيتا ذات الطاقات المنخفضة نسبيًا، فإنها تعجز عن الكشف عـــن الجسيمات التى مداها أطول من أبعاد غرفة الكاشف. وعلى نقيض ذلك فـــإن الكشف الوميضى يعد من أحد الطرق المفيدة فى قياس طاقات بيتا وجامـــا . ففى نظرية الحزام Band theory تمثل البلورة بحزام التكافؤ للطاقة والذى فى العادة يكون ممتلئ باللإلكترونات و كذلك حزام التوصيل للطاقة والذى فـــى العادة يكون فارغا. يكون مستوى حزام التوصيل أعلى مـــن حـــزام التكـــافؤ ويفصل بينهما حزام الطاقة المحظور الخالى مـــن الإلكترونـــات الحـــرة. إن مرور الجسيم المشحون والذى له طاقة كافية يمكنه نقل إلكترونات من منطقـــة التكافؤ إلى منطقة التوصيل وهو ما يسمى بالتأين.الفراغ الناتج عـــن رحيـــل الإلكترون يسمى بالثقب Hole . الإلكترون فى منطقة التوصيل والثقـــب فـــى حزام التكافؤ يتحركان مستقلين خلال البلورة Crystal . أى تحور للبلورة مثل إضافة ذرات شوائب يمكنها أن تكون مستويات طاقة داخل المنطقة المحظورة ، وبسرحان الثقوب والإلكترونات فى البلورة تحدث إثارة للمـــادة المنشـــطة (الشوائب) . وعند عودة هذه المستويات المثارة إلى مستويات أقـــل أو إلـــى مستوى استقرارها فإنها تومض ضوء (فوتون)، أنظرالشكل التالى للتوضيح .



الشكل 7.7 أحزمة وماض بلورى منشط

ويتركب الكاشف من الوماض Scintillator محاط بعاكس ضوء من عدة جهات ومحاط بالأنبوب الضوئى من جهة أخرى الذى ينتهى بالمهبط الضوئى فأنبوبة التضاعف الضوئى فقاعدة الكاشف. الشكل 8.7 يبين تركيبة الكاشف. وطريقة عمل الكاشف تتمثل فى إنتاج الجسيم الساقط لوميض الضوء بجسم البلورة، وعن طريق عاكس الضوء والأنبوب الضوئى فإن كمية كبيرة من الضوء ترحل إلى المهبط الضوئى . الإلكترونات الضوئية المنبعثة من المهبط الضوئى تتضاعف عدة مرات عن طريق أنبوب التضاعف الضوئى. نبضة التيار الناتج تولد إشارة لمدخل المضخم الأولى. هذه النبضة ، بعد مرورها على المميز Disciminator وكذلك منسق النبضة Pulse shaper ، تعد بالعداد الإلكتروني.



الشكل 8.7 دارة كاشف وميضى

ولعل الكاشفات الوميضية التى تستخدم يوديد الليثيوم المنشط باليوربيوم Li I(Eu) تعد أحد الكاشفات عن النيوترونات وهى تعتمد أساسا على التفاعل $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ مع تحرير طاقة 4.78 MeV وهى طاقة كبيرة تميز هذا التفاعل، كما أن احتمالية التفاعل 940b . وتتميز كاشفات يوديد الليثيوم عن نظيرتها الكاشفات الغازية وذلك من خلال حجمها الصغير نظير كفاية عالية التى تصل فى بعض الحالات إلى كفاية 90% لثخانة 2 cm للبلورة. كما أن أحد أهم عيوبها هو الحساسية لأشعة جاما.

رابعًا: الكاشفات أشباه الموصلات Semi-conductor detectors :

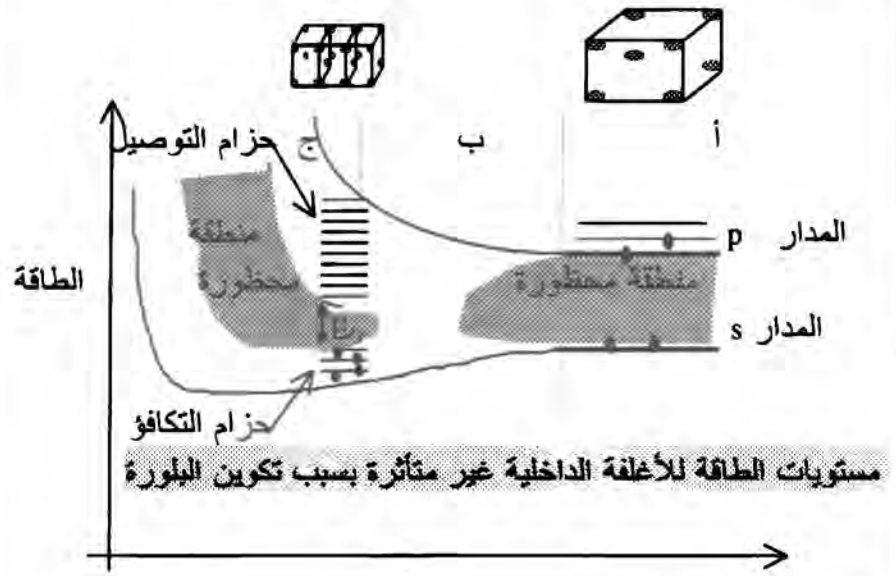
وحتى تعم الفائدة، لنعرج قليلا عن ماهية أشباه الموصلات والتى كانت أساس لتقنية ثورة الترانسيستور فى مطلع الخمسينيات. فكما أسلفنا ذكره أن البنية الأساسية للمادة هى الذرة التى اقترحها رذرفورد والتى تتمثل فى نواة مكونة من بروتونات ونيوترونات ، وهذه النواة يطوف من حولها الإلكترونات فى مدارات محددة ، فمثلاً فى ذرة الكربون ^{12}C توجد ستة إلكترونات تتوزع كما يلى: 2 منهما فى المدار الأول n=1 بمنزلتين States ، وفى المدار الثانى n=2 يوجد أربعة إلكترونات اثنان منهما فى منزلتين بالمستوى s والآخران فى منزلتين بالمستوى p الذى سعته الكاملة 6 إلكترونات. إذا فالتركيب الإلكترونى لعنصر الكربون يعبر عنه بالآتى:

$$1s^2\ 2s^2\ 2p^2$$

وكذلك فإن عنصر السليكون Si لديه عدد 14 إلكترونا موزعة على ثلاث مدارات رئيسة كما يلى:

$$1s^2\ \ 2s^2\ 2p^6\ |\ 3s^2\ 3p^2$$

ماذكر أعلاه يعبر عن مثال للتوزيع الإلكترونى للذرات الحرة من المادة. أما فى حالة البناء البلورى لهذه الذرات فإن مستويات الطاقة تختلف عنها فى الحالة الحرة للذرة. حيث إن البلورة عبارة عن ذرات تشغل حيز ذى ثلاثة أبعاد. هذه الذرات لها بناء تكرارى لوحدة بناء أساسية. ففى حالة تكوين البلور فإن مستويات الطاقة لإلكترونات الأغلفة الخارجية تتغير كثيرا حيث إن هذه الإلكترونات مشتركة بين أكثر من ذرة فى البلورة. لقد لوحظ أن مشاركة هذه الإلكترونات الخارجية للذرات يشكل حزامًا من مستويات طاقة متقاربة بدلاً من مستويات طاقة متباعدة جدًا فى حالة الذرة الحرة. ففى الشكل 9.7 يبين كيفية تشكيل أحزمة الطاقة وذلك بسبب تقارب الذرات لتشكيل البلورة.



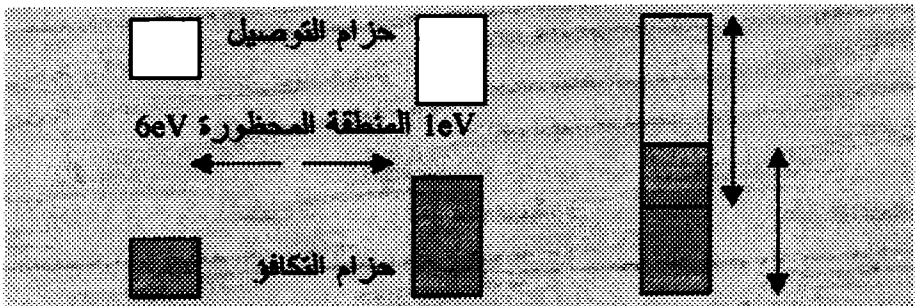
الشكل 9.7 تكوين أحزمة الطاقة عند تقريب الذرات لبناء البلور

ولتفسير الشكل، لنفرض أن البلورة هى $_{14}Si$ والتى لها تركيب إلكترونى للذرة الحرة كما يلي:

$$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^2$$

إذاً، المدار الرئيس الثالث به المدار الفرعي s والذى له موقعان لإلكترونين، وكذلك المدارات الفرعية p والتى لها ستة مواقع للإلكترونات محملة فقط بإلكترونين فى حالة ذرة السيليكون. وعلى مستوى البلورة التى تحوى على N من الذرات فنلاحظ أن الطرف الأيمن من الشكل يبين المدار الثالث المتكون من مدارات p التى تحوى على 6N مواقع للإلكترونات تحوى فعليًا على 2N من الإلكترونات. أيضًا المدار s الذى به 2N مواقع تحتوى على

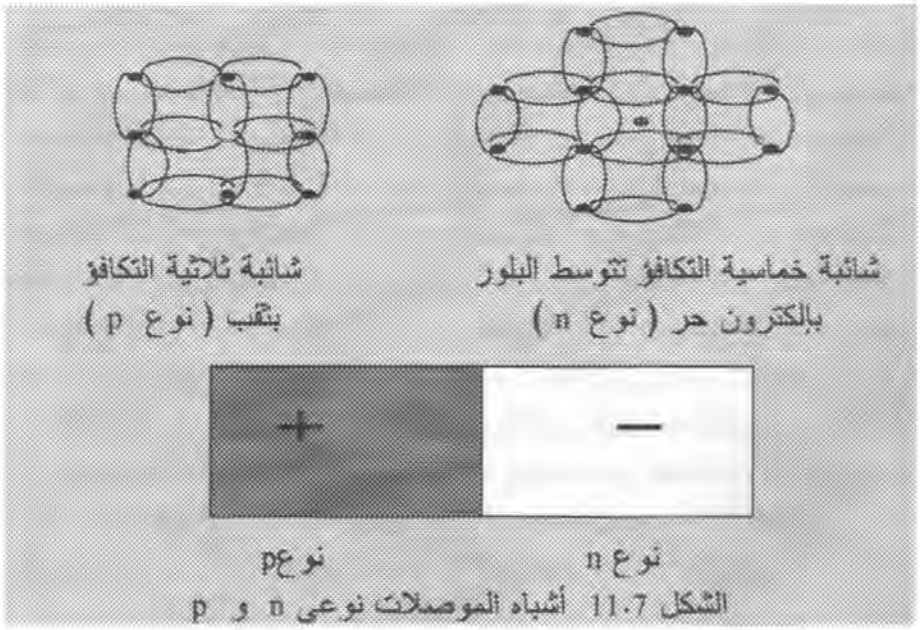
2N من الإلكترونات. وهذه الحالة للبلورة بسبب التباعد الكبير بين الذرات توافق بناء الذرة الحرة (الجزء أ من الشكل) . الآن لنفترض أنه يمكن تقليص المسافة بين الذرات بدون تغيير البلورة وذلك بالاتجاه إلى اليسارفى الشكل المبين، فإن كل ذرة ستؤثر بقوة كهربائية على جارتها ومن ثم فإن البلورة ستشكل مجموعة إلكترونات يجب عليها إطاعة مبدأ الإقصاء لباولى Pauli exclusion principle وبالتالى فإن مستويات الطاقة تنفصل لتكوين حزام طاقة. إن الفصل بين مستويات الطاقة صغير ولكن حيث إننا نتعامل مع N من الذرات وهو رقم يقارب من 10^{23} /cm3 ، فإن الفارق فى الطاقة بين أعلى وأدنى مستوى يساوى عدد من الإلكترون فولت. هذا العدد الكبير من مستويات الطاقة المتقاربة جدا يشكل ما يسمى بحزام الطاقة. فمثلا فى الجزء (ب) من الشكل نلاحظ أن عدد 2N من المواقع (مدار s) تتفصص لتكوين حزام طاقة تحوى على 2N من الإلكترونات ، وكذلك فإن عدد المواقع 6N (مدارات p) تتفصص حاوية عدد 2N من الإلكترونات. إن المنطقة المحظورة فى الجزء ب تتضائل كلما قلت المسافة بين الذرات حتى يتم التداخل بين الحزامين ، وفى هذه الحالة تتحد المواقع (المنازل) العليا 6N مع المنازل الدنيا 2N لتكون 8N من المنازل بحيث تحوى 4N مواقع منها عدد الإلكترونات الموجودة وهى 4N . عند هذه المسافة (مساوية للبعد بين شبكات البلور) ، كل ذرة تهب 4 إلكترونات لهذا الحزام ومن ثم فلا تكن هذه الإلكترونات من خواص الذرات ذاتها ولكن تابعة للبلورة ككل، لذلك تعتبر هذه المادة رباعية التكافؤ وذلك بمساهمتهم بأربع إلكترونات للبلورة. الحزام الذى يحوى هذه الإلكترونات يسمى بحزام التكافؤ. يفصل بين هذا الحزام وحزام التوصيل الذى يعلوه والذى به 4N منازل خالية من الإلكترونات بما يسمى بالمنطقة المحظورة مقدرة بطاقة قدرها E_G . من الشرح السابق يمكننا التمييز بين المادة ككونها عازلة، أو موصلة، أو شبه موصلة ، وذلك بالرجوع إلى تشكيلة المنطقة المحظورة وحزامى الطاقة (حزام التوصيل وحزام التكافؤ) ، الشكل 10.7 يبين الفارق .



الشكل 10.7 أحزمة الطاقة في الموصل وشبه الموصل والعازل

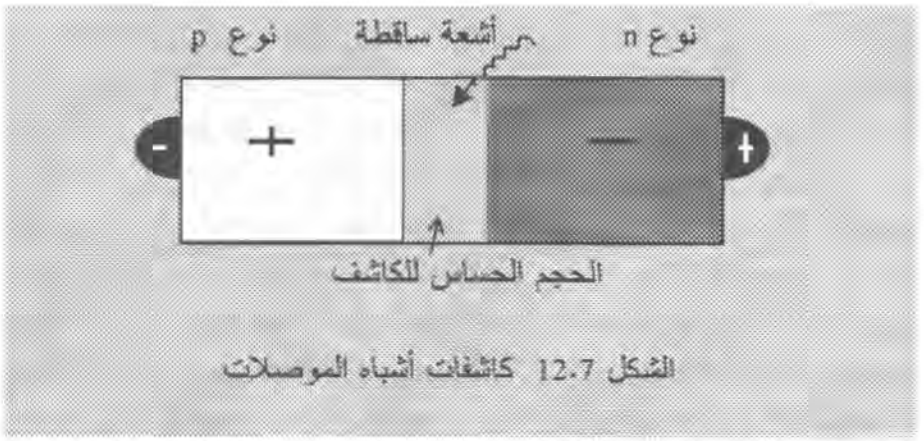
إن أى مادة تكون فيها منطقة الطاقة المحرمة صغيرة حوالى 1eV تسمى بشبه موصل، فالكربون مثلا يسمى شبه موصل لتميزه بصغر منطقة الطاقة المحظورة، وكذلك فإن الجرمانيوم والسيليكون يعتبران من أشباه الموصلات العملية، حيث إنه فى درجة حرارة 0° K فإن E_G للجرمانيوم تساوى 0.785 eV وللسيليكون تساوى 1.2 eV . هذه المواد عند درجة حرارة منخفضة يكون حزام التكافؤ محتويا على الإلكترونات وحزام التوصيل يكون خاليا من الإلكترونات، إلاّ أنه بزيادة الحرارة فإن بعض هذه الإلكترونات تكسب طاقة تمكنها من اجتياز المنطقة المحظورة واختراق حزام التوصيل وبالتالى فإن هذه الإلكترونات تبقى لها القدرة على الحركة. ومن ثم فإن هذه المادة التى كانت عازلة فى درجة حرارة منخفضة، أصبحت موصلة فى حالة درجة الحرارة المرتفعة، ومن هنا كان اسم أشباه الموصلات. إن الفراغات المصاحبة لتخلى الإلكترون عن حزام التكافؤ تعزو أهميتها إلى كونها حاملة للكهرباء بنفس ذات الفاعلية للإلكترون الحر. هذه النوعية من المواد تسمى أشباه الموصلات النقية، ومن ثم يجدر الإشارة هنا إلى تغشيش هذه النقاوة بإضافة نوع ما من الذرات بمادة مخالفة وبالتالى يتم استحداث منازل طاقة فى المنطقة المحرمة، ومن ثم فإن ذلك له مساهمة فى عملية التوصيل (كما أسلفنا ذكره فى جزء الكاشفات الوميضية) ، وتسمى هذه بأشباه الموصلات غير النقية. إذا كانت المادة المضافة (الشوائب Impurities) لشبه الموصل

النقى خماسية التكافؤ مثل عنصر الأنتيمونى Sb فإن الإلكترونات الأربعة تكون رابطة تساهمية مع العنصر النقى ، فى حين أن الإلكترون الخامس يكون حرا بحيث يمكنه نقل التيار الكهربائى ومن ثم تسمى هذه المادة بنوع n . أما عند إضافة مادة مخالفة ذات تكافؤ ثلاثى مثل البورون أو الجاليوم أو الإنديوم، فإنه يتم تشكيل ثلاث روابط تساهمية، فى حين تبقى الرابطة الرابعة تشكل فراغا يمكنه اكتساب إلكترون، وهذه المادة تسمى بنوع p . إن تركيبات n-p تكون ما يسمى بالصمام الثنائى Diode كما أن تركيبة p-n-p أو n-p-n تسمى بالصمام الثلاثى Transistor الذى باكتشافه كان ثورة فى عالم الإلكترونيات و ظهر بناء عليه الجيل الثالث للحاسبات الذى كان أساس لنهضة الحاسبات التى نعيشها فى أواخر القرن العشرين الممثلة فى الجيل الخامس للحاسبات وهى نتاج اتحاد السرعة الفائقة لحاسبات الجيل الرابع المعتمدة على تقنية الدوائر المتكاملة الكبيرة جدا VLSI ككيان صلب Hardware مع برمجيات الذكاء الإصطناعى ككيان رقيق Software . الشكل 11.7 يوضح الروابط التساهمية للنوعين n و p ، كما يبين شكل الصمام الثنائى الذى يعتبر أيضا أساسا لكاشفات الإشعاع.



الشكل 11.7 أشباه الموصلات نوعى n و p

إذا ما وضع الصمام الثنائى نوع n-p تحت تأثير فرق جهد عكسى فإن الثقوب تتجه نحو السالب فى حين تتجه الإلكترونات نحو القطب الموجب مما ينتج عنه تولد طبقة خالية تتميز بأنها خالية من نواقل الشحنة وهى تشكل الحجم الفعلى الحساس للكشف عن الأشعة الساقطة (الشكل 12.7). إن سمك هذه الطبقة حوالى 1 ميكرون ، وبتغير الجهد الخارجى تتغير سماكة هذه الطبقة. ونظرا لصغر هذه الطبقة فإن زمن استجابة الكاشفات من هذا النوع صغيرة جدا إذا ما قورنت باستجابة الكاشفات الغازية، إلا أن عدد الشحنات الناتجة فى أشباه الموصلات تقارب من عشرة أضعاف تلك الشحنات الناتجة فى الكاشفات الغازية، والسبب أنه فى الكاشفات الغازية يحتاج إلى حوالى 30 eV



الشكل 12.7 كاشفات أشباه الموصلات

لتوليد زوج أيونى فى حين أنه يحتاج إلى حوالى عشر(1/10) تلك القيمة فى حالة الكاشفات الشبه موصلة.

إن الكشف على النيوترونات باستخدام هذه الكاشفات يتم عن طريق الاستفادة من التفاعلات التى تحدثها النيوترونات ، حيث يتم وضع الهدف للنيوترونات الساقطة فى صورة رقائق قريبة من نافذة الكاشف.

خامسا: كاشفات المستحلبات النووية Nuclear Emulsion detectors :

لقد تم استخدام المستحلبات النووية فى قياس طاقات النيوترونات وكذلك فى قياسات المطيافية Spectroscopy .ففى المستحلبات يمكن أن يتم القياس

المتزامن لكل من الطاقة واتجاه الجسيم. تتميز المستحلبات النووية باحتياجها إلى زمن قليل للتجهيز والتشغيل، وأيضا تتميز بصغر الحجم ومتضامة مقارنة بكثير من الأنواع الأخرى من الكاشفات. ولكن من عيوبها طول الزمن اللازم لتحليل نتائج المسارات فى المستحلب النووى. فعند مرور الجسيمات المشحونة خلال المستحلب (طبقة حساسة تصويرية) ستترك صورة لمسارها. وبعد إظهار الصورة Film فستظهر حبيبات الفضة على طول المسار للجسيمات. العديد من النتائج يمكن استخلاصها ، فمثلا عدد المسارات الفردية تعطى قياسا لعدد الجسيمات التى دخلت لوحة المستحلب، كما أن الدراسة المستفيضة للمسارت تمكن من معرفة الكتلة والشحنة وطاقة الجسيمات. إن المستحلبات النووية تتفوق كثيرا على الغرف السحابية Cloud Chambers من ناحية قدرة الإيقاف Stopping power ومدة حساسية الكاشف حيث إنه فى المستحلبات يمكن تجميع البيانات لعدة أسابيع والكاشف مستمر فى التشغيل طيلة كل هذه المدة، كما أن المستحلبات كما ذكرنا تمتاز بخفة وزنها وصغر حجمها وقوة بنيتها. إلا أن الغرف السحابية تمتاز عن المستحلبات فى الدقة حيث تميل المستحلبات إلى الإنكماش خلال إظهار الصورة وفى حالة عدم أخذ الإحتياطات اللازمة فقد يحدث إنكماش سمك المستحلب إلى نسبة 50%، أيضا تمتاز الغرف السحابية عن المستحلبات فى أنه يمكن تشغيلها فى مجال مغناطيسى ومن ثم بقياس انحناء المسار يمكن حساب زخم الجسيم . عدة أساليب تستخدم لقياس طاقة النيوترونات ومطيافيتها من خلال المستحلبات النووية، وتتنوع الأساليب بناء علىدرجة توجيه النيوترونات Collimation ، وكذلك على مدى طاقة النيوترونات المراد قياسها، وأيضا الامكانات والزمن المتوفر لحساب المسارات. ولعل من أهم هذه الطرق المعتمدة على ارتداد البروتونات مع الاستفادة من منحنيات المدى – الطاقة Range - Energy التىتوضح مدى الجسيمات بالميكرون أو بالمليمتر كدالة فى الطاقة MeV .

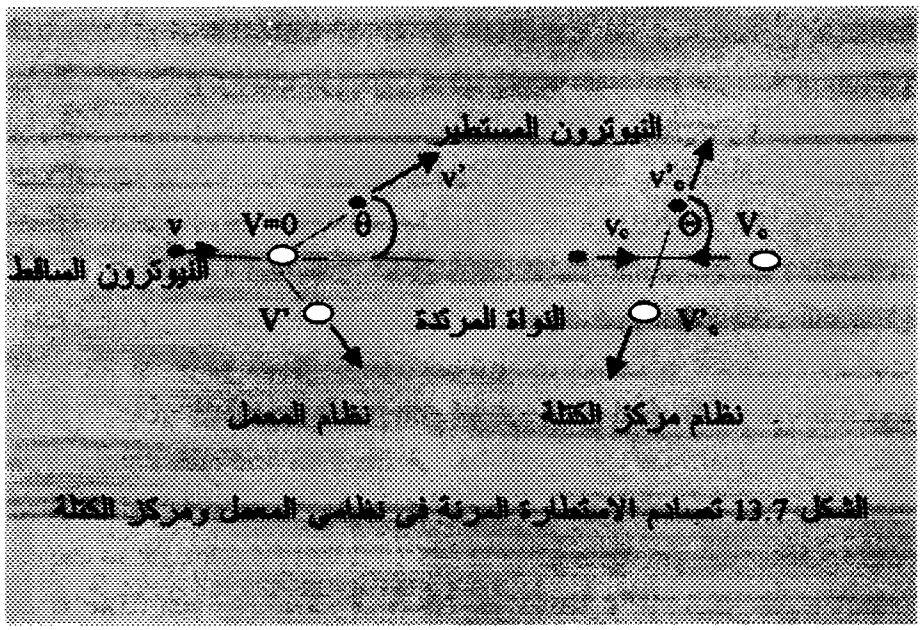
4-7 تصنيف النيوترونات :

التصنيفات المهمة للنيوترونات هى كونها إما سريعة Fast أو بطيئة (حرارية Thermal) من وجهة نظر الطاقة وهذا يترتب عليه فيزياء نوعين من المفاعلات سواء المفاعلات السريعة أو المفاعلات الحرارية. كما أن هناك تصنيف آخر للنيوترونات من حيث كونها سريعة المو لد (فورية Prompt) أو بطيئة المولد (متأخرة Delayed) من وجهة نظر الزمن ، وهذا يترتب عليه إمكانية هندسة المفاعلات أو عدمها، بل ويتعدى ذلك إلى إمكانية التطبيق السلمى لتوليد الطاقة النووية من أساسه، حيث إنه فى وجود النيوترونات الفورية فقط والتى تجعل الثابت الزمنى Time constant للنظام الهندسىالنووى فى مدى الميكروثانية، لما أمكن تصميم أنظمة تحكم للمفاعل تتلاءم مع هذا الزمن، ولكن بوجود النيوترونات المتأخرة جعلت الثابت الزمنى للنظام الهندسى فى مدى الثانية والتى أمكن لنظم التحكم من القدرة على السيطرة على تصرف النظام فى هذا الزمن. فى هذا الفصل سنركز على الجانب الطاقى لتصنيف النيوترونات ومن ثم سنناقش بشئ من التفصيل مسببات اختلاف النيوترونات من وجهة نظر سرعاتها ، أى أننا سنناقش أحد أهم تفاعلات النيوترونات مع المادة ألا وهو استطارة أو تبعثر النيوترونات نتيجة تصادمها مع نوى مختلفة وما مدى تأثير ذلك على طاقتها الناتجة.

5-7 استطارة النيوترونات فى نظامي المعمل ومركز الكتلة :

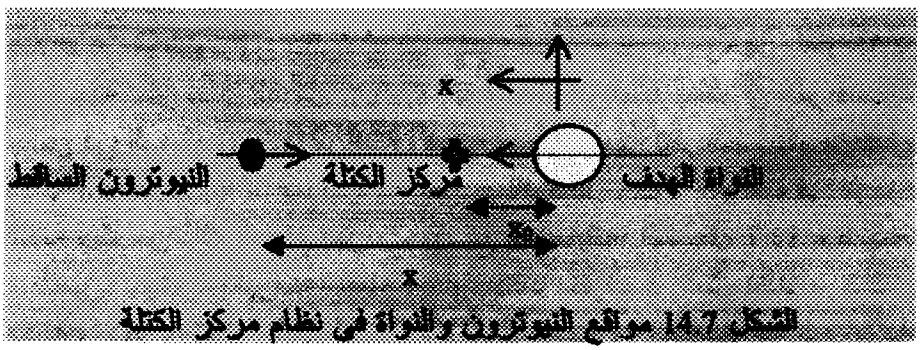
عند اصطدام النيوترون بالنواة يمكننا تحليل هذا التفاعل من وجهتى نظر،إما من وجهة نظر نظام المعمل Labarotory system ونقصد بذلك أن المراقب جالس فى المعمل ويجرى مراقبته وقياسه أو من وجهة نظر نظام مركز الكتلة Center of mass system ، ونقصد بذلك تخيل وجود المراقب فى مركز الكتلة ويتم من ذلك الموقع إجراء جميع حساباته، الشكل 13.7 يوضح النظامين، حيث المتغيرات المذيلة subscripted بحرف c تمثل نظام مركز الكتلة والأخرى تمثل متغيرات نظام المعمل كما أن المتغيرات المرأسة

superscripted بإشارة (') تمثل تلك الخاصة ببعد التصادم والأخرى تمثل قبل التصادم. هذا وسنتبنى تحليلاتنا فى نظام مركز الكتلة لكونها أسهل إلى حـــد ما.



الشكل 13.7 تصادم الإشارة المرنة فى نظامى المعمل ومركز الكتلة

وحتى يمكننا أن نحل مشكلة تصادم النيوترون مع النواة بالنسبة لنظام مركـــز الكتلة علينا أن نعرف بعض المصطلحات فى ذلك النظام ، وذلك بمراجعـــة الشكل 14.7 التالى.



الشكل 14.7 مواقع النيوترون والنواة فى نظام مركز الكتلة

فى الشكل يقع مركز الكتلة على بعد x_0 من النواة الهدف التى كتلتها M كما يقع النيوترون ذو كتلة m على بعد x من النواة الهدف، وبإجراء التوازن (العزم حول المركز) نجد أن:

$$Mx_0 = m\,(x-x_0) \qquad (4.7)$$

وبحل المعادلة لقيمة x_0 مع اعتبار أن رقم الكتلة الذرية A يساوى M/m (حيث إن كتلة النيوترون قريبة جدا من كتلة البروتون) نجد ما يلى:

$$x_0 = \frac{x}{1+A} \qquad (5.7)$$

كما أن سرعة مركز الكتلة نتحصل عليها بإجراء التفاضل للموقع x_0 بالنسبة للزمن:

$$V_{CM} = \frac{dx_0}{dt} = \frac{1}{1+A}\,\frac{dx}{dt} = \frac{1}{1+A}\,v \qquad (6.7)$$

والآن نتخيل أن أحدنا جالسا فى مركز الكتلة، سيلاحظ أن كلا من النواة والنيوترون يتقاربان فى اتجاه مركز الكتلة وتكون السرعة النسبية للنيوترون، بدلالة سرعة النيوترون فى نظام المعمل v هى:

$$v_c = v - V_{CM} = \frac{1}{1+\frac{1}{A}}\,v \qquad (7.7)$$

وتكون السرعة النسبية بالنسبة للنواة الهدف (نفترض أنها ساكنة فى المعمل):

$$V_c = 0 - V_{CM} = -\frac{1}{1+A}\,v \qquad (8.7)$$

مثال 2.7

لماذا يسمى نظام مركز الكتلة بنظام الزخم الصفرى Zero Momentum System

الحل:

كما أوردنا فى التحليل السابق تحديد سرعتى النيوترون والنواة فى نظام مركز الكتلة، فإنه يمكننا حساب الزخم الكلى كما يلى:

$$\text{الزخم الكلى} = m\,v_c + M\,V_c$$

وبالتعويض فى هذه المعادلة بالمعادلة 7.7 لقيمة سرعة النيوترون v_c فى نظام مركز الكتلة والمعادلة 8.7 لقيمة سرعة النواة V_c فى نفس النظام، وكذلك بالتعويض بقيمة

A= M/m نجد أن :

$$mv_c + MV_c = \frac{mM}{m+M}v - \frac{mM}{m+M}v = 0$$

المثال السابق أوضح أن الزخم الكلى قبل التصادم فى نظام مركز الكتلة يساوى صفرًا، واستنادًا على قانون بقاء الزخم Conservation of Momentum

فإن الزخم الكلى بعد التصادم يجب أن يبقى صفرًا. النتيجة المهمة التى تتبع هنا هو أنه فى التصادم المرن فى نظام مركز الكتلة، فإن الجسمين المتصادمين بعد التصادم يسيران باتجاهين متعاكسين وبنفس سرعتيهما قبل التصادم. لهذا كله فإن تحليلاتنا فى نظام مركز الكتلة أكثر بساطة من تلك بنظام المعمل وذلك لأننا سنتعامل مع نفس السرعات قبل وبعد التصادم كما أننا نتعامل مع زاوية واحدة فقط لأن الأخرى مكملة لها. الجدول التالى يبين ملخصا لما ذكر أعلاه:

الجدول 2.7 السرعات والزوايا فى نظامي مركز الكتلة والمعمل للاستطارة المرنة

التمييز	نظام المعمل		نظام مركز الكتلة	
	قبل التصادم	بعد التصادم	قبل التصادم	بعد التصادم
سرعة النيوترون	v	v'	vc	vc
سرعة النواة	V=0	V'	Vc	Vc
زاوية ارتداد النيوترون	θ		Θ	
زاوية ارتداد النواة	ϕ		180–Θ	
عدد المتغيرات	V,v',V',θ, ϕ خمسة		v_c, V_c, Θ ثلاثة	

من الجدول نلاحظ أنه فى التصادم المرن بالنسبة لنظام المعمل سنتعامل مع ثلاث سرعات V' ,v', v و زاويتين θ, ϕ . فى حين أنه فى نظام مركز الكتلة ينخفض التعامل إلى سرعتين v_c, V_c وزاوية واحدة فقط Θ .

تحليلات الطاقة :

فى نظام المعمل ، فإن الطاقة الحركية للجسيم الساقط ، فى حالة الاستطارة المرنة، تساوى الطاقة الكلية، أى أن؛

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (9.7)$$

ولكن فى نظام مركز الكتلة، فإن الطاقة الكلية، هى حاصل جمع كل من طاقة الجسيم وطاقة الهدف، بمعنى؛

$$E_c = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} M V_c^2 \qquad (10.7)$$

وبالتعويض بقيمتى كل من vc ، Vc ، وذلك حسب المعادلتين (7.7) و(8.7) على التوالى ، مع استخدام A=M/m ، نجد أن:

$$E_c = \frac{1}{2} \mu v^2 \qquad (11.7)$$

حيث إن μ تسمى الكتلة المقلصة Reduced Mass وتعطى بالمعادلة التالية:

$$\mu = \frac{mM}{m + M} \qquad (12.7)$$

بمقارنة المعادلتين (9.7) و (11.7) نجد أن:

$$E_c = \frac{A}{1 + A} E \qquad (13.7)$$

وذلك يعنى أن الطاقة فى نظام مركز الكتلة قد نقصت بالمقارنة بقيمة الطاقة الكلية فى نظام المعمل الموضح بالمعادلة السابقة. هذه الطاقة الناقصة هى بسبب حركة مركز الكتلة، وبالتالى فإن هذا الجزء من الطاقة غيرمتوفر لإثارة النواة ومن ثم فهو غير مهم بالنسبة للتفاعل. يمكن حساب هذه الطاقة والخاصة بحركة مركز الكتلة كما يلى:

$$E_{c.m.} = E - E_c = \frac{1}{2} (m - \mu) v^2 = \frac{1}{2} \zeta v^2 \qquad (14.7)$$

مثال 3.7

ما هى الكتل الفعّالة Effective Masses للطاقة الكلية بنظام المعمل E والطاقة الكلية بنظام مركز الكتلة E_c وطاقة مركز الكتلة $E_{c.m.}$ بدلالة سرعة النيوترون المعملية v .

الحل:

حيث إن $E = \frac{1}{2} m v^2$ ، و $E_c = \frac{1}{2} \mu v^2$ ، و $E_{c.m.} = \frac{1}{2} \zeta v^2$ ، فإن

الكتل الفعّالة هى: m ، و $\mu = \frac{mM}{m+M}$ ، و $\zeta = (m - \mu) = \frac{m^2}{m+M}$.

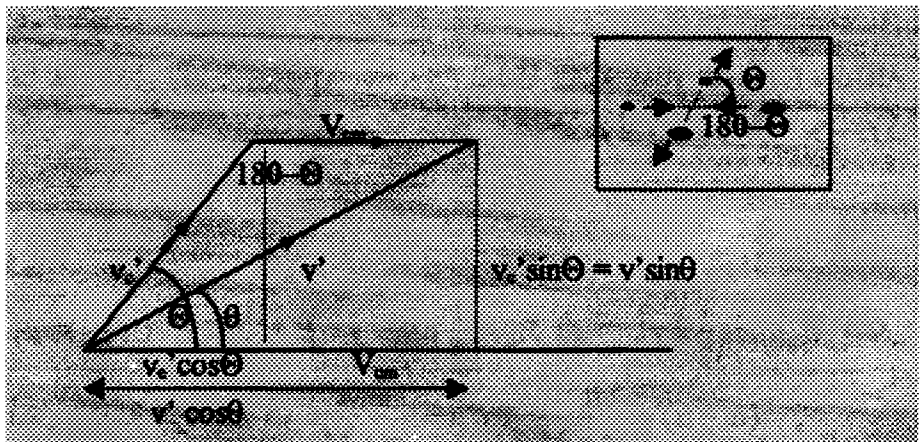
كما يمكننا استنتاج أن :

$$\frac{E_{c.m.}}{E} = \frac{m}{m+M} \quad , \quad \frac{E_c}{E} = \frac{M}{m+M} \quad , \quad \frac{E}{E} = 1$$

الفرق فى الطاقة $(E-E_c)$ الذى أوردناه سابقا يبين أنه فى حالة التفاعلات الماصة للطاقة (Endoergic) والتى تتميز بأن قيمة Q=Ec تكون سالبة فإن الطاقة اللازمة لبدء التفاعل E=Eth (Threshold Energy) أكبر من Q بالقدر $r = \frac{E_{th}}{Q} = \frac{m+M}{M} = \frac{1+A}{A}$.

علاقة طاقتى النيوترون قبل وبعد التصادم :

برسم مخطوط المتجهات للسرعات كما هو مبين بالشكل 15.7 ، حيث تمثل θ زاوية ارتداد النيوترون فى المعمل والزاوية Θ تمثل زاوية ارتداد النيوترون فى نظام مركز الكتلة، كما أن v' تمثل سرعة النيوترون بعد التصادم فى نظام المعمل، فى حين أن v_c' تمثل سرعة النيوترون بعد التصادم فى نظام مركز الكتلة، و V_{cm} تمثل سرعة مركز الكتلة.



الشكل 15.7مخطط سرعات متجهة فى نظامي المعمل ومركز الكتلة

من خلال الشكل نلاحظ أنه فى الاتجاه العمودى يمكننا القول بأن:

$$v'\sin\theta = v_c'\sin\Theta \qquad (15.7)$$

وفى الاتجاه الأفقى فإن:

$$v'\cos\theta = v_c'\cos\Theta + Vcm \qquad (16.7)$$

بقسمة المعادلتين واعتبار أن $Vcm/vc' = m/M = 1/A$ فيمكننا استنتاج العلاقة بين زاوية الارتداد فى نظام المعمل و نظيرتها فى نظام مركز الكتلة كما يأتى:

$$\tan\theta = \frac{\sin\Theta}{\cos\Theta + \frac{1}{A}} \qquad (17.7)$$

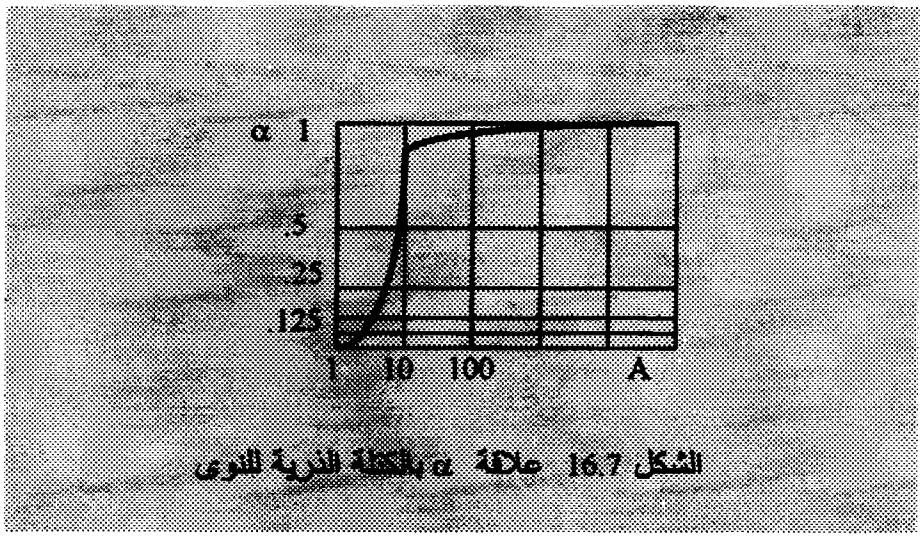
وبالرجوع إلى الشكل 15.7 وباستخدام قانون جيب التمام فيمكننا القول بأن:

$$v'^2 = v_c'^2 + V_{cm}^2 - 2\, v_c' V_{cm} \cos(180-\Theta) \qquad (18.7)$$

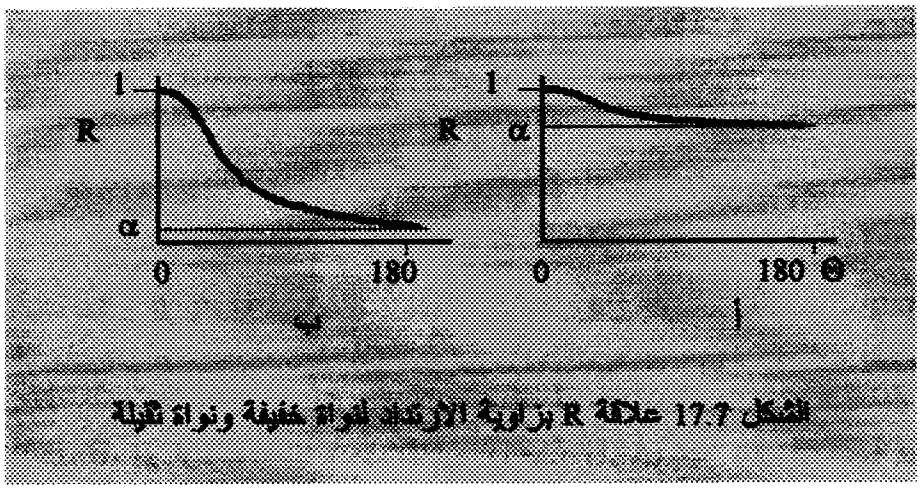
باستخدام المعادلتين 7.7 و 8.7 وباعتبار أن $v_c=v_c'$ فى حالة التصادم المرن ، وباعتبار أن $\cos(180-\Theta) = -\cos\Theta$ فيمكننا كتابة ما يلى:

$$\frac{v'^2}{v^2} = \frac{E'}{E} = R(A,\Theta) = \frac{A^2 + 2A\cos\Theta + 1}{(1+A)^2} \qquad (19.7)$$

حيث تمثل R النسبة بين طاقتى النيوترون بعد وقبل التصادم. ففى حالة التصادم الخاطف حيث $\Theta=0$ فإن النيوترون يحتفظ بطاقته أى أن $R=1$ ، فى حين أن النيوترون المرتد يكون فى أدنى طاقة له عند التصادم المباشر ($\Theta=180$، أى أن؛ $E'=\alpha E$ ، حيث إن $\alpha = (A-1)^2/(A+1)^2$. إن قيمة α تكون صغيرة فى حالة تصادم النيوترون مع النوى الخفيفة (تساوى صفرا فى حالة الهيدروجين) ، فى حين أن قيمتها تقارب من 1 فى حالة التصادم مع النوى الثقيلة ، الشكل 16.7 يبين العلاقة بين α و A . كما أن الشكل 17.7 (أ، ب) يبين تصرف R كدالة فى زاوية الارتداد لنواة خفيفة ونواة ثقيلة على التوالى.

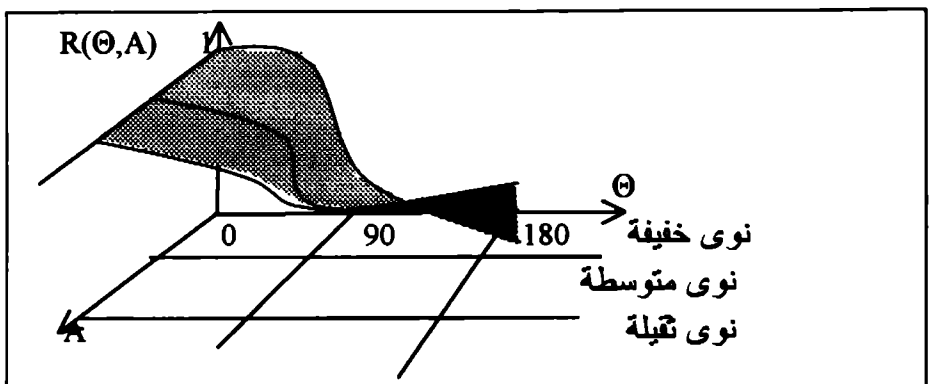


الشكل 16.7 علاقة α بالكتلة الذرية للنوى



الشكل 17.7 علاقة R بزاوية الارتداد لنواة خفيفة ونواة ثقيلة

كما يمكننا رسم $R(\Theta,A)$ فى ثلاثة أبعاد، والذى يبين لنا كيف تتغير النسبة بتغير كل من زاوية الارتداد و ثقل النواة. الشكل 18.7 يوضح ذلك وهو مستوى يشبه علما يرفرف.



الشكل 18.7 $R(\Theta,A)$ كدالة فى زاوية الارتداد وعدد الكتلة

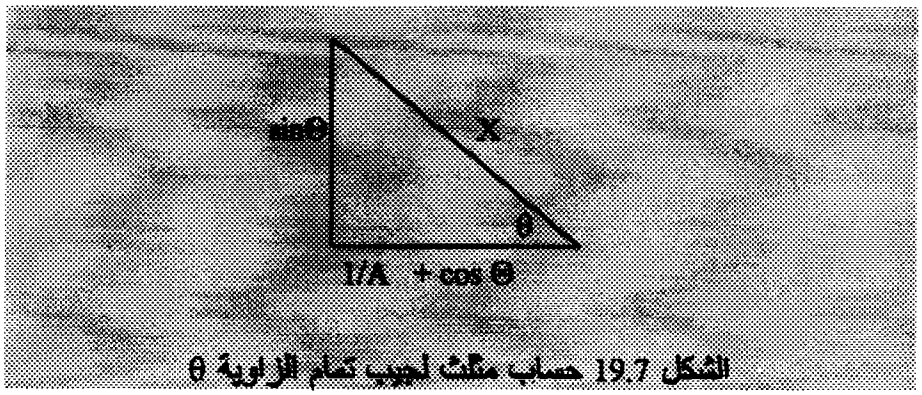
وعند قيم عالية للوزن الذرى ($A>50$)، فإن α يمكن كتابتها كما يلى

$$\alpha = 1 - \frac{4}{A} \qquad (20.7)$$

6-7 تباطؤ النيوترونات واحتمالية الاستطارة
: Neutron Slowing Down and Probability of Scattering

من الناحية التطبيقية، فإن أهم طرق تباطؤ النيوترونات تعزى إلى الاستطارة المرنة للنيوترونات من قبل النوى الخفيفة، فى حين إن، الاستطارة غير المرنة من قبل النوى المتوسطة والثقيلة يكون مهما للنيوترونات ذات الطاقات الأعلى من 1MeV ، وتتضاءل أهمية هذا النوع من الاستطارة عند قيم طاقة أقل من هذه. فيما سبق قمنا بإستعراض مشكلة الاستطارة لجسيمين اثنين،والآن سنستعرض مفهوم تباطؤ النيوترون واستطارته إلى مجموعة طاقات، حيث سيكون هذا مهما للدراسات القادمة للمفاعلات النووية الحرارية حيث تتطلب هذه المفاعلات تباطؤ النيوترونات السريعة إلى الطاقات الحرارية اللازمة للتفاعل الانشطارى المتسلسل. هذا وأن المقاطع المستعرضة لهذه التفاعلات تعتمد جدا على طاقة النيوترونات، ومن ثم فإن معرفة طاقات النيوترون قبل وبعد التصادم تعتبر مهمة ، وما استعرضناه مسبقا يعد مدخلا لمناقشتنا الموالية.

بالرجوع إلى المعادلة 17.7 فيمكننا حساب جيب تمام الزاوية θ من خلال الشكل 19.7



الشكل 19.7 حساب مثلث لجيب تمام الزاوية θ

من المثلث يمكننا الاستدلال على cosθ بما يلى:

$$\cos\theta = \frac{1 + A\cos\Theta}{\sqrt{1 + 2A\cos\Theta + A^2}} \qquad (21.7)$$

وحيث إن الاستطارة فى نظام مركز الكتلة تعد متماثلة كرويا Isotropic فيمكننا حساب متوسط جيب تمام الزاوية θ وهى دالة فى Θ حسب المعادلة 21.7 وذلك بالتكامل على الزاوية المجسمة Solid angle Ω فى نظام مركز الكتلة،أى أن؛

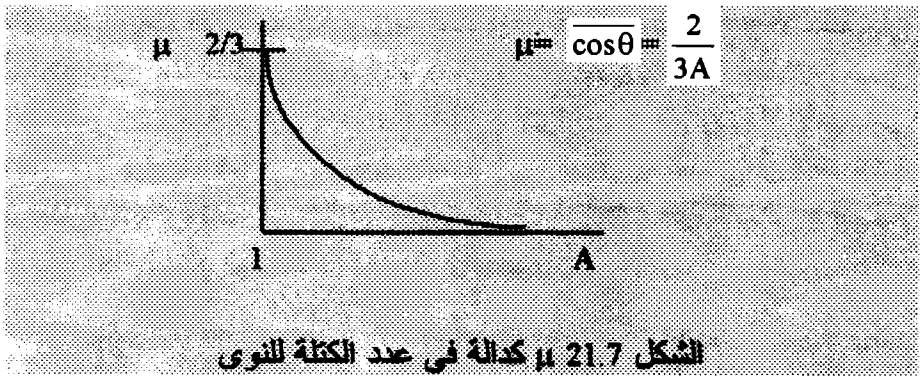
$$\overline{\cos\theta} = \mu = \frac{\int \cos\theta d\Omega}{\int d\Omega} \qquad (22.7)$$

$$\overline{\cos\theta} = \frac{1}{4\pi}\int_0^{\pi} \cos\theta 2\pi \sin\Theta d\Theta \qquad (23.7)$$

وبالتعويض عن cosθ بالمعادلة 21.7 وإجراء التكامل بالتعبير عن cosΘ=X نجد أن μ=2/3A ، وفى حالة النوى الثقيلة فإن μ=0 ، أى أن استطارة النيوترونات مع النوى الثقيلة مثل اليورانيوم يكون متماثل كرويا وذلك فى نظام المعمل، بمعنى أن؛ احتمالية استطارة النيوترونات فى أى اتجاه متساوية، أنظر الشكل التالى لتوضيح الاستطارة المتماثلة كرويا.

الشكل 20.7 الاستطارة المتماثلة كرويا

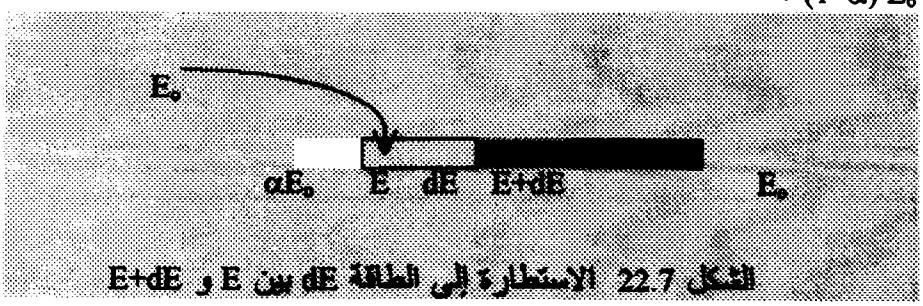
كما أن الاستطارة بالنسبة للنوى الخفيفة تتميز بأنها أمامية ، أى أن؛ معظم النيوترونات تستطير فى الاتجاه الأمامى (الشكل 21.7).



الشكل 21.7 μ كدالة فى عدد الكتلة للنوى

احتمالية الاستطارة Scattering Probability :

لنفترض أن هناك نيوترون بطاقة E_o ونريد ايجاد الاحتمالية PdE بأن النيوترون بعد اصطدام واحد فقط ستكون له طاقة بين E و E+dE ، أنظر الشكل 22.7 ، يمكننا فعل ذلك باعتبار أن طاقة النيوترون بعد التصادم ستكون محصورة بين القيمة القصوى E_o فى حالة التصادم الخاطف والقيمة الدنيا αE_o فى حالة التصادم المباشر، أى أن طاقة النيوترون ستكون فى المدى $(1-\alpha) E_o$.

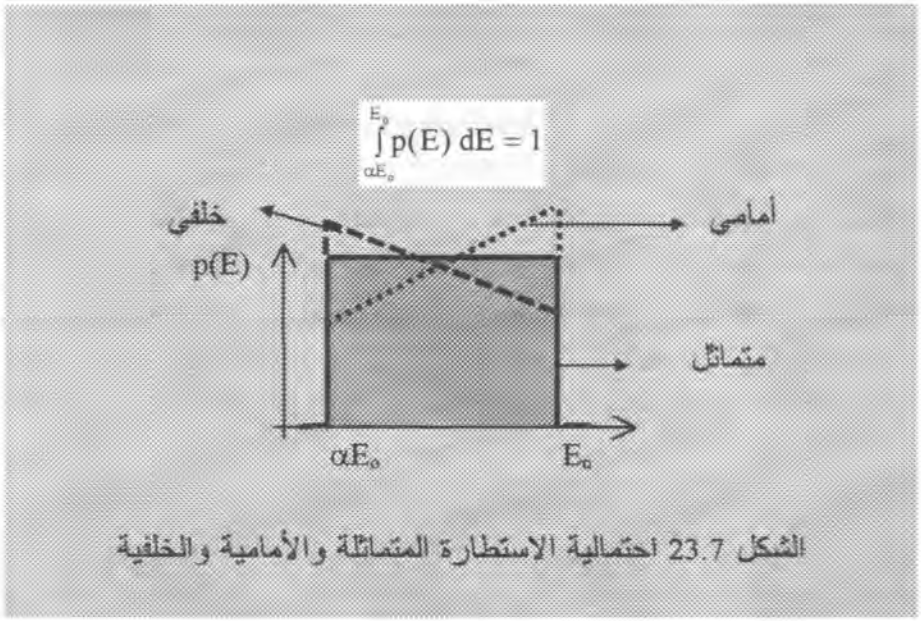


الشكل 22.7 الاستطارة إلى الطاقة dE بين E و E+dE

إذا يمكننا تعريف الاحتمالية للاستطارة المتماثلةisotropic scattering لنيوترون بطاقة E_o إلى dE كما يلى:

$$p\,dE = \frac{dE}{(1-\alpha)E_o} \qquad (24.7)$$

وأن تكامل هذه الدالة بين E_o وαE_o يساوى 1، أى أن؛ النيوترون لابد وأن يستطير فى ذلك المدى (احتمالية الاستطارة تساوى 100%). هذا وتعنى الاستطارة الأمامية ، بأن احتمالية استطارة النيوترونات فى الاتجاه الأمامى أعلى من غيرها، كما أن احتمالية الاستطارة الخلفية تعنى أن احتمالية استطارة النيوترونات إلى الخلف أعلى من غيرها. الشكل التالى يوضح الثلاث احتماليات(المتماثلة، الأمامية، والخلفية).

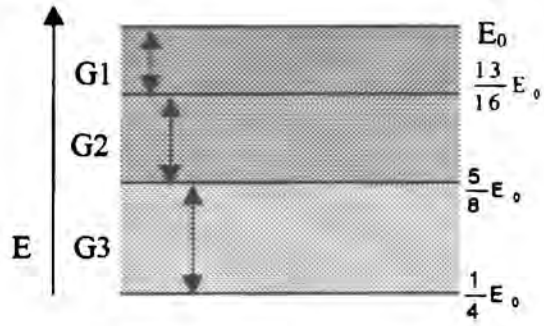


الشكل 23.7 احتمالية الاستطارة المتماثلة والأمامية والخلفية

مثال 4.7

نيوترون بطاقة E_0 استطار تماثليًا من قبل نواة لها قيمة α=1/4 . اوجد احتمالية استطارة النيوترون إلى أحد من المجموعات G1,G2,G3 بحيث

يكون مدى هذه المجموعات مقسمًا بين الطاقة القصوى والطاقة الدنيا كما هو مبين بالشكل التالى:



الحل:

لحساب احتمالية الاستطارة المتماثلة للمجموعة G تستخدم المعادلة:

$$P_G = \int_{E_L}^{E_H} \frac{1}{(1-\alpha)E_0} dE = \frac{4}{3E_0}(E_H - E_L)$$

إذًا الاحتماليات المطلوبة هى:

$$P_{G1} = \frac{4(1-\frac{13}{16})E_0}{3E_0} = \frac{1}{4}$$

$$P_{G2} = \frac{4(\frac{13}{16}-\frac{10}{16})E_0}{3E_0} = \frac{1}{4}$$

$$P_{G3} = \frac{4(\frac{10}{16}-\frac{4}{16})E_0}{3E_0} = \frac{1}{2}$$

متوسط لوغاريتم فقد الطاقة لكل اصطدام ($\xi = \overline{\ln \frac{E_0}{E}}$):

يمكن تعريف متوسط لوغاريتم فقد الطاقة لكل اصطدام ξ باستخدام اللوغاريتم، حيث تعد هذه كمية مناسبة فى حسابات تباطؤ النيوترونات لأنها كمية لا تعتمد على طاقة النيوترون. المعادلة التالية تبين تعريف ξ (فى حالة الاستطارة المتماثلة):

$$\xi = \overline{\ln \frac{E_o}{E}} = \frac{\int_{\alpha E_o}^{E_0} \ln \frac{E_o}{E}\, p(E)\, dE}{\int_{\alpha E_o}^{E_0} p(E)\, dE} = \frac{\alpha \ln \alpha}{1-\alpha} + 1 \qquad (25.7)$$

المعادلة 25.7 تبين أنه فى حالة النوى الثقيلة فإن ξ=0 ، فى حين أن ξ=1 عندما A=1 ، أى أنه فى حالة التصادم مع النوى الثقيلة فإن النيوترون فعليا لا يفقد طاقة ، فى حين أنه يفقد كثيرًا من طاقته عند التصادم مع الهيدروجين. وعندما تكون A أكبر من 10 يمكن التعبير عن ξ بالمعادلة التالية:

$$\xi \cong \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \quad , \qquad A>10 \qquad (26.7)$$

كما أن متوسط طاقة النيوترون بعد كل اصطدام يمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$\overline{E} = \frac{\int_{\alpha E_0}^{E_0} Ep(E)dE}{\int_{\alpha E_0}^{E_0} p(E)dE} = \frac{(1+\alpha)}{2} E_0 \qquad (27.7)$$

وبالتالى فإن تصادم النيوترونات مع الهيدروجين وبعد التعويض فى المعادلة السابقة يتضح أنه فى المتوسط تكون النيوترونات بنصف الطاقة الابتدائية.

كما أنه يمكن حساب متوسط عدد الاصطدامات عند تحول طاقة النيوترون من طاقة معينة E_H إلى أخرى E_L ، وذلك من المعادلة التالية:

$$C = \frac{\ln \frac{E_H}{E_L}}{\xi(A)} \qquad (28.7)$$

مثال 5.7

احسب عدد الاصطدامات التى يحتاجها نيوترون بطاقة ابتدائية قدرها 2MeV ليتحول إلى نيوترون حرارى طاقته 025 eV. وذلك مع الهيدروجين والكربون-12 واليورانيوم-238

الحل:

حيث إن النيوترون ستحدث له تصادمات لتحول طاقته من 2MeV إلى 025 eV. وبملاحظة أن :

$$\ln \frac{E_0}{E} = \ln \frac{2X10^6}{.025} = 18.2$$

وباستخدام:

$$\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$$

وكذلك باستخدام المعادلة 25.7 و المعادلة 28.7 يمكن حساب عدد الاصطدامات للنوى المعطاة وذلك كما هو وارد فى الجدول التالى:

العنصر	A	α	ξ	C (عدد الاصطدامات)
^{1}H	1	0	1	18
^{12}C	12	0.716	0.158	115
^{238}U	238	0.983	.0085	2141

قدرة التباطؤ slowing power ($\xi\Sigma_s$) :

إن ξ تعد مؤشر معقول على تهدئة النيوترونات ولكن ليست مثالية لأنه يجب الأخذ فى الحسبان اعتبارات كثافة الوسط الذى سيتحرك فيه النيوترون وأيضا احتمالية الاستطارة فى ذلك الوسط أى المقطع المستعرض للاستطارة للوسط وكلا هذين التأثيرين يمكن التعبير عنهما بالكمية التى تدعى المقطع المستعرض العينى Σ_s . فالقيمة الأفضل للتعبير عن تباطؤ النيوترونات هى $\xi\Sigma_s$ وهذه الكمية تدعى قدرة التباطؤ ولها وحدة cm^{-1} . هذه الكمية تعرف بانها متوسط لوغاريتم فقد الطاقة لكل سنتمتر من رحلة النيوترون ، والتى تكون لها قيمة عددية عالية نسبيا بالنسبة للمهدىء الجيد.

نسبة التهدئة moderating ratio ($\xi\Sigma_s/\Sigma_a$) :

فى القرار عن جدوى الوسط لتهدئة النيوترونات يجب اعتبار مدى امتصاص الوسط للنيوترونات، وبالتالى فإن الوسط الذى له قدرة عالية على امتصاص النيوترونات يسبب فى التقليل من أهمية الوسط على أنه مهدىء جيد . هذا أدى إلى الأخذ فى الاعتبار المقطع المستعرض لامتصاص النيوترونات من قبل الوسط . لقد سميت الكمية المعبرة عن المقدرة على التهدئة بنسبة التهدئة ويعبر عنها بالمقدار $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$. الجدول التالى مدون به قيم قدرة التباطؤ ونسبة التهدئة لعدد من المهدئات.

الجدول 3.7 قدرة التهدئة لعدد من المهدئات

المهدىء	$\xi\Sigma_s$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$
الماء الخفيف	1.53	72
الماء الثقيل	.37	12000
البريليوم	.176	159
الجرافيت	.064	170

من الجدول نرى أنه على الرغم من أن القدرة على التباطؤ هى أعلاهم بالنسبة للماء الخفيف إلا أنه وبالأخذ فى الاعتبار قدرة امتصاص الوسط للنيوترونات فإن الماء الخفيف يعتبر أسوأهم لأن مقطعه المستعرض لامتصاص النيوترونات له قيمة عالية جدا مقارنة بالأوساط الأخرى، فى حين أن الماء الثقيل يعد أفضلهم كمهدىء وذلك للقيمة العالية لنسبة التهدئة الخاصة به.

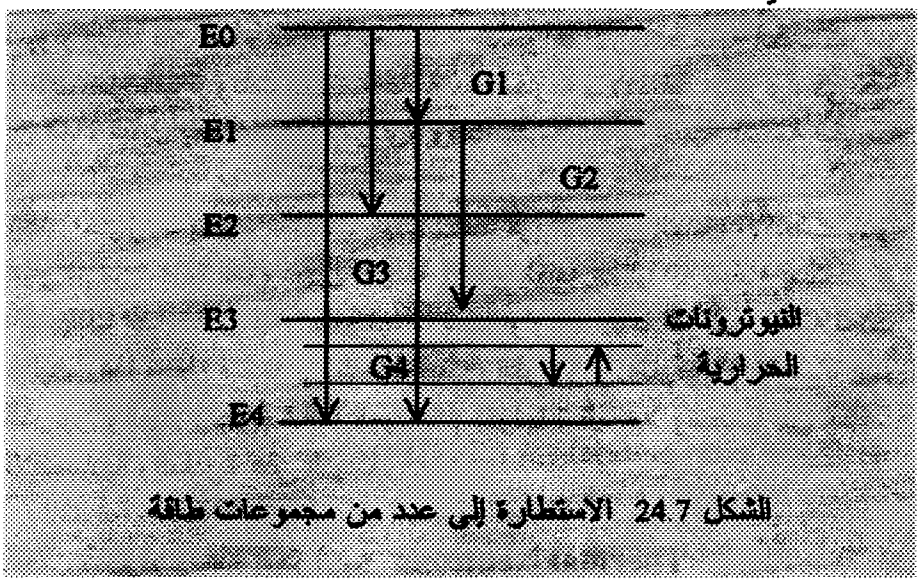
وعند اختيار المهدىء المناسب يجب الأخذ فى الاعتبار العامل الاقتصادي. فبالرغم من كفاءة الماء الثقيل للتهدئة إلا أن الكلفة العالية له تجعله يُستخدم فى التطبيقات التى تكون فيه الكلفة ليست ذات أولوية. أيضا البريليوم كلفته تعتبر عالية. هذا يجعل استخدام الماء الخفيف والكربون و البارفين (خليطًا بين الكربون والهيدروجين) شائعًا كمهدئات لكونها تمثل حلا وسطًا بين الكلفة الاقتصادية والمقدرة على التهدئة.

7-7 النيوترونات الحرارية Thermal Neutrons:

لقد اتضح من خلال الجزء السابق أن اختيار المهدىء المناسب من الأوزان الذرية الخفيفة يمكّن النيوترونات السريعة من تخفيض سرعاتها نتيجة التصادم مع الوسط المهدىء حتى تصبح طاقة النيوترونات فى حالة اتزان مع طاقة ذرات أو جزيئات الوسط التى تتحرك فيه وهى الطاقة الضئيلة التى تجعل ذرات الوسط تلف وتصطدم مع النيوترونات فيمكن أن يفقد النيوترون طاقة (الاستطارة السفلية Down scattering) ويمكن أن يكتسب طاقة وهو ما يسمى بالاستطارة العلوية Up scattering . الشكل 24.7 يوضح تدرج طاقات النيوترونات من خلال عدد من الاستطارات لمجموعات مختلفة من الطاقات. يلاحظ من الشكل أن الاستطارة تكون سفلية فى مدى الطاقات العليا، فى حين نرى أن الاستطارة فى مدى الطاقات الدنيا (الحرارية) يمكن أن تكون استطارة سفلية أو استطارة علوية.

فى الطاقات الدنيا، يقال إن النيوترونات فى حالة اتزان حرارى مع الذرات أو الجزيئات ، ومن ثم تدعى بالنيوترونات الحرارية. عند ذلك الاتزان

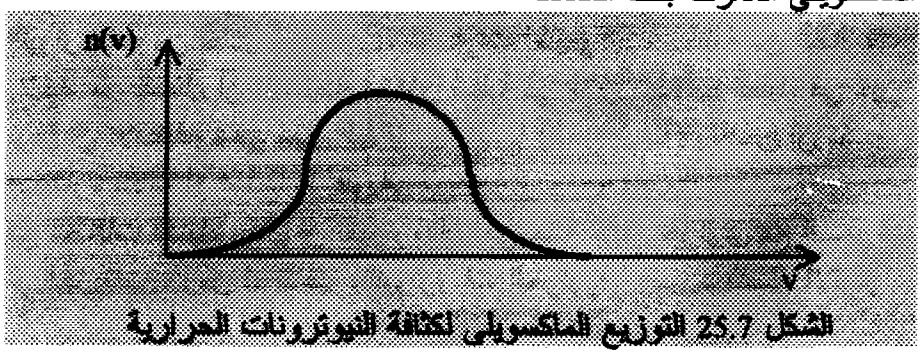
الحرارى فإن النيوترونات لها توزيع ماكسويلى بالنسبة لسرعاتها حسب المعادلة التالية:



الشكل 24.7 الاستطارة إلى عدد من مجموعات طاقة

$$n(v)dv = 4\pi n\left(\frac{m}{2\pi KT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}} dv \qquad (29.7)$$

حيث إن n(v)dv تمثل عدد النيوترونات لكل وحدة حجم بسرعات بين v و dv ، كما أن K تمثل ثابت بولتزمان يساوى $1.38x10^{-16}$ erg/K° ، و T تمثل درجة الحرارة المطلقة. المعادلة 29.7 تبين بأنه عندما v=0 وكذلك عندما v=∞ فإن n(v)=0 ، وهذا ما يوضحه الشكل 25.7 الممثل للتوزيع الماكسويلي المعرف بتلك المعادلة .



الشكل 25.7 التوزيع الماكسويلى لكثافة النيوترونات الحرارية

لإيجاد السرعة الأكثر احتمالا v_0 ؛ اى السرعةالشائعة بين أغلبية النيوترونات، فإنه يمكن الحصول عليها باعتبار أن تلك السرعة تقابل قمة المنحنى المبين بالشكل والتى تعنى أن $dn/dv=0$. بأخذ تفاضل المعادلة 29.7 وتسويتها بالصفر فيمكن إيجاد السرعة المطلوبة والتى تعطى بالمعادلة التالية:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2KT}{m}} \qquad (30.7)$$

وكذلك يمكن استنتاج أن الطاقة المناظرة لهذه السرعة هى:

$$E_0=KT \qquad (31.7)$$

وباعتبار أن النيوترون له كتلة تساوى $1.67547x10^{-24}$ gm ، فإنه يمكن حساب السرعة بوحدة المتر لكل ثانية من خلال المعادلة التالية حيث يعوض بدرجة الحرارة بالوحدة المطلقة $[C^0+273]$:

$$v_0 = 128\sqrt{T} \quad \left[\frac{m}{sec}\right] \qquad (32.7)$$

وبالتالى فإنه عند درجة حرارة الغرفة ($20\ C^0$) يمكن حساب السرعة والطاقة الأكثر احتمالا للنيوترونات الحرارية وهما؛ v_0~2200 m/sec و E_0~.025 eV.

كما يمكن حساب السرعة المتوسطة من خلال المعادلة التالية:

$$\bar{v} = \frac{\int vn(v)dv}{\int n(v)dv} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_0 = 1.1284 v_0 \qquad (33.7)$$

أيضا يمكن استنتاج التوزيع الماكسويلى للنيوترونات الحرارية بدلالة الطاقة بدلا من السرعة ، وهو ما يستدل به من المعادلة التالية:

$$n(E)dE = \frac{2\pi n}{(\pi KT)^{3/2}} e^{-\frac{E}{KT}} \sqrt{E}\, dE \qquad (34.7)$$

ومن ثم يمكن حساب الطاقة المتوسطة من خلال المعادلة التالية:

$$\overline{E} = \frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{3}{2} KT = 1.5 E_0 \qquad (35.7)$$

حيث إن v_{rms} تدعى جذر متوسط مربع السرعة root mean square speed

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2}}\, v_0 \qquad (36.7)$$

8-7 ملخص :

فى هذا الفصل، تم تناول النيوترون بشئ من الدراسة، فقد تم استعراض ماهيته، حيث اتضح أنه يتكون فى بنيته من ثلاثة كواركات. كما أن هناك العديد من التفاعلات التى تنتجه ولعل أهم مصدر لإنتاجه يتمثل فى استخدام المفاعلات النووية. وحيث إن النيوترون متعادل لا يحمل شحنة، فإنه لا يمكن الكشف عنه مباشرة ولكن عن طريق مادة محولة، هذا وقد تم تعديد طرق الكشف عن النيوترونات.وأخيرًا، تم استعراض تصنيف النيوترونات من وجهتى نظر، أحدهما يتمثل فى التصنيف من حيث الطاقة وهذا مهم جدا فى حسابات المفاعلات. والتصنيف الثانى يتعلق بفورية وتأخر صدور النيوترونات من عملية الانشطار، وهذا التصنيف مهم جدا فى دراسة حركية المفاعلات لدلالته على الثابت الزمنى Time constant لمنظومة الانشطار.
فى هذا الفصل، أيضًا تم تناول موضوع استطارة النيوترونات بشئ من التحليل الرياضى الذى مكن من استنتاج معادلة مهمة لها علاقة بتحديد طاقة النيوترونات بعد التصادم كدالة فى زاوية الارتداد وعدد كتلة النواة الهدف. أيضا تم التعرض لمفهوم الاستطارة المتماثلة وكذلك لكل من الاستطارة الأمامية و الخلفية. وحيث إن احتمالية الاستطارة الممثلة بالمقطع المستعرض للاستطارة σ_s ليست كافية لتقييم مدى كفاءة العنصر كمهدىء، لذا كان من الضرورى تعريف ξ متوسط لوغاريتم فقد الطاقة لكل اصطدام، وكذلك

قدرة التباطؤ $\xi\Sigma s$ للأخذ فى الحسبان الكثافة الذرية للوسط المسبب للاستطارة، وأخيرًا كان مهم جدا لغرض التقييم النهائى للوسط كمهدىء جيد من اعتبار مدى امتصاص الوسط للنيوترون، فكان ما يسمى بقدرة التهدئة $\xi\Sigma s/\Sigma a$ Moderating ratio.

وأختتم الفصل بدراسة التوزيع الماكسويلى للنيوترونات الحرارية لحساب السرعات والطاقات ذات العلاقة.

9-7 مسائل :

1.7- حسب المنحنى بالشكل 3.7 (الجزء الأيسر من المنحنى) فإن احتمالية التفاعل تتناسب عكسيا مع سرعة النيوترون ، أى أن ؛ $\sigma=\sigma_0 v_0/v$ حيث إن v_0 =2.2x105 cm/sec وσ_0=3840b لتفاعل البورون . اثبت أن $\sigma = \sigma_0\sqrt{\frac{0.025}{E}}$ ، حيث تعطىE بوحدة eV ، واوجد احتمالية التفاعل لنيوترون ساقط بطاقة 10 KeV .

2.7 – إذا كانت حساسية كاشف BF_3 للنيوترونات البطيئة (E=.025 eV) تساوى 81% ، وكانت كفاية الكاشف 22% ، وكان حجمه الحساس $58cm^3$، احسب مساحة المقطع المستعرض للكاشف .

[الحل : $3.82\ cm^2$]

3.7 – إذا استخدم الكاشف فى السؤال السابق كغرفة تأين بحيث وجد أن التيار الكهربئ المقاس والناتج عن وضع الكاشف فى مفاعل نووى حرارى يساوى 10 مللى أمبير، فما قيمة الفيض المناظر لذلك ؟.
(معلومة: استخدم حساسية الكاشف S=.81 ، والمعادلة 3.7)

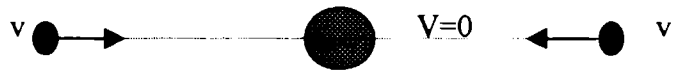
4.7 – إذا كانت كثافة غاز كاشف البورون هى $4.1x10^{18}\ atom.cm^{-3}$ بحجم حساس $58cm^3$، فما حساسية الكاشف؟ ثم إذا أستغل هذا الكاشف

كغرفة تأين فى مفاعل حجمه $1m^3$ ، ووجد ان التيار الكهربى المقاس هو 0.1A ، اوجد قيمة فيض النيوترونات . ثم إذا علمت أن قدرة المفاعل هى $P=C\phi V$ ، حيث إن P تمثل القدرة (MW) ، و ϕ هو الفيض النيوترونى و $C=0.649x10^{-11}\ J.cm^{-1}$ لكل انشطار، اوجد قدرة المفاعل.

5.7 – اثبت أن الطاقة الكلية فى التصادم المرن لنيوترون بنواة تساوى $E_c=\frac{1}{2}\mu v^2$، حيث إن m هى الكتلة المقلصة، و v هى سرعة النيوترون معمليًا .

6.7 – احسب الزخم الكلى والطاقة الكلية فى نظامي المعمل و مركز الكتلة للتصادم المرن المبين بالشكل التالى.

7.7– احسب الزخم الكلى والطاقة الكلية فى نظامي المعمل و مركز الكتلة للتصادم المرن المبين بالشكل التالى.



8.7– اثبت أنه عند تصادم النيوترون بنواة ثقيلة مثل اليورانيوم فإن زاويتى ارتداد النيوترون فى نظام المعمل ونظام مركز الكتلة متساويتان $(\Theta = \theta)$.

9.7 – نيوترونات بطاقة 1MeV سقطت على عينة من اليورانيوم 238 ، وقد تم الكشف عن نيوترونات عند زاوية معمل 60° . اوجد سرعة هذه النيوترونات وطاقتها.

(كتلة النيوترون= 1.008665 amu ، $1amu= 1.66x10^{-27}Kg$ ،
$1eV= 1.6x10^{-19}$ Joule)

(الحل: $v=9.21x10^{5}$ m/sec)

10.7 –اثبت أن $\mu= 2/3A = \overline{\cos\theta}$.

11.7– اثبت أن $\xi = \frac{\alpha \ln \alpha}{1-\alpha} + 1$.

(مساندة: إجعل X= E/Eo فى المعادلة 25.7)

12.7 – بين أن المعادلة 25.7 يمكن كتابتها بالصيغة التالية:

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1} \quad .$$

13.7 – بين أنه يمكن التعبير عن طاقة النيوترون بعد التصادم بالمعادلة التالية:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1+\alpha}{2} + \frac{1-\alpha}{2}\cos\Theta \quad ،$$

ثم بين أنه عند التصادم المباشر للنيوترون مع بروتون فتكون طاقة النيوترون تساوى صفرًا (أى أن النيوترون سيفقد طاقته تماما).

14.7 – استنتج المعادلة 34.7 المعبرة عن التوزيع الماكسويلى للنيوترونات الحرارية بدلالة الطاقة.

15.7– استنتج العلاقة بين السرعة المتوسطة و جذر متوسط مربع السرعة للنيوترونات الحرارية.

$$\left(\frac{v_{rms}}{\bar{v}} = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} = 1.0854 \text{ الحل }\right)$$

16.7 –عرف المقطع المستعرض المجهرى لامتصاص النيوترونات σa

–عرف المقطع المستعرض العينى لامتصاص النيوترونات Σa

-عرف متوسط المسار الحر لامتصاص النيوترونات λa

-ماذا تعنى قدرة التهدئة $M = \frac{\xi \Sigma_s}{\Sigma_a}$ (ناقش).

17.7 – حوصر نيوترون مستطيرًا بين نواتين لليورانيوم، وبالتالى بدأ فى فقدان طاقته نتيجة التصادمات المتكررة، علما بأن طاقته الابتدائية E_0.

أ) ما نوع التصادم الذى يتعرض له هذا النيوترون؟

ب) اثبت أن $E_C = \alpha^C E_0$ ، حيث إن c تمثل عدد التصادمات، $\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$.

ج) إذا علمت أن عدد التصادمات هى: $C = \frac{\ln \frac{E_0}{E_C}}{\xi}$ ، فاستنتج معادلة ξ لهذا التصادم.

د) احسب قيمة ξ لليورانيوم– 238، لهذا النوع من التصادم.

18.7 –

أ) ارسم التوزيع الاحتمالى للاستطارة المتماثلة والاستطارة الأمامية و الاستطارة الخلفية

ب) ماذا تعنى $\int_0^{\infty} p(E)dE = \int_{\alpha E_0}^{E_0} p(E)dE = 1$ ؟.

الفصل الثامن

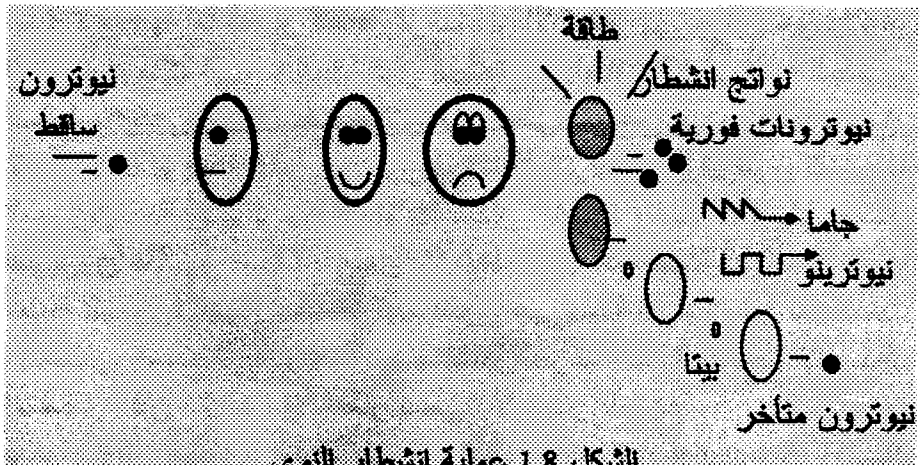
الانشطار النووى Nuclear Fission

8-1 نظرية الانشطار.
8-2 المقاطع المستعرضة للانشطار النووى.
8-3 نواتج الانشطار.
8-4 النيوترونات الفورية والمتأخرة.
8-5 الطاقة الناتجة من الانشطار.
8-6 دورة النيوترونات ومعامل التضاعف K.
8-7 ملخص.
8-8 مسائل.

1-8 نظرية الانشطار Fission Theory:

يحدث الانشطار فى النوى لنظائر بعض العناصر الثقيلة مثل اليورانيوم والبلوتونيوم عند أسرها للنيوترونات. هذه النوى بالكاد تكون مستقرة ومن ثم فإن امتصاصها للنيوترون يضيف اليها طاقة تمكنها من الانشطار فورا إلى جزئين متساويين تقريبا بطاقة مصاحبة آنيا قدرها حوالى MeV180، وكذلك عدد من النيوترونات(2.52 ليورانيوم-235، و 2.95 لبلوتونيوم-239). النيوترونات قد تكون فورية أو نيوترونات متأخرة التى تنتج فى أحد مراحل انحلال نواتج الانشطار المسبوقة بإشعاع جسيمات بيتا. يصاحب عملية الانشطار إنتاج أشعة جاما وكذلك النيوترينو فى عملية مصاحبة لانحلال بيتا.

إذا ،فى المتوسط، تمكّن نيوترون واحد ناتج من الانشطار من إحداث انشطار موالى، فإن تفاعلا متسلسلاً ينشأ عن ذلك. أما إذا ما تمكن أكثر من نيوترون ناشىء من الانشطار من إحداث انشطارات تالية، فإن عدد النيوترونات وكذلك معدل الطاقة المولّدة تتزايد أسيًا. الشكل 1.8 يبين عملية انشطار أحد النوى الثقيلة.



الشكل 1.8 عملية انشطار النوى

إن النواة فى الذرة يمكن أن تتفاعل مع النيوترون الذى يمر بجوارها بطريقتين أساسيتين؛ إما باستطارته وبالتالى انحراف النيوترون عن مساره وفقدانه لجزء من طاقته الحركية، أو تقوم النواة بأسر النيوترون . لذا فللنواة تتأثر بعدة طرق؛ أهمها امتصاص النيوترون أو الانشطار. إن احتمالية استطارة النيوترون (Scattering) أو أسره (Capturing) تقاس بالمقاطع المستعرضة للاستطارة أو الأسر. كما أن المقطع المستعرض للأسر يمكن أن ينطوى تحته المقطع المستعرض للامتصاص وكذلك المقطع المستعرض للانشطار.

إن استقرار نواة ذرة ما يعتمد على طاقة ترابطها Binding Energy (أى الطاقة اللازمة لتفكيكها)، فعندما يُؤسر نيوترون أو بروتون من قبل نواة الذرة ، فإن النواة تعيد ترتيب بنائها ، وعليه فإذا تحررت طاقة بسبب إعادة الترتيب، فإن طاقة الترابط تقل، وفى حالة امتصاص الطاقة، فإن طاقة الترابط تزيد.

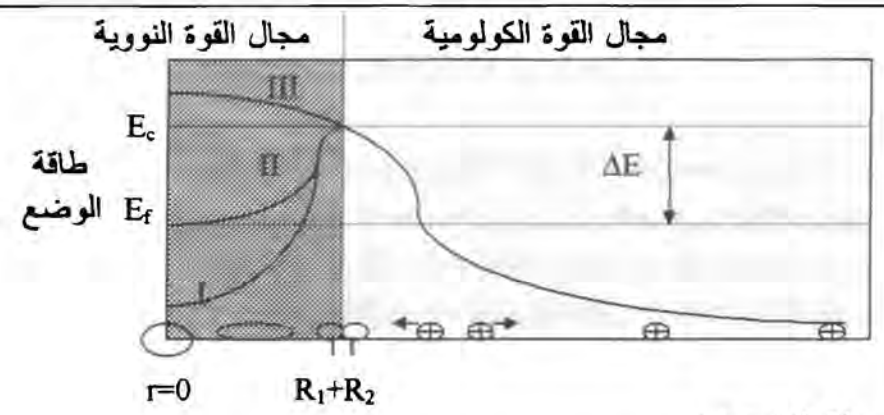
النظائر ذات الأهمية فى تحرير طاقة ذات مستوى تطبيقى ملموس مثل اليورانيوم بنوعيه U-235 و U-233 وكذلك البلوتونيوم Pu-239 لها طاقة ترابط ضعيفة بحيث إذا ما أسرت إحداها نيوترون، فإن الطاقة التى ستحرر بسبب إعادة ترتيب النواة تفوق طاقة الترابط، ومن ثم فإن النواة لن تعد مستقرة وعليها إما تحرير الطاقة الزائدة، أو الانشطار إلى جزئين ، وحيث إن الانشطار يحدث فى هذه الحالة دون الحاجة إلى الطاقة الحركية للجسيم الساقط ، فيدعى هذا الانشطار بالانشطار البطىء. وعلى نقيض هذا ، فإن النظير U-238 عندما يأسر نيوترون فإن طاقة الترابط لا تزال تفوق الطاقة المحررة نتيجة إعادة ترتيب النواة بمقدار 1MeV ، لذا فعندما يحمل النيوترون المأسور طاقة أعلى من 1MeV ، فإن هذه الطاقة مضافة اليها الطاقة المحررة نتيجة إعادة الترتيب تتفوق على طاقة الترابط ومن ثم يحدث الانشطار. وحيث إن النيوترون بهذه الطاقة الحركية العالية مطلوب لإحداث الانشطار، فإن مثل هذا الانشطار يسمى بالانشطار السريع.

بوهر و ويلر إستطاعا التنبأ بالانشطار الذاتى Spontaneous Fission وذلك باستخدام نموذج قطرة السائل، وأيضا انشطار النوى الثقيلة بواسطة

النيوترونات البطيئة والسريعة. إن شكل قطرة السائل الممثلة للنواة تعتمد على التوازن بين قوى الشد السطحى($A^{2/3}$) وقوة التنافر الكولومية ($\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$)

فإذا أضيفت الطاقة إلى النواة (القطرة) فى صورة طاقة إثارة بسبب أسرها لنيوترون بطىء، فإن تذبذبًا Oscilation ينشأ داخل القطرة. هذه التذبذبات تسعى لتشويه الشكل الكروى للنواة وتتحول إلى شكل اهليلجى (بيضاوى) Ellipsoid . الشد السطحى يسعى إلى إعادة الشكل إلى الشكل الأصلى الكروى، فى حين أن طاقة الإثارة تسعى إلى تشويه الشكل أكثر. إذا كانت طاقة الإثارة كبيرة فإن القطرة ربما تأخذ شكل الدمبل Dumb bell (ثمرة الفول السودانى بحبتين)، ومن ثم فإن القوة الكولومية تأخذ دورها فى فصل النوتؤين إلى كرتيين بحيث تقوم قوة الشد السطحى لكل منهما بالحفاظ على الشكل الكروى ومن ثم تنجز مهمة الانشطار. أما إذا كانت طاقة الإثارة ضعيفة، فإن الشكل الاهليلجى قد يرجع إلى الشكل الكروى، وتتحرر طاقة الإثارة فى شكل أشعة جاما، ومن ثم يسمى الحدث بالأسر الإشعاعى والذى تشكل نسبة حدوثه حوالى 18% لنواة اليورانيوم-235.

فيما يلى نوضح بالشكل آلية الانشطار الذاتى أو الانشطار بنيوترون سويع أو نيوترون بطئ.



الشكل 2.8 تفسير الانشطار الذاتى والمستحث

الشكل يوضح أن تأثير مجال القوة الكولومية يبدأ من الحالة الحرجة المتمثلة فى مساوة البعد بين النويتين الجديدتين إلى $r=R_1+R_2$ كما هو موضح بالشكل وذلك يناظر طاقة وضع تساوى E_c . ومن تم ففى الجانب الأيسر للمنحنى هناك إحتمالين؛ إما E_c أكبر من E_f وهذا يتطلب طاقة لتسلق المنحنى وذلك يعنى انشطار مُحفز أو مستحث ، أما إذا ما كانت Ec أصغر من E_f فإن شكل المنحنى الإنسيابى يدل على انشطار ذاتى. وكما تم عرضه فى الفصل الخامس من هذا الكتاب بالمعادلة 20.5 والتى تعنى بطاقة إثارة النواة فسوف يعاد كتابتها هنا مضمنة مع معادلة طاقة الإثارة المستنتجة من نموذج قطرة السائل:

$$E_{excit} = E_c - E_f = KE_{neutron} + BE_{netron} = .89A^{2/3} - .02\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \quad MeV \qquad (1.8)$$

حيث A تمثل عدد الكتلة للنواة المركبة، و Z تمثل العدد الذرى، وE_f تساوى حوالى 200 MeV بالنسبة لنواة U-235 ، كما أن Ec تمثل الطاقة الكولومية؛ أى أن:

$$E_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2} \qquad (2.8)$$

بعض النوى التى يزيد عدد كتلتها Aعن 100 فإن E_f أصغر من E_c بمقدار 50MeV ، ومن ثم يتطلب ذلك حصول النيوترون الساقط على طاقة حركية عالية لاحداث الانشطار وهو ما يشير اليه المنحنى I فى الشكل السابق. فى حين أن المنحنى II يوضح أن الفارق أقل بكثير (حوالى 6MeV) وذلك لنوى الثوريوم واليورانيوم ، ومن ثم تتميز النيوترونات المسببة لانشطارهذه النوى بطاقات منخفضة. أما بعض النوى الثقيلة التى يحكمها المنحنى III ، فإن E_f تكبر أو تساوى Ec ومن ثم يحدث بها انشطار ذاتى.

مثال 8-1

قدّر الطاقة اللازمة للنيوترون لإحداث الانشطار فى نواتى U-235 و U-238.

الحل:

باستخدام المعادلة 8-1:

$$E_{excit.} = .89A^{2/3} - .02\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \quad MeV$$

معادلتى تكوين النواة المركبة للحالتين المطلوبتين هما:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U$$

$$^{238}_{92}U_{92} + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U$$

وبتطبيق معادلة طاقة الإثارة على النواة المركبة، نجد ما يلي:

بالنسبة لنواة U-236 $E_{excit.}$=6.9 MeV

وبالنسبة لنواة U-238 $E_{excit.}$=7.3 MeV

باستخدام بيانات الملحق 1

فإن كتلة الإلكترونات فى ذرة اليورانيوم هى:

92 x 0.000549=0.050508 amu

ومن ثم يمكن حساب طاقة ترابط النيوترون لنواة U-235 باستخدام الكتل الذرية بالملحق مباشرة دون الحاجة لخصم كتل الإلكترونات لأن النواة الناتجة تحمل نفس عدد الإلكترونات وذلك من خلال المعادلة التالية:

$$BE=m(^{235}U)+m(^{1}n)-m(^{236}U)$$

B.E.=235.043915+1.00866520-236.045637=0.00694 amu

=0.00694amu x 931MeV/amu= 6.5 MeV=$BE(^{236}U)-BE(^{235}U)$

وبحساب طاقة ترابط النيوترون لنواة U-238 من المعادلة:

$$BE=m(^{238}U)+m(^{1}n)-m(^{239}U)$$

$$BE=238.05077+1.00866520-239.05430=0.00513\ amu$$
$$=0\ .00513\ amu \times 931\ MeV/amu= 4.8\ MeV= BE(^{239}U)-BE(^{238}U)$$

مرة أخرى وباستخدام المعادلة 8-1 يمكن حساب مايلي:

الطاقة الحركية للنيوترون المسبب لانشطار نواة U-235 هى:

$$KE_{neutron} = E_{excit} - BE_{netron} = 6.9 - 6.5 = 0.4MeV$$

و الطاقة الحركية للنيوترون المسبب لانشطار نواة U-238 هى:

$$KE_{neutron} = E_{excit} - BE_{netron} = 7.3 - 4.8 = 2.5MeV$$

يلاحظ من الحسابات التقريبية أن نواة U-235 تنشطر بنيوترون بطئ مقارنة بانشطار نواة U-238 بنيوترون سريع.

2-8 المقاطع المستعرضة للانشطار النووى
: Nuclear Fission Cross Section

لقد ورد فى نموذج قطرة السائل أن الحد الفردى -الزوجى E_δ مهم فى تمييز طاقة الترابط للنوى، حيث إن مساهمته إيجابية فى حالة زوجية عدد النيوترونات وزوجية عدد البروتونات فى نواة ما فى حين أن مساهمته سلبية فى حالة فردية كل من النيوترونات والبروتونات، وصفرية المساهمة فى حالة فردية النيوترونات وزوجية البروتونات أو العكس. لذا فإن اليورانيوم-235 تحوى 92 بروتون و 143 نيوترون أقل استقرارًا من نواة اليورانيوم-238 تحوى 92 بروتون و 146 نيوترون، وهذا يسهل انشطار النواة الأولى بنيوترون بطئ مقارنة بالأخرى التى تنشطر بنيوترون سريع كما ورد ذكره سابقا. أيضا النظرية تبين أن تحرير طاقة الانشطار أسهل فى حالة العدد الفردى للنيوترونات مقارنة بالعدد الزوجى للنيوترونات لنواة تحمل نفس العدد الذرى Z . الجدول 1.8 يوضح النوى القابلة للانشطار من قبل نوعية معينة من النيوترونات.

الجدول 1.8 نوعية النيوترونات اللازمة لانشطار نوى معينة

النواة	عدد البروتونات Z	عدد النيوترونات N	نوعية النيوترون
^{233}U	e	o	بطئ
^{235}U	e	o	بطئ
^{238}U	e	e	سريع
^{232}Th	e	e	سريع
^{239}Pu	e	o	بطئ
^{237}Np	o	e	سريع
^{232}Pa	o	o	بطئ
^{236}Np	o	o	بطئ

إن النواة بأسرها النيوترون تتحول إلى نواة مركبة مثارة قد تنشطر وقد تشع أشعة جاما لتتحول إلى الحالة الأرضية لتلك النواة المركبة. وعليه فإن احتمالية التفاعلين تقاس بما يسمى المقاطع المستعرضة σ_r للأسر الإشعاعى و σ_f للانشطار. الجدول التالى يبين هذه المقاطع المجهرية مقاسة بالبارن لبعض العناصر وذلك لنيوترونات حرارية (بطيئة).

الجدول 2.8 المقاطع المستعرضة الحرارية لبعض العناصر

العنصر	σ_r (barn)	σ_f (barn)	σ_r / σ_f
^{235}U	101	577	0.18
اليورانيوم الطبيعى	3.5	4.18	0.84
^{239}Pu	286	742	0.39

يلاحظ أنه نظرًا لصغر الوفرة الطبيعية بقدر 0.72% لنواة ^{235}U فى اليورانيوم الطبيعى فإن المقطع المستعرض لانشطار اليورانيوم الطبيعى يكون صغيرًا كما هو موضح بالجدول. الخانة الأخيرة من الجدول تبين أن 18% يعتبر أسرًا إشعاعيا بالنسبة لنواة اليورانيوم-235 ، ومن ثم فإن 82% تكون

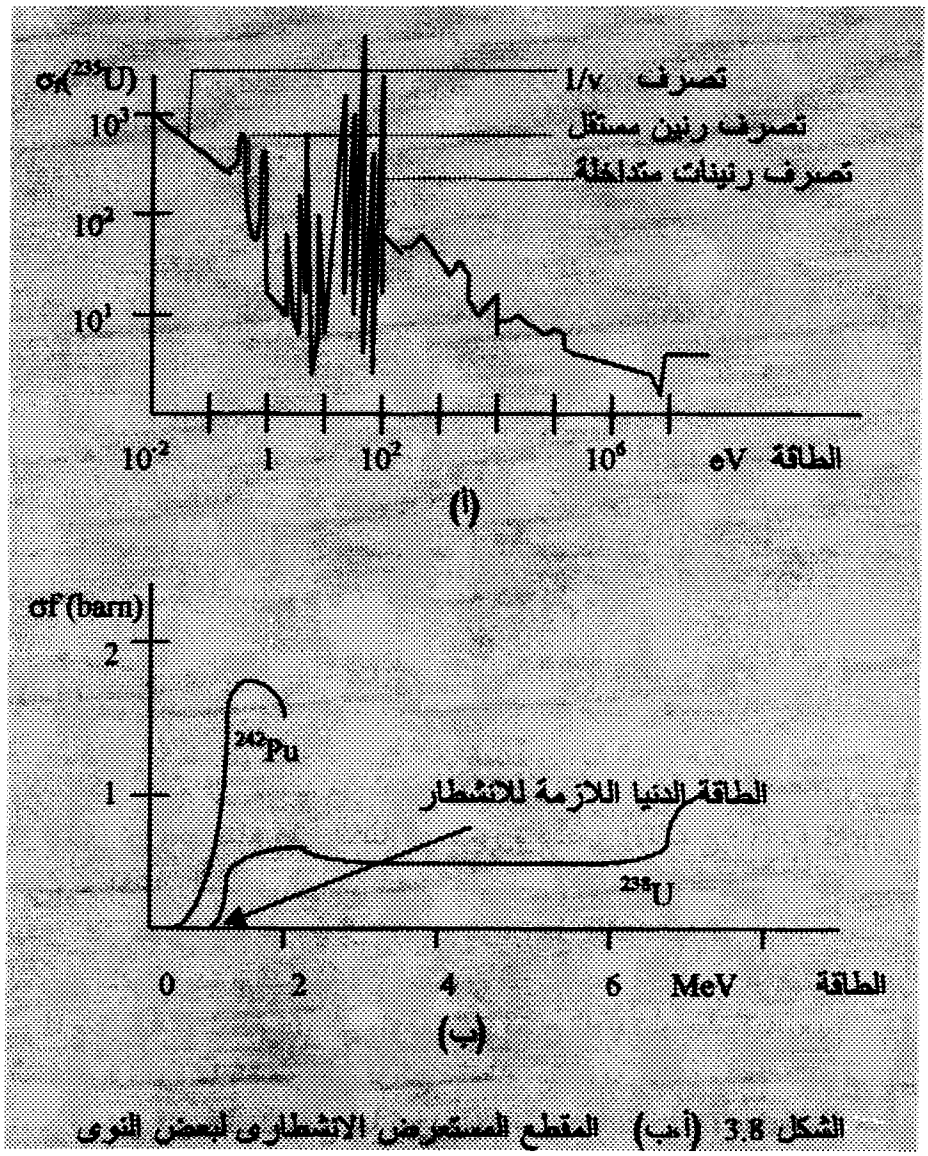
انشطارًا . هذا ويلاحظ أن الأسر الإشعاعى يشكل نسبة 39% بالنسبة للبلوتونيوم على الرغم من العلو النسبى للمقطع المستعرض لانشطار البلوتونيوم مقارنة باليورانيوم-235.
من كل النوى القابلة للانشطار فإن النوى ^{239}Pu, ^{235}U, ^{233}U تحمل مقاطع مستعرضة عالية وكذلك أعمار نصفها كبيرة، مما يجعلها ذات أهمية فى التطبيقات الكبرى للانشطار. وهى قد توجد طبيعيا مثل ^{235}U أو يمكن إنتاجها اصطناعيا مثل ^{239}Pu, ^{233}U.

إن المقاطع المستعرضة للانشطار لها إعتماد ملحوظ على طاقة النيوترون الساقط ويمكن ملاحظة أربعة مظاهر لهذا الإعتماد، فهناك لبعض النوى طاقة دنيا لازمة لإحداث الانشطار Threshold Energy ، أيضا هناك ما يسمى بالاعتماد على معكوس السرعة 1/v dependence ، أو الرنينات المنفصلة Separated Resonances أو الرنينات المتداخلة Overlapped Resonances.
الشكل 3.8 (أ،ب) يوضح بعض المقاطع المستعرضة لبعض النوى:

3-8 نواتج الانشطار Fission Products :

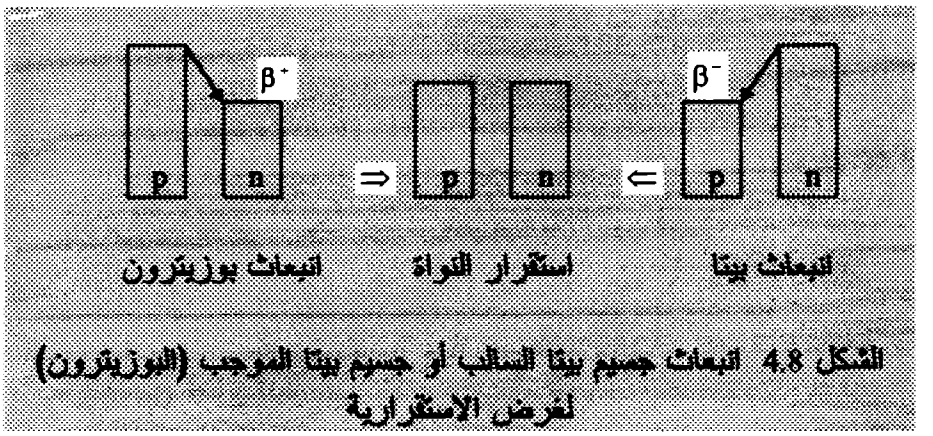
نواتج الانشطار هى تلك النوى الناتجة من انشطار النواة المركبة (مثلا ^{236}U) الناتجة من امتصاص النيوترون. إن نواة ^{236}U تحوى عدد 144 من النيوترونات وعدد 92 من البروتونات بنسبة n/p=1.57 ، فى حين أن n/p لنواتج الانشطار تتراوح بين 1.17 إلى 1.52. وعليه فإن بانشطار النواة المركبة المثارة فإنه على الأقل إحدى نواتج الانشطار تكون لها زيادة فى عدد النيوترونات مقارنة بعدد البروتونات، وبالتالى فهى غير مستقرة وتسعى إلى الاستقرار إما بانبعاث نيوترون إذا كانت النواة الناتجة من الانشطار تحمل طاقة إثارة عالية، أو تشع جسيم β^- بتحول أحد النيوترونات إلى بروتون عبر التفاعل التالى:

$$^{1}_{0}n \rightarrow ^{1}_{1}p + \beta^- + \bar{\upsilon} \qquad (3.8)$$



الشكل 3.8 (أ،ب) المقطع المستعرض الانشطاري لبعض النوى

الشكل التالى يوضح انبعاث جسيمات بيتا السالبة أو جسيمات بيتـــا الموجبـــة (البوزيترون) بناءً على فائضية النيوترونات أو البروتونات فى النوى.



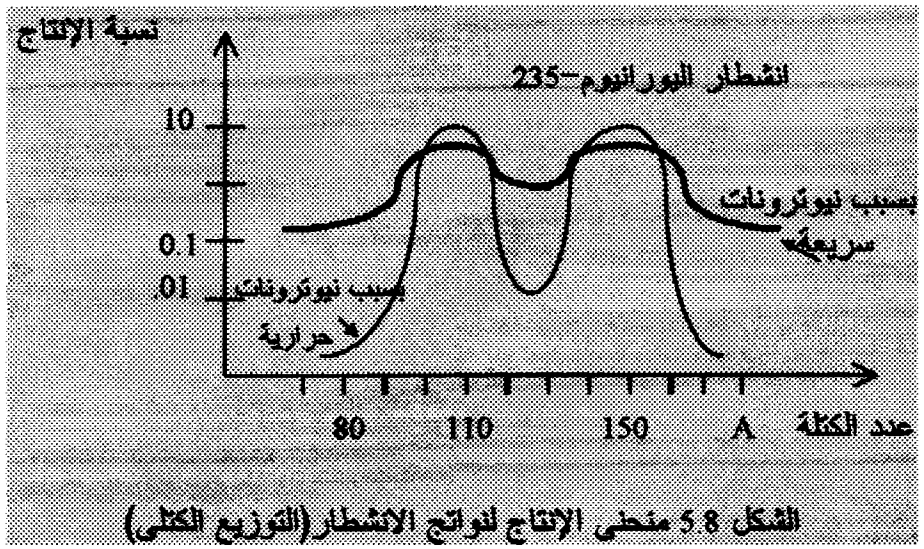
الشكل 4.8 انبعاث جسيم بيتا السالب أو جسيم بيتا الموجب (البوزيترون) لغرض الاستقرارية

يوجد هناك أكثر من 60 شظية انشطار أى حوالى 30 زوجا من الشظايا. هذه الشظايا تتحل إشعاعيا، حيث يوجد هناك أكثر من 60 سلسلة انحلال متضمنة ما يقارب من 200 نويدة. أحد أمثلة هذه السلاسل التى تنتهى بالعنصر المستقر السيزيوم Ce موضحة كما يلي.

$$^{140}_{54}Xe \xrightarrow[16\,s]{\beta^-} {}^{140}_{55}Cs \xrightarrow[66\,s]{\beta^-} {}^{140}_{56}Ba \xrightarrow[12.8\,d]{\beta^-} {}^{140}_{57}La \xrightarrow[40h]{\beta^-} {}^{140}_{58}Ce \quad \text{مستقر} \qquad (4.8)$$

وكما ذكر أعلاه فإن العديد من نواتج الانشطار تنتج نتيجة تلك العملية، وقد تم توثيق توزيعها بناء على الكتلة فى صورة منحنى الإنتاج Yield Curve . حيث تم اختيار المحور الرأسى ليعبر على نسبة الإنتاج، والمحور الأفقى ليعبر عن عدد الكتلة A . يُمثِل الإنتاج لنويدة ما الاحتمالية فى صورة نسبة لتكوين تلك النويدة أوالسلسلة التى ستكون النويدة عضوا فيها. أو قد يعبر الإنتاج كنسبة الانشطارات التى تؤدى إلى إنتاج النويدة أو سلسلتها. إن النويدة المنشطرة نادرًا ما تنشطر إلى نواتج انشطار متساوية الكتلة والعدد الذرى، بل على العكس فإن كتل النواتج لها توزيع جاوسى Gaussian Distribution حول متوسطين أحدهما حول نويدة خفيفة A=95 وآخر حول نويدة ثقيلة A=135. وحيث إن نويدتين تنتجان خلال الانشطار فإن الإنتاج الكلى يتضاعف إلى 200%. الإنتاج يتراوح بين 10^{-5}% إلى 7%، ومن ثم فإن التدريج اللوغارتمى

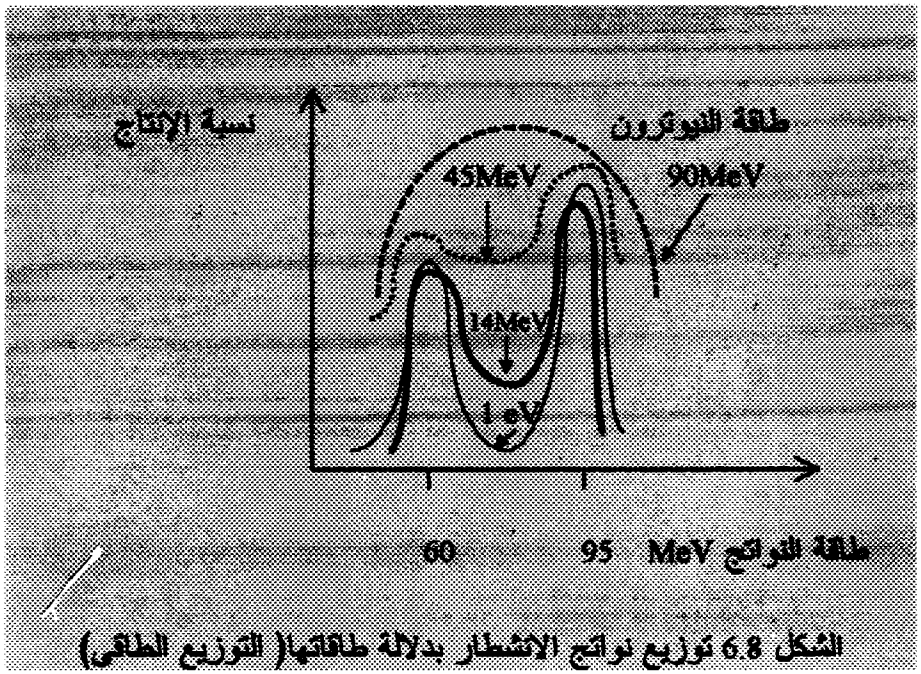
يعد مناسبا للتعبير عن هذا التنوع. الشكل التالى يبين منحنى الإنتاج لنواتج (شظايا) الانشطار.



الشكل 5.8 منحنى الإنتاج لنواتج الانشطار (التوزيع الكتلى)

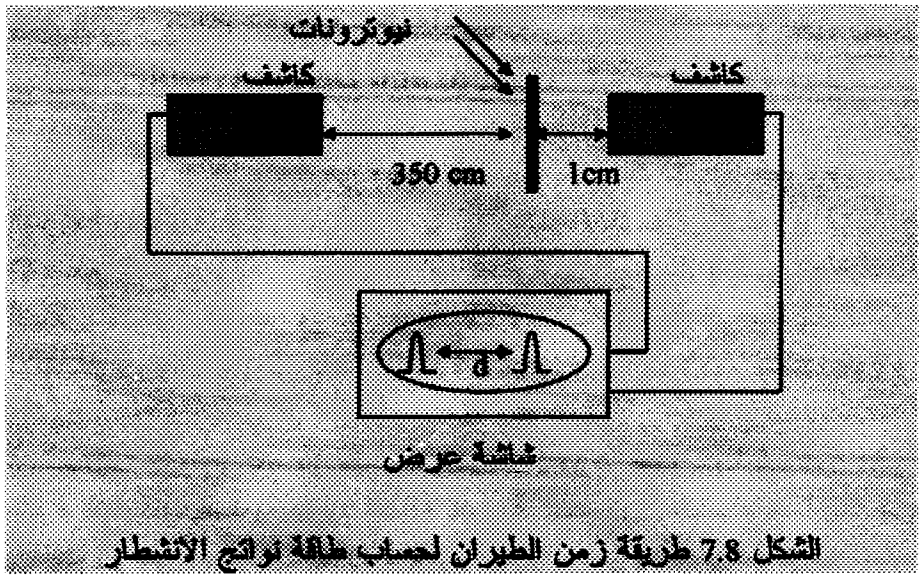
يلاحظ من الشكل أن القيم القصوى تناظر A=95 و A=135 ، وعليه فإن شكل منحنى الإنتاج فى حالة النيوترونات الحرارية غير متماثل بحيث لا توجد نسبة احتمالية عالية لنواتج متساوية الكتلة ، حيث يلاحظ أن الاحتمالية تساوى حوالى0.01%. فى حين أنه فى حالة زيادة الطاقة للنيوترون المسبب للانشطار، ترتفع الاحتمالية لإنتاج نويدات متساوية الكتلة إلى حوالى 1%، وذلك لنيوترونات بسرعة 14MeV ، أى بتضاعف 100 مرة بالمقارنة بحالة النيوترونات الحرارية. يلاحظ أيضا من الشكل أنه بزيادة طاقة النيوترون فإن القيم القصوى للمنحنى المناظر تقل، فى حين أن الأطراف أو الأجنحة لذات الشكل ترتفع وذلك يعنى بزيادة الاحتمالية فى الأطراف (أى زيادة الاحتمالية لإنتاج النواتج غير المتماثلة) .

هذا ويمكن إيجاد منحنى توزيع نواتج الانشطار بدلالة طاقة نواتج الانشطار(التوزيع الطاقى) وليس كتلتها (التوزيع الكتلى)، وهو ما يوضحه الشكل التالى لانشطار النوى الثقيلة.



الشكل 6.8 توزيع نواتج الانشطار بدلالة طاقاتها(التوزيع الطاقى)

يلاحظ من الشكل أنه بزيادة الطاقة الحركية للنيوترون المسبب للانشطار، فإن احتمالية الانشطار المتماثل (إنتاج نويدتين متقاربتين فى الطاقة) تزداد، ويتضح ذلك جليا عندما تكون طاقة النيوترون حوالى 90MeV حيث تكون هناك قمة واحدة والتى تعنى أن الانشطار إلى نويدتين متماثلتين هو الأكثر احتمالية. هذا ويمكن قياس التوزيع الطاقى لنواتج الانشطار باستخدام طريقة زمن الطيران Time of Flight Method والموضحة بالشكل التالى، حيث يتم تعريض الرقيقة الحاوية لليورانيوم – 235 لفيض من النيوترونات، ثم يتم قياس المسافة والزمن بين النبضتين المتتاليتين من الكاشفين الوميضين Scintillation detectors حسب ما تعرضه شاشة العرض . ومن بعد يتم حساب السرعة وكذلك الطاقة، حيث وجد أن متوسط طاقة نواتج الانشطار فى هذه التجارب تقارب من 167 MeV .



الشكل 7.8 طريقة زمن الطيران لحساب طاقة نواتج الانشطار

هذا ويمكن حساب التوزيع الكتلى للنواتج بدلالة التوزيع الطاقى لها ، وذلك باستخدام قانون حفظ الزخم (كمية الحركة)، حيث يعتبر أن النواة المركبة ساكنة ومن ثم فإن الزخم الابتدائي يساوى صفرًا، وبُعَيد الانشطار فإن النويدتين الناتجتين من الانشطار تتحركان فى اتجاهين مضادين، وعليه فإن الزخمين متساويان وذلك حسب المعادلة التالية:

$$M_2 v_2 = M_1 v_1 \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{M_2}{M_1} \qquad (5.8)$$

وباستخدام $E=Mv^2/2$، فيمكن استنتاج ما يلى:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{M_2}{M_1} \qquad (6.8)$$

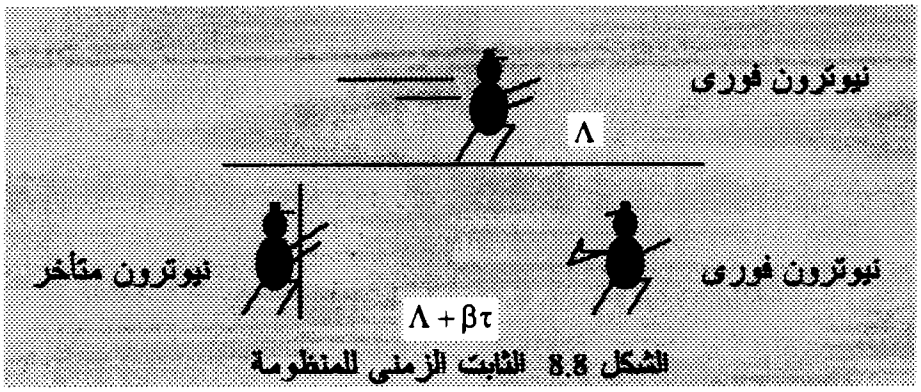
ومن ثم فبمجرد تعيين التوزيع الطاقى يمكن تعيين التوزيع الكتلى إستنادًا على المعادلة 6.8 .

4-8 النيوترونات الفورية والمتأخرة
: Prompt and Delayed Neutrons

يُمكن تصنيف النيوترونات من وجهة نظر الطاقة فهناك مثلا النيوترونات السريعة والبطيئة، والتى يترتب عليها نوعية الانشطار النووى فهناك الانشطار السريع وأيضا الانشطار الحرارى. أيضا، يمكن تصنيف النيوترونات من الناحية الزمنية فهناك النيوترونات الفورية التى تنتج فور الانشطار، وهناك النيوترونات المتأخرة التى تنتج بعد انحلالات متعددة لنواتج الانشطار.

إن تصنيف النيوترونات من حيث فوريتها أو تأخرها لعب دورًا كبيرًا فى نشوء التطبيقات السلمية لتوليد الطاقة النووية. ذلك لأن هناك ما يسمى بالثابت الزمنى Time Constant لمنظومة ما والذى يحكم تصرف تلك المنظومة. فمثلا الثابت الزمنى المتعلق بنشوء وحركية المجرات والكواكب والنجوم تناظر ملايين السنين، فى حين أن نشوء وانحلال وحركية الذرات تناظر أجزاء من ملايين من الثانية. إن حركية النيوترونات بالنسبة لعملية الانشطار تحكمها ثوابت زمنية مختلفة ، فلو كان هناك نيوترونات فورية فقط تنتج عن الانشطارات لكان الثابت الزمنى أو ما يسمى بزمن توليد النيوترونات Λ يتراوح بين المايكرو ثانية بالنسبة للانشطار بواسطة النيوترونات السريعة إلى المللى ثانية بالنسبة للانشطار بواسطة النيوترونات الحرارية، وهذا الزمن صغير جدا بالنسبة للزمن اللازم للتحكم فى المنظومة المصممة، حيث إن أسرع نظام تحكم ميكانيكى لا يتجاوز بأى حال زمن الثانية إلى عُشر الثانية ، بمعنى أن ديناميكية المنظومة تكون بالسرعة بمكان بحيث لا يمكن التحكم فيها . لحسن الحظ فإن وجود النيوترونات المتأخرة يجعل الثابت الزمنى للمنظومة $\Lambda + \beta\tau$ فى حدود زمن الثانية وهو ما يجعل أنظمة التحكم المصممة قادرة على التعامل مع المنظومة. لو لم يكن هناك نيوترونات متأخرة فى عملية الانشطار لكان هناك التطبيق العسكرى فقط للطاقة النووية من خلال إنتاج القنابل النووية التى لا تحتاج إلى تحكم. إن وجود النيوترونات المتأخرة مكّن العلماء من تصميم المفاعلات النووية لتوليد الطاقة ومن ثم التطبيق السلمى لمجال الهندسة النووية.

الشكل التالى يعبر كاريكتريا عن المفاهيم المذكورة أعلاه.

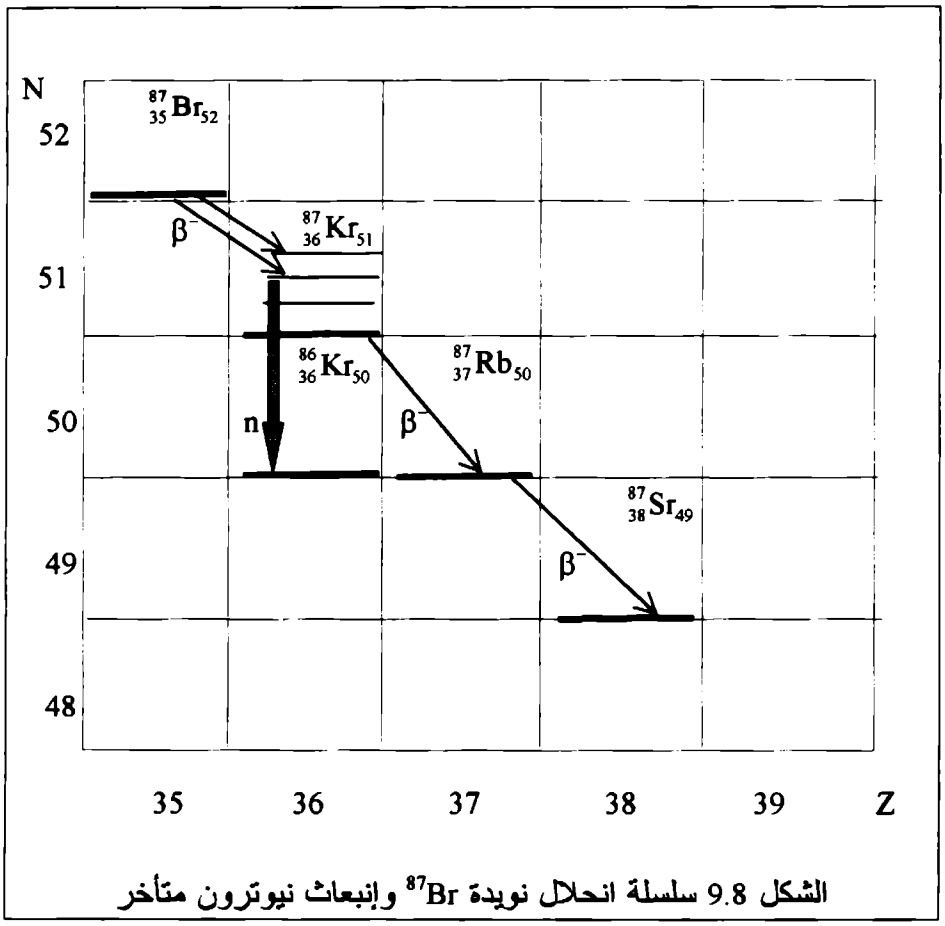


الشكل 8.8 الثابت الزمنى للمنظومة

تتعدد نواتج الانشطار، ومن ثم فإن زمن انبعاث النيوترونات المتأخرة من سلاسل انحلال هذه النواتج تتعدد أيضا، هذا وقد تم الاتفاق على عدد من المجموعات التى تشمل هذ النواتج ، ومن ثم تحديدها إلى ست مجموعات كل مجموعة تتميز عن الأخرى عن طريق جزء النيوترونات المتأخرة β_i وكذلك ثابت الانحلال λ_i. فمثلا المجموعة الأولى تشمل نويدة البروم ^{87}Br ، حيث تتميز هذه المجموعة بعمر النصف يساوى 55 ثانية المجوعة الثانية تتضمن نويدة اليود ^{137}I بعمر النصف للمجموعة يساوى 22 ثانية، أيضا إحدى المجموعات تحوى عنصر ^{138}I وهى مجموعة ذات عمر النصف يساوى 5.6 ثانية. الشكل التالى يبين سلسلة انحلال النويدة ^{87}Br والتى تتحل بانبعاث جسيمات β^- مع انحلال أحد المستويات المثارة لنويدة الكريبتون ^{87}Kr .

يلاحظ من الشكل 9.8 أن نويدة البروم تتحل إلى الحالة الأرضية لنويدة الكريبتون-87 أو إلى مستويات مثارة من نفس النويدة ، كما أن الشكل يبين انحلال نويدة ^{87}Kr إلى نويدة ^{87}Rb بانبعاث جسيمات بيتا السالبة، التى بالتالى تتحل إلى ^{87}Sr بانحلال جسيمات بيتا السالبة. ويلاحظ من الشكل أيضًا أن أحد المستويات المثارة لنويدة ^{87}Kr تكون طاقة إثارتها أكبر من طاقة الترابط للنيوترون، وعليه يتحرر هذا النيوترون وهو ما نسميه بالنيوترون المتأخر الذى نتج متأخرًا من عملية الانشطار عبر انحلال ناتج الانشطار البروم،

وعليه فإن هذه المجموعة تأخذ نفس قيمة عمر النصف $t_{1/2}$ =55 sec لنويدة البروم.



الشكل 9.8 سلسلة انحلال نويدة ^{87}Br وإنبعاث نيوترون متأخر

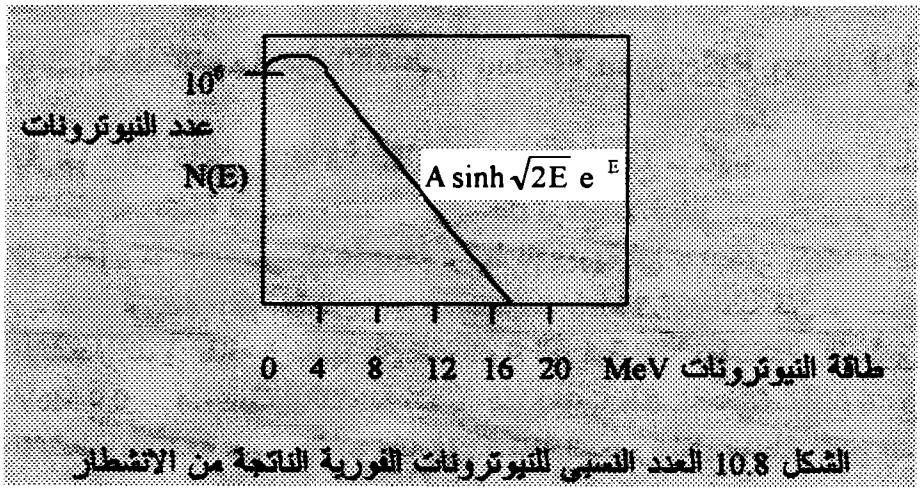
تتنوع طاقة النيوترونات الفورية الناتجة من الانشطار من 0.05MeV إلى 17MeV، وقياس طاقات النيوترونات فى هذا المدى العريض ليس بالأمر

السهل. الشكل 10.8 يوضح العدد النسبى للنيوترونات بطاقة معينة N(E) كدالة فى الطاقة E .

إن معادلة توزيع عدد النيوترونات كدالة فى الطاقة فى مدى طاقة محصورة بين 0.075 MeV إلى 17 MeV أمكن إستنتاجها تجريبيًا Empirical formula حسب الآتى:

$$N(E) = A \sinh\sqrt{2E}\, e^{-E} \qquad (7.8)$$

والتى منها يمكن حساب متوسط طاقة النيوترونات الفورية الناتجة من الانشطار $\bar{E}$ والتى تساوى 2MeV .



الشكل 10.8 العدد النسبى للنيوترونات الفورية الناتجة من الانشطار

إن متوسط عدد النيوترونات الناتجة من الانشطار هو $\nu>2$ (أكبرمن 2) ويزداد العدد بزيادة طاقة النيوترون المسبب للانشطار. هناك مُعامل آخر مهم والذى يعنى بمتوسط عدد النيوترونات المنبعثة لكل نيوترون ممتص من قبل النواة القابلة للانشطار، هذا العدد يرمز له بالرمز η . وحيث إن امتصاص النيوترون قد يحتمل الأسر الإشعاعى إضافة إلى الانشطار فإن η يمكن حسابها من المعادلة التالية:

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_r} = \frac{\nu}{1 + \frac{\sigma_r}{\sigma_f}} \qquad (8.8)$$

هذا وتمثل نسبة النيوترونات الفورية لليورانيوم-235 ما قدره 99.35% ، فى حين تمثل نسبة 65. النيوترونات المتأخرة وهو مايعبر عنه بجزء النيوترونات المتأخرة β=.0065 ، والتى تساوى حوالى ثلاثة أضعاف نظيرتها لنواة البلوتونيوم ^{239}Pu . وعليه وكما ذكر سابقا أنه وعلى الرغم من ضآلة نسبة النيوترونات المتأخرة (حوالى 1%) فإن لها تأثير ملحوظ على التصرف الزمنى لأنظمة الانشطار النووية، وتلعب دورًا كبيرًا وأساسيًا فى عملية التحكم فى تلك المنظومات.

5-8 الطاقة الناتجة من الانشطار Energy Release in Fission:

بالرجوع إلى منحنى طاقة الترابط للنوى بالفصل الرابع من هذا الكتاب، يلاحظ أنه ونتيجة لعملية الانشطار فإن كتل نواتج الانشطار تتراوح بين 50 إلى 180 وهو ما يناظرمتوسط طاقة ترابط لكل نوية فى حدود 8.4 MeV، وباعتبار أن طاقة الترابط لليورانيوم فى حدود 7.5 MeV، وعليه فإن نواتج الانشطار تفوق طاقة ترابطها عن تلك للنواة المركبة ^{236}U بمقدار الفارق 0.9 MeV . هذه الطاقة الفائضة تتحرر فى صورة طاقة حركية لنواتج الانشطار، وأشعة جاما...الخ.وعليه فإن الطاقة المحررة لكل انشطار تقدر بـ 236(0.9)=212 MeV .

أيضًا، وبالرجوع إلى الفصل الخامس من هذا الكتاب فيمكن حساب قيمة Q لتفاعل الانشطار التالى:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{95}_{42}Mo + ^{139}_{57}La + 2^{1}_{0}n \qquad (9.8)$$

باستخدام معادلة حساب قيمة Q التالية:

$$Q = \left[M_{^{235}U} + m_{^{1}n}\right] - \left[M_{^{95}Mo} + M_{^{139}La} + 2m_{^{1}n}\right] amu \frac{931MeV}{amu} \qquad (10.8)$$

مثال 2.8

إحسب الطاقة الناتجة من انشطار نواة ^{235}U باستخدام المعادلة (10.8)

الحل

بالرجوع إلى الملحق 1 للاوزان الذرية، يمكن حساب الأوزان النووية بعد التخلص من أوزان الإلكترونات المصاحبة لكل ذرة كما يلى:

$$^{0}_{-1}e = .000549$$

$$^{1}_{0}n = 1.00866520$$

$$^{95}Mo = 94.905839 - 42(.000549) = 94.882781$$

$$^{139}La = 138.90614 - 57(.000549) = 138.87485$$

$$^{235}U = 235.043915 - 92(.000549) = 234.99341$$

و بالاستناد إلى المعادلة (10.8) نجد أن:

$$Q = \left[M_{^{235}U} - M_{^{95}Mo} - M_{^{139}La} - m_{^{1}n}\right] amu \frac{931MeV}{amu}$$

$$Q = (234.99341 - 94.882781 - 138.87485 - 1.00866520)\ amu$$

$$= .2271148\ \cancel{amu}\ (931\ MeV/\cancel{amu}) = 211.44MeV$$

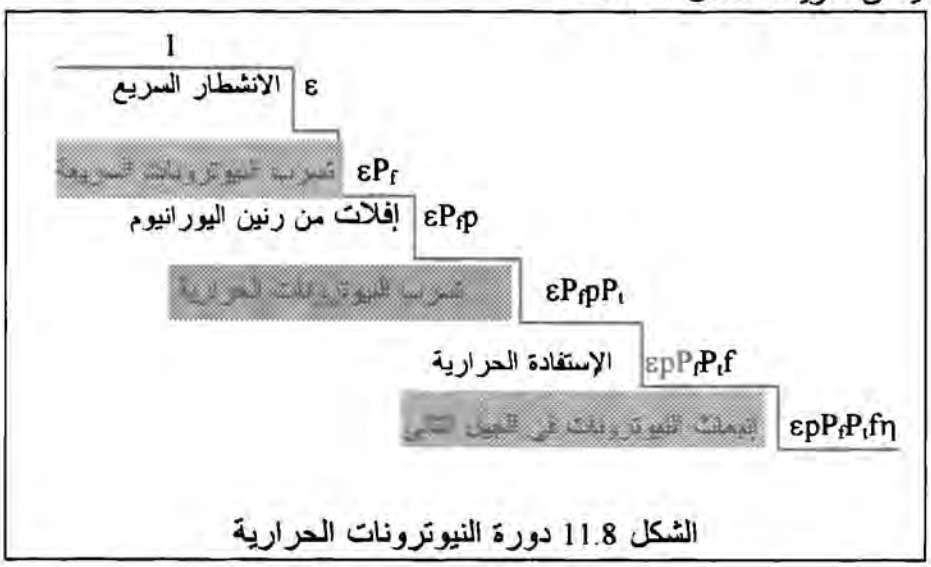
إن توزيع الطاقة الناتجة من الانشطار يمكن التعبير عنه بالجدول التالى:

الجدول 3.8 الطاقة الناتجة من الانشطار

نوع الطاقة	قيمة الطاقة MeV
الطاقة الحركية لشظايا الانشطار	165 +/- 5
طاقة أشعة جاما الفورية	7 +/- 1
الطاقة الحركية للنيوترونات	5 +/- 0.5
طاقة جسيمات بيتا من انحلال النواتج	7 +/- 1
طاقة أشعة جاما من انحلال النواتج	6 +/- 1
طاقة النيوترينوات من انحلال النواتج	10
الطاقة الكلية	200 +/- 6

6-8 دورة النيوترونات ومعامل التضاعف K
: Neutron Cycle and Multiplication Factor K

إن تعدد النيوترونات الناتجة من عملية الانشطار جعلت إمكانية تسلسل عملية الانشطار من جيل النيوترونات إلى الجيل الذى يليه، وتحت ظروف معينة يمكن أن يتضاعف عدد النيوترونات مع الزمن أو يبقى ثابتا أو يضمحل، وهذا ما يعبر عنه بمعامل التضاعف. إن النيوترونات تمر بمراحل حتى تتحرر نيوترونات جديدة بسبب عملية الانشطار، وهذه ما تسمى بدورة النيوترونات. الشكل التالى يوضح دورة النيوترونات الحرارية، والتى منها يمكن تعريف معامل التضاعف.



الشكل 11.8 دورة النيوترونات الحرارية

الشكل يوضح أنه ابتداءً بنيوترون فإنه نتيجة للانشطار السريع هناك معامل الانشطار السريع (ε) Fast fission factor الذى يسبب تواجد عدد من النيوترونات يساوى (ε)1، يلى ذلك احتمالية تسرب النيوترونات السريعة، ومن ثم فإن الباقى سيكون احتمالية عدم تسرب النيوترونات السريعة (Fast Nonleakage Probability P_f) مضروبة فى النيوترونات المتواجدة ε وهو مايساوى εP_f ، يلى ذلك أنه هناك الامتصاص للنيوترونات من قبل رنين اليورانيوم وعليه فلو كانت احتمالية الإفلات من الرنين

Resonance Escape Probability هى p ، فإن النيوترونات الباقية هى $\varepsilon P_f p$، بعد ذلك وخلال تباطؤ النيوترونات فإن هناك احتمالية عدم تسرب النيوترونات الحرارية(P_t) Thermal Nonleakage Probability ومن ثم فإن العدد الباقى يكون $\varepsilon P_f p P_t$. ونظرا للإستفادة من النيوترونات الحرارية فى إحداث الانشطار لمادة الوقود وهو ما يعكسه معامل الاستفادة الحرارية (f) Thermal Utilization factor، فإن عدد النيوترونات المتوفر هو $\varepsilon p P_f P_t f$ ، لأن عددًا آخر من النيوترونات سيمتص من قبل مواد أخرى. أخيرا فإن هناك عددا من النيوترونات التى تنتج من الانشطار فى ظل التنافس مع الأسر الإشعاعى وهو ما يعبر عنه بالمعامل η ، لذا فإن العدد النهائى من النيوترونات المتوفرة نتيجة كل الأحداث هو $\varepsilon p P_f P_t f \eta$ وهو ما يعبر عنه بالجيل التالى للنيوترونات. لذا فإن معامل التضاعف K يمكن تعريفه من هذه الدورة بأنه النسبة بين الجيل التالى إلى الجيل الأول، $K = \varepsilon p P_f P_t f \eta$.فإذا كان عدد النيوترونات فى الجيل الثانى أكبر منه فى الجيل الأول (K أكبر من 1) فإن المنظومة تعرف بأنها فوق الحرجة Super Critical، وفى حالة أن عدد الجيل الثانى أصغر من عدد الجيل الأول (K أصغر من 1) تعد المنظومة تحت حرجة Sub Critical، أما فى حالة تساوى العدد فى الجيلين فإن K=1، وتعتبر المنظومة حرجة Critical. التغير الجزئى Fractional Change لمعامل التضاعف يسمى بالمفاعلية (ρ) Reactivity، حسب المعادلة التالية:

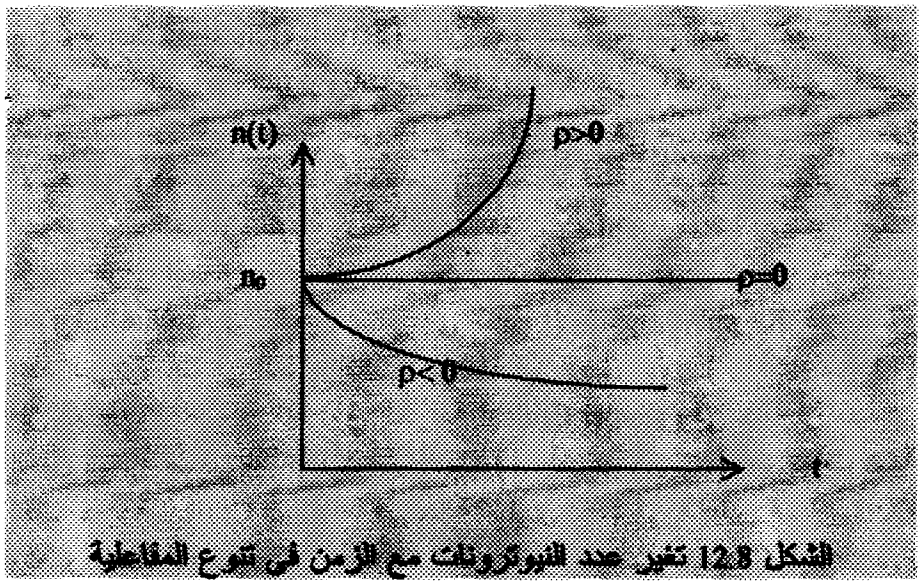
$$\rho = \frac{K - 1}{K} \qquad (11.8)$$

هذا و يمكن استنتاج أنه فى وجود النيوترونات الفورية فإن عدد النيوترونات يمكن التعبير عنه بالمعادلة (راجع المسألة 4.8) :

$$n(t) = n_0 e^{\frac{\rho}{\Lambda} t} \qquad (12.8)$$

وعليه يكون شكل الدالة n(t) فى الحالات المختلفة للمفاعلية كما هو موضح فى الشكل الموالي. فى المفاعلات النووية إن عدد النيوترونات يتناسب مع قدرة المفاعل، كما أن المفاعلية الموجبة تعنى سحب أعمدة التحكم من المفاعل ومن ثم يصبح المفاعل فى حالة فوق الحرجة مما يؤدى إلى زيادة القدرة كما

هو موضح بالشكل . وفى حالة المفاعلية السالبة فإن ذلك يعنى إدخال الأعمدة فى المفاعل، ومن ثم فالمفاعل فى حالة تحت الحرجة مسببة انخفاض القدرة. أما حالة المفاعلية الصفرية فهى تعنى أن المفاعل حرج ويشتغل عند قدرة ثابتة.



الشكل 12.8 تغير عدد النيوترونات مع الزمن فى تنوع المفاعلية

7-8 ملخص :

انشطار النوى الثقيلة يحدث نتيجة امتصاص هذه النوى للنيوترونات البطيئة أو النيوترونات السريعة، حيث تتنوع احتمالية الانشطار بناء على المقاطع المستعرضة للنواة القابلة للانشطار، فنجد أن نواة اليورانيوم-235 لها احتمالية تبدأ من طاقات ضئيلة للنيوترونات، فى حين أن نواة اليورانيوم-238 تحتاج إلى نيوترون سريع بطاقة حوالى 1MeV حتى تنشطر. ونتيجة لهذا الانشطار تنتج نويدات متوسطة الكتل تسمى نواتج الانشطار، حيث تتعدد هذه الشظايا ولها توزيع جاوسى بقمتين أحدهما حول نويدة خفيفة نسبيا A=95 وأخرى حول نويدة ثقيلة نسبيا A=135 . إن عملية الانشطار تنتج أيضا

نيوترونات فورية فى زمن يقارب من 10^{-4} إلى 10^{-6} ثانية ، فى حين أن هناك نوع آخر من النيوترونات يسمى بالنيوترونات المتأخرة والذى ينتج نتيجة انحلال نواتج الانشطار أو ما يسمى بأمهات النيوترونات المتأخرة Delayed neutrons precursors، ويعبر عن هذه النيوترونات بست مجموعات، وهى تلعب دورًا أساسيًا فى ديناميكية المفاعلات النووية. الطاقة الناتجة من الانشطار تقارب من 200 MeV وتتضمن الطاقة الحركية للنويدات الناتجة من الانشطار، وطاقة النيوترونات، وطاقةبيتا، وطاقة أشعة جاما الفورية والمتأخرة وأيضا طاقة النيوترينوات وهذه الأخيرة ضائعة لايمكن إستردادها. إن النيوترونات تمر بعدد من الأحداث حتى تنتج جيلا جديدًا من النيوترونات وهذا ما يسمى بدورة النيوترونات، فهناك حدث الانشطار السريع والإفلات للنيوترونات السريعة وأيضا الامتصاص الرنينى لنيوترونات من قبل نواة اليورانيوم-238، كما أن النيوترونات، بسبب التصادمات والتبعثر المرن، تفقد طاقتها وتتحول إلى نيوترونات حرارية، هذه النيوترونات الحرارية معرضة للإفلات من المنظومة. أيضا هناك الإستفادة من هذه النيوترونات الحرارية من حيث عملية امتصاصها من قبل نواة اليورانيوم. وأخيرا، تتم عملية انبعاث نيوترونات جديدة نتيجة الانشطار الذى يتنافس مع عملية الأسر الإشعاعى. نسبة الجيل التالى من النيوترونات إلى الجيل السابق يسمى بمعامل التضلعف K الذى له علاقة بمعامل المفاعلية ρ. قدرة المفاعلات تزداد وتنقص أو تبقى كما هى بناءً على قيمة المفاعلية، حيث توجد ثلاث حالات تمثل الحرجة، وفوق الحرجة ، وتحت الحرجة.

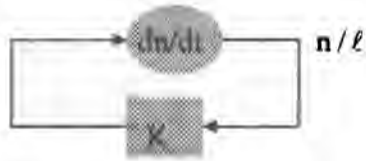
8-8 مسائل :

1.8 – قدّر الطاقة اللازمة للنيوترون لإحداث الانشطار فى نواة ^{239}Pu .

2.8 – ما هى نهاية القيمة القصوى للمفاعلية ؟

3.8 – كيف يمكن حساب الطاقة المتوسطة للنيوترونات الناتجة من الانشطار باستخدام البيانات فى الشكل 10.8 ؟

4.8 – يوضح الشكل التالى العوامل المؤثرة على معدل تغير عدد النيوترونات dn/dt



والتى يمكن التعبير عنها بالمعادلة:

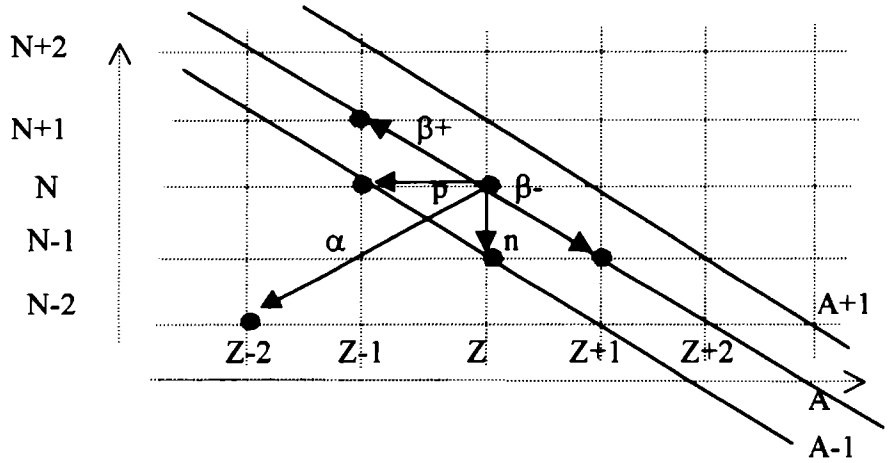
$\frac{dn}{dt} = (K-1)\frac{n}{\ell}$، حيث ℓ تمثل زمن حياة النيوترون،

أ- حل المعادلة فى حالة وجود الشرط الإبتدائى $n(0)=n_0$.

ب- ارسم الأشكال التى تمثل n كدالة فى الزمن فى الحالات K=1, K<1, K>1.

ج- أعد كتابة المعادلة بدلالة ρ و زمن توليد النيوترونات $\Lambda = \frac{\ell}{K}$.

5.8- فى الشكل التالى مبتدئين بالنواة A والتى تحمل N من النيوترونات و Z من البروتونات احسب A, N, Z فى كل حالات الانحلال المبينة.


N+2
N+1
N
N-1
N-2
β+
p
β-
α
n
A+1
Z-2
Z-1
Z
Z+1
Z+2
A
A-1

الفصل التاسع

منظومات التفاعل الانشطارى Nuclear Fission Systems

9-1 ثنائية إينشتين.
9-2 التفاعل المتسلسل مع اليورانيوم.
9-3 حسابات K_{∞} وتصميم المفاعلات.
9-4 الأنواع الأساسية للمفاعلات.
9-5 فيزياء المفاعلات : استاتيكا وديناميكا المفاعلات.
9-6 ملخص.
9-7 مسائل.

1-9 ثنائية إينشتين :

فيما سبق تم تقديم ثنائية دى برولیه والتى تفيد بأن الجسيم من خـــلال كميـــة حركته p يمكن التعبير عنه بموجة عبر طول موجته λ وذلك مـــن خـــلال المعادلة التالية:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (1.9)$$

أيضاً، هناك ثنائية أخرى مشهورة جدًا وهى ثنائية اينشتين والتى تفيـــد بـــأن الكتلة تعبر عن طاقة وأن الطاقة تعبر عن كتلة، وهو ما تشير بـــه المعادلـــة التالية:

$$E = mc^2 \qquad (2.9)$$

حيث m تمثل الكتلة، E تمثل الطاقة، و c تمثل سرعة الضوء.

تفوق الطاقة النووية (تفاعلات نووية) عـــن الطاقـــة الكيمائيـــة (تفـــاعلات كيمائية:تفاعلات أغلفة الإلكترونات فى الذرة) بمقدار مليون مرة، مما أحـــاط أهمية بالغة فى محاولة الاستفادة من هذه الطاقة الهائلة لغـــرض التطبيقـــات السلمية لتوليد الطاقة، ومن ثم ظهرت المفاعلات الانشطارية.

مثال 1.9

احسب الطاقة الناتجة من انشطار كيلو جرام واحد من اليورانيوم وقارن ذلـك بالتفاعلات الكيمائية، إذا علمت أن انفجار كيلوجرام واحد من مادة TNT تولد طاقة تساوى 4.1×10^{13} erg .

الحل:

بحساب فرق الكتلة نتيجة انشطار نواة واحـــدة مـــن ^{235}U نجدهـــا تســـاوى 200MeV وهى ما تناظر 3.2×10^{-4} erg

كما أن عدد الذرات (النوى) فى جرام واحد من عنصر ^{235}U يمكن حسابه كما يلي:

$$N[\#] = \frac{1[g]}{235[\frac{g}{møle}]} \quad 0.602x10^{24}[\frac{atom}{møle}] = 2.56x10^{21} \quad atom$$

وعليه فإن الطاقة الناتجة عن انشطار كل الذرات فى الجرام الواحد من ^{235}U هى:

$$2.56x10^{21} \quad [atøm] \quad 3.2x10^{-4}\ [\frac{erg}{atøm}] = 8.2x10^{17}\ erg$$

ومن ثم فإن انشطاركيلوجرام واحد من ^{235}U ينتج $8.2x10^{20}$ erg
فإذا كان انفجار كيلوجرام واحد من مادة TNT يولد طاقة تساوى $4.1x10^{13}$ erg ، لذا يمكن حساب عدد الكيلوجرامات من TNT التى تعادل الطاقة الناتجة من انشطار كيلوجرام واحد من اليورانيوم وذلك حسب الآتى:

$$\frac{8.2x10^{20}}{4.1x10^{13}} = 20x10^{6}\,Kg$$

هذا يعنى أن الطاقة النووية تناظر عشرين مليون مرة الطاقة الكيمائية.
يلاحظ أيضا أن جرامًا واحدًا من انشطار اليورانيوم يولد:

$8.2x10^{17}$ erg $=8.2x10^{10}$ Joule$= 8.2x10^{10}$ watt.sec ~ 1Mw.day

ومن ثم فإن كيلوجرامًا واحدًا من اليورانيوم يولد 1Gw.day (واحد جيجاوات-يوم) وهذه تعتبر طاقة حرارية يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية بافتراض 30% كفاءة «efficiency» أى أن الطاقة الكهربائية المولدة تناظر 0.3Gw.day، وهذه الطاقة تنتجها محطة توليد كهرباء تقليدية بحرق حوالى 2500 طن من الفحم. هذه الحسابات تجعل استخدام الطاقة النووية لتوليد الطاقة شيئًا ذا جاذبية.

2-9 التفاعل المتسلسل مع اليورانيوم :

لحدوث التفاعل المتسلسل فى اليورانيوم، فإن ذلك يعتمد على التوازن بين أربعة أحداث متنافسة وهي:

1- انشطار نوى اليورانيوم مع انبعاث نيوترونات أكثر مما يؤسر
2- أسر اليورانيوم للنيوترونات دون احداث انشطار
3- أسر مواد أخرى للنيوترونات وطبعا دون حدوث انشطار
4- إفلات النيوترونات دون أسرها.

فإذا كانت العمليات أو الأحداث 2،3،4 أصغر أو تساوى الحدث 1، فإن التفاعل المتسلسل ممكن بحيث يكون إما فوق الحرجى، أو تفاعل متسلسل حرجى. أما إذا ما حدث العكس، فإن المنظومة تكون تحت الحرجية ولا يمكن الحفاظ على تسلسل التفاعل.

لذا فالحاجة إلى توازن مرغوب يتطلب وضع شروط وضوابط على أى منظومة يضمن فيها حدوث التفاعل المتسلسل. أحد هذه الشروط المهمة هو "الحجم". إن إنتاج النيوترونات يعتمد على حجم المنظومة، فى حين أن احتمالية إفلات النيوترونات تعتمد على المساحة السطحية. فإذا كانت المنظومة صغيرة جدا، بحيث تكون نسبة مساحة السطح S إلى الحجم V (R=S/V) كبيرة، فإن إفلات النيوترونات من المنظومة يكون كبيرًا، وعليه فإن هذه المنظومة يعز عليها المحافظة على التفاعل المتسلسل. وعلى الجانب الآخر، فلو كانت النسبة صغيرة، بمعنى أن الحجم يكون كبيرًا، ومن ثم فإن إفلات النيوترونات يكون صغيرًا ويكون فقدها بسبب الأسر أو الامتصاص متغلباً على إنتاجها بمعنى أن صغر الحجم لا يؤدى إلى تفاعل متسلسل، كما أن كبر الحجم لا يؤدى إلى تفاعل متسلسل، وعليه هناك حجم حرج Critical Size يحدث فيه التفاعل الانشطارى المتسلسل. هذا يخالف التفاعل الكيميائى الذى لا يعتمد على حجم منظومة التفاعل، حيث إن التفاعل يحدث فى اى حجم كان.

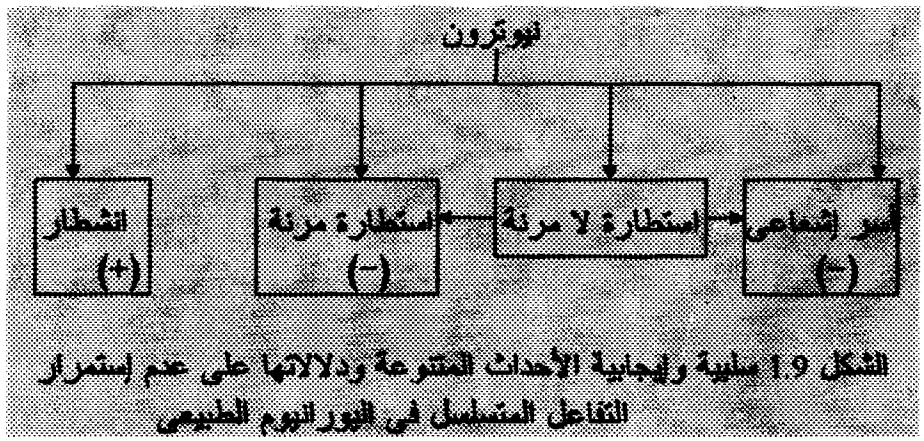
الآن سندرس امكانية حدوث التفاعل المتسلسل مع اليورانيوم الطبيعى فقط. وكما أشرنا أعلاه أن هناك أربعة أحداث متنافسة فى حالة عملية الانشطار،

وأيضا علمنا بأن كلما زاد حجم المنظومة قل إفلات النيوترونات من المنظومة ، وعليه سنفرض أن هناك كتلة كافية من اليورانيوم الطبيعى (أبعاد الكتلة أكبر بكثير من متوسط المسار الحر؛ أى افتراض وسط لانهائى)، ومن ثم يمكن تجاهل إفلات النيوترونات من المنظومة. أيضا الحدث الثالث يمكن تجاهله بسبب عدم وجود مواد أخرى غير اليورانيوم الطبيعى. وعليه سيكون هناك الحدثان الرئيسيان الأول (الانشطار) والثانى (الامتصاص دون حدوث انشطار)، طبعا يتخللهما تصادم النيوترونات المرن Elastic Scattering وغير المرن Inelastic Scattering .

طبعا، يحدث الانشطار التلقائى منتجًا نيوترونات سريعة بطاقة متوسطة تساوى 2MeV وبانتاج نيوترونات متوسط Yield يساوى $\nu=2.5$.

اليورانيوم الطبيعى يتكون من النظير ^{238}U بنسبة 99.28%، ومن النظير ^{235}U بنسبة 0.72%. كما أن المقاطع المستعرضة للانشطار فى مدى طاقة النيوترونات الناتجة من الانشطار تعتبر نفس القيمة لكلا النظيرين (راجع شكل المقاطع المستعرضة لانشطار النظيرين بالشكلين 3.8 (أ) و 3.8 (ب) ، وعليه فإن الانشطار الإضافى يكون من قبل انشطار اليورانيوم-238.

الشكل التالى يوضح الأحداث التى تتعرض لها النيوترونات من حيث الإيجابية فى إنتاج نيوترونات جديدة (+) أو السلبية وذلك بضياع النيوترونات (-).



الشكل 1.9 سلبية وإيجابية الأحداث المتنوعة ودلالاتها على عدم إستمرار التفاعل المتسلسل فى اليورانيوم الطبيعى

إن حدث الانشطار يمثل الحدث الإيجابى وذلك بسبب إنتاج نيوترونات جديدة. كما أن حدث الأسر الإشعاعى هو حدث سلبى بسبب امتصاص النيوترون وانبعاث أشعة جاما دون انشطار اليورانيوم. وحيث إن التصادمات بين النيوترونات ونوى اليورانيوم تؤدى سواء إلى الاستطارة المرنة أو الاستطارة اللامرنة، فإنه فى حالة الاستطارة المرنة ونظراً لأن التصادم يحدث مع نوى ثقيلة، فإن النيوترون يفقد طاقة صغيرة نتيجة التصادم (الطاقة الدنيا للتصادم بالنسبة لليورانيوم هى $E=0.98E_0$) وبالتالى تتناقص طاقة النيوترون نتيجة التصادمات المتكررة ببطء شديد مما يتطلب العديد من التصادمات حتى تتحول طاقة النيوترون من 1Mev إلى 1eV وعليه فإن النيوترون لا مفر له من وقوعه فريسة للامتصاص الرنينى لنواة اليورانيوم-238، حيث إنه فى هذا المدى تكون احتمالية الامتصاص الرنينى أكبر من احتمالية الانشطار لنواة اليورانيوم-235، ومن ثم فإن النيوترون بسبب الاستطارة المرنة يكون له تأثير سلبى نظراً لفقده بسبب الامتصاص الرنينى. أما بالنسبة للاستطارة اللامرنة فإن النيوترون يفقد طاقة ويصبح بطاقة قدرها 0.3MeV وهى أقل من الطاقة اللازمة لإحداث استطارة لامرنة أخرى وأيضا هى أقل من الطاقة اللازمة لإحداث انشطار لنواة اليورانيوم-238 ، وبالتالى فإما أن النيوترون يتعرض فيما بعد إلى الاستطارة المرنة وهو حدث سلبى بسبب حتمية الامتصاص الرنينى، أو حدوث الأسر الإشعاعى وهو أيضا سلبى التأثير. مما سبق نجد أنه لا يمكن استمرار الانشطار المتسلسل بسبب كثرة التأثيرات السلبية على التأثير الإيجابى الوحيد.

بالتحليل والدراسة برز حلان هندسيان لهذه المعضلة وهما :

1- إضافة مهدىء Moderator من النوى الخفيفة ، وذلك لأن التصادم المرن للنيوترونات مع هذه النوى يؤدى إلى فقد طاقة كبيرة للنيوترون فى عدد محدود من التصادمات ومن ثم فإن النيوترونات تتحول إلى طاقات تمكنها من تجنب الامتصاص الرنينى لليورانيوم-238 مما يضيف إيجابية لحدوث الانشطار. كما أن المقطع المستعرض لانشطار اليورانيوم-235 عالٍ بدرجة

تكفى للتغلب على التأثير السلبى للأسر الإشعاعى . ومن ثـــم فـــإن إضافـــة المهدىء المناسب لليورانيوم الطبيعى مكـــّن من حدوث تفاعل متسلسل علـــى الرغم من تدنى وفرة نظير اليورانيوم-235 . وهذا ما نتج عنه مـــا يســـمى بالمفاعلات الحرارية Thermal Reactors.

2- التثرية وذلك برفع نسبة اليورانيوم-235 من نســـبة 0.72% إلـــى نســـب أعلى. ومن ثم تتم الاستفادة من وجود احتمالية انشطار لليورانيوم-235 علـــى امتداد تنوع طاقة النيوترونات من meV إلى MeV ، وبالتالى تـــزداد نســـبة الانشطار إيجابيا. وفى حالة اليورانيوم-235 الصافى أو عالى التثرية (90%) فإن الانشطار حتما سيقع ، ذلك لأنه لن يكون التـــأثير الســـلبى للاســـتطارة اللامرنة له دور جدى كما يحدث مع اليورانيوم الطبيعى الذى يحمـــل نســـبة عالية من اليورانيوم-238 (أكثر من 99%) ، كما أن النيوترونات التـــى تصل إلى طاقات الرنين Resonance Energy، سوف تسبب انشطارًا، ذلـــك لأن النيوترونات بطاقات تساوى طاقة رنين اليورانيوم-238 لـــها احتماليـــة لإحداث انشطار أعلى من احتمالية الأسر الإشعاعى بالنسبة لليورانيوم-235. وهذا ما نتج عنه ما يسمى بالمفاعلات السريعة Fast Reactors.

سيتم تناول هذين الحلين الهندسين فيما بعد وذلك من خلال حسابات معـــامل التضاعف للوسط اللانهائى K_∞.

3-9 حسابات معامل التضاعف K_∞ وتصميم المفاعلات :

كما ورد فى الفصل الثامن من هذا الكتاب وبالتحديد فى الجـــزء 8-6 ، فـــإن معامل التضاعف K يعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$K = \eta p \varepsilon f P_t P_f \qquad (3.9)$$

وفى حالة الوسط اللانهائى، فإن كلا من احتماليتى عدم الإفلات للنيوترونـــات السريعة و النيوترونـــات البطيئـــة هـــى 100% أى أنـــه لا يمكـــن إفـــلات

النيوترونات بنوعيها من الوسط اللانهائى، ومن ثم فإن $P_t = P_f = 1$. هذا يجعل معادلة معامل التضاعف للوسط اللانهائى K_∞ تعرف كما يلي:

$$K_\infty = \eta p \varepsilon f \qquad (4.9)$$

فى المفاعلات المحتوية على اليورانيوم-235 فقط فإن كلا من $\varepsilon = 1$ و $p = 1$ الممثلان لمعامل الانشطار السريع واحتمالية الإفلات من الرنين على التوالى، ذلك لأن اليورانيوم-238 غير موجود. كما أنه فى وجود اليورانيوم-238 فإن ε تكون أكبر من 1.

أيضا فى المفاعلات المتجانسة Homogeneous Reactors والتى فيها يختلط كل من الوقود (المحتوى على اليورانيوم -238 واليورانيوم-235) والمهدىء، فإن $\varepsilon = 1$. ذلك لأن جسيمات الوقود صغيرة جداً، ومن ثم فإن النيوترونات التى تسبب الانشطار ستصطدم مع المهدىء قبل أن تتحصل على فرصة لإحداث انشطار فى اليورانيوم-238 .

إن المعاملات الفرعية المكونة لمعامل التضاعف اللانهائى تتنوع اعتماديتها كما يلى:

η : تعتمد على الخواص النووية للوقود من خلال عدد النيوترونات الناتجة من الانشطار ν والمقطع المستعرض للانشطار σ_f و المقطع المستعرض للامتصاص σ_a .

ε : تعتمد على الخواص النووية للوقود وكذلك على الحجم وشكل الوقود.

p و f : كل منهما يعتمد على الخواص النووية للوقود وكذلك المهدىء، والمواد الأخرى.

وحيث إن كلا من η و ε يعتمدان فقط على الخواص النووية للوقود ، لـــذا فإن أحد المشاكل الأساسية لتصميم المفاعلات ، بعد اختيار نوعية الوقود، هو إيجاد المقادير النسبية لكل المواد المستخدمة فى التصميم ، وكذلـــك أســلوب تجميعها مع بعض لإنتاج أعلى قيمة لـــ pf . ذلك بدوره يمنح القيمة القصوى لمعامل التضاعف K_∞ .

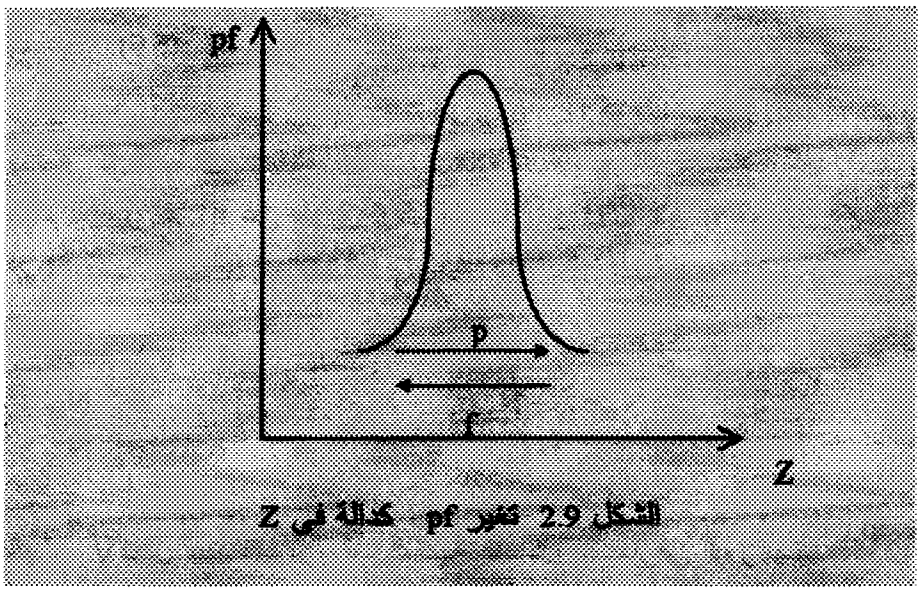
عند تصميم المفاعلات فإنه لضمان التفاعل المتسلسل فى حجم محـــدد مـــن الوسط وكذلك لضمان التحكم فى التفاعل المتسلســـل بوجـــود مـــواد تحكـــم لامتصاص النيوترونات، فإن ذلك يتطلب أن يكون K_∞ أكبر مـــن 1. ذلـــك لأنه لو كان K_∞ يساوى 1 فإنه بتحديد الوسط (جعله محدود الحجـــم)ســـيقل معامل التضاعف الفعلى K عن 1 وذلك بسبب تأثير كل من احتمالية إفـــلات النيوترونات السريعة P_f واحتمالية النيوترونات البطيئة P_t.
والأن سنحاول دراسة تصميم وسط انشطارى(مفاعل بسيط) بحيـــث يكـــون الوسط خليطا متجانسا بين الوقود والمهدىء. لذا وبما أن الوسط متجـــانس، فإن $\varepsilon=1$. كما أن شرط ضمان التفاعل المتسلسل لوسط محدود الحجم ، فـــإن K_∞ أكبر من 1. الآن يمكن التعبير عـــن هـــدف التصميـــم Design Goal بالمعادلة التالية:

$$K_\infty > 1 \Rightarrow pf\eta > 1 \Rightarrow pf > \frac{1}{\eta} \qquad (5.9)$$

هذا وسوف يكون معامل التصميم هو نسبة المهدىء إلى الوقـــود $Z = \frac{N_1}{N_0}$، حيث إن N_0 تمثل الكثافة الذرية للوقود فى الخليط، فـــى حيـــن أن N_1 تمثـــل الكثافة الذرية للمهدىء فى الخليط. إذاً يمكننا تلخيص برنامج تصميم المفـــاعل المتجانس البسيط عبر العبارة التالية:

تصميم المفاعل للحصول على القيمة القصوى لـــ $pf > \frac{1}{\eta}$ ، من خلال خيـــار تركيبة مناسبة لـــ Z من الوقود والمهدىء.

سنجد عبر العرض القادم أن نظير نثرية معينة فإن pf تمر عبر قمة بتغـــير قيمة Z، وهذه القمة قد تجعل من K_∞ أكبر من1 أو أقل وذلك حسب نوعيـة المهدىء . الشكل التالى يوضح ذلك التغير:



الشكل 2.9 تغير pf كدالة في Z

والآن لنحسب قيمة K_∞ لثلاث من المنظومات الحرارية المتجانسة الخليـــط (Thermal Homogeneous Systems). الجدول التالى يبين تركيبة الخليط بيـن الوقود والمهدىء:

الجدول 1.9 نوعية الوقود ونوعية المهدىء فى الخليط المتجانس

الوقود	المهدىء	شكل الخليط المتجانس
U	الكربون C	جسيمات مختلطة
UO_2	مـــاء عـــادى H_2O	وحلى (Slurry in Liquid Moderator)
UO_2	مـــاء ثقيـــل D_2O	وحلى (Slurry in Liquid Moderator)

إذاً هدف التصميم هو اختيار قيمة Z (نسبة المهدىء الى الوقود) بحيث يتم الحصول على أكبر قيمة لـ pf ومن ثم أكبر قيمة لـ K_∞ .
وحيث إنه لضمان الحصول على تفاعل متسلسل ، وكما ورد سابقا، فإن ذلك يناظر توفر الشرط التالي:

$$pf > \frac{1}{\eta} \qquad (6.9)$$

فما هى قيمة η التى تحقق ذلك الشرط؟.
سيتم التعبير عن η عن طريق تركيزات U^{235} و U^{238} لأن η تتغير بتغير درجة تثرية اليورانيوم باليورانيوم-235. وذلك كما يلي:

$$\eta = \nu^{25}\frac{\Sigma_f^{25}}{\Sigma_a} = \nu^{25}\frac{N_{25}\sigma_f^{25}}{N_{25}\sigma_f^{25} + N_{25}\sigma_r^{25} + N_{28}\sigma_a^{28}} = \frac{\nu^{25}}{1 + \frac{\sigma_r^{25}}{\sigma_f^{25}} + \frac{\sigma_a^{28}}{\sigma_f^{25}}\frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

حيث ν^{25} تمثل عدد النيوترونات الناتجة عند كل انشطارفى اليورانيوم-235، و η تمثل عدد النيوترونات الناتجة عند كل امتصاص والذى يشمل أسر إشعاعى و انشطار.
هذا وبالتعويض بالقيم التالية:

$$\nu^{25} = 2.44, \quad \frac{\sigma_r^{25}}{\sigma_f^{25}} = 0.18, \quad \frac{\sigma_a^{28}}{\sigma_f^{25}} = .0047$$

نجد أن:

$$\eta = \frac{2.44}{1.18 + 0.0047\frac{N_{28}}{N_{25}}} \qquad (7.9)$$

يمكن حساب $\frac{N_{28}}{N_{25}}$ بمعلومية درجة التثرية، حيث إن درجة التثرية الوزنية $w/_0$ معرفة كما يلي:

$$w/_0 = \frac{\rho^{25}}{\rho^{25} + \rho^{28}} \qquad (8.9)$$

حيث ρ تمثل الكثافة والتى يعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$\rho = \frac{NM}{N_{AV}} \qquad (9.9)$$

حيث N تمثل الكثافة الذرية [#/cm3]، M تمثل الوزن الجزيئى [g/mole] ، و N_{AV} يمثل عدد أفوجادرو [atoms/mole]. بالتعويض بالمعادلة 9.9 فى المعادلة 8.9، نحصل على:

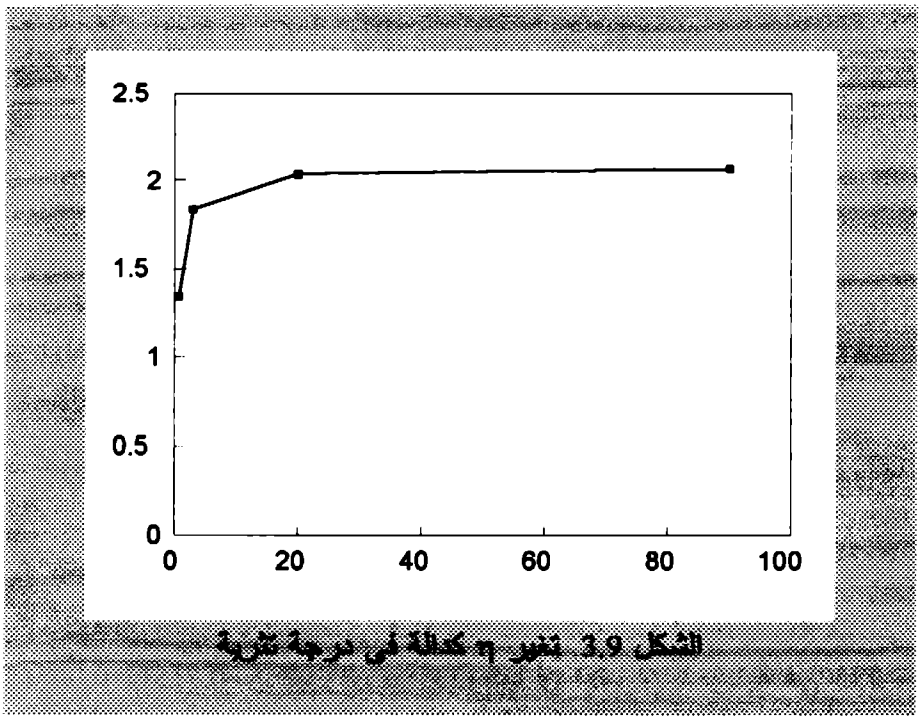
$$w/_0 = \frac{(NM)^{25}/N_{AV}}{(NM)^{25}/N_{AV} + (NM)^{28}/N_{AV}} = \frac{1}{1 + \frac{N^{28}}{N^{25}}\frac{M^{28}}{M^{25}}} \qquad (10.9)$$

بالنسبة لليورانيوم الطبيعى فإن درجة التثرية الطبيعية هى 0.00715=0.715% من اليورانيوم-235، كما أن الأوزان الجزيئية هى 235 ، و 238 لكل من نظير اليورانيوم-235 واليورانيوم-238 على التوالى. وبالتعويض بهذه القيم فى المعادلة السابقة نحصل على:

$$\frac{N_{28}}{N_{25}} = 137 \qquad (11.9)$$

هذا ونلاحظ أن هذه القيمة تتغير بناءً على تغير تثرية اليورانيوم ، فمثلاً فى حالة درجة تثرية تساوى 3% من اليورانيوم-235 ، نجد أن القيمة تساوى 32 .

إذاً يمكن الآن حساب قيمة η لليورانيوم الطبيعى باستخدام المعادلة 10.9 وبالتعويض بنتيجة المعادلة 11.9، نجد أن η= 1.337. هذا ويلاحظ أن η تزداد بزيادة درجة تثرية اليورانيوم بنظير اليورانيوم-235 ، وتعتدل عند قيمة معينة مع زيادة التثرية عن 20% ، وذلك كما يوضحه الشكل التالي:



الشكل 3.9 تغير η كدالة في درجة تثرية

مثال 1.9

إذا تم تصميم مفاعل مكون من خليط متجانس من الوقـــود(يورانيـــوم-235 ويورانيوم-238) والمهدىء، بحيث كانت احتمالية عدم إفلات النيوترونـــات البطيئة والنيوترونات السريعة $P_{fl}=P_f*P_t$ تساوى 83%، و كـــانت قيمـــة pf تساوى 0.6، احسب درجة تثرية الوقود من اليورانيوم-235 حتـــى نضمـــن حرجية المفاعل.

الحل :

لضمان حرجية المفاعل فإن $K=P_{fl}*K_\infty=1$

ومن ثم فإن $K_\infty=\frac{1}{0.83}=1.205$

وحيث إنه فى الخليط المتجانس تكون جسيمات وقود اليورانيوم صغيرة جدًا

(بقطر فى حدود الميكرون) ، لذا فإنه من المؤكد أن النيوترونات السريعة من الانشطار سوف تفلت من اليورانيوم قبل الوصول إلى نوى اليورانيوم-238، النيوترون سيفلت إلى المهدىء ويتم تهدئته دون شطر اليورانيوم-238.

وعليه فإن ε=1 مما يعنى عدم مساهمة النيوترونات السريعة فى الانشطار. وهذا ما يضيف أحد المساوىء للمنظومات المتجانسة وذلك بعدم الاستفادة من النيوترونات السريعة فى الانشطار.

كما أن pf=0.6 تعنى أن كل من p و f يكونان فى حيز $0.6^{1/2}$ =.775 ، أو 78%، لذا فإن ذلك يفيد ما يلي:

1- يجب أن لا يضيع أكثر من 22% من النيوترونات بسبب الامتصاص الرنينى خلال عملية تهدئة النيوترونات

2- يجب أن لا يضيع أكثر من 22% من النيوترونات الحرارية بسبب الامتصاص فى المواد غير الوقود

لذا فإن ؛

$$K_\infty = pf\eta = 0.6\eta = 1.205$$

وعليه
$$\eta = \frac{1.205}{0.6} = 2.0083$$

يمكن حساب نسبة الكثافة الذرية بين اليورانيوم-238 واليورانيوم-235 ، وذلك باستخدام المعادلة 7.9 :

$$2.0083 = \frac{2.44}{1.18 + 0.0047\frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

ومنها يمكن أيجاد التالي:

$$\frac{N_{28}}{N_{25}} = \frac{2.44}{2.0083*.0047} - \frac{1.18}{.0047} = 258.50 - 251.06 = 7.44$$

وباستخدام المعادلة 10.9:

$$w/_0 = \frac{1}{1 + \frac{N^{28}}{N^{25}}\frac{M^{28}}{M^{25}}} = \frac{1}{1 + 7.44\frac{238}{235}} = 0.1172 = 11.7\%$$

إذا فهذا المفاعل متجانس الخليط بين الوقود والمهدىء والمحدد الحجم يجب أن يكون ذا تثرية قدرها حوالي 12% من اليورانيوم-235 للحصول على حرجية K=1.

بعد أن تم عرض كيفية حساب η، نقدم الآن كيفية حساب معامل الاستفادة الحرارية f.

يعرف معامل الاستفادة الحرارية بأنه النسبة بين عدد النيوترونات الحرارية الممتصة من قبل اليورانيوم إلى العدد الكلى من النيوترونات الحرارية الممتصة فى الوسط (وقود و مهدىء). أو بمعنى آخر فإن معامل الاستفادة الحرارى هو النسبة بين معدل امتصاص النيوترونات فى اليورانيوم إلى معدل امتصاص النيوترونات فىكل المواد.

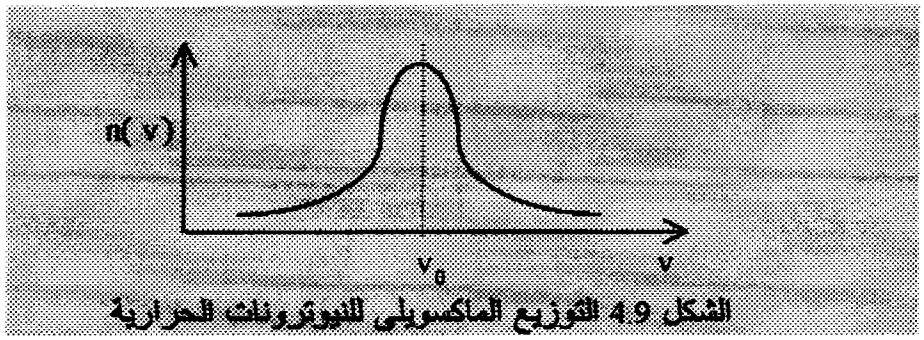
وحيث إنه من شكل منحنىالمقطع المستعرض الانشطارى لليورانيوم (^{235}U) فى منطقة طاقة النيوترونات البطيئة ، يتضح أن المقطع المستعرض يتناسب مع معكوس سرعة النيوترونات(1/v dependence). وهذا يعنى أن:

$$\frac{\sigma_a}{v_0} = \frac{\sigma_{a0}}{v} \Rightarrow \sigma_a = \frac{v_0\sigma_{a0}}{v} \qquad (12.9)$$

كما أن كثافة النيوترونات الحرارية لها توزيع ماكسويلى كدالة فى السرعةn(v)، حيث يمكن التعبير عن هذه الكثافة الكلية n بالمعادلة التالية:

$$n = \int_0^\infty n(v)dv = \int_0^\infty 4\pi n(\frac{m}{2\pi kT})^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \qquad (13.9)$$

الشكل التالي يوضح التوزيع الماكسويلى للنيوترونات الحرارية حول سرعة متوسطة v_0 :



الشكل 4.9 التوزيع الماكسويلى للنيوترونات الحرارية

لذا فإن معدل التفاعل الامتصاصى يمكن حسابه من خلال حاصل ضرب الفيض flux (ϕ=vn) و المقطع المستعرض العينى الامتصاصى Macroscopic absorption cross section ($\Sigma_a=\sigma_a N$) كما يلي:

$$R = \Sigma\phi = [\sigma_a(v)N][vn(v)] \qquad (14.9)$$

وباستخدام المعادلتين 12.9 و 13.9 بالتعويض فى المعادلة السابقة:

$$R = \frac{v_0\sigma_{a0}}{\sqrt{\pi}}N \quad \sqrt{\pi}\, n = \sigma_{a0}N\, nv_0 = \sigma_{a0}N\phi_0 = \Sigma_{a0}\phi_0 \qquad (15.9)$$

من المعادلة نلاحظ أن معدل تفاعل الامتصاص R لا يعتمد على السرعة، ومن ثم فإنه يعتمد على المقطع المستعرض المجهرى σ_{a0} عند السرعة الحرارية الأكثر احتمالية (most probable velocity) وهى v_0=2200m/sec التى تناظر الطاقة الحرارية للنيوترونات 0.025 eV ، كما يعتمد على الكثافة الذرية للنوى الهدف N ، وأيضا الفيض النيوترونى الحرارى ϕ_0 .

الآن يمكننا استخدام معادلة معدل تفاعل الامتصاص (15.9) لتعريف معامل الاستفادة الحرارية f ، بحيث نفترض أن الخليط المتجانس هو من الوقود والمهدىء ، كما أن المقاطع المستعرضة هى الحرارية ومن ثم سنحتفظ

بتذييل الرموز بالرقمين 0 ، و 1 ليدلا على الوقود والمهدىء على التوالـــى. المعادلة هى:

$$f = \frac{\Sigma_{a0}}{\Sigma_{a0} + \Sigma_{a1}} = \frac{\sigma_{a0} N_0 \phi_0}{\sigma_{a0} N_0 \phi_0 + \sigma_{a1} N_1 \phi_0} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma_{a1}}{\Sigma_{a0}}} \qquad (16.9)$$

$$f = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a0}} \frac{N_1}{N_0}} \qquad (17.9)$$

حيث N_1 تمثل الكثافة الذرية للمهدىء، وأن N_0 تمثل الكثافة الذرية للوقـــود. أيضا σ_{a1} تمثل المقطع المستعرض المجهرى الامتصاصى الحرارى للمهدىء ، وσ_{a0} تمثل المقطع المستعرض المجهرى الامتصاصى الحـــرارى للوقـــود. يلاحظ من المعادلة السابقة أن معامل الاســـتفادة الحـــرارى f يعتمـــد علـــى الخواص النووية لكل من الوقود والمهدىء، على عكس η التى تعتمد علـــى الخواص النووية للوقود فقط.

وكما أوردنا فى الجدول 1.9 ، فسيتم حساب قيمة f للأنظمة الثلاثة المقترحـــة الممثلة بالوقود النووى وهو اليورانيوم الطبيعى مع أحـــد المـــهدئات الثلاثـــة وهى الماء الخفيف، أو الماء الثقيل، أو الكربـــون. والتـــى هـــى بالأســـاس للأنواع الرئيسة الموجودة فى العالم ونعنى بـــها مفـــاعلات المـــاء الخفيـــف بالولايات المتحدة ، ومفاعلات الكاندو بكنـــدا والـــهند، وأخـــيرًا المفـــاعلات المبردة بالغاز وهى الموجودة بالمملكة المتحدة.

الجدول التالي يوضح بعض الخواص الفيزيائية والنووية لبعـــض العنـــاصر اللازمة الداخلة فى التصميم.

الجدول 2.9 بعض الخواص الفيزيائية والنووية لبعض العناصر

العنصر	الكثافة ρ [g/cm^3]	σ_a [cm^2/atom] x10^{24} للنيوترون حراري ϕ_0	N [#/cm^3] x10^{24}
^{235}U	-	683	-
^{238}U	-	2.71	-
U يورانيوم طبيعي	19.1	7.68	0.0478
H	1.0 لـ H_2O	.332	0.0668
D	1.1 لـ D_2O	.00046	0.0662
C	1.6	.0045	0.0803
O	-	<.0002~0	-

مثال 2.9

1 – احسب المقطع المستعرض الامتصاصى لليورانيوم الطبيعى U

2 – نظرا لوجود شوائب من الماء الخفيف بنسبة وفرة 0.25% فى الماء الثقيل والذى يشكل نسبة 99.75%، وحيث إن الماء الخفيف له مقطع مستعرض امتصاصى كبير نسبيا مقارنة بالمقطع المستعرض للماء الثقيل، احسب المقطع المستعرض المجهرى الفعلى للماء الثقيل $\sigma_a^{eff}(D_2O)$، وقارنه بالبيانات الواردة فى الجدول 2.9 .

الحل :

اليورانيوم متكون من النظيرين ^{235}U و ^{238}U، ومن معادلة التثرية يمكن حساب $N_{28}/N_{25}= 137$ لحالة تثرية $w/_0=0.715\%$، حسب ما تم عرضه فيما سبق وذلك باستخدام المعادلة 10.9. وبالتالى تحسب $\sigma_a(U)$ كالآتى:

1 –
$$\sigma_a(U) = \frac{N_{25}\sigma_a^{25} + N_{28}\sigma_a^{28}}{N_{25} + N_{28}} = \frac{\sigma_a^{25} + \frac{N_{28}}{N_{25}}\sigma_a^{28}}{1 + \frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

وبالتعويض بالقيم اللازمة الواردة فى الجدول 2.9:

$$\sigma_a(U) = \frac{683 + 137 * 2.71}{1 + 137} = 7.68\ b$$

2 – بالرغم من النسبة الصغيرة جدا من شائبة H_2O فى الماء الثقيل D_2O إلا أن علو قيمة المقطع المستعرض الامتصاصى للماء الخفيف تغير القيمة الفعلية للمقطع المستعرض للامتصاص بالنسبة للماء الثقيل. يمكن حساب المقطع المستعرض العينىMacroscopic cross section الفعلى للماء الثقيل حسب المعادلة التالية:

$$\Sigma_a^{eff}(D_2O) = m[N(D_2) * 2 * \sigma_a(D) + N(O) * \sigma_a(O)] + (1 - m)[N(H_2) * 2 * \sigma_a(H) + N(O) * \sigma_a(O)]$$

يمكن حساب عدد جزيئات H_2O حسب الآتى:

$$\#(H_2O) = \frac{\rho}{M(H_2O)} N_{AV} = \frac{1[\frac{g}{cm^3}]}{(2+16)[\frac{g}{mole}]} 0.602x10^{24}$$

$$= 0.0334x10^{24}[\frac{mole}{cm^3}]$$

هذا يعنى أن هناك $0.0334x10^{24}$ من H_2 و $0.0334x10^{24}$ من O. ومن ثم فإن هناك $2x0.0334x10^{24}=0.0668x10^{24}$ من H فقط.

وبالمثل فإن عدد ذرات الديوتيريوم D يمكن حسابه حسب التالى:

$$\#(D_2O) = \frac{\rho}{M(D_2O)} N_{AV} = \frac{1.1[\frac{g}{cm^3}]}{20[\frac{g}{mole}]} 0.602x10^{24} = 0.0331x10^{24}[\frac{mole}{cm^3}]$$

ومن ثم فإن عدد ذرات الديوتيريوم هو $0.0662x10^{24}$.

وباستخدام قيم نسب الوفرة للماء الثقيل m=0.9975 ، فى حين أن الشـــوائب تمثل 1-m=0.0025 ، مع التعويض فى المعادلة الأولى من هذا المثال فقـرة 2 بعد الرجوع إلى الجدول 2.9:

$$\Sigma_a^{eff}(D_2O) = 0.9975[0.0331 * 2 * 0.00046 + 0.0331 * 0]$$
$$+ 0.0025[0.0334 * 2 * 0.332 + 0.00334 * 0]$$
$$= 0.0000304 + 0.0000554 = 0.858x10^{-4}$$

يلاحظ من المعادلة السابقة أن تـــأثير المـــاء الخفيـف علـى قلـة وفرتـه كشائبة ($0.554x10^{-4}$) أكبر من تأثير الماء الثقيل ($0.304x10^{-4}$) . كما يلاحـظ أن تأثير امتصاص الأكسجين للنيوترون ضئيل جدا بحيث يمكن تجاهله وذلك لصغر المقطع المستعرض الامتصاصى لذلك العنصر.

والآن لحساب المقطع المستعرض المجهرى الفعلى للمـــاء الثقيـل نسـتخدم المعادلة التالية:

$$\sigma_a^{eff}(D_2O) = \frac{\Sigma_a^{eff}(D_2O)}{N(D_2O)} = \frac{0.858x10^{-4}}{0.0331x10^{24}} = .00259x10^{-24}\ cm^2 = .00259\ b$$

وهو فعليا المقطع المستعرض للديوتيريوم $\sigma_a^{eff}(D_2)$ بســبب ضآلـة تـأثير الأكسجين كما سبق ذكره. لذا يمكن حساب المقطع المستعرض الفعلى لـــذرة الديوتيريوم حسب التالي:

$$\sigma_a^{eff}(D) = \frac{\sigma_a^{eff}(D_2)}{2} = \frac{0.00259}{2} = 0.0013\ b$$

يلاحظ أن الرقم المتحصل عليه للمقطع المستعرض الامتصاصي لذرة الديوتيريوم 0.0013 b أكبر بالمقارنة بما ورد في الجدول 0.00046 b، أي بحوالي ثلاثة أضعاف.

والآن يمكن التعامل مع المعادلة (17.9) لحساب معامل الاستفادة الحرارى للمنظومات الثلاث السابق ذكرها ، مع أخذ الملاحظات التالية فى الحسبان :

1- تجاهل تأثير الأكسجين بسبب ضآلة مقطعه المستعرض للامتصاص سواءً فى تركيبته مع الوقود (UO_2)، أو فى المهدئين (H_2O, D_2O).
2- استخدام المقاطع المستعرضة المذكورة فى الجدول 2.9
3 - استخدام المقطع المستعرض الفعلى للديوتيريوم حسب ما تم حسابه فى المثال 2.9 بدل من المذكور فى الجدول 2.9 .

بالنسبة لمنظومة اليورانيوم-كربون ، فإن معامل الاستفادة الحرارى هو:

$$f = \frac{1}{1 + 0.00058\frac{N_1}{N_0}} \qquad (18.9)$$

وبالنسبة لمنظومة اليورانيوم-الماء الثقيل ، فإن معامل الاستفادة الحرارى هو:

$$f = \frac{1}{1 + 0.00169\frac{N_1}{N_0}} \qquad (19.9)$$

وبالنسبة لمنظومة اليورانيوم-الماء الخفيف ، فإن معامل الاستفادة الحرارى هو:

$$f = \frac{1}{1 + 0.0432\frac{N_1}{N_0}} \qquad (20.9)$$

إذا فإن المعادلات الثلاث السابقة يمكن كتابتها فى صورة موحدة بدلالة معامل التجانس $Z=N_f/N_u$ كالآتى:

$$f = \frac{1}{1+\gamma Z} \qquad (21.9)$$

وتعتمد قيمة γ على نوعية المهدىء حسب الجدول التالى:

الجدول 3.9 قيم γ لأنواع المهدئات

نوعية المهدىء	قيمة γ
كربون	0.00058
ماء ثقيل	0.00169
ماء خفيف	0.0432

والآن نستهدف حساب احتمالية الإفلات الرنينى p، حيث يعبر عن هذه الاحتمالية بالمعادلة التالية:

$$p = e^{-\frac{1}{\xi\sigma_{s1}}\frac{N_0}{N_1}\left(\int \sigma_a \frac{dE}{E}\right)_{eff}} \qquad (22.9)$$

حيث تمثل ξ متوسط لوغاريتم فقد الطاقة لكل اصطدام بالنسبة للمهدىء، كما ورد ذكره فى الفصل السابع، المعادلة (25.7).

$$\xi = \overline{\ln\frac{E_o}{E}} = \frac{\int_{\alpha E_o}^{E_o} \ln\frac{E_o}{E}\, p(E)\, dE}{\int_{\alpha E_o}^{E_o} p(E)\, dE} = \frac{\alpha \ln\alpha}{1-\alpha} + 1 \qquad (23.9)$$

و قيمة α تحسب كما يلي:

$$\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \qquad (24.9)$$

الجدول التالى يوضح قيم المقاطع المستعرضة المجهرية لكـــل ذرة أو لكـــل جزىء، وكذلك قيمة ξ لعدد من الذرات والجزيئات

الجدول 4.9 قيم σ_s و ξ لبعض العناصر والجزيئات

المادة	σ_s/atom أو σ_a/atom [b]	ξ
U	8.3	-
C	4.7	0.158
H	20.5	1.0
D	3.3	0.725
O	3.8	0.12
H_2O	44.8	0.926
D_2O	10.4	0.508

بالنظر للجدول سوف يتم استخدام قيم ξ المظللة بالنســـبة للثـــلاث مـــهدئات المستخدمة وهى الكربون و الماء الخفيف والماء الثقيل.

كما يمكن التعبير عن التكامل الرنينى الفعلـــى وهـــو مقيـــاس لامتصـــاص النيوترون الكلى فى منطقة الرنين بالمعادلة التالية:

$$(\int \sigma_a \frac{dE}{E})_{eff} = 3.9\left(\frac{\Sigma_s}{N_0}\right)^{0.415} \quad \text{barn} \qquad (25.9)$$

حيث تمثل Σ_s/N_0 المقطع المستعرض العينى لاستطارة النيوتـــرون بواســـطة مواد المفاعل بالنسبة لكثافة الوقود فىالخليط. وحيث إنه لا يمكن تجاهل تأثير الأكسجين فى حالة الاستطارة على نقيض تجاهلنا له فى حالة الامتصـــاص،

لذا وجب أخذه فى الحسبان. هذا وسوف يتم حساب Σ_s/N_0 للأنواع الثلاث من المهدئات على النحو التالي:

بالنسبة لخليط اليورانيوم–كربون، فإن:

$$\frac{\Sigma_s}{N_0} = \frac{N_1\sigma_s^C + N_0\sigma_s^U}{N_0} = \frac{N_1}{N_0}\sigma_s^C + \sigma_s^U \qquad (26.9)$$

وبالنسبة لخليط اليورانيوم– الماء الثقيل، فإن:

$$\frac{\Sigma_s}{N_0} = \frac{N^{D_2O}\sigma_s^{D_2O} + N^{UO_2}\sigma_s^{UO_2}}{N_0} = \frac{N_1\sigma_s^{D_2O} + N_0\sigma_s^{UO_2}}{N_0}$$

$$= \frac{N_1(\sigma_s^{D_2} + \sigma_s^O) + N_0(\sigma_s^U + \sigma_s^{O_2})}{N_0} = \frac{\frac{N_1}{2}(2\sigma_s^D + \sigma_s^O) + N_0(\sigma_s^U + 2\sigma_s^C}{N_0}$$

$$= \frac{N_1}{N_0}\sigma_s^D + \sigma_s^U + (\frac{1}{2}\frac{N_1}{N_0} + 2)\sigma_s^O$$

(27.9)

وحيث إن N_1 تمثل عدد الذرات المهدئة لكل cm^3، فقد تم تعويض تضاعف قيمة المقطع المستعرض للاستطارة للديوتيريوم ($\sigma_s^{D_2} = 2\sigma_s^D$) بتخفيض عدد ذرات المهدىء من N_1 إلى $\frac{N_1}{2}$. فى حين أنه على النقيض N_0 تمثل عدد ذرات الوقود لكل cm^3 ، كما أن المقطع المستعرض للاستطارة بالنسبة لليورانيوم فى المعادلة هو σ_s^U لذرة واحدة فقط، ومن ثم لم تتغير قيمة N_0 . وعلى نفس السياق يمكن استنتاج معادلة لحساب Σ_s/N_0 وبالنسبة لخليط اليورانيوم– الماء الخفيف، فإن:

$$\frac{\Sigma_s}{N_0} = \frac{N_1}{N_0}\sigma_s^H + \sigma_s^U + (\frac{1}{2}\frac{N_1}{N_0} + 2)\sigma_s^O \qquad (28.9)$$

وبدلالة معامل التصميم Z، فيمكننا التعبير عن احتمالية الإفلات من الرنين للحالات الثلاث من المهدئات (H_2O, D_2O, C) بما يلي:

$$p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^C Z}\left[Z\sigma_s^C+\sigma_s^U\right]^{0.415}}$$ (29.9) للكربون

$$p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^{D_2O} Z}\left[Z\sigma_s^D+\sigma_s^U+(\frac{1}{2}Z+2)\sigma_s^O\right]^{0.415}}$$ (30.9) للماء الثقيل

$$p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^{H_2O} Z}\left[Z\sigma_s^H+\sigma_s^U+(\frac{1}{2}Z+2)\sigma_s^O\right]^{0.415}}$$ (31.9) للماء الخفيف

وباستخدام القيم المُظللة بالجدول 4.9 يمكن الحصول على المعادلات التالية:

بالنسبة لمهدئ الكربون:

$$p = e^{-\frac{5.252}{Z}[4.7Z+8.3]^{0.415}}$$ (32.9)

بالنسبة للماء الثقيل:

$$p = e^{-\frac{0.738}{Z}[5.2Z+15.9]^{0.415}}$$ (33.9)

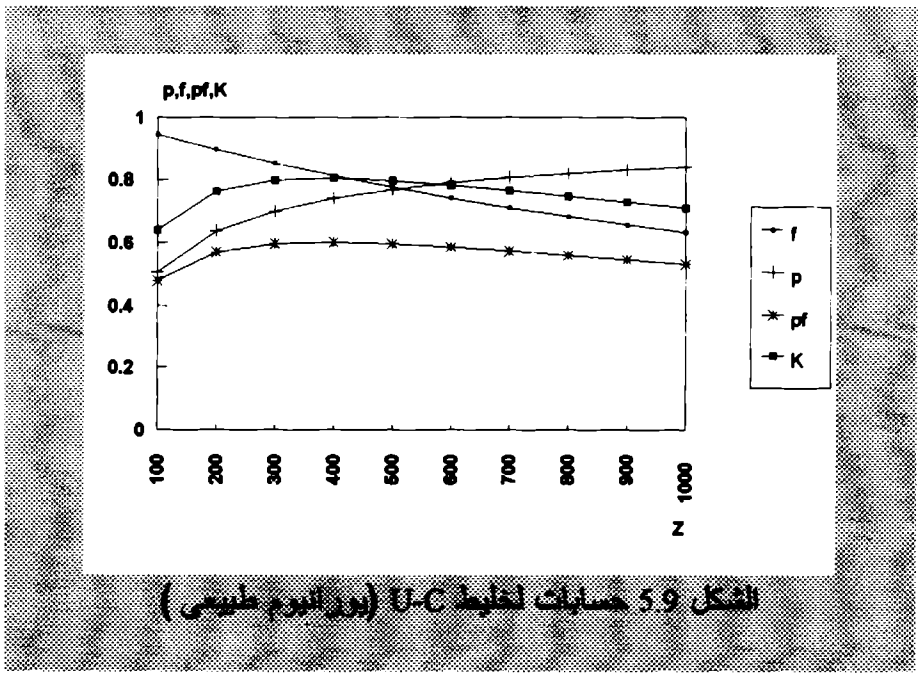
بالنسبة للماء الخفيف:

$$p = e^{-\frac{0.094}{Z}[22.4Z+15.9]^{0.415}}$$ (34.9)

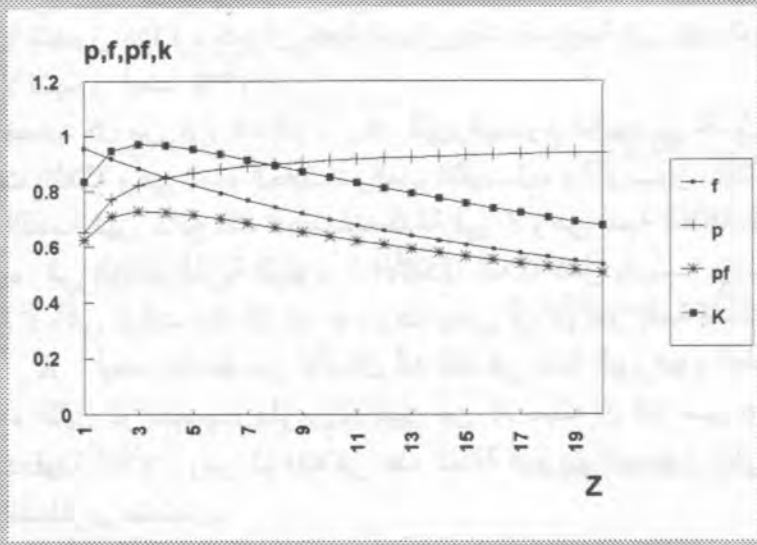
لضمان الحصول على تفاعل متسلسل، يجب أن يتحقق الشرط $pf > 1/\eta$، وفي حالة كون الوقود هو يورانيوم طبيعي ضمن خليط متجانس مع أحد المهدئات، فإن $pf > 0.75$، هذا يعني أن كل من p، f تكونان بقيمة حول

0.87 أو أكبر، والذى يعنى أن النيوترونات الممتصة من قبل رنين اليورانيوم يجب الا تتجاوز 13% ، كما أن كمية النيوترونات الممتصة فى غير الوقود يجب الا تتجاوز أيضا 13% .

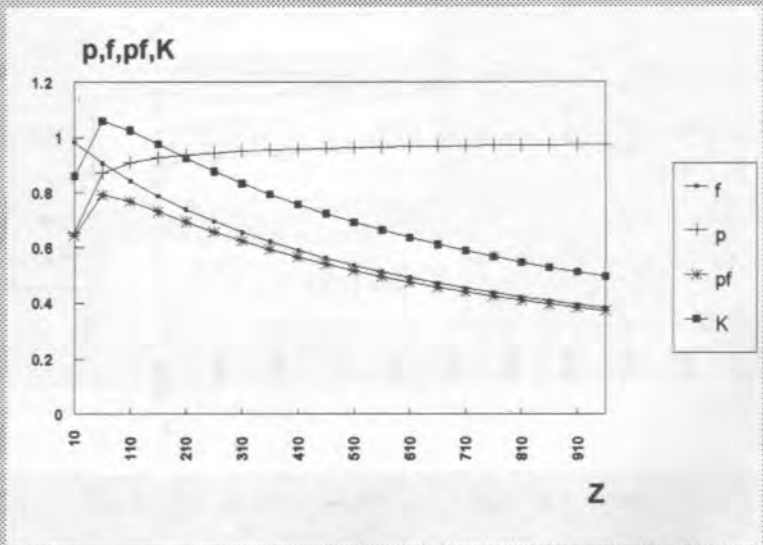
لقد تم حساب كل من p ، f ، pf ، K_∞ لليورانيوم الطبيعى لكل من المهدئات الثلاثة وهى الماء الخفيف، والماء الثقيل، والكربون. الأشكال الثلاثة القادمة تبين نتائج تلك الحسابات كدالة فى Z وهى نسبة الكثافة الذرية للمهدىء إلى الكثافة الذرية للوقود . الأشكال الثلاثة تتفق بأنه بزيادة Z تتناقص f ، فى الوقت ذاته تتزايد p ، وهذا يعنى أن pf تمر بقمة قصوى، وكذلك K_∞ . أيضا يلاحظ من الأشكال أنه فقط فى حالة اليورانيوم الطبيعى مع الماء الثقيل تم الحصول على K_∞ أكبر من 1، حيث إن كلا من p ، f تجاوزت قيمة 87% ، ومن ثم فإنه فى هذه الحالة فقط يتم الحصول على تفاعل انشطارى متسلسل.



الشكل 5.9 حسابات لخليط U-C (يورانيوم طبيعى)



الشكل 6.9 حسابات لخليط H_2O-UO_2(يورانيوم طبيعي)



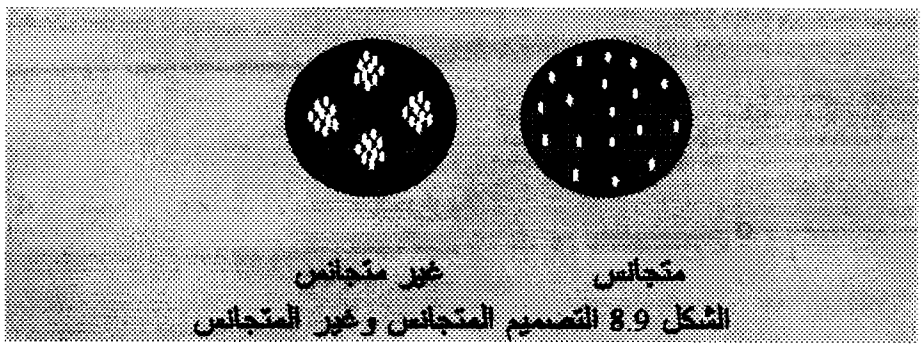
الشكل 7.9 حسابات لخليط D_2O-UO_2(يورانيوم طبيعي)

الجدول التالى يبين مدى قيم Z التى يتم الحصول فيها على القيمة القصـــوى لـــ K_∞ وكذلك عما إذا كانت K_∞ أكبر أوأصغر من 1.

الجدول 5.9 نوعية المفاعلات ومدى ملاءمتها للحفاظ على تفاعل متسلسل مع اليورانيوم الطبيعى

خليط المفاعل	مدى قيم Z	K_∞
U-C	300-500	أصغر من 1
H_2O-UO_2	2-5	أصغر من 1
D_2O-UO_2	50-150	أكبر من 1

لقد أوضحنا فى السابق أن تصميم الخليط المتجانس Homogeneous يجعـــل $\varepsilon=1$ ، ومن ثم يتم تحييد الانشطارات بسبب النيوترونات السريعة، لذا كـــان التفكير فى التصميم غير المتجانس Hetrogeneous ، وذلك بتكـويم Lumping الوقود فى تجمعات محاطة بالمهدىء، وخصوصـــا فـــى حالـــة الكربـــون كمهدىء. أيضا ، بهذا التصميم تزداد احتمالية الإفلات من رنين اليورانيـــوم، وذلك بسبب وجود النيوترونات فى محيط واسع من المهدىء الذى يمكنها مـن فقد طاقاتها بدرجات كبيرة تمكنها من تجاوز الطاقات اللازمـــة للامتصـــاص الرنينى، ومن ثم تفلت هذه النيوترونات من الرنين. وبذلك يمكـــن الحصـــول على K_∞ أكبر من 1 . الشكل التالى يوضح الفارق بين التصميم المتجـــانس وغيرالمتجانس.



الشكل 8.9 التصميم المتجانس وغير المتجانس

إذا، علمنا أن اليورانيوم الطبيعي وحده لا يمكن أن يحافظ على تفاعل انشطاري متسلسل، لذا تم إضافة مهدىء لحل هذه المشكلة، ولكن حتى هذا الحل لم يفلح الا مع الماء الثقيل حيث تم الحصول على قيمة لـ K_∞ أكبر من 1، ومن ثم كان هناك حل هندسي آخر متمثلا في تثرية اليورانيوم بالنظير يورانيوم-235.

مثال 3.9

اكتب برنامج حاسوبي لحساب K_∞ لخليط متجانس من اليورانيوم والكربون، لعدد من درجات تثرية تساوى 1%، 3%، 5%.

الحل:

يمثل هذا المثال تصميم مفاعل بأسلوب مبسط ، ومؤكدا على أن استخدام الحاسوب يعد شيئـًا أساسيًا لتصميم المفاعلات النووية، وما هذا المثال إلا تاكيد لهذا المفهوم.

لكتابة البرنامج نحتاج إلى المعادلات الأساسية اللازمة لحساب المتغيرات. هذه المعادلات بعد شئ من التحوير للمعادلات ذات العلاقة الواردة في هذا الفصل يعبر عنها كما يلي:

1- استخدام معادلة التثرية: $$\frac{N^{28}}{N^{25}} = 0.9874\left(\frac{1}{w} - 1\right)$$

2- استخدام معادلة η : $$\eta = \frac{2.44}{1.18 + 0.0047\frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

3 - استخدام معادلة المقطع المستعرض الامتصاصي للوقود :

$$\sigma_a^U = \frac{\sigma_a^{25} + \frac{N_{28}}{N_{25}}\sigma_a^{28}}{1 + \frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

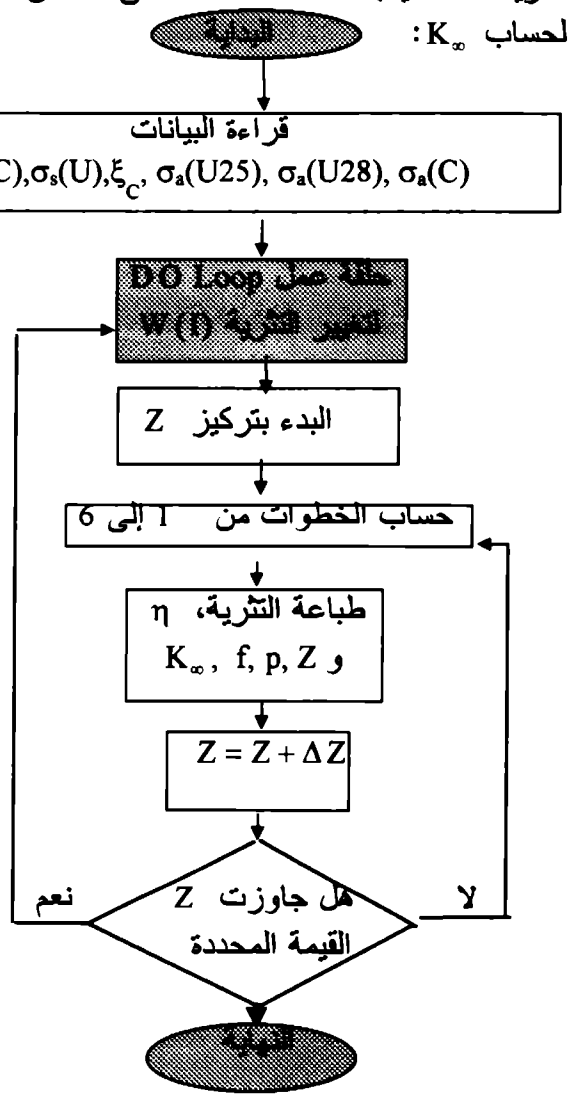
4 - معادلة معامل الاستفادة الحرارية : $$f = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_a^C}{\sigma_a^U}Z}$$

$$p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^C Z}\left[Z\sigma_s^C+\sigma_s^U\right]^{0.415}}$$

5 – معادلة احتمالية الإفلات من الرنين :

6 – معادلة معامل التضاعف للوسط اللانهائى : $K_\infty = \eta f p$

والآن يمكن كتابة خريطة الانسياب Folw Chart التى تمكن من كتابة البرنامج التنفيذى لحساب K_∞ :

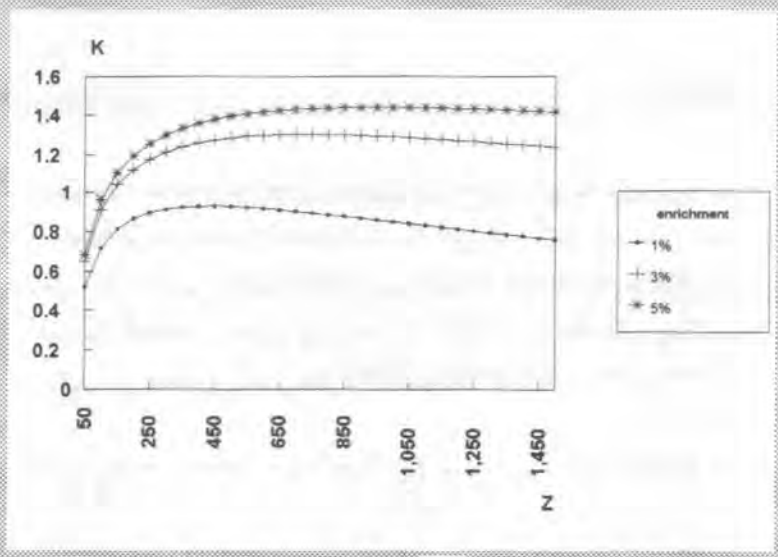


البرنامج الحاسوبى باستخدام لغة الفورتران يبدو كما يلي:

```
DIMENSION W(3)
DATA SC,SU,XC,SA5,SA8,SAC/4.7,8.3,0.158,683,2.71,0.0045/
DATA W(1),W(2),W(3)/0.01,0.03,0.05/
 DO 80 I=1,3
     Z=10
     RN8O5=0.9874*(1./W(I)-1.)
     ETA=2.44/(1.18+0.0047*RN8O5)
     SAU=(SA5+RN8O5*SA8)/(1.+RN8O5)
1    F=1./(1.+Z*SAC/SAU)
     P=EXP((-3.9*(Z*SC+SU)**0.415/(XC*SC*Z))
     CK=P*F*ETA
     WRITE(10,*)W(I),ETA
     WRITE(20,*)Z,F,P,CK
     Z=Z+10
     IF(Z.LE.700) GO TO 1
80   CONTINUE
     STOP
     END
```

فى المثال السابق تمت كتابة برنامج حاسوبى لحساب قيمة K_∞ كدالة فى Z الممثلة لنسبة تخفيف تركيز الوقود بالمهدىء وذلك لعدد من درجات التثرية باليورانيوم -235. الشكل التالى يوضح نتائج الحسابات لدرجات تثرية هى: 1%، و 3%, و 5%. حيث نرى أنه فى حالة تثرية 1% لاتزال قيمة K_∞ أقل من 1 وبالتالى لا يمكن الحفاظ على تفاعل متسلسل . أما فى الحالتين الأخريين فالقيمة تجاوزت 1، وبالتأكيد، كما هو واضح بالشكل، أنه فى ظل زيادة التثرية تقل قيمة Z (تقليل نسبة المهدىء للوقود) اللازمة للحصول على

نفس قيمة معامل التضاعف K_∞ المناظرة للتثرية الأقل. وهذا أيضا يوضحانه الجدولان اللاحقان:



الشكل 9.9 تغير K_∞ قيمة بسبب تنوع التثرية

الجدول 6.9 القيمة القصوى لـ K_∞ و Z المناظرة لتثرية متنوعة

K_∞	التثرية	التركيز Z
0.928751	1%	430
1.302256	3%	730
1.4398822	5%	970

الجدول 7.9 قيم Z المناظرة لـقيم K_∞ القصوى لتثريات مختلفة

تثرية 1%	3%	5%	
450 (K_∞ = 0.928751)	100-110	80-90	$Z \rightarrow K_\infty^{MAX(1\%)}$
-	750 (K_∞ = 1.302256)	300-310	$Z \rightarrow K_\infty^{MAX(3\%)}$
-	-	950 (K_∞ = 1.4398822)	$Z \rightarrow K_\infty^{MAX(5\%)}$

لقد تمت ملاحظة حسب العرض السابق أن عملية التهدئة للنيوترونات مع التثرية المناسبة تزيد معامل التضاعف K_∞ إلى قيم أعلى من 1 . يوجد هناك معامل آخر يسمى طول التباطؤ Slowing down length L مهم لحساب الإبعاد المناسبة للمفاعل. حيث يعرف L^2 بأنها المساحة التى ينتشر فيها النيوترون قبل أن يمتص وهى معرفة بالمعادلة التالية :

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \qquad (35.9)$$

حيث إن D تمثل معامل الانتشار Diffusion coefficientt ، و $\frac{1}{\Sigma_a}$ متوسط المسار الحر قبل امتصاص النيوترون.

الجدول التالى يوضح القيم المختلفة لـ L^2 لعدد من المهدئات:

الجدول 8.9 L^2 لعدد من المهدئات

نوع المهدىء	الكثافة $[g/cm^3]$	L^2 $[cm^2]$
الماء الخفيف	1	28
الماء الثقيل	1.1	125
البيريليوم	1.85	96
الكربون	1.6	364
اليورانيوم	-	18

مثال 4.9

أ- صمم مفاعل كروى من خليط متجانس من اليورانيوم المُثـــــرَى بنسـبة 1.334% مع مهدىء كربون، وذلك بحساب نصف القطـــر للكـرة الحرجـة K=1،

إذا علمت أن :

1 - p= 0.7404 ، و f=0.86924 (أنظر المسألة 11.9 من هذا الفصل)

2 - انبعاج الفيض النيوترونى للكرة Flux Buckling B^2 يعـبر عنـه بالمعادلة التالية: $B^2 = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2 = \frac{\frac{K_\infty}{K} - 1}{L^2}$.

ب- أعد التصميم لتثرية 5% وعند Z=400.

ج - صمم المفاعل الكروى لخليط من اليورانيوم الطبيعى والماء الثقيل.

د - صمم الكرة مكونة من يورانيوم-235، بحيث تكون حرجة

الحل :

أ-

$$\eta = \frac{2.44}{1.18 + 0.00464078(\frac{1}{w} - 1)} = \frac{2.44}{1.18+.00464078(\frac{1}{.01334} - 1)} = 1.602$$

$$K_\infty = \eta f p = 1.602 x 0.86924 x 0.7404 = 1.031$$

يمكن حساب قيمة L^2 للخليط من خلال المعادلة التالية:

$$L^2 = \frac{N_1 L_1^2 + N_0 L_0^2}{N_1 + N_0} = \frac{Z L_1^2 + L_0^2}{Z + 1}$$

وحيث إن Z تعد كبيرة نسبيا أى أكبر بكثير من 1، لـــذا يمكـــن اعتبـــارأن $L^2 = L_1^2$ هى للمهدىء.

وباستخدام الجدول 8.9 لقيمة L^2 لعنصر الكربون، نجد أن:

$$R = \sqrt{\frac{\pi^2 L^2}{\frac{K_\infty}{K} - 1}} = \sqrt{\frac{\pi^2 (364)^2}{1.031 - 1}} = 65m$$

ب – وفى حالة تثرية 5% لنفس قيمة Z=400،(مع الرجوع إلـــى المســـألة 9.9) فإن:

$$K_\infty = \eta fp = 1.924025x0.95377x0.7404 = 1.3587$$

$$R = \sqrt{\frac{\pi^2 L^2}{\frac{K_\infty}{K} - 1}} = \sqrt{\frac{\pi^2 (364)^2}{1.3587 - 1}} = 19m$$

يلاحظ من هذه الحسابات البسيطة أن المفاعلات المهدئة بالكربون تعد كبـــيرة الحجم نسبيا وهذا ما تعكسه القيمة الكبيرة نسبيا لـــطول التباطؤ فى الكربـــون L حسب ما يوضحه الجدول 8.9.

ج – وبالمقارنة ففى خليط من اليورانيوم الطبيعى والماء الثقيل عند قيمة Z= 60 ، التى تناظر القيمة القصوى لـــ K_∞=1.05942 فإن نصف قطر الكـــــرة هو:

$$R = \sqrt{\frac{\pi^2 L^2}{\frac{K_\infty}{K} - 1}} = \sqrt{\frac{\pi^2 (125)^2}{1.05942 - 1}} = 16m$$

د – بالنسبة للوقود الصافى من اليورانيوم-235 فإن $K_\infty = \eta = 2.07$ ، كمـــا أن L^2=18 cm^2 ، وعليه فإن:

$$R = \sqrt{\frac{\pi^2 L^2}{\frac{K_\infty}{K} - 1}} = \sqrt{\frac{\pi^2 (18)^2}{2.07 - 1}} = 55cm$$

4-9 الأنواع الأساسية للمفاعلات :

بناءً على ما ورد فى السابق، فإنه يمكن تصميم مفاعلات انشطارية باستخدام عدد من المهدئات، ويمكن للوقود أن يكون يورانيوم طبيعيًا مع مهدىء الماء الثقيل، أو أن يستخدم مهدىء الماء الخفيف أو مهدىء الكربون ولكن مع ضرورة تثرية اليورانيوم. من هذا المنطلق ظهرت ثلاثة أنواع من المفاعلات كل منها تتبنى أحد المهدئات، وقد تبنت ثلاث دول رئيسة هذه التقنيات فتبنت بريطانيا تقنية اليورانيوم المثرى مع الكربون بتصميم المفاعلات المبردة بالغاز Gas Cooled Reactors (GCR)، وتبنت كندا تقنية اليورانيوم الطبيعى مع الماء الثقيل بتصميم مفاعلات الكاندو (CANDU)، فى حين تبنت الولايات المتحدة الأمريكية تقنية اليورانيوم المثرى مع الماء الخفيف بتصميم نوعين من المفاعلات وهما مفاعلات الماء المغلى Boiling Water Reactor (BWR) ومفاعلات الماء المضغوط Pressurized Water Reactor (PWR) . الجدول التالى يلخص ذلك.

الجدول 9.9 الأنواع الأساسية للمفاعلات

	K_∞			
المهدىء	لوقود U طبيعى	لوقود U مثرى	نوع المفاعل	البلد
الماء الثقيل	>1	-	CANDU	كندا
الكربون	<1	>1	GCR	بريطانيا
الماء الخفيف	<1	>1	BWR,PWR	أمريكا

ومع مهدىء الكربون يمكن استخدام تصميم غير متجانس لتحقيق شرط استمرارية الانشطار، بحيث يوزع اليورانيوم فى تكويمات محاطة بالكربون. أما فى حالة استخدام الماء الثقيل، فإن الوقود يكون فى صورة كبريتات اليورانيوم أو فى شكل حبيبات دقيقة من ثانى أكسيد اليورانيوم متوزعة بانتظام فى الماء الثقيل فى صورة خليط متجانس. أما فى حالة الماء الخفيف، فإن الوقود يكون فى صورة ثانى أكسيد اليورانيوم وفى العادة بتصميم غير متجانس.

بسبب الانشطار تنتج نيوترونات وكذلك طاقة، ومن ثم فإن المفاعلات تعد مصدرًا أساسيًا لإنتاج النيوترونات، وكذلك لإنتاج الطاقة. وحتى يشتغل المفاعل على قُدرة ثابتة، لذا وجب التخلص من الطاقة الناتجة من الانشطار.
الحرارة يتخلص منها من خلال تدوير مبرد فى المفاعل .
يتم اختيار المبرد بناءً على :

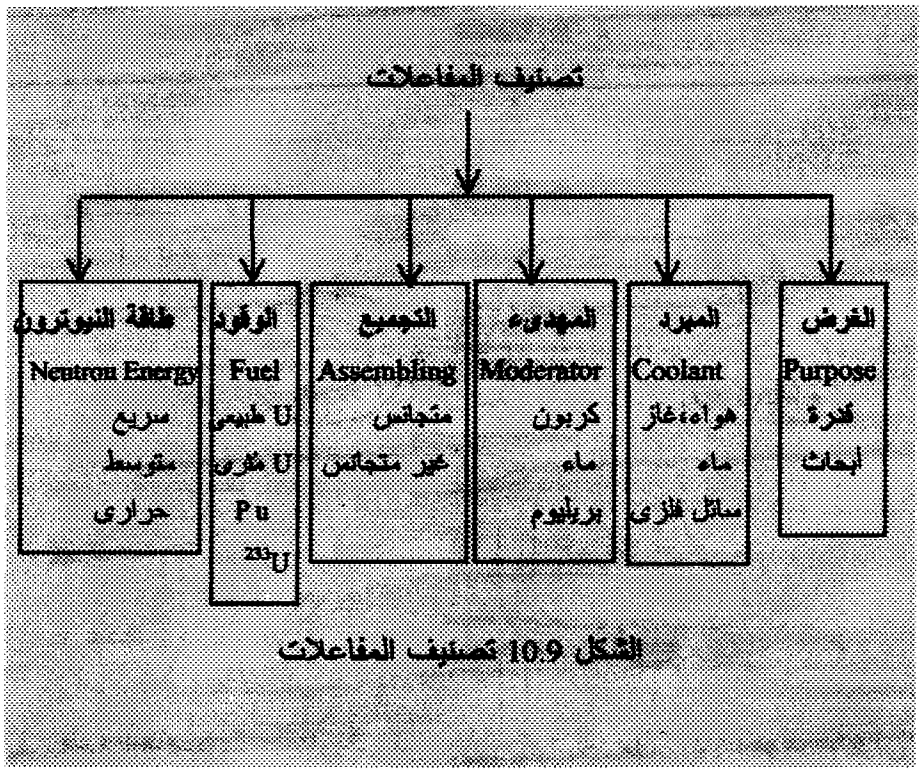
1 – غرض المفاعل
2 – حدود الاعتبارات الهندسية والنووية

المبرد فى ذاته يعتبر شائبة لأنه يُساهم فى امتصاص النيوترونات دون الانشطار. وعليه، هناك توازن بين كفاءة التخلص من الحرارة و الاقتصاد النيوترونى. نعنى بهذا التوازن الآتي:

1 – يمكن الاستغناء عن كفاءة التحويل الحرارى من أجل اقتصاد جيد للنيوترونات (قدرة صغيرة P=10MW مقابل فيض نيوترونى عالٍ $(\phi=10^{17}\ cm^{-2}.sec^{-1})$ وهو ما نتج عنه مفاعلات الأبحاث Research Reactors، حيث الاهتمام هنا فىالحصول على فيض عالٍ دون الحاجة إلى قدرة ، وبالتالى، فاستخدام مبرد ذى كفاءة تحويل حرارى ضعيفة مثل الهواء يؤدى الغرض.

2 – يمكن الاستغناء عن اقتصاد نيوترونى من أجل كفاءة عالية للتحويل الحرارى (فيض نيوترونى أقل $\phi=10^{13}\ cm^{-2}.sec^{-1}$ مقابل قدرة جيدة P=1000MW). وهو ما نتج عنه مفاعلات القدرة Power Reactors . وفى هذه الحالة يُستخدم مبرد ذو كفاءة نقل حرارى عالية حتى ولو كان ماصًا جيدًا للنيوترونات مثل الماء أو مبرد السائل الفلزى Liquid metal .

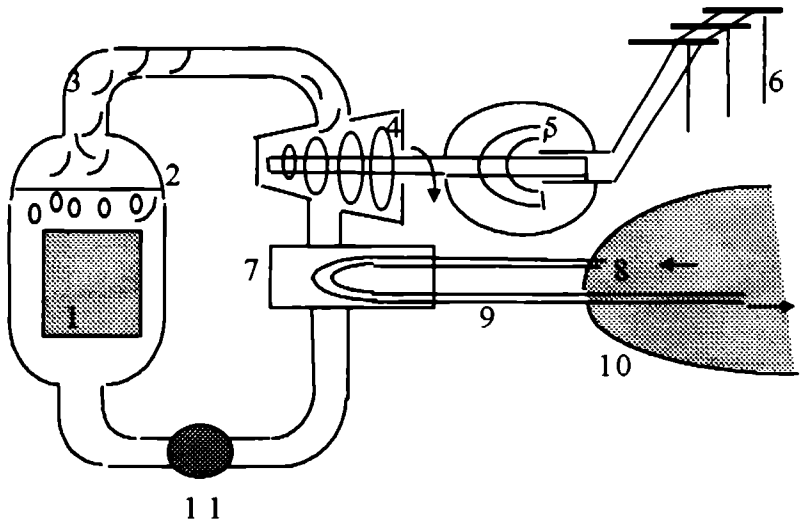
يمكن تصنيف المفاعلات حسب التصنيفات الواردة فى الشكل التالي:



الشكل 10.9 تصنيف المفاعلات

إن التكامل فى التصميم لتحويل الطاقة الحرارية المولدة داخل قلب المفاعل إلى طاقة كهربائية يتطلب تصميم محطة كاملة لذلك الغرض. لعل أشهر المحطات هى محطات مفاعلات الماء المغلى، ومحطات مفاعلات الماء المضغوط. الشكل التالي يوضح التصميم العام لمفاعل الماء المغلى BWR. حيث يتم تولد الطاقة فى قلب المفاعل والتى تسخن الماء فى الحاوية حتى يغلى ثم يمر البخار على التربين ليحرك بدوره الريش الداخلية مسببًا حركة الذراع الذى بدوره يلف داخل المولد الكهربى فى وجود مغناطيس ليولد تيارًا كهربيا يسرى فى خطوط الكهرباء. طبعا، خارج التربين يمر البخار فى المكثف الذى يسيله بسبب التبادل الحرارى مع الماء البارد القادم من البحيرة.

يعاد البخار المكثف كسائل عبر المضخة إلى الحاوية لتتم الدورة من جديـــد، وهى ماتسمى فى مفهوم الديناميكا الحرارية بدورة رانكين Rankin Cycle.

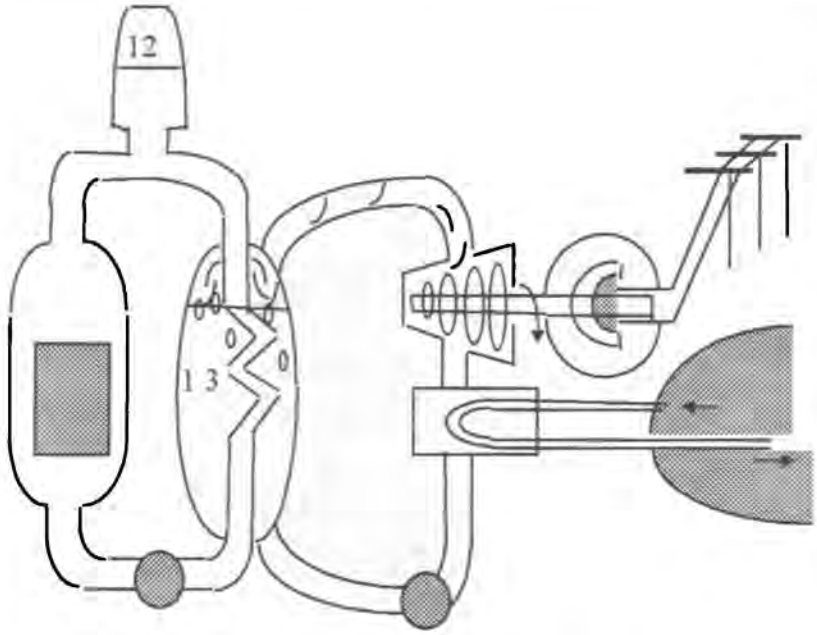


1- قلب المفاعل 2- الحاوية 3 -بخار 4 - التربين 5 -المولد الكهربى
6 -أعمدة الكهرباء 7 -المكثف 8 - أنبوب الأخذ 9 - أنبوب التفريغ
10- بحيرة 11 - مضخة

الشكل 11.9 محطة مفاعل الماء المغلى

فيما يلي يوضح الشكل (12.9) تصميماً آخر للمحطات النووية والمتمثل فـــى محطة مفاعل الماء المضغوط Pressurized Water Reactor Power Plant PWR . يتميز هذا التصميم بفصل الحلقة الأولية Primary Circuitعن الحلقـة الثانوية Secondary Circuit، وذلك لحماية أكثر وذلك بحصر الإشعاعات فـى الحلقة الأولية الخاصة بقلب المفاعل. و لنقل الحرارة وجـــب ربـط الحلقـة

الثانية بالأولى عن طريق مولد البخار Steam Generator. هـذا وتستخدم الضاغطة لتعديل ضغط الحلقة الأولى 15 Pa (باسكال) والذى فى العادة يساوى ضعف ضغط الحلقة الثانية 7 Pa (1000 psi).

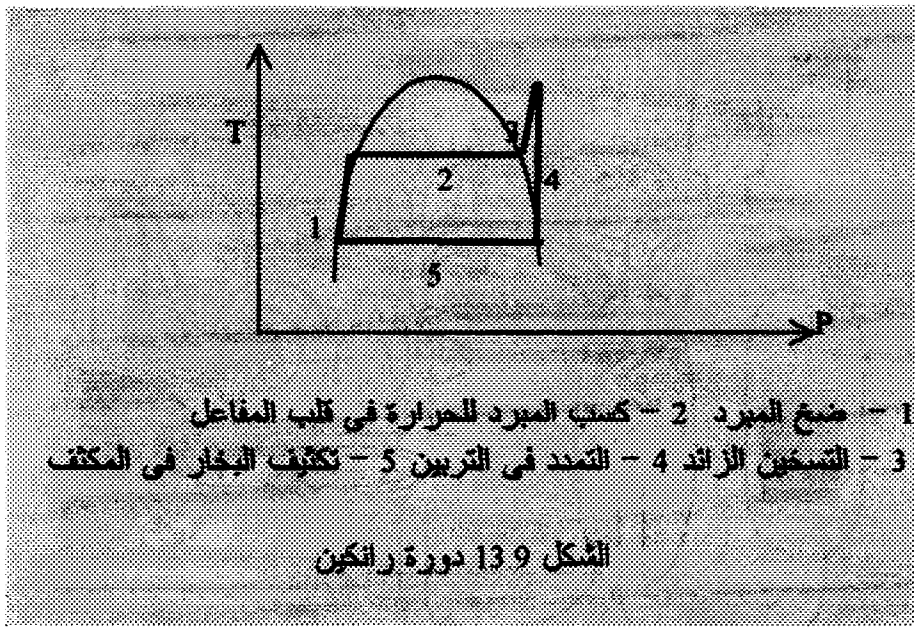


1 – إلى 11 – مثل ما ورد فى الشكل السابق
12 – الضاغطة 13 – مولد البخار

الشكل 12.9 محطة مفاعل الماء المضغوط

يُعبَّرُ عن دورة رانكين بشكل يبين العلاقة بين درجة الحرارة T و الإنثروبى S لضغوط التشغيل P. الشكل التالى يوضح تلك العلاقة. حيث يبين الشكل أنه عند المنطقة 1 يتم ضخ المبرد إلى الحاوية من ضغط المكثف إلى

ضغط الحاوية، ثم فى قلب المفاعل تتم إضافة الحرارة الناتجة عن الانشطار، وذلك عند نفس ضغط الحاوية (المنطقة 2)، ثم قد يتم زيادة التسخين للبخار لتجفيفه عند المنطقة 3 ، ومن بعد يتم التمدد للبخار فى التربين عند النقطة 4 ، وأخيرًا يتم التكثيف بواسطة المكثف عند ضغط أقل (المنطقة 5).



1 – ضخ المبرد 2 – كسب المبرد للحرارة فى قلب المفاعل
3 – التسخين الزائد 4 – التمدد فى التربين 5 – تكثيف البخار فى المكثف

الشكل 9 13 دورة رانكين

9-5 فيزياء المفاعلات : استاتيكا وديناميكا المفاعلات :

لقد أوردنا فى السابق أن المفاعلات بنوعيها البحثى والقدروى Power and Research بهما فيض نيوترونى وكذلك يولدان قدرة بمقادير متفاوتة. إنه بتصميم المفاعلات بخليط متجانس من الوقود والمهدىء، يمكن تشكيل ذلك فى عدة صور من مكعب إلى كروى إلى إسطوانى، وبالتالى يعد من الضرورى معرفة كيفية توزع النيوترونات فى هذه الأشكال المختلفة وهذا ما يعنى به موضوع إستاتيكا المفاعلات. كما أنه بتصميم المفاعلات علينا معرفة ما مقدار القدرة المولدة، مع كيفية رفع هذه القدرة وخفضها أى معرفة كيفية تشغيل المفاعل، وهذا ما يهتم به موضوع ديناميكا المفاعلات.

سوف نتطرق بإيجاز لهذين الموضوعين، حيث أن المعالجة التفصيلية لـــهما خارج نطاق هذا الكتاب.

إن وصف النيوترونات من خلال عمل توازن عليها، وذلك بحســـاب معـــدل التغير R على أنه يساوى الفارق بين معدل الإنتاج P ومعدل الفقد L، وذلـــك حسب المعادلة التالية:

$$R = P - L \qquad (36.9)$$

فإذا تم الوصف استاتيكيا، فإن معدل التغـــير R يســـاوى صفـــراً . وتكـــون المعادلة البسيطة التى تصف انتشار النيوترونات ذات الطاقة الموحدة كدالـــة فى الموقع فقط $\phi(r)$ هى:

$$\nabla^2\phi + B^2\phi = 0 \qquad (37.9)$$

وهى ما تسمى فى العادة بمعادلة المفـــاعل Reactor Equation، حيـــث B^2 المسماة بانبعاج الفيض Flux Buckling تمثل المعـــاملات النوويـــة للـــوسط Nuclear Parameters ، حسب المعادلة التالية:

$$B^2 = \frac{\nu\Sigma_f - \Sigma_a}{D} = \frac{\frac{K_\infty}{K} - 1}{L^2} \qquad (38.9)$$

أما ∇^2 تمثل التفاضل الثانى للفيض بالنسبة للموقـــع وتنطـــق "لابلاســـيان" Laplacian و لها علاقة بالشكل الهندسى للوسط Geometry. وهـــى مُعرّفـــة لبعض الأشكال الهندسية البسيطة كما هو مذكور فى الجدول التالي:

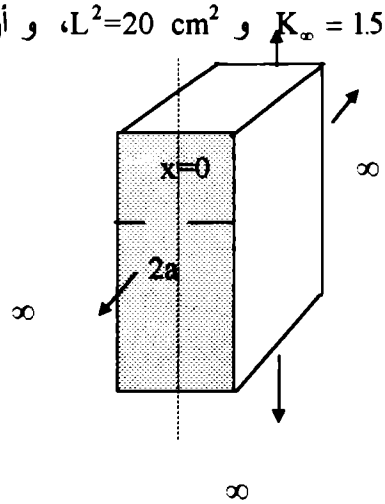
الجدول 10.9 ∇^2 لأشكال بسيطة متنوعة

الشكل	∇^2
مكعب	$\frac{d^2}{dx^2}+\frac{d^2}{dy^2}+\frac{d^2}{dz^2}$
كرة	$\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}r^2\frac{d}{dr}$
أسطوانة	$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}r\frac{d}{dr}+\frac{d}{dz}$

ومن ثم فإن المعادلات هى من الرتبة الثانية وتحتاج لحلها شرطين حديين، فى العادة هما التماثل فى المركز والذى يعنى أن التفاضل الأول للفيض بالنسبة للمتغير المستقل تساوى صفرًا، والآخر يؤكد أن الفيض عند الطرف الخارجى للمفاعل يساوى صفرًا.

مثال 5.9

اوجد شكل الفيض النيوترونى فى مفاعل على شكل شريحة لا نهائية فى اتجاه z ولا نهائية فى اتجاه y وبعرض 2a فى اتجاه x . علما بأن الخواص النووية لوسط الشريحة هو $K_\infty = 1.5$ و $L^2=20\ cm^2$، و أن المفاعل حالته حرجة.



الحل :

نستخدم المعادلتين الرئيستين التاليتين:

$$\nabla^2\phi + B^2\phi = 0 \quad ،$$

$$B^2 = \frac{\nu\Sigma_f - \Sigma_a}{D} = \frac{K_\infty - 1}{L^2} = 0.025$$

وحيث إن الشريحة لانهائية فى الاتجاهين z، y فعليه تكون المعادلة التفاضلية هى:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + .025\phi = 0$$

مع الشرطين الحديين : $\left.\frac{d\phi}{dx}\right|_{x=0} = 0, \quad \phi(x)|_{x=a} = 0$

والتى لها حل:

$$\phi(x) = A\cos\sqrt{.025}x + B\sin\sqrt{.025x}$$

وبتطبيق الشرط الحدى الخاص بالتفاضل يؤدى إلى أن B=0 ، ويكون الفيض:

$$\phi(x) = A\cos\sqrt{.025}x$$

فى حين أن الشرط الحدى الأول، يمكننا من ايجاد قيمة سمك الشريحة ، وذلك حسب المعادلة التالية :

$$A\cos\sqrt{.025}a = 0$$

والتى تفيد أن : $\sqrt{.025}a = \frac{n\pi}{2}$ لقيم n=1,3,5,.. ومن ثم فإن a للفيض الأساسى Fundemental عندما تكون n=1 هى: $a = \frac{\pi}{2\sqrt{.025}} = 9.93cm$

هذا وتحسب قيمة A من القدرة لكل سم2 من الشريحة P حسب المعادلة التالية:

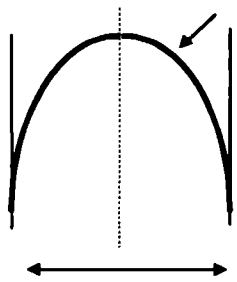
$$P = c\int \Sigma_f \phi(x)dx = c\Sigma_f A\int_{-a}^{a}\cos\sqrt{.025}xdx = 2\frac{c\Sigma_f A}{\sqrt{.025}}\sin\sqrt{.025}a$$

$$A = \frac{\sqrt{.025}P}{2ac\Sigma_f \sin\sqrt{.025}}$$

حيث إن c تمثل الطاقة الناتجة لكل انشطار وتعطى بالقيمة التالية:

$c=3.2x10^{-11}$ Joule/fission . وفيما يلي شكل الفيض داخل الشريحة:

$$\phi(x) = A\cos\sqrt{.025}x$$



19.86 cm

أما فى حالة ديناميكا المفاعلات فإن عامل الزمن يبقى فى الصورة، والمعادلات النهائية التى تحكم ديناميكية المفاعل تعطى بالمعادلة التالية فى حالة الأخذ فى الحسبان مجموعة واحدة من النيوترونات المتأخرة . هذه المعادلة تسمى معادلة حركية مفاعل النقطة Point Reactor Kinetics Equation :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda}P + \lambda C \qquad (39.9)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda}P - \lambda C \qquad (40.9)$$

حيث P تمثل قدرة المفاعل، و C تمثل تركيز أمهات النيوترونات المتأخرة، β تمثل جزء النيوترونات المتأخرة ، و λ تمثل ثابت الانحلال لأمهات النيوترونات ، و ρ تمثل المفاعلية والتى قد تتغير بسبب سحب أو إدخال أعمدة التحكم فى المفاعل، أما Λ فهى تمثل زمن توليد النيوترونات.

المعادلتان 39.9 و 40.9 تمثلان معادلتين ذات رتبة أولى ومن ثم يمكن تحويلهما إلى معادلة تفاضلية واحدة ذات رتبة ثانية، والتى تصاحبها معادلة مُميزَة characteristic equation ، والتى فى العادة تسمى معادلة ساعة المفاعلية Inhour Equation، والتى تُعرَف بالمعادلة التالية:

$$\rho = \Lambda\omega + \frac{\beta\omega}{\omega + \lambda} \qquad (41.9)$$

والتى يمكن إعادة كتابتها على الصورة التالية:

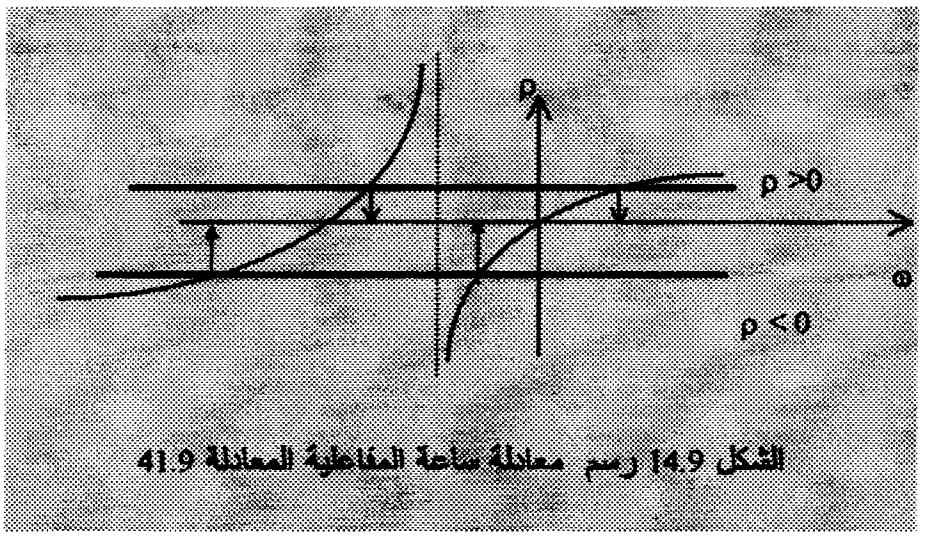
$$f(\omega) = \Lambda\omega^2 + (\Lambda\lambda + \beta - \rho)\omega - \rho\lambda = 0 \qquad (42.9)$$

بحيث جذور هذه المعادلة تتناسب مع الثوابت الزمنية لتصـــــرف المنظومـــة حسب المعادلة التالية:

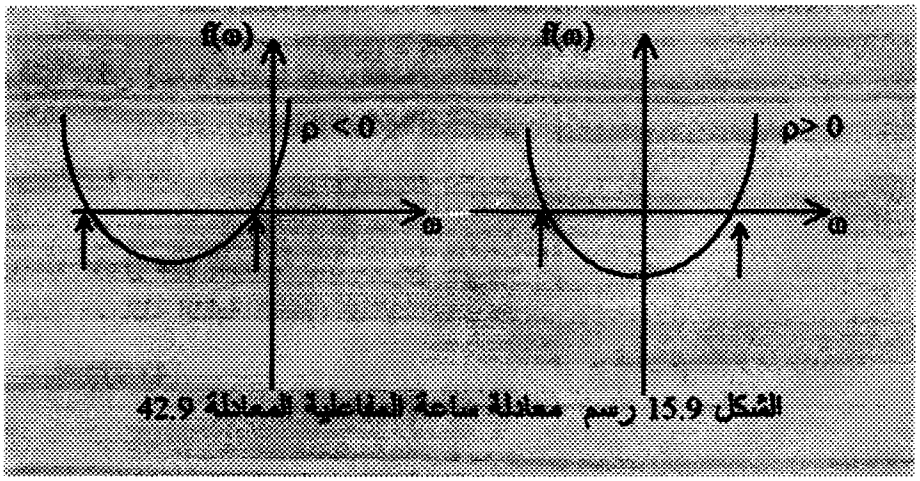
$$P = \sum_{j=1}^{2} A_j e^{\omega_j t} \qquad (43.9)$$

يمكن تعميم المعادلة 42.9 لعـــدد ســـت مجموعـــات فـــى شـــكل مضمـــوم Compact form، ممثلا لشكل جديد لمعادلة ساعة المفاعلية .

الشكلان التاليان يوضحان بالرسم تصرف كل من المعادلتين 41.9 و 42.9:

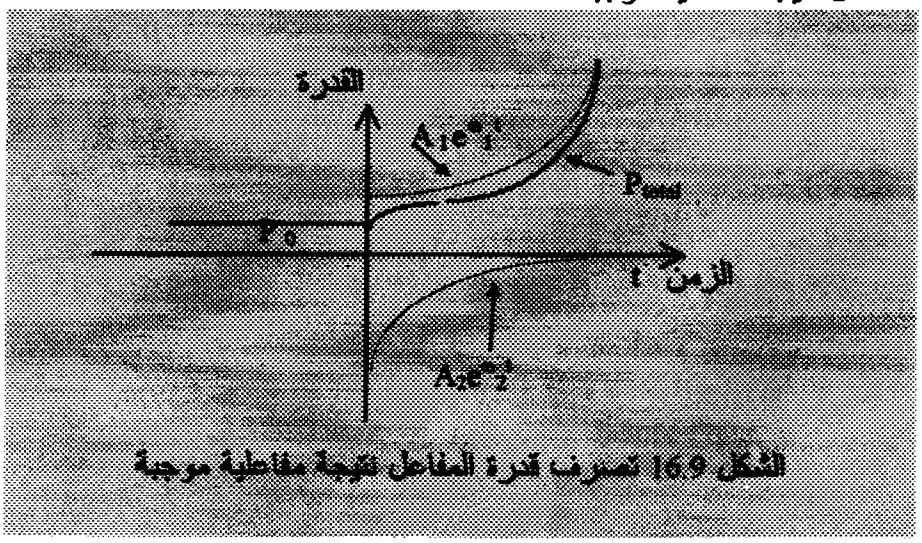


الشكل 14.9 رسم معادلة ساعة المفاعلية المعادلة 41.9

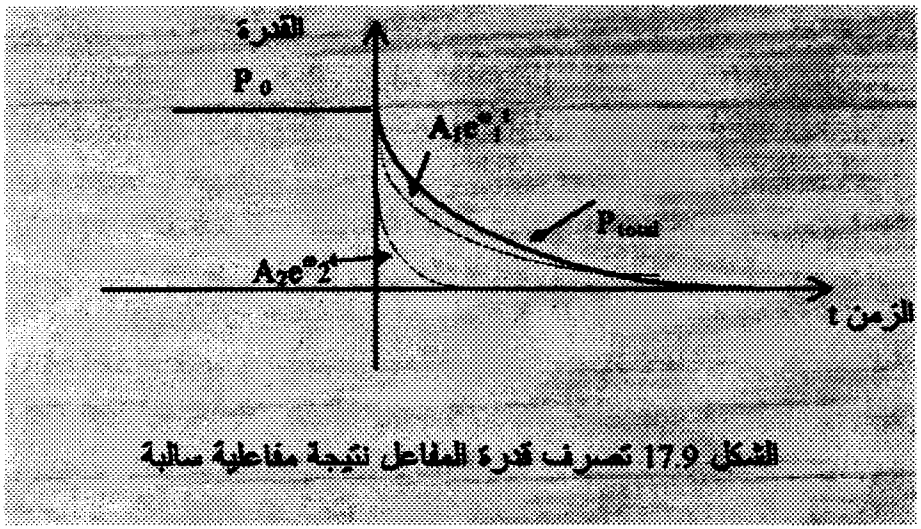


الشكل 15.9 رسم معادلة ساعة المفاعلية المعادلة 42.9

الشكلان 14.9 و 15.9 كلاهما يوضحان أن فى حالة وجود مفاعلية موجبة (سحب أعمدة التحكم من المفاعل) فإن هناك جذرين لـ ω أحدهما موجب والآخر سالب، فى حين أنه فى حالة وجود مفاعلية سالبة (إدخال أعمدة التحكم فى المفاعل) فإن كلا الجذرين سالب. الجذور السالبة هى تمثل تصرفاً عابرًا ، سريعا ما يزول مع الزمن، فى حين أن الجذر الموجب يمثل تأثيرا ايجابيا يتزايد مع الزمن. الشكل التالى يوضح تصرف قدرة المفاعل نتيجة مفاعلية موجبة:



الشكل 16.9 تصرف قدرة المفاعل نتيجة مفاعلية موجبة



الشكل 17.9 تصرف قدرة المفاعل نتيجة مفاعلية سالبة

6-9 ملخص :

لا يمكن الحصول على تفاعل متسلسل فى وجود اليورانيوم الطبيعى لوحده ، وعليه تم اقتراح ثلاثة حلول هندسية:

1 – إضافة مهدىء .

2 – تصميم خليط غير متجانس.

3 – تثرية اليورانيوم.

لقد تم اقتراح إضافة المهدىء، للاستفادة من احتمالية الانشطار بواسطة مدى واسع من طاقات النيوترونات من الحرارية وحتى السريعة، وهذا ما يعرضه شكل منحنى المقطع المستعرض الانشطارى لنظير اليورانيوم–235.

يلاحظ أنه عند جعل خلطة بين الوقود والمهدىء، نجد أنه بتركيز الخليط وذلك بزيادة تركيز الوقود بالنسبة للمهدىء (N1/N0 صغيرة) فإن p احتمالية الإفلات من الرنين تكون صغيرة يعنى أن النيوترونات ستمتص من قبل اليورانيوم–238، فى حين أن معامل الاستفادة الحرارية يزداد وهو مقياس

لعدد النيوترونات الممتصة من قبل الوقود مقارنة بغيره من المواد. كما أنه في حالة تخفيف تركيز الوقود بزيادة المهدىء (N1/N0 كبيرة) فإنه من الطبيعي أن عدد النيوترونات الممتصة من الوقود ستقل لقلة الوقود وبالتالي فإن f ستصغر، في حين أن الإفلات من الرنين سيزداد وذلك أيضا لقلة الوقود مما يعني أن p ستكبر. لذا يلاحظ أن p ، f تتصرفان عكسيا. هذا يعني أنه عند تحسين أحدهما بتغير التركيزات، يحدث التأثير العكسي من جانب المعامل الآخر. السبب في حصول K_∞ أكبر من 1 بالنسبة لخليط D_2O-UO_2 هو أن f عالية نسبيا حتى قيم عالية من Z وهذا يعطي فرصة لوجود قيمة لـ p تمكن من الحصول على K_∞ أكبر من 1. أما بالنسبة لخليط H_2O-UO_2 فإن f صغيرة جدا (بسبب المقطع المستعرض الامتصاصي العالي) إلا عند قيم صغيرة من $Z=N_1/N_0$ (عند تركيز عالي من الوقود) كما هو موضح بالشكل 6.9 ،فعلى الرغم من تحسن قيمة f ، الا أنه يتم دفع الثمن بصغر قيمة p (زيادة الامتصاص من قبل الرنين) ،ومن ثم عند تلك القيم لا يتم تحقيق شرط استمرارية الانشطار. بالنسبة لخليط C-U، فإنه خلال التباطؤ يتم فقد طاقة النيوترون على درجات صغيرة نسبيًا، مما يتيح الفرصة لتواجد النيوترونات حول طاقة الرنين، لذا عند قيم Z صغيرة (تركيز عالٍ للوقود) النيوترونات لها قابلية عالية للفقد بسبب الرنين ، بمعنى p تكون صغيرة جدا، ومن ثم لتحسين p بتخفيف تركيز الوقود وذلك بإضافة المهدىء (يعني زيادة Z) فإن ذلك يسبب نقصان قيمة f ، وبالتالي لا يتم الحصول على شرط استمرارية التفاعل المتسلسل.

في حالة التصميم غير المتجانس تستثمر أيضا الانشطارات بسبب النيوترونات السريعة، مع زيادة قيمة p ، وذلك بسبب العديد من التصادمات في محيط المهدىء.

أما النثرية وذلك بزيادة تركيز اليورانيوم-235 ، فهي كفيلة بتحقيق شرط استمرارية التفاعل المتسلسل للأنواع الثلاثة من المنظومات وذلك بتصميم متجانس، حيث في هذه الحالة تتم زيادة كل من f، η ، وليس p لأن هذه الأخيرة خاصية لليورانيوم-238 ، مع افتراض أن النثرية صغيرة لدرجة أن

اليورانيوم – 238 لا يتغير تركيزه. إن زيادة η هى ذات الأهميـــة العاليـــة، ومن ثم تكون الأكثر مساهمة فى رفع K_∞ إلى قيمة أكبر من 1.

لقد نتج عن الحلول الهندسية أجيال من المفاعلات تبنتها دول معينـــة فكنـــدا تبنت مفاعلات الكاندو CANDU ذات وقود يورانيوم طبيعى مـــع مـــهدىء الماء الثقيل، فى حين تبنت بريطانيا مفاعلات المبردة بالغـــاز GCR والتـــى تتعامل مع اليورانيوم المثرى ومهدىء الكربون، فـــى حيـــن تبنـــت أمريكـــا مفاعلات الماء الخفيف LWR . وهذه الأخـــيرة تنوعـــت تصميماتـــها بيـــن مفاعلات الماء المغلى BWR و مفاعلات الماء المضغوط PWR.
هذا وتعد أستاتيكا وديناميكا المفاعلات من أهم مواضيع فيزياء المفـــاعلات . التى تمكن من حسابات الفيوض فى الأشكال الهندسية المتنوعة للمفـــاعلات، وكذلك فى دراسة قدرة هذه المفاعلات وكيفية مناورة هذه القدرة .

7-9 مسائل :

1.9 – احسب η لدرجات تثرية من اليورانيوم–235 تساوى: 3% و 20% و 90%. (إجابة: η=1.8345 بالنسبة لـــ 3%)

2.9 – إذا تم تصميم مفاعل مكون من خليط متجانس من الوقود (يورانيوم–235 ويورانيوم–238) والمهدىء، بحيث كانت احتمالية عدم إفلات النيوترونات البطيئة والنيوترونات السريعة $P_{ft}=P_f*P_t$ تساوى 50%، فإذا كانت قيمة pf تساوى 0.5، احسب درجة تثرية الوقود من اليورانيوم–235 حتى نضمن حرجية المفاعل .
(إجابة: درجة التثرية 0.36%)

3.9 – إذا علمت أن $\int_0^\infty v^2 e^{-\beta^2 v^2} dv = \frac{\pi^{1/2}}{4\beta^3}$ ، اثبت أن الكثافة الذرية للنيوترونات الحرارية هى: $n = \int_0^\infty 4\pi n (\frac{m}{2\pi kT})^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$.

4.9 – استنتج كلا من المعادلات 18.9 و 19.9 و 20.9 المعبرات عن معامل الاستفادة الحرارية للمنظومات الثلاث.

5.9– خليط متجانس من الوقود والمهدىء محدود الحجم يتميز بتثرية قدرها 30% لليورانيوم–235 ، فإذا كانت pf=0.6، اوجد احتمالية إفلات النيوترونات البطيئة، إذا كانت احتمالية عدم إفلات النيوترونات السريعة 90%، وذلك للمنظومة الحرجة.
(إجابة:احتمالية إفلات النيوترونات البطيئة هى 9.6%)

6.9 – اشتق معادلة η بالنسبة لوقود اليورانيوم كدالة فى درجة التثرية $w/_0$ لليورانيوم–235 .

7.9 –احسب $\sigma_a(U)$ للتثرية 1% و 50% من اليورانيوم–235 باستخدام المعادلة التالية:

$$\sigma_a(U) = \frac{\sigma_a^{25} + \frac{N_{28}}{N_{25}}\sigma_a^{28}}{1 + \frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

8.9 – استخدم أى لغة برمجة حاسوب لبرمجة المعادلة 21.9 (f) والجدول 3.9 (γ)، مع المعادلة 7.9 (η) والمعادلة 10.9 ($w/_0$)، وكذلك المعادلات 32.9، 33.9، 34.9 (p) ، وذلك لحساب p ، f ، pf ، K_∞ لمهدئات الماء الخفيف، أوالماء الثقيل، أوالكربون، وذلك لدرجة تثرية طبيعية 0.715% .

9.9 – اكتب برنامج حاسوب أكثر عمومية لحساب p ، f ، pf ، K_∞ لاستخدام مهدئات الماء الخفيف، أوالماء الثقيل، أوالكربون، وذلك لعدد من درجات التثرية التالية: 1%، 2% ، 3% ، 5% .
(افترض أن p لاتتغير، لأنها لها علاقة باليورانيوم–238، حيث إن التثرية بسيطة ومن ثم فإن تركيز اليورانيوم–238 يكاد يكون هو ذاته

فى الطبيعى، لذا يتطلب حسابات η و f ، أيضا استخدم المعادلة الواردة فى المسألة 7.9 لحساب المقطع المستعرض لليورانيوم المثرى).

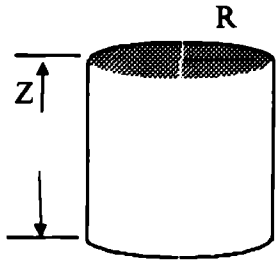
10.9 – ما هى نهايات limits لكل من f و p فى حالة ضآلة قيمة Z، وما معنى ذلك فيزيائيا ؟

11.9 – إذا كانت القيمة القصوى لاحتمالية الإفلات من الرنين p هى 0.7404 بالنسبة لخليط اليورانيوم الطبيعى مع كربون عند Z=400، والتى عندها أيضا تكون K_∞=0.80356 ، فإذا زادت η بقيمة 20%، احسب النظرية اللازمة لذلك، وكذلك قيمة η، f ، K_∞ عند نفس قيمة Z . (افترض أن p لا تتغير)

(الإجابة: النظرية= 1.344%، f= 0.86924 ، η=1.6044 ، K_∞ = 1.033)

12.9 – إذا كانت K_∞ = 1.5 لخليط متجانس من وقود اليورانيوم مثر بنسبة معينة ومُهدِ بماء خفيف . أريد تصميم مفاعل حرج فى شكل إسطوانى بنصف قطر 100cm، أوجد طول الاسطوانة، إذا علمت أن :

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Z}\right)^2 = \frac{\frac{K_\infty}{K} - 1}{L^2}$$

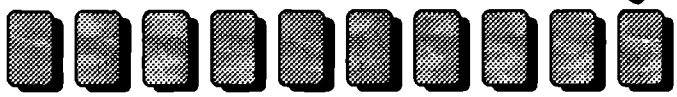


(إجابة: Z = 4.07 m)

13.9–فى مفاعل إسطوانى إذا أعتبر أن الفيض النيوترونى $\phi(r,z)$ يمكن التدليل عليه بفصل المتغيرات بحيث يمكن افتراض أن $\phi(r,z) = R(r)Z(z)$ ، أوجد هذا الفيض النيوترونى باعتبار الشروط الحدية المناسبة وهى تماثل الفيض عند المركز، وانعدام الفيض عند أطراف المفاعل.

14.9 – إذا علمت أن $\beta=.0065$ و $\lambda=0.047$ و $\Lambda = 10^{-4}$ ، احسب جذور معادلة ساعة المفاعلية فى حالة مفاعلية موجبة قدرها $\rho=0.1\beta$.
واحسب أيضا الزمن اللازم لتضاعف قدرة المفاعل بعد استقرار زيادة قدرة المفاعل على الفترة المقاربة للمفاعل $T=1/\omega_1$
. Asymptotic reactor period

الفصل العاشر



الطاقة النووية وتطبيقاتها (نظرة شمولية)

Nuclear Energy and its Applications (An Overview)

10-1 تمهيد.
10-2 السكان والبيئة والتنمية.
10-3 توليد الطاقة الكهربائية.
10-4 تحلية المياه.
10-5 تطبيقات النظائر المشعة.
10-6 الوقاية من التأثير الإشعاعى.
10-7 ملخص.

1-10 تمهيد:

هذا الفصل يدلى بتصور شمولى حول استخدامات الطاقة النووية. فالفصل يتناول إلقاء نظرة عامة على العالم سكانيا وتنمويا وطاقويا وبيئويا، ثم يتم استعراض الحالة الراهنة للعالم لمدى استخدامه للطاقة النووية كمصدر للطاقة. بعد ذلك يتم التعريج على الموضوع الحيوى وهو تحلية مياه البحر من حيث الحاجة إليها، وأنظمة التحلية، ومصادر الطاقة المتاحة وربط هذه المصادر بنظم التحلية مع التكلفة المقارنة للطاقة من عدة مصادر من ضمنها النووية. كما يتم أيضا استعراض سريع لمجال توظيف النظائر المشعة فى التطبيقات الصناعية والزراعية والطبية. هذا و يقفل الفصل بعرض جانب المحاذير لاستخدامات الطاقة النووية وكيفية التغلب عليها والمتمثلة فى إدارة النفايات والوقاية الاشعاعية. ويخلص الفصل إلى أن استخدام تعدد البدائل للطاقة أسلوب مطلوب انتهاجه، كما أن طاقة الانشطار النووى تعد إحدى أهم هذه البدائل لإنتاج طاقة الكهرباء وتحلية مياه البحر، كما أن الطاقة النووية بوجهها الآخر المضيء وهو استخدامات النظائر المشعة فى الصناعة والزراعة والطب تفتح أفاقـًا جديدة للتفحص الدقيق لجدوى التعامل مع هذه الطاقة فى ظل التحوطات الأمنية اللازمة لحماية الإنسان وبيئته.

" باستخدام تقنية المفاعلات المولدة السريعة، فإن المخزون المتواضع لليورانيوم فى المانيا يعادل طاقويا احتياطى النفط فى ليبيا" (إتحاد كرافت ويرك Kraftwerk Union ، المانيا، 1979) .

إن الدول التى تتمتع بالنفط الآيل إلى النضوب والذى يفضل استغلاله فى صناعة البتروكيماويات بدلا من حرقه عليها التفكير فى بدائل لمصدر طاقة النفط ، وحيث إن الدول العربية ليس لها احتياطى فحم فإنه لا يعد بديلا. كما أن تميز الوطن العربى بالسطوع الشمسى فإن الاستغلال المباشر للطاقة الشمسية فى ظل عدم توفر التقنية وعدم إمكانية التحكم المطلق فى التذبذب المصاحب لهذا المصدر نتيجة الأحوال الجوية وتعاقب

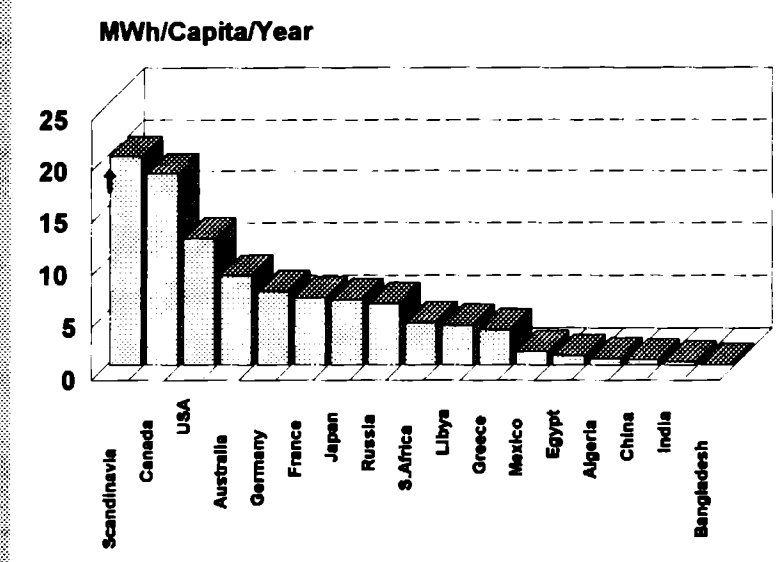
الليل والنهار، لا يؤيد فكرة كون الطاقة الشمسية بديلا مطلقا للنفط. كما أن استغلال طاقة الرياح يشكل فرصة ضئيلة لكون وجود عدد محدود من الوحدات لهذا المصدر والتى تتواجد فى مناطق مفعمة بالرياح ذات كثافة سكانية محدودة . كما أن مصادر مساقط المياه غير المستغلة تعد محدودة جدا فى العالم، وأيضا فإن الطاقة الجيوحرارية والموجية تقدمان خدماتهما فقط فى مناطق نائية من العالم، كما أن طاقة الإندماج النووى تعد فى طور الدراسات النظرية، وعليه فإن البديل الحقيقى المتبقى والمقدور عليه تقنيا هو الانشطار النووى. إن الطاقة النووية ومع الاهتمام بالأمان تشكل مصدر طاقة يمكن استغلاله لتوليد الطاقة لإنتاج الكهرباء وكذلك لتحلية مياه البحر وخصوصا فى مناطق الجفاف المائى مثل شمال إفريقيا ومناطق الخليج.ليس هذا فقط، بل يمكننا النظر إلى الوجه الآخر من قطعة النقود!، نقصد الاستفادة من الطاقة النووية فى الصورة الاشعاعية، حيث إن تطبيقات النظائر المشعة يشكل ثقلاً كبيرًا فى مجال التطبيقات الزراعية والصناعية والطبية. لذا فإن نظرة اهتمام وتقدير يجب أن توجه إلى هذا المجال فى الوطن العربى وأن تتم السيطرة على هذه التقنية من قبل أبناء هذه الأمة لصالح الأجيال القادمة. مع التركيز على استخدام أسلوب توازى (تعدد) البدائل لغرض التخطيط المستقبلى لاحتياجات الطاقة. وعليه سوف يستعرض هذا الفصل جوانب استخدام الطاقة النووية كقدر محتمل فى ظل التحوطات اللازمة للتغلب على الحذر المصاحب.

2-10 السكان والبيئة والتنمية

الطاقة كمؤشر لتقدم الشعوب

إن أحد المؤشرات التى تعكس درجة تقدم الشعوب المادى يتمثل فى مدى استخدام تلك الشعوب للطاقة. فمثلا، إن الدول الصناعية الغربية والتى تشكل حوالى 25% من نسبة سكان العالم تستهلك حوالى 60% من الاستهلاك العالمى للطاقة ، حيث إن جل مصادر الطاقة المستغلة ليست محلية بل تستورد من الخارج. فى حين أن سكان الدول النامية والتى تشكل حوالى

70% من نسبة سكان العالم تستهلك فقط 15% من الاستهلاك العالمى للطاقة. الشكل التالى يوضح نصيب الفرد من الطاقة الكهربائية فى السنة لبعض من دول العالم .



الشكل 1.10 نصيب الفرد من الطاقة الكهربائية فى بعض الدول
(ميجاوات ساعة فى السنة)

من الشكل يمكن ملاحظة أن أمريكا الشمالية وأوروبا تحضيان بنصيب الأسد فى استخدامها للطاقة والذى ينعكس فى مدى تقدمها المادى الملحوظ على مستوى العالم .

وفى ظل التطور الحضارى والصناعى الذى تشهده البشرية حاليا فإن مصادر إمدادات الطاقة بدت تحضى باهتمام متزايد. وبدأ التفكير فى مصادر الطاقة الحالية ومدى قدرتها على مواكبة مسيرة الحضارة، وجدوى استخدام بدائل أخرى وخصوصا بعد نمو الوعى البيئي لدى الإنسان وإحساسه بأن الاحتباس الحرارى الذى يعانيه الكوكب مرده الاستخدام المفرط لمصادر الوقود الأحفورى وذلك بسبب تراكم غاز ثانى أكسيد الكربون وهو أحد

العوادم التى تنتج عن احتراق الوقود الأحفورى. مثل هذه الظـــاهرة والتـــى تساهم فيها الولايات المتحدة وحدها بنسبة 22% ، أدت إلى تنبه العالم لمـــدى الخطورة الناجمة عن هذا التهور البيئي والذى يهدد بشكل كبير مظاهر الحيـلة على كوكبنا، ومن ثم جلس العالم بكيوتو باليابان فى آواخـــر ســـنة 1997 ف ليخرج بتوصيات متمثلة فى تقليص انبعاث الغازات بنسب أقلـــها 6% علـــى معدل انبعاث سنة 1990.

عوامل تعكس أهمية استخدام طاقات موازية أو بديلة :

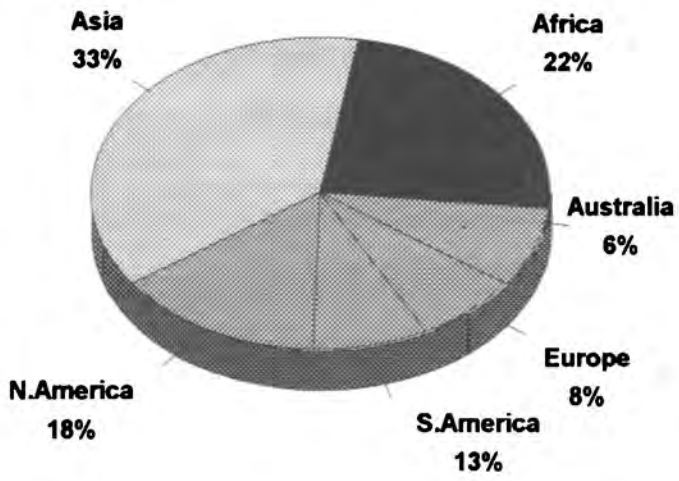
لإدراك مدى أهمية وجود مصدر جديد للطاقة هناك العديد من العوامل التـــى يجب أن يعتد بها. وهذه العوامل هى:

أولاً: التعداد السكانى والاكتضاض السكانى:

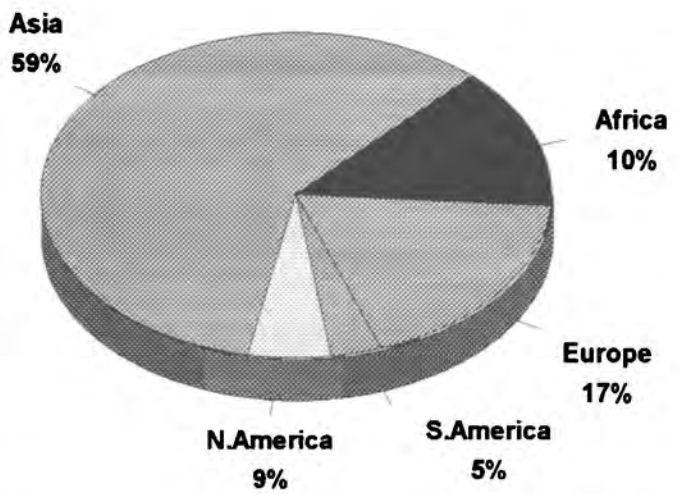
إن التعداد السكانى فى تزايد سنة بعد سنة ونسب النمو تراوحت بين 2% إلـــى 1.4 % منذ الستينيات وحتى التسعينيات حسب إحصائيات الأمم المتحدة. كمـــا أن الدول النامية والتى تعد إفريقيا أحد أركانها ستحضى بالنصيب الأكبر فـــى سكان العالم الذى سيبلغ حوالى 8 بليون نسمة مـــع ســـنة 2020 . كمـــا أن الاكتضاض السكانى على مستوى القارات يمكن احتسابه من الأرض المتاحـــة وعدد السكان القاطنين.

من حيث الأرض، فإن الشكل 2.10 يوضح التوزيع النسبى للأرض كقارات . كما أن عدد سكان العالم موزع على النحو الموضح بشكل 3.10.

لو أردنا حساب مؤشر مقدار اكتضـــاض القـــارات وذلـــك بقســـمة نســـبة عددالسكان إلى نسبة الأرض (مؤشر الاكتضاض= نســـبة الســـكان/نســـبة الأرض المتاحة)لتحصلنا على الجدول 1.10:



الشكل 2.10 التوزيع النسبى للأرض المعمورة بالسكان



الشكل 3.10 التوزيع السكانى على القارات

الجدول 1.10 مؤشر اكتضاض القارات

إفريقيا	آسيا	أمريكا ش	أمريكا ج	أوروبا	أستراليا
1/2	2	1/2	1/2	2	1/20

يلاحظ من الجدول أن اكتضاض الفئة الأولى وهـــى إفريقيـــا والأمريكتـــان متساو، كما أن اكتضاض الفئة الثانية آسيا وأوروبا متساو أيضـــا وكلاهمـــا مكتضتان أربع أضعاف اكتضاض الفئة الأولى . كمـــا يلاحـــظ أن أســـتراليا ضعيفة الاكتضاض.

ثانيًا: الفاعلية الاقتصادية:

تشير معظم الإحصاءات إلى أن الدول النامية ستكون أكثر فاعلية اقتصاديـــا بعد عام 2000 ، ويمكن إرجاع ذلك إلى أن الأغلبية من سكان العالم تـــتركز فى الدول النامية.

ثالثـــًا: الطلب على الطاقة :

إن زيادة النمو السكانى وكذلك زيادة الفاعلية الاقتصادية للعالم يـــؤدى إلـــى حتمية زيادة الطلب على الطاقة. وهذا ما تشير اليه الإحصـــاءات ، حيـــث يزيد الطلب على الطاقة عالميا من 11جيجاطن مكافئ نفط فى سنة 1990 إلى حوالى 20 جيجا طن مكافئ نفط سنة 2020 بنسبة زيادة حوالـــى 50% كـــل عشر سنوات ، بحيث يكون للدول الصناعية النصيب الأكبر تليـــها الـــدول النامية. كما أن هناك مؤشرا جيدا لإدراك مدى الاستفادة من هـــذه الطاقـــة ، هذا الموشر هو شدة الطاقة ، والذى يعكس كفاءة استخدام الطاقـــة، الجـــدول التالى يبين ذلك.

الجدول 2.10 شدة الطاقة Kgoe/$ (كيلوجرام مكافئ نفط/دولار)

	سنة 1990	سنة 2020
الدول الصناعية	0.351	0.202
الدول النامية	0.409	0.283

يلاحظ من الجدول أن الكفاءة فى استخدام الطاقة سوف تزداد وبالإمكان إرجاع ذلك إلى التوقعات بشأن ارتفاع أسعار الطاقة الناتج عن محدودية المخزون من مصادر الوقود الأحفورى وكذلك إلى الاستخدام الأمثل للطاقة للتقليل من التأثيرات السلبية على البيئة.

رابعًا : البيئة :

إن إنتاج واستخدام الطاقة من المصادر التقليدية أدى إلى إحداث تأثيرات سلبية على البيئة. فالتلوث البيئى أصبح واقعًا ملموسًا. الجدول 3.10 يوضح مقدار انبعاث غاز ثانى أكسيد الكربون من الوقود الأحفورى لسنة 1990 والمقادير المتوقعة سنة 2020 . إن غاز ثانى أكسيد الكربون هو أحد العوامل الرئيسة التى تتسبب فى تغيير مناخ الأرض فهو يتراكم فى طبقات الجو العليا ويعمل كعاكس لأشعة الشمس المنعكسة من على سطح الأرض مما يؤدى إلى ظاهرة الاحتباس الحرارى.

الجدول 3.10 معدل انبعاث ثانى أكسيد الكربون جيجاطن /سنة

	1990	2020
الدول الصناعية	2.9	3.0
الكتلة الشرقية	1.3	1.3
الدول النامية	1.7	7.2
العالم	5.9	11.5

كما يلاحظ من الجدول أن معدل انبعاث الغازات يتضاعف فـــى ســـنة 2020 عنه فى سنة 1990 عاكسا ما طرح سابقا من تضاعف الاحتياج للطاقة خـــلال نفس الفترة الزمنية ، والذى يستنتج منه أن ذلك ســـيحدث إذا مـــا أســـتمرت الدول فى تبنى نفس مستوى الاستخدام للوقـــود الأحفـــورى المســـبب لتلـــك الانبعاثات. إن ما أشرنا اليه سابقا من نتائج اجتماع كيوتو باليابان، والـــذى التزمت فيه كثيرًا من الدول لتخفيض مســـتوى الانبعاثـــات فمثـــلا الـــتزمت الولايات المتحدة الأمريكية بتخفيض ما نسبته 6% (والتى تملصت منه مـــع بدايات القرن الواحد والعشرين خلال إدارة بوش الإبن)عـــن مســـتوى ســـنة 1990 إلاّ دليل على التأكيد على أحد أمرين أو كلاهمـــا وهمـــا التحوطـــات الأمنية المبتكرة اللازمة فى التقنية الأحفورية أو استخدام بدائل طاقة أخرى.

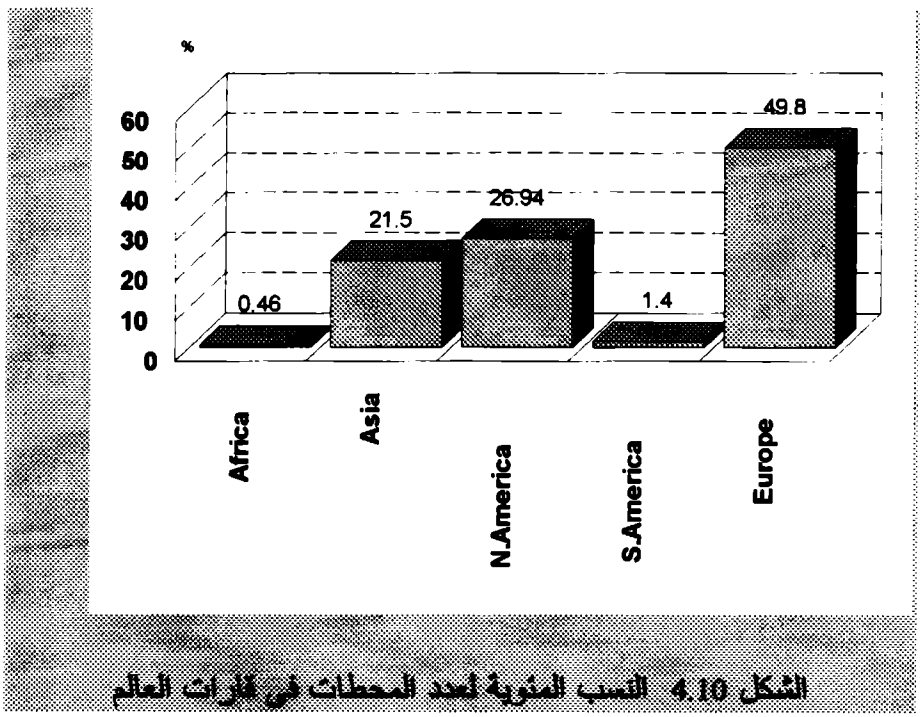
إن القيود البيئية والرغبة فى التنمية تتطلب النظر فـــى اســـتخدامات بدائـــل لمصادر الطاقة الأحفورية أو على الأقل مصادر موازية للمصادر الأحفوريـــة (تساهم بالتوازى فى توليد الطاقة). ولعل البديل الأوفر حظا من حيث توفـــر التقنية اللازمة هى الطاقة النووية .

3-10 توليد الطاقة الكهربائية :

عالميا فإن 15% من دول العالم تستخدم الطاقة النووية ، كما أن هذه الـــدول المستغلة للطاقة النووية تستخدم نسبة 28% كطاقة نووية من مجمل إنتاجـــها من الطاقة. ومن مجمل الطاقة المستخدمة فى العالم فإن حوالى 17% هـــى طاقة نووية . وعلى مستوى الـــدول فـــإن فرنســـا تســـتغل 76.4% مـــن احتياجاتها نوويا .

إن الاستخدام المتوازى للعديد من البدائل يعد أحد أهم الأساليب للتعامل مـــع التقنيات والتآلف معها . كثيرًا من الدول ذهبت هذا المنحـــى فمثـــلا ومـــع بدايات القرن الواحد والعشرين فإن اليابان تستخدم حوالـــى 33.8% نوويـــا ،

والولايات المتحدة 19.8% نوويا ، والباكستان تسهم بحوالـــى 1.7% . فـــى حين أن إفريقيا ليس لها إلا ما تساهم به جنوب إفريقيا من خـــلال محطتيـــن نوويتين واللتين تشكلان نسبة 6.7% من الطاقة المولدة بدولة جنوب إفريقيـــا. هذا وتشير التقديرات الفرنسية فى الثمانينيات من القـــرن العشـــرين إلـــى أن سعر الكيلوات ساعة من الكهرباء المولدة نوويا يبلغ 30% من تكلفة التوليـــد باستخدام النفط ويبلغ 60% من تكلفة التوليـــد باســـتخدام الفحـــم . إن ذلـــك بالتأكيد سيوفر عملة يمكن الاستفادة منها فى مواضع أخرى لصالح التنمية.
الشكل التالى يوضح نصيب كل قارة كنسبة مئوية من عدد محطـــات القـــدرة النووية العاملة بالعالم وهى 438 محطة.



الشكل 4.10 النسب المئوية لعدد المحطات فى قارات العالم

كما أن هذه النسب تمثل تقريبا نفس نسب توليد كل قارة من الطاقة النوويـــة من مجمل الطاقة النووية المولدة فى دول العالم.

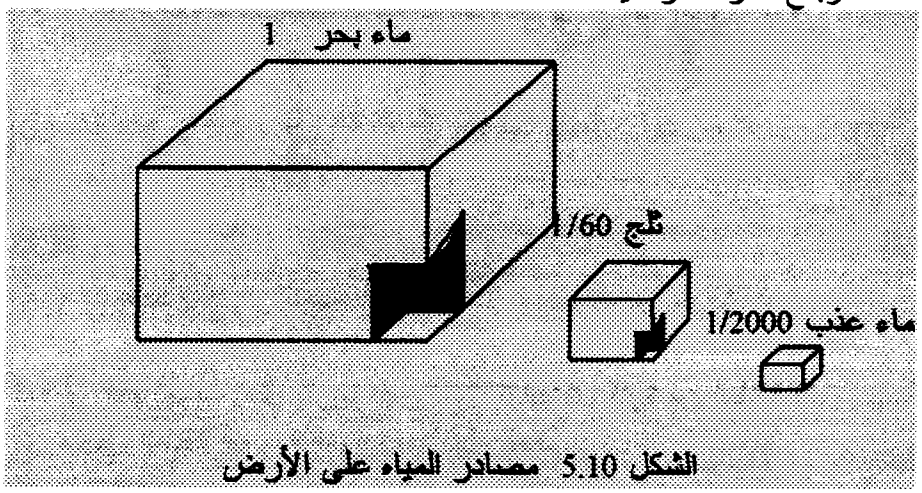
الجدول 4.10 نسب الطاقة النووية من مجمل الطاقة النووية المولدة عالميا (351327 MWe) سنة 2001

إفريقيا	آسيا	أمريكا ش	أمريكا ج	أوروبا
0.5%	19%	31%	1.2%	49%

مما سبق نستطيع أن نستخلص أن الدول الصناعية تستغل الطاقة النووية كأحد المصادر الموازية ، وأيضا يعد استخدامها أحد مؤشرات التقدم . فيلاحظ من الجدول 4.10 أن النسبة 0.5% الممثلة لإفريقيا ترجع إلى مساهمة جنوب إفريقيا، والتى تعكس تقدمها النسبى مقارنة بباقى دول إفريقيا، حيث تحضى جنوب إفريقيا إلى جانب تملكها لمحطات قدرة بتملكها إلى مراكز تثرية الوقود وتصنيعه وتخزينه فى منطقة بيلندابا. كما تحضى عدد من دول إفريقيا بعدد من مفاعلات الأبحاث فى جنوب إفريقيا و ليبيا والجزائر ومصر وغانا والكونغو.

4-10 تحلية المياه :

بالنظر إلى الشكل التالى نرى مصادر المياه على الأرض حيث يغطى البحر ثلاثة أرباع الكرة الأرضية.



الشكل 5.10 مصادر المياه على الأرض

تعد الدول الإفريقية المطلة على الصحراء الكبرى من أكثر الدول التى تعانى من ندرة الماء ولعل إنشاء مشروع النهر الصناعى بليبيا يعد أحد الأدلة على مدى تفاقم هذه المشكلة ولكن هل هناك حلول أخرى أيضا؟
لقد ورد فى تقرير للوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA-TECDOC-666) فى أبريل 1994 تقويما فنيا واقتصاديا لإنتاج المياه العذبة عن طريق تحلية مياه البحر باستخدام الطاقة النووية والوسائل الأخرى. سنعرض مختصر ذلك التقرير فيما يلى:

الحاجة إلى تحلية مياه البحر:

إن كميات المياه العذبة المتاحة على مستوى العالم تتجاوز بكثير تلك الكميات المستخدمة ومع هذا فإن كميات المياه ليست موزعة حسب الاحتياجات ، حيث تشير التقديرات إلى أن ثلاثة أرباع سكان العالم يعانون من نقص فى المياه العذبة. ومن المتوقع أن الإزدياد السكانى والتلوث المتزايد والتناقص فى المياه السطحية والجوفية سيؤدى حتما إلى تفاقم مشكلة توفير المياه العذبة. إن قدرات محطات التحلية فى بداية 1990 تقارب من 16 مليون متر مكعب قد تصل إلى 20 مليون متر مكعب فى سنة 2000 . إن أهم المستخدمين للتحلية يتركز فى الشرق الأوسط (70% من السعة العالمية) وذلك لدول الخليج العربى، أما شمال إفريقيا (ليبيا و الجزائر) تستغل ما نسبته 6% من السعة العالمية، فى حين أن أمريكا تستخدم حوالى 7% من السعة العالمية ممثلة فى ولايتى كاليفورنيا وفلوريدا. هذا ويتوقع بعد سنة 2000 أن تزداد قدرات التحلية إلى الضعف فى كل عقد من الزمان وقد يتسارع ذلك إذا ما انخفضت التكلفة.

نظم التحلية :

إن التقنية لتحلية المياه أصبحت مستقرة ومتاحة. ولعل أهمها التقنيات التالية :

1- التناضح العكسى.
2- التقطير متعدد التأثيرات.
3- التقطير الومضى متعدد المراحل.

مصادر الطاقة المتاحة :

بعض التقنيات السابقة تحتاج إلى طاقة ميكانيكية (كهرباء مثلا) مثل طريقة التناضح العكسى، والبعض الأخر يحتاج حرارة مثل التقطير متعدد التأثيرات. تعد المحطات النووية ومحطات الوقود الأحفورى هى الخيارات المتاحة لتوفير الكهرباء والحرارة أو كليهما معا وذلك لمحطات التحلية. وليست هناك عوائق فنية فى استخدام أى منهما. وتشمل محطات الوقود الأحفورى محركات الديزل، التوربينات الغازية، وحدات الدورة المركبة، ومحطات القوى/ البخار العاملة بالنفط والغاز والفحم ، والغلايات. أما فيما يتعلق بالمفاعلات النووية فهناك العديد من المفاعلات التى تفى بالغرض . حيث إن المفاعلات كبيرة القدرة تعد متاحة تجاريا فى الوقت الحاضر، كما أن هناك مفاهيم متقدمة تحت التطوير، وتشمل تلك مفاعلات قدرة صغيرة ومتناهية الصغر من المحتمل أن تكون متاحة مستقبلا.

ربط مصدر الطاقة بنظم التحلية:

يمكن ربط عمليات التحلية التى تحتاج إلى كهرباء فقط مثل محطة التناضح العكسى إما بمحطات توليد الكهرباء أو بالشبكة، ويتم نقل الطاقة بالتوصيلات الكهربية. أما العمليات التى تحتاج الحرارة والكهرباء مثل التقطير متعدد التأثيرات فيتم ربطها بالمحطات ثنائية الغرض (توليد مشترك للكهرباء والحرارة) أو بالمحطات وحيدة الغرض (الحرارة فقط) مع مصدر إضافى للكهرباء (الشبكة أو وحدة توليد خاصة) ويكون الإمداد بالطاقة من خلال نظام للانتقال الحرارى (البخار أو الماء الساخن) ومن خلال التوصيلات الكهربية.

التكلفة المقارنة للطاقة :

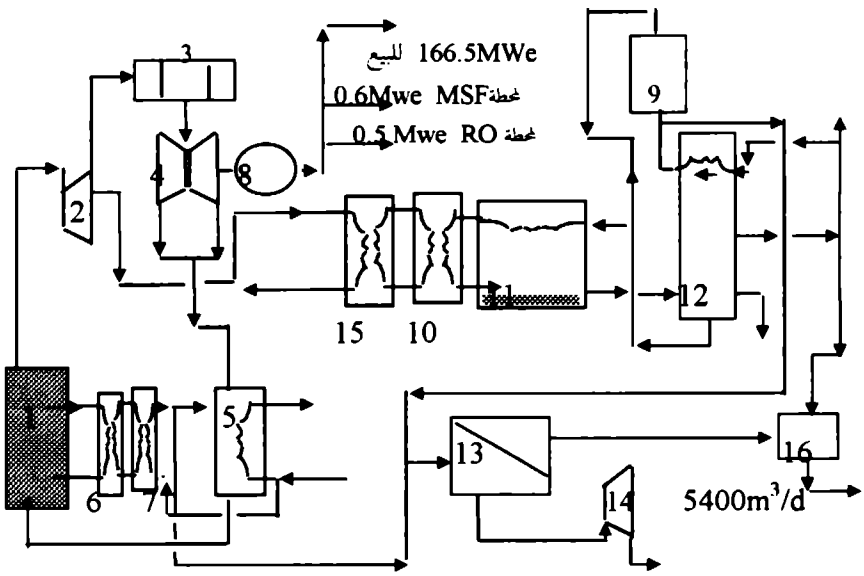
يوضح التحليل الاقتصادى أن تكلفة الطاقة الكهربية اللازمة لمحطة التحلية لكل من خيارت الوقود الأحفورى والنووى تعد متقاربة بصفة عامة ، وتعتمد التنافسية على حجم المحطة، حيث تعد المحطات النووية الكبيرة (900 ميجا وات) ذات أفضلية على نظيرتها ، فى حين تتساوى التكلفة بالنسبة للمحطات متوسطة القدرة (300- 600 ميجاوات). أما بالنسبة للمفاعلات الصغيرة (50 ميجاوات) فإن محطات الوقود الأحفورى (محركات الديزل) تتميز اقتصاديا. أما فى حالة المحطات الحرارية وحيدة الغرض (الحرارة) فإن تكلفة الطاقة تعد متقاربة لكلا البديلين.
هذا ويشكل تكلفة عنصر الطاقة ما يوازى ربع إلى نصف تكلفة إنتاج الماء. أما باقى التكلفة فإنها تنجم عن أعباء رأس المال وتكاليف التشغيل والصيانة لمحطة التحلية.

التكلفة الكلية للمياه :

تتراوح تكلفة إنتاج الماء بين 0.7 إلى 1.1 دولارًا أمريكيًا لكل متر مكعب لمحطات تحلية المياه المرتبطة بمحطات ثنائية الغرض (التوليد المشترك للكهرباء والحرارة) أو محطات توليد الكهرباء فقط. هذا وترتفع التكلفة إلى ما بين 1.2 إلى 2 دولارًا لكل متر مكعب فى حالة الربط مع محطات توليد الحرارة فقط. وعند إضافة تكلفة تخزين ونقل وتوزيع المياه، وكذلك تكاليف الفقد ، فإن التكلفة النهائية للماء (للمستهلك) ترتفع بطريقة ملموسة.
مما سبق ذكره يمكننا أن نستنتج أن استخدام الطاقة النووية- لتوفير الطاقة لمحطات تحلية مياه البحر- يعد بديلا عن محطات الوقود الأحفورى وأيضا ذا جدوى فنية، كما يعد كذلك منافسًا من الناحية الاقتصادية للوحدات المتوسطة والكبيرة المندمجة فى نظام الشبكة الكهربية. وتعد محطات توليد الكهرباء النووية الكبيرة والمندمجة فى نظام الشبكة الكهربية والتى توفر الكهرباء لوحدات التحلية-الموزعة فى مواقع متعددة- والعاملة بالتناضح العكسى أكثر الخيارات أفضلية من حيث التكلفة.

عدد من الدول ولدت الخبرة الجيدة فى مجال التحلية مثل اليابان وكازخستان، وعلى نفس المنوال دخلت المجال جمهورية كوريا بمفاعلات ذات قدرة 330 MWth تدعى SMART، أيضا روسيا سلكت نفس الطريق بمفاعلات تدعى KLT-40C، وكذلك الهند بربط مجموعة مفاعلات الماء الثقيل المضغوط PHWRs (170MWe) .

الشكل التالى يوضح شكلا توضيحيًا للمنظومة الهندية .



1-المفاعل 2- تربين عالى الضغط 3- فاصل الرطوبة والمسخن المبدئى 4- تربين ضعيف الضغط 5- مكثف المحطة 6- حلقة تبريد المهدئ/الماء 7- حلقة تبريد ماءالبحر/الماء 8- المولد 9- المعالجة المبدئية الكيمائية لمحطة MSF 10- المسخن لمحطة MSF 11- قسم استرجاع الحرارة لمحطة MSF 12- قسم طرح الحرارة لمحطة MSF 13- محطة RO 14- تربين استرجاع الطاقة لمحطة RO 15- المبادل الحرارى الوسطى 16- خزان المنتوج

الشكل 6.10 منظومة نووية لتزويد الطاقة اللازمة لمحطات تحلية متنوعة

5-10 تطبيقات النظائر المشعة :

تستخدم التطبيقات المختلفة للنظائر المشعة والإشعاع فى العديد من دول العالم ، وفى المجالات المختلفة وذلك لتحسين الأداء وزيادة الكفاءة والإنتاجية. وقد تركزت هذه التطبيقات فى مجالات الغذاء والزراعة ومجالات الصحة والطب النووى. ونخص بالذكر هنا بعض من هذه التطبيقات.

مجالات الغذاء والزراعة :

فى مجالات الغذاء والزراعة، توجد العديد من المشروعات التى تهدف إلى زيادة الإنتاج الزراعى، وتحسين نوعية المنتجات وحماية المحاصيل من الآفات الزراعية وكذلك الاهتمام بالإنتاج الحيوانى. فعلى سبيل المثال هناك استخدام مقاييس الرطوبة النيوترونية لغرض الحصول على عدد من أصناف القمح المقاوم للجفاف، وكذلك دراسة زراعة الصمغ المقاوم للجفاف باستخدام نظير الكربون-13، وأيضا، دراسة استخدام كميات محدودة من المياه فى الرى بالنسبة للذرة. إحداث طفرات Mutations فى الأرز والذرة وإيجاد أنواع مقاومة للجفاف ، وكذلك إحداث طفرات من (الكسبة) Cassava تتمتع بجودة الإنتاج ومقاومة الجفاف. هناك أيضا دراسة تأثير علف الأبقار على إنتاجية الحليب، وكذلك تطبيق تقنية الحشرات العقيمة لمكافحة ذبابة تسى تسى tsetse (SIT-Sterile Insect Technique) ، وأيضا، مكافحة ذبابة الفاكهة. كما يتم دراسة تأثير الكيماويات الزراعية ومخلفاتها فى المحاصيل الزراعية والغذاء والحيوانات عن طريق تحليل محتواها من البروم والكلور، وأيضا دراسة تصبير منتوجات زراعية مثل البطاطا والبصل (على المستوى البحثى)، وذلك بالتعريض لجرعات من أشعة جاما، لأجل تخزينها والاستفادة منها فى مواسم ندرتها. هذا وتفيد الإحصاءات أنه هناك حوالى 243000 طن مترى من الغذاء المعالج بالإشعة على مستوى العالم حتى سنة 1999.

مجالات الصحة والطب النووى :

بعض من هذه النشاطات تتمثل فى: تطبيقات تقنية تحليل المناعة الإشعاعى (Radioimmunoassay- RIA)، و استخدام مصورات جاما Gamma camera فى التشخيص. هناك مجهودات كبيرة بمساعدة الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA ومنظمة الصحة العالمية WHO فى نشر تقنيات الطب النووى فى التشخيص والعلاج فى العديد من الدول و كذلك إنتاج مستحضرات صيدلانية إشعاعية.

مجالات أخرى:

هناك تطبيقات أخرى فى مجالات متنوعة فعلى سبيل المثال؛ تستخدم التقنيات النووية فى تقدير المخزون الجوفى للمياه، وكذلك فىالتنقيب عن البترول والمعادن الأخرى. أيضا تتم دراسة خصائص آبار النفط بأجهزة نيوترونية لدراسة المركبات الهيدروجينية، وكذلك دراسة قواعد خزانات النفط من ضمان أرضية متماسكة لتجنب حدوث انفجارات بها ، وأيضا، دراسات التلوث الإشعاعى الطبيعى للأنابيب الناقلة للنفط. تستخدم كذلك تحليلات التركيب المادى باستخدام المعجلات (Elemental Analysis) ، وأيضا، هناك دراسات عن التطبيقات الصناعية مثل الحساب الدقيق لسمك القطع المدرفلة ، وحساب زمن التخليط المتجانس للمواد الصناعية.

10-6 الوقاية من التأثير الإشعاعى:

النفايات الإشعاعية:

إن الجانب الذى يحذره الناس من جراء استخدام الطاقة النووية بجميع صورها هو التعرض الإشعاعى وإدارة النفايات. إلا أن النظر لبعض الأرقام يخفف من حدة الحذر (الهوسى). فعلى سبيل المقارنة فإن المحطات النووية تضيف 0.01% على المستوى الإشعاعى الطبيعى بينما تضيف المحطات

التى تعمل بالفحم 25% من ثانى أكسيد الكربون زيادة على قيمته الطبيعية علاوة على عشرة أمثال ثانى أكسيد الكبريت الموجود بالطبيعة. كما أن المحطة النووية تنتج 30 طنا من الوقود المستهلك سنويا . وللمقارنة فإن الولايات المتحدة تنتج سنويا 3 الآف طن من الوقود المستهلك سنويا يتم معالجتها ودفنها بطرق تكنولوجية متقدمة فى حين أن محطات الوقود التقليدية التى تعادلها فى القدرة ينتج عنها حوالى 300 مليون طن من المخلفات الكيميائية الأكثر خطورة على البيئة. كما أن هاجس النفايات قد ينسب إلى الدول التى لها عدد كبير من المحطات النووية ولكن فى حالة الدول محدودة العدد فإن المخلفات لا تشكل هاجس رعب من استخدام الطاقة الذرية . هذا وأن الدول الكبرى الممتلكة لعدد كبير من المحطات تتجه إلى تقليص حجم مخلفاتها النووية خلال السنين القادمة عن طريق الدراسات والبحوث المستمرة.

إن النفايات المشعة تعرف علىأنها كل ما لا يرجى استخدامه ويحتوى على نويات مشعة تزيد مستويات إشعاعاتها عن المستوى المسموح به للدولة المعنية.

هذا ويهتم المختصون بتطوير سبل الحد من انتشار تلك الملوثات فى مكونات البيئة من خلال إدارة هذه النفايات من حيث مراقبة تداولها والتخلص الآمن منها ومتابعة أى تأثير بيئى لها للوقوف على ما قد يسببه ذلك من تأثير مباشر أو غير مباشر على الإنسان.

هذا وتعدد مصادر النفايات المشعة على النحو التالى:

1 – التنقيب واستخراج النظائر المشعة من مصادرها الطبيعية.
2 – تشغيل منشآت دورة الوقود النووى والمفاعلات.
3 – الحوادث النووية و تجارب اختبار الإسلحة النووية.
4 – إزالة تلوث المنشآت النووية.
5 – الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية فى مجالات الطب والزراعة والصناعة والبحوث.

كما تتنوع النفايات المشعة وتأخذ ثلاث صور هى؛ صلبة، و سائلة، وغازية ويمكن تبويبها من خلال مجموعتين:

i - نفايات مشعة قصيرة العمر(ذات عمر النصف أقل من 30 عاما).
2 - نفايات مشعة طويلة العمر (ذات عمر النصف أكبر من 30 عاما).

كما يمكن تبويب النفايات من حيث المستوى الإشعاعى كما يلى:
1- نفايات منخفضة المستوى الإشعاعى.
2- نفايات متوسطة المستوى الإشعاعى.
3- نفايات مرتفعة المستوى الإشعاعى.

إدارة النفايات:

وتشمل تداول ومعالجة وتهيئة ونقل وتخزين والتصرف النهائى للنفايات مع تحقيق الهدف الأساسى المتفق عليه وهو الحفاظ على سلامة الأفراد والبيئة من مخاطر هذه النفايات فى الحاضر والمستقبل. وفى كل الأحوال فإن التوثيق لكل العمليات الخاصة بإدارة النفايات يعد أمرًا أساسيًا، بالإضافة إلى التدريب الجيد للقائمين على هذا العمل، مع الرقابة الاشعاعية ، وكذلك وجوب التبادل المعلوماتى غير المحظور بين كل الدول لضمان سلامة الإنسان والبيئة.

إدارة النفايات منخفضة ومتوسطة المستوى الإشعاعى:

لقد أصبحت التقنيات المتبعة فى معالجة وتداول والتحفظ الآمن لتلك النفايات، حتى يضمحل ما بها من مواد مشعة ، أكثر نضوجا وتتمثل فى :

1 - الكبس لتقليل حجم النفايات الصلبة غير القابلة للحرق.
2 - حرق الأوراق والملابس والمصفيات الملوثة إشعاعيا.
3 - الترسيب الكيميائى والترشيح والبخر الحرارى والتبادل الأيونى لمختلف السوائل، ثم تثبيت الرواسب المشعة فى كتل مصلدة فى خلائط إسمنتية أو فى الإسفلت أو فى بعض البلمرات الراتنجية .

4 – التخلص من الكتل الصلدة فى قوالب إسمنتية بالقرب من سطح الأرض أو فى أماكن تخزين خاصة. لفترات قد تصل إلى 300 سنة

إدارة نفايات الوقود النووى المحترق مرتفعة المستوى الإشعاعى:

يتم عادة التخزين المؤقت للوقود النووى المحترق فى منشآت خاصة بجوار مصادر استعماله بالمفاعلات النووية ثم يتم تداوله من خلال إحدى الطريقتين:

1– نقله إلى منشآت تخزين بعيدة عن موقع المفاعل لمدة معينة يتم من بعده تهيئته للتخلص منه فى مخازن جيولوجية دائمة.

2– يتم معالجة الوقود النووى المحترق بعد فترة تخزين إضافية بعيد عن موقع المفاعل ، ثم تثبت النفايات المشعة مرتفعة المستوى من نواتج الانشطار الناتجة بعد فصل كل من اليورانيوم والبلوتونيوم فى كتل زجاجية من سليكات البورون أو كتل سيراميكية للتخلص منها فى مخازن جيولوجية خاصة.

التخلص من النفايات المشعة (التحفظ عليها):

التخلص لا يعنى تخزين، حيث إنه فى حالة التخلص من النفايات تكون عملية استرجاعها ليست واردة ومن ثم تُختار مناطق التخلص لتكون ذات تركيب جيولوجى خالٍ من التشققات وتكون معزولة برواسب جيولوجية كفيلة بمنع تسرب المواد المشعة ، كما يجب أن تكون خالية من المياه السطحية ويفضل خلوها من المياه الجوفية.

الوقاية الإشعاعية:

مع تزايد استخدام النظائر والمصادر المشعة، إضافة إلى استخدام المنشآت النووية مثل المفاعلات ومحطات تداول ومعالجة النفايات المشعة، فقد أصبح

ضروريا التأكيد على سلامة الإنسان وبيئته من خلال إحكام الرقابة عليهما من مخاطر التعرض الإشعاعى ووضع قواعد وأسس للوقاية الإشعاعية.

أنواع التعرض الإشعاعى:

يتنوع التعرض للإشعاع بتنوع الإشعاعات مثل أشعة جاما أو جسيمات الفا وبيتا والنيوترونات إلى آخره. ويتعامل مع الإشعاعات من خلال معرفة أربعة مفاهيم أساسية لقياسها متمثلة فى:

1 - قياس الفاعلية الإشعاعية Activity (A) ، وهى معدل انحلال النوى، والتى تقاس بالبيكريل Bq والكورى Ci.

2 - قياس التأين فى الجو وهو ما يسمى بالتعرض Exposure (X) والذى يقاس بالروتجن Rontegen (R) أو بوحدة Coulomb/Kg. (يُحتاج إلى 34 eV لتكوين أيون).

3- قياس الجرعة الممتصة Absorbed Dose (AD) والتى تقاس بالوحدة الكلاسيكية rad أو بالوحدة العالمية Gy والتى تناظر الطاقة الممتصة Joule لكل كتلة Kg.

4- الجرعة المكافئة والتى تعنى بالتأثير البيولوجى أو ما تسمى بـ Biological Equivalent Dose (BED)، وهى تقاس بوحدة كلاسيكية rem أو الحديثة السفيريث Sv.

الجدول التالي يلخص علاقة الجرعة الممتصة والمكافئة بالوحدة القديمة والحديثة:

الجدول 5.10 الجرعة الممتصة والمكافئة

الجرعة المكافئة Dose Equivalent	الجرعة الممتصة Absorbed Dose	التحويل
rem	rad	1Gy = 100 rad
Sv	Gy	1Sv = 100 rem

يلاحظ أن الجرعة المكافئة مهمة ، وذلك لأن بعض الإشعاعات مثل أشعة جاما وجسيمات بيتا تفرغ طاقتها على مدى طويل، بمعنى أنها تفرغ جزءًا بسيطًا من طاقتها فى مدى قصير مثل مدى خلية إنسانية. وعلى عكس من ذلك هناك جسيمات أخرى مثل الفا تفرغ طاقتها فى مدى قصير جدا، وعليه فإن التأثير البيولوجى لجسيمات الفا بقيمة 1 rad أكثر خطورة من نفس الجرعة لجسيمات بيتا أو جاما. وعليه هناك معامل Factor يتم به تقدير هذه الجرعات والذى يعتمد على نوعية الإشعة ويسمى بعامل النوعية Quality Factor Q، كما أنه هناك معامل أخر لتقدير الجرعة المكافئة للجسم كله Whole Body Equivalent Dose والذى يعتمد على طبيعة العضو المعرض للأشعة، وأخيرًا هناك معامل ثالث لتقييم نسبة المخاطرة Risk Factor . الجدول التالي يوضح هذه العلاقات.

فى الجدول 6.10، تم افتراض جرعة ممتصة قدرها 0.025 Gy على اعتبار أن معامل نوع الإشعاع يساوى 20 بالنسبة لألفا والذى نتج عنه جرعة مكافئة 0.5 Sv وباعتبار العضو المعرض هو الرئة، فتم اعتبار المعامل المناظر 0.12 ، مما نتج عنه جرعة كاملة للجسم تساوى 0.06 Sv ، وأخيرًا، باعتبار نوع المرض على إنه سرطان قاتل، فنتج عن ذلك نسبة المخاطرة بقيمة 0.6 % .

الجدول 6.10 تقدير الجرع المناسبة

	F3		F2		F1=Q	
نسبة المخاطرة %		الجرعة المكافئة للجسم Sv		الجرعة المكافئة Sv		الجرعة الممتصة Gy
0.6%	سرطان قاتل 10	.06	الرئة 0.12	0.5	α 20	0.025

هذا وينقسم التعرض للإشعاع إلى التعـــرض المـــهنى والتعـــرض الطبـــى والتعرض للجمهور، ومن ثم هناك حدود للجرعات، فهناك حدود للجرعـــات خاصة بالمهنيين و أخرى خاصة للجمهور كما هو مدون بالجدول التالي:

الجدول 7.10 حدود الجرعات المسموح بها

النوع	المهنى	الجمهور
جرعة فعالة فى السنة	20 mSv	1 mSv
جرعة مكافئة لعدسة العين فى السنة	150 mSv	15 mSv
جرعة مكافئة للجلد فى السنة	500 mSv	50 mSv

الوقاية الاشعاعية فى الممارسات المطلوبة:

لأداء عمل ما ، يجب تبرير الممارسة أو العمل المطلوب . وفى حالة تبنـــى الممارسة وتبريرها يجب تقرير أفضل السبل لاستخدام الموارد والإمكانـــات للتقليل من مخاطر الإشعاعات، مع توفر نظام الوقاية الإشعاعية فى حـــالات التدخل.

توصيات اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات
International Commission on Radiation Protection (ICRP) :

من ضمن التوصيات المهمة:

1- تحديد المسؤولية والسلطة وعدم تمييعها

2- الإدارة الكفأة متمثلة فى التدريب الجيد ، وإيجاد كادر إدارى رسمى وإقامة الأساس العملى لوقاية من لهم علاقة بالعمل الإشعاعىمن خلال اختبار المصدر الإشعاعى، و استخدام التدريع الوقائى وتحديد المسافات الوقائية وزمن التعرض للإشعاعات.

3- تقسيم أماكن العمل عادة إلى منطقتين متميزتين إحداهما منطقة مراقبة وأخرى تحت الإشراف.

4- إصدار قواعد التشغيل.

5- تحديد المستويات الاشعاعية المرجعية متمثلة فى مستويات التسجيل ، ومستويات الفحص ، ومستويات التدخل .

6- تقويم الجرعات .

7- الإلتزام بالمعايير الوقائية المطلوبة.

8- حفظ السجلات.

9- التخطيط للطوارىء.

المسح الإشعاعى وشبكات المرا قبةالاشعاعية:

للقيام بعمليات المسح الإشعاعى الفعالة على مستوى الدولة فإنها تتم بتحديد عدد المواقع التى بها المنشآت النووية وعدد المناطق القريبة منها وعدد المناطق الأخرى المهمة والتى بها عدد سكان كبير ، بحيث ينشأ بها شبكات متكاملة للرصد الإشعاعى وتحديد المستويات الاشعاعية وتؤخذ منها عينات تشمل معظم مكونات البيئة والسلسلة الغذائية وتجمع على فترات معينة وتجرى عليها القياسات اللازمة لتقدير كميات النويدات المشعة الموجودة بها ونوعياتها. وبمتابعة هذه المستويات يمكن تحديد أى تلوث إشعاعى ومن ثم

القيام بالتدخل الوقائى اللازم. كثير من دول العالم لديها مثل هـذه الشـبكات، والتى يجب أن تعمم دوليًا.

7-10 ملخص:

إن الطاقة النووية بتقنيتها المتاحة تعد بديلاً قويًا لمصادر الطاقة الناتجة عـن الوقود الأحفورى وخصوصا فى ظل تنامى الوعى البيئي، وحتمية نضـوب الوقود الأحفورى، مع إمكانية الاستفادة من النفـط مثـلا فـى الأغـراض الصناعية. كما أن الطاقة النووية تنافس مصادر الطاقة الأخـرى المتاحـة لتوفير الطاقة لغرض تحلية مياه البحر، وعليه فإن إنشـاء محطـات نوويـة بالتوازى مع محطات القدرة التقليدية موضوع جدير بالاهتمـام. وحيـث إن الكلفة المالية لإنشاء محطات نووية ذات قدرة كبيرة قد لا تمكن بعض الدول من إدخالها ضمن ميزانية مصروفاتها، فإن الاتجاه الحديث لبنـاء محطـات صغيرة يعد مشجعا لمثل هذه الدول. وما التوسع الحديث فى استخدام الطاقـة النووية من جانبها الآخر المتمثل فى النظائر المشعة، إلا دليـل آخـر علـى استئناس الطاقة النووية، فى ظل التحوطات الأمنية اللازمة لحماية الإنسـان وبيئته.

المراجع

1- Irving G.Kaplan , Nuclear Physics, 2nd ed. Addison - Wesley , 1964.

2- G.R. Choppin and J.Rydberg, Nuclear Chemistry, Theory and Application ,Pergamon Press, 1980.

3- Paul A. Tipler, Foundations of Modern Physics ,4th ed.Worth Publishers, 1973.

4- A.R.Foster and R.L.Wright,Jr., Basic Nuclear Engineering, 3rd ed. Allyn and Bacon, 1977.

5- Masterton, Slowinski, Chemical Principles ,3rd. ed. Saunders, 1973.

6- G.Shortley, Dudley Williams, Elements of Physics, Prentice Hall, 1971.

7- Stephen W.Hawking, "A Brief History of Time", Bantam Books ,1992.

8- C.M.Lederer and V.S.Shirley (editors), Table of Isotopes, 7th ed. , John Wiley&Sons, Inc.,1978.

9- James J. Duderstadt, " Nuclear Power", Marcel Dekker Inc., 1979.

10- Lamarsh, " Nuclear Reactor Theory", Addison Wesley, 1972.

11- Benedict,Pigford,and Levi ,"Nuclear Chemical Engineering" , McGraw Hill , 1981.

12- Harold Suzu , Archeticture of Sixth Generation of Computers : Neural Network Machines, Supercomputers, and Optical Data Bases, 1993.

13- V.Thomas Dock, " Structured Fortran IV Programming", West, 1979.

14- Haissinsky ,"Nuclear Chemistry and its Applications" , Addison Wesley, 1964.

15- William J.Price , Nuclear Radiation Detection, 2ed Edition, McGraw-Hill, Inc. , 1964 .

16- N.G.Gusev,and P.P. Dmtriev, Quantum Radiation of Radioactive Nuclides, A Data Handbook, Pergamon Press,1979.

17- Jacob Millman, and Christos Halkias, Integrated Electronics: Analogue and digital circuits and systems , McGraw Hill, 1972.

18- David Hetrich, "Dynamics of Nuclear Reactors", Chicago, 1971.

19- R.J.Blin-Stoyle,Nuclear and Particle Physics,Chapman and Hall,1992.

20- M.M.El-Wakil, Nuclear Power Engineering, McGraw Hill, 1962.

21 - J.R.Lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering, Addison Wesley,1975.

22 - W.E.Meyerhof, Elements of Nuclear Physics, McGraw-Hill, 1967.

23- هينز ر. باجلز " رموز الكون : الفيزياء الكمية كلغة للطبيعة" ، ترجمة د. محمد عبد الله البيومى، الدار الدولية للنشر والتوزيع ، القاهرة ، الطبعة الثانية، 1989.

24- " التقويم الفنى والاقتصادى لإنتاج المياه العذبة عن طريق تحلية مياه البحر باستخدام الطاقة النووية والوسائل الأخرى" الوكالة الدولية للطاقة الذرية ، IAEA-TECDOC-666 ، إبريل 1994.

25- د. مريم عتيق ود.محمد الدغمة، دليل المعمل فى العلوم النووية، منشورات جامعة الفاتح 1992.

26- كتيب المؤتمر العربى الثانى للاستخدامات السلمية للطاقة الذرية الجزء الأول، أكتوبر 1995.

27- عبد المنعم الشريك ، محاظرة خاصة بمركز البحوث النووية بخصوص التطبيقات الصناعية لتغطية المواد ببلورات فى صورتها النانونية 1996/1/28.

28- وجدى الرتيمى " الطاقة النووية بين القدر والحذر" المؤتمر الوطنى الأول للمهندسين، مصراتة، 1998.

ملحق الكتل الذرية

جدول بيانات الكتل الذرية لبعض الذرات المختارة

Name	amu الكتلة	الرمز	Z	الإسم
Neutron	1.00866520	${}_0^1n$		النيوترون
Hydrogen	1.00782519	* ${}^1H$	1	الهيدروجين
Deutrium	2.01410222	${}^2H$	1	الديوتيريوم
Tritium	3.01604971	${}^3H$	1	التريتيوم
Helium	3.01602973	${}^3He$	2	هيليوم
	4.00260312	* ${}^4He$		
Lithium	6.0151247	${}^6Li$	3	ليثيوم
	7.0160039	* ${}^7Li$		
Beryllium	9.0121855	${}^9Be$	4	بريليوم
Boron	10.0129388	${}^{10}B$	5	بورون
	11.0093053	* ${}^{11}B$		
Carbon	11.0114317	${}^{11}C$	6	كربون
	12.0000000	* ${}^{12}C$		
	13.003354	${}^{13}C$		
	14.00324197	${}^{14}C$		
Nitrogen	13.0057384	${}^{13}N$	7	نيتروجين
	14.00307439	* ${}^{14}N$		
	15.0001077	${}^{15}N$		
	16.0061033	${}^{16}N$		
Oxygen	15.0030703	${}^{15}O$	8	أكسجين
	15.9949150	* ${}^{16}O$		
	16.9991329	${}^{17}O$		
	17.9991600	${}^{18}O$		

Fluorine	18.9984046	^{19}F	9	فلورين
Neon	19.9924405	^{20}Ne	10	نيون
Sodium	21.9944366	^{22}Na	11	صوديوم
	22.9897707	^{23}Na		
	23.9909623	^{24}Na		
	24.989955	^{25}Na		
Magnesium	22.994125	^{23}Mg	12	ماغنيسيوم
	23.9850417	* ^{24}Mg		
	24.985839	^{25}Mg		
	25.982593	^{26}Mg		
Aluminum	25.9868909	^{26}Al	13	الومنيوم
	26.9815389	$^{*27}Al$		
	27.9819047	^{28}Al		
Silicon	27.9769292	* ^{28}Si	14	سيليكون
	28.9764958	^{29}Si		
Phosphorus	30.9737647	^{31}P	15	فسفور
Sulfur	31.9720737	^{32}S	16	كبريت
Clorine	34.9688511	^{35}Cl	17	كلور
Argon	39.9623842	^{40}Ar	18	أرجون
Potassium	38.9637101	^{39}K	19	بوتاسيوم
Calciun	39.9625889	^{40}Ca	20	كالسيوم
Scandium	44.955918	^{45}Sc	21	سكانديوم
Titanium	47.947950	^{48}Ti	22	تيتانيوم
Vanadium	50.943961	^{51}V	23	فاناديوم
Chromium	51.940513	^{52}Cr	24	كروميوم
Manganese	54.9380503	^{55}Mn	25	مانجنيز
Iron	55.934936	^{56}Fe	26	الحديد
Cobalt	58.933189	^{59}Co	27	كوبلت

Nickel	57.935342	^{58}Ni	28	النيكل
Copper	62.929592	^{63}Cu	29	النحاس
Zinc	63.929145	^{64}Zn	30	الزنك
Gallium	68.925574	^{69}Ga	31	جاليوم
Germanium	73.921180	^{74}Ge	32	جرمانيوم
Arsenic	74.9215964	^{75}As	33	أرسينك
Selenium	79.916527	^{80}Se	34	سيلينيوم
Bromine	78.918329	^{79}Br	35	بروم
Krypton	83.911503	^{84}Kr	36	كريبتون
Rubidium	84.911800	^{85}Rb	37	روبيديوم
Strontium	87.905641	^{88}Sr	38	سترونتيوم
Yttrium	88.905871	^{89}Y	39	يتريوم
Zirconium	89.904699	^{90}Zr	40	زركونيوم
Niobium	92.906382	^{93}Nb	41	نيوبيوم
Molybdenum	94.905839	^{95}Mo	42	موليبيدنيوم
	97.905408	$^{*98}Mo$		
Technetium	96.90634	$^{**\ 97}Tc$	43	تيكنيتيوم
Ruthenium	101.904347	^{102}Ru	44	روثينيوم
Rhodium	102.905511	^{103}Rh	45	روديوم
Palladium	105.903479	^{106}Pd	46	بالديوم
Silver	106.905094	^{107}Ag	47	الفضة
Cadmium	113.903360	^{114}Cd	48	كادميوم
Indium	114.903871	^{115}In	49	إنديوم
Tin	119.902198	^{120}Sn	50	الخارصين
Antimony	120.903816	^{121}Sb	51	أنتيمون
Tellurium	129.906238	^{130}Te	52	تيلليوريوم
Iodine	126.904469	^{127}I	53	أيود
Xenon	131.904161	^{132}Xe	54	زينون

Cesium	132.905355	^{133}Cs	55	سيزيوم
Barium	137.905000	^{138}Ba	56	باريوم
Lanthanum	138.906140	^{139}La	57	لانثانوم
Cerium	139.905392	^{140}Ce	58	سيريوم
Praseodymium	140.907596	^{141}Pr	59	براسيوديميوم
Neodymium	141.907663	^{142}Nd	60	نيوديميوم
Promethium	146.915108	$^{**147}Pm$	61	بروميثيوم
Samarium	151.919756	^{152}Sm	62	ساميريوم
Europium	152.921242	^{153}Eu	63	يوربيوم
Gadolinium	157.924178	^{158}Gd	64	جادولينيوم
Terbium	158.925351	^{159}Tb	65	تيربيوم
Dysprosium	163.929200	^{164}Dy	66	ديسبروسيوم
Holmium	164.930421	^{165}Ho	67	هولميوم
Erbium	167.932383	^{168}Er	68	إربيوم
Thulium	168.934245	^{169}Tm	69	ثوليوم
Ytterbium	173.938740	^{174}Yb	70	يتربيوم
Lutecium	174.940640	^{175}Lu	71	لوتيسيوم
Hafnium	179.946820	^{180}Hf	72	هافنيوم
Tantalum	180.948007	^{181}Ta	73	تانتالوم
Tungsten	183.951025	^{184}W	74	تنجستون
Rhenium	186.955833	^{187}Re	75	رينيوم
Osmium	191.961450	^{192}Os	76	أوزميوم
Iridium	192.963012	^{193}Ir	77	إيريديوم
Platinum	194.964813	^{195}Pt	78	بلاتينيوم
Gold	196.966541	^{197}Au	79	الذهب
Mercury	201.970642	^{202}Hg	80	الزئبق
Thallium	204.974442	^{205}Tl	81	الثاليوم
Lead	207.976650	^{208}Pb	82	الرصاص

Bismuth	208.980394	^{209}Bi	83	بزموث
Polonium	208.982426	$^{**209}Po$	84	بولونيوم
Astatine	217.004648	^{217}At	85	أستاتين
Radon	222.017531	$^{**222}Rn$	86	رادون
Francium	223.019736	$^{**223}Fr$	87	فرانسيوم
Radium	226.02536	$^{**226}Ra$	88	راديوم
Actinium	227.027753	$^{**227}Ac$	89	أكتينيوم
Thorium	232.038124	^{232}Th	90	ثوريوم
Protactinium	231.035877	^{231}Pa	91	بروتاكتينيوم
Uranium	231.03627	^{231}U	92	يورانيوم
	232.037168	^{232}U		
	233.039522	^{233}U		
	234.040904	^{234}U		
	235.043915	^{235}U		
	236.045637	^{236}U		
	237.048608	^{237}U		
	238.05077	$^{*238}U$		
	239.05430	^{239}U		
	240.056594	^{240}U		
Neptunium	236.046624	^{236m}Np	93	نبتنيوم
Plutonium	244.0641	$^{**244}Pu$	94	بلوتونيوم
	242.058725	^{242}Pu		
	239.052146	^{239}Pu		
	240.053882	^{240}Pu		
Americium	243.061367	$^{**243}Am$	95	امريسيوم
Curium	247.07028	$^{**247}Cm$	96	كيوريوم
Berkelium	247.07026	$^{**247}Bk$	97	بيركيليوم
Californium	251.079260	$^{**251}Cf$	98	كاليفورنيوم

Einsteinium	253.08473	^{253}Es**	99	اينشتانيوم
Fermium	255.08964	^{255}Fm**	100	فيرميوم
Mendelevium		$^{[256]}Md$	101	ماندليفيوم
Nobelium		$^{[253]}No$	102	نوبيليوم
Lawrencium		$^{[257]}Lr$	103	لورانسيوم
		--	104	
		--	105	
		--	106	

*الأكثر وفرة طبيعيا ** الأكبر عمر النصف

كتلة الإلكترون=0.000549 amu ومن ثم يمكن حساب الكتل النووية بخصم كتلة الإلكترونات من الكتل الذرية المذكورة بالجدول.

ملحق الثوابت النووية والفيزيائية

CONVERSION FACTORS معاملات تحويل

Unit الوحدة	Equivalent To تناظر
1amu	$1.6605655 \times 10^{-24}$ gram
1 eV	1.602177×10^{-12} erg 11606 degree K
1 Bar	10^5 pascals (nt/m^2) 10^6 dyne/cm^2 0.98687 atmospheres 0.068948 PSI
1 kt	10^{12} calories 4.19×10^{12} joules (4.19×10^{19} ergs) 2.62×10^{31} eV (2.62×10^{25} MeV) fission of 0.241 moles of material (1.45×10^{23} nuclei) fission of approx. 57 g of material 1.16×10^6 kilowatt-hrs 3.97×10^9 BTU
1 calorie	4.1868 J

تقريبات لمحتوى الطاقة Convenient Energy Content Approximations

Fission of U-235: 17.6 kt/kg

Fission of Pu-239: 17.3 kt/kg

Fusion of pure deuterium: 82.2 kt/kg

Total conversion of matter to energy: 21.47 Mt/kg

Fission of 1.11 g U-235: 1 megawatt-day (thermal)

وحدات مهمة لقياس الإشعاع

Important Units of Radiation Measurements

المقاس	الكمية	الوحدة (الرمز)
الفاعلية الإشعاعية Activity (A)	1 disintegration/sec	Becquerel (Bq)
	3.7×10^{10} disintegration/sec	curie (Ci)
الجرعة الممتصة Absorbed Radiation Dose (D)	1 J/Kg	Gray (Gy)
	100 erg/g	rad
الجرعة المكافئة Equivalent Dose (H)	$H=D \cdot Q^{+}$	Sievert (Sv)
التأثير البيولوجي للإشعاع Radiation Biological effect	RBE	rem

+ معامل النوعية Quality factor Q

Physical Constants ثوابت فيزيائية

Value القيمة	Symbol الرمز	Quantity الكمية
$2.99792458 \times 10^{10}$ cm/sec	c	سرعة الضوء Speed of Light in Vacuum
6.62608×10^{-27} erg-sec	h	ثابت بلانك Planck Constant
6.02214×10^{23} atom/mole	N_{AV}	عدد افوجادرو Avogadro Constant
1.3806×10^{-16} erg/K	k	ثابت بولتزمان Boltzmann Constant

بعض المواصفات الفيزيائية والنووية لبعض النوى[+]

الهيدروجين Hydrogen

- Atomic number: 1 العدد الذرى
- Molar volume: 13.1 cm^3/mole (solid, 13 K) الحجم المولارى
- Density: 0.0763 (solid, 13 K, natural hydrogen) الكثافة
- Melting point: 13.96 K (natural hydrogen) نقطة الانصهار
- Boiling point: 20.39 K نقطة الغليان

$$^{1}_{1}H$$

- Atomic Mass: 1.007825032 (amu) الكتلة الذرية
- Stable Isotope نظير مستقر
- Atomic Percent Abundance: 99.985% الوفرة النسبية
- Magnetic Moment العزم المغناطيسي

  2.7928 nuclear magnetons
- Spin: 1/2+ اللف (المغزلية)

$^{2}_{1}H$ (Deuterium) الديوتيريوم

- Atomic Mass: 2.014101778 (amu) الكتلة الذرية
- Binding Energy: 2224.573 +- 0.002 keV طاقة الترابط
- Stable Isotope نظير مستقر
- Atomic Percent Abundance: 0.015% الوفرة النسبية
- Spin: 1+ اللف (المغزلية)
- Magnetic Moment: العزم المغناطيسي
  0.8574 nuclear magnetons
- Quadrupole Moment: 0.003 barns العزم رباعى القطبية

Uraniumاليورانيوم

- Atomic number: 92 العدد الذرى
- Molar volume: 12.56 cm^3/mole الحجم المولارى
- Density: 18.95 (alpha form, stable to 667.8 C) الكثافة
- Melting point: 1132.2 C (+/- 0.8 C) درجة الانصهار
- Boiling point: 3818 degrees C درجة الغليان
- specific heat 6.65 cal/mole/C (25 C) الحرارة النوعية
- tensile strength 450 MPa قوة الشد

$^{235}_{92}U$ اليورانيوم-235

- Atomic Mass: 235.043923062 +- 0.000002115 (amu) الكتلة الذرية
- Binding Energy: 1783870.285 +- 1.996 keV طاقة الترابط
- Beta Decay Energy: طاقة انحلال بيتا
  E_{β^-}=123.716 +- 0.869 keV
- Atomic Percent Abundance: 0.720% الوفرة النسبية
- Spin: $7/2^-$ اللف (المغزلية)

- Half Life: 7.038E8 Y عمر النصف
- Specific Activity: 2.161E-6 Ci/g الفاعلية النوعية
- Radioisotopic Specific Power: القدرة النوعية النظير
  5.994E-8 W/g
- Primary Mode of Decay: Alpha to Th-231 الانحلال
  Decay Energy: 4.679 MeV طاقة الانحلال
- Spin: 1/2+ اللف (المغزلية)

$^{238}_{92}U$ اليورانيوم-238

- Atomic Mass: الكتلة الذرية
  238.050782583 +- 0.000002126 (amu)
- Binding Energy: 1801694.651 +- 2.006 keV طاقة الترابط
- Beta Decay Energy: E_{β^-}=147.065 +- 1.145 keV طاقة بيتا
- Atomic Percent Abundance: 99.2745% الوفرة النسبية
- HalfLife: 4.468×10^9 yr عمر النصف
- Specific Activity: 3.361E-7 Ci/g الفاعلية النوعية
- Radioisotopic Power: 8.508E-9 W/g القدرة النوعية للنظير
- Primary Mode of Decay: Alpha to Th-234 الانحلال الرئيس
  Decay Energy: 4.270 MeV طاقة الانحلال
- Secondary Mode of Decay: الانحلال الثانوى
  Spontaneous fission
- Spin: 0+ اللف (المغزلية)

Plutonium البلوتونيوم

- Atomic number: 94 العدد الذرى
- Molar volume: 12.061 cm^3/mole الحجم المولارى
- Density: 19.816 (20 C) الكثافة
- Melting point: 639.5 درجة الانصهار
- Boiling point: 3230 C درجة الغليان

$^{239}_{94}Pu$ البلوتونيوم-239

- Atomic Mass: 239.0521565 +- 0.0000021 amu عدد الكتلة
- Binding Energy: 1806921.454 +- 1.998 keV طاقة الترابط
- Beta Decay Energy: E_{β}=802.912 +- 2.011 keV طاقة انحلال بيتا
- Half Life: 24110 Y
- Specific Activity: 0.06203 Ci/g الفاعلية النوعية
- Radioisotopic Power: 0.001929 W/g القدرة النوعية للنظير
- Primary Mode of Decay: Alpha to U-235 الانحلال الرئيس

  Decay Energy: 5.245 MeV
- Secondary Mode of Decay: الانحلال الثانوى

  Spontaneous fission
- Spin: 1/2+ اللف

+http://www.envirolink.org

منتدى إقرأ الثقافي
www.iqra.ahlamontada.com
للكتب (كوردى ,عربي ,فارسي)

مشروع الكتاب الهندسي

تبنى مكتب البحوث والاستشارات الهندسية بكلية الهندسة جامعة الفاتح، رعاية هذا المشروع العلمي الطموح كخطوة أولى لسد بعض النقص في الكتاب الهندسي باللغة العربية، ويأمل أن يجد هذا المشروع الدعم والرعاية من الجهات العامة والخاصة الحريصة على توطين العلوم الهندسية باللغة العربية.

اعتمدت الخطة التنفيذية لهذا المشروع على أساس تكامل الدور العلمي، بداية من مناقشة واعتماد مقترح مشروع الكتاب ومحتواه العلمي من قبل القسم المختص بكلية الهندسة وإحالته الى لجنة المناهج والتعريب بالكلية لاعتماده ككتاب منهجي.

يتولى مكتب البحوث والاستشارات الهندسية متابعة سير عمليات التأليف والإخراج والطباعة ضماناً لمستوى كتاب جامعي مرموق من حيث الشكل والمحتوى.

- **أساسيات الهندسة النووية**
  وجدي محمد الشارف الرتيمي
- **تحليل الدوائر الكهربائية**
  نور الدين محمود الجالي
- **التحليل العددي للمهندسين**
  سعد فضيلة - النفاتي الرويعي
- **الكيمياء العضوية**
  محيي الدين البكوش - المهدي عياد
  محمد الشنطة
- **هندسة الرصف**
  محمد عمران امبارك - محمد خليفة علي

ISBN 9959-816-26-5
9 789959 816269