



أساسيات

الهندسة النووية

منتدى اقرأ الثقافي

WWW.IQRA.AHLAMONTADA.COM

د. وجدي محمد الشارف الرتيمي

أستاذ

قسم الهندسة النووية



منشورات

مكتب البحوث والاستشارات الهندسية



بۆدابهزاندنی چۆرهما کتیب:سەردانی: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ الثَّقَافِي)

لتحميل انواع الكتب راجع: (مُنْتَدَى إِقْرَأِ الثَّقَافِي)

پدای دانیود کتایهای مختلف مراجعه: (منتدی اقرا الثقافی)

www.iqra.ahlamontada.com



www.iqra.ahlamontada.com

للكتب (كوردی ، عربی ، فارسی)

أساسيات الهندسة النووية

أساسيات الهندسة النووية

تأليف

د. وجدي محمد الشارف الرتيمي

أستاذ

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 بأي شكل من الأشكال دون إذن خطي 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 الإبداع الدولي) 9959-816-26-5 ISBN
دار الكتب الوطنية/ بنغازي - ليبيا

مكتب البحوث والاستشارات الهندسية

كلية الهندسة . جامعة الفاتح

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

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

طبع الكتاب بدار الكتاب الجديد المتحدة

إلى والدي محمد الشارف

إلى والدتي حليلة

إلى شقيقي نوري

رحمة الله عليهم وعلى سائر المسلمين

تقديم

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأتي احتفالية كلية الهندسة بجامعة الفاتح بعيدها الأربعين مقرونة بخطوة علمية جادة، تجسدت في مشروع هذا الكتاب الهندسي، 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	
1	<u>الفصل الأول : البناء الإلكتروني للذرة</u> Electronic Structure of an Atom
3	1-1 نظرية بوهر
20	2-1 النظرية الموجية (نظرية دي برولييه وشروود نجر)
32	3-1 الأعداد الكمية
38	4-1 خريطة البناء الإلكتروني للذرة
41	5-1 ملخص
41	6-1 مسائل
43	<u>الفصل الثاني : مكونات و خواص النواة</u> Constituents and Properties of the Nucleus
45	1-2 خواص البنية الذرية والإلكترونية والنوية
48	2-2 فرضيتا البروتون - الإلكترون والبروتون - النيوترون
63	3-2 بعض الخواص النووية
67	4-2 ملخص
67	5-2 مسائل
69	<u>الفصل الثالث : النويات والقوى النووية</u> Nucleons and Nuclear Forces
71	1-3 القوى الأساسية
76	2-3 نظرية الميزونات
79	3-3 الجسيمات عالية الطاقة
88	4-3 ملخص
88	5-3 مسائل

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

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

319	مسائل	7-9
323	<u>الفصل العاشر : الطاقة النووية وتطبيقاتها (نظرة شمولية)</u>	
	Nuclear Energy and Its Applications (An Overview)	
325	تمهيد	1-10
326	السكان والبيئة والتنمية	2-10
332	توليد الطاقة الكهربائية	3-10
334	تحلية المياه	4-10
339	تطبيقات النظائر المشعة	5-10
340	الوقاية من التأثير الإشعاعي	6-10
348	ملخص	7-10
349	<u>المراجع</u>	
353	<u>الملحقات</u>	
353	1. ملحق الكتل الذرية	
359	2. ملحق الثوابت النووية والفيزيائية	



بسم الله الرحمن الرحيم
والصلاة والسلام على محمد رسول الله

أما بعد،

اللغة هي أداة الاتصال بين بنى البشر. والكتابة باللغة الأم تسهم بالضرورة في النهوض بالمجتمع. كما أن الانفجار المعلوماتي الذي نشهده يستلزم وجود آليات لمواكبة الكم الهائل من المعلومات. أما الطرق المعتمدة هي التأليف والترجمة التي يقوم بها الأفراد. والطريقة الأخرى المستحدثة هي الترجمة الآلية والتي تبنتها بعض الدول من بينها روسيا واليابان. وحتى تصل الأخيرة الى مرحلة النضوج، فإنه يجب تبني الأسلوب الأول لغرض نقل المعرفة والتقنية. لذا كان هذا الكتاب مساهمة متواضعة في محاولة لإثراء المكتبة العربية، والله أسأل أن يوفني الى ذلك، إنه نعم المولى ونعم النصير.

الطاقة تعد مصدر حركية الدول، فمتى زاد استهلاكها للطاقة ازدادت رفاهية هذه الدول. وتتعدد مصادر الطاقة، فإمالة الوقود الأحفوري السائل والغاز والصلب وكذلك الوقود النووي 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 فإنه يوجد اتفاق اقتصادي وهناك قلق على أن الطاقة النووية مع الالتزام بالمحافظة على أعلى معايير الأمان والحد من قدرات القدرة النووية تبشر بحل لمشكل الطاقة الكهربائية يتسم بكونه نظيفاً بيئياً وأوفر اقتصادياً. إن العالم مع العقود الأولى للقرن الواحد والعشرين، يهجم نووياً طاقة كهربائية تكفيء حوالي 20% من مجمل الطاقة الكهربائية المنتجة عالمياً، في حين أن بعض الدول مثل فرنسا تنتج نووياً ما يفوق 80% من مجمل طاقتها الكهربائية المنتجة. أما فيما يخص الدول العربية فهي لا تملك الفحم ولكنها تملك النفط ولعل استخدام النفط يكون أجدى اقتصادياً إذا ما استخدم في صناعة البتروكيماويات وكمحروقات لوسائل المواصلات، كما أن الطاقة الشمسية

منظورة تطبيقيا على مستوى محدود متمثل في التطبيقات المنزلية، أما ونحن نتحدث على التطبيقات الشمولية كمصدر طاقة ضخم للمصانع العملاقة والمؤسسات الضخمة كالمستشفيات والمشاريع القومية .. الخ ، فإن البديل الحقيقي والمتوفر تقنيا هو مصدر طاقة الانشطار النووي الذي يجب أن يتبنى إقليميا وقوميا بالتوازي مع مصادر الطاقة الأخرى. لذلك كان هذا الكتاب مدخلا لوضع اللبنة الأساسية لهذا المجال الحيوي محاولا بذلك إنارة شمعة في الطريق أمام راغبي التعرف على أسرار الطاقة النووية.

إن إعداد أى كتاب منهجى لابد وأن يكون نتاج جمع ورصد لتراكم معرفى والذي بالأساس يكون حصيلة إجتهدات السابقين فى حقل المعرفة ذاتها، وعليه فإن المادة العلمية المعروضة فى هذا الكتاب هى مزيج من تجميع هذه المعارف والإضافة إليها 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 أساسيات رئيسة فى مجملها تشكل قاعدة مجال الهندسة النووية والذي يتشكل بنيانه بجدران مصاحبة لهذه الأساسيات متمثلة فى شئ من الكيمياء والإلكترونيات والحراريات لإتمام منظومة المجال المتكاملة. هذا وسيصب جل تركيزنا فى هذا الكتاب على الثلاثة أساسيات والتي هى ذاتها تعد خطأ 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 إماماً مسبقاً بمبادئ الفيزياء والرياضة الحديثة.

وحيث إنه في اللغة العربية ، الجملة الفعلية المتكونة من العناصر الثلاث الفعل والفاعل والمفعول به تكون جملة مفيدة، فبناء على ذلك كانت أساسيات هذا الكتاب، على نفس السياق، هي الفعل (تفاعلات الانشطار النووي) والفاعل (النيوترون) والمفعول به (النواة)، حيث سيتم التجاوز في تسلسل الترتيب، بحيث نبدأ بتناول موضوع النواة ثم موضوع النيوترون ثم موضوع تفاعلات الانشطار النووي.

من خلال هذه الأساسيات نتناول عدة فصول في الفصل الأول نتحدث عن البناء الإلكتروني للذرة، وفي الفصل الثاني عن مكونات وخواص النواة، وفي الفصل الثالث عن النويات والقوى النووية. في الفصل الرابع، نتحدث عن نماذج البناء النووي، وفي الفصل الخامس عن التفاعلات النووية . كما نتناول في الفصل السادس النشاط الإشعاعي. وفي الفصل السابع نتحدث عن النيوترونات بشئ من التفصيل . أما الفصل الثامن فيخص الانشطار النووي، ثم في الفصل التاسع نعرض على منظومات التفاعل الانشطاري. في الفصل العاشر نقدم حوصلة عن الطاقة النووية وتطبيقاتها، ونختتم الكتاب بقائمة للمراجع وكذلك بعض الملاحق اللازمة للحسابات.

لقد كان دور الأستاذة الدكتورة مريم عتيق في مراجعتها العلمية لمادة هذا الكتاب فعالاً جداً ، وذلك لما حضيت به من خبرة مرموقة في تأليف العديد من الكتب المنهجية، ولذلك تم الاسترشاد بجميع تعديلاتها وملاحظاتها. وأنا جد شاكر لها ذلك.

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

الفصل الأول

البناء الإلكتروني للذرة

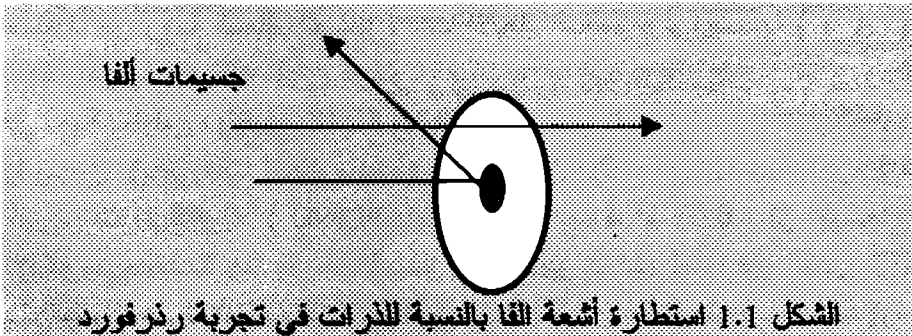
Electronic Structure of Atom

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

1-1 نظرية بوهر : Bohr's Theory

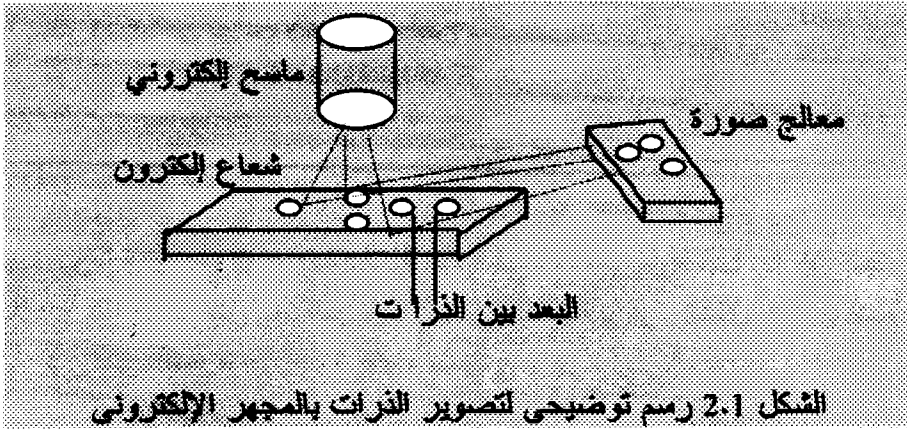
مع بدايات القرن العشرين كان للدراسات المعملية التي قام بها أرנסت رذرفورد وزملاؤه الفضل في إرساء تركيب بنائي جديد للذرة وبالتالي استبعاد نموذج ج.ثومسون المقترح في أواخر القرن التاسع عشر والذي يفيد بأن الذرة عبارة عن إلكترونات مدفونة داخل كرة ذات شحنة موجبة. إن تجربة رذرفورد كانت تشمل تعريض رقائق من الذهب 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 في مركز الذرة ذات شحنة موجبة 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 صعب علي تصديقه في حياتي، فهل كنت لتصدق لو أنك أطلقت قذيفة خمس عشرة بوصة صوب نسيج ورقي وأردت 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 في حدود 10^{-12} سم، و بالتالي يقارب حجم النواة من 10^{-36} سم³. فإذا كانت الكتلة (والتي أغلبيتها في النواة) تقدر بحوالي 10^{-24} جرام وذلك للنوى الخفيفة، فإن ذلك يعنى أن الكثافة تقارب من 10^{12} جرام/سم³. الشكل 1.1 يوضح استطارة الفا.



إذا، بمتابعة التاريخ، نجد أن الفيلسوف ديموكريّس في القرن الخامس قبل الميلاد قد فسّر البناء الأولى للطبيعة بكون أن كل المواد يمكن تقليصها إلى ذرة غير قابلة للانقسام وتحمل مواصفات المادة. وفي العشرينيات من القرن العشرين أنهى رذرفورد التساؤل عن ماهية هذه الذرة إلا أنه لم يتسن لأى أحد أن يلقي بنظرة إلى ذرة بذاتها إلا 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 أوكريديج القومي بأمريكا. لقد قام هذا العالم باقتراح تقنية جديدة وهى التصوير بتباين Z (Z-Contrast Imaging) حيث إن هذه التقنية تعد تطويراً جذرياً فى مجال المجهرية الإلكترونية، فلقد كانت قبل هذه التقنية أساليب صعبة لإصدار الصورة مع صعوبة تفسيرها. إلا أنه باستخدام أسلوب بينيكوك سيتمكن العلماء من النظر إلى التركيب الذرى مباشرة بالمجهر الإلكتروني الذى يميز ذرة ما عن أخرى بناءً على عدد البروتونات أو قيمة "Z". وبالتالي فإنه باستخدام هذه الطريقة يمكن التحليل التفصيلي للمادة التى ستفتح آفاقاً جديدة من أجل خذف 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 بقدرته تمييز قدرها 2.2 انجستروم (1 انجستروم = 10^{-6} شعرة الإنسان = 10^{-8} سم). حيث إن هذه القدرة تفوق بـ 35% المعايير الصناعية. إلا أن سباق الانجستروم لا ينتهى هنا، حيث إن الهدف المطموح للمجهرية هو التعرف على أبعاد تصل إلى 1 \AA . ويتوقع بينيكوك أنه باستخدام تقنيته سيتمكن مستقبلاً من رؤية المعالم الصغيرة ذات الأبعاد المطموح لرؤيتها (1 \AA) 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 وبالتالي فإن الإلكترونات المبعثرة بزوايا كبيرة تستخدم لتخريط (MAPPING) تركيبية المادة. أما إذا كان الشعاع الإلكتروني دقيقاً جداً بدرجة أقل من التباعد بين ذرات المادة فإن التخريط ينتج صور على مستوى الذرات. الشكل 2.1 يمثل رسماً توضيحياً لمفهوم تصوير الذرات بالمجهر الإلكتروني.



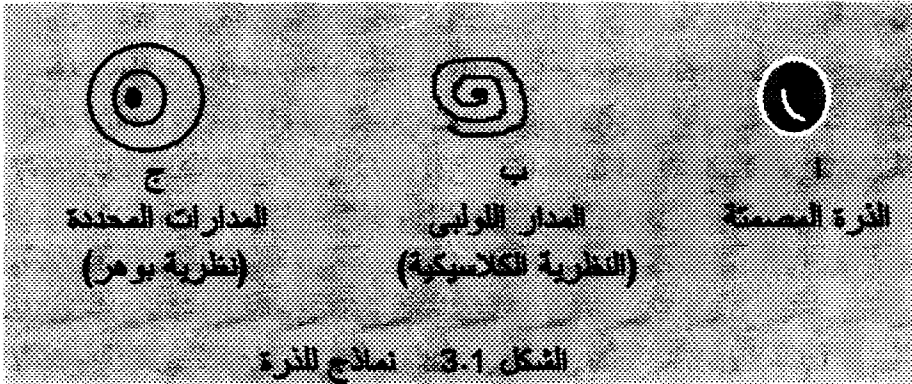
من خلال طرح رذرفورد فإن حجم الذرة يكبر عن حجم النواة بما يزيد عن $(10^9)^3 = 10^{27}$ ضعفاً ومن ثم فإن معظم حجم الذرة فراغ بحيث تدور الإلكترونات تحت تأثير قوتين متساويتين وهما جذب النواة والقوة المركزية الطاردة الناشئة عن دوران الإلكترونات. إن تفسير رذرفورد الكواكبي للذرة لم يكن صحيحاً فالمقارنة بين حركة عالم الكواكب وحركة عالم الذرات مختلفة. لذا، وتبعاً للديناميكا الكهربية فإن أي شحنة مسرعة (تشمل الإلكترون) متحركة في دائرة حول النواة يجب أن تفقد طاقة بالإشعاع وسوف تنقص المنظومة في الطاقة وأخيراً يسقط الإلكترون في النواة. إن طبيعة فقدان الطاقة هذه تجعل الضوء المنبعث له طيف مستمر، ولكنه لوحظ أن الضوء المنبعث مميز Discrete ، مما أدى بالعالم بوهر في سنة 1913 لاستحداث نظريته المشهورة لحل تلك المعضلة.

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

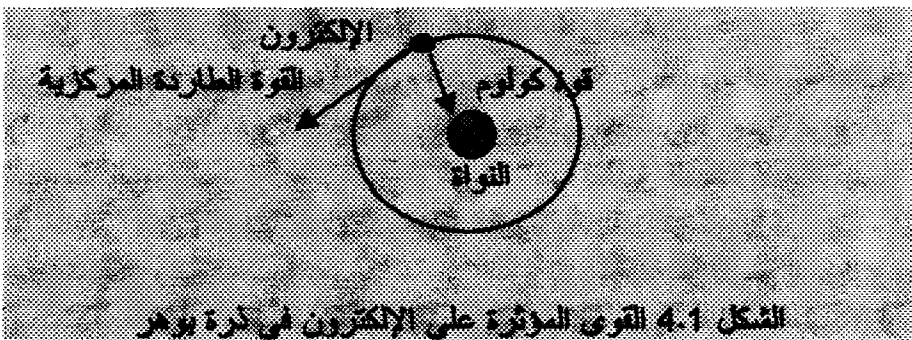
المستقرة. كما أن تردد الإشعاع ν ليس ذلك التردد الدوراني للإلكترونات في أى من المدارين ولكن له علاقة بطاقة كل من المدارين أى أن:

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

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



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



إن القوة الطاردة المركزية يمكن إيجادها باستخدام قانون نيوتن الثاني:

$$F = ma = m r \omega^2 \quad (2.1)$$

حيث m هي الكتلة و $r \omega^2$ هي العجلة الدورانية و r نصف القطر و ω السرعة الزاوية، كما أن القوة الجاذبة الكولومية يعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$F_q = \epsilon \frac{q e}{r^2} \quad (3.1)$$

حيث إن الثابت $(\epsilon = 1/4\pi\epsilon_0)$ يساوي $9 \times 10^9 \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ و e تمثل شحنة الإلكترون وتساوي $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ و q هي شحنة النواة Ze . إن التوازن بين القوتين يؤدي الى استنتاج المعادلة التالية:

$$m r \omega^2 = \epsilon \frac{Z e^2}{r^2} \quad (4.1)$$

وحيث إن السرعة الزاوية تتناسب مع السرعة الخطية من خلال:

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

فإن معادلة 4.1 يمكن كتابتها كما يلي:

$$m \frac{v^2}{r} = \epsilon \frac{Z e^2}{r^2} \quad (6.1)$$

أو بطريقة أخرى:

$$m \frac{v^2}{2} = \epsilon \frac{Z e^2}{2r} \quad (7.1)$$

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

$$U = -\epsilon \frac{Z e^2}{r} \quad (8.1)$$

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

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

إذا وباستخدام 8.1 يمكن استنتاج:

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

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

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

أى أن وباستخدام المعادلة 7.1 فإن:

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

النتيجة سالبة لأن الإلكترون ملازم للنواة في مداره.

المعادلة 12.1 توضح الطاقة الدنيا اللازمة لتحرير الإلكترون ، فى حين أن المعادلة 8.1 تبين الطاقة الكافية بتحرير الإلكترون من الذرة نهائياً . 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:

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

كما أن معادلة ريتز-بالمر Ritz-Balmer وهي المعادلة التي تحدد تردد الخطوط الطيفية Spectral Lines يمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية:

$$v = cv^* = cR \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right] \quad (14.1)$$

حيث إن c سرعة الضوء، و R ثابت ريديبرج Rydberg . المقارنة بين المعادلتين 13.1 و 14.1 تفيد أن أنصاف أقطار المدارات المستقرة يجب أن تتناسب مع ضعف الأعداد الصحيحة، بمعنى:

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

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

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

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

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

حيث إن r_0 يمثل أصغر نصف قطر ممكن. عندما تؤول n إلى عدد كبير جدًا (مالانهاية)، فإن مستويات الطاقة تتقارب جدًا لبعضها البعض ويكون الفارق في الطاقة بين المدارات المتجاورة تلك يقارب من الصفر، ومن ثم فإن تكمية الطاقة يكون تأثيرها ضئيلاً، والنتائج

تتقارب مع نتائج الفيزياء الكلاسيكية، وهذا ما يسمى بمبدأ بوهر للمطابقة. وبمقارنة المعادلة 17.1 والمعادلة 14.1 فإن ثابت ريدبرج R ، لذرة الهيدروجين يعبر عنه بالمعادلة التالية:

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

مثال 1.1

استخدم مبدأ بوهر للمطابقة لإيجاد القيمة العددية لأصغر نصف قطر ذرة الهيدروجين (نصف قطر بوهر) والذي يساوي 0.529 انجستروم .

الحل:

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

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

وحيث إن $n \gg 1$ فإن $2n-1 \sim 2n$ و $n^2(n^2-2n+1) \sim n^4$ وبالتالي فإن المعادلة 1 تساوي $2/n^3$ ، وبالتعويض بهذه القيمة فى المعادلة 17.1 فإن التردد يعطى بالمعادلة التالية:

$$\nu \sim \epsilon \frac{Ze^2}{hr_0 n^3} \quad (2)$$

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

$$\nu_c = \frac{\nu}{2\pi r} \quad (3)$$

وباستخدام المعادلة 6.1 لدلالة عن ν^2 وباستخدام المعادلة 15.1 للتدليل على r فإن

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

والآن وحسب مبدأ المطابقة لبوهر فإن $(v_c^2 = v^2)$ ، لذا وبترتيب المعادلة 2 ومساواتها بالمعادلة 4 يمكننا استنتاج:

$$r_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m Z e^2} \quad (5)$$

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

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \quad (6)$$

وباستخدام قيم الثوابت:

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

$$1/\epsilon_0 = 36\pi \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

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

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

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

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

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

$$a_0 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.529 \text{ \AA}$$

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

مثال 2.1

- أ- اوجد علاقة رياضية لنصف قطر الأيونات ذات الإلكترون الواحد
- ب- اثبت أن طاقة الإلكترون الوحيد للأيون تتناسب طردياً مع Z^2

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

الحل:

١ - باستخدام المعادلة 5 في المثال السابق:

$$r_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m Z e^2} \quad (1)$$

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

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

وبالتالي فإن المدارات العليا تعطى من العلاقة:

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

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

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

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

ج- لإيجاد طاقة التآين فعلى الإلكترون الخروج من المدار الأول ($n=1$) إلى المدار مالانهاية (الإنفكاك من جذب النواة $n=\infty$) ، وبالتالي تكون الطاقة اللازمة للتآين هي:

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

وباستخدام القيم التالية:

$$\epsilon = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

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

$$a_0 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

نجد قيمة E بدلالة Z² هي:

$$E = -\epsilon \frac{e^2}{2a_0} Z^2 = \frac{-9 \times 10^9 \left[\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right] \times (1.6 \times 10^{-19})^2 [\text{C}^2]}{2 \times 0.529 \times 10^{-10} [\text{m}]} Z^2$$

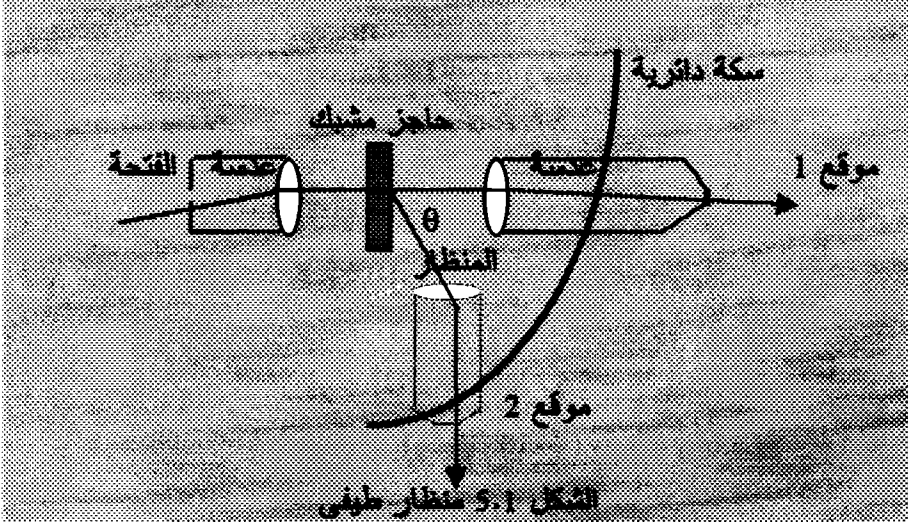
$$E = \frac{-2.17769 \times 10^{-18} [\text{J}]}{1.6 \times 10^{-19} \left[\frac{\text{J}}{\text{eV}} \right]} Z^2$$

$$E = -13.6 Z^2 [\text{eV}] \quad (6)$$

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

طاقة التآين $E = -13.6 Z^2 [\text{eV}]$	Z	الرمز	الذرة
-13.6	1	^1_1H	الهيدروجين
- 54.4	2	$^4_2\text{He}^+$	الهيليوم
- 122.4	3	$^6_3\text{Li}^{++}$	الليثيوم

إن الجهاز المستخدم لدراسة أطياف العناصر هو المنظار الطيفي و الشكل 5.1 يوضح ذلك.



إن الخطوط الطيفية الذرية المراقبة أو المصورة تُرصد إما باستخدام المنظار الطيفي ذي الحاجز المشبك أو المنشور ففي الشكل السابق لو أُستبدل المنظار بألة تصوير لتصوير الطيف فإن الجهاز بالتالي يسمى المصور الطيفي. إن الجهاز بحد ذاته هو آلة يتم بها بعثرة الضوء وله إمكانية قياس الطول الموجي أو التردد للضوء المبعثر. ففي الجهاز الضوء المنبعث من المصدر يشع على الشق وفي حالة ما إذا كان المصدر يعطي ضوءاً أحادي الطول الموجي فإن خيالا واحداً فقط للشق سوف يُرى بالمنظار عند توجيهه بزواوية معينة θ . أما إذا كان المصدر يعطي عدداً من أحادي الأطوال الموجية عند كل زاوية (موقع) للمنظار المتحرك على الشبكة الدائرية، فستتعدد الخيالات المختلفة للشق و تظهر للملاحظ كخطوط ضيقة متوازية، والتي سميت بالخطوط الطيفية. الشكل 6.1 يوضح الخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين.

في سنة 1885 تمكن العالم بالمر من إيجاد علاقة لحساب التردد للخطوط الطيفية لذرة الهيدروجين الظاهرة في منطقة الضوء المرئي والقريبة من منطقة فوق البنفسجية ، والعلاقة هي:

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



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

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

اسم السلسلة	قيمة m	قيم n	المنطقة
Lyman ليمان	1	$2 < n$	فوق البنفسجية
Balmer بالمر	2	$3 < n$	المنطقة المنظورة
Paschen باشن	3	$4 < n$	تحت الحمراء
Brackett براكيت	4	$5 < n$	تحت الحمراء
Pfund بيفنند	5	$6 < n$	تحت الحمراء
Humphrey همفري	6	$7 < n$	ما تحت الحمراء

إن مقارنة معادلة 13.1 والتي تحدد تردد الإلكترون المنتقل من مدار إلى مدار والمعادلة 14.1 والخاصة بخطوط الطيف يحدد العلاقة بين مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين بحيث إن انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقل يتطلب تسريع أشعة (قذفة) ذات طول موجي وتردد معين. الشكل 7.1 يبين مستوى الطاقة لذرة الهيدروجين والسلسلات المرافقة لتسريع أشعة ذات تردد أو طول موجي معين.

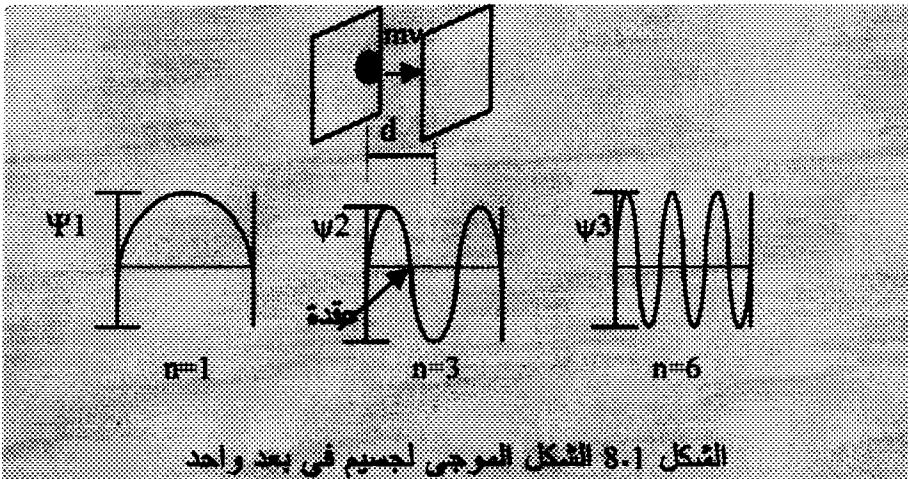


لذا فإن الذرة المحايدة تحوى شحنة موجبة على النواة تكافئها فى المقدار شحنة سالبة تحملها الإلكترونات التي تدور فى الفراغ الهائل حول النواة ولكن كيف تنتظم هذه الإلكترونات. إنها تنتظم فى مدارات بصفة الجسيمات أو كسحابة بصفة الموجية. إن عجز نظرية بوهر عن تفسير ذرات بأكثر من إلكترون أدى بالعلماء إلى التفكير فى نظريات أخرى تساعد على تحديد مستويات الطاقة فى الذرات والجزئيات فى سنة 1924 قام فيزيائى شاب يدعى لويس دى بروليه باقتراح الخاصية الثنائية للتصرف الجسمى للموجة والتصرف الموجى للجسيم، بحيث يكون الطول الموجى المصاحب لجسيم ذا كتلة m ويتحرك بسرعة v معطى بالمعادلة التالية :

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

وهو ما حققه عمليا كل من دايفسيون و جيبيرمر بمعامل بيل للتلفونات بعد بعض من سنوات لاحقة لاقتراح دي بروليه. الشكل الموجي لحركة جسم في بُعد واحد يمكن التعبير عنه بالشكل 8.1 .
 يمكننا ملاحظة أن الطول الموجي λ للموجات المحتملة يمكن تحقيقها من المعادلة التالية:

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



الشكل 8-1 الشكل الموجي لجسيم في بعد واحد

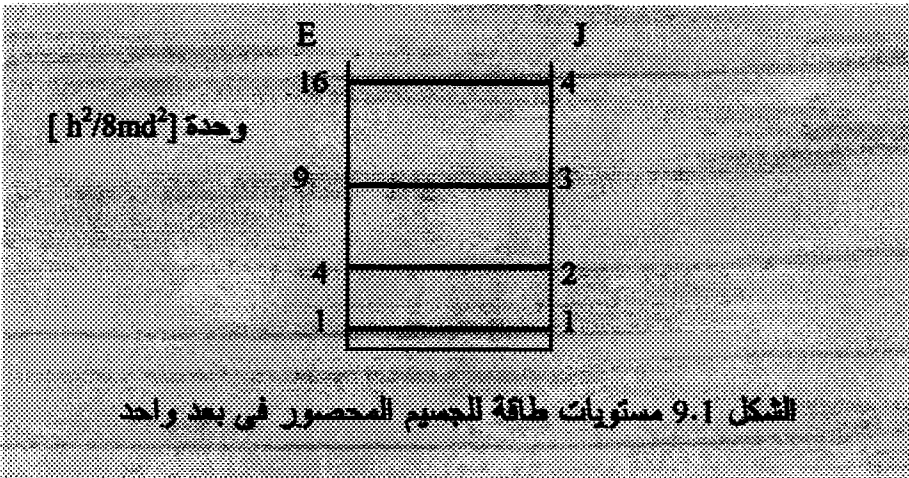
حيث d هي المسافة بين حائطي الصندوق و J هو عدد صحيح يساوي 1، 2، 3، ... هذا العدد J هو عدد كمي للنظام تحت الدراسة وهو نتيجة حتمية لشرط احتواء الموجة في الفضاء المسموح للجسيم وكما نرى فإن التوفيق بين المعادلتين 29.1 و 30.1 يمكن الحصول على التعبير التالي:

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

وهذه المعادلة تقترح شرط كمي لزخم Momentum الجسيم ومن ثم تحديد طاقة الحركة لقيم معينة:

$$E_j = \frac{J^2 h^2}{8md^2} \quad (32.1)$$

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 وبالتالي فمستويات الطاقة المسموحة للجسيم هي كما يعبر عنها بالشكل 9.1.



الشكل 9.1 مستويات طاقة للجسيم المحصور فى بعد واحد

لاحظ أنه كلما تعددت عقد الموجة فإن الطول الموجى يصغر وبالتالي 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 جزيء تقتنى طاقة دنيا ($n=1$) أكبر بكثير من تلك التى تقتنىها 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 لجزء غاز النيتروجين يتحرك في حجرة.

الحل:

بالنسبة لذرة الهيدروجين فإن القوة التي تبقى الإلكترون حول النواة هي قوة كولوم بدلاً من الحائط في مسألة الجسم في الصندوق، كما أن الإلكترون لا يتحرك في بعد أفقي بل يتحرك في دائرة ومن ثم فيمكننا تبني نموذج الجسم في الصندوق باعتبار البعد d يساوي 1 \AA (10^{-8} سم) وباعتبار كتلة الإلكترون m_e تساوي 9.1×10^{-28} جرام. ولحساب الطاقة الدنيا فإن $J=1$. أيضاً بالنسبة لجزء النيتروجين فإن m_N تساوي 4.7×10^{-23} جرام وباعتبار بعد الحجرة حوالي 3 متر ($3 \times 10^{10} \text{ \AA}$) فمن ثم، وباستخدام المعادلة في حالة الطاقة الدنيا فإن:

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

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

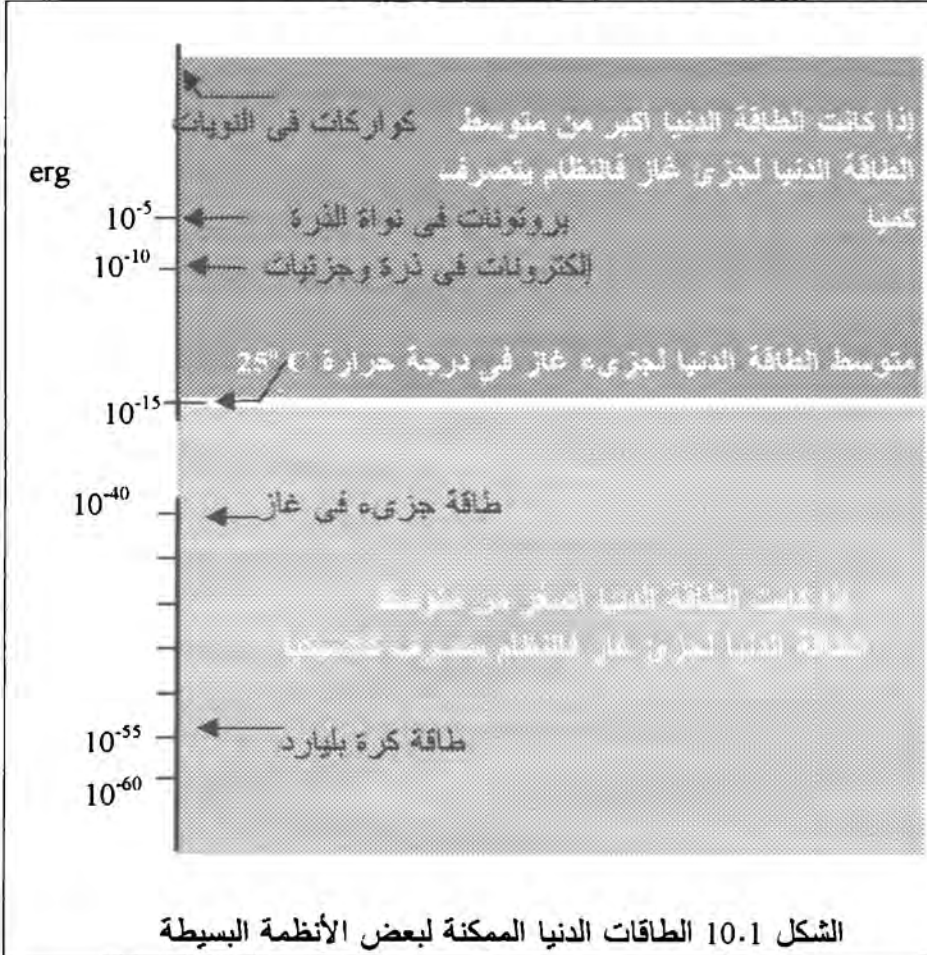
وبالتعويض بالقيم المعطية أعلاه نجد أن:

$$R = 0.5 \times 10^{26}$$

أي أن طاقة الإلكترون تفوق طاقة النيتروجين بمقدار 0.5×10^{26} مرة

الشكل 10.1 يوضح الطاقات الدنيا الممكنة لبعض الأنظمة البسيطة وذلك للمقارنة. من الشكل نلاحظ أن الطاقة الدنيا الإنتقالية لجزء النيتروجين أصغر بكثير من الطاقة المتوسطة لجزء غاز في درجة حرارة الحجرة العادية. هذا يعني أن جزء النيتروجين في حالته الأرضية (G round State) يكتسب طاقة نتيجة التصادم وبالتالي يرتفع العدد الكمي

1 من إلى عدد كبير جدًا وبالتالي فإن احتمالية الحصول على جزيء نيوترونين بطاقة دنيا في عينة نيوترونين تكون ضئيلة جدًا.



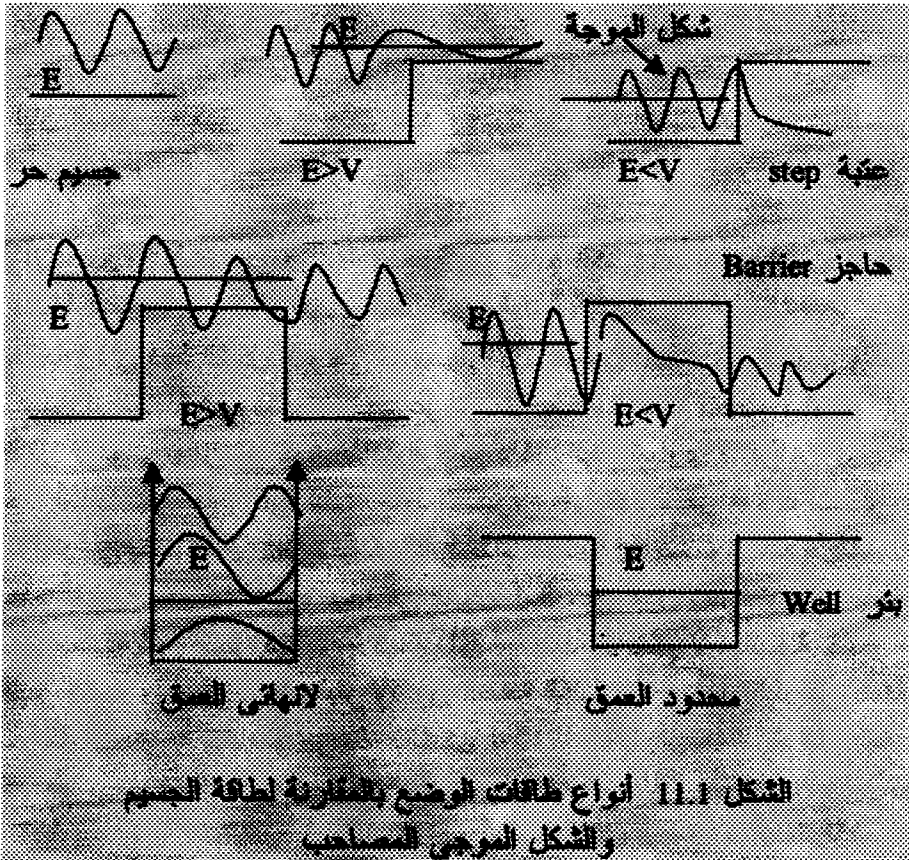
2-1 النظرية الموجية (نظرية دي برولييه وشروندجر):

في سنة 1926 قام أروين شروندجر بتطبيق فكرة دي برولييه و استنتج ما يسمى الآن بمعادلة شروندجر للموجة التي مكنته من تحديد مستويات الطاقة وكذلك الخصائص الموجية لذرة الهيدروجين. ولقد إتضح أن معادلة شروندجر يمكن تطبيقها لذرات أخرى غير الهيدروجين وأيضاً للجزيئات على

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

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

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



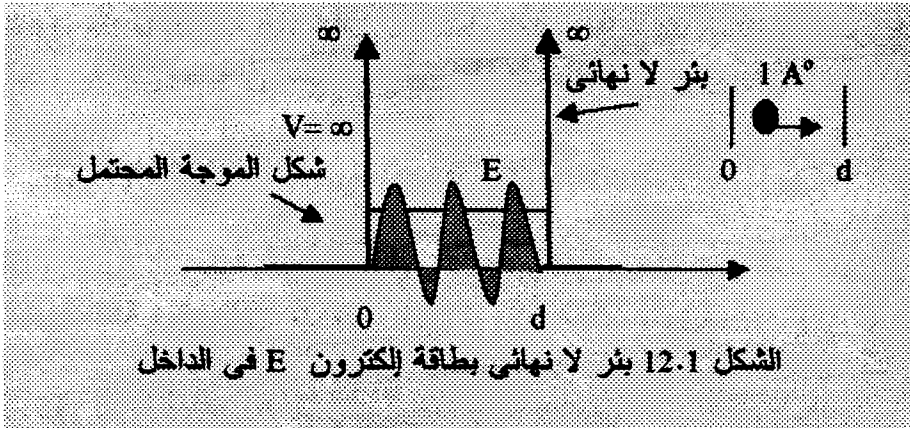
حيث يبين الشكل السابق عددًا من الحالات الممثلة:

- 1- للجسيم الحر الذي يتحرك بطاقة V ولا توجد قوة تؤثر عليه ومن ثم فإن $V=0$.
- 2- حالات تصادم حيث تكون V موجبة ويمكن أن تكون طاقة الوضع في 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 في بئر وقد يكون هذا البئر لانتهائي (لا يمكن للجسيم أن يتواجد خارج البئر) أو محدود العمق.

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

والآن لنعرج قليلا على دراسة العلاقة بين العدد الكمي للمدارات (مستويات الطاقة الرئيسية n والعدد الكمي لعقد الموجة J . سنحاول أن نجد الشكل الموجي لجسيم الإلكترون في ذرة الهيدروجين باستخدام معادلة شرودنجر، ونجد عرض بئر طاقة الوضع بحيث نفترض أن البئر لا نهائي ومن ثم تكون طاقة الوضع داخل البئر تساوي صفرًا. كما أسلفنا ذكره فإن القوة التي تحفظ الإلكترون في مداره هي قوة كولوم وأن الإلكترون يتحرك في دائرة فيمكن استخدام الجسيم في صندوق كمدخل لحلي هذه المسألة وهو ما تم توضيحه في الشكل 8.1 . إن هذا الافتراض يناظر حل معادلة شرودنجر في بئر لانتهائي أي أن طاقة الوضع لا نهائية خارج البئر وتساوي صفر داخل البئر وتكون الطاقة الكلية E داخل البئر هي طاقة حركة الإلكترون كما هو موضح بالشكل 12.1 .

إذا فنتوقع أن حل معادلة شرودنجر لهذه المسألة سيعطى أشكال الموجات السالفة الذكر (باستخدام بعد واحد). ومن ثم فمعادلة شرودنجر (33.1) يمكننا تطبيقها باعتبار V تساوى صفراً داخل البئر لنحصل على الآتى:



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

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 :

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

فى خارج البئر $E \ll V$ (طاقة الوضع لانتهائية) ومن ثم فإن المعادلة هى:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

وبالتالي فإن الحل الخاص لهذه الحالة سيكون:

$$\psi = A \sin(\pi Jx / d) \quad ; J = 1, 2, 3, \dots \quad (41.1)$$

إن هذا الحل الرياضي هو الذي يعبر عن الأشكال الموجية في الشكل 8.1 وذلك حسب قيم J الممثلة لعدد العقد للموجة. ولإيجاد الطاقة التي يحملها

$$E_J = \frac{J^2 h^2}{8m_e d^2} \quad \text{الإلكترون حسب تموجه داخل البئر نستخدم}$$

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

أن طاقة الحالة الأرضية لذرة الهيدروجين هي 13.6 eV - وهي ما تتناظر طاقة 13.6 eV للإلكترون في 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:

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

وبالتعويض بالقيم الثوابت نجد أن $d = 1.66419 \times 10^{-10} \text{ m} \sim 1.664 \text{ \AA}$ ، وبمقارنة هذا العدد مع نصف قطر بوهر 0.529 \AA فإن :

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

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

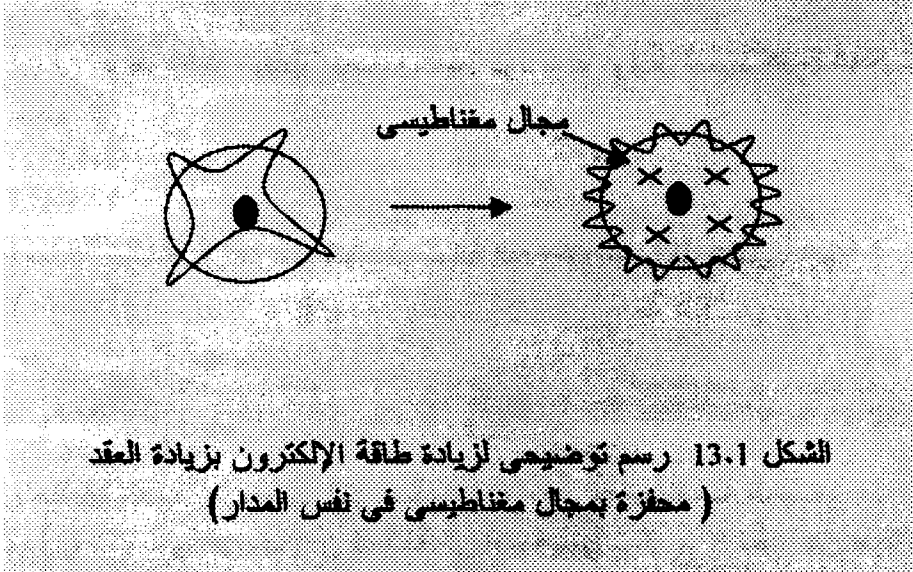
$$d = \pi r_0 \quad (44.1)$$

ويمكننا استنتاج أن عرض البئر فى حالة المدارات العليا لذرة الهيدروجين (باستخدام $r_n = r_0 n^2$) هى :

$$d_n = \pi n^2 r_0 \quad (45.1)$$

لاحظ أن العلاقة الرياضية التى تمثل E_J تعبر عن طاقة الجسيم فى صورته الموجية فى حين أن العلاقة الرياضية التى تمثل E_n تعبر عن طاقة الجسيم فى صورته الجسيمية. لذا نلاحظ أن هناك تكمية للطاقة بالنسبة للجسيم على حسب عدد عقد الموجة ($J-1$) أو عدد قمم الموجة فكلما زادت العقد (زيادة فى التموج) قل طول الموجة معادلة 30.1، وبالتالى زاد التردد ومن ثم يزداد الزخم (معادلة 31.1) الذى يقابله زيادة فى الطاقة. فى حين أن معادلة بوهر تقترح أن التكمية للطاقة مبنية على العدد الكمي n ، فكلما زاد العدد الكمي n المناظر لمستويات الطاقة أو المدارات الرئيسة فى الذرة قلت

طاقة الإلكترون بمعنى أنه كلما كان الإلكترون قريبا من النواة زادت طاقته الحركية ليبقى في ذلك المدار مقاوما للقوة الكولومية التي تحاول جذبها للداخل، ومن ثم فإن العدد الكمي n يختلف عن العدد الكمي l من حيث التفسير الفيزيائي لكل منهما، والذي للتو قد تم تقديمه . فلو أن نفس جسيم الإلكترون إزداد تموجه (تزداد عدد العقد $l-1$) وهو في نفس المدار n ، فلن طاقة الإلكترون تزداد وفق المعادلة 32.1 . يمكننا تخيل ذلك بتحفيز زيادة العقد بوضع الذرة في مجال مغناطيسي، ومن ثم يشكل المجال المغناطيسي قوة جذب إضافية للشحنة داخل المركز تسبب في زيادة حركة الإلكترون للتغلب على ذلك الجذب الإضافي. الشكل 13.1 يوضح رسماً توضيحياً لتقريب المفهوم.



والآن قد يتبادر للذهن بأنه هل هناك علاقة بين العددين الكميين n ، l ؟ . للإجابة على هذا السؤال فلنرجع إلى ما تم استنتاجه في المثال السابق، فقد تم استنتاج العلاقة المهمة وهي بأن عرض البئر d تتناسب طردياً مع نصف محيط الذرة وثابت التناسب هو n^2 (المعادلة 45.1) . فلنحاول أيضاً أن نستنتج العلاقة بين n ، l من خلال مساواة طاقة الإلكترون في ذرة

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

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

وباستخدام المعادلة 45.1 للتعويض بقيمة عرض البئر $d = \pi n^2 r_0$ ،

فإنه يمكن استنتاج (لاحظ أن $\epsilon = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$) :

$$\frac{e^2}{\epsilon_0} = \frac{J^2 h^2}{\pi m r_0 n^2} \quad (47.1)$$

ومن ثم فإن العلاقة بين J ، n هي:

$$\frac{J^2}{n^2} = \frac{m \pi r_0 e^2}{\epsilon_0 h^2} \quad (48.1)$$

وبالتعويض بالقيم:

$$r_0 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} , m_e = 9.1091 \times 10^{-31} \text{ Kg} , e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} , \\ \epsilon_0 = 8.8419 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 , h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ N.m.sec}$$

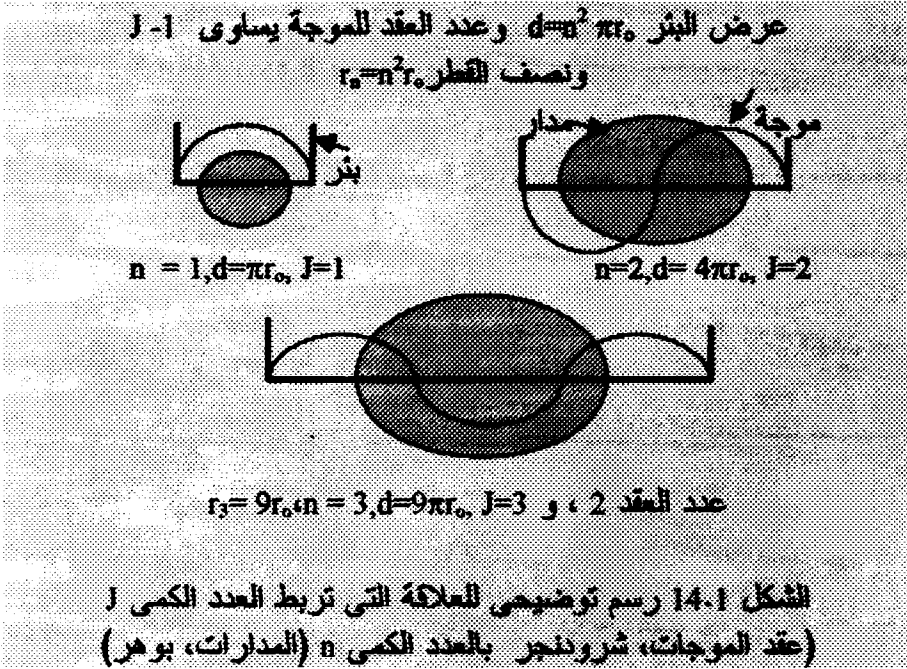
نجد أن $J = n$ ، أى أن:

$$1 = \frac{m \pi r_0 e^2}{\epsilon_0 h^2} \quad (49.1)$$

وهى بحذفها 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 إعتبار أن $J = n$ ، 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 البئر أو عرضه أكثر بقليل من ثلاثة أضعاف نصف قطر المدار المعنى وبالضبط تناظر نصف محيط المدار المعنى:



مثال 4.1

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

الحل:

بوهر إقترح أن طاقة الإلكترون هي :

$$E_n = \epsilon \frac{e^2}{2n^2 r_0} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0 n^2} \quad (1)$$

وبإعادة كتابة المعادلة 49.1 حسب ما يلي:

$$\frac{e^2}{\epsilon_0} = \frac{h^2}{m\pi r_0} \quad (2)$$

وبالتعويض بها في المعادلة 1 نحصل على

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

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

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

وباستخدام العلاقة 45.1

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

نحصل على المطلوب إثباته:

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

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 $d = \pi n^2 r_0$ في المعادلة 32.1 مع اعتبار أن $J=n$ فإنه يمكننا القول بأن :

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

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

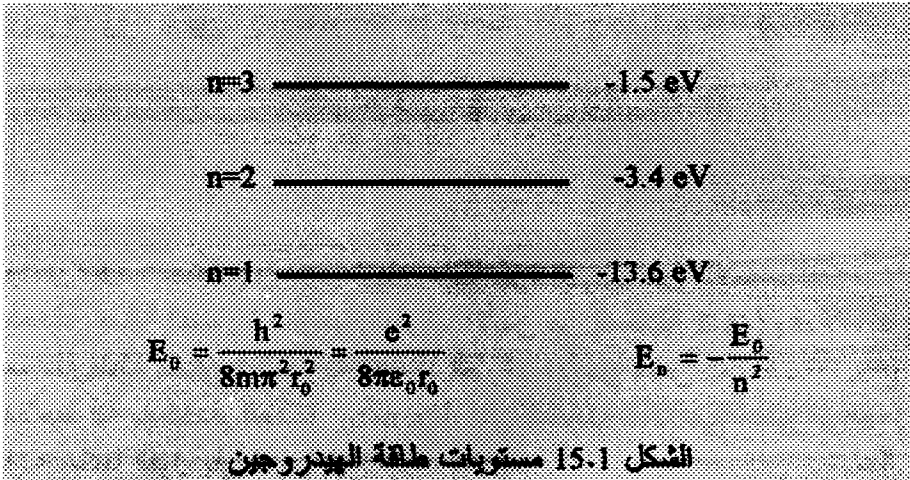
وهي تساوى عدديا ما أستنتجه بوهر أى أن:

$$|E_n| = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0} \frac{1}{n^2} \quad (52.1)$$

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

$$E_0 = \frac{h^2}{8m\pi^2 r_0^2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0} \quad (53.1)$$

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

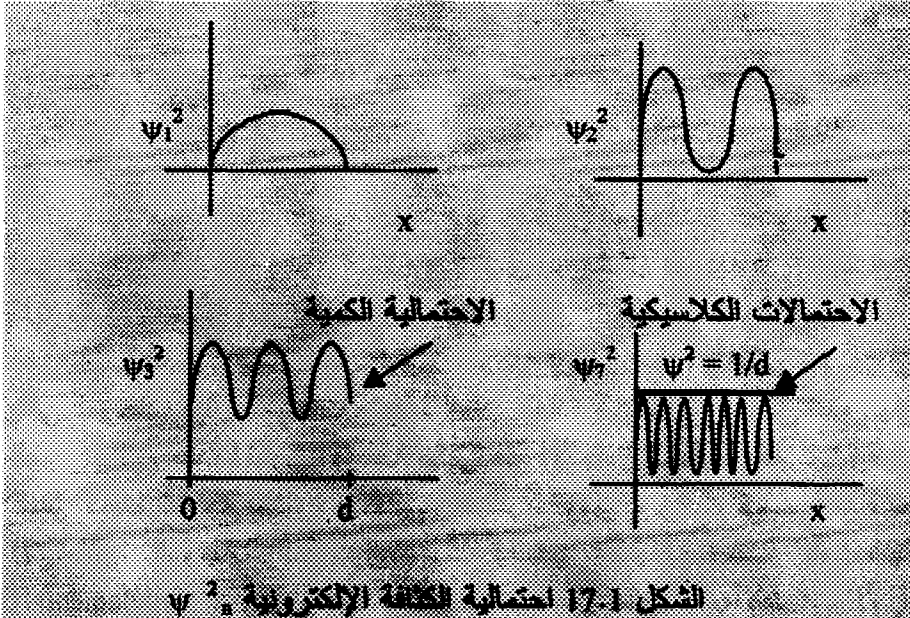


والآن لنخوض معاً في التفسير الموجي للجسيم. إن تفسير دالة الموجة Ψ في حالة معينة هو أن Ψ^2 عند نقطة ما في الفضاء تتناسب مع احتمالية وجود الجسيم عند تلك النقطة. في المسائل التي تحوى إلكترونات يمكننا تفسير قيمة Ψ^2 على كونها تتناسب مع كثافة الشحنة الكهربائية عند تلك

النقطة أو " السحابة الإلكترونية" electron cloud التي تحيط بالنواة في ذرة ما. الشكل 16.1 يوضح سحابة الإلكترون.



كما أن الشكل 17.1 يوضح Ψ^2 لعدد $n=1,2,3,4,\dots$ لحالة بئر لا نهائى



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

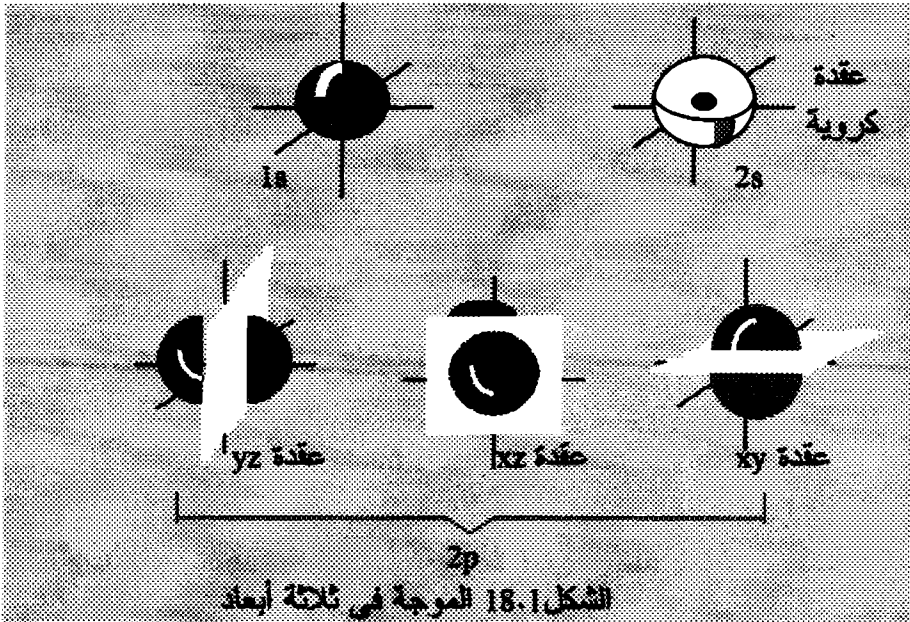
تكون الاحتمالية لها توزيع يحمل عدد J من القمم وبالتالي فعندما يكون العدد J كبيراً جداً تتقارب هذه القمم لبعضها بعضاً. ومع وجود مسافة صغيرة جداً تحويها فإن المتوسط لهذا التوزيع يمكن قياسه وهو ما يوافق التوزيع الكلاسيكي.

1-3 الأعداد الكمية :

والآن لدراسة كيفية توزيع الإلكترونات في الذرة علينا أن نستفيد بنظرية الكم وميكانيكا الموجات. في الوقت الذي قام فيه شرودنجر بحل معادلته لذرة الهيدروجين ومن ثم تحديد نفس مستويات الطاقة التي حددها بوهر من قبله إلا أنه حدد أيضاً الدالات للموجة وكذلك الأعداد الكمية المصاحبة لكل المستويات الممكنة في الذرة. وبالتالي فإن شرودنجر اكتشف بأن الإلكترون في ذرة الهيدروجين يمكن وصفه بثلاثة أعداد كمية والتي تسمى الآن بـ n ، l ، m_l حيث إن العدد الكمي الأساسي n له دور كبير في تحديد طاقة الإلكترون وفي حالة الذرات الأخرى فيتم إضافة عدد كمي آخر وهو m_s وبالتالي يتم وصف الإلكترونات من خلال أربعة أعداد كمية (اسم رباعي لكل إلكترون).

وحتى نفهم هذه الأعداد الكمية فلنناقش مرة أخرى الموجات وخصوصاً تلك التي في الثلاثة أبعاد. راجع الشكل 8.1 الذي يبين شكل الموجة في بعدين . كل الأشكال المبينة تعبر عن موجة واحدة بغض النظر عن درجة الحركة. الموجة في أقصى اليسار تمثل الموجة الواقفة (بدون عقد) ، في حين أن باقي الموجات تمثل الموجات متعددة العقد. العقدة هي النقطة في المحور السيني والتي عندها تكون الإزاحة صفراً في الإتجاه الصادي. كلما زادت العقد كانت الموجة قصيرة وبالتالي زاد التردد ومن ثم زادت قيمة طاقة الارتعاش. الموجة الواقفة بدون عقد يعبر عنها بالموجة الأساسية (Fundamental) ، وفي وجود عقدة واحدة نحصل على النغم الإضافي الأول (Overtone) للموجة الأساسية، وهكذا. . أما الموجات في الثلاثة أبعاد فيمكن بناؤها من خلال الموجة الأساسية، بحيث يمكن الحصول على الموجات ذات الطاقات الأعلى من خلال إدخال العقد. إن العقد في ثلاثة

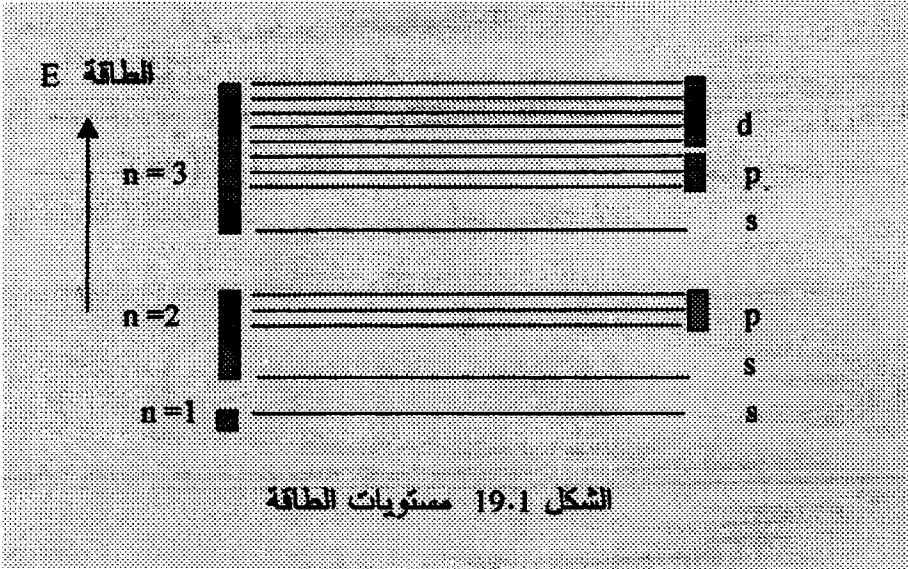
أبعاد يمكن أن تكون كرات، أو مستوى، أو مخاريط . الشكل 18.1 يبين الموجة الأساسية وموجات بعقد . وللحصول على ارتعاشات أكثر في ثلاثة أبعاد يمكن إضافة مزيداً من العقد المستوية. يمكننا ملاحظة أنه بالنسبة للموجة الأساسية تحصلنا على شكل واحد (1 = 12)، وفي حالة النغم الأول وذلك بإضافة عقدة تحصلنا على أربعة أشكال (4 = 22)، وفي حالة النغم الثاني وذلك بإضافة عقدتين نحصل على (9 = 32) تسعة أشكال وهكذا. لذا يمكننا استنتاج أن:



$$\text{عدد الأشكال} = (\text{عدد العقد} + 1) \times 2$$

عدد الأشكال هذه يعبر عن عدد مستويات الطاقة الداخلية لكل مستوى طاقة أساسي n ، وبالتالي فإنه لمستوى الطاقة $n=1$ هناك مستوى داخلي واحد (12)، ومستوى الطاقة الثاني $n=2$ فهناك عدد أربعة مستويات طاقة داخلية (22)، ومستوى الطاقة الثالث $n=3$ فهناك عدد تسعة من المستويات الداخلية للطاقة (32)، ومن ثم فيمكننا استنتاج:
عدد مستويات الطاقة الداخلية = n^2

الشكل 19.1 يوضح مستويات الطاقة المدفونة في كل مستوى أساسي



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 وهي كالتالي:

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

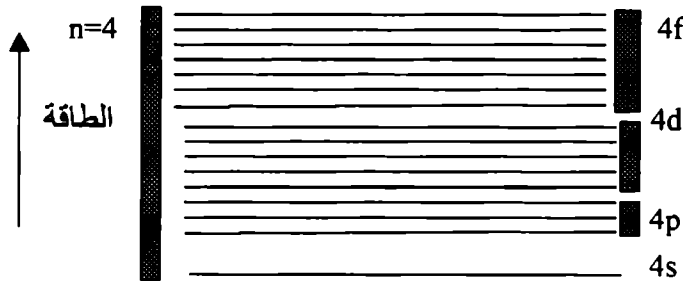
أى مدارات ذات شكل كروي أعطت اسم s وبالتالي فإن الموجة الأساسية ، وهي كروية، لها اسم s ، فى حين أنه لمستوى الطاقة الرئيسى الثانى فإن أحد العقد هي كروية وبالتالي فهذا المدار اسمه s، وباقى العقد ثلاثة مستويات (انظر الشكل 18.1) يُعبر عنهم بمدارات p، وهكذا تتسلسل التسميات الحرفية.

مثال 5.1

ارسم مستويات الطاقة لمستوى الطاقة الرئيس الرابع

الحل :

حيث إن $n=4$ فإن المدارات الفرعية هي $4s, 4p, 4d, 4f$ ، حيث نبدأ الترتيب مثل ذلك الموجود في المستوى الرئيس الثالث وهي تسعة مستويات فرعية وباقي المستويات $16 = 9 - 7$ تسمى بمدارات f و يكون ترتيب المدارات كما هو موضح في الشكل التالي



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

والآن 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 الكمي l بحيث تكون التسمية حسب المناظرة التالية:

$$\begin{array}{cccccccc}
 s & p & d & f & g & h & i & j & k \dots \\
 l = & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \dots
 \end{array}$$

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) هي 1، وعندما $l = 1$ (مدارات p) يكون العدد 3، كما أنه في حالة $l = 2$ (مدارات d) هي 5 مدارات، وهكذا. هذه المدارات الفرعية في ذاتها يمكن إعطاؤها تسمية العدد الكمي m_l حيث يكون عددهم $2l + 1$ ويحملون قيم عددية تتراوح من بين $l, +1, -1$. لذلك بالنسبة لمدارات p فإن $l = 1$ وبالتالي m_l تساوي $2l + 1$ وهي عددياً تساوي 3 وتكون قيمها $+1, 0, -1$. بهذا أمكننا تمييز كل المستويات التي تحمل الإلكترونات. تبقى لنا معرفة أن كل مستوي يمكنه حمل فقط عدد اثنين من الإلكترونات وذلك بسبب مبدأ الإقصاء لباولي Pauli exclusion principal والذي يفيد مايلي:

1- لا يمكن لعدد اثنين من الإلكترونات في نفس الذرة أن يكون لهما نفس الأربعة أعداد الكمية وهي (n, l, m_l, m_s) .

2- إذا احتل إلكترونان نفس المدار، فلا بد 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 في الذرة، وهذه الأعداد تسمى بالأعداد الكمية.

مثال 6.1

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

الحل

لوصف الإلكترونات المعنية لابد من استخدام الأربعة أعداد كمية وهي n, l, m_l, m_s . من المعطيات $n=4$ ، والرزمة f تعني أن $l = 3$ وبالتالي فإن $m_l = 2l + 1 = 7$ هي عدد المدارات وتكون قيمه العددية بين $+3, -3$ ، وكل مدار من هذه المدارات السبعة تحوي إلكترونين بحيث العدد الكمي m_s لهذين الإلكترونين يساوي $+1/2$ أو $-1/2$ وبالتالي فالعدد الكلي للإلكترونات الموجودة بالمدار الرئيس الرابع بالرزمة f هو $2 \times 7 = 14$.

الجدول التالي يبين تفصيلاً وصف للإلكترونات الأربعة عشر

جدول وصف للإلكترونات الأربعة عشر الموجودة في المدار الرئيس الرابع بالترتبة f

n	l	ml	ms
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 في رزم المدارات الفرعية

s p d f g h i j

الحل

الجدول التالي يوضح تفصيليًا حساب عدد الإلكترونات الموجودة في الرزم المدارية المذكورة

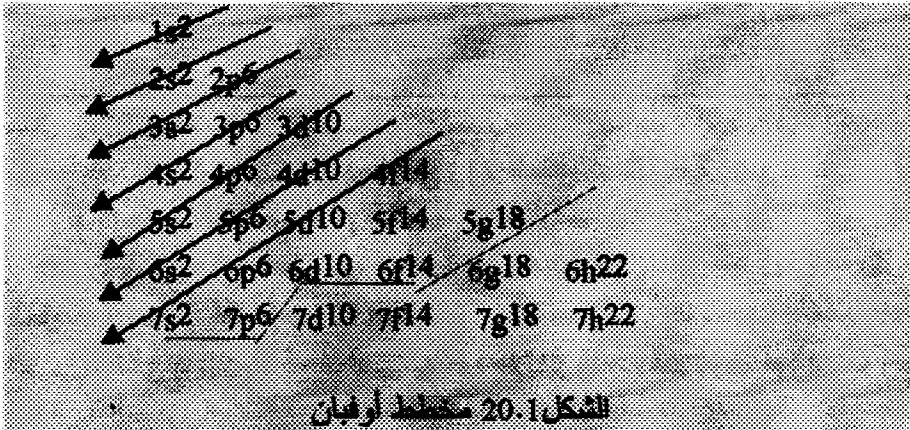
	s	p	d	f	g	h	I	j
l	0	1	2	3	4	5	6	7
$m_l = 2l + 1$	1	3	5	7	9	11	13	15
عدد الإلكترونات								
$2m_l =$	2	6	10	14	18	22	26	30

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

s² p⁶ d¹⁰ f¹⁴ g¹⁸ h²² i²⁶ j³⁰

1-4 خريطة البناء الإلكتروني للذرة :

من المثال السابق وبترتيب العدد الكمي n للحروف الترميزية للزخم المدارية والتي هي مرأسة (superscripted) بعدد الإلكترونات يمكننا إنشاء خريطة لتعبئة الإلكترونات بمدارات أي ذرة وهي ما تسمى بمخطط أوفبان Aufbau diagram، وفيما يلي الشكل 20.1 يبين الخريطة المرغوبة:



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 وهي:

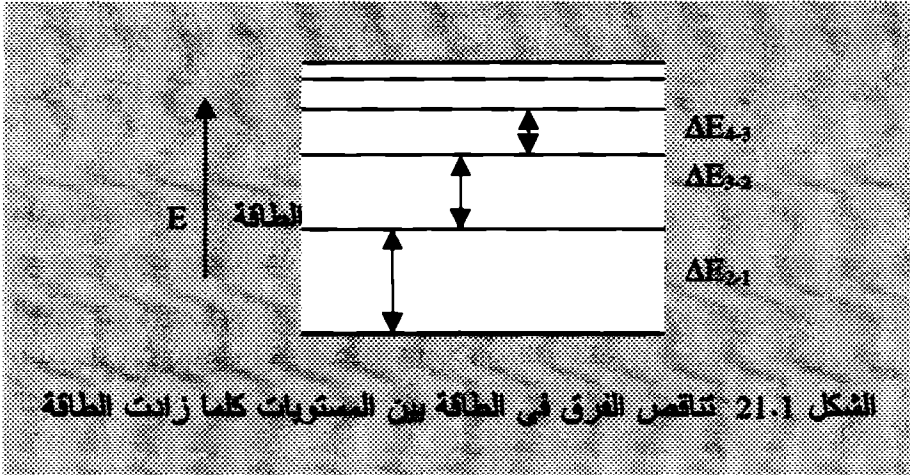
1- في نفس مستوى الطاقة الرئيس يعتبر المدار s في أقل طاقة وتزداد الطاقة تباعاً أي أن:

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

(انظر الشكل التابع لمثال 5.1)

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

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

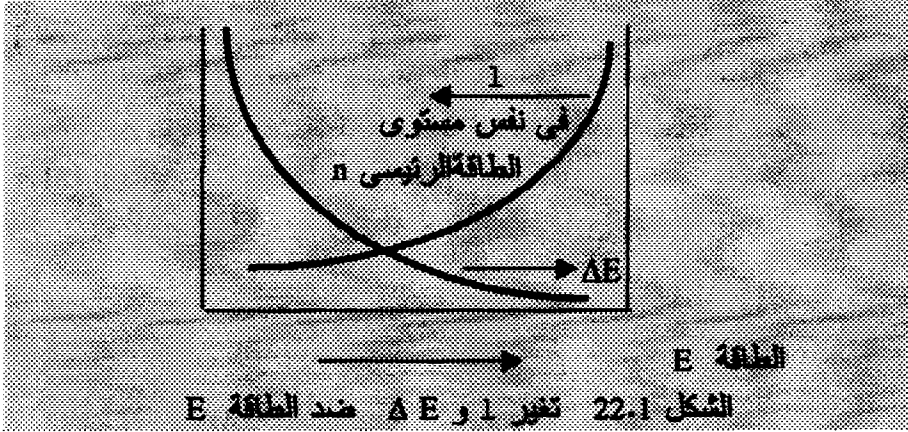


الشكل 22.1 يبين العلاقة بين كل من 1 (نفس المستوى الرئيس للطاقة n) و ΔE ضد الطاقة E . لاحظ تزايد 1 كلما زادت الطاقة، في حين أن ΔE تتناقص بزيادة الطاقة.

3- الإلكترونات تبعاً تباعاً كلما زادت مستويات الطاقة (انظر اتجاه الأسهم بالخريطة مع الترتيب). هذا الشرط يسمى مبدأ أوفبان Aufbau Principle ، وبالتالي فالتعبئة تكون كما يلي:

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

4- كل مدار يحوى إلكترون 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.

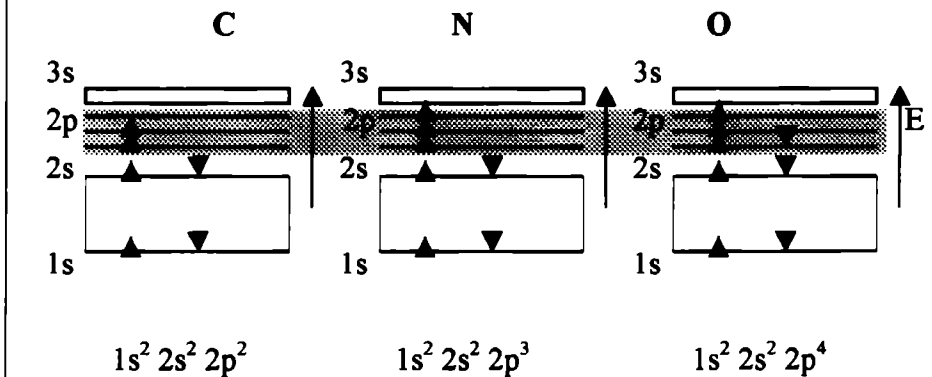


مثال 8.1

عبء بالإلكترونات مدارات كل من ${}^6_6\text{C}$ و ${}^7_7\text{N}$ و ${}^8_8\text{O}$

الحل:

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



▲ العدد الكمي $ms=+1/2$

▼ العدد الكمي $ms=-1/2$

لاحظ أنه قد تحققت الشروط الأربعة:

- 1 - الطاقة تتزايد من أسفل إلى أعلى حسب توزيع العدد الكمي الرئيسي n
- 2 - ΔE تتناقص كلما ازدادت E
- 3 - تحقق مبدأ أوفبان
- 4 - تحقق قانون هوند (في كل رزمة لا يمكن تعبئتها بالإلكترون ثان إلا بعد شغل كل مدارات تلك الرزمة بالإلكترون واحد

5-1 ملخص :

في هذا الفصل تم تناول البناء الإلكتروني للذرة مبتدئين بنظرية بوهر وهي صالحة لتفسير ذرة الهيدروجين أو أيون بالإلكترون واحد في مداره الخارجي. وحيث إن نظرية بوهر فشلت في تفسير البناء الإلكتروني لذرات معقدة ، فلبن ذلك تطلب خروج نظريات جديدة لحل تلك المعضلة. كان الحل في النظرية الموجية والتي أنتجت تسمية رباعية للإلكترون تتمثل فيما يسمى بالأعداد الكمية، والتي تمت مناقشتها بشئ من التفصيل. أيضاً، تم عرض تصميم خريطة بناء التركيب الإلكتروني لأي ذرة، والتي ستكون مدخلا مهماً للبناء النووي للنواة والمتمثل في استنتاج خريطة بناء البروتونات والنيوترونات في النواة من خلال نموذج الأغلفة الذي سيأتي ذكره لاحقاً.

6-1 مسائل :

1.1 - احسب أصغر مدار للإلكترون الوحيد الموجود في ذرة أيون الهيليوم ${}^4_2\text{He}^+$.

(الحل: 0.2645 A°)

2.1 - اثبت بأن تحديد أنصاف أقطار مدارات ذرة الهيدروجين تعطى

$$\cdot a_0 n^2 = r_n$$

- 3.1 - احسب طاقة المستوى $n=1$ في ذرة الهيدروجين.
 4.1 - استنتج معادلة لثابت ريديرج R_0 لذرة الهيدروجين ثم احسب قيمته.
 5.1 - احسب ثابت ريديرج لأيون الهيليوم $^4\text{He}^+$.

(الحل: $R = Z^2 R_0$)

- 6.1 - استنتج معادلة نصف قطر بوهر باستخدام معادلتى E_J و E_n .
 7.1 - اثبت أن الطاقة الدنيا للإلكترون في ذرة الهيدروجين تعطى بإحدى العلاقاتين التاليتين إما

$$E_0 = \frac{h^2}{8m\pi^2 r_0^2} \quad \text{أو} \quad E_0 = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_0}$$

- 8.1 - احسب E_0 لذرة الهيدروجين باستخدام المعادلتين المذكورتين بالمسألة السابقة.

(الحل: 13.6 eV)

- 9.1 - صف جميع الإلكترونات الموجودة في المستوى الرئيس $n=4$
 (4s, 4p, 4d, 4f)

- 10.1 - اكتب التركيب الإلكتروني لذرة Xe ($Z=54$) باستخدام خريطة تعبئة المدارات (مخطط أوفبان).

- 11.1 - اكتب التركيب الإلكتروني لذرة Ta ($Z=73$) باستخدام خريطة تعبئة المدارات.

(الحل: $[\text{Xe}] 6s^2 4f^{14} 5d^3$)



الفصل الثانى

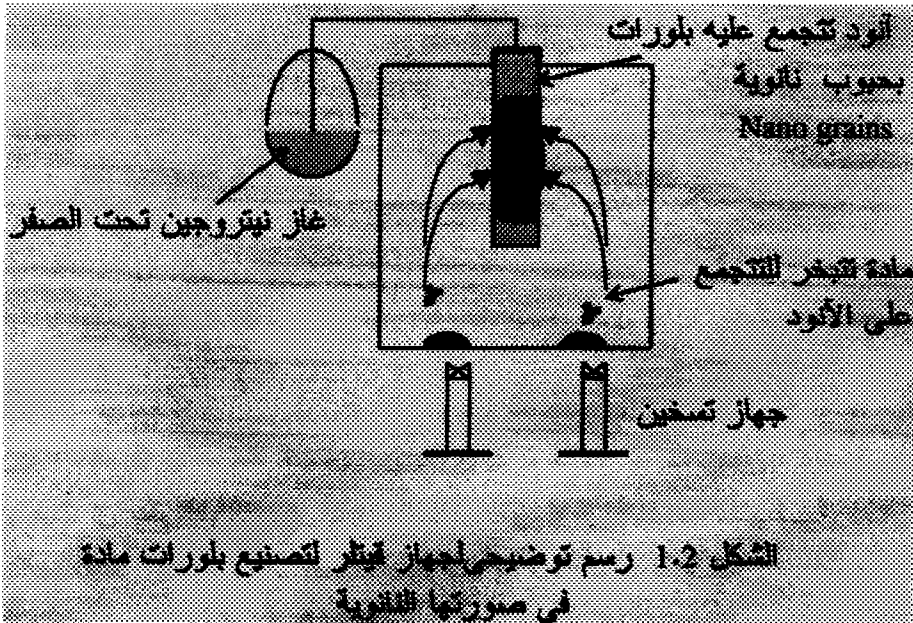
مكونات وخواص النواة

Constituents and Properties of the Nucleus

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

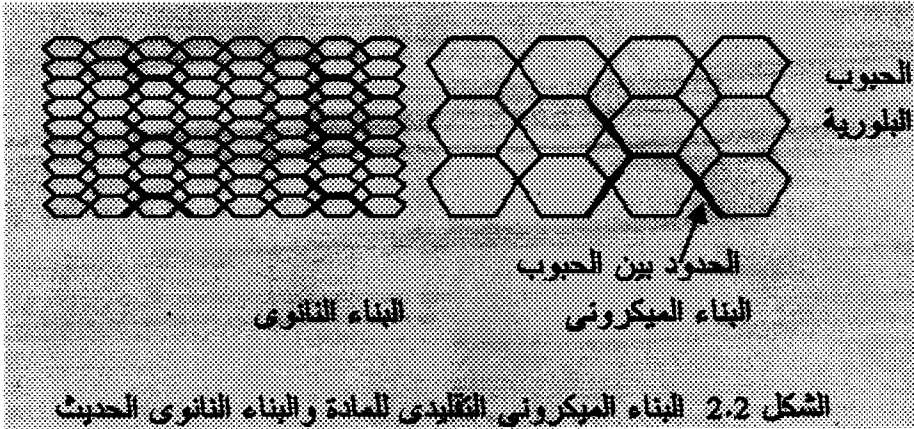
1-2 خواص البنية الذرية والإلكترونية والنووية:

كما نعلم أن علم المواد يهتم بالتركيب الذري للمادة وكيفية تنسيق تلك الذرات في بلورات ودراسة خواص تلك التركيبات. إن مجمل تركيبات تلك المواد في صورها البلورية كانت إلى زمن قريب (الثمانينيات) تتشكل في مجاميع أو حبوب (Grains) ذات أحجام ميكرونية. وخلال جولة استجمامية في منطقة تتساقط عليها ثلوج إكتشف قينتر (Githler) في أوائل الثمانينيات أن الغبار متجمع في تشكيلات على الثلج ولم ينتشر خلال الثلج، وبالتالي خطوت له فكرة إجراء تجارب معملية لتصنيع مواد ذات مجاميع لبلورات أكثر دقة من الميكرونية، وفيما يلي رسم توضيحي للجهاز المعمل الذي أنتج مجاميع أو حبوب دقيقة (nanometer grains) لبلورات المادة:



لقد تم الاهتمام بهذا الاكتشاف مما أدى الباحث إلى تطوير أساليب تصنيع المواد ببلورات في صورتها النانوية ، وعلى سبيل المثال فقد استحدث الشريك وزملاؤه أسلوب التغطية بالبلورات النانوية بالتحليل الكهربى النبضى

(Electrolysis pulse nanocrystalline coating) . هذا المجال الحديث فى علم المواد فتح آفاقاً جديدة لإعادة اكتشاف المواد من جديد، حيث إن النيكل مثلاً فى صورته النانوية له مواصفات 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 وبالتالي 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.



وحيث إن علم المواد يهتم بنسق وتشكيل الذرات فى بناءات متنوعة، فإن علم الكيمياء يتوغل أكثر فى المادة ومن ثم إلى الذرات ذاتها ويتعامل مع السحابات الإلكترونية أو بالإلكترونات فى مداراتها وبالتالي 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 الإلكتروني لذرات المادة وكذلك توليد الطاقة . أما المجال النووى فهو

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

إن دراستنا للنواة من خلال خواصها وتركيبها وتفاعلاتها ستكون أساسيات لتطبيقات مباشرة لتلك المفاهيم، فمثلا دراسة الخواص النووية مثل العزم المغناطيسى (Magnatic moment) ، يمكننا من الدخول في مجال الفصل الليزرى لليورانيوم-238 و اليورانيوم-235 ، أيضا بدراسة تركيبات النواة نجد أن النيوترونات لها مقدرة فائقة في شطر النوى الثقيلة (اليورانيوم مثلا) وبالتالي 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 متوافقا مع الزمن الديناميكي 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) الاصطناعى للنوى
- 4 - المطيافية الضوئية
- 5 - القياس المباشر لبعض الخواص النووية مثل خاصية اللف (Spin) والعزم المغناطيسى

إن المشكل الرئيس في الفيزياء النووية هو التوفيق بين النتائج العملية و التنظير و النمذجة للنوى.

قانون العدد الصحيح لأستون : Aston whole number rule

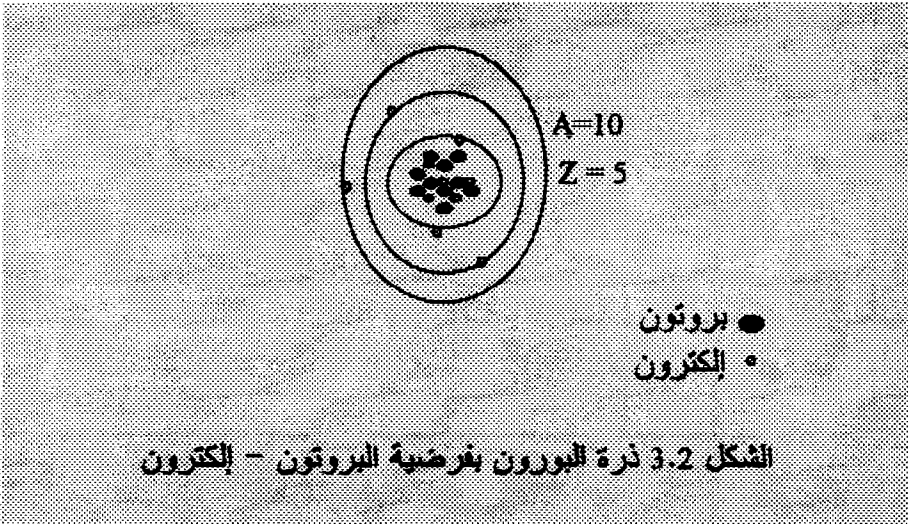
الحقيقة بأن بعض الذرات المشعة تشع جسيمات α و β أدت إلى الإفتراض بأن الذرات متكونة من مكونات ابتدائية. اقترح براوت Prout في سنة 1816 بأن كل الأوزان الذرية هي أعداد صحيحة ، وبأنها يمكن أن تكون مضاعفات صحيحة (Integral multiples) للوزن الذرى للهيدروجين. هذا الإفتراض أهمل عندما اكتشف أن بعض العناصر مكونة من أوزان جزئية مثل الكلور (35.46) والنحاس (63.54). مع القرن العشرين بدأت تظهر تأييدات جديدة لأفكار براوت، عندما اكتشفت النظائر من خلال أبحاث النشاط الإشعاعي. لقد وجد أن معظم العناصر عبارة عن خليط من النظائر، وان الكتل الذرية للنظائر قريبة جدا من أعداد صحيحة. لذلك اقترح أستون قانونه للأعداد الصحيحة " كل الأوزان الذرية قريبة جدا من الأعداد الصحيحة وأن الأوزان الذرية الموجودة بالطرق الكيميائية مسببة بإحتواء نظيرين فأكثر ، كل منهم له وزن ذرى قريب من العدد الصحيح". كثير من العمل المعملى تناول تحليل الجسيمات الموجبة من عدة عناصر، وقد كان أخف جسيم قد أكتشفت فى سياق هذه التجارب هو مايسمى بالبروتون الذى له شحنة موجبة تساوى فى 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 ، كان لزاما أن نفترض بأن النواة تحوى A بروتونات. ولكن إذا كان هذا صحيحا فإن شحنة النواة تكون أيضا A ؛ أى تكون قريبة من الكتلة الذرية وليست

للعدد الذرى Z ، التى هى نصف أو أقل من الكتلة الذرية. وحتى يتم تفسادى هذا الإشكال، فقد افترض 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 كما هو مبين بالشكل 3.2.








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 هاوكينغ 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

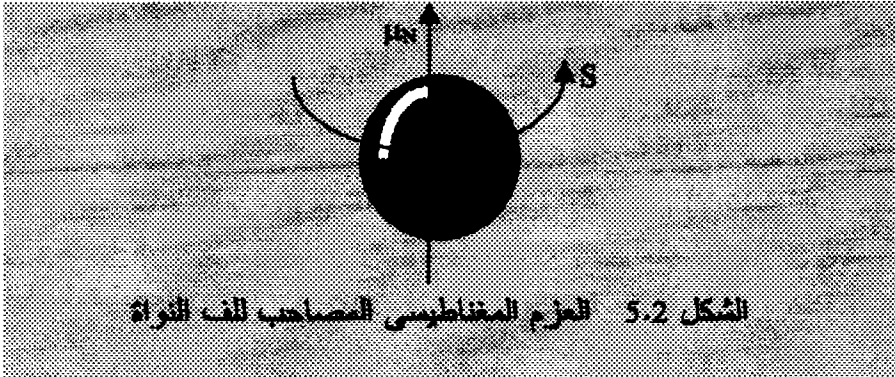
المفهوم	قيمة S	الوصف
	0	إن شكل الكرة دائما يبدو كما هو من أى إتجاه نظرت إليه
	1	هذا السهم يمكننا رؤيته بنفس الشكل إذا لف دورة كاملة
	2	هذا السهم يمكننا رؤيته بنفس الشكل إذا لف نصف دورة
	4	هذا الشكل يمكننا رؤيته بنفس الشكل إذا لف ربع دورة
	1/2	هذا الشكل يقرب لنا مفهوم $S=1/2$ ، حيث إن الكرة لها نصفان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

التركيب عالى الدقة لخطوط الطيف : Hyperfine structure of spectral lines

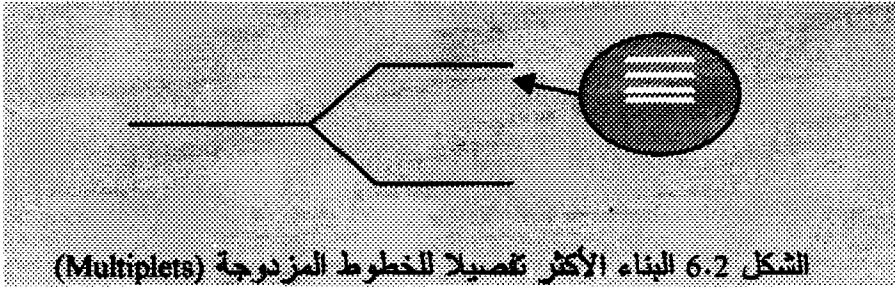
هل حدث وأن ركبت طائرة، وخلال الرحلة مرت الطائرة بمنطقة جبالية وطلب منكم ربان الطائرة بأن تشدوا الأحزمة؟ ماذا يحدث للطائرة خلال عبورها فوق الجبال؟
.....تهتز أليس كذلك؟ أنظر الشكل 4.2 للتوضيح.



الدراسة الدقيقة لخطوط الطيف بينت أن النواة لها زخم زاوي Angular Momentum و لف spin الذي يصاحبه عزم مغناطيسي مثل ذلك للإلكترون أنظر الشكل 5.2 .



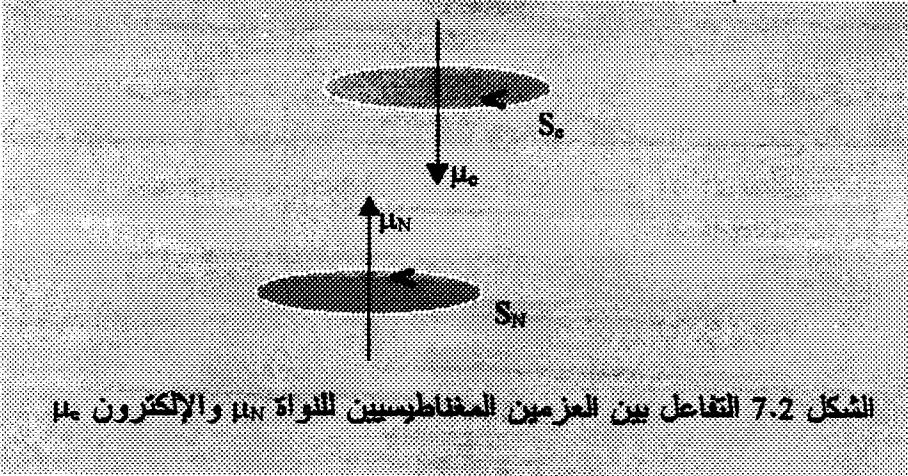
الخطوط المزدوجة تم فحصها بأجهزة مطيافية متناهية الدقة، وقد وجد أن هذه الخطوط تنقسم إلى مجموعة خطوط أخرى. هذا الانفصال يسمى بالبناء. أعلى الدقة Hyperfine Structure . الشكل 6.2 يوضح هذا الانفصال:



البناء التفصيلي لخطوط الطيف لم يمكن تفسيره فقط بالاعتماد على الإلكترونات الخارجية للذرة، ومن ثم كان لزاما أن تفسر باستخدام خواص نواة الذرة. الخواص التي لها علاقة بالبناء التفصيلي هي الكتلة والعز الزاوي (اللف S) للنواة.

نظرا لأن النواة والإلكترون لهما حركة أنية حول مركز مشترك للجاذبية، فإن ثابت ريديبيرج للعنصر يعتمد على كتلة النواة. لذلك إذا كان العنصر له أكثر من نظير، فإن ثابت ريديبيرج للنظائر سيكون مختلفا قليلا وبالتالي ستكور

خطوط الطيف مختلفة. إلا أن هذا التفسير ليس كافياً وحده لتفسير ظاهرة البناء التفصيلي، لأن عدد الخطوط في البناء التفصيلي أكثر عدداً من النظائر، وأيضاً العناصر بنظير واحد مثل البزمث (Bismuth) أظهرت بناء تفصيلياً. لذلك إذا افترضنا بأن النواة لها زخم زاوي (S) ، فإنه يمكننا تفسير البناء التفصيلي بإعتبار العزم المغناطيسي المصاحب للنواة سيتفاعل مع نظيره للإلكترون، ومن ثم فإن طاقة التفاعل هذه ستغير من طاقة الإلكترون الكلية، وبالتالي يحدث انفصال في مستويات طاقة الذرة. الشكل 7.2 يوضح تفاعل العزمين المغناطيسيين للنواة والإلكترون (لا تتسى الربط بين رحلة الطائرة والشكل 7.2 لتثبيت مفهوم البناء عالي الدقة لخطوط الطيف) .



إن العزم المغناطيسي للنواة يتناسب مع الزخم الزاوي الكلي I ، أي أن:

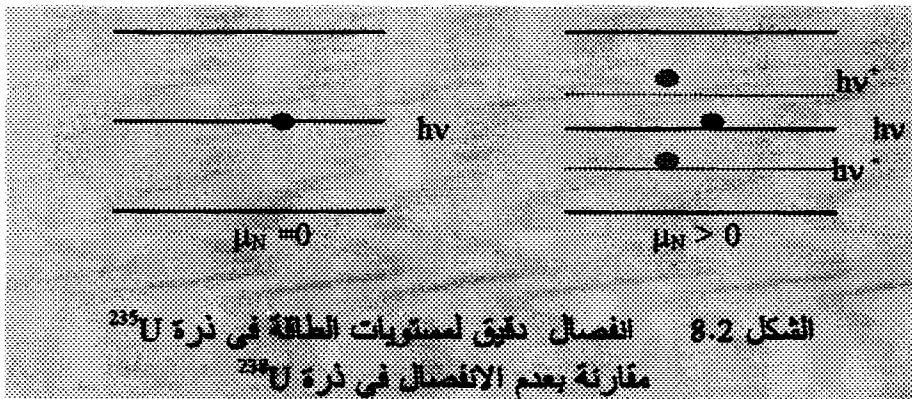
$$\mu_N \propto I$$

إن النوى التي تحوى عدداً زوجياً من البروتونات وكذلك النيوترونات (التي سيأتى ذكرها قريباً) وجد أن لها I=0 ومن ثم فإن $\mu_N = 0$ (لنوى زوجية النيوترونات-البروتونات).

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

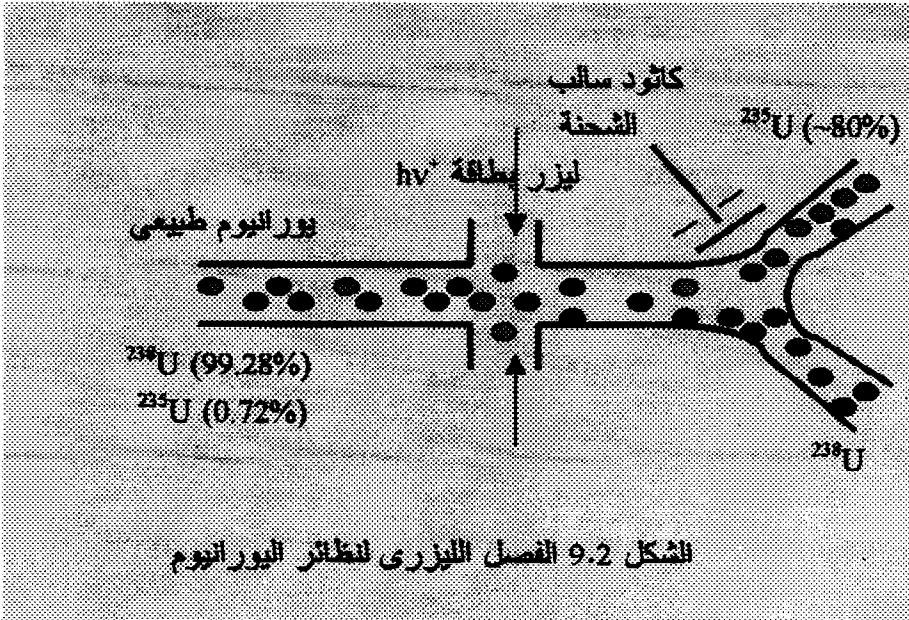
ثم فإن الانفصال في مستويات الطاقة موجود لذرات تلك النوى أى أن لها ظاهرة البناء عال الدقة للخطوط الطيفية. هذه الأفكار تعد مدخلا مهماً لتصميم تقنية فصل النظائر مثل اليورانيوم-235 واليورانيوم-238. ولنأخذ بعض الوقت لشرح كيفية الاستفادة من فهم أحد خواص النواة وهو العزم المغنطيسى لتمكيننا من التصميم الهندسى لجهاز فصل نظيرى اليورانيوم 235 و 238 .

نظرا لأن ^{238}U يحوى عدداً من البروتونات $Z=92$ وعدداً من النيوترونات $N=146$ فهي تحوى عددا زوجيا من النيوترونات و عددا زوجيا من البروتونات، لذلك فإن العزم المغنطيسى لنواة هذا النظير يساوى صفرا كما أسلفنا ذكره سابقا، ولذلك لن يكون هناك انفصالا دقيقا في مستويات طاقة الإلكترونات لذرة هذا النظير. فى حين أن ^{235}U يحوى عددا من البروتونات $Z=92$ وعددا من النيوترونات $N=143$ وبالتالي فإن العزم المغنطيسى لنواة هذا النظير لا تساوى صفرا ($\mu_N > 0$) ، ولذلك سيكون هناك انفصالا دقيقا فى مستويات طاقة الإلكترونات لذرة هذا النظير (Hyperfine structure)، أنظر الشكل 8.2 لتوضيح انفصال مستويات الطاقة ليورانيوم -235 مقارنة بعدم وجود هذا الانفصال فى مستويات الطاقة لذرة اليورانيوم -238.



فبسبب الانفصال فى مستويات الطاقة فى ذرة اليورانيوم -235 فإنه تباعا لذلك تكون الإلكترونات بطاقات مجاورة أى $h\nu^+$ أو $h\nu^-$. الفكرة الهندسية التى تمكننا من فصل هذين النظيرين هو اختيارنا لطاقة دقيقة جدا تتاظر

الطاقة المناظرة للمستوى المنفصل ونقذف بها الإلكترون الموجود فى ذلك المستوى ومن ثم يمكن طرد ذلك الإلكترون وبالتالي يحدث التأين لهذا النظير (اليورانيوم-235). هذه الذرات المتأينة يمكننا جذبها إذا بكاثود مشحون بالسالب. إنه بسبب التكمية فى مستويات الطاقة فإن اختيارنا لتلك الطاقة المحددة وقذفها إلى الذرات المختلفة بالنظرين لن تطرد أى من الإلكترونات فى ذرات اليورانيوم-238 وبالتالي لن تتأين تلك الذرات. طبعاً يمكننا تحديد تلك الطاقة الدقيقة من خلال إستخدام أشعة الليزر، ومن ثم كانت التسمية؛ الفصل الليزرى للنظائر. الشكل 9.2 يوضح رسماً توضيحياً للأسلوب الهندسى لفصل نظيرى اليورانيوم (235 و 238).



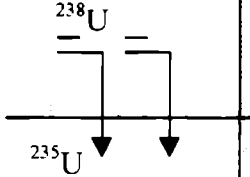
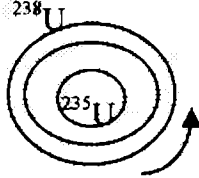
وبالتالى لتطبيق هذا العمل يجب مراعاة مايلى:

- 1- الدراية بمستويات الطاقة لكل من اليورانيوم-235 و اليورانيوم-238 .
- 2- اختيار التصميم الليزرى اللازم ذا الطاقة الكافية لتأين الإلكترونات فى المستويات المنفصلة.

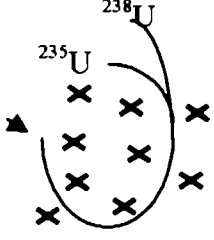
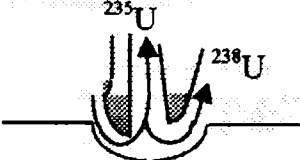
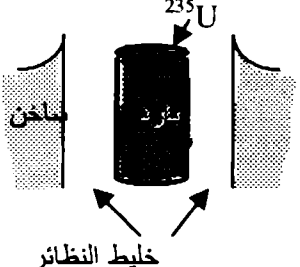
3- تصميم الجهاز المناسب للأخذ في الاعتبار النقاط المذكورة مع الكيفية لتجميع الذرات المنفصلة.

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 هي 0.72% . والجدير بالذكر أن هذا ليس الأسلوب الوحيد للتثرية بل هناك عدة طرق أخرى والجدول 2.2 يلخص بعضها منها.

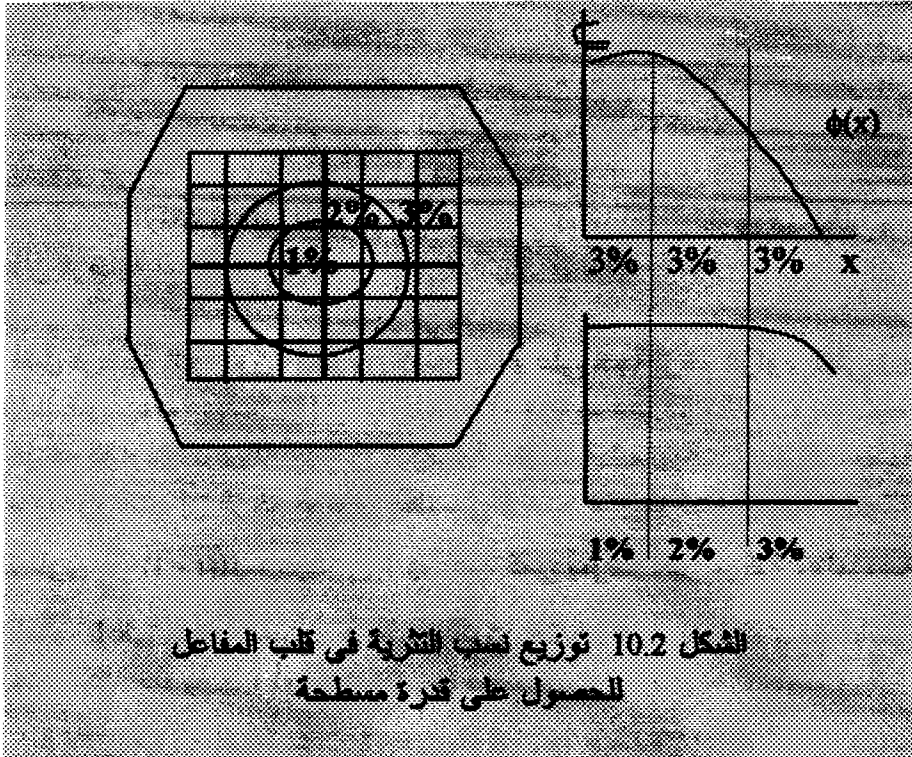
الجدول 2.2 بعض الطرق المستخدمة في التثرية

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

يتبع الجدول 2.2

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

إن برنامج التثرية يعد أحد الحلول الناجعة لتصميم المفاعلات النووية لغرض المحافظة على التفاعل المتسلسل ، كما أنه في المفاعلات يتم توزيع نسب تثرية متنوعة في مناطق متعدد من المفاعل، حيث تكون نسب التثرية في 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 في قلب المفاعل.



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

الآن حان الوقت لدحض فرضية البروتون-إلكترون بعد أن هيأنا ما يلزم لذلك. لقد كانت قياسات العزوم المغنطيسية لعدد من النوى تعطى قيما 1/1000 من قيم العزوم المغنطيسية للإلكترونات والتي لها القيمة العددية لعزم بوهر للإلكترون:

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

كل القيم المقاسة لعزوم النوى في إطار القيمة $10^{-23} \text{ erg/gauss}$ ويعبر عنها:

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

القيم المقاسة للعزوم المغناطيسية النووية تتراوح بين 0 و $5 \mu_N$. وبالتالي فلو كانت الإلكترونات موجودة بداخل النواة ، إذا لوجدنا أن العزم المغناطيسي 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 حجة الزخم الزاوى الكلى I :

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

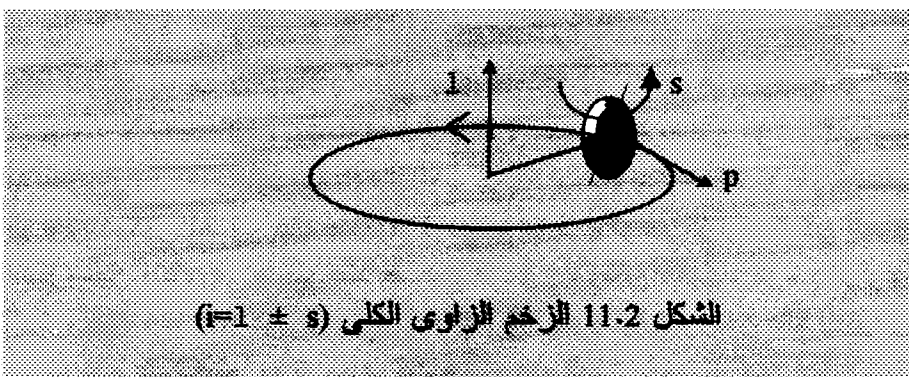
إذا كانت A زوجية فإن I تكون عددًا صحيحًا بوحدة $h/2\pi$ ، بمعنى:

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

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

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

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



الشكل 11.2 الزخم الزاوي الكلي $(I = l + s)$

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

$$\Sigma I = \Sigma l + \Sigma s \quad (3.2)$$

أو

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

حيث إن L هي عدد صحيح، و S تكون نصف عدد صحيح زوجي إذا كان عدد النويات زوجياً، وتكون نصف عدد صحيح فردي إذا كان عدد النويات فردياً. لذلك ستكون I عدداً صحيحاً عندما تكون A زوجية، وتكون نصف عدد صحيح فردي عندما تكون A فردية، متفقة بذلك مع النتائج العملية.

الآن يمكننا دحض فرضية البروتون-إلكترون من خلال الحجة المستددة على الزخم الزاوي الكلي I . إن النيتروجين له العدد الذري Z مساوياً 7 وعدد الكتلة الذري A مساوياً 14، ومن ثم وحسب فرضية البروتون-إلكترون فإن نواة النيتروجين تحوى عدد $14 - 7 = 7$ إلكترونات وبملاحظة أنه:

إذا كانت A زوجية فإن $I = (0, 1, 2, 3, 4, \dots) h/2\pi$
 إذا كانت A فردية فإن $I = (1/2, 3/2, 5/2, \dots) h/2\pi$

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 . إذا فإن الزخم الزاوى الكلى لنواة النيتروجين سيكون نصف عدد صحيح فردى . ولكن معملياً، الزخم الزاوى للنيتروجين وجد أنه عدد صحيح $I=1$. إذاً ففرضية البروتون-إلكترون أثبتت عدم صلاحيتها مرة أخرى من خلال هذه المناقشة.

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

فى سنة 1900 قام العالم الألماني ماكس بلانك باقتراح أن الضوء، وأشعة إكس، وموجات أخرى لا يمكن أن تشع بمعدل عشوائى، ولكن بحزم محددة تسمى "كمات quanta" . لقد نجح الافتراض الكمى فى تفسير معدل إشعاع الأشعة من الأجسام الساخنة . وفى سنة 1926 قام عالم المانى آخر يسمى ويرنر هايسنبرغ بعرض مبدأه المشهور " اللاتأكديّة" (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 ضوءاً على الجسيم، حيث إن جزءاً من موجات الضوء ستنتعثر بواسطة الجسيم وبالتالي هذا سيحدد موقعه. إلا أنه لا يمكننا تحديد الموقع أكثر 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 كمّي " quantum " واحد. هذا الكمّي سيسبب اضطراباً للجسيم ويغير من سرعته بطريقة لا يمكن التنبؤ بها. بالإضافة إلى ذلك، كلما أردنا دقة فى حساب الموقع، نحتاج موجات ضوء بطول موجى أقصر وبالتالي طاقة أعلى لكل كمّي ، ومن ثم سيحدث اضطراباً للسرعة بقدر أكبر. وبمعنى آخر، كلما أردنا حساب الموقع بدقة أكبر حسبنا سرعته بأقل دقة والعكس صحيح. أوضح هايسنبرغ أن قيمة اللاتأكد فى الموقع مضروبة فى قيمة اللاتأكد

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

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

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

حيث X تمثل الموقع و p تمثل الزخم و E تمثل الطاقة و t تمثل الزمن .
الآن لنطبق مبدأ اللاتأكدية على إلكترون بالنواة. اللاتأكدية في الموقع ΔX للإلكترون هي تقريبا قطر النواة ولنفرضه يساوى 2×10^{-12} cm ، وباستخدام المعادلة 5.2 يمكننا حساب Δp .

$$\Delta p \cong h / \Delta X = 6.6 \times 10^{-27} / 2 \times 10^{-12} = 3.3 \times 10^{-15} \text{ erg.sec/cm}$$

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

$$E^2 = p^2 C^2 + m_0^2 C^4 \quad (7.2)$$

حيث m_0 كتلة السكون للإلكترون (9×10^{-28} g) و C تعبر عن سرعة الضوء (3×10^{10} cm/sec) ، و الزخم $p = 3.3 \times 10^{-15}$ erg.sec/cm ، وبالتعويض بالقيم نجد أن حد الزخم أكبر بكثير من حد طاقة السكون ومن ثم فإن $E^2 = 10^{-8}$ erg² ، أو $E = 10^{-4}$ erg أو $E = 60$ MeV . بناءً على هذه النتيجة فإن الإلكترون الحر المحتوى في هذا الحجم من الفضاء ستكون طاقته 60 MeV . إلا أن القياسات لطاقة

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

اكتشاف النيوترونات (Neutrons) :

من خلال الحجج السابقة فإنه لا يوجد إلكترونات حرّة داخل النواة وبالتالي سقطت فرضية البروتون- إلكترون. الفرضية التي تلى ذلك هي 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 الافتراضى سمي بالنيوترون . فى سنة 1932 اكتشف شادويك النيوترون خلال تجاربه فى التحويل الإصطناعى للنوى بمقذوفات جسيمات الفا. دراسات إضافية بينت أن كتلة النيوترون هي 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 (p-n) Proton-neutron hypothesis :

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 التي استخدمت لدحض فرضية البروتون-إلكترون:

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

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

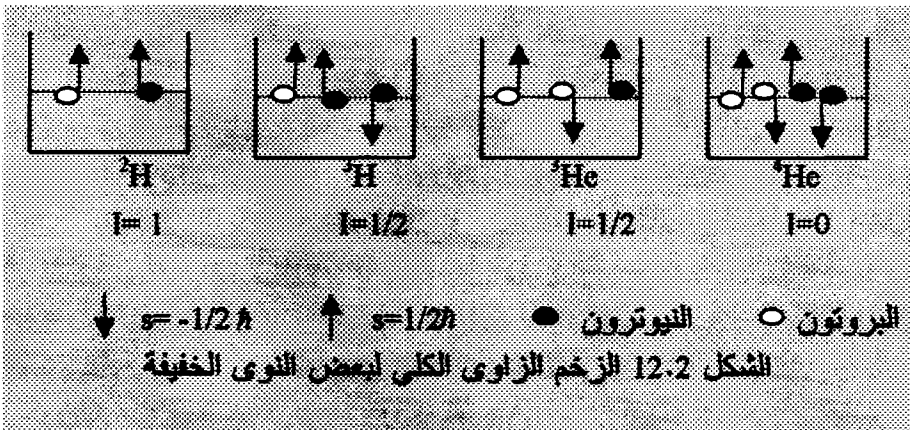
3 - النيوترون يوجد حر داخل النواة ، وهذا يمكننا ببساطة إثباته باستخدام حجة ميكانيكا الموجة، فنجد أن $E = 1.51 \times 10^{-3} \text{ erg}$ أو $E = 941 \text{ MeV}$. كما أن طاقة السكون للنيوترون هي $931 \text{ MeV}/\text{amu} \times 1.00898 \text{ amu} = 939 \text{ MeV}$. إن الرقمين قريبان لبعضهما مما يؤكد وجود النيوترون حرًا داخل النواة.

3-2 بعض الخواص النووية Nuclear properties :

الزخم الزاوي Angular momentum :

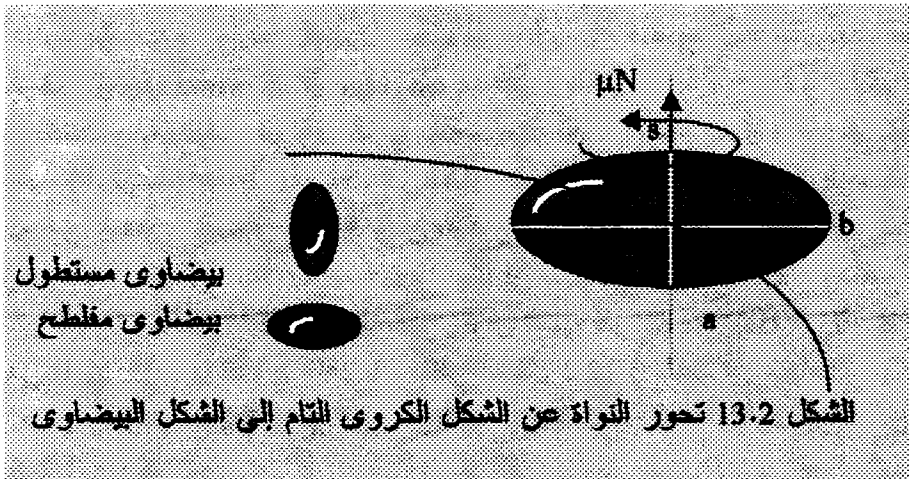
قد ناقشنا سابقا الزخم الزاوي الكلي بأنه حاصل جمع الزخم المداري وزخم اللف (المغزلية)؛ $I = L + S$. في مستويات الطاقة الدنيا ، يتوقع أن الزخم الزاوي المداري يساوي صفرًا، ومن ثم فإن الزخم الزاوي الكلي يكون بسبب زخم اللف. أي أن: $I = \sum s = S$ ، حيث إن للبروتون $s = 1/2$ ومثله للنيوترون . وكمثال لذلك فإن الزخم الزاوي الكلي لذرات ^2H , ^3H , ^3He , ^4He هي $1, 1/2, 1/2, 0$ بوحدة \hbar . $h/2\pi = \hbar$. أنظر الشكل 12.2 (لاحظ أن اتجاه السهم العلوي يعبر عن $s = 1/2 \hbar$ في حين أن اتجاه السهم السفلي يعبر عن $s = -1/2 \hbar$) .

لاحظ أن I تساوي عدد صحيح لقيم A الزوجية، في حين I تساوي نصف عدد صحيح فردي لقيم A الفردية ، وهو ما يوافق التجارب المعملية.



العزم الكهربى رباعى الأقطاب Electric quadrupole moment :

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



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

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

حيث تمثل كل من a و b أبعاد أطراف الشكل البيضاوى. إن العزم الكهربى رباعى الأقطاب Q للديتوريوم بروتون واحد ونيوترون واحد هي $Q = +0.00274 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ، فى حين نواة اللوتيسيوم والتى لها 176 من النويات فإن لها $Q = 7 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$. 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 ، وتكون Q تساوى صفرًا عندما تتوزع الشحنة بشكل ممتثل أي كروى تماما

Spheroid . كما أن العزم المغناطيسي الموازي للـ ف يسمى عزمًا مغناطيسيًا موجبًا، في حين يكون سالبا إذا كان العزم المغناطيسي ضد التوازي للـ ف. الجدول 3.2 يوضح الخواص التي ذكرت حتى الآن وذلك لبعض النوى:

الجدول 3.2 بعض الخواص النووية لبعض النوى

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

التناظر واللاتناظر لدالة الموجة

: Symmetrical and asymmetrical wave function

هناك نوعان من أساليب الإحصاء لتفسير تصرف عدد كبير من الجسيمات؛ أحدهما إحصاء فيرمي-ديراك والذي يستخدم لنظام من الجسيمات له دالة موجية لاتناظرية، والتي تعني؛ أن دالة الموجة تغير من إشارتها عندما يحدث تبادل كل الإحداثيات (ثلاثة للموقع وواحد للـ ف) لجسيمين متماثلين. هذا يعني أن كل حالة (state) معرفة تماما يمكن أن تُشغل فقط بجسيم واحد. ومن ثم فإن مبدأ الإقصاء لباولي Pauli exclusion principle يطبق على الجسيمات التي تخضع لإحصاء فيرمي-ديراك. إن الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات وأيضا كل النوى ذات عدد الكتلة الذري الفردي تمتلك لإحصاء فيرمي-ديراك. النوع الثاني من الإحصاء هو إحصاء بوزي-اينشتين والتي

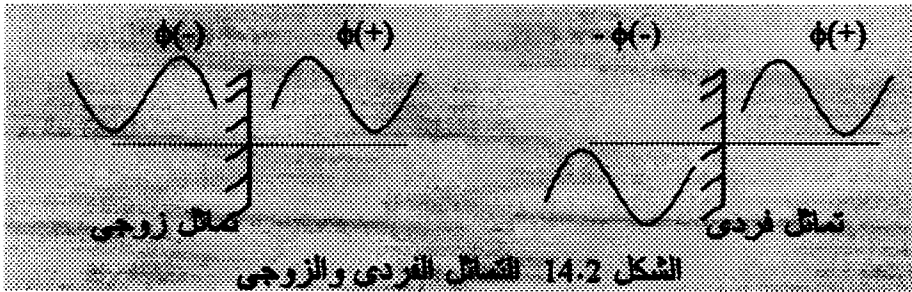
لها علاقة بالحالة التناظرية لدالة الموجة ، والتي تعني؛ أن دالة الموجة لا تتغير من إشارتها عندما يحدث تبادل كل الإحداثيات لجسيمين متماثلين. وفي هذه الحالة يمكن لاثنين أو أكثر من الجسيمات أن يحتلا نفس الحالة الكمية (quantum state) . كل النوى ذات عدد الكتلة الذرى الزوجى تمتثل لإحصاء بوزى-اينشتين.

التمائل Parity :

باعتبار أن دالة الموجة يمكن فصلها وتعتبر حاصل ضرب دالتين إحداهما دالة فى الموقع والأخرى دالة فى اللف أى أن:

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

ومن ثم فإن حركة النواة توصف بأنها ذات تماثل زوجى إذا كانت دالة الموقع ϕ لا تتغير فى حالة استبدال إحداثيات الموقع x,y,z بـ $-x,-y,-z$. كما أن الحركة توصف بأن لها تماثلا فرديًا إذا تغيرت إشارة دالة الموقع ϕ عند استبدال الإحداثيات x,y,z بـ $-x,-y,-z$. الشكل 14.2 يوضح التماثل بدلالة الموجة ذات بعد واحد x .



إن قانون الاختيار للعديد من التحويلات النووية يعتمد على التماثل وكذلك الزخم الزاوى الكلى.

4-2 ملخص :

علمنا في هذا الفصل أن فهم البنية المادية لتشكيل الذرات في بناء بلورى Crystal structure للعنصر مكنت من نشوء علم المواد الذي يهتم بتشكيل المادة ببنيتها المايكرونية وحديثا ببنيتها النانوية. كما أن الغوص في كيفية بنية الذرة والتي هي نواة بالمركز تطوف حولها مجموعة من الإلكترونات ، مع الفهم الصحيح لتوصيف هذه الإلكترونات الدوارة، عن طريق ميكانيكا الكم، كان فتحاً في علم الكيمياء الذي مكن من التفسير الدقيق للتفاعلات الكيميائية التي بنيت عليها الصناعات الكيميائية الحديثة. أخيراً، أصبح الفهم الدقيق للبنية النووية من حيث مكوناتها (البروتونات و النيوترونات) و كذلك خواصها النووية، فتحاً آخر في إنتاج الطاقة النووية وغيرها من التطبيقات، فعلى سبيل المثال لا الحصر لاحظنا في هذا الفصل كيف أنه بفهم خاصية العزم المغناطيسى للنواة تم التمكن من استغلال ذلك فى تثرية الوقود النووى عن طريق الليزر، ومن ثم الاستفادة من ذلك فى تصميم المفاعلات النووية التى 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

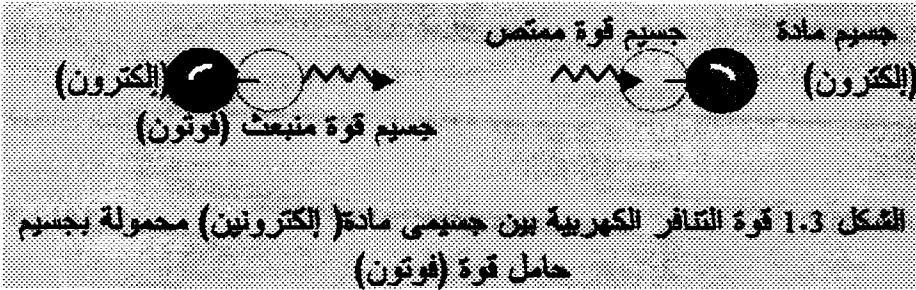
النويات والقوى النووية

Nucleons and Nuclear Forces

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

1-3 القوى الأساسية : The Universal Forces

في ميكانيكا الموجات، يتم تفسير قوة التناثر بين إلكترونين (يعتبران جسيمى مادة Matter particles كلا منهما له لف $\hbar/2$) على أن هناك جسيما حاملا قوة (Force-carrying particle) وهو فوتون بلف \hbar مسؤول على ذلك التناثر 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 .



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 ، وبالتالي 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 في 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 التقلديون بالموجات، مثل موجات الضوء وموجات الجاذبية. والآن يمكننا تبويب الجسيمات حاملات القوى إلى أربعة أنواع بناءً على مدى القوة المحمولة وكذلك على الجسيمات التي تتفاعل معها.

قوة الجاذبية (Gravitational force) F_g :

النوع الأول يدعى قوة الجاذبية (Gravitational force) F_g ؛ 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 قوة. هذا يعنى أن قوة الجاذبية الضعيفة جداً بين الجسيمات المستقلة فى جسيمين 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 التي يحملها تعتبر ذات مدى طويل. إن قوة الجاذبية بين الشمس والأرض متمثلة فى تبادل الجرافيتون بين الجسيمات التي تكون هاتين الكتلتين وهذه الجرافيتونات هي المسؤولة عن بقاء الأرض تدور حول الشمس. الجرافيتونات الحقيقية تمثل موجات الجاذبية كما يسميها الفيزيائيون الكلاسيكيون وهي من الضعف وصعوبة الكشف عنها بمكان لدرجة أنه لم يتم اكتشافها حتى الآن.

القوة الكهرومغناطيسية F_e (Electromagnetic force) :

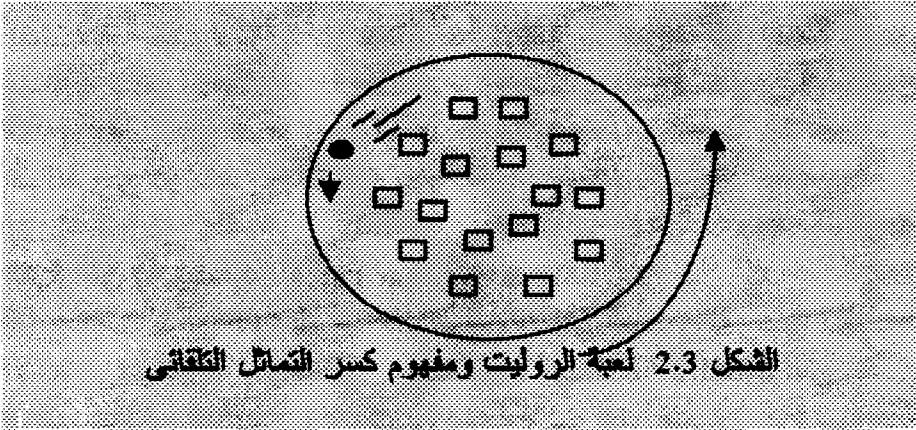
النوع الثانى هي القوة الكهرومغناطيسية F_e (Electromagnetic force) ، وهي تتفاعل مع الجسيمات المشحونة كهربائياً مثل الإلكترونات والكواركات. وهي أكثر قوة من قوة الجاذبية بحيث إن $F_e / F_g = 10^{42}$. وهناك بالطبع قوة التتافر فى حالة تساوى شحنتى الجسيمين أو قوة تجاذب فى حالة اختلاف

الشحنتين. بالنسبة للأجسام الكبيرة مثل الأرض و القمر فإنهما يحتويان على عدد متساو تقريباً من الشحن الموجبة والسالبة، وبالتالي فإن قوى الجذب والتنافر تلغى بعضهما بعضاً وبالتالي 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 التي 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 هي جسيمات افتراضية، إلا أنه عندما يقفز إلكترون من مدار إلى مدار آخر قريب من النواة فإن قذفة طاقة تتحرر ويشع تبعاً لذلك فوتون حقيقي، والذي يمكن الكشف عنه كضوء مرئي من خلال عين الإنسان لو كان له الطول الموجي المناسب لذلك. وبالمثل إذا ما اصطدم فوتون حقيقي بذرة فيمكن أن ينتقل إلكترون قريب من النواة إلى مدار أبعد وبالتالي هذا سيستفد طاقة الفوتون الساقط ومن ثم يُمتص.

القوة النووية الضعيفة Weak Nuclear Force :

النوع الثالث يدعى القوة النووية الضعيفة، وهي المسؤولة عن النشاط الإشعاعي، 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 تماماً حتى سنة 1967، عندما قام العالم الباكستاني عبد السلام بكلية إمبيريال بجامعة لندن و ستيفن واينبيرغ بجامعة هارفرد بأمريكا بطرح نظريتهما التي توحد هذه القوة مع القوة الكهرومغناطيسية، مثل ما قام ماكسويل بتوحيد الكهربائية والمغناطيسية منذ ما يزيد عن مائتي عام قبل ذلك. لقد إقترحا بأنه بالإضافة إلى الفوتون فهناك ثلاثة جسيمات ذات لف يساوى 1 تدعى البوزونات Bosons وهي التي تحمل القوة النووية الضعيفة. هذه الجسيمات هي W^+ ، W^- ، Z^0 كل منهم له كتلة تقارب من 100 GeV . إن نظرية عبد السلام-واينبيرغ تمتلك خاصية تدعى كسر التماثل

التلقائي (Spontaneous symmetry breaking). هذه الخاصية تعنى أن الذى يبدو بأنه العديد من الجسيمات المختلفة فى طاقات منخفضة، هو فى الحقيقة نفس النوع من الجسيم ولكن فى حالات مختلفة (Different states). فى مدى الطاقات العالية كل هذه الجسيمات تتصرف مثل بعضها. هذا يشابه لعبة الروليت (Roulette) (أنظر الشكل 2.3)، فى حالة دوران الصحن بسرعة عالية فإن الكرة تتصرف بطريقة وحيدة وهى الدوران بسرعة عالية، وفى حالة انخفاض سرعة الكرة فإن الكرة ستستقر أخيرا فى إحدى الفتحات، بمعنى أنه فى مدى الطاقات المنخفضة فإن هناك عددًا من الحالات (states) يناظر 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 الكرات يساوى عدد الفتحات أى نوع 1، نوع 2، نوع 3 ... الخ.



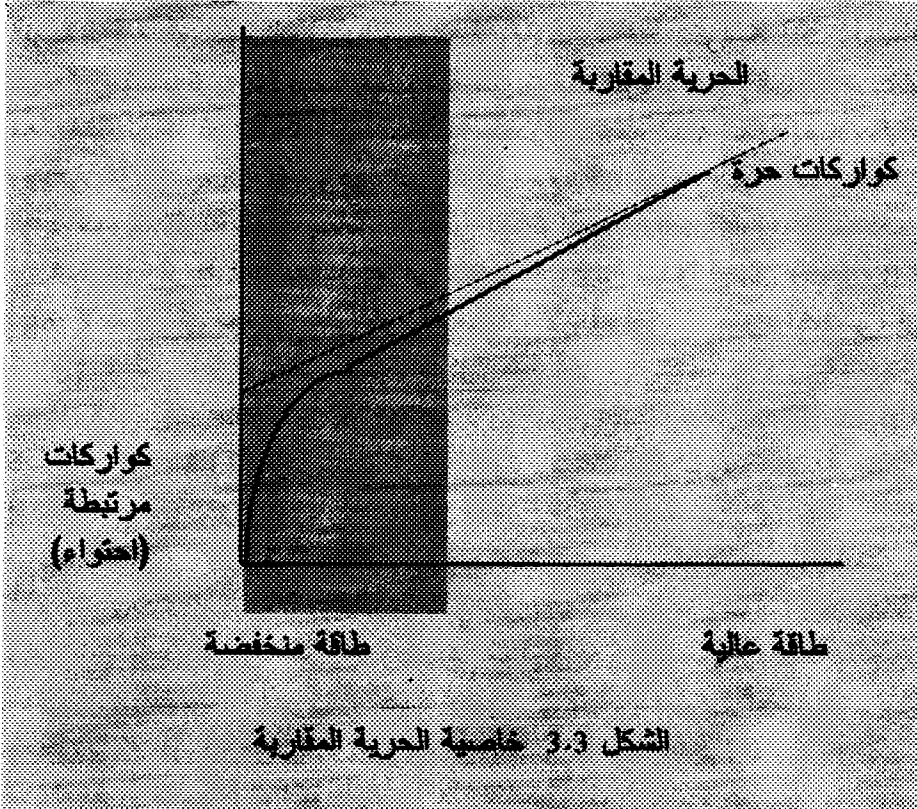
نظرية واينبيرغ-عبدالسلام توضح أيضا أنه فى حالة طاقات أعلى من 100 GeV، فإن الجسيمات الثلاثة والفوتون تتصرف بنفس الطريقة، ولكن فى الطاقات المنخفضة التى تحدث فى معظم الحالات الطبيعية، فإن هذا التشابه أو التماثل ينكسر؛ بمعنى الجسيمات W^+ ، W^- ، Z^0 تمتلك كتل أكبر وبالتالي تجعل القوة التى تحملها تكون ذات مدى قصير جدا. فى سنة 1979 تحصل كل من عبد السلام وواينبيرغ على جائزة نوبل فى الفيزياء. فى سنة 1983 بالمركز الأوروبى للبحث النووى (European Centre for Nuclear

(Research ; CERN) تم اكتشاف الجسيمات الثقيلة الثلاثة رفاق الفوتون ، ونظير ذلك تحصل في سنة 1984 كل من كارل روبيا قائد فريق الفيزيائيين وكذلك المهندس سايمون فان ديرمير 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 معا داخل نواة الذرة. يعتقد أن هذه القوة محمولة بجسيم له لف يساوى 1 ويدعى غرون (Gluon) ، وهي التي تتفاعل مع ذاتها أو مع الكواركات. إن القوة النووية القوية تتميز بخاصية تدعى الإحتواء (Confinement) ؛ بمعنى أن هذه القوة تربط الجسيمات معا في 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 بروتونا أو نيوترونا. تشكيلة أخرى محتملة هي إتحاد زوج من الكوارك وضديده ؛ أى أحمر+ ضديد أحمر، او أخضر + ضديد أخضر، أو أزرق + ضديد أزرق، حيث إن كل زوج ينتج لونا أبيض. هذه التشكيلات الأخيرة تكون الجسيمات التي تدعى الميزونات (Mesons) وهي غير مستقرة لأن الكوارك وضديد الكوارك يفنيان بعضهما بعضا 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 ألوانها أبيض، هذا التشكيل يكون جسيم غير مستقر يدعى قلوبول (Glueball) . إن حقيقة مفهوم الإحتواء التي تمنع كشف كوارك مستقل أو غرون مستقل قد تدعو إلى إعتبار أن الكواركات والغرونات تعتبر من الميتافيزيقيات، ولكن هناك خاصية أخرى للقوة النووية القوية تدعى الحرية المقاربة (Asymptotic Freedom) ، التي تجعل من الكواركات والغرونات معرفة تماما ، حيث إن في مدى الطاقات الإعتيادية تكون القوة النووية القوية فعلا قوية ومن ثم فتربط الكواركات بشدة ، وفي الطاقات العالية جدا تولد نوعا ما حرية للكواركات (أنظر الشكل التالي)، حيث إن التجارب في

المعجلات الكبيرة أوضحت أنه عند الطاقات العالية فإن القوة القوية تضعف كثيراً ، وبالتالي فالكواريكات والغرونات تتصرف وكأنها تقريباً جسيمات حرة ففى تصادم بين بروتون بطاقة عالية وضديد البروتون تولد عنه العديد من الكواركات الحرة نوعاً ما.

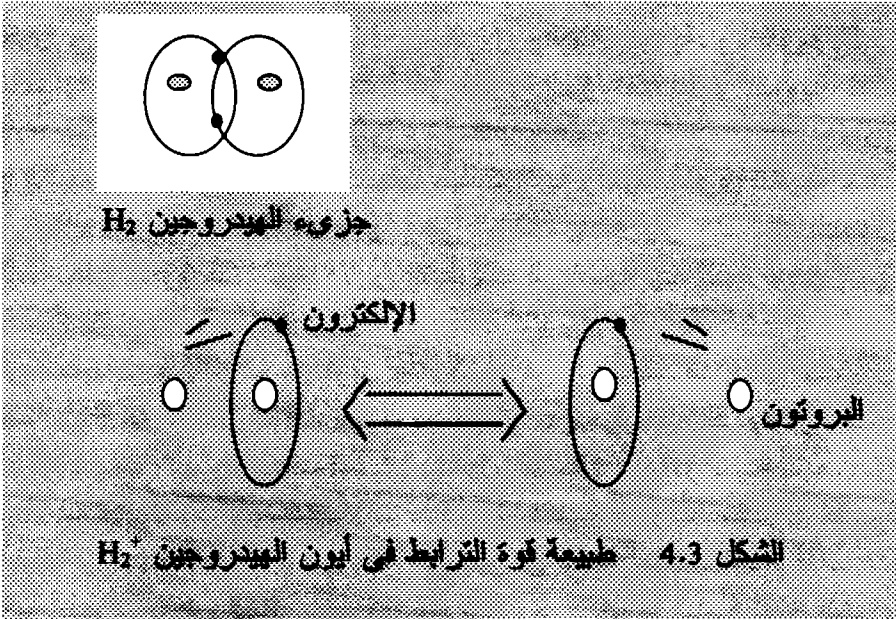


2-3 نظرية الميزونات Mesons Theory :

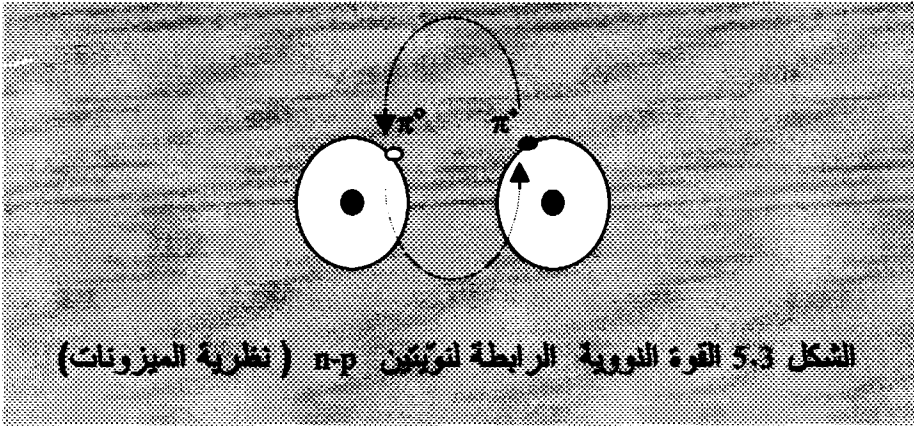
إن نظرية الميزونات ظهرت لأجل فهم القوة الموجودة داخل النواة. هذا وتجدر الإشارة هنا أن قوة الجاذبية (لاحظ أن الجرافيتون مسؤول على قوة التجاذب بين الكواكب السيارة) بين الجسيمات المشحونة ضئيلة يمكن تجاهلها

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

في سنة 1935 ظهر عالم يابانى يدعى يوكاوا Yukawa بمحاولة لتفسير القوة النووية القصيرة المدى بين النويات، اقترح هذا العالم بأن القوة النووية هي ذات طبيعة تبادلية مثلها مثل تلك الطبيعة الترابطية لجزء أيون الهيدروجين H_2^+ ، أنظر الشكل التالي ، حيث إن الإلكترونات تُبدل مواقعها من حول البروتونات،، وبالتالي ظهر مصطلح القوة النووية التبادلية . Exchanged Nuclear Force



لذا فإن النظرية تقترح بأن البروتون والنيوترون متكونان من قلب متماسك ويتميزان فقط من خلال ميزونات ، حيث إن قلب البروتون يدور حول ميزون موجب π^+ ، في حين أن قلب النيوترون يدور حوله ميزون متعاد π^0 ، وحتى يتم الترابط يحدث تبادل للميزونين انظر الشكل 5.3 .

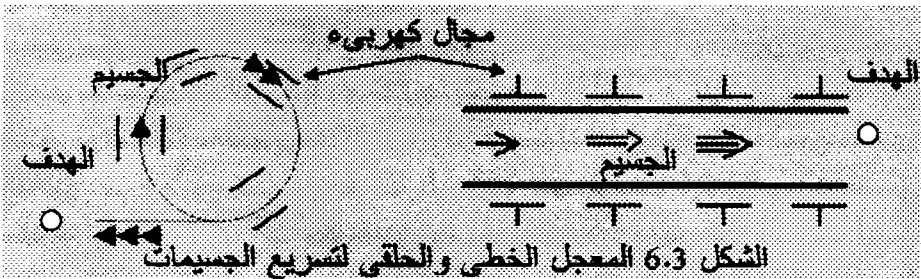


لذلك فقد تتبأ يوكاوا بوجود جسيمات حاملة قوة تدعى الميزونات ولها كتلة سكون Rest mass تتراوح بين كتلة الإلكترون والكتلة النووية، والنظرية التي استحدثتها باستخدام هذه الميزونات تدعى نظرية الميزونات للقوى النووية. لقد تم بعد ذلك الاكتشاف المعملى لأنواع من الميزونات. إن الطبيعة التبادلية لهذه القوة تجعلها حيناً تجاذبية وأحياناً أخرى تنافرية بنلة على حالة الجسيمات المتعامل معها. على الرغم من أنه ليس هناك الدليل القاطع على وجود هذه القوة، إلا أن التحليلات الرياضية لهذه القوة تؤدي إلى خاصية التشبع.

في الحقيقة وعلى الرغم من توفر عدد ضخم من المعلومات في متناول العلماء، إلا أنه لم يحن الوقت بعد للفهم النهائي عن حيثية القوة الرابطة للنيوترونات والبروتونات فعلى سبيل المثال ؛ إن دراسة التبعثر Scattering بسبب الجسيمات ذات طاقات منخفضة أظهرت تساوى القوة الرابطة بين $n-p \approx n-n \approx p-p$ ، في حين أن التبعثر باستخدام طاقات عالية أظهرت بعض التناقضات. وبسبب عدم وجود نظرية شاملة تفسر البناء النووى للنواة الذرة، فقد اجتهد العلماء لتخير العديد من النماذج النووية لتفسير العديد من الظواهر النووية الملاحظة، وقد نجحت الكثير من هذه النماذج الفيزيائية والرياضية لخدمة الأغراض التي استتجت 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 قِيلمان والذى تحصل على جائزة نوبل فى سنة 1969 بسبب عمله مع الكواركات. هناك عدة أنواع من الكواركات ويعتقد بأن هناك على الأقل ست " نكهات flavors " تدعى " up " و " down " و " غريب strange " و " فاتن charmed " و " أسفل bottom " و " علوى top " ، كما أن كل نكهة تأتى بثلاث " ألوان 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 وبالتالي ليس لها اللون بالمفهوم المعتاد لنا ، إن الفيزيائين الجدد يبدو أنهم لم يحصروا أنفسهم بإستخدام التسميات الإغريقية وانتقلوا 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.

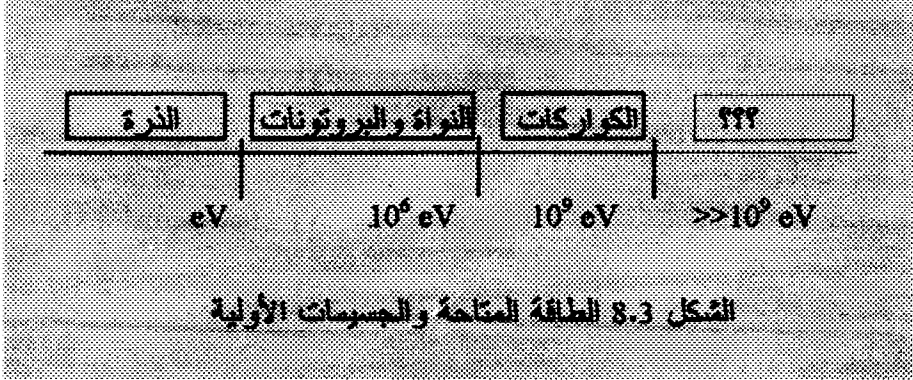


إن البروتون أو النيوترون مكون من ثلاثة كواركات أنظر الشكل 7.3 ؛ كل منهم له لون، فالبروتون يحوى اثنين من الكواركات "الفوقية" وواحد "تحتى"، كما أن النيوترون يحوى اثنين من الكواركات "التحتية" وواحد "فوقى"، . جسيمات أخرى يمكن تركيبها باستخدام النكهات الأخرى؛ غريب ، فاتن، علوى، سفلى ، ولكن هذه لها كتل أكبر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



لقد وصلنا إلى معرفة أن حتى البروتونات والنيوترونات تتكون من جسيمات أصغر. فما هي أصغر المكونات الأساسية التي 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 هي موجات وأنه كلما زادت طاقة الجسيم صغر الطول الموجى لموجة الجسيم. وبالتالي فالإجابة على السؤال تكمن في مدى طاقة الجسيم المتاحة لنا، لأن ذلك سيبين لنا مدى صغر الأبعاد التي يمكننا رؤيتها. فى القرن التاسع عشر كانت الطاقة المتاحة تتأخر عدداً من الإلكترون-فولت eV ، مما نتج عنه الاعتقاد بأن أصغر مكونات المادة هي الذرة. مع العقد الثانى من القرن العشرين استخدم رذرفورد جسيمات ألفا 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. والتي من المحتمل أن

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



بناءً على ثنائية الجسيم-الموجة، فإن كل شيء في العالم يمكن وصفه كجسيم وحتى الضوء والجاذبية، وهذه الجسيمات لها خاصية اللف (المغزلية) spin والتي تم عرضها سابقاً. كل الجسيمات المعروفة في الكون يمكن تقسيمها إلى مجموعتين؛ جسيمات بلف $\frac{1}{2}$ وهي التي تكون المادة في الكون (جسيمات مادة). أما المجموعة الثانية من الجسيمات فهي (جسيمات قوة) وهي تحمل لف 0، 1، 2 والتي تعبر عن القوة بين جسيمات المادة. إن جسيمات المادة تمثل لمبدأ الإقصاء لباولي، والذي يفيد كما ذكرنا سابقاً بأنه لا يمكن لجسيمين متشابهين أن يحتلا نفس الحالة (state)؛ أي أنه لا يمكن أن يكون ل كليهما نفس الموقع ونفس السرعة في حدود قانون اللاتأكدية. إن مبدأ الإقصاء يعد أساساً، لأنه يشرح لماذا لا تتحطم جسيمات المادة إلى حالة كثافة عالية جداً تحت تأثير القوى المنتجة بسبب جسيمات القوة التي لها لف 0، 1، 2؛ أي أن إذا كان لجسيمات المادة نفس الموقع سيكون لهما سرعات مختلفة ومن ثم فلن يبقيا في نفس الموقع لمدة طويلة. في حال عدم صلاحية قاعدة الإقصاء فإن الكواركات لا يمكنها أن تكون البروتونات والنيوترونات، ولا هذين مع الإلكترونات أمكنهما تكوين ذرات محددة منفصلة. بل لتحطمت الأشياء إلى نوع ما من الرغوة الكثيفة. إن الفهم الصحيح للإلكترون وكذلك للجسيمات التي تحمل لف $\frac{1}{2}$ حان سنة 1928 عندما تقدم بول ديراك

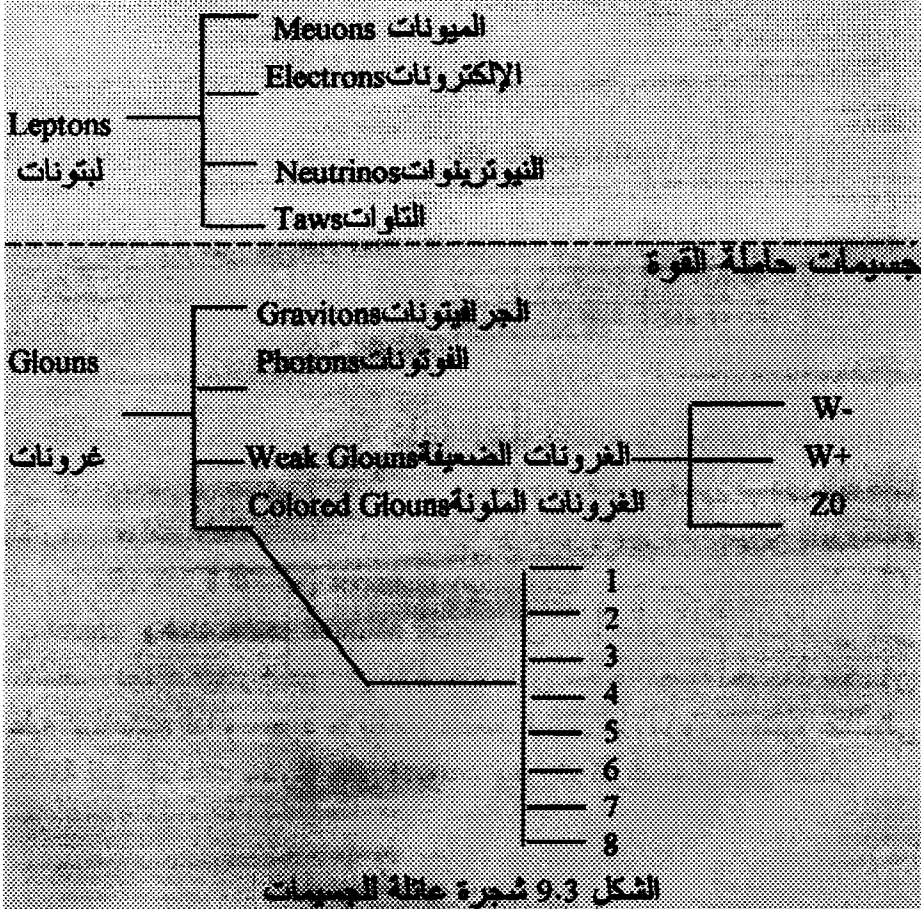
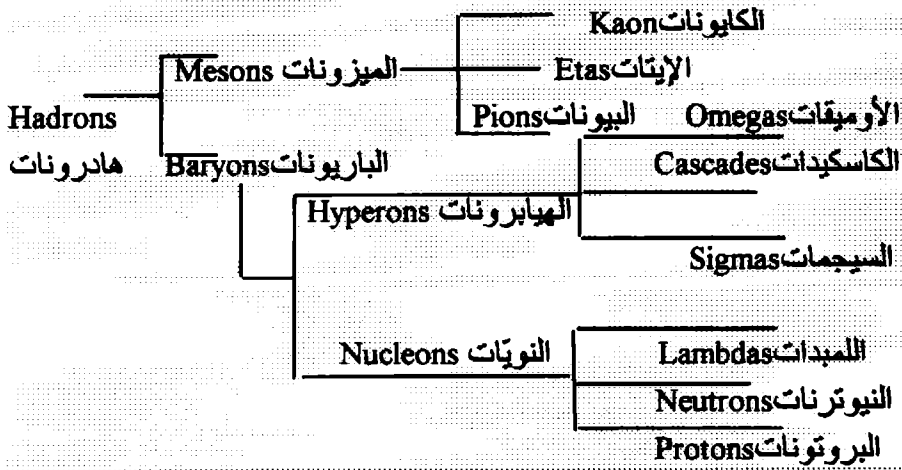
بنظريته والتي كانت الأولى من نوعها التي وفقت بين ميكانيكا الموجات ونظرية النسبية الخاصة. لقد أوضحت النظرية رياضيا لماذا الإلكترون له لف $1/2$ ؛ لماذا لا يرى الإلكترون بنفس الشكل إلا بعد دورتين .

أيضا تتبأت النظرية بأن الإلكترون له رفيقه وهو ضد يد الإلكترون ويدعى البوزيترون positron . إن اكتشاف البوزيترون سنة 1932 أكد نظرية ديراك وبالتالي تحصل على جائزة نوبل بدوره سنة 1933 . الآن نعلم بأن لكل جسيم ضديده (antiparticle) ، وكلاهما يتسمان بخاصية التلاشي annihilate عندما يلتقيان .

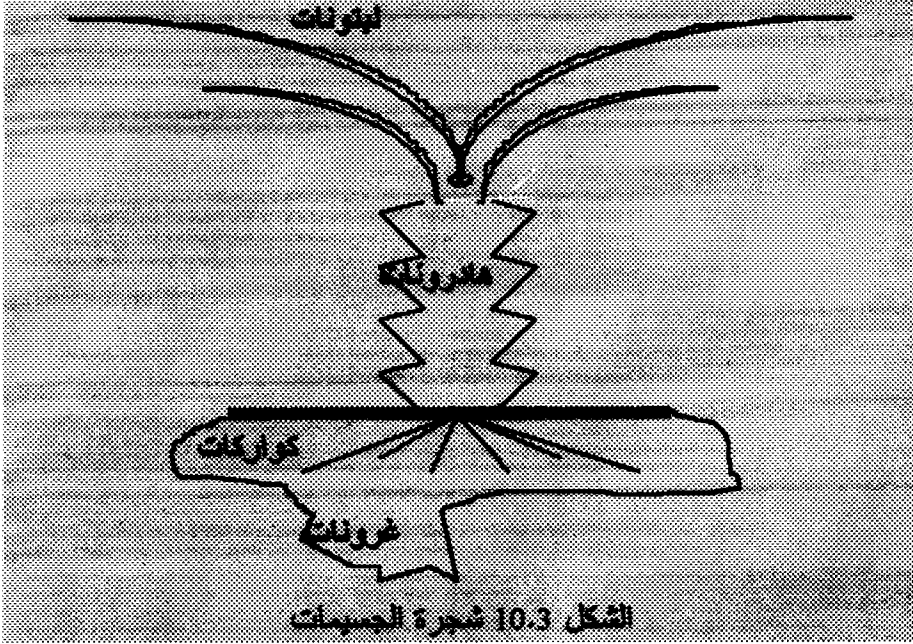
إن التفاعلات النووية التي تحدث في غرفة التأين و المعجلات والأشعة الكونية بينت بأن هناك العديد من الجسيمات ، التقسيم التالي في الشكل 9.3 يلخص شجرة العائلة للجسيمات عالية الطاقة والتي أعمارها طويلة ($\tau \sim 10^{-23}$ sec) .

في الشكل 9.3 يوضح تصنيف الجسيمات إلى ثلاثة تصنيفات رئيسية هي الهادرونات واللبتونات والغرونات. يلاحظ أن الغرونات Glouons هي عبارة عن جسيمات حاملة القوة وهي 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 Glouons المسؤولة على التفاعلات النووية القوية (القوة النووية القوية).

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



الشكل 9.3 شجرة عائلة 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 في زمن قصير جداً وطاقات في مدى الجيجا إلكترون-فولت GeV لا يمكن من خلالها دراستها بأجهزة كلاسيكية للفيزياء النووية مثل حجرة التأين Ionization chamber وحجرة السحابة Cloud chamber وعداد جايجر Geiger counter. إن مبدأ حجرة الفقاعات مبني على اكتشاف دونالد كليسر؛ حيث إن الأيونات تكوّن سطحاً أجنبيّاً بحيث تتكون عليه الفقاعات. لذا وبمجرد ما ينقص ضغط السائل قبل مرور الجسيم عالى الطاقة فإن الفقاعات ستتولد على الأيونات ومن ثم تترك مساراً في السائل.

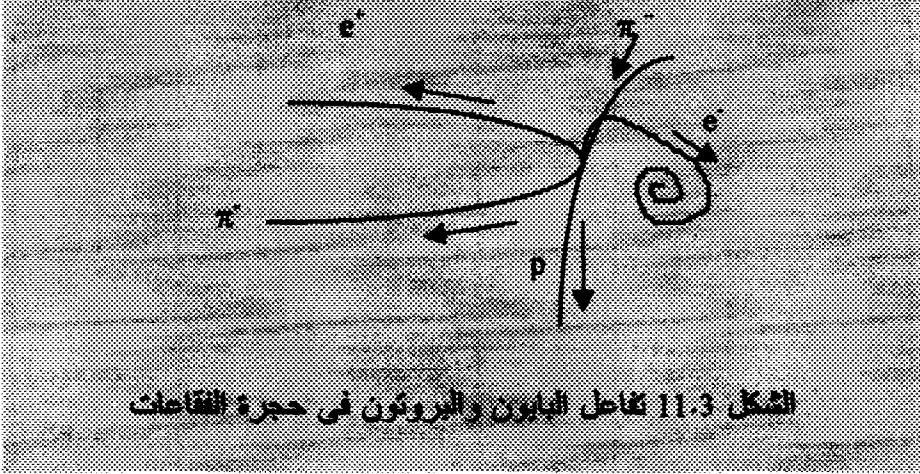
الجدول 1.3 خواص الجسيمات طويلة العمر

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

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

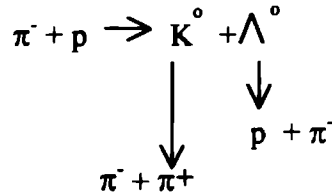
كتلة الإلكترون 9.1×10^{-31} كجم

الشكل 11.3 يوضح رسماً توضيحياً لتفاعل بين بايون سالب π^- وبروتون p والذي هو مبدئياً في سكون وذلك حسب مسارات سجلت بحجرة الفقاعات.

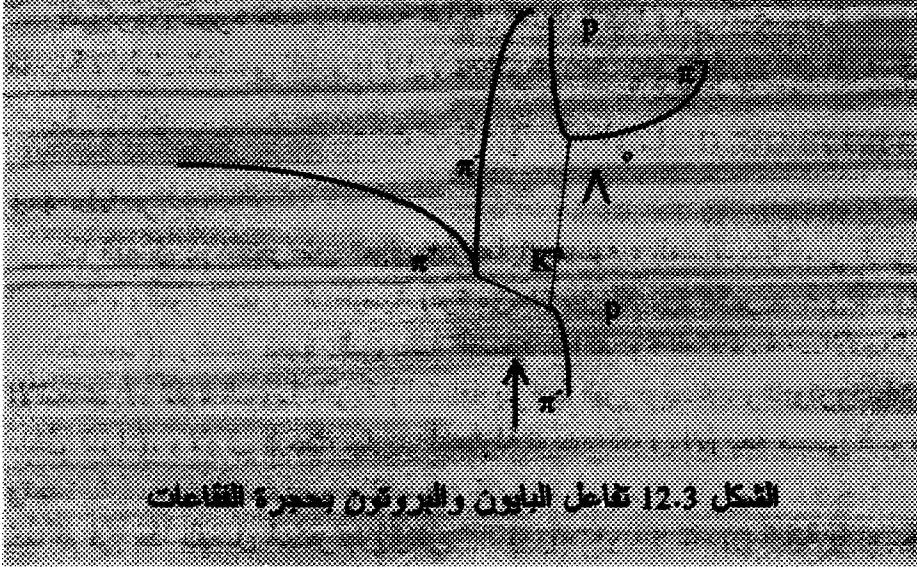


نلاحظ أن نتيجة التصادم تكون بايوناً متعادلاً والذي بدوره إنحل فوراً إلى زوج بوزيترون-إلكترون . إن البايون المتعادل والفوتونين الناتجين في مرحلة لاحقة لا تترك مسارات بالحجرة.

مثل آخر للكشف عن الجسيمات في حجرة الفقاعات تمثل التفاعل التالي:



فيما يلي الشكل 12.3 يوضح مسارات الجسيمات المأخوذة عن حجرة الفقاعات:



هذا وقد أجريت تفاعلات نووية بين البروتون وضديد البيروتون بسرعات عالية حيث كان المنتج 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^0 ، على إفتراض أن متوسط العمر t هو 10^3 ثانية و 10^{-10} ثانية و 10^{-16} ثانية وذلك على التوالي.

الحل :

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

لاحظ أن المسافة التي يمكن حصرها بحجرة الفقاعات هي d_E ، في حين أن تلك للنيوترون كبيرة جداً، وبالنسبة للبايون صغيرة جداً وهي صغيرة جداً مقارنة بالطول الموجي للضوء، لذا لا يمكن حساب عمر البايون عن طريق حجرة الفقاعات.

4-3 ملخص :

في هذا الفصل تم استعراض القوى الأربعة الأساسية ، المتمثلة في قوة الجاذبية ، والقوة الكهرومغناطيسية (قوة موحدة بين القوة الكهربائية والقوة المغناطيسية)، وكذلك القوة النووية الضعيفة (القوة المتعلقة بالانحلال الإشعاعي) والقوة النووية القوية (المتعلقة بترباط البروتونات والنيوترونات داخل النواة). ولازال البحث جارياً لمحاولة توحيد القوى الأربعة في قوة واحدة.

كما تم في هذا الفصل استعراض نظرية الميزونات وذلك لتفسير كيفية طبيعة القوة النووية التبادلية (القوة النووية القوية) التي تربط بين النيوترونات والبروتونات في النواة.

أيضاً، تم التوضيح في هذا الفصل أنه ربما لن تكون النيوترونات والبروتونات والإلكترونات هي الجسيمات الوحيدة الدقيقة المكونة للذرة، بل إن الكواركات تبدو أنها المكونات الأساسية للبروتونات والنيوترونات. إذاً هناك العديد من الجسيمات الموجودة والتي تم تصنيفها تحت مسميات أساسية تشمل اللبتونات، والهادرونات، والكواركات، 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 في 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 النووي

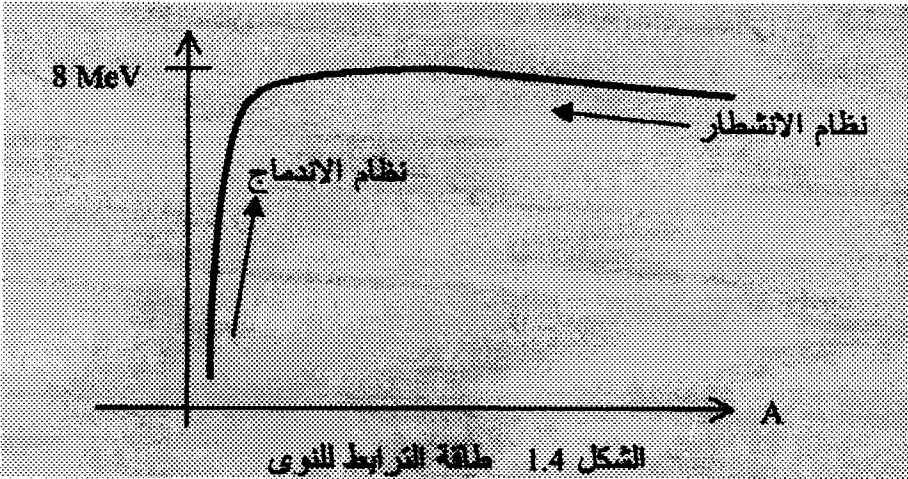
Models of Nuclear Structure

- 1-4 طاقة الترابط النووية واستقرارية النوى.
- 2-4 نموذج قطرة السائل (طاقة الترابط).
- 3-4 نموذج الأغلفة (خريطة البناء النووي).
- 4-4 ملخص.
- 5-4 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 والتي 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 نوية B.E./ nucleon كدالة فى عدد الكتلة A . من الشكل، نلاحظ أن متوسط طاقة الترابط لكل نوية فى النوى يبدو تقريبا ثابتا لكل النوى فيما عدا النوى الخفيفة. بمعنى أن طاقة الترابط الكلية تتناسب طرديا مع عدد نويات النواة ($y = c x \rightarrow dy/dx = c$).



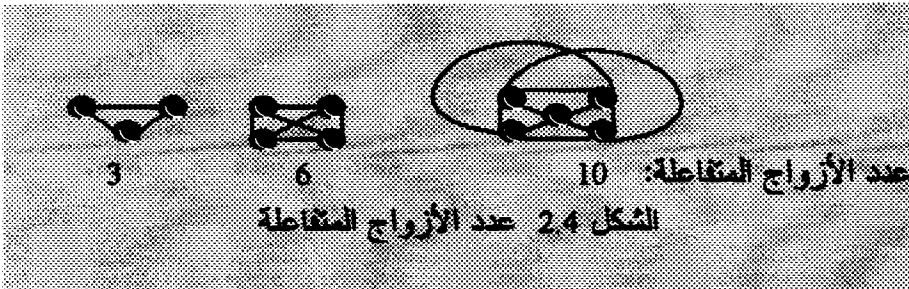
إضافة لذلك فإن أعلى قيمة لمعدل طاقة الترابط لكل نوية للنوى الموجودة فى منتصف المنحنى تدل على أعلى استقرارية لهذه النوى. ومن ثم نرى أن اندماج النوى الخفيفة الموجودة فى يسار المنحنى يؤدي إلى إنتاج نوى أكثر

استقرارًا وينتج عن ذلك أيضا طاقة (طاقة الاندماج النووي)، في حين أن انشطار النوى الثقيلة الموجودة في يمين المنحنى يؤدي ذلك إلى إنتاج نوى أكثر استقرارًا مع تحرير طاقة (طاقة الانشطار النووي). كما أننا نلاحظ أن درجة ميل المنحنى في الجهة اليسرى أكثر حدة من نظيرتها في الجهة اليمنى وبالتالي فإن الطاقة المحررة بسبب الاندماج تكون أعظم من تلك المحررة بسبب الانشطار. ونلاحظ أن هذا المنحنى هو أساس كل من تقنية مفاعلات الانشطار النووية بنوعها الحراري والسريع المتوزعة في أنحاء المعمورة، وكذلك أساس لتقنية مفاعلات الاندماج النووية التجريبية التوكماك (Tokamak).

القوة النووية ذات المدى القصير وخاصة التشبع

: Short Range Nuclear Force and Saturation Property

إذا كانت كل نوية تتفاعل مع النويات الأخرى في النواة، فإن طاقة الترابط ستتناسب مع عدد الأزواج المتفاعلة. وحيث إن أي نوية ستتفاعل مع $A-1$ من النوى، فإن عدد الأزواج المتفاعلة $A(A-1)/2$ ، وبالتالي فإن طاقة الترابط ستتناسب مع هذا العدد. الشكل 2.4 يوضح عدد الأزواج المتفاعلة.



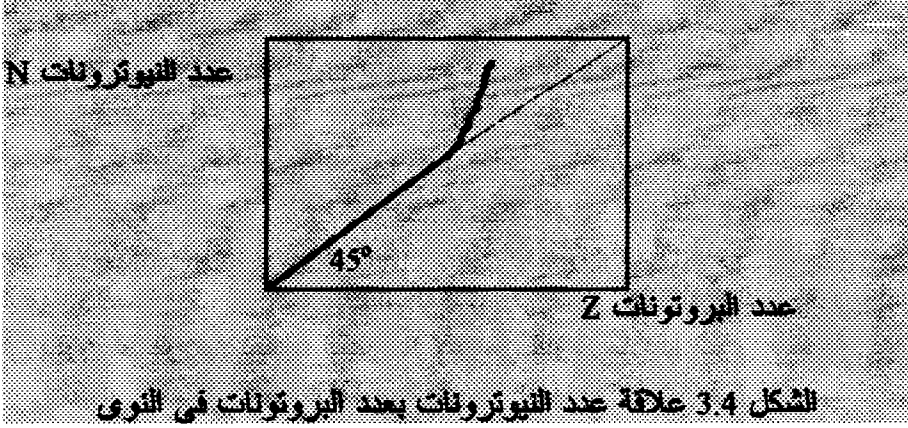
بخصوص النوى الثقيلة، فإن A يمكن تجاهلها مقارنة بـ A^2 ، أي؛ $B.E. \propto A^2$ ، وهذا يناقض ما أثبتته التجارب من أن $B.E. \propto A$. ولتجنب هذه الصعوبة، يستلزم افتراض أن النوية لا تتفاعل مع كل النوى، أي أن؛ قوة الترابط هي ذات مدى قصير. إن القوة النووية يمكن التعبير عنها بترابط قطبي

Homo-polar شبيه بالهيدروجين، بمعنى أنه هناك تجاذبًا قويًا بين ذرتي هيدروجين لتكوين جزيء H_2 ، ولكن ذرة ثالثة لا يمكن أن ترتبط بقوة للجزيء. في هذه الحالة يقال بأن جزيء الهيدروجين متشعب. وبالتالي مجموعة من ذرات الهيدروجين مثل تلك الموجودة في قطرة هيدروجين سائل لها طاقة ترابط تتناسب تقريبا مع عدد جزئيات الهيدروجين ومن ثم فهي تتناسب تقريبا مع عدد ذرات الهيدروجين الموجودة. لهذا فإن طاقة الترابط بين نوّيتين ستتضاعف 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 النوّى ما عدا النوّى الخفيفة. على نقيض ذلك فإن القوة الكولومية Coulomb Force تعتبر قوة ذات مدى بعيد وهي تعد ضئيلة ، فباعتبار أن الطاقة الكولومية $E_c = e^2/4\pi\epsilon_0 r$ وأن المسافة بين بروتونين هي 3×10^{-13} cm فإن $E_c \sim 0.5$ MeV وهي 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 متشعبة ، في حين أن القوة الكولومية غير ذلك فهي 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 في انحدار المنحنى في الجهة اليمنى لشكل 1.4 .

الاستقرار النووي والقوى بين النوّيات

: 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.

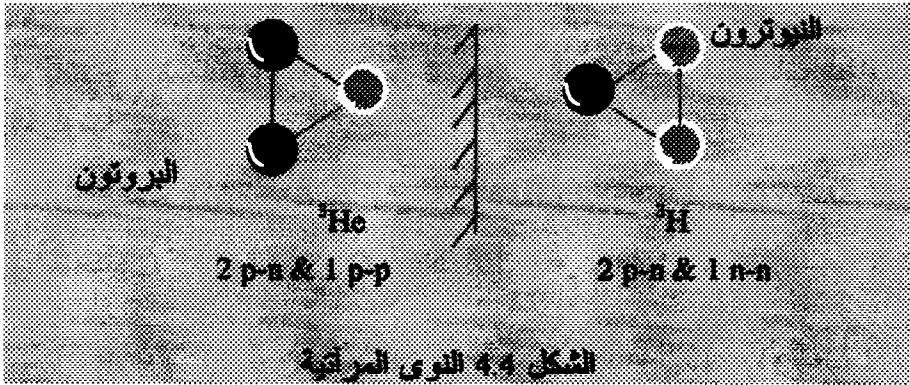


إن تساوى عدد البروتونات بعدد النيوترونات في النوى الخفيفة يعنى بأن هناك قوة جذب قوية بين النيوترون والبروتون، لذا يمكن أن يقترح بأن هناك قوة متساوية بين النيوترون والنيوترون n-n وكذلك بين البروتون والبروتون p-p بغض النظر عن قوة كولوم الإلكتروستاتيكية بين البروتونين. فلو كانت n-n أكبر من n-p أو n-p أكبر من p-p لكان هناك عدد أكثر من النيوترونات في النوى الخفيفة المستقرة بدلا من تساوى عدد النيوترونات وعدد البروتونات. كما أنه لا يمكن أن تكون p-p أكبر من n-p أو من n-n لأنه في تلك الحالة سنجد في النوى الخفيفة أن عدد البروتونات يفوق عدد النيوترونات بدلا من تساويهما. كما أن وجود القوة يفسر من خلال زيادة عدد النيوترونات كلما زاد عدد البروتونات، وذلك ما يعرضه المنحنى في الجهة اليمنى من الشكل 3.4. كلما زادت القوة الكولومية تزداد نسبة عدد النيوترونات إلى البروتونات من 1 إلى حوالي 1.6 بالنسبة لليورانيوم $Z=92$. هذه الزيادة فسرت على أنها زيادة ضرورية في القوة النووية الكلية اللازمة للتغلب على قوة التنافر الكولومية. لذلك يمكن أن نفترض بالنسبة لقوة الترابط بين النويات مايلي:

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

$$n-p \gg n-n ; n-p \gg p-p ; n-n \sim p-p \quad - 2$$

في الافتراض الثاني قوة الترابط بين n-p محبذة على غيرها من القوى بسبب تساوي عدد النيوترونات والبروتونات في النوى الخفيفة. الإفتراض الأول يسمى بالقوة النووية المستقلة عن الشحنة Charge independence of nuclear forces ، في حين أن الافتراض الثاني يسمى بالقوة النووية ذات تماثل الشحنة Charge symmetry of nuclear forces . فيما يلي مناقشة للاستدلال على الافتراض الأول وهو تساوي قوة الترابط بين نويات النواة، بمعنى؛ n-p ~ n-n ~ p-p . ففي المتكاملات Isobars وهي النويات المتساوية في عدد الكتلة A مثل ${}^3\text{H}$ و ${}^3\text{He}$ واللذان تسميان بالنوى المرآتية Mirror nuclei أنظر الشكل 4.4 .



إن طاقة الترابط يمكن حسابها من الآتي:

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

حيث إن m_p كتلة البروتون و m_n كتلة النيوترون و M كتلة النواة المعنية، وبالتالي فإن طاقة الترابط للترينيوم تساوي 8.482 MeV ، وطاقة الترابط للهليوم تساوي 7.711 MeV . الفرق يساوي 0.771 MeV وهو له علاقة بقوة التناظر الكولومية لـ p-p في نواة الهليوم.

مثال 1.4

باستخدام المعادلة $E_c = \frac{3Z(Z-1)e^2}{5R}$ للتعبير عن الطاقة الكولومية الكلية
وباعتبار أن الشحنة تساوي 4.8×10^{-10} esu ، إثبت أن الفارق بين طاقتي
الترابط التريتيوم والهيليوم هي بسبب طاقة التناثر الكولومية في نواة الهيليوم.

الحل :

نظرا لأن الفارق بين طاقتي الترابط التريتيوم والهيليوم يساوي 0.771 MeV ،
فنساوي ذلك للطاقة الكولومية، حيث إن Z للهيليوم تساوي 2، أي أن:

$$0.771[\text{MeV}] \times 1.6 \times 10^{-6} [\text{erg/MeV}] = (6/5) \times (4.8 \times 10^{-10})^2 [\text{esu}]^2 / R$$

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

أو باستخدام المعادلة الاعتيادية بين شحنتي البروتونين لحساب الطاقة
الكولومية:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R}$$

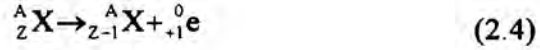
وباستخدام $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ و $1/4\pi\epsilon_0 = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ ، يمكننا حساب R :

$$0.771 \text{ MeV} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ joule/MeV} = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \text{ C}^2 / R$$

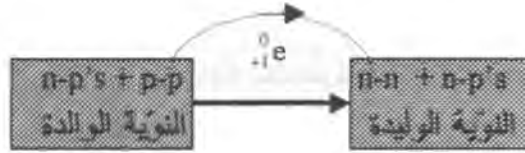
$$R = 1.87 \times 10^{-15} \text{ m} \sim 10^{-13} \text{ cm}$$

وهذا يعتبر نصف قطر مناسب للنوى الخفيفة مثل الهيليوم.

كما يمكننا الاستدلال على تساوي $n-p \approx n-n \approx p-p$ 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 هي ${}^A_Z X$ ، حيث إن $A=2Z-1$ ، ومعادلة
التحول هي:



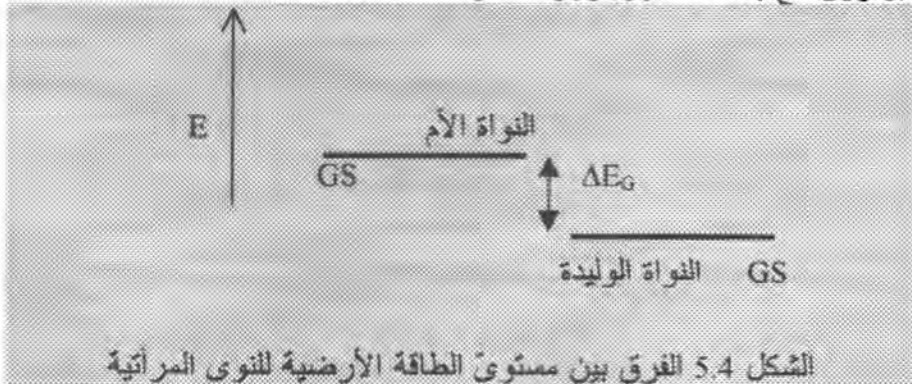
في مثل هذه النوى تكون للأم والوليدة نفس عدد الروابط n-p ، في حين أن الأم تكون لها رابطة p-p زيادة ورابطة n-n أقل، أي أن:



إذا وبافتراض تساوى رابطة n-n ورابطة p-p يمكننا حساب ΔE_G وهي الفرق بين طاقتي الحالة الأرضية (GS) Ground State Energy للنويتين من الآتي:

$$\Delta E_G = (\Delta E_C - \Delta m_{mp})[-am_u] \times 931 [\text{MeV}/am_u] \quad (3.4)$$

بحيث إن ΔE_C تمثل الفارق بين طاقتي التناظر الكولومية للنويتين و $\Delta m_{mp} = m_n - m_p$ تمثل الفارق بين كتلتى النيوترون والبروتون. أي أن الفرق بين مستويات الطاقة للحالتين التحتيتين يكون بسبب الرابطة في النوية الوالدة المسببة لتناظر كولومي إضافي وأيضاً بسبب تحول البروتون إلى نيوترون مع انبعاث البوزيترون، أنظر الشكل 5.4 .



الشكل 5.4 الفرق بين مستوى الطاقة الأرضية للنوى المرآتية

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

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

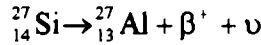
حيث إن A, Z للنواة الأم. إن ΔE_G المحسوبة والمقاسة معمليا متقاربتان، كما أن دراسة الفارق بين مستويات الطاقة الأرضية لمتكاثلات أخريات أظهرت تساوى الروابط $n-p \approx n-n \approx p-p$.

مثال 2.4

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

الحل:

السيليكون-27 والألومنيوم-27 يعتبران متكاثلتين أو نويتهن مرأتين لأن السيليكون يشع بوزيترون ونيوترينو ليتحول إلى الومنيوم وذلك كما يلي:



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

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

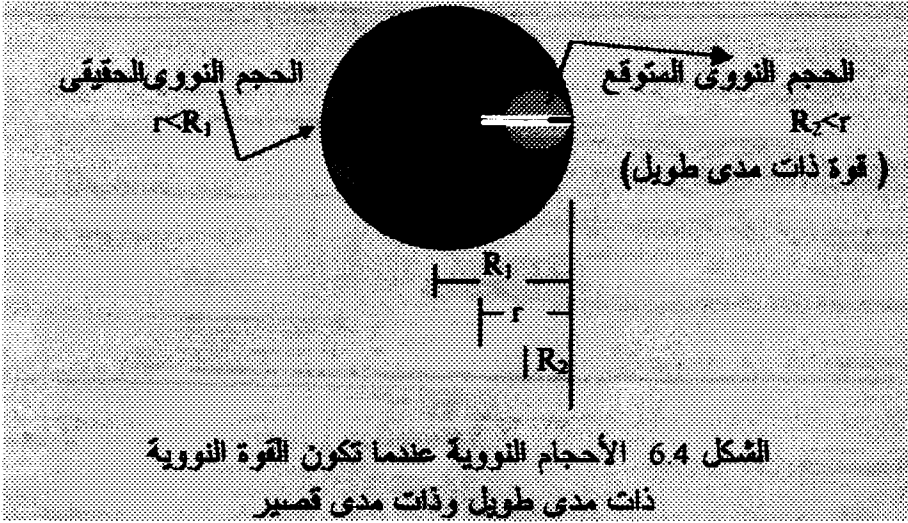
وبالتالى نجد أن هناك اختلافا بنسبة 6% فقط بين النظرى والمعملي مما يؤكد صحة افتراض تساوى الروابط $n-p \approx n-n \approx p-p$.

إن حيثية القوة النووية وخصوصا بالاستناد على دراسات التفاعل بين اثنتين من الجسيمات النووية يمكننا التعبير عنها بأنها ذات صبغة تجاذبية، وذات مدى يقارب من 2×10^{-13} cm وتعتمد على اللف، وليست مركزية تماما، ولا تعتمد على نوع النوية، كما أنها قوة غير معتمدة على الشحنة، أى أن:

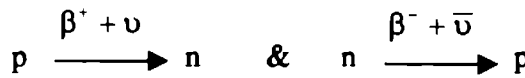
$$n - p \approx n - n \approx p - p$$

معضلة التشبع : Saturation Dilemma

إن الدراسات المعتمدة على مجموعات من النوى أوضحت أن طاقة الترابط لكل نوية تكاد تكون ثابتة كما أوردنا ذكره فيما سبق، وكذلك فإن نصف القطر يتناسب مع $A^{1/3}$ ، والذي يعنى بدوره أن حجم النواة يتناسب مع A ، ومن ثم نستنتج أن القوة النووية ذات خاصية تشبعية، تماما كخاصية التشبع التى يتصف بها جزيء الهيدروجين الذى نوهنا عنه سابقا. إلا أنه قد تبين بأن لو كانت القوة النووية تجاذبية، وذات مدى قصير، لا يمكن أن تكون لها خاصية التشبع المستتجة من قبل طاقة الترابط وكذلك من قبل أنصاف أقطار النوى. إن الدراسة المستتدة على طاقات الوضع والحركة للنوى كدالة فى نصف القطر أظهرت بأنه تحت ظروف قوة جذب نقيه 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 نوية تتفاعل مع نويات 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 معمليا، أنظر الشكل 6.4 .



هذه المعضلة حلت جزئياً بافتراض أن القوة ، أو جزءاً منها بين النويات فى بعض الأحيان يكون تجاذبى وفى بعض الأحيان يكون تنافرى، وذلك بناء على حالة النويات بالنسبة لبعضها البعض. إقترح هايسنبرغ Heisenberg بأنه عند التفاعل (Interaction) بين البروتون والنيوترون، فإن الشحنة على البروتون تقفز على النيوترون ويحدث التحول، أى أن؛



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

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

أحد النماذج النووية التي استهدفت تفسير طاقة الترابط النووية والذي يعد كثير الأهمية هو نموذج قطرة السائل والذي نجح في استخراج الصيغة شبه التجريبية Semi-empirical formula لطاقة الترابط . إن كتلة وطاقة الترابط للنواة استحوذت على كثير من الاهتمام وبالتالي 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 التشعب والمدى القصير واللتين إستتجتا بناءً على التناسب الخطي بين كل من طاقة الترابط والحجم مع عدد النويات 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 ذي كثافة عالية حوالى 10^{14} g/cm^3 . بهذه الفكرة مع الأخذ في الاعتبار التناظر الكهروستاتيكي وكذلك الشد السطحي Surface tension تم استخلاص صيغة شبه تجريبية للكتلة وكذلك طاقة الترابط في النواة. هذه الصيغة الرياضية مكونة من عدد من الحدود التي تؤثر في طاقة الترابط وكل حد منها له وزنة ثابتة weight Constant إما تكون قد استتجت نظرياً أو معملياً. ولنتخلص الآن الصيغة من خلال الحدود التي ذكرناها.

1- حد الطاقة الحجمي Volume Factor

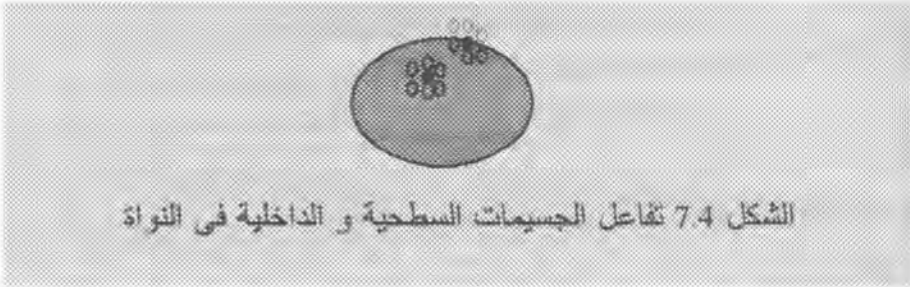
حيث إن طاقة الترابط تتناسب كما أوردنا سابقاً مع عدد الكتلة ، أي أن؛ $B.E. \propto A$ (لا حظ أن هذا صحيح بالنسبة للنوى المتوسطة والثقيلة) ونظراً لأن الحجم أيضاً يتناسب مع عدد الكتلة $V \propto A$ $V \propto A^3 \gg R^3 \propto A^{1/3}$ ، فإن هذا الحد قد سمي حد الطاقة الحجمي ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

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

حيث إن a_V يمثل ثابت التناسب.

2- حد الطاقة السطحي Surface factor

الجسيمات الموجودة على سطح النواة تتفاعل فى المتوسط مع نصف الجسيمات التى تتفاعل معها الجسيمات المحصورة فى النواة، أنظر 7.4 للتوضيح.



وحيث إن حد الطاقة الحجمى يحوى كل الجسيمات، علينا أن نُنحى تأثير هذا الحد وبالتالي يكون تأثيره سلبياً، وحيث إن $R \propto A^{1/3}$ وكذلك نظراً لأن المساحة السطحية S تتناسب مع مربع نصف القطر $(S \propto R^2 \propto A^{2/3})$ ، لذا فسيعرف حد الطاقة السطحي من العلاقة التالية:

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

3- حد الطاقة الكولومبى Coulomb factor

إن الطاقة الكولومية تسعى إلى تخفيض طاقة الترابط الكلية بسبب تنافر البروتونات، وبالتالي فتأثيرها سلبى، أى أن :

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

4 - حد الطاقة لتأثير اللاتناظر Asymmetry effect term :

لكل قيمة من A ، هناك قيمة Z التي تناظر النويـدة ذات أعلى استقرار، فبالنسبة للنويدات الخفيفة حيث $Z = A/2$ (راجع الشكل 3.4) والتي توافق النويدات الأكثر استقراراً، فإن القوة الكولومية ذات تأثير جد ضئيل . وبالتالي ففي غياب القوة الكولومية فإن أى ابتعاد من شرط $Z = A/2$ يؤدي إلى عدم استقرارية وبالتالي إلى قيمة أقل لطاقة الترابط ، لذا يجب وضع حد تأثير اللاتناظر في الحساب والذي له أيضا قيمة سلبية. إن الحد المطلوب يتناسب مع $(A-2Z)^2$ ، حيث إن $(A-2Z)$ تمثل فائض النيوترونات ، كما أن القوة التربيعية لضمان صفرية الحد وتفاضله بالنسبة لـ Z عند $Z = A/2$. الحد المرغوب فيه يعطى بالمعادلة التالية :

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

5 - حد الطاقة للتأثير الفردي الزوجي Odd-even effect :

النوى ذات الأعداد الزوجية من البروتونات والنيوترونات (e,e) تعد الأكثر وفرة والأكثر استقراراً، في حين أن تلك النوى بأعداد فردية من البروتونات والنيوترونات (o,o) تعد الأقل استقراراً ، كما أن التركيبات الفردية - زوجية بين البروتونات والنيوترونات (e,o أو o,e) فى نويات أخرى تعبر عن وسطية الاستقرارية . لذلك يجب إضافة هذا الحد للصيغة النهائية لمعادلة الترابط ، وهذا الحد يعبر عنه بالمعادلة التالية:

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

6 - حد الأغلفة η Shell term :

هذا الحد يأتي من علمنا بأنه عند كون عدد البروتونات أو النيوترونات يساوي عددا سحريا تكون النواة أكثر استقراراً، وبالتالي يكون هذا الحد موجبا.

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

الصيغة النهائية لمعادلة طاقة الترابط بوحدة MeV يتم الحصول عليها بتجميع تأثير كل الحدود المذكورة أعلاه فيما عدا الحد السادس هي:

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

الجدول التالي يوضح قيم الثوابت اللازمة للمعادلة 10.4:

الجدول 1.4 قيم الثوابت لمعادلة طاقة الترابط

الحد	رمز الثابت	القيمة
الحجمي	a_v	15.76
السطحي	a_s	17.81
الكولومي	a_c	0.71
تأثير اللاتناظر	a_{AS}	23.7
التأثير الفردي-الزوجي	a_{O-E}	34

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

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

حيث إن m_p تمثل كتلة البروتون ، و m_n تمثل كتلة النيوترون، و M_{nuclear} كتلة النواة (كل الكتل بوحدة الكيلوجرام) ، في حين أن $B(A,Z)$ بوحدة الجول ($1\text{MeV}=1.6\times 10^{-13}\text{ J}$) و c سرعة الضوء تساوي $2.998\times 10^8\text{ m/sec}$.

وفي حالة حساب الكتل الذرية، فيتم إضافة كتل الإلكترونات وذلك حسب المعادلة التالية وهي المعادلة التي اشتهرت باسم صيغة ويزساكر Weizsacker الشبه تجريبية للكتلة.

$$M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e - a_v A + a_s A^{2/3} + a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_{As} \frac{(A - 2Z)^2}{A} + E_\delta \quad (12.4)$$

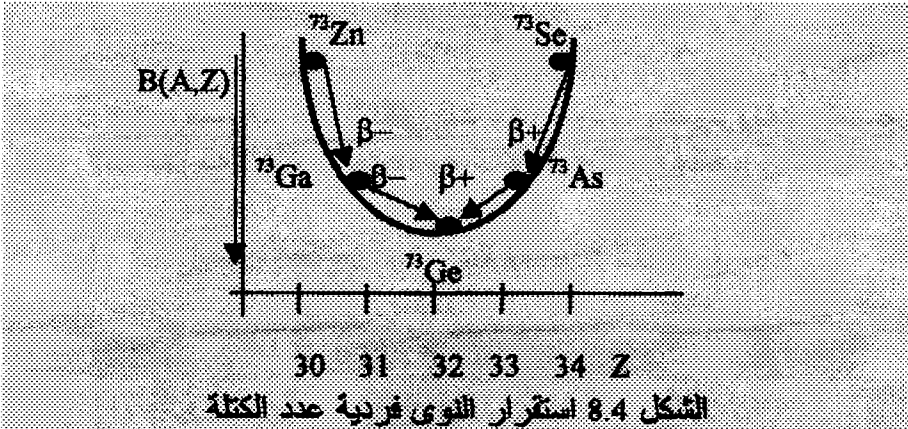
الجدول 2.4 يوضح قيم كتل الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات وبعض التحويلات اللازمة لتطبيقات صيغة ويزساكر شبه التجريبية.

الجدول 2.4 بعض القيم اللازمة لاستخدام معادلة ويزساكر

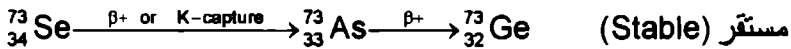
الكتلة amu	الكتلة Kg	الجسيم
0.000549	9.109×10^{-31}	الإلكترون
1.00782519	1.673×10^{-27}	البروتون
1.00866520	1.675×10^{-27}	النيوترون
التحويلات		
$1\text{amu}=1.661\times 10^{-27}\text{ Kg}$		
$1\text{MeV}=1.602\times 10^{-13}\text{ J}$		
$1\text{amu}=931\text{ MeV}$		
$c=2.998\times 10^8\text{ m/sec}$		

تطبيقات نموذج قطرة السائل : Application of Liquid Drop Model

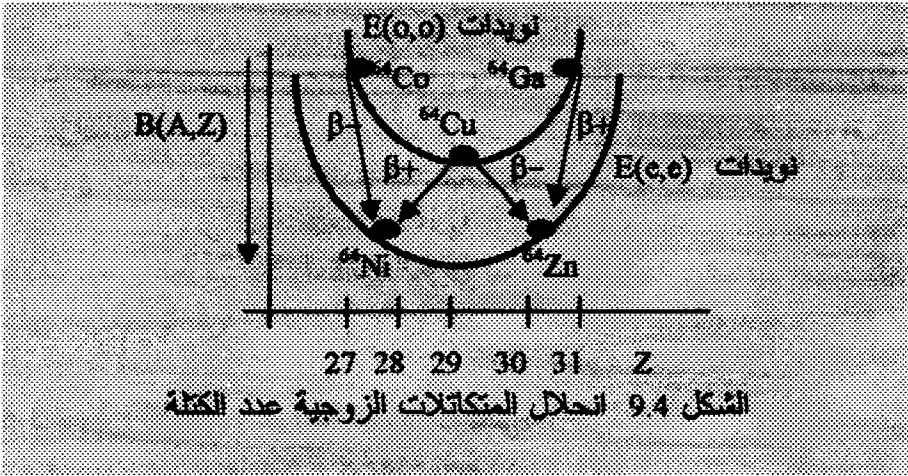
لقد كان لطاقة الترابط دور فعال في فهم طبائع خصائص الاستقرار للنوى، وخصوصًا النشاط الإشعاعي لجسيمات بيتا، وكذلك خصائص استقرار المتكاثلات. فلو اخترنا مجموعة نويدات بعدد كتلة فردي A ومتغيرة في Z ، ثم قمنا برسم طاقة الترابط لهذه النوى ضد العدد الذري Z ، سنحصل على منحنى بشكل قطع مكافئ. ستكون النويدة الأكثر استقرارًا في قاع المنحنى، وتلك على اليسار ستحلل بإشعاع جسيمات بيتا β^- ، في حين تلك التي على اليمين ستحلل بإشعاع جسيمات البوزيترون β^+ ، أنظر الشكل 8.4.



وبصيغة معادلات الانحلال يمكننا كتابة ما يلي:



أما في حالة عدد الكتلة A الزوجي فإن سبب وجود الحد الزوجي-الفردى E_8 في معادلة طاقة الترابط يجعلنا نتحصل على زوج من المنحنيات بشكل القطع المكافئ كما هو موضح في الشكل التالي:



ففي الشكل 9.4 نلاحظ أن المتكاثلات زوجية عدد الكتلة مكونة من عدد فردي لكل من عدد البروتونات والنيوترونات (0,0) أو مكونة من عدد زوجي لكل من عدد البروتونات والنيوترونات (e,e) ، وبحكم أن قيمة الحد الفردي- الزوجي في معادلة طاقة الترابط إما موجبة في حالة (e,e) أو سالبة في حالة (0,0) ، لذا كان لنا المنحنيان الواردان في الشكل السابق وعلى الشكل أيضا نرى طبيعة انحلال النويدات سواء بإشعاع β^- أو β^+ . ومن الشكل وبسبب المنحنى السفلي نلاحظ أنه لا يمكن الحصول على نويدة مستقرة يكون عدد كتلتها زوجيا وعددها الذري Z فرديا (النحاس ^{64}Cu) ، وذلك لانحلالها الفوري 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 المتكاثلات سواء الفردية أو الزوجية كان ممكناً بسبب تمكننا من إيجاد صيغة رياضية لطاقة الترابط في النوى؟ بلى. وهذا هو السبب في محاولة إيجاد النماذج المختلفة لتفسير ما يكتنف النواة من غموض، هذا ويستخدم نموذج قطرة السائل في تفسير نظرية النواة المركبة Compound nucleus وكذلك في نظرية الانشطار التي تفسر الانشطار كأنه إرباك وتقسيم في قطرة السائل. كما أنه هناك نماذج أخرى

مثل النموذج الشمولى Collective model والمستند على دراسات فى العزم رباعى القطبية الكهربية وكذلك النموذج البصرى Optical model والمستخدم فى دراسات التفاعلات النووية وذلك من خلال تكوين النواة المركبة، ففى النموذج البصرى يعتقد أن النواة المركبة لا يحدث فوراً، وأيضاً ليس بضمناً أكيد، حيث يظن أن النواة تتصرف كأنها كرة رمادية Gray sphere حيث تقوم بالامتصاص الجزئى و الإنعكاس الجزئى للموجة الساقطة (الجسيم الساقط على النواة).

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

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

إن نموذج الأغلفة يعد من أهم النماذج والأكثر أهمية من غيره بخصوص البناء النووى. لقد تم فى السنوات الأخيرة ملاحظة أن الخصائص النووية تتغير دورياً (Periodical Variation) . حيث إن كثيراً من الخصائص أظهرت انقطاعات (Discontinuities) قرب قيم زوجية من أعداد النيوترونات أو البروتونات. أوضحت التجارب بأن النوى المستقرة تتصف بأن عدد بروتوناتها Z أو عدد نيوتروناتها N يساوى عدداً سحرياً Magic Number . هذه الأعداد السحرية هى:

$$2, 8, 20, 50, 82, 126, \dots$$

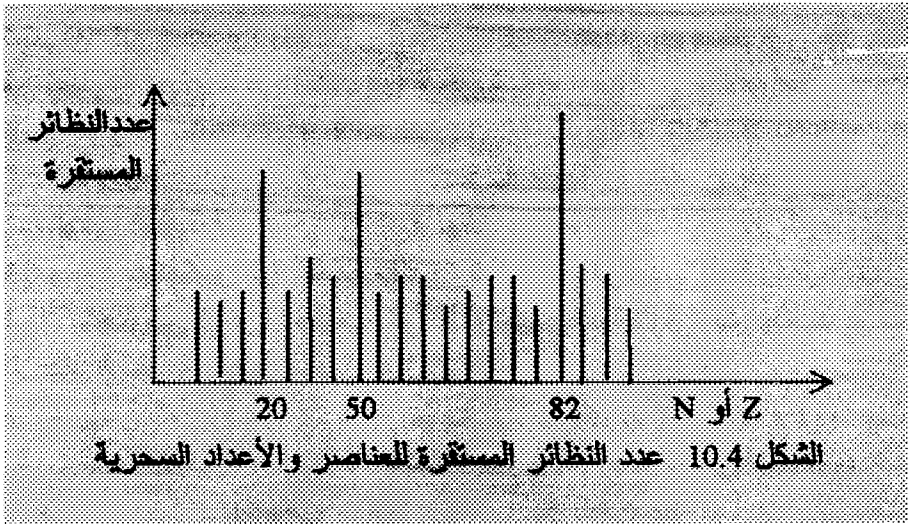
لقد تم تفسير هذه الأعداد السحرية على أنها تكون أغلفة مغلقة من النيوترونات أو البروتونات، كما أن أغلفة البروتونات وأغلفة النيوترونات تبدو مستقلة عن بعضها بعضاً. إن دراسة النوى المستقرة أظهرت دلائل عن حقيقة هذه الأعداد السحرية. فمثلاً نواة ${}^4\text{He}$ التى لها نفس العدد من البروتونات $Z=2$ و النيوترونات $N=2$ ، وأيضاً نواة الأكسجين ${}^{16}\text{O}$ تحتوى على نفس العدد من البروتونات والنيوترونات وهو العدد 8 . كلتا النواتين

- تعتبران أكثر استقرارًا من النوى المجاورة لهما. كما أن الأعداد 14، 28، 40، في بعض الأحيان تدعى أعداد شبه سحرية Semimagic Numbers .
تتسم النوى المستقرة بأحدى الخصائص التالية منفردة أو مجتمعة:
- 1- قوة ترابط عالية.
 - 2- الوفرة الطبيعية.
 - 3- وجود عدد كبير من النظائر المستقرة للعنصر الواحد.
- فمثلًا بخصوص الوفرة الطبيعية، لوحظ أن قيمة عالية للوفرة تتواجد عند الأعداد السحرية، أنظر الجدول 3.4 .

الجدول 3.4 وفرة العناصر الحاملة للأعداد السحرية

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

فكما نلاحظ من الجدول أن العنصر ^{16}O هو أحد أخف العناصر على منحنى طاقة الترابط، حيث إن له طاقة ترابط ضعيفة نسبياً مقارنة بالعناصر المتوسطة والثقيلة، لذا فإن الوفرة الطبيعية تعد مقياساً لمدى استقرارية العناصر، وهذه العناصر التي لها وفرة عالية تحمل أعداداً سحرية. أيضاً 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 التي لها أكبر عدد من النظائر المستقرة تتميز بحملها أعداداً سحرية إما لعدد البروتونات أو لعدد النيوترونات. أنظر الشكل 10.4 للتوضيح.



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 النوية 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 يساوي 128 ويشعان جسيمات الفا بطاقات 9.4 MeV و 8.78 MeV . كل منهما يتحول إلى نويدة لها عدد 126 من النيوترونات وهو عدد سحري. هناك دراسات مماثلة لانحلال العناصر بإشعاع جسيمات بيتا ، وقد أوضحت هذه الدراسات أن جسيمات بيتا الأكثر طاقة تُشع عند تحول النويدة إلى نويدة وليدة Daughter Nuclide تحمل عددا سحريا.

نستنتج من كل هذا أن النيوترونات والبروتونات تتجمع في أغلفة شبيهة بتلك التي تتجمع فيها الإلكترونات في الذرة، وعندما تمتلئ هذه الأغلفة بعدد سحري، فإن البناء المتكون يكون مستقرا (لا ينحل بإشعاع جسيمات مثل الفا وبيتا) وله طاقة ضئيلة جدا. إن في ذلك تشابهاً لما يسمى في البناء الإلكتروني للذرة بالعناصر الخاملة (النييلة) التي لا تتفاعل كيميائيا بسبب إمتلاء مدارات الذرة الخارجية بعدد من الإلكترونات تساوي 2 (الهيليوم) و8

(النيون ^{20}Ne) و (الأرجون ^{40}Ar) ، و 18 (الكريبتون ^{84}Kr) .. الخ ، وهي موجودة في أقصى يسار الجدول الدوري الحديث للعناصر .

إن نموذج الأغلفة يفترض أن :

1- كل نوية nucleon تتحرك في مدارها في النواة مستقلة تماما عن باقي النويات .

2- تحكم كل جسيم دالة طاقة وضع (Potential Energy) $V(r)$ ممثلة لتأثير كل التفاعلات Interactions مع باقي النويات ، كما أن هذه الدالة هي نفسها لكل نوية أو جسيم في النواة .

3- تُبنى أغلفة البروتونات والنيوترونات كل منها مستقلا عن الآخر ولكن بنفس الطريقة .

4- وحيث إن كل نوية لها ل Spin ، فقد افترض بأن النويات يتزاوجان Pair off بلف مضاد لبعضهما بعضا .

5- كل نوية تعد جسيما مستقلا ، وأن التفاعلات بين النويات تعتبر اضطرابا أو تحورا Perturbation صغيرا على التفاعل بين النوية و مجال طاقة الوضع . Potential Field

فكما أشرنا سابقا ، فإنه هناك تشابها بين البناء الإلكتروني للذرة والبناء النووي للنواة . الجدول 4.4 يوضح أوجه التشابه والخلاف للبنائين الإلكتروني والنوياتي .

من دراسات انحلال النوى المشعة ، نعلم طاقة الانحلال الكلية (قيمة Q) لذات النوع من النويدات لها قيمة محددة ، كما أن انبعاث أشعة γ من النوى يكون ذا قيم محددة مميزة Discrete definite values . هذه الحقائق جميعها تشابه الإشعاع الكمي للإشعاعات الكهرومغناطيسية من الذرة مثل أشعة إكس والأشعة فوق البنفسجية وأشعة الضوء المرئي ، .. الخ . لذلك فقد تم الاستنتاج بأن انحلال النوى المشعة سواء بإنبعاث الفا (α) أو بيتا (β) أو جاما (γ) له علاقة بإنتقالات بين مستويات طاقة كمية مميزة . Discrete Quantized Energy Levels

الجدول 4.4 أوجه الشبه والاختلاف بين البناء الإلكتروني للذرة والبناء النووي لنواة

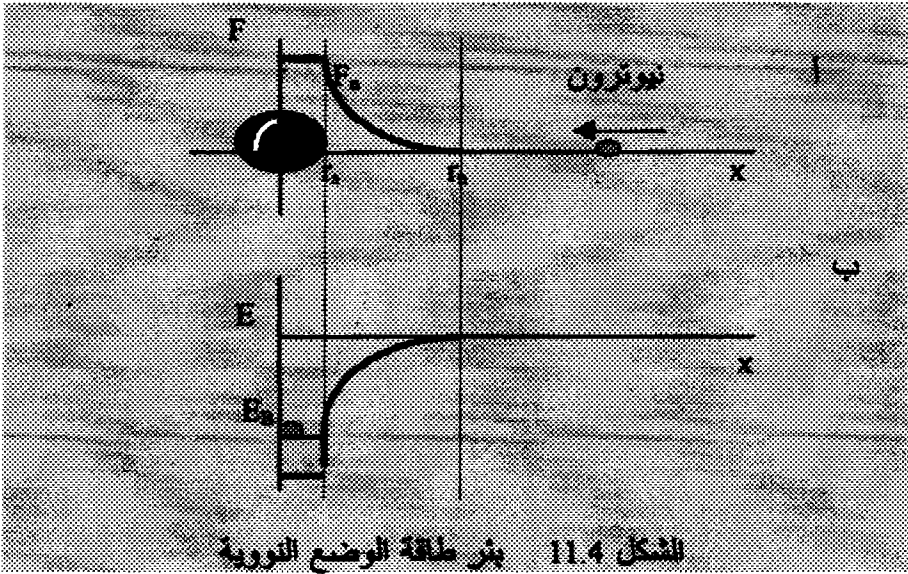
أوجه الاختلاف		أوجه التشابه	
الإلكترونات	النويات	الإلكترونات	النويات
طاقة كولوم: $E(r) \propto \frac{1}{r}$	طاقة الوضع: $V(r) = -V_0 - 1$ $V(r) = -V_0 + a r^2 - 2$	طاقة كولومية	طاقة وضع
نوع واحد (إلكترون)	نوعين من الجسيمات (البروتون و النيوترون)	مدارية (حالة كمية)	مدارية (حالة كمية)
		إشعاع فوق البنفسجية و أشعة X بسبب إنتقالات بين مستويات طاقة كمية	إشعاع α, β, γ بسبب إنتقالات بين مستويات طاقة كمية

بنر طاقة الوضع النووية The Nuclear Potential Energy Well :

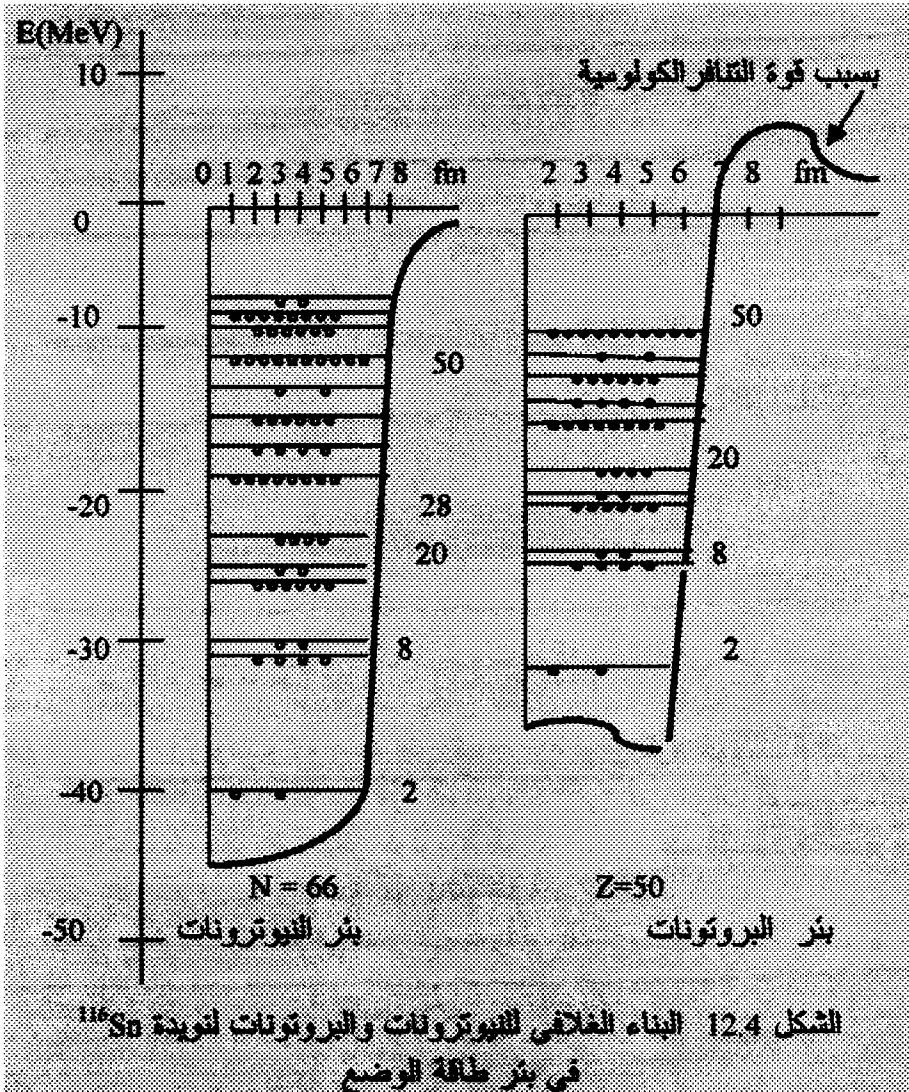
لنتصور أن نيوترون بطاقة حركية ضعيفة يقترب من نواة ما، ونظراً لأن النيوترون غير مشحون فسوف لن يكون هناك تأثير من قبل المجال الكولومي للنواة، ومن ثم فإن النيوترون سوف يقترب بدون أى تفاعل حتى تقترب بكفاية وتظهر عند ذلك تأثيرات القوة النووية الجاذبة $F_n > 0$ عند البعد r_n وبالتالي يتم امتصاصه بالنواة عند سطحها r_s ، أنظر الشكل 11.4 (أ). عندما يتم امتصاص النيوترون فسيتم تحرير طاقة تتبعث في صورة كم جاما. طاقة جاما المنبعثة تحسب من المعادلة التالية:

$$E_\gamma = -931.5 (M_{A+1} - M_A - M_n) \quad (13.4)$$

الطاقة المتحررة هي طاقة الترابط للنيوترون في النواة E_B . وتبعاً لذلك فإن الطاقة الكلية للنواة تتخفض بذات القيمة، أنظر الشكل 11.4 (ب)، هذا الانخفاض يشار إليه عادة ببئر طاقة الوضع Potential Energy Well.



يمكننا إذاً اعتبار أن النويات تحتل مستويات طاقة مختلفة في هذا البئر. إن الشكل الحقيقي للبئر غير محقق فقد يكون الشكل مربعاً أو قطعاً ناقصاً أو غيره. أيضاً البروتونات تقع تحت ظروف مماثلة لهذه القوة النووية القوية ذات المدى القصير عند اقترابها من النواة، ولكن في نفس الوقت تقع هذه البروتونات تحت تأثير قوة تنافر كولومية طويلة المدى. هذه القوة الأخيرة تمنع بنر الوضع أن يكون أعمق من نظيره الخاص بالنيوترونات. ففي تعبئة مستويات الطاقة في البئر لنتصور أن النواة بها نوية واحدة، وهناك نيوترون قادم الذي بدوره سيقع تحت تأثير القوة 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 النويتان الحبيستان بالنواة ستؤثران بقوة نووية جديدة على النيوترون القادم الجديد، وبالتالي يتم امتصاصه نظير طاقة ترابط جديدة وبالتالي يكون هناك مستوى طاقة جديد، وهكذا تتكرر العملية. إذاً وبتتابع تجمع النيوترونات داخل النواة ستتوزع في مستويات طاقة مختلفة. الشكل 12.4 يوضح مستويات الطاقة للنيوترونات والبروتونات في نواة ^{116}Sn .

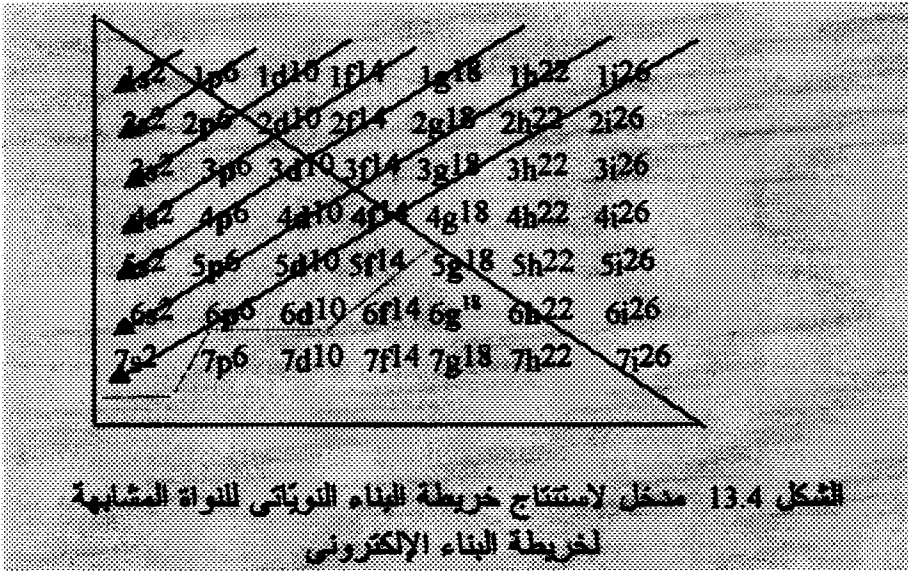


ونظراً لأن الاستقرار Stability تعنى عدم انبعاث أشعة وجسيمات من النواة، فإن ذلك يعنى أنه لا بد من وجود غلاف يمنع حدوث ذلك. وهذا هو مفهوم نظام الأغلفة، حيث إن هذه الأغلفة تحمل أعداداً سحرية. ومن ثم وحتى يتسنى لنا وصف كيفية توزيع النويات داخل النواة، تمت محاولة الربط مع أسلوب البناء الإلكتروني الذى قمنا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

من التفصيل الذى يؤهلنا لمتابعة النقاش للوصول إلى البناء النوويّاتى للنواة. إن إتباع خريطة البناء الإلكتروني مكنّت من ملء مستويات الطاقة بالنويّات ولكن لم يُتمكّن من إظهار كل الأعداد السحرية. لحل هذه المشكلة ، وجب استحداث طريقة لفصل Split هذه المستويات المستخلصة من أسلوب البناء الإلكتروني، بحيث يتم ملء هذه المستويات الجديدة بنويّات. لقد تمّ التمكن من إحداث هذا الفصل باعتبار أن البئر شكله قطع ناقص Parabolle ، ولكن هذه الطريقة لم تُمكن من حل المشكلة كلياً، فلذلك تمّ اقتراح التقارن Coupling بين الزخم الزاوى المدارى Orbital angular momentum و الزخم الزاوى المغزلى Spin Angular Momentum ، أى أن $i = 1 \pm s$ ، هذا الحل مكنّ من فصل مستويات الطاقة وكذلك أنتج الأعداد السحرية.

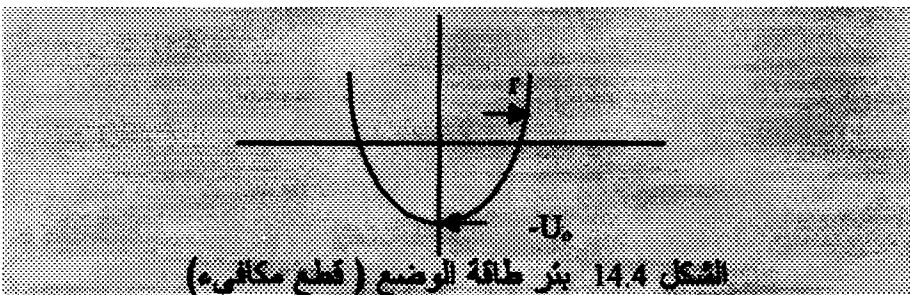
لقد أوجزنا فى السطور السابقة التدرج فى استنباط الكيفية التى تمكّنتنا من استنتاج الأعداد السحرية وذلك من خلال تطور نموذج الأغلفة عبر سلسلة من الأفكار التى أوصلت أخيراً إلى استنتاج الأعداد السحرية، والآن لنأخذ بعض الوقت للغوص بشيء من التفصيل لما أوجزناه فى السطور السابقة.

سنعيد عرض خريطة البناء الإلكتروني للذرة هنا مرة أخرى ولكن بشكل موسع أكثر حتى يمكّنا الاستفادة منها فى استخلاص البناء النوويّاتى تبعاً لذلك. لاحظ أن شكل الخريطة مستطيل ، وأن الجزء المشار إليه بالمثلث (المحتوى على الحروف الداكنة) هو الذى أوردناه فى الفصل الأول من هذا الكتاب لغرض البناء الإلكتروني للذرة ، كما أن الأسهم الواردة (الجزء المحصور داخل المثلث فقط) توضح تسلسل البناء الإلكتروني، كما يشير الخط المنكسر فى الخريطة إلى الحد النهائى لملء أغلفة المدارات الإلكترونيّة للعناصر المتوفرة فى الطبيعة أو المصنعة، حيث إن أحدث العناصر المكتشفة هو العنصر $Z=106$.



وبالرجوع إلى الجدول 5.4 الذي يبين الحالات الكمية Quantum states وعدد الجسيمات المحمولة في كل مستوى كمي مع تتبع الأسهم الواردة في الخريطة بالشكل 13.4 و ذلك من منبت السهم من خارج المثلث نتحصل على بناء نوياى 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 مكافئ Parabolic ، وتتغير طاقة النوية بين طاقة الوضع وطاقة الحركة مثل المتذبذب التوافقى Harmonic oscillator ، أنظر الشكل 14.4 لتوضيح بنر طاقة الوضع المفترضة(منخفض الجهد المفترض).



الجدول 5.4 الأعداد الكمية والبناء النووي

الحالة الكمية	العدد الكمي	العدد الكمي	عدد الجسيمات بالمستوى	العدد التراكمي للنويات =
	1	$m_l = -1 \dots +1$	$\# = 2(2l + 1)$	$\# \sum_0^l 2(2l + 1)$
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	$(1d^{10} 2p^6 3s^2) 18$
f	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
-	1	-1, ..., +1	$2(2l+1)$	$\sum_0^l 2(2l+1)$

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

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

حيث إن U_0 تمثل طاقة الوضع عند نصف قطر $r=0$ ، و m تمثل كتلة النوية، و n, ℓ تمثلان حالتين (عددين كميين)، كما أن تردد المتذبذب ω

$$\cdot \sqrt{\frac{2U_0}{mr^2}} \text{ يساوي}$$

وبناء على تلك المعادلة فإن مستويات الطاقة تعطي كما هو موضح في الجدول

:6.4

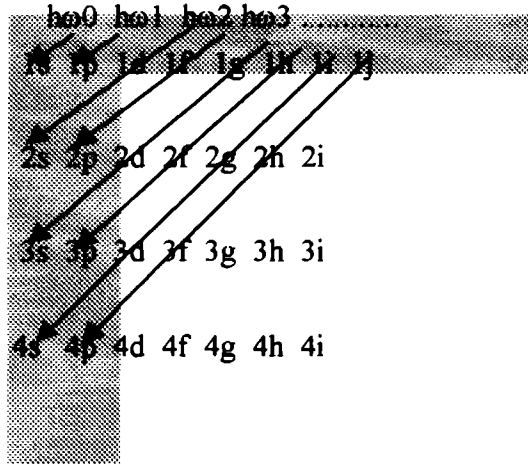
الجدول 6.4 ملء مستويات الطاقة باستخدام بنزr القطع المكافئ

طاقة المستوى $h\omega(2(n-1)+1)$	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	1d	12	20
	2	0	2s		
$h\omega_3$	1	3	1f	20	40
	2	1	2p		
$h\omega_4$	1	4	1g		
	2	2	2d	30	70
	3	0	3s		
$h\omega_5$	1	5	1h		
	2	3	2f	42	112
	3	1	3p		

لاحظ

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

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



الشكل 15.4 تعبئة مستويات الطاقة بالنويات استنادًا على بئر القطع المكافئ

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

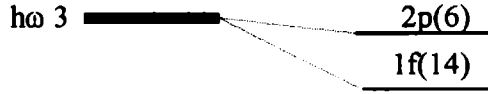
مثال 3.4

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

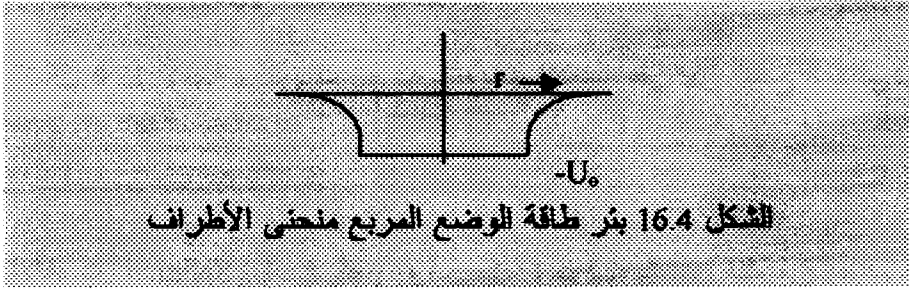
الحل:

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

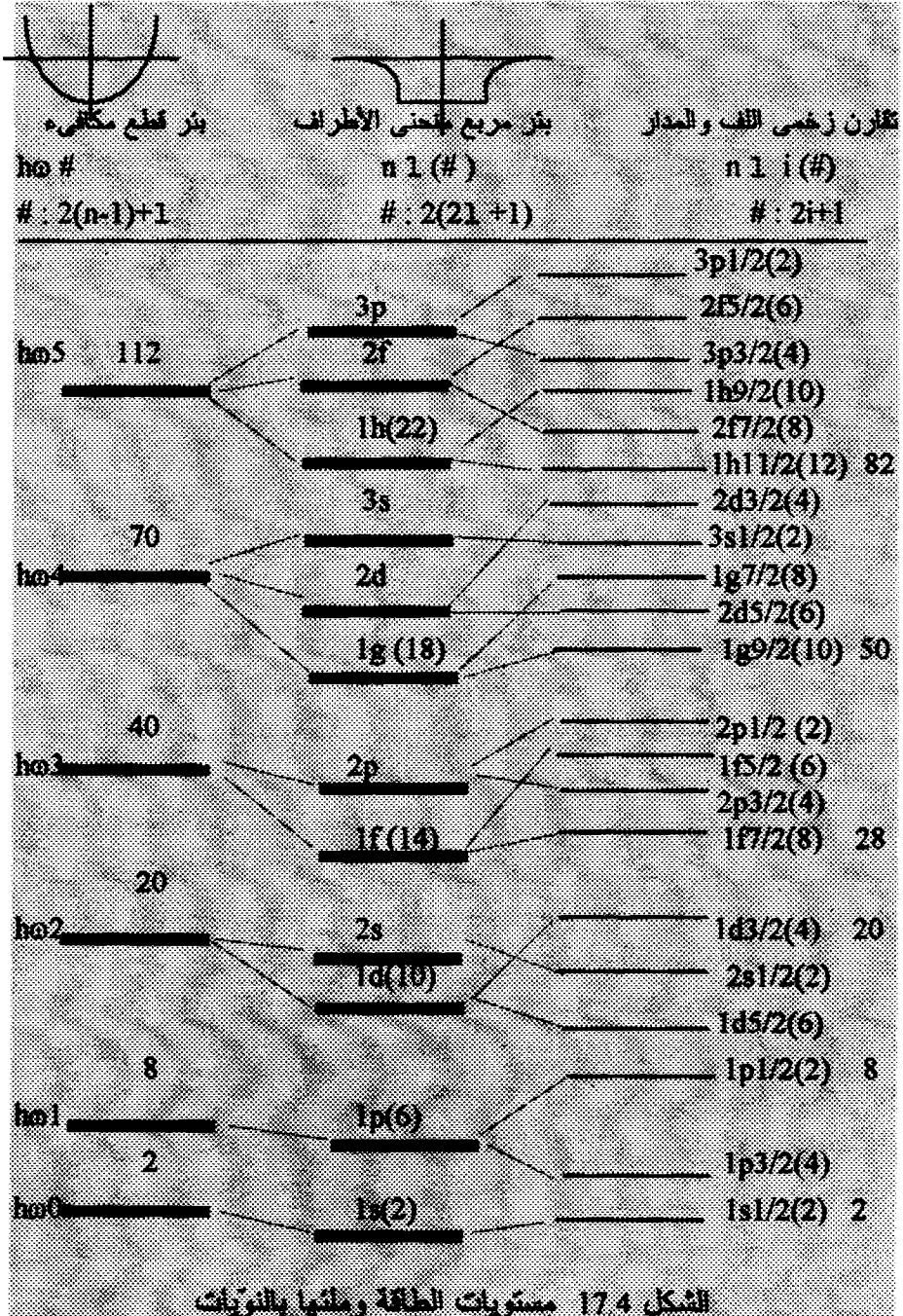
نووية ، كما أن $2p$ يمكنها احتواء 6 نوويات، لذا فإن المستوى المنفصل يمكنه حمل $14+6=20$ نووية .



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



ساعد هذا الافتراض بعض الشيء ولكن لم يف بالغرض كلية ، ومن ثم كانت الحاجة إلى تحسين آخر والذي كان بافتراض تقارن زخم اللف الزاوي مع الزخم الزاوي المداري $l-s$ coupling ، حيث إن $i=1+s$ ويكون الزخم الزاوي الكلي $I=\sum z_i$. بهذه الطريقة كل مستويات الطاقة ما عدا مستوى s انفصلت إلى مستويين بقيم كمية تساوي $1+1/2$ و $1-1/2$ ، بحيث أن المستوى ذا اللف الموجب له قيمة طاقة أقل (يكون تحت الآخر عند رسم مستويات الطاقة للنويات ، 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.



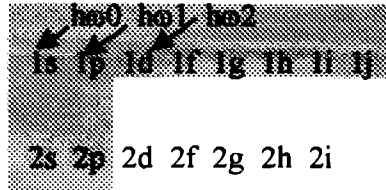
لتوضيح الشكل 17.4 ، نلاحظ في أقصى يسار الشكل مستويات الطاقة المستنتجة من حل معادلة شرودنجر وذلك لبئر طاقة الوضع ذات القطع المكافئ ، حيث وردت في الشكل مستويات الطاقة من $h\omega_0$ إلى $h\omega_5$ ، ونلاحظ عدد النويات التراكمية 2 ، 8 ، 20 ، 40 ، 70 ، 112 ، و 168 لا تمثل كل الأعداد السحرية، وعلى يمين هذه المستويات نلاحظ عملية فصل هذه المستويات، كما أوردنا في مثال 3.4 ، فمثلا وباستخدام المعادلة 14.4 نجد أن مستوى الطاقة $h\omega_1$ يعبر عنها بمستوى $1p$ ، في حين مستوى الطاقة $h\omega_2$ يمكن التعبير عنه بمستوى $2s$ و $1d$ وهكذا تتم عملية انفصال المستويات ، كما نلاحظ أنه وضعنا على هذه المستويات وصف ذلك المستوى مع عدد النويات التي يحملها ($\# = 2(2i+1)$ ، حيث إن $i = 1, n$ تعبران عن الأعداد الكمية و ($\# = 2(2i+1)$) تعبر عن عدد النويات في ذلك المستوى ، فمثلا $2p(6)$ تعنى أن n تساوى 2 وأن l تساوى 1 (أو بالحروف p ؛ أنظر الجدول 6.4) كما أن (6) تعنى أن هناك عدد 6 نويات بذلك المستوى . وبتقارن زخمىّ اللف والمدار تم الفصل أكثر وأستظهرت الأعداد السحرية كما هو مدون في أقصى يمين الشكل. أيضا نلاحظ أنه تم وصف المستويات في أقصى يمين الشكل من خلال الأعداد الكمية وكذلك عدد النويات المحمولة بتلك المستويات $\# = 2i + 1$ حيث إن $i = 1, n$ تعبران عن الأعداد الكمية و i تمثل التقارن بين زخمىّ اللف والمدار أى أن $s = \pm 1 = i$ ، أما ($\# = 2i+1$) فتمثل عدد النويات المحمولة بالمستوى. فمثلا (8) $1g_{7/2}$ تفيد أن n تساوى 1 وأن l تساوى 4 (أو g حسب الجدول 6.4) ، في حين أن $7/2$ تمثل $s = 1 - i$ أو $s = 1/2 - i$ ، وأخيراً (8) تمثل عدد النويات في هذا المستوى $\# = 2i+1$ أو $\# = 8 = 2 \times 7/2 + 1$. وهكذا باستخدام خريطة البناء النوياتى الواردة بالشكل 15.4 مع استخدام التقارن بين زخمى اللف والمدار يمكننا رسم مستويات الطاقة للنويات مع العلم أنه في حالة التقارن فإن $1+1/2$ تكون ذات طاقة أقل من $1-1/2$ وبالتالي يرسم مستوى $1+1/2$ تحت مستوى طاقة $1-1/2$ (لاحظ أن بئر طاقة الوضع سالب) ومن خلال $\# = 2i + 1$ يمكننا وصف كل مستوى مع ما يحمله من نويات.

مثال 4.4

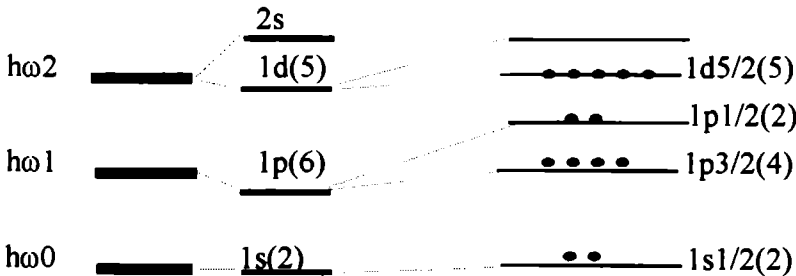
ارسم مستويات الطاقة للبروتونات فى نواة الألومنيوم ^{27}Al مع وصف تلك المستويات من خلال الاسم الرباعى $n l i \#$.

الحل:

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

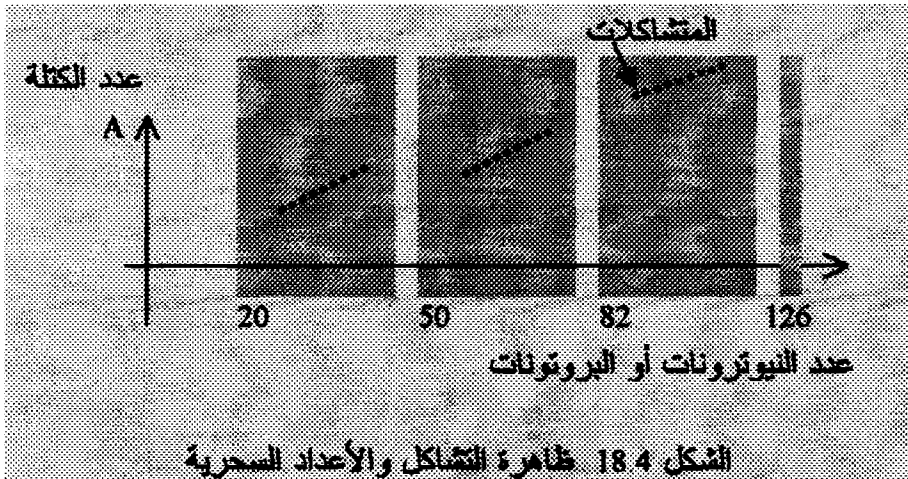


وباستخدام التقارن بين زخمى اللف (المغزلية) والمدار فإن كل من المستويين p و d يحدث لهما انفصال ، فى حين أن المستوى s لا ينفصل، وباستخدام معادلة تعبئة المستوى $n l i \#$ يكون وصف المستوى $1s$ هو $1s(2)$ ، والمستوى $1p$ ينفصل إلى مستويين $1p(2)$ و $1p(4)$ كما أن المستوى $1d$ ينفصل هو أيضا بسبب تقارن زخمى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



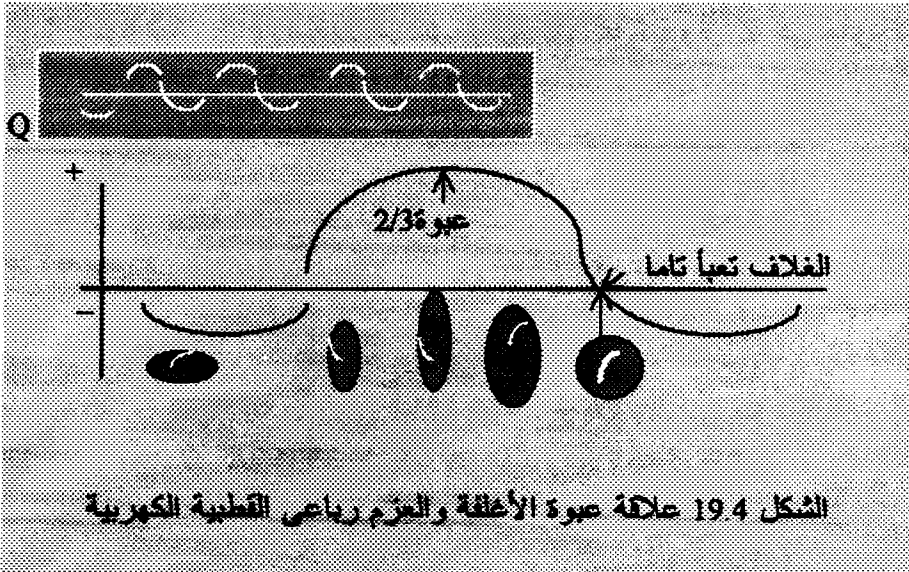
تطبيقات نموذج الأغلفة : Application of Shell Model

من مزايا نموذج الأغلفة هو إمكانية التنبؤ بالزخم الزاوي الكلي للنوى والذي يتوافق تماما مع التجارب المعملية، ومن ثم يمكننا تحديد زخم زاوي كلى لنوى لم يتم تحديد زخمها الزاوي الكلي معمليا. كما أمكن باستخدام نموذج الأغلفة من دراسة ظاهرة التشاكل Isomerism ، حيث ظاهرة التشاكل تعنى وجود حالات مثارة ذات عمر طويل وذلك لأن مستويات الطاقة المتجاورة فى النواة تتميز بفارق كبير بينها فى الزخم الزاوي الكلي مما يجعل انتقال النوى بين هذه المستويات صعبا للغاية فتبقى النواة فى حالة مثارة لأمد طويل. لقد تم رسم المتشاكلات Isomers ذات عدد الكتلة A الفردى بالنسبة لأعدادها الفردية من البروتونات أو النيوترونات، فوجد أن تجمعات من المتشاكلات تتواجد وتقطع تماما عند الأعداد السحرية ولا تبدأ فى الظهور من جديد إلا بعد أن يمتلىء الغلاف إلى نصفه من النويات. الشكل 18.4 يمثل رسم توضيحي لظهور المتشاكلات وإنقطاعها عند الأعداد السحرية.



فلاحظ على سبيل المثال أن نظائر عنصر الزينون (Xe) ذات أعداد الكتلة الفردية 127، 129، 131، 133، 135 بعدد النيوترونات 73، 75، 77، 79، 81 كلها تظهر التشاكل، فى حين أن النظيرين بعددى الكتلة 137 و

138 الحاملين لعدد النيوترونات 83 و 85 لا تظهران ظاهرة التشاكل. وهو تماما ما يحدثه نموذج الأغلفة من كون ظهور ظاهرة التشاكل تحت الأعداد 50 و 82 و 126 وعدم ظهورها مباشرة بعد هذه الأعداد. أيضا النتائج المعملية حول العزوم المغناطيسية $Magnetic\ moments$ وكذلك العزوم رباعية القطبية الكهربائية $Electric\ quadrupole\ moments$ تم تفسيرها بشيء من النجاح وذلك من خلال نموذج الأغلفة. فمثلا عند عدد البروتونات 2، 8، 20، 50، و 82 فإن رباعي القطبية Q يكون صفراً (الغلاف كروي تماما) وعند الشروع في بناء غلاف جديد فلن Q تكون سالبة (الغلاف ذو شكل أهولج مفلطح)، وبزيادة إمتلاء الغلاف بالبروتونات فإن Q تصبح موجبة (الغلاف ذو شكل أهولج مستطول) وتصل إلى القمة عندما يكون الغلاف قد امتلأ إلى الثلثين ($2/3$) من النويات ثم يبدأ في التناقص حتى الصفر عند عدد سحري جديد ويكون الغلاف قد أخذ الشكل الكروي من جديد. أنظر الشكل 19.4 لتوضيح علاقة تشكيل الغلاف بقيمة العزم الكهربى رباعى الأقطاب.



4-4 ملخص :

في هذا الفصل تمت دراسة طبيعة القوة النووية والتي أدت إلى استنتاج أن القوة النووية تتميز بأنها متساوية $n-p \approx n-n \approx p-p$ وهي ذات مدى قصير، ولها خاصية التشبع، وكذلك هي 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 والذي كان قادرًا على تفسير طاقة الترابط للنوى وساعد في حساب الكتل النووية والذرية للذرات المتنوعة غير الخفيفة، وكذلك في تفسير الانحلال الإشعاعي لجسيمات بيتا. كما نجح نموذج الأغلفة في 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 $E_c \propto Z(Z-1) e^2/R$ ، وأن $R \propto A^{1/3}$ ، وأن Z في حدود القيمة العددية (order of) A ، وأن القوة النووية هي ذات مدى قصير، احسب E_c/E_N .

2.4 - احسب طاقة التناثر الكولومية بين شحنتي بروتونين بوحدتي Joule , MeV

(الإجابة : 7.68×10^{-14} Joule)

3.4 - احسب الفرق بين مستوى الطاقة الأرضية للأم والوليدة مع مقارنة النتائج بذلك الفارق المعطى كما هو مذكور في الجدول التالي:

النوية الوليدة	النوية الوليدة	فارق الطاقة المعلى 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 للأكتينيوم هي 9.4MeV ، والأخرى 8.78MeV .

5.4 - اوجد الأغلفة البروتونية لنواة الزينون ^{20}Xe ، وما عدد البروتونات في المستوى الطاقة الرئيس $n=1$.

(الإجابة : $1s_{1/2}(2) 1p_{3/2}(4) 1p_{1/2}(2) 1d_{5/2}(6) 1d_{3/2}(4) 2s_{1/2}(2)$)
(عدد البروتونات = 18)

6.4 - عبّ كلا من بروتونات ونيوترونات نواة اليورانيوم ^{238}U

في مستويات طاقاتها المناسبة حسب

(أ) خريطة البناء النوويّاتي،

(ب) ثم بتقارن زخمىّ اللف والمدار .

(ج) احسب عدد البروتونات في مستويات الطاقة الرئيسة

($n=1,2,\dots$) ،

(د) استخدم خريطة البناء الإلكتروني لتوزيع الإلكترونات في مداراتها

(هـ) احسب عدد الإلكترونات في مستويات الطاقة الرئيسة

($n=1,2,\dots$) التي تناظر الأسماء الحرفية (K,L,M,N,...) .

(الإجابة :

(أ) $1s^2 1p^6 1d^{10} 2s^2 1f^4 2p^6 1g^{18} 2d^{10} 3s^2 1h^{22}$)

ب) افصل المستويات وذلك بتقارن بين زخمى اللف والمدار

ج) عدد البروتونات فى المستوى الرئيس الأول هو 72 وفى المستوى الثانى هو 18 وفى 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 لنويده ^{238}U ، ثم احسب طاقة الترابط لهذه النويده ، ثم احسب طاقة الترابط لكل نوية وحدد موقع هذه القيمة على منحني طاقة الترابط، ثم بين هل نحتاج إلى تشطير هذه النويده أم تدمجها 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 والنوية للعناصر التى تخضع لنموذج قطرة السائل، مع مقارنتها بالقيم الموجودة فى الملحق 1 من هذا الكتاب، احسب أيضا $B(A,Z)$ والـ $B(A,Z)$ لكل نوية مع الرسم.

الفصل الخامس

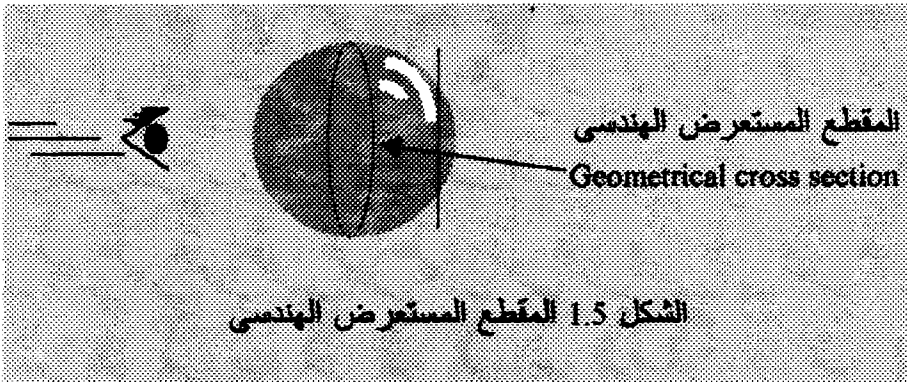
Nuclear Reactions التفاعلات النووية

- 1-5 المقاطع المستعرضة للتفاعلات.
- 2-5 أنواع التفاعلات .
- 3-5 قيمة Q للتفاعل ومستويات طاقة الإثارة.
- 4-5 نظرية النواة المركبة.
- 5-5 معادلة برايت ويجنر للمقاطع المستعرضة المجهرية .
- 6-5 ملخص.
- 7-5 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 الجسم 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 الممتثلة لاحتمالية التفاعل هى وحدة مساحة مثلاً cm^2 ، و تقاس قيم المقاطع المستعرضة بوحدة البارن ($1\text{Barn}=10^{-24} \text{cm}^2$).

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.



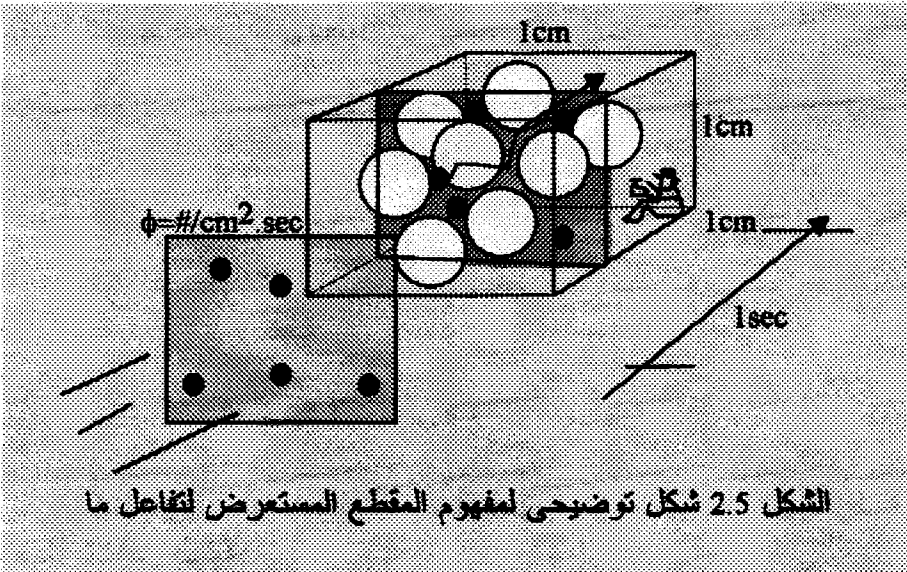
ولكن يمكننا تعريف المقاطع المستعرضة بصورة أدق من خلال معرفة معادلة التفاعل التالية:

$$R\left[\frac{\#}{\text{cm}^3 \cdot \text{sec}}\right] = \phi\left[\frac{\#}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}\right] \sigma[\text{cm}^2] N\left[\frac{\#}{\text{cm}^3}\right] \quad (1.5)$$

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

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

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



كما يوضح الشكل بان هناك مكعباً حجمه 1 سم³ به نوى الهدف وكان 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 الكلي.

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

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

فمثلا إذا كانت A تساوى 125 فإن σ تساوى $1.8 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ أو 1.8 b . المقاطع المستعرضة الهندسية في 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 تأتي من قياسات عدد الأحداث (التفاعلات) في السنتمتر المكعب لكل وحدة فيض ولكل وحدة كثافة ذرية. إن مدى المقاطع المستعرضة يتراوح فيما بين أجزاء من البارن إلى 10^5 بارن.

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

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 :

$$NV = \frac{m_{\text{Al}}}{M_{\text{Al}}} N_{\text{Av}} = \frac{5\text{g}}{27\text{g/mole}} \cdot 0.6 \times 10^{24} \text{ atom/mole} = 0.111 \times 10^{24} \text{ atom}$$

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

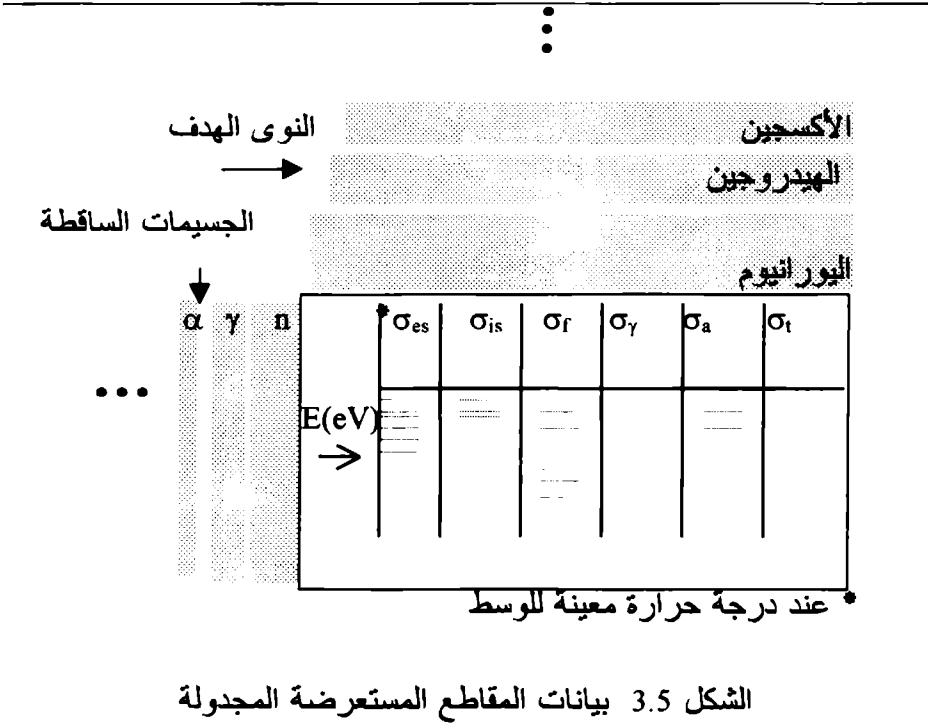
$$\# \text{absorptions} = 20 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 0.111 \times 10^{24} \text{ atom} \times$$

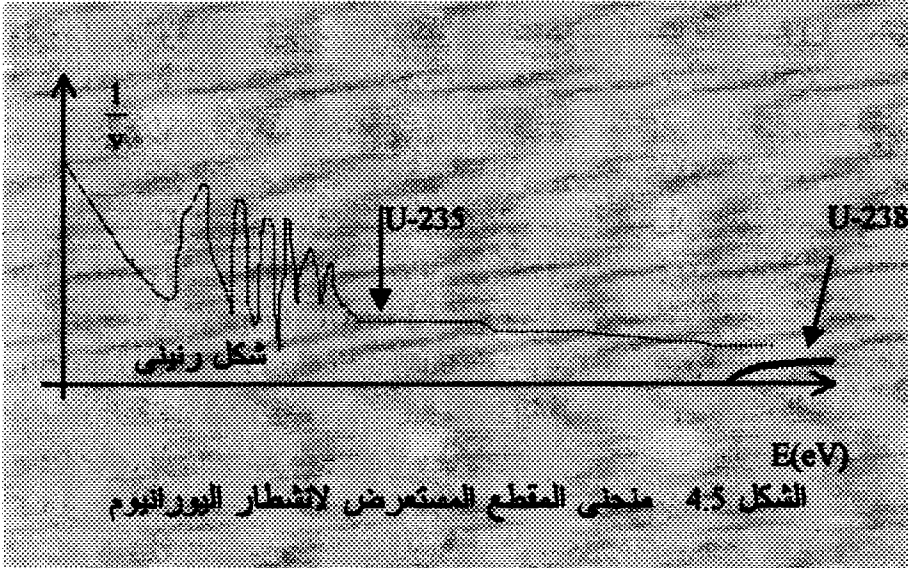
$$10^5 \frac{\#}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}} \times 60 \text{ sec} = 13.3 \times 10^6$$

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 في الطاقة. ليس هذا فحسب ، بل أن حساب المقاطع المستعرضة يعتمد أيضا على درجة الحرارة التي 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 في شكل جداول أو رسومات. الشكل 3.5 يبين مفهوم البيانات الموثقة للمقاطع المستعرضة السالف ذكرها.

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





الشكل يبين أن المقطع المستعرض لانشطار اليورانيوم 235 يعتمد كثيرا على طاقة النيوترون الساقط ، حيث إن المقطع المستعرض يعتمد على الطاقة في منطقة النيوترونات الحرارية (طاقة ضيئة) بشكل $\frac{1}{v}$ أو $\frac{1}{\sqrt{E}}$ ، كما أن

هناك الشكل الرنيني للمقطع المستعرض Resonance cross section ، حيث إن المقطع المستعرض يعبر عنه بـ :

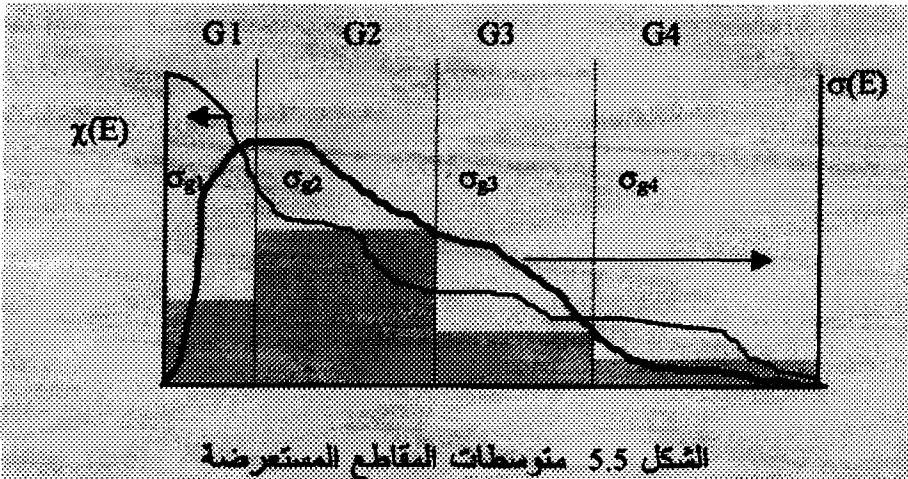
$$\sigma(x, y) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\Gamma_x \Gamma_y}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$

هذا ويلاحظ أن المقطع المستعرض لليورانيوم 238 يساوى صفرًا حتى تصل طاقة النيوترونات إلى 1MeV حيث يبدأ اليورانيوم 238 في 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 في حسابات المفاعلات. إن اعتماد المقاطع المستعرضة على الطاقة يتطلب التعامل مع المقاطع المستعرضة بأسلوب يوفر الوقت في الحسابات ، حيث

انه لا يمكن إدخال المقاطع المستعرضة كدالة في 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 النيوتروني Neutron Spectrum $\chi(E)$. المعادلة التالية تبين كيفية إيجاد متوسطات المقاطع المستعرضة لعدد من مجموعات طاقة النيوترونات.

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

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



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

لقد تم التحدث فيما سبق عن المقاطع المستعرضة المتنوعة، هذا وتوجد قيمة مستنتجة من المقاطع المستعرضة وهي متوسط المسار الحر ، والمعروف بمتوسط المسافة التي يسيرها 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 التي يسيرها الجسيم حراً قبل أن تحدث له استطارة . وتكون وحدة المسار الحر بالطبع هي وحدة مسافة. ويمكن إذا تعريف معادلة المسار الحر من خلال المقطع المستعرض المجهرى σ والكثافة الذرية N كما يلي:

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

هذا ويعرف المقطع المستعرض العيني Macroscopic Cross Section بقيمة Σ وهي معكوس متوسط المسار الحر وله وحدة معكوس مسافة $[\text{cm}^{-1}]$. إذا فهناك مسار حر للاستطارة λ_s ومسار حر للامتصاص λ_a وكذلك مسار حر للتقليل λ_r ، والذي له علاقة بالمسار الحر للاستطارة حسب المعادلة التالية:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_s}{(1-\mu)} = \frac{1}{\Sigma_s(1-\cos\theta)} = \frac{1}{\Sigma_r} [\text{cm}] \quad (5.5)$$

حيث إن ،

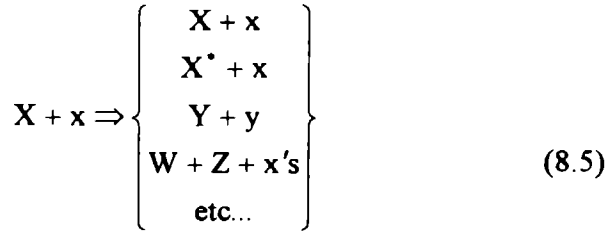
$$\overline{\cos\theta} = \frac{2}{3A} \quad (6.5)$$

وحسب المعادلة السابقة فإن المسار الحر للتقلل للنوى الثقيلة يساوى المسار الحر لاستطارتها $\mu=0$ ، فى حين أنه فى حالة النوى الخفيفة مثل نواة الهيدروجين $A=1$ (استطارة أمامية) فإن $\lambda_n=3\lambda_g$. وأيضاً بناء على نظرية الحركة Kinetic Theory، فإن معامل الانتشار Diffusion Coefficient (D) بدلالة السرعة يساوى:

$$D = \frac{\lambda_g}{3} v \quad (7.5)$$

2-5 أنواع التفاعلات :

تتنوع التفاعلات النووية كما هو موضح فيما يلى:



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

Nuclide النواة	المقطع المستعرض σ_s عند الطاقات التالية		
	حرارى Thermal	0.1 MeV	1.0 MeV
^1H	20.4	12.5	4.3
^2H	3.39	3.4	3.0
^4He	0.76	0.8	(6.2)
^6Li	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 التالي يبين بعض المقاطع المستعرضة لبعض من التفاعلات:

الجدول 5-2 بعض المقاطع المستعرضة لبعض من التفاعلات

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

3-5 قيمة Q للتفاعل ومستويات طاقة الإثارة

في التفاعل التالي :



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

$$\text{مجموع الطاقة المتفاعلات} = \text{مجموع الطاقة للنواتج}$$

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

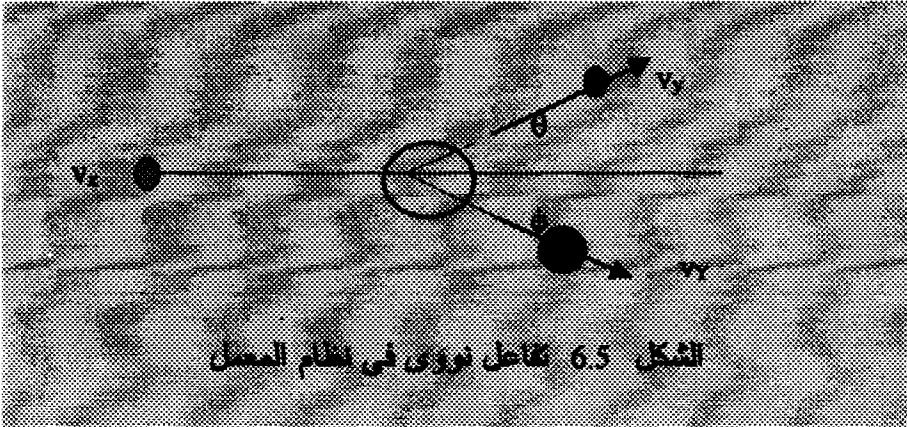
حيث أفترض أن النواة الهدف ساكنة (طاقاتها الحركية $E = 0$ صفر، ولها فقط طاقة الكتلة الساكنة فقط $M c^2$).

يمكن حساب قيمة Q من المعادلة التالية:

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

من المعادلة يعرف التفاعل بأنه تفاعل ماص للطاقة Endoergic عندما تكون Q سالبة ، في 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 التالي يستعان به لإيجاد المعادلات المناسبة:



معادلة حفظ الزخم الأفقى هي:

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

معادلة حفظ الزخم العمودى هي:

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

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

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

وباستخدام معادلة حفظ الزخم الأفقى للتعبير عن الحد $M_Y v_Y \cos \phi$ فى

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{المعادلة السابقة، وأيضاً}$$

نتحصل على:

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

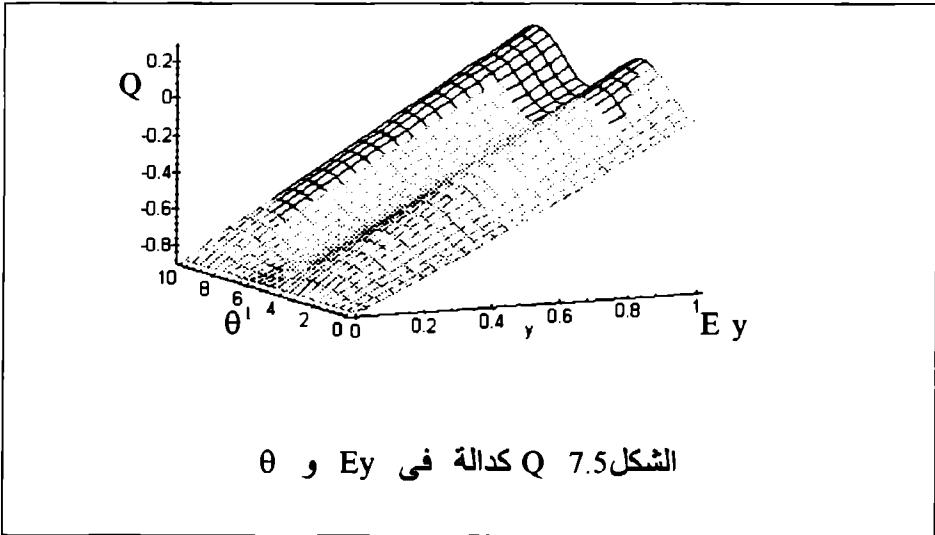
وبالتعويض في معادلة قيمة Q (11.5) نحصل على:

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

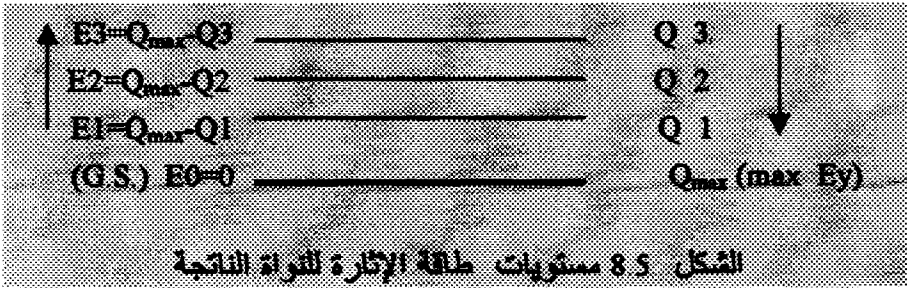
وفي حالة التفاعل $X(x,y)Y$ مثل $^{27}\text{Al}(\alpha,p)^{30}\text{Si}$ ولطاقة سقوط جسيم معينة (1MeV) فإنه يمكن كتابة قيمة Q كدالة في طاقة الجسيم الناتج وزاوية ارتداده كما يلي:

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

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

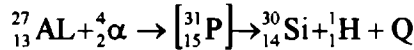


في العديد من التفاعلات النووية قد تنتج العديد من الجسيمات بطاقات مختلفة، ومن ثم فإن أعلى قيمة Q (Q_{max}) تناظر الحالة الأرضية Ground State للنواة الناتجة Product Nucleus، وهي تصاحب خروج الجسيمات بأعلى طاقة $E_y(max)$ ، في حين أن باقي قيم Q تناظر مستويات طاقة الإثارة لتلك النواة. كما تُحدد مستويات طاقة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



مثال 2.5

في التفاعل التالي :



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

قيمة Q MeV	طاقة البروتونات MeV
2.22	9.34
-0.06	6.98
-1.44	5.55
-2.4	4.65

ارسم مستويات الطاقة للنواة الناتجة Si .

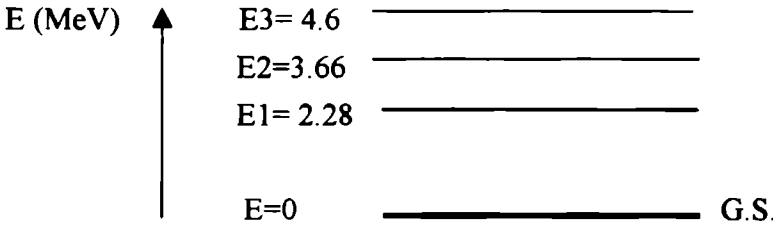
الحل:

أعلى قيمة لـ Q تتأخر الحالة الأرضية E_0 ، كما أن مستوى طاقة الإثارة الأول E_1 يمكن حسابه من الفارق بين Q_{max} والتي تليها بمعنى:

$$E_1 = 2.22 - (-0.06) = 2.28 \text{ MeV}$$

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

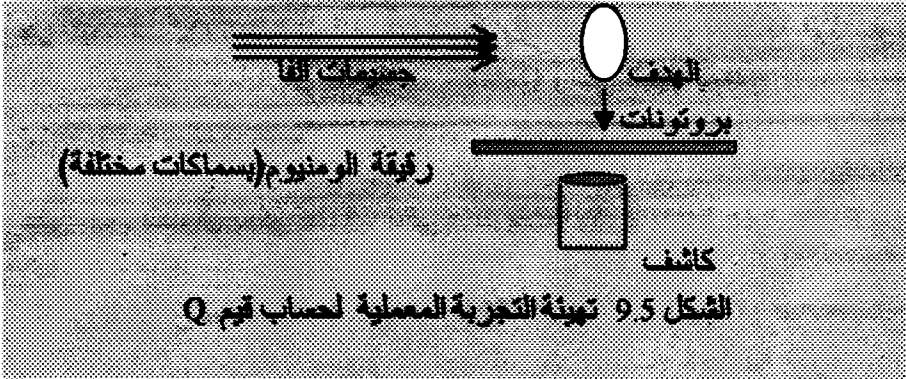
وبالتالى يمكن رسم مخطط مستويات الطاقة للنواة الناتجة كما هو موضح فى الشكل التالى، بحيث المستوى الأسود العريض يمثل الحالة الأرضية والمستويات الأعلى تمثل مستويات الإثارة .



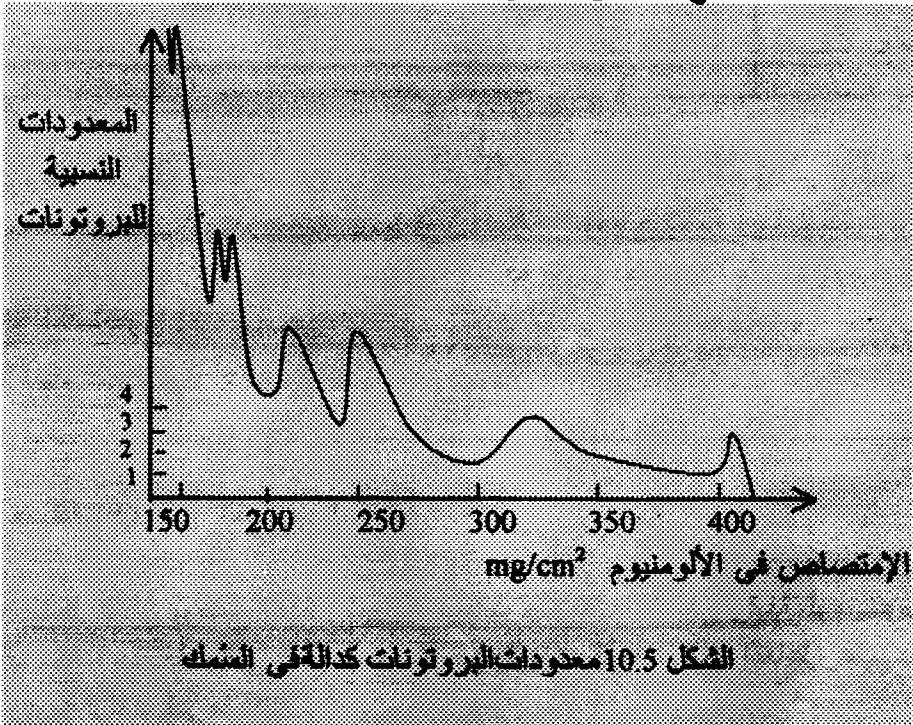
(لاحظ فى هذه التجارب أن البروتونات عالية الطاقة لم يصحبها أى أشعة جاما، فى حين أن البروتونات منخفضة الطاقة صاحبها أشعة جاما، وعليه فإن ذلك يؤكد أن البروتونات منخفضة الطاقة تكون مصحبة لعالات إثارة نواة السليكون Si، فى حين أن البروتونات الأعلى فى الطاقة تصاحب الحالة الأرضية لنواة السليكون).

حسابات Q من التجارب المعملية :

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

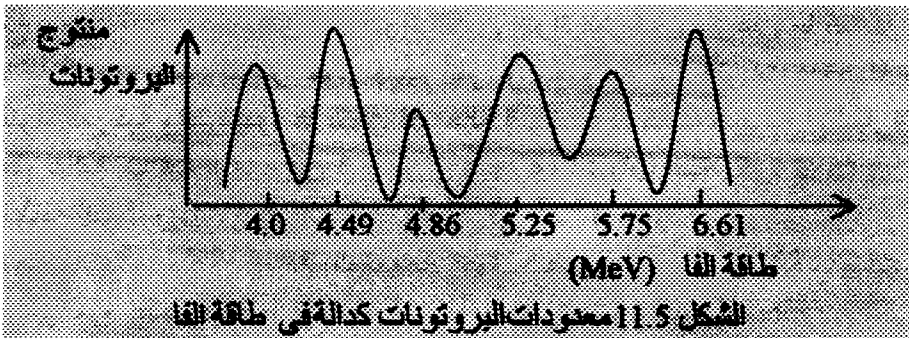


ويرسم المعدودات كدالة في سمك رقيقة الألومنيوم (كتلة وحدة المساحة g.cm^{-2}) تظهر مجموعة من القمم في المنحنى لها علاقة بالمدى أو الطاقة للمجموعات المختلفة من البروتونات الشكل 10.5 يوضح المنحنى المعنى.



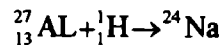
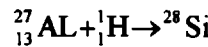
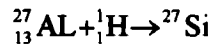
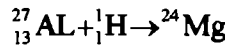
وحيث إن كل قمة تتناظر طاقة معينة للبروتونات فيمكن إذا حساب قيم Q ومن ثم حساب مستويات طاقة الإثارة للنواة الناتجة في ذلك التفاعل، كما تم شرحه في السابق.

هذا وقد لوحظ في تجارب قذف رقائق الألومنيوم بجسيمات ألفا، أن منتوج البروتونات Protons Yield له قمم عند طاقات لألفا (بوحدة MeV) قدرها 4.0 و 4.49 و 4.86 و 5.25 و 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 التي تحدث عند طاقات بينية (بين عدد من الرنينات). الشكل 11.5 يوضح ذلك.



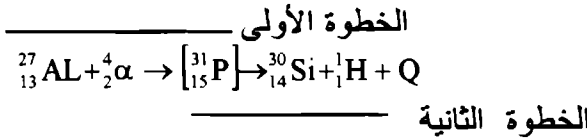
4-5 نظرية النواة المركبة :

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



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

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



إذا بمجرد أسر الجسيم من قبل النواة تتكون النواة المركبة وسرعان ما تنتشر طاقة الجسيم حتى تتركز حول جسيم آخر أو مجموعة من النويات داخل النواة المركبة والتي بدورها تكون في حالة إثارة، فإذا كانت طاقة الإثارة هذه عالية بما فيه الكفاية فإن الجسيم أو مجموعة النويات المتمركزة حولها الطاقة تنبعث وبذلك تتحلل النواة المركبة إلى النواة الناتجة والجسيم أو الجسيمات المنبعثة. الطاقة المتجمعة حول الجسيم أو مجموعة الجسيمات والتي تقوم بتحريرها من النواة المركبة تسمى طاقة الفصل Separation energy أو طاقة التفكك energy .

إنه بمجرد أسر الجسيم الساقط فإنه يمنح طاقة إثارة للنواة المركبة والتي تساوى طاقة ترابط الجسيم الساقط للنواة مضافة إلى طاقته الحركية، وكمثل لذلك ففي التفاعل التالي:



فإن طاقة إثارة النواة المركبة E_{excit} تحسب كما يلي:

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

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 تتحلل إلى النواة الناتجة والجسيم أو الجسيمات الهاربة. الطاقة المحررة والمتمركزة حول الجسيم أو الجسيمات تسمى بطاقة الفصل Separation Energy .

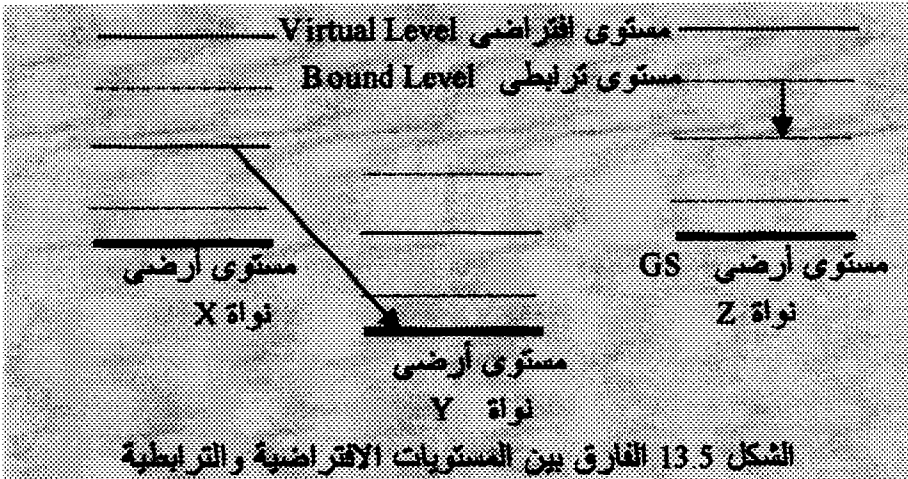
وكنتيجة لتوزيع طاقة الإثارة حول جسيم بعينه أو حول مجموعة جسيمات بطريقة عشوائية، لذا فإن النواة المركبة لها زمن عمر نسبيا أطول مقارنة بالزمن النووي الطبيعي (زمن اختراق الجسيم الساقط للنواة) ، أنظر الشكل التالي:



وبقسمة قطر النواة على سرعة الجسيم الساقط فنحصل على الزمن الطبيعي النووي t_n .

ففي حالة طاقة الجسيم تساوي 1MeV فإن سرعته هي 10^9 cm/sec ، وبقطر نواة قدره 10^{-12} cm فإن زمن الاختراق حوالي 10^{-21} sec ، وفي حالة النيوترونات البطيئة فيحتاج إلى 10^{-17} sec لاختراق النواة. إلا أن عمر النواة المركبة يتراوح ما بين 10^{-15} sec إلى 10^{-14} sec وهذا يعني أنه زمن كبير نسبيا مقارنة بزمن اختراق النواة. إذا ، فإنه خلال هذا الزمن الطويل فإن النواة المركبة (تتسبى) كيف تكونت ومن ثم تتحلل بطريقة مستقلة عن

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



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

و عليه، ونظرًا للطرق المختلفة التي تتوزع فيها طاقة الإثارة في داخل النواة، فإن هناك عددًا من المستويات الافتراضية المناظرة (كل واحدة منها تتأخر 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 إثارة أحد المستويات للنواة المركبة CN ، فإن احتمالية تكون النواة المركبة تكون أعلى بكثير بالمقارنة بحالة قصور تلك الطاقة عن مساواتها لأحد المستويات. ومن ثم يمكن القول بأن طاقة الإثارة لمستوى ما للنواة المركبة يساوى الطاقة الحركية للجسيم الساقط مضافاً إليه طاقة ترابط الجسيم للنواة الهدف، وذلك حسب المعادلة التالية:

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

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

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

إذا الطاقة التى ستساهم فى إثارة النواة المركبة ستكون الفارق بين الطاقة الحركية للجسيم والطاقة الحركية للنواة المركبة، وباعتبار أن كتلة النواة المركبة هى حاصل جمع كتلة الجسيم الساقط m_x والنواة الهدف M_x فإن الطاقة الفعلية E' الداخلة فى إثارة النواة المركبة تكون حسب المعادلة التالية:

$$E' = \frac{M_x}{m_x + M_x} E_x \quad (22.5)$$

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

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

عرض المستوى Γ Level Width :

كل حالة إثارة للنواة المركبة سواء كانت افتراضية أو ترابطية لها متوسط عمر τ ، وهذا يعنى أنه فى المتوسط توجد فترة زمنية والتي فيها تبقى النواة فى حالة إثارة قبل أن تتحلل بانبعث إما جسيم أو أشعة جاما. لقد تم التعرف فى حالة التعامل مع مستويات الطاقة على استخدام كمية تتناسب مع متوسط العمر وهى كمية عرض المستوى Γ تحمل وحدة الطاقة (مثلا MeV). هذا ويعبر عن عرض المستوى (باستخدام مبدأ اللاتأكد Uncertainty Principle) بالمعادلة التالية:

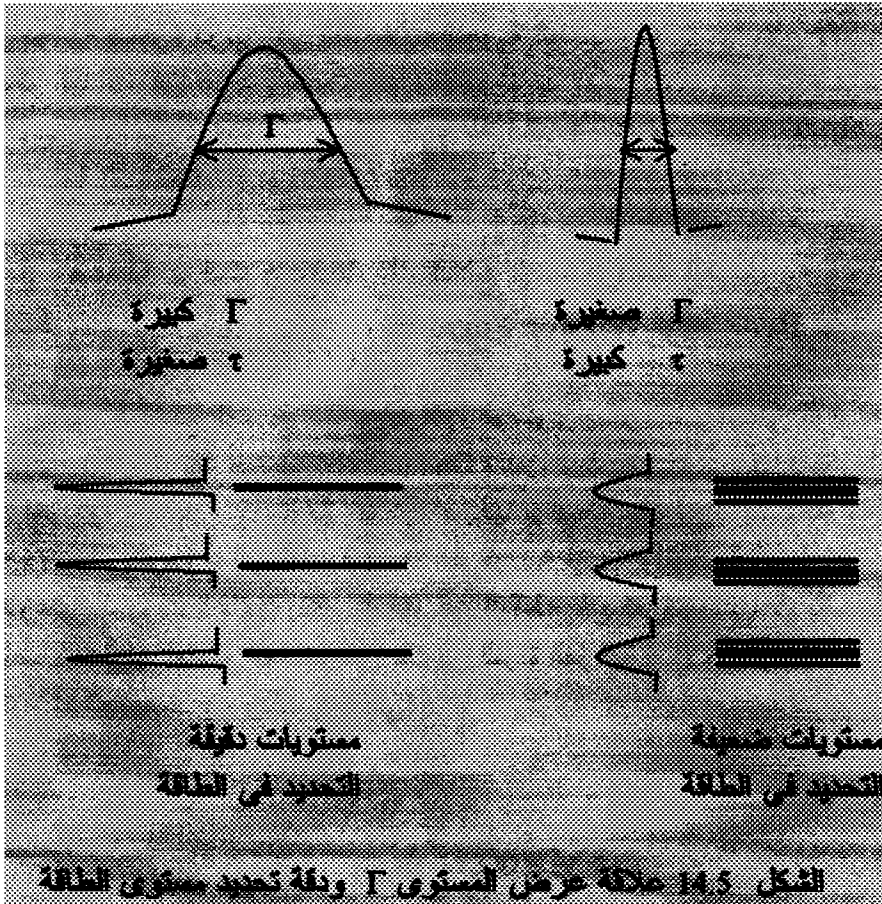
$$\Gamma = \frac{h}{2\pi\tau} \quad (24.5)$$

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

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

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

وعليه فى حالة المستوى العريض فإن $\Gamma = 10^4 \text{ eV}$ للنوى الخفيفة فإن $\tau = 6.6 \times 10^{-20} \text{ sec}$ ، فى حين أنه فى حالة المستوى الدقيق $\Gamma = 1 \text{ eV}$ مما يعنى أن $\tau = 6.6 \times 10^{-15} \text{ sec}$. أيضا متوسط المسافة بين مستويات الطاقة تدعى تباعد المستوى Level Spacing .



لكل حالة انحلال توجد احتمالية لذلك الانحلال، ومن ثم يناظر ذلك عرض مستوى جزئي Γ Partial width ، مما يبين أن العرض الكلي يساوي المجموع الجزئي، بمعنى:

$$\Gamma = \Gamma_{\gamma} + \Gamma_{\alpha} + \Gamma_{p} + \dots \quad (26.5)$$

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

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

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

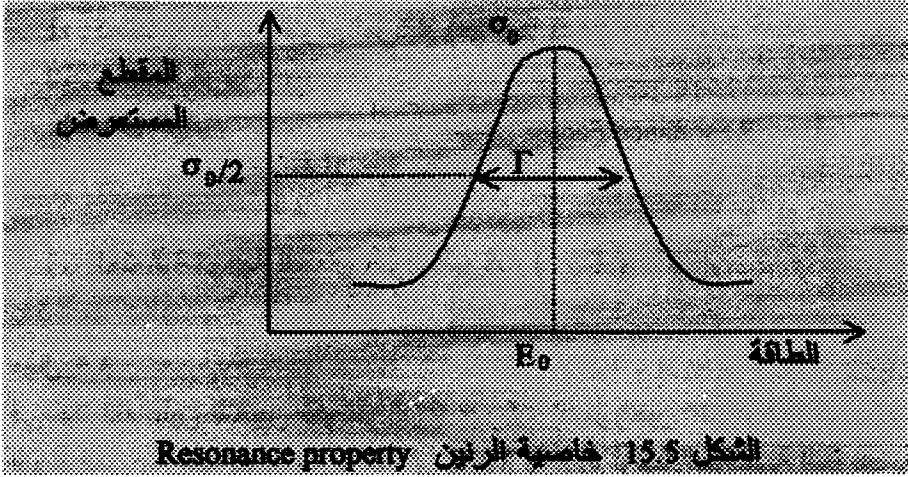
إن مفهوم المقاطع المستعرضة و عرض المستوى يمكن تطبيقه على الرنين Resonance بطريقة حسابية Qualitative وليس فقط بطريقة وصفية؛ حيث إن احتمالية التفاعل $X(x,y)Y$ يمكن تعريفها بواسطة المقطع المستعرض $\sigma(x,y)$. وبالرجوع إلى نظرية النواة المركبة فإنه ونتيجة للخطوتين اللازمتين لحدوث التفاعل يمكن التعبير عن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

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

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

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

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



أيضا λ هي الطول الموجي لدى بروليه للجسيم الساقط والذي يساوى:

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

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

$$\lambda(\text{cm}) = \frac{2.87 \times 10^{-9}}{\sqrt{E(\text{eV})}} \quad (30.5)$$

لذا فنيوترون بطاقة 10^4 eV له طول موجي $\lambda = 2.87 \times 10^{-11} \text{ cm}$ فى حين أن النيوترون بطاقة 1 MeV يكون طوله الموجي $\lambda = 2.87 \times 10^{-12} \text{ cm}$.
 وحيث إن σ تتناسب طرديا مع λ^2 نجد من حسابات الطول الموجي 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:

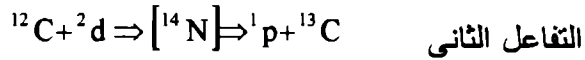
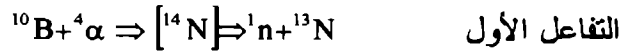
1. احتمالية تكوين النواة المركبة (حد λ)
2. خاصية الرنين
معامل الرنين (Resonance Factor) $\frac{1}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$
3. احتمالية نوعية انحلال النواة المركبة (Γ_y)

مثال 3.5

في كلا التفاعلين التاليين تكونت النواة المركبة للنيتروجين-14 ، فإذا كانت النواة المركبة عند طاقة إثارة تساوي 12.8 MeV ، أوجد الطاقة الحركية اللازمة للجسيم الساقط لكلا التفاعلين:



الحل:



طاقة ترابط الفا $BE(\alpha)$:

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

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

$$= 11.6 \text{ MeV}$$

طاقة ترابط الديوتيريوم $BE(d)$:

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

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

$$= 10.26 \text{ MeV}$$

وحسب معادلة طاقة إثارة النواة المركبة (23.5):

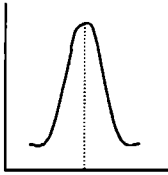
$$E_{\text{excit.}} = \frac{M_x}{m_x + M_x} E_x + BE_{\text{particle}}$$

فإن طاقة الفا هي:

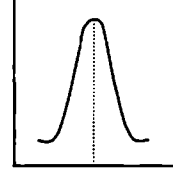
$$12.8 = \frac{10}{10+4} E_{\alpha} + 11.6 \Rightarrow E_{\alpha} = 1.68 \text{ MeV}$$

وكذلك طاقة الديوتيريوم هي:

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



$$E_{\alpha} = 1.68 \text{ MeV}$$



$$E_d = 2.96 \text{ MeV}$$

6-5 ملخص :

لقد تم استعراض التفاعلات النووية في هذا الفصل مستهلين عرض تعريف المقاطع المستعرضة المجهرية والتي 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 قانوني حفظ الزخم وحفظ الطاقة. وأخيراً تم عرض نظرية النواة المركبة وتفسيرها للتفاعلات النووية.

7-5 مسائل :

1.5 - عرف المقطع المستعرض لتفاعل الاستطارة المرنة.

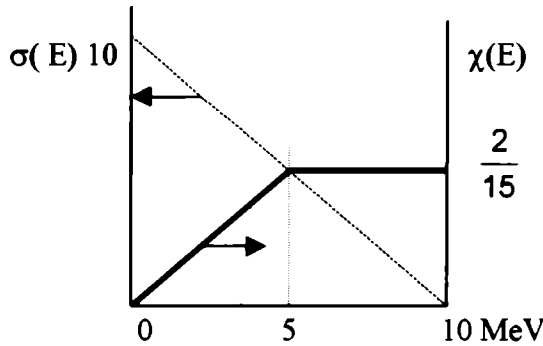
2.5 - الشكل التالي يوضح المقطع المستعرض المرن كدالة في الطاقة ،

وأیضا یوضح $\chi(E)$ كدالة في الطاقة، اوجد:

(أ) متوسط المقطع المستعرض لمجموعة طاقة واحدة G_1 تمثل المدى من 0 إلى 10 MeV .

(ب) متوسط المقطعين المستعرضين لمجموعتين G_1, G_2 في

المدى ما بين 0 و 5 MeV لمجموعة G_1 والمدى ما بين 5 و 10 MeV لمجموعة G_2 .



(الحل: أ- $\sigma_{G1} = 3.9 \text{ b}$ ، ب- $\sigma_{G1} = 6.7 \text{ b}$ ، $\sigma_{G2} = 2.5 \text{ b}$)

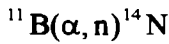
3.5 - في حالة قياس الجسيمات عند زاوية 90 درجة ، استنتج المعادلة التي تحكم Q .

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

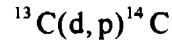
5.5 - اثبت باستخدام المعادلة (28.5) أن المقطع المستعرض عندما $E=E_0$ يعتبر قيمة قصوى (Maximum σ)

6.5 - في التفاعلين التاليين تكونت النواة المركبة للنيوتروجين-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.

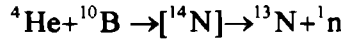
التفاعل الثاني



التفاعل الأول



7.5- في التفاعل التالي:



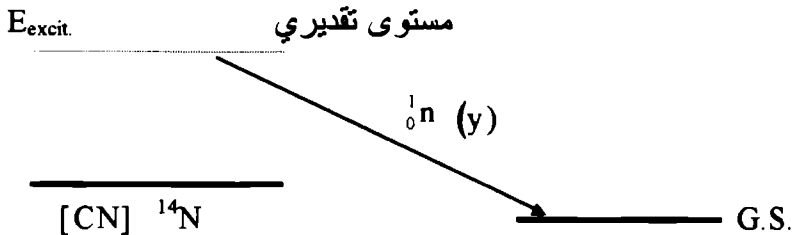
مع الكتل التالية (amu) [1amu=931MeV]:

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 x (^4He) هي 1.68 MeV ، وقيست الجسيمات الناتجة عند زاوية قدرها 90° عن الأفقى، احسب طاقة هذه الجسيمات الناتجة.

ج) فى الشكل التالى للتفاعل المذكور أعلاه، احسب طاقة إثارة النواة المركبة:





الفصل السادس

النشاط الإشعاعي Radioactivity

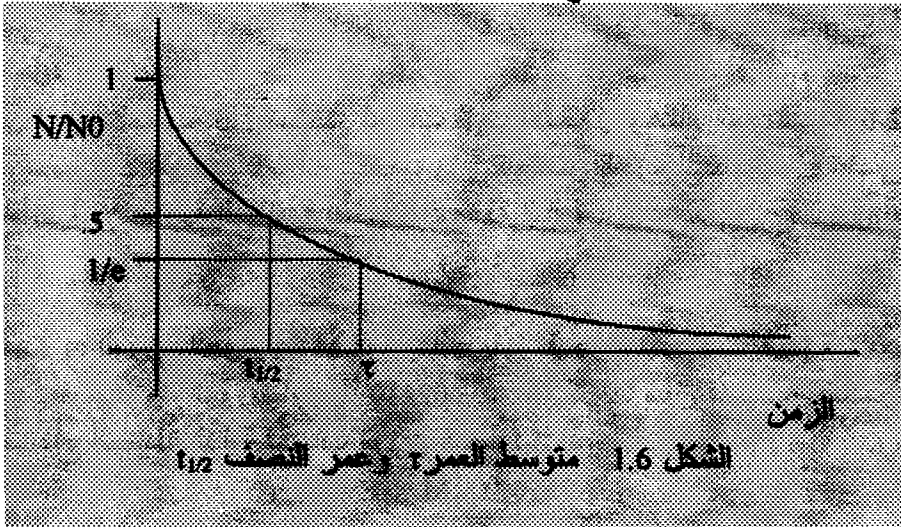
- 1-6 النشاط الإشعاعي.
- 2-6 نمذجة الانحلال الإشعاعي.
- 3-6 اتران النشاط الإشعاعي.
- 4-6 تطبيقات الانحلال الإشعاعي.
- 5-6 ملخص.
- 6-6 مسائل.

1-6 النشاط الإشعاعي Radioactivity :

تتعدد الانحلالات الإشعاعية للنوى بحسب نوع الإشعاع أو الجسم 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 $t_{1/2}$ والذي يعني أن المادة تفقد نصف عدد ذراتها أو كتلتها خلال ذلك الزمن. أيضا هناك مصطلح ثابت الانحلال λ Decay constant والذي يعكس معدل الانحلال لكل وحدة زمن للعنصر، والذي يرتبط مع عمر النصف من خلال العلاقة التالية:

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

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 التالي يوضح هذه القيم بالرسم.



أيضا هناك مصطلح آخر وهي الفاعلية الإشعاعية Activity والتي تمثل عدد الذرات المنحلة للعنصر N (عدد الانحلالات) لكل وحدة زمن والذي يعبر عنه من خلال المعادلة التالية:

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

ومن وحدات قياس الفاعلية الإشعاعية البيكرل Bq والذي يمثل انحلالا لكل ثانية ، وأيضا الكوري Ci والذي يناظر 3.7×10^{10} انحلالا لكل ثانية. ولعل أحدا ما يتساءل ما علاقة الفاعلية الإشعاعية بأعمار النصف أو بصورة أخرى ماهو وزن المادة المشعة اللازمة للحصول على فاعلية اشعاعية معينة؟ لتوضيح هذه الإجابة لهذه التساؤلات فلنتابع المثال التالي.

مثال 1.6

احسب الأوزان اللازمة للحصول على فاعلية إشعاعية قيمتها 1Ci لعنصرى الرصاص ^{214}Pb واليورانيوم ^{238}U علما بأن عمر النصف للرصاص يساوى 26.8 دقيقة، وعمر النصف لليورانيوم يساوى 4.5×10^9 سنة.

الحل:

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

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

حيث m الوزن بالجرام و M الوزن الجزيئي (جرام لكل جزيء) و N_{Av} عدد أفوجادرو والذي يساوى 0.602×10^{24} . من كل ما سبق فإنه يمكن استنتاج المعادلة التالية لحساب الوزن المطلوب:

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

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 .

$$m_{U} = 3 \times 10^6 \text{ gram} \text{ و}$$

$$m_{Pb} = 3. \times 10^4 \text{ gram}$$

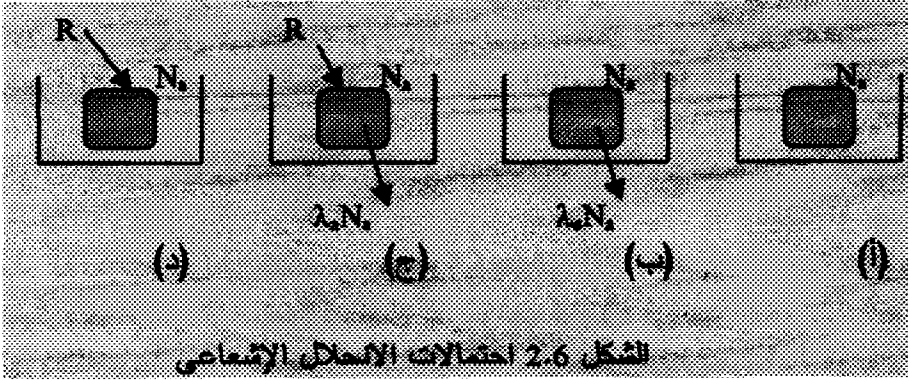
هذه الحسابات تبين أن الشخص يحتاج إلى حوالى ثلاثة من المائة من الميكروجرام من الرصاص ليحصل على واحد كورى، فى حين أنه يحتاج إلى ثلاثة ميغا جرام أو ثلاثة آلاف كيلوجرام أو ثلاثة أطنان من اليورانيوم ليحصل على نفس الفاعلية الإشعاعية.

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



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

(أ) حالة استقرار العنصر تعني أن معدل تغير العنصر يساوي صفرًا.

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

(ب) حالة انحلال فقط للعنصر

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

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

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

(د) معدل التغير يساوي معدل الإنتاج فقط

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

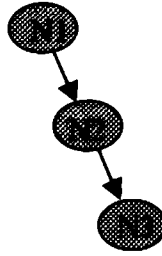
مثال 2.6

لديك ثلاثة أنواع من العناصر الأول ينحل إلى الثاني والثاني ينحل إلى الثالث والثالث عنصر مستقر، حيث إن ثابتي الانحلال للأول والثاني هما على التوالي λ_1 و λ_2 . أيضا عند الزمن صفر فإن عدد ذرات العنصر الأول يساوي $N_1(0)=N_{10}$ ، في حين أن عدد ذرات العنصرين الآخرين يساوي صفرًا.

- (أ) اوجد النموذج الرياضي الذي يحكم الانحلال الإشعاعي
 (ب) حل النموذج الرياضي و اوجد عدد ذرات كل من العناصر الثلاث كدالة في 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 التوالي، بمعنى:

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

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

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

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

(ب)

المعادلة الأولى تحل بطريقة فصل المتغيرات حيث نتيجة التكامل تعطى:

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

بتعويض المعادلة 3 في المعادلة 2

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

بضرب طرفي المعادلة 4 في $e^{\lambda_2 t}$ ، نحصل على:

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

بإجراء التكامل على طرفي المعادلة 5 :

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + C e^{-\lambda_2 t} \quad (6)$$

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

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (7)$$

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

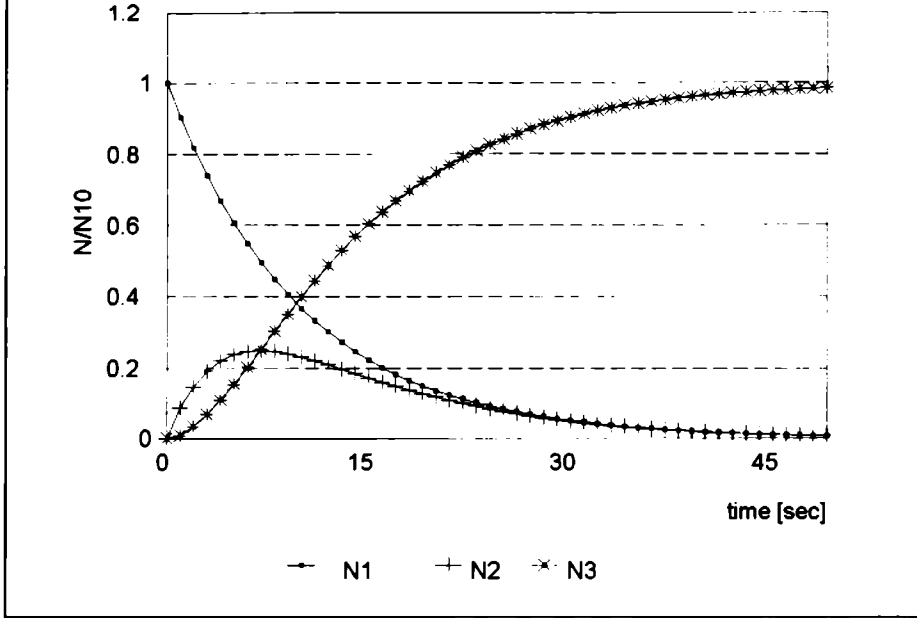
$$N_3 = \int \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] dt + C \quad (8)$$

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

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

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

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



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

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1}N_{n-1} - \lambda_n N_n \quad ; \quad (7.6)$$

$$N(0) = N_{10}, N_2(0) = N_3(0) = \dots = N_n(0) = 0$$

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:

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

بحيث إن؛

$$C_i = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_3) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} N_{10} \quad ; i = 1, 2, \dots, n \quad (9.6)$$

على أن نعتبر ما يلي:

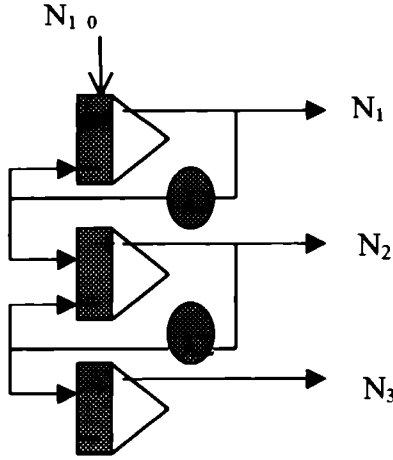
الحد $(\lambda_i - \lambda_i)$ ملغى في المقام، و $\lambda_n = 0$ لأن العنصر الأخير مستقر، كما أن $C_1 = N_{10}$ للعنصر الأول فقط.

الحلول التحليلية والتشابهية (التوافقية) و العددية للتحلل الإشعاعي

: 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 العددي وذلك بكتابة برنامج حاسوبى بإحدى اللغات المعروفة مثل الفورتران (FORTRAN) أو الـ سي (C). وحيث إن فى الحالات التطبيقية مثل حسابات احتراق الوقود Fuel burnup والتي تتبع سلسلة انحلال طويلة للمواد النووية داخل المفاعل مثل اليورانيوم والبلوتونيوم والزينون والسامريوم وغيرهم. فإن حل النماذج الرياضية عدديا يعد أفضل وأكفا الطرق الثلاث. وإتماما للموضوع سنأخذ نفس حالة الانحلال المذكورة فى المثال 2.6 ونوضح كلا من الحل التشابهي والحل العددي لها.

فى الحل التشابهي نحتاج إلى دائرة إلكترونية لإجراء التكامل وهى مانعبر عنها بالمكامل Integrator ونحتاج أيضا إلى دائرة 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 التشابهي Analogue solution للمثال 2.6

بالنسبة للحل العددي لنفس المسألة الواردة في مثال 2.6 فإنه يمكننا كتابة برنامج حاسوبي 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 الحاسوبية وكذلك استخدام الذاكرة. كما أن الملاحظات المرافقة للبرنامج تعد مهمة لمن يريد تتبعه، خصوصا في البرامج الكبيرة. إذا كان لديك الوقت الكافي لماذا لا تحاول تطبيق الحل التشابهي (باستخدام نفس التصميم الوارد في الشكل 3.6 في برنامج SimuLink) والحل العددي وتقارن نتائجهما بنتائج الحل التحليلي الوارد في 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 حاسوبية جاهزة تجرى لك حسابات أعقد التكاملات والتفاضلات وكذلك حل المعادلات

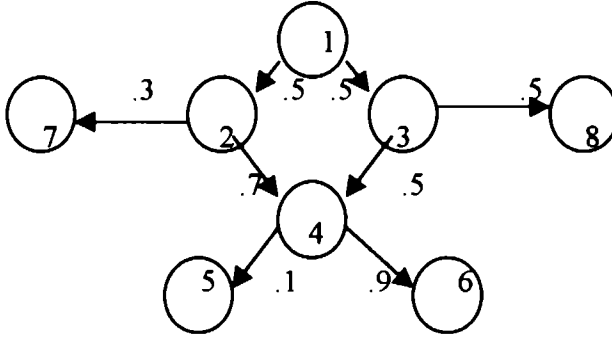
```
C * * A PROGRAM FOR RADIOACTIVE DECAY *
READ (*,*) X10,R1,R2
T=0.0
DT=.1
X1=X10
X2=0.0
X3=0.0
1 WRITE(*,*)T,X1/X10,X2/X10,X3/X10
T=T+DT
F1=-R1*X1
F2=R1*X1-R2*X2
F3=R2*X2
X1=X1+F1*DT
X2=X2+F2*DT
X3=X3+F3*DT
IF(T.LT.50.) THEN
GO TO 1
ELSE
ENDIF
STOP
END
```

الشكل 4.6 برنامج فورتران لحساب الانحلال الإشعاعي للمثال 2.6

التفاضلية المتنوعة من خلال برامج سلسلة الاستعمال مثل Maple وMathLab 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:

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

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

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

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

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

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

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

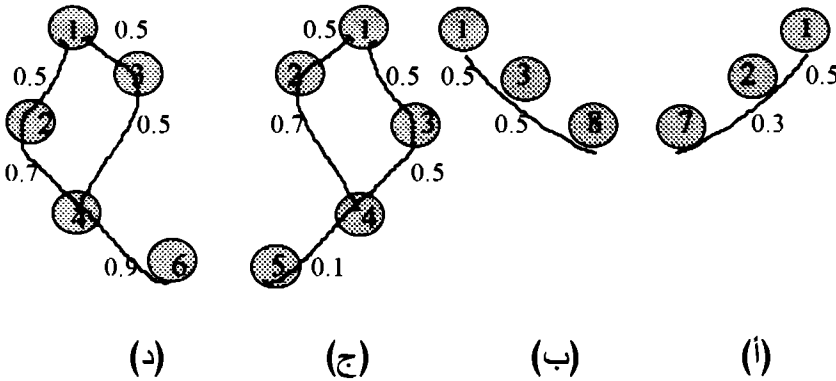
$$\frac{dN_8}{dt} = .5\lambda_3 N_3$$

مثال 4.6

في المثال السابق وبدون حل المعادلات التفاضلية، احسب النسبة المئوية لكل من العناصر المستقرة (5,6,7,8) بعد انتهاء الانحلال الإشعاعي لباقي العناصر.

الحل:

في المثال 3.6 وردت نسبة الانحلال على مسارات الانحلال المختلفة. لذا فإن هذه النسب هي التي تلعب الدور الرئيس في حساب النسبة المئوية من عدد ذرات N_{10} الأصلية للعناصر المستقرة. حيث إن العنصر الأول سينحل تماماً لتظهر العناصر المستقرة حسب نسب الانحلال الواردة على مسار انحلال العناصر. فيما يلي نورد مسارات الانحلال المؤدية إلى العناصر المستقرة



من الأشكال السابقة يمكن حساب العناصر المستقرة كما يلي:

الشكل (أ) يوضح أن نسبة العنصر السابع هي:

$$15\% \text{ أي } 0.5 \times 0.3 = 0.15$$

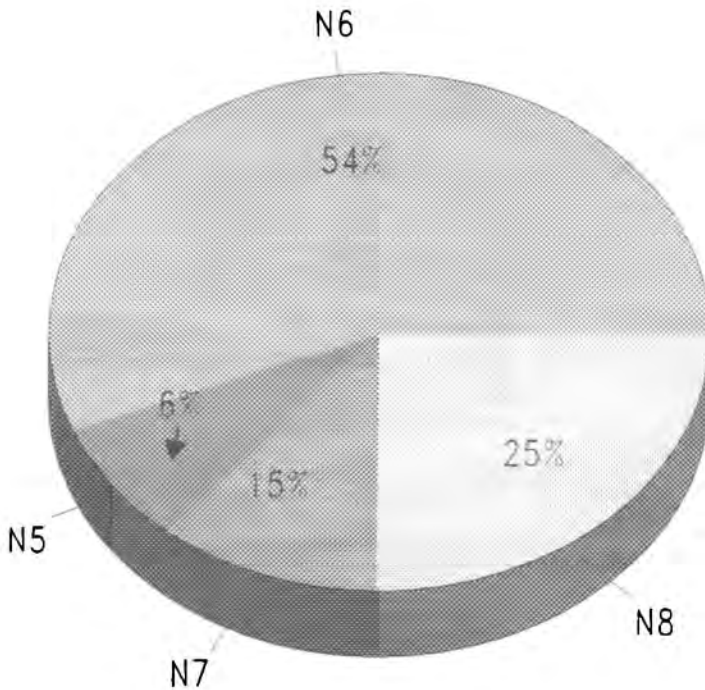
الشكل (ب) يوضح أن نسبة العنصر الثامن هي:

$$25\% \text{ أي } 0.5 \times 0.5 = 0.25$$

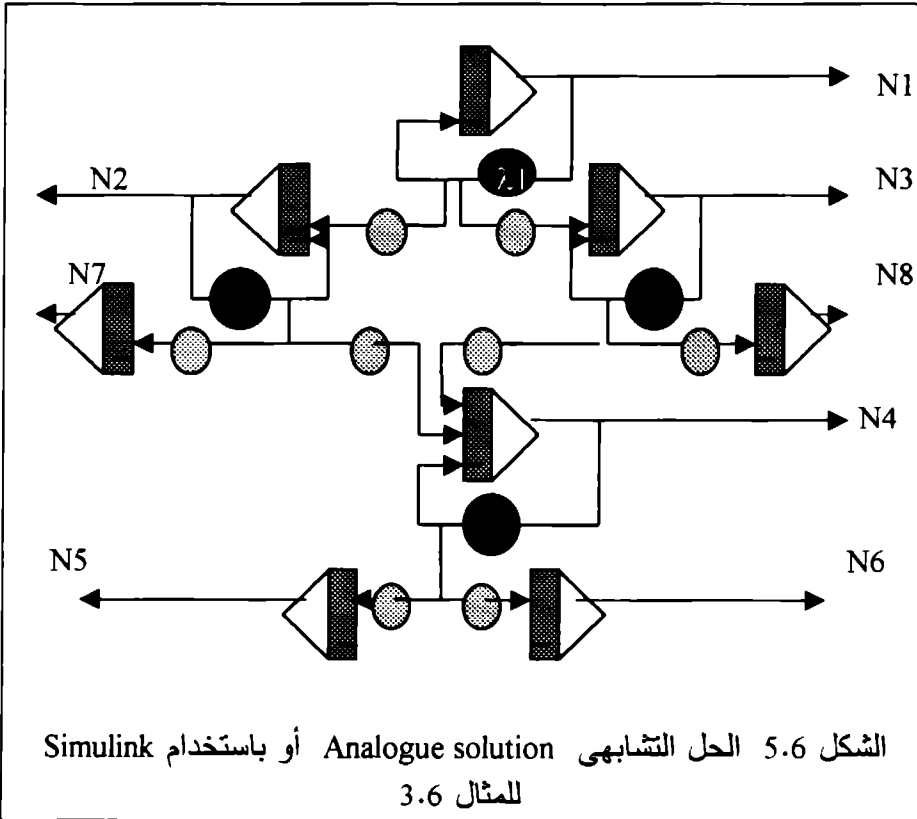
الشكل (ج) يوضح أن نسبة العنصر الخامس هي:
 $0.5 \times 0.5 \times 0.1 + 0.5 \times 0.7 \times 0.1 = .06$ أى 6%

الشكل (د) يوضح أن نسبة العنصر السادس هي:
 $0.5 \times 0.5 \times 0.9 + 0.5 \times 0.7 \times 0.9 = .54$ أى 54%

الشكل التالى يوضح توزيع هذه النسب المئوية للعناصر المستقرة.



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



3-6 اتزان النشاط الإشعاعي Radioactivity Equilibrium:

إن الاتزان بصفة عامة يعبر عنه رياضياً بأن معدل التغير يساوى صفراً.
أي أن:

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

وسوف نورد فيما يلي نوعين من الاتزانات وهما الاتزان القرني والاتزان العابر.

الاتزان القرني Secular equilibrium :

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

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

إذا كانت N_1 مشعة فإن المعادلة الأولى من مجموعة المعادلات 11.6 تعنى أن $\lambda_1=0$ ، وهذا يعنى أن N_1 مستقرة (تتاقض يجب التخلص منه، فلا يمكن أن يكون العنصر مشعاً ومستقراً في نفس الوقت). للخروج من هذا المأزق نعتبر أن النوى الأم تحل ببطء شديد مقارنة بأى من أعضاء سلسلة الانحلال، أى أن عمر النصف للأم أكبر بكثير من عمر النصف للوليدة. بهذا الاعتبار، فإن N_1 تكون قريبة جداً من الاستقرار وأن λ_1 أصغر بكثير من باقى ثوابت الانحلال $\lambda_2, \lambda_3, \dots$. وبالتالي فإنه يمكن القول إن:

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

وتكون باقى المعادلات المعروضة فى المعادلة 11.6 صالحة. هذا النوع من التوازن يسمى التوازن القرني Secular equilibrium. وحيث إن ثابت

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

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

الشرط المذكور أعلاه يمكن إذا تطبيقه في 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:

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

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

$$\lambda_1 \sim 0, \quad \lambda_1 \ll \lambda_2 \quad (15.6)$$

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

$$\begin{aligned} N_1 &\approx N_1^0 \\ N_2 &\approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \end{aligned} \quad (16.6)$$

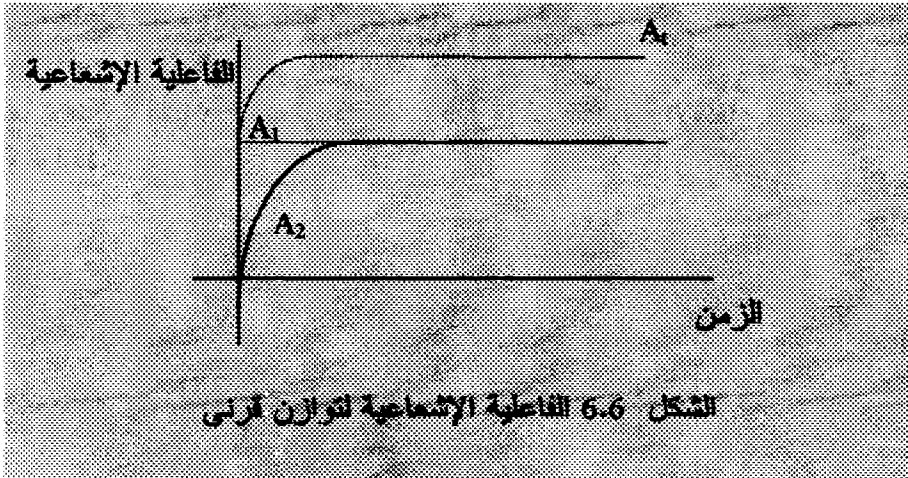
وبدلالة الفاعلية الإشعاعية ($A = \lambda N$) Activity يمكن التعبير عن الفاعلية الإشعاعية الكلية A_t :

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

وبالاستفادة من المعادلة 16.6 ، فإن :

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

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 التالي يوضح التصرف للفاعلية الإشعاعية لكل من الأم أو الوليدة. الشكل يوضح أنه بعد زمن طويل تكون الفاعلية الإشعاعية ثابتة (اتزان إستاتيكي) مخالفا لما سيأتى ذكره وهو الاتزان العابري Transient equilibrium (اتزان ديناميكي).



الاتزان العابري Transient equilibrium (اتزان ديناميكي) :

فى هذا الاتزان تكون الأم طويلة العمر أيضا مقارنة بالوليدة ($\lambda_1 < \lambda_2$) إلا أن عمر النصف للأم ليس كبير جدا بمعنى أن $\lambda_1 \sim 0$ لا يجوز تطبيقه كما فى حالة الاتزان القرني. أيضا بعد زمن كبير يمكن تجاهل الحد

2.6 مقارة بالحد $\exp(-\lambda_2 t)$. وعليه فإن المعادلتين 3 و7 في المثال
 2.6 فقرة ب تكونان كما يلي:

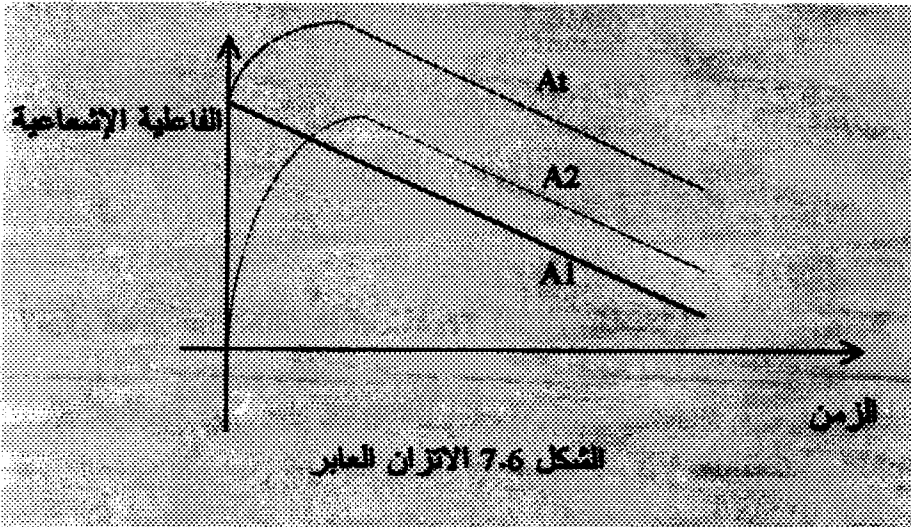
$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (19.6)$$

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (20.6)$$

وبدلالة الفاعلية الإشعاعية $A = \lambda N$ ، فإن المعادلة 20.6 يمكن كتابتها كما
 يلي (وذلك بعد زمن طويل) :

$$\frac{A_2}{A_1} \approx \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (21.6)$$

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 التالي فإن هناك اتزان ديناميكي للفاعلية الإشعاعية وذلك
 ما يوضحه انحدار المنحنى مع ثبات الفارق في الفاعلية الإشعاعية بين الأم
 والوليدة.

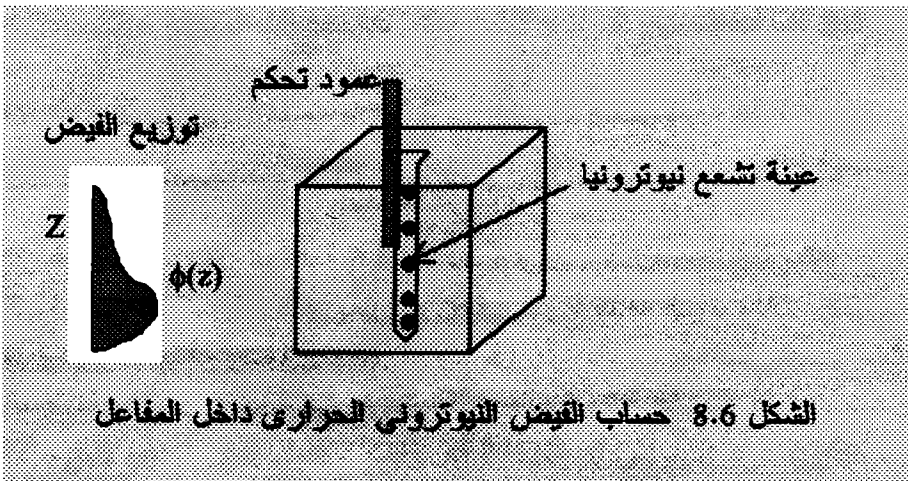


4-6 تطبيقات الانحلال الإشعاعي : Application of Radioactive Decay

في هذا القسم نعرض بعبارة على تطبيقات الانحلال الإشعاعي، حيث يمكن بسهولة استخدام الأساسيات التي وردت في هذا الفصل لإجراء تحليلات التنشيط الإشعاعي Activation Analysis، وإنتاج النظائر المشعة، وحسابات احتراق الوقود Fuel burnup calculations في المفاعل النووي.

قياس الفيض النيوتروني :

من أحد تطبيقات التنشيط الإشعاعي Activation Analysis تحديد فيض النيوترونات الحرارية Thermal neutron flux داخل المفاعل. نقصد بالفيض النيوتروني الحراري هو عدد النيوترونات الحرارية العابرة لمساحة قدرها سم² عند كل ثانية. في مثل هذه التجربة توضع عينات من عنصر ما N في المواضع المطلوب قياس الفيض النيوتروني فيها. الشكل 8.6 يوضح توزيع مجموعة العينات على المحور الرأسي لقلب المفاعل في وجود عمود تحكم مجاور تم إدخاله جزئياً .



يتمص العنصر N المكون لهذه العينات النيوترونات الحرارية ليتحول إلى عنصر آخر N_b بمعدل إنتاج $R = \sum_a \phi = \sigma_a(v) N \phi = \sigma_a(v) N v n(v)$ الذي بدوره ينحل بمعدل $N_b \lambda_b$. إذا يمكننا كتابة معادلة رياضية تحكم معدل تغير N_b كما يلي:

$$\frac{dN_b}{dt} = R - \lambda_b N_b \quad (22.6)$$

والآن وبالتركيز على حد معدل الإنتاج R ، وباعتبار أن المقطع المستعرض المجهرى يتناسب عكسيا مع سرعة النيوترونات الحرارية بمعنى أن $\sigma_a(v) = \sigma_{a0} v_0/v$ ، وبالتالي فإن:

$$R = v n(v) N \sigma_{a0} v_0/v = n(v) N \sigma_{a0} v_0 \quad (23.6)$$

وبالتعويض بالتوزيع الماكسويلي للنيوترونات الحرارية مع إجراء التكامل على كل السرعات المحتملة يمكن إذا كتابة المعادلة 23.6 بالصورة التالية:

$$R = N \sigma_{a0} v_0 \int_0^{\infty} 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}} dv \quad (24.6)$$

وباعتبار أن:

$$\int_0^{\infty} v^2 e^{-\beta^2 v^2} dv = \frac{\sqrt{\pi}}{4\beta^3} \quad (25.6)$$

فإن قيمة التكامل في المعادلة 24.6 تساوى n . هذا يعنى أن التوزيع النيوتروني الماكسويلي الذي يعبر عن كيفية توزع كثافة النيوترونات بالنسبة للسرعات المختلفة عندما يتم إجراء التكامل عليه بالنسبة لكل السرعات المحتملة فستكون النتيجة هي n أى الكثافة النيوترونية. لذلك فإن معدل الإنتاج R هو:

$$R = N \sigma_{a0} v_0 n = \Sigma_{a0} \phi_0 \quad (26.6)$$

حيث ϕ_0 يمثل الفيض النيوتروني الحراري. الآن يمكن التعرّيج مرة أخرى للمعادلة 22.6 ، وبالإستفادة من المعادلة 26.6 ، فإنه يمكن القول بأن:

$$\frac{dN_b}{dt} + \lambda_b N_b = \Sigma_{a0} \phi_0 \quad (27.6)$$

لحل هذه المعادلة التفاضلية ذات الرتبة الأولى وغير المتجانسة، يمكن استخدام حل المعادلة المتجانسة (وذلك بتسوية الطرف الأيمن بصفر) لإيجاد مايسمى بالحل المتجانس ثم يضاف إليه الحل غير المتجانس، أى أن

$$N_b = N_{bh} + N_{bnh} \quad (28.6)$$

المعادلة التفاضلية التي تحكم الحل المتجانس هي:

$$N_{bh} = C e^{-\lambda_b t} \quad (29.6)$$

أما الحل غير المتجانس نفترضه ثابتاً وبالتعويض به في المعادلة 27.6، نجد أن :

$$0 + \lambda_b N_{bnh} = \Sigma_{a0} \phi_0 \quad (30.6)$$

ومن ثم فإن حل المعادلة التفاضلية هو:

$$N_b = C e^{-\lambda_b t} + \frac{\Sigma_{a0} \phi_0}{\lambda_b} \quad (31.6)$$

وباعتبار الشرط الابتدائي $N_b(0)=0$ ، فإن ثابت التكامل يمكن إيجاده ويكون الحل النهائي كما يلي:

$$N_b = \frac{\sum_{a0} \phi_0}{\lambda_b} (1 - e^{-\lambda_b t}) \quad (32.6)$$

كما أن الفاعلية الإشعاعية Activity هي $A = N_b \lambda_b$ ، و t زمن الإشعاع داخل المفاعل. أما إذا أخرجت العينة من المفاعل فإن الفاعلية الإشعاعية المقاسة $A_{measured}$ ستتضاءل مع الزمن على الصورة التالية:

$$A_{measured} = \sum_{a0} \phi_0 (1 - e^{-\lambda_b t}) e^{-\lambda_b t'} \quad (33.6)$$

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 التي بها عمود التحكم بسبب امتصاص عمود التحكم للنيوترونات عند تلك المواقع.

تحليلات المواد :

كما يمكن استخدام أسلوب التنشيط الإشعاعي 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 ، وبشئى 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 الطبيعي أو المثرى مع عناصر أخرى محدودة مثل الأكسجين والهيدروجين والكاديوم 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 تتحلل إلى عناصر أخرى وذلك بانبعث 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) والتي 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 مطروحاً 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 انحلال لكل ثانية ، أو بدلالة وحدة أكبر تدعى الكيورى والتى تساوى 3.7×10^{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 تحليلياً أو عددياً أو باستخدام برامج خاصة مثل Simulink . كما تم فى الفصل تبين مفهوم

الاتزان وخصوصا القرنى Secular والعاير Transient. إن سلسلة الانحلال 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 سلسلة انحلال يمكن نمذجتها رياضيا وحلها كما ورد ذكره، وذلك لحساب عدد النوى المرادة ومن ثم كتلتها . أيضا من خلال التنشيط الإشعاعى يمكن حساب الفيض النيوترونى الحرارى فى المفاعلات النووية.

6-6 مسائل :

1.6 - اوجد حل مثال 2.6 بالشروط الابتدائية 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 بالمثال 3.6 علما بأن:

$$N_1(0)=N_{10}, N_2(0)=N_3(0)=\dots=N_8(0)=0$$

3.6 - طبق حل المعادلة 8.6 على المثال 2.6 لإيجاد كل من N_1 و N_2 و N_3 .

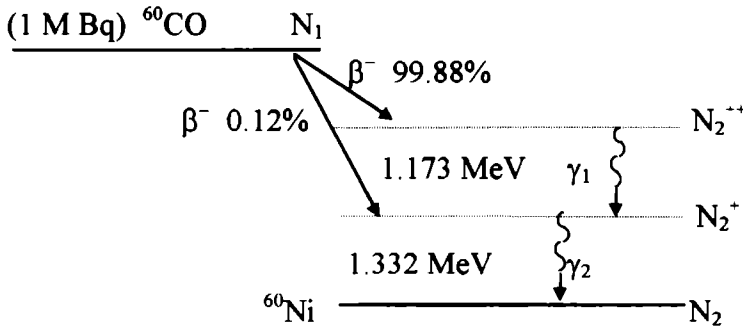
4.6 - طبق حل المعادلة 8.6 على سلسلة انحلال متكونة من 7 عناصر.

5.6 - استنتج المعادلتين الخاصتين بتعريف عمر النصف $t_{1/2}$ وكذلك متوسط العمر τ ، ثم وضع بالرسم التعريفيين على شكل محور الزمنى عادى ومحوره الصادى لوغاريتمى، ثم بين إلام يشير ميل الخط المستقيم للرسم الناتج؟

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} tA(t)dt}{\int_0^{\infty} A(t)dt}; A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{معلومة مساندة:}$$

6.6 - إذا كانت إحصائية عدم انحلال نواة ما حتى الزمن t هي $e^{-\lambda t}$ ، كما أن الاحتمالية بأن تلك النواة ستتحلل في الفترة dt التالية هي λdt ، فإذا كان هناك عدد نوى ابتدائي N_0 ، احسب إحصائية أن نواة ما ستتحلل بعد زمن لانتهائي ، وإذا كانت $\lambda = 0.1 \text{ [day}^{-1}\text{]}$ ، احسب احتمالية الانحلال عند نهاية اليوم الخامس. احسب احتمالية الانحلال عند نهاية اليوم العاشر. ارسم شكلا يعبر عن عدد النوى المتبقية (غير المنحلة) كدالة في الزمن.

7.6 - الشكل التالي يمثل مخطط انحلال ^{60}Ni إلى ^{60}CO



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 التي تحكم سلسلة الانحلال.

د) ارسم التصرف الزمني لكل النويدات.
هـ) ما هي الفاعلية الإشعاعية لأشعة γ_1 (1.173MeV) بالبيكريل (Bq) وبالكوري (Ci) ؟



الفصل السابع

النيوترونات

Neutrons

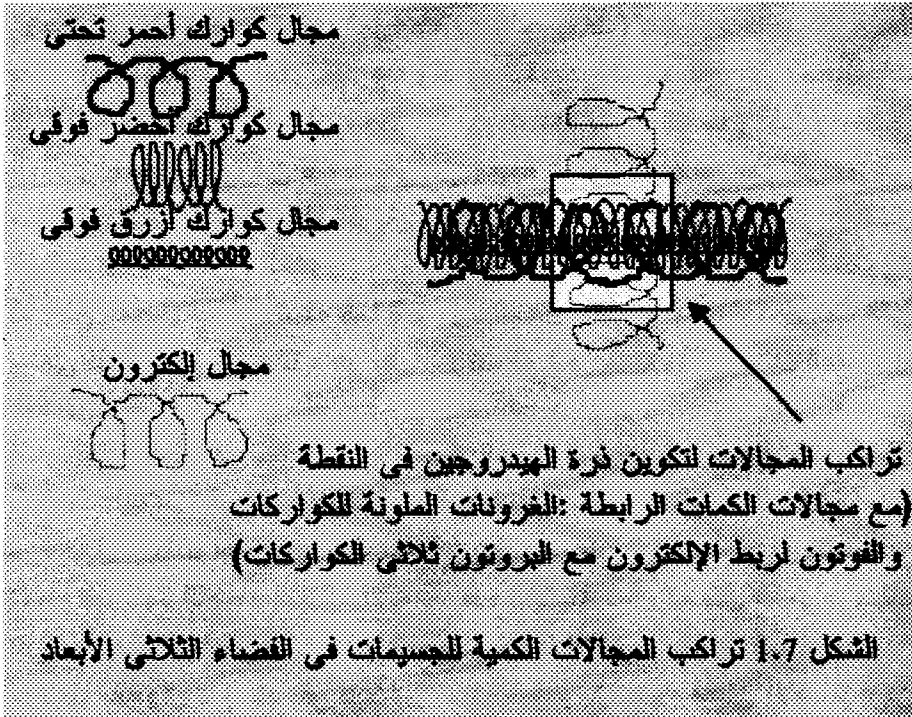
- 1-7 ماهية النيوترون.
- 2-7 إنتاج النيوترونات.
- 3-7 الكشف عن النيوترونات.
- 4-7 تصنيف النيوترونات.
- 5-7 استطارة النيوترونات في نظامي المعمل ومركز الكتلة.
- 6-7 تباطؤ النيوترونات و احتمالية الاستطارة.
- 7-7 النيوترونات الحرارية.
- 8-7 ملخص.
- 9-7 مسائل.

7-1 ماهية النيوترون :

توجد هناك نظرية المجال الكمية النسبية الحديثة Relativistic Quantum Field Theory والتي تفسر الكون بأنه مجموعة من المجالات الخاضعة لقواعد النسبية الخاصة والميكانيكا الكمية، وبالتالي أمكن رؤية كل شيء على أنه مجالات كمية متفاعلة. هذا وتفسر شدة المجال عند نقطة بأنها الاحتمال الإحصائي لإكتشاف الكمات المرتبطة به (الجسيمات) عند تلك النقطة، وهذا يعتبر أحد أهم نتائج النظرية. هذا وقد ورد في أحد أخبار المحطات الفضائية العالمية حديثاً أن مجموعة من العلماء بدولة النمسا وعلى رأسهم العالم زلينجر تمكنوا من تزويد خواص معينة لفوتون ثم ظهر هذا الفوتون في مكان آخر. إن ما حققه هذا الفريق هونتاج لدراسات سابقة في أوائل التسعينيات من القرن العشرين قام بها العالم تشارلز مينت . ويعد هذا تطوراً قد يفتح المجال لنقل الأشياء كما يتصوره الخيال العلمي، فالخطوة القادمة التي يسعى لها زلينجر وزملاؤه هو نقل الذرات ثم الجزيئات وذلك خلال العقدين القادمين.

أشار هينز باجلز في كتابه القيم " رموز الكون" المترجم للعربية من قبل د.محمد البيومي إلى تفسير تخيلي يُمكننا من استشعار نظرية المجال الكمي من خلال ربط نوابض springs بعضها ببعض على شكل سلسلة مترامية الأطراف لتعم الفضاء الثلاثي الأبعاد. هذه السلسلة تمثل المجال الكمي . وعند نقر أحد هذه النوابض في السلسلة فسيهتز وهذا الاهتزاز يقابل كما أو جسيماً مرتبطاً بالمجال ، وعند نقر نابضين منفصلين ومتباعدين فان الاهتزازين الناشئين يمثلان كميتين أو جسيمين عند تلكا النقطتين. قد تكون تلك السلسلة معبرة عن مجال إلكتروني، ويمكن تخيل سلسلة أخرى ذات نوابض أثقل لتعبر عن مجال فوتوني وأخرى لمجال كواركي بحيث تكون اهتزازاتها تعبر عن الجسيمات المناظرة لها في موقع ذلك الاهتزاز. وعند ارتباط هذه السلاسل بعضها ببعض أحدها ممثلاً الكواركات وأخرى لبتونات وأخرى غرونات في الفضاء الواسع فإننا سنلاحظ اهتزازات تنتقل من سلسلة إلى أخرى . الآن بعد أن تخيلت هذه السلاسل المهتزة والمتشابكة والمترامية

الأطراف في الفضاء ، قلص حجم النوايوس لا نهائيا، بحيث يكون هناك عدد لانهائي منها عند نقطة ما في الفضاء، ثم أحجب رؤية النوايوس، فما يتبقى لنا من هذه السلاسل (المجال) الا الاهتزازات المحتملة عند كل نقطة، فتظهر هذه الكمات كجسيمات مختلفة. ويمكن أن تتحرك هذه الجسيمات في الفضاء وتتفاعل بعضها مع بعض، وهذا يعد تفسير الفيزيائيين النظريين للمجال الكمي ، أنظر الشكل 1.7 للتوضيح.



وكما كان السؤال سابقا وهو ما هي الجسيمات الأولية والذي 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 هي المجالات الأساسية ؟ وتباعا لما ورد، فإن مجالات هذه الكمات تكون هي المجالات الأساسية.

هذا وتعد نظرية الديناميكا الكهربية الكمية والديناميكا اللونية الكمية احدى النظريات التى توظف النماذج الرياضية لوصف تفاعل المجالات الكمية.

بالنظر إلى الكون عينياً Macroscopically (الكواكب والنجوم) أو مجهرياً Microscopically (الذرات) فإن وجود المادة هو الإستثناء حيث يبدو الخواء يعم الفضاء. وبظهور نظرية المجال الكمية النسبية فإن هذا الخواء غير خاوا بل ممتلئ، إذ يتكون من الجسيمات وضديداتها التى تخلق وتندثر تلقائياً فى أزمنة ومسافات قصيرة جداً. 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 بأن 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 تغيير مدار الإلكترون حول النواة وقد استطاع العالم ويليس لامب القياس بدقة هذه التغيرات المدارية فى ذرة الهيدروجين . لقد كان لتصنيع آلة تصادم حزمى الإلكترونات (المادة) والبوزيترونات (ضد يد المادة) فى السبعينيات من القرن العشرين عظيم الأثر لتأكيد مفهوم تأثيرات استقطاب الفضاء، حيث تم التصادم المباشر بين المادة وضديدها الذى أمد الطاقة اللازمة لإظهار أزواج الجسيمات الافتراضية القابعة فى الفراغ . لقد كانت هذه إحدى الطوق التى اكتشفت بها الكواركات الجديدة كالكوارك الغاتن وضديده.

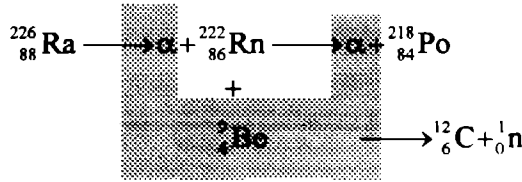
النيوترون الذي تتبأ به رذرفورد هو أحد أوائل الهادرونات المكتشفة، حيث أكتشفه شادويك سنة 1932 . والنيوترون مكون من ثلاث كواركات ، اثنتان منهما تحتية وآخر فوقى كما أن لكل منهم له لون (أحمر، أخضر، أزرق) هذه الكواركات ترتبط بنوع من الغروانات والمسمى بالغروانات اللونية التى هى مسؤولة عن ترابط القوى النووية القوية. الجدول 1.7 يوضح بعض خواص الكواركات والتي من بعضها يتكون النيوترون، حيث إن لو جمعنا الشحنات الكهربائية على كواركات النيوترون $2(-1/3) + (2/3) = 0$ ، أى أن النيوترون ليس له شحنة ومن ثم فهو نوية محايدة. الكواركات تعتبر حبيسة وإذا ما حاولنا أن نشطر النيوترون فإن الطاقة التى نزودها ستمطط 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 الإنجلىزى	الكتلة m_p/m_e	الشحنة بالنسبة للإلكترون
فوقى	u	up	2	2/3
تحتى	d	down	6	-1/3
غريب	s	strange	200	-1/3
فائق	c	charm	3000	2/3
قاع	b	bottom	9000	-1/3
قمة	t	top	-	2/3

2-7 إنتاج النيوترونات : Production of Neutrons

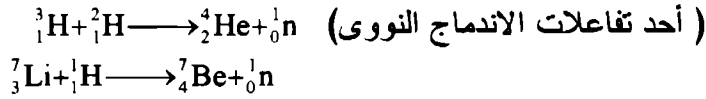
التفاعلات النووية تعد المصدر الوحيد للنيوترونات، حيث إن تفاعلات (α, n) على النوى الخفيفة التي أدت إلى اكتشاف النيوترون لازالت مصدرا مهما لإنتاج هذه الجسيمات. إن ما قيمته جرام واحد من الراديوم (1 كوري : ICi ؛ أى الكمية التي لها نشاط إشعاعي لجسيمات الفا يناظر 3.7×10^{10} انحلاله لكل ثانية) مضافا إليه عدد من الجرامات من مسحوق البريليوم سيؤدي 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 رمزياً بـ ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$. 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 التغيير 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 قياسي Standard Source .

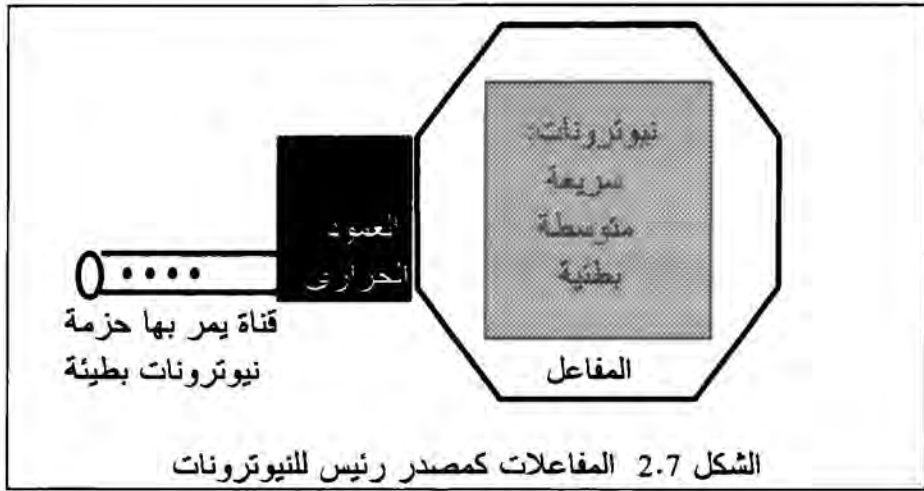
أيضا هناك مصدر الرادون-بريليوم Rn-Be ، والذي له عمر النصف يقارب من 3.8 أيام مما يصنفه من المصادر سريعة الانحلال. مصدر آخر هو البولونيوم-بريليوم Po-Be (ينتج حوالى 3×10^6 نيوترون لكل ثانية) ويستخدم هذا المصدر عند الرغبة فى الحصول على إشعاعات جامية ضئيلة مصاحبة الانحلال، ولكن لهذا المصدر عيوب متمثلة فى قصر عمر النصف

(حوالي 140 يوم) كما أن عناية فائقة مطلوبة لتحضير البولونيوم بدرجة نقاوة عالية. وعند الرغبة في الحصول على نيوترونات أحادية الطاقة Monoenergetic فإن المصادر الفوتونيوترونية Photoneutronic sources يمكن استخدامها. هذه المصادر لا تعتمد بالضرورة على المادة المشعة (γ, n) ، ومثال ذلك ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ و ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^1\text{H}$ ، كما أن طاقة الترابط للنيوترون الأخير ضعيفة بالنسبة لكل من ${}^2\text{H}$ و ${}^9\text{Be}$. أيضا تعد طاقة الاستحثات Threshold Energy صغيرة بالنسبة لتفاعلات (γ, n) ، فمثلا طاقة الاستحثات للتفاعل ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^1\text{H}$ تساوي 2.23 MeV ، في حين تلك للتفاعل ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ تساوي 1.67 MeV . إن مشعات جاما الكثيفة جدًا يمكن إنتاجها برخص في المفاعلات النووية وبالتالي يمكن استخدامها لتصنيع مصادر نيوترونات كثيفة تفوق تلك المنتجة من المشعات الجامية الطبيعية. هناك طريقة أخرى لإنتاج النيوترونات وذلك عبر المعجلات ومثالا لذلك التفاعلات التصادمية التالية:



لاحظ أن التفاعل الأول يعد أحد التفاعلات الأساسية في المفاعلات الاندماجية النووية، في حين أن التفاعل الثاني يمكن استخدامه في المفاعلات الاندماجية فيما يسمى ببطانية اليوارنيوم -238 U blanket 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 مصمماً بحيث يحدث الانشطار فيه بسبب النيوترونات البطيئة، فإن خليط من النيوترونات السريعة والمتوسطة والبطيئة سينتج ، وهذا التعدد في طاقات النيوترونات يناسب إنتاج النويات المشعة الإصطناعية داخل ذلك المفاعل، إلا أنه هناك كثير من التجارب تتطلب النيوترونات البطيئة، وهذه يمكن الحصول عليها عبر ما 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.



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 كثيرا منها ليتمكن 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 والذي 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 والتي تعتمد على طاقة الإثارة وموقع مستويات الطاقة فى النواة المركبة والنواة الناتجة، وبالتالي فإن احتمالية أى نوع من الامتصاص للنيوترون يعتمد على طاقة النيوترون الساقط وتركيبية المادة الماصة . هذه الاحتمالات تتغير كثيرا حتى بين النظائر المختلفة لنفس العنصر، وذلك لأن كل نويدها لها خواصها النووية الخاصة بها. ونظراً لأهمية طاقة النيوترون فى تفاعلات النيوترون مع المادة، فإن تميز النيوترونات من وجهة نظر الطاقة يعد مهماً، فهناك النيوترونات البطيئة والتي تتراوح طاقتها بين 0-1 eV والمتوسطة 1- 100 KeV والسريعة أكبر من 100KeV. ولنسرد الآن قائمة بتفاعلات النيوترونات بالمادة والتي فى مجملها تعد أساس طرق الكشف عن النيوترونات.

1- الاستطارة المرنة (n,n) Elastic scattering

2- الاستطارة اللامرنة (n,n), (n,γn), (n,2n) Inelastic scattering ؛ هذا التفاعل ممكن طاقياً فقط للنيوترونات السريعة ، فى التفاعل (n,n) تترك النواة فى حالة 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 .

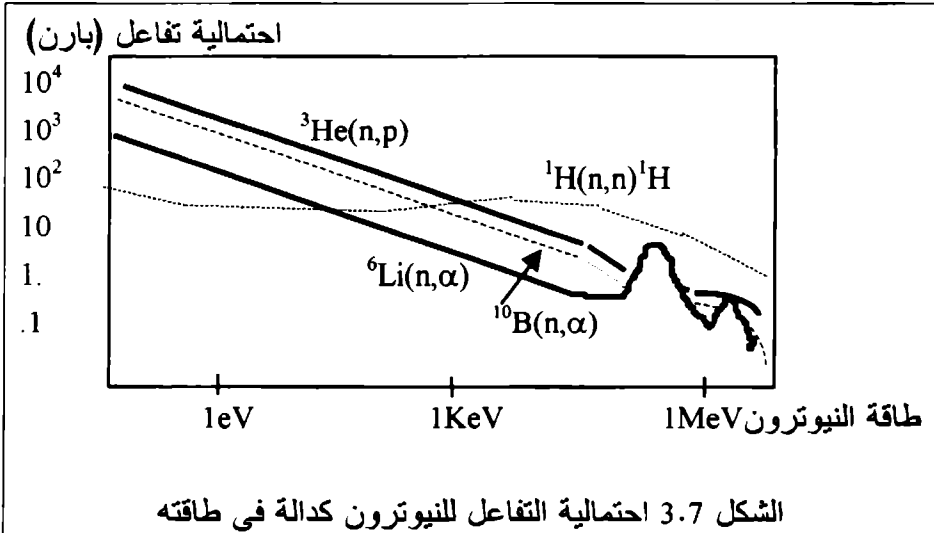
3- الأسر الإشعاعى (n, γ) Radiative capture ؛ هذا التفاعل يعد من أهم تفاعلات النيوترون مع المادة، حيث إن النيوترونات البطيئة يمكنها استحداث هذا التفاعل تقريبا فى كل النويدات. كما أن احتماليته عالية بالنسبة لبعض النويدات ولبعض طاقات معينة للنيوترونات فى مدى الطاقات المتوسطة ، وهذا النوع يسمى بالأسر الرنينى 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 الانفلات من النواة ، فنتميز هذه التفاعلات باحتمالية عالية للنوى الخفيفة، وكذلك بالطاقات العالية للنيوترونات الساقطة. يستثنى من ذلك تفاعل (n,α) الباعث للطاقة Exoergic حيث تتحرر جسيمات ألفا بسقوط نيوترونات بطيئة على النوى الخفيفة مثل الليثيوم-6 والبورون-10 .

- 5- الانشطار (n,f) Fission ؛ في هذا التفاعل تنشط النواة المركبة إلى شظيتين مع تحرر نيوترون أو أكثر. الانشطار يحدث بسبب النيوترونات البطيئة في ^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U ، في حين أن النيوترونات السريعة تحدث انشطارا لكثير من النوى الثقيلة.
- 6- التفاعلات عالية الطاقة ؛ عند سقوط نيوترونات بطاقة عالية تزيد عن 100 MeV فقد تسبب في انبعاث رش من الجسيمات المختلفة.

إن من أهم الطرق للكشف عن النيوترون، تبوب كما يلي:

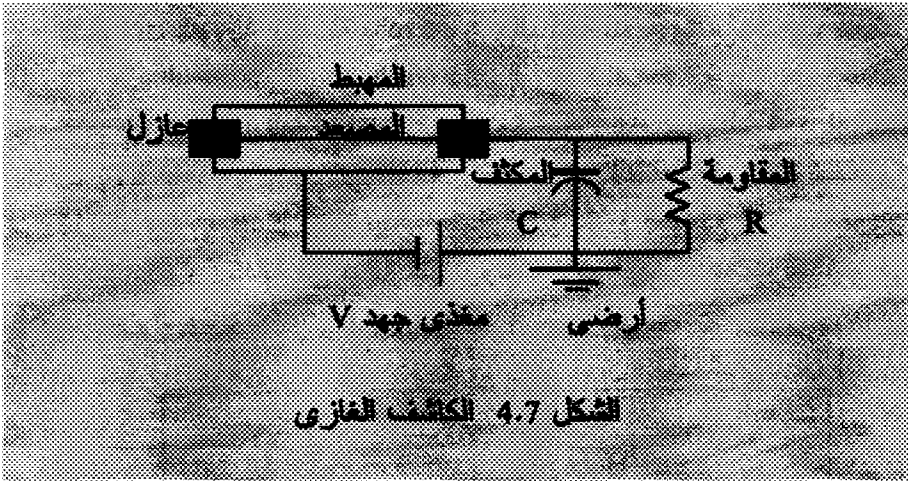
- 1- التحولات النووية المحدثة بالنيوترونات Neutron induced transmutation حيث يمكن الكشف عن الجسيم الناتج؛ مثال ذلك تفاعلات (n,p), (n,γ), (n,α), (n,f)
- 2- التحولات النووية المحدثة بالنيوترون والمنتجة لنوى مشعة، بحيث يستدل بانحلال هذه النوى عن الفيض النيوتروني المراد قياسه.
- 3- الاستطارة المرنة للنيوترونات، 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 في طاقة النيوترونات لأهم أربع تفاعلات تستخدم في الكشف عن النيوترونات.



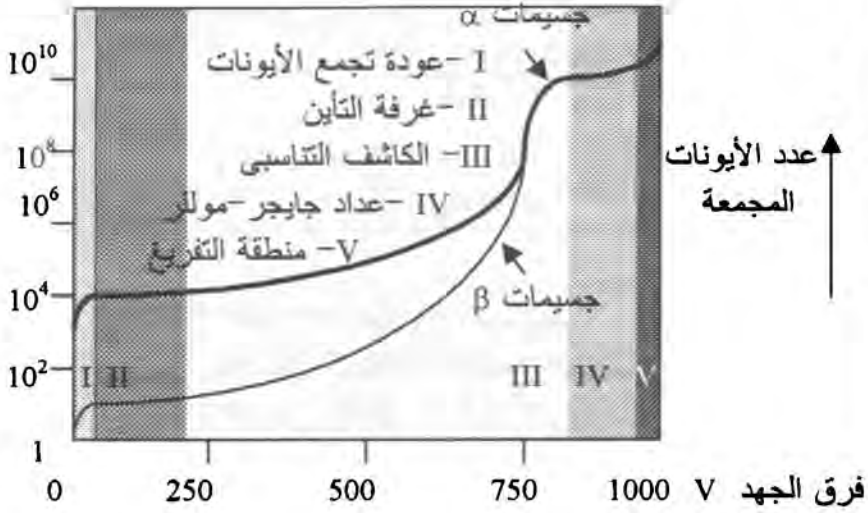
وكما أوردنا سابقاً فإن الكشف عن النيوترونات ليس مباشراً بل يتم الكشف عنه عن طريق مادة محولة ، وهناك عدة كاشفات ذات العلاقة منها:

أولاً: الكاشفات الغازية:

في هذه الكاشفات الجسيمات المشحونة تسبب تأين خلال مسارها في 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 بالتوازي مع المكثف C ، أنظر الشكل 4.7 للتوضيح.



وبتغيير فرق الجهد المغذى للكاشف تتنوع مسميات الكاشف مثل؛ غرف التأين والكاشفات التناسبية وأنايبب جيجر- مولر، وذلك حسب المنحنى المبين في الشكل 5.7 .



الشكل 5.7 مناطق استخدام الكاشفات الغازية

كاشفات البورون :

وكمثال للتفاعل اللازم للكشف عن النيوترونات فهو تفاعل $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ويرافقه تحرير لطاقة تساوي 2.78 MeV ، وقد تنتج نوية الليثيوم مباشرة في الحالة الأرضية Ground state باحتمالية 0.64. للنيوترونات البطيئة أو باحتمالية 7. للنيوترونات بطاقة 1.8 MeV و باحتمالية 5. للنيوترونات بطاقة 2.5 MeV ، وفي هذه الحالة تتوزع الطاقة المتحررة بين الليثيوم والفا. وعلى نقيض ذلك قد تنشأ نوية الليثيوم في حالة استثارة ، والتي تتخلص منها النوية بتحرير أشعة جاما ذات طاقة 48 MeV . ونظرا لأن مدى جسيمات الفا قصير فإن الكاشفات تتطلب أن يكون البورون ^{10}B في صورة طبقة رقيقة جدا تغلف جدار الكاشف ومن ثم تتوفر الحرية في اختيار نوع مناسب من الغاز لملء الكاشف، أو أن يكون البورون أساسا في مركب غازي مثل غاز

ثالث فلوريد البورون BF_3 . هذا ويمكن حساب حساسية (S) Sensitivity الكاشف وكذلك كفايته (ε) Efficiency من المعادلتين التاليتين:

$$S = \frac{3840 \times 10^{24} NV}{1.128} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon = 1 - e^{-N\sigma_a d}; \sigma_a = \sigma_{a0} \left(\frac{0.25}{E}\right)^{1/2} \quad (2.7)$$

حيث إن N تمثل عدد ذرات البورون لكل سم³ ، و V تمثل الحجم الحساس للكاشف، و σ_{a0} تمثل احتمالية امتصاص النيوترون البطئ من قبل البورون وهي حسب المنحنى بالشكل 3.7 تساوى b 3840 ، والرقم 1.128 يمثل نسبة \bar{v}/v_0 للنيوترونات ذات توزيع ماكسويل بولتزمان فى الطاقة عند درجة حرارة 20° 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 cm³ وكثافة ذرات البورون ^{10}B هى $N = 4.1 \times 10^{18}$ atom/cm³ . أيضا احسب كفاية الكاشف للنيوترونات البطيئة المتحركة موازية لمحور الكاشف، علما بأن طول الحجم الحساس يساوى 15.2 cm .

الحل :

$$S = \frac{3840 \times 10^{-24} \times 4.1 \times 10^{18} \times 58}{1.128} = 0.81$$

أى أن حساسية الكاشف تساوى 0.81 عدة لكل ثانية لكل وحدة فيض flux (φ) نيوترونى.

كما أن الكفاية للكاشف هي:

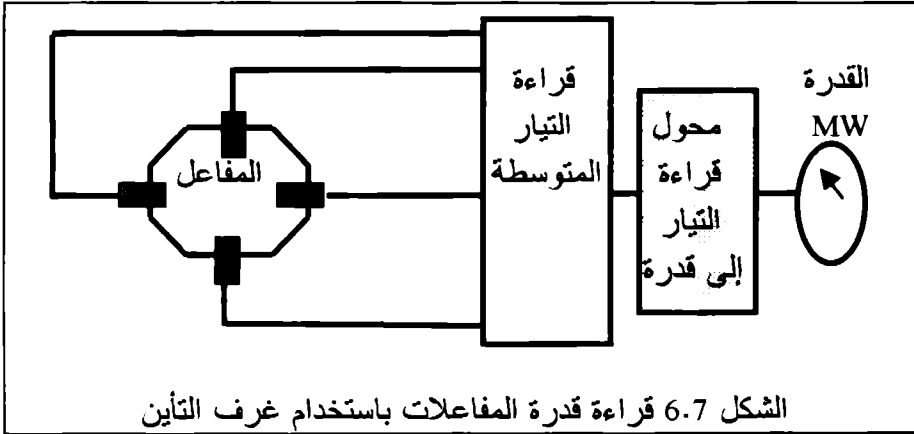
$$\varepsilon = 1 - \exp \left[-4.1 \times 10^{18} * 3840 \times 10^{-24} * \left(\frac{0.025}{E} \right)^{1/2} * 15.2 \right]$$

وبالتعويض بطاقة النيوترون الحرارى $E=0.025 \text{ eV}$ فإن $\varepsilon = 22\%$.

وعند التعامل مع فيض نيوترونى عال (مثل ذلك الموجود بالمفاعلات النووية) فإن الكاشف النيوترونى يمكن تشغيله كغرفة تأين من نوع التيار الكهربى، فعلى افتراض أن الطاقة الناتجة 2.3 MeV من التفاعل $B(n,\alpha)Li^*$ ستنتج تأين وذلك بفقد 35eV لإنتاج زوج أيونى، حيث إن Li^* تعتبر نويدة ليثيوم مثارة ستفقد تلك الإثارة بتحرير أشعة جاما بطاقة $2.78-2.3=0.48$ MeV، فإن كل تفاعل لكل ثانية سينتج 1.02×10^{-14} أمبير (amp). وبالتالى فإن التيار بوحدة الأمبير الناتج لفيض من النيوترونات ϕ فى غرفة التأين بحساسية S يعطى من المعادلة التالية:

$$I = 1.02 \times 10^{-14} \phi S \quad (3.7)$$

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 سم². 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.



كاشفات الهيليوم :

هناك أيضا التفاعل ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ محررا طاقة قدرها 765 MeV. وهذا التفاعل له احتمالية تفاعل قدرها 5400 b للنيوترونات البطيئة، ومن مميزات هذا التفاعل أنه ليس هناك وليدات تفاعل في حالة ماثرة وبالتالي فإن نواتج التفاعل (البروتون والتريتيوم) يحملان كل الطاقة المتاحة وهي طاقة النيوترون الساقط و الطاقة المتحررة من التفاعل، كما أن عيب هذا التفاعل هو تأثير استطرارة النيوترون بالتريتيوم الذي له احتمالية تضاهي ضعف تفاعل ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$. 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 هي 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 الإشعاعي لنواتج الانشطار . من مزايا استخدام غرف الانشطار Fission chambers ، وجود التنوع في المواد المنشطرة ومن ثم يتم اختيار اعتمادية الطاقات، فمثلا ${}^{238}\text{U}$ تستخدم في الكشف عن النيوترونات السريعة في حين ${}^{235}\text{U}$ تستخدم في 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. وفي العادة يتم استخدام المادة المنشطرة في 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 في الكشف عن النيوترونات السريعة تلك التي تعنى بتفاعلات الاستطارة (n, p) ، حيث إن في هذه التفاعلات يعطى النيوترون على الأقل جزءا من طاقته إلى البروتونات، ومن ثم فالتأين أو الإثارة التي يسببها الأخير (البروتون) تمكن من عملية الكشف.

ثانيا: الكشف عن طريق التنشيط الإشعاعي

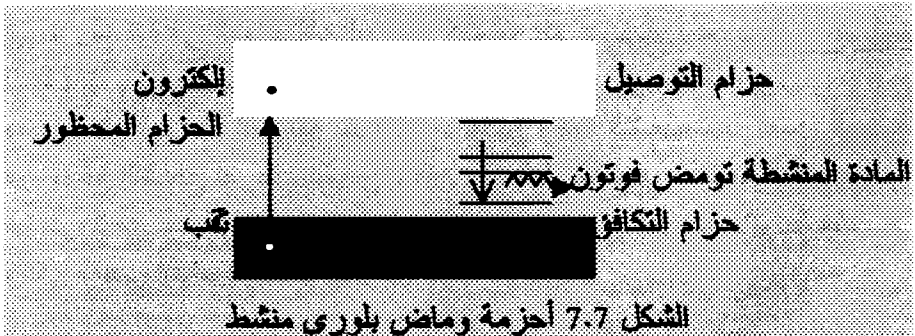
: Detection by induced activity

عند تعريض نويدات ما مستقرة إلى النيوترونات لفترة معينة يحدث تحويل لتلك النويدات مولدا بذلك نويدات ذات نشاط إشعاعي. وبعد توقف التشعيع النيوتروني يتم الكشف عن النشاط الإشعاعي والذي يتم من خلاله الكشف عن الفيض النيوتروني المسبب لذلك النشاط. تسمى هذه الكاشفات بكاشفات النشاط الإشعاعي. من مميزات هذه الطريقة إنه بالاختيار المناسب للمادة التي ستسعى يمكن قياس فيوض تتراوح من 1 نيوترون/سم²/ثانية إلى أعلى فيوض ممكنة في المفاعلات النووية. كما أنه يتم استخدام أحجام صغيرة للكاشفات ، بحيث يمكن أن تكون رقائق صغيرة أو كريات صغيرة. ونظرا لأن في 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. في هذه الحالة يجب استخدام الغرف الأيونية مثلا والتي تعطي القياسات الآنية للفيض.

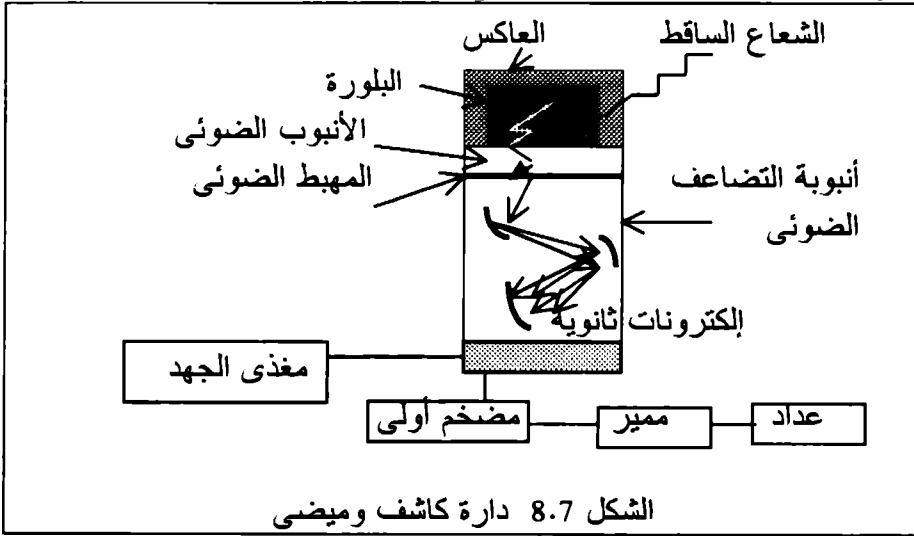
ثالثاً: الكاشفات الومضية Scintillation detectors :

في الوقت الذي تعتبر فيه غرف التأين والكاشفات التناسبية وكاشفات أشباه الموصلات (الآتي ذكرها) ذات فائدة في قياس الجسيمات ذات المدى القصير مثل الفا و بيتا ذات الطاقات المنخفضة نسبياً، فإنها تعجز عن الكشف عن الجسيمات التي مداها أطول من أبعاد غرفة الكاشف. وعلى نقيض ذلك فإن الكشف الومضى يعد من أحد الطرق المفيدة في قياس طاقات بيتا وجاما .

ففي نظرية الحزام Band theory تمثل البلورة بحزام التكافؤ للطاقة والذي في العادة يكون ممتلئاً بالإلكترونات وكذلك حزام التوصيل للطاقة والذي في العادة يكون فارغاً. يكون مستوى حزام التوصيل أعلى من حزام التكافؤ ويفصل بينهما حزام الطاقة المحظور الخالي من الإلكترونات الحرة. إن مرور الجسيم المشحون والذي له طاقة كافية يمكنه نقل إلكترونات من منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل وهو ما يسمى بالتأين. الفراغ الناتج عن رحيل الإلكترون يسمى بالتقب Hole . الإلكترون في منطقة التوصيل والتقب في حزام التكافؤ يتحركان مستقلين خلال البلورة Crystal . أي تحور للبلورة مثل إضافة ذرات شوائب يمكنها أن تكون مستويات طاقة داخل المنطقة المحظورة ، وبسرحان التقوب والإلكترونات في البلورة تحدث إثارة للمادة المنشطة (الشوائب) . وعند عودة هذه المستويات المثارة إلى مستويات أقل أو إلى مستوى استقرارها فإنها تومض ضوء (فوتون)، أنظر الشكل التالي للتوضيح .



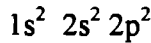
ويتركب الكاشف من الوماض Scintillator محاط بعاكس ضوء من عدة جهات ومحاط بالأنبوب الضوئي من جهة أخرى الذى ينتهى بالمهبط الضوئي فأنبوية التضاعف الضوئي فقاعدة الكاشف. الشكل 8.7 يبين تركيب الكاشف. وطريقة عمل الكاشف تتمثل فى إنتاج الجسيم الساقط لوميض الضوء بجسم البلورة، وعن طريق عاكس الضوء والأنبوب الضوئى فإن 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 Discriminator وكذلك منسق النبضة Pulse shaper ، تعد بالعداد الإلكترونى.



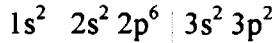
ولعل الكاشفات الوميضية التى تستخدم يوديد الليثيوم المنشط باليورانيوم $Li I(Eu)$ تعد أحد الكاشفات عن النيوترونات وهى تعتمد أساسا على التفاعل ${}^3H(n,\alpha){}^3He$ مع تحرير طاقة 4.78 MeV وهى طاقة كبيرة تميز هذا التفاعل، كما أن احتمالية التفاعل 940b . وتتميز كاشفات يوديد الليثيوم عن نظيراتها الكاشفات 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.

رابعاً: الكاشفات أشباه الموصلات Semi-conductor detectors :

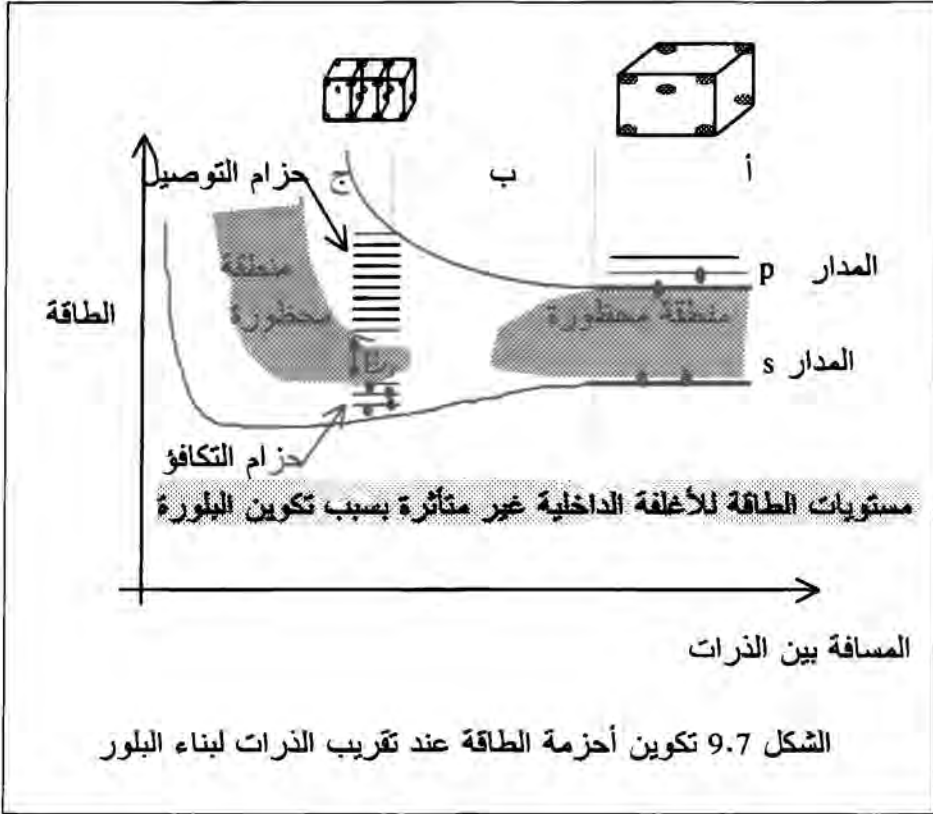
وحتى تعم الفائدة، لنعرج قليلاً عن ماهية أشباه الموصلات والتي كانت أساس لتقنية ثورة الترانسيستور في مطلع الخمسينيات. فكما أسلفنا ذكره أن البنية الأساسية للمادة هي الذرة التي اقترحها رذرفورد والتي تتمثل في نواة مكونة من بروتونات ونيوترونات ، وهذه النواة يطوف من حولها الإلكترونات في مدارات محددة ، فمثلاً في ذرة الكربون ^{12}C توجد ستة إلكترونات تتوزع كما يلي: 2 منهما في المدار الأول $n=1$ بمنزلتين States ، وفي المدار الثاني $n=2$ يوجد أربعة إلكترونات اثنان منهما في منزلتين بالمستوى s والآخران في منزلتين بالمستوى p الذي سعته الكاملة 6 إلكترونات. إذا فالتركيب الإلكتروني لعنصر الكربون يعبر عنه بالآتي:



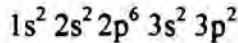
وكذلك فإن عنصر السليكون Si لديه عدد 14 إلكترونات موزعة على ثلاث مدارات رئيسة كما يلي:



ماذكر أعلاه يعبر عن مثال للتوزيع الإلكتروني للذرات الحرة من المادة. أما في حالة البناء البلوري لهذه الذرات فإن مستويات الطاقة تختلف عنها في الحالة الحرة للذرة. حيث إن البلورة عبارة عن ذرات تشغل حيز ذى ثلاثة أبعاد. هذه الذرات لها بناء تكرارى لوحدة بناء أساسية. ففي حالة تكوين البلور فإن مستويات الطاقة لإلكترونات الأغلفة الخارجية تتغير كثيراً حيث إن هذه الإلكترونات مشتركة بين أكثر من ذرة في البلورة. لقد لوحظ أن مشاركة هذه الإلكترونات الخارجية للذرات يشكل حزاماً من مستويات طاقة متقاربة بدلاً من مستويات طاقة متباعدة جداً في حالة الذرة الحرة. ففي الشكل 9.7 يبين كيفية تشكيل أحزمة الطاقة وذلك بسبب تقارب الذرات لتشكل البلورة.

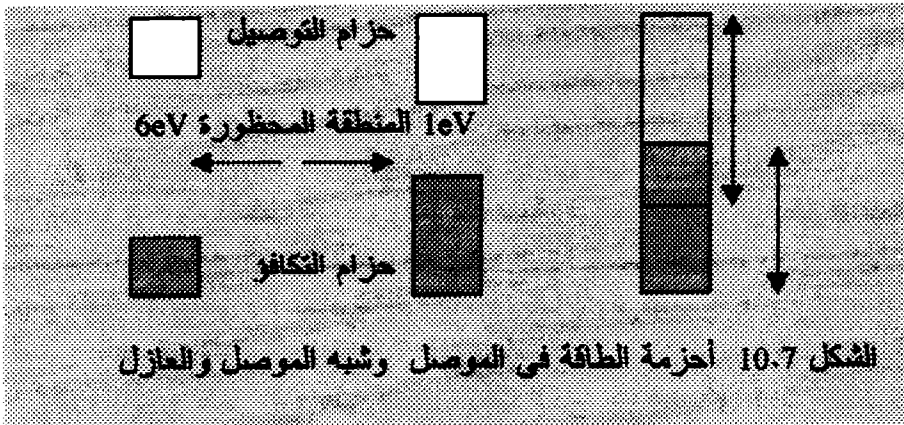


ولتفسير الشكل، لنفرض أن البلورة هي ${}_{14}\text{Si}$ والتي لها تركيب إلكتروني للذرة الحرة كما يلي:



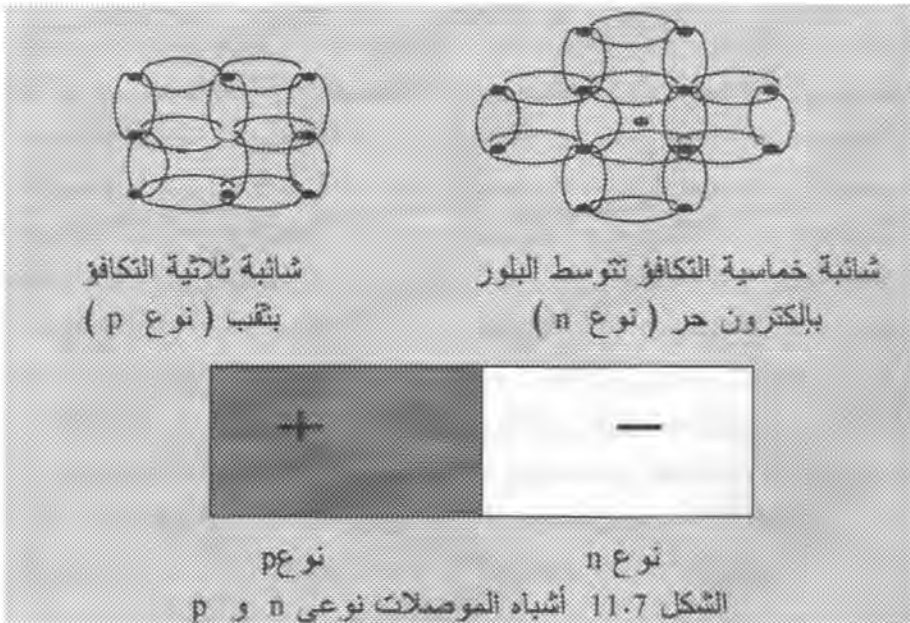
إذاً، المدار الرئيس الثالث به المدار الفرعي s والذي له موقعان لإلكترونين، وكذلك المدارات الفرعية p والتي لها ستة مواقع للإلكترونات محملة فقط بالكترونين في حالة ذرة السيليكون. وعلى مستوى البلورة التي تحوى على N من الذرات فنلاحظ أن الطرف الأيمن من الشكل يبين المدار الثالث المتكون من مدارات p التي تحوى على 6N مواقع للإلكترونات تحوى فعلياً على 2N من الإلكترونات. أيضاً المدار s الذي به 2N مواقع تحوى 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 اليسار في الشكل المبين، فإن كل ذرة ستؤثر بقوة كهربائية على جاريتها ومن ثم فإن البلورة ستشكل مجموعة إلكترونات يجب عليها إطاعة مبدأ الإقصاء لباولي Pauli exclusion principle وبالتالي فإن مستويات الطاقة تتفصل لتكوين حزام طاقة. إن الفصل بين مستويات الطاقة صغير ولكن حيث إننا نتعامل مع N من الذرات وهو رقم يقارب من $10^{23}/\text{cm}^3$ ، فإن الفارق في الطاقة بين أعلى وأدنى مستوى يساوى عدد من الإلكترون فولت. هذا العدد الكبير من مستويات الطاقة المتقاربة جدا يشكل ما يسمى بحزام الطاقة. فمثلا في الجزء (ب) من الشكل نلاحظ أن عدد 2N من المواقع (مدار s) تنفصص لتكوين حزام طاقة تحوى على 2N من الإلكترونات ، وكذلك فإن عدد المواقع 6N (مدارات p) تنفصص حاوية عدد 2N من الإلكترونات. إن المنطقة المحظورة في الجزء ب تتضائل كلما قلت المسافة بين الذرات حتى يتم التداخل بين الحزامين ، وفي هذه الحالة تتحد المواقع (المنازل) العليا 6N مع المنازل الدنيا 2N لتكون 8N من المنازل بحيث تحوى 4N مواقع منها عدد الإلكترونات الموجودة وهي 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 .

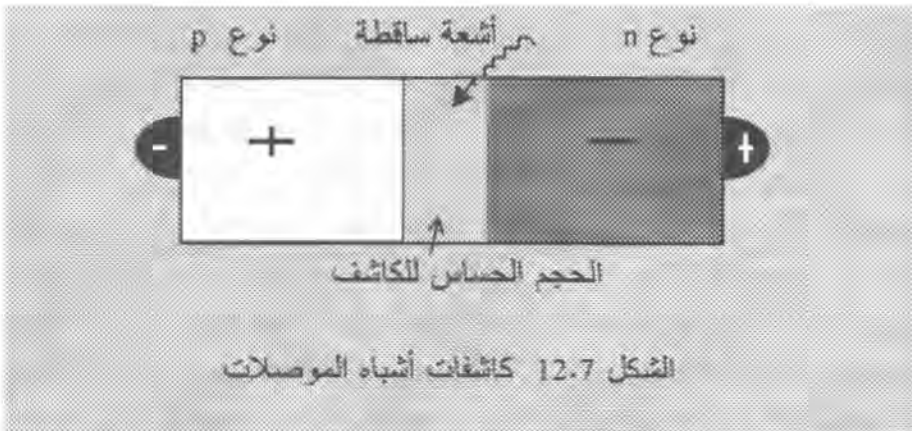


إن أي مادة تكون فيها منطقة الطاقة المحرمة صغيرة حوالي 1eV تسمى بشبه موصل، فالكربون مثلا يسمى شبه موصل لتمييزه بصغر منطقة الطاقة المحظورة، وكذلك فإن الجرمانيوم والسيليكون يعتبران من أشباه الموصلات العملية، حيث إنه في درجة حرارة 0°K فإن E_G للجرمانيوم تسلوى 0.785 eV وللسيليكون تساوى 1.2 eV. هذه المواد عند درجة حرارة منخفضة يكون حزام التكافؤ محتويا على الإلكترونات وحزام التوصيل يكون خاليا من الإلكترونات، إلا أنه بزيادة الحرارة فإن بعض هذه الإلكترونات تكسب طاقة تمكنها من اجتياز المنطقة المحظورة واختراق حزام التوصيل وبالتالي فإن هذه الإلكترونات تبقى لها القدرة على الحركة. ومن ثم فإن هذه المادة التي كانت عازلة في درجة حرارة منخفضة، أصبحت موصلة في حالة درجة الحرارة المرتفعة، ومن هنا كان اسم أشباه الموصلات. إن الفراغات المصاحبة لتخلي 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 وبالتالي يتم استحداث منازل طاقة في المنطقة المحرمة، ومن ثم فإن ذلك له مساهمة في عملية التوصيل (كما أسلفنا ذكره في جزء الكاشفات الوميضية) ، وتسمى هذه بأشباه الموصلات غير النقية. إذا كانت المادة المضافة (الشوائب Impurities) لشبه الموصل

النقى خماسية التكافؤ مثل عنصر الأنتيموني Sb فإن الإلكترونات الأربعة تكون رابطة تساهمية مع العنصر النقي ، 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 تركيبات 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.



إذا ما وضع الصمام الثنائي نوع n-p تحت تأثير فرق جهد عكسي فإن الثقوب تتجه نحو السالب في حين تتجه الإلكترونات نحو القطب الموجب مما ينتج عنه تولد طبقة خالية تتميز بأنها خالية من نواقل الشحنة وهي تشكل الحجم الفعلي الحساس للكشف عن الأشعة الساقطة (الشكل 12.7). إن سمك هذه الطبقة حوالي 1 ميكرون ، وبتغير الجهد الخارجي 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 في أشباه الموصلات تقارب من عشرة أضعاف تلك الشحنات الناتجة في الكاشفات الغازية، والسبب أنه في الكاشفات الغازية يحتاج إلى حوالي 30 eV



لتوليد زوج أيوني في حين أنه يحتاج إلى حوالي عشر (1/10) تلك القيمة في حالة الكاشفات الشبه موصلة.

إن الكشف على النيوترونات باستخدام هذه الكاشفات يتم عن طريق الاستفادة من التفاعلات التي تحدثها النيوترونات ، حيث يتم وضع الهدف للنيوترونات الساقطة في صورة رقائق قريبة من نافذة الكاشف.

خامسا: كاشفات المستحلبات النووية Nuclear Emulsion detectors :

لقد تم استخدام المستحلبات النووية في قياس طاقات النيوترونات وكذلك في قياسات المطيافية Spectroscopy. ففي المستحلبات يمكن أن يتم القياس

المتزامن لكل من الطاقة واتجاه الجسم. 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 في المستحلب النووي. 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 التي دخلت لوحة المستحلب، كما أن الدراسة المستفيضة للمسارات 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 في المستحلبات يمكن تجميع البيانات لعدة أسابيع والكاشف مستمر في التشغيل طيلة كل هذه المدة، كما أن المستحلبات كما ذكرنا تمتاز بخفة وزنها وصغر حجمها وقوة بنيتها. إلا أن الغرف السحابية تمتاز عن المستحلبات في الدقة حيث تميل المستحلبات إلى الإنكماش خلال إظهار الصورة وفي حالة عدم أخذ الاحتياطات اللازمة فقد يحدث إنكماش سمك المستحلب إلى نسبة 50%، أيضا تمتاز الغرف السحابية عن المستحلبات في أنه يمكن تشغيلها في مجال مغناطيسي ومن ثم بقياس انحناء المسار يمكن حساب زخم الجسم . عدة أساليب تستخدم لقياس طاقة النيوترونات ومطيافيتها من خلال المستحلبات النووية، وتتنوع الأساليب بناء على درجة 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 الاستفاد من منحنيات المدى - الطاقة Range - Energy التي توضح مدى الجسيمات بالميكرون أو بالمليمتر كدالة في الطاقة MeV .

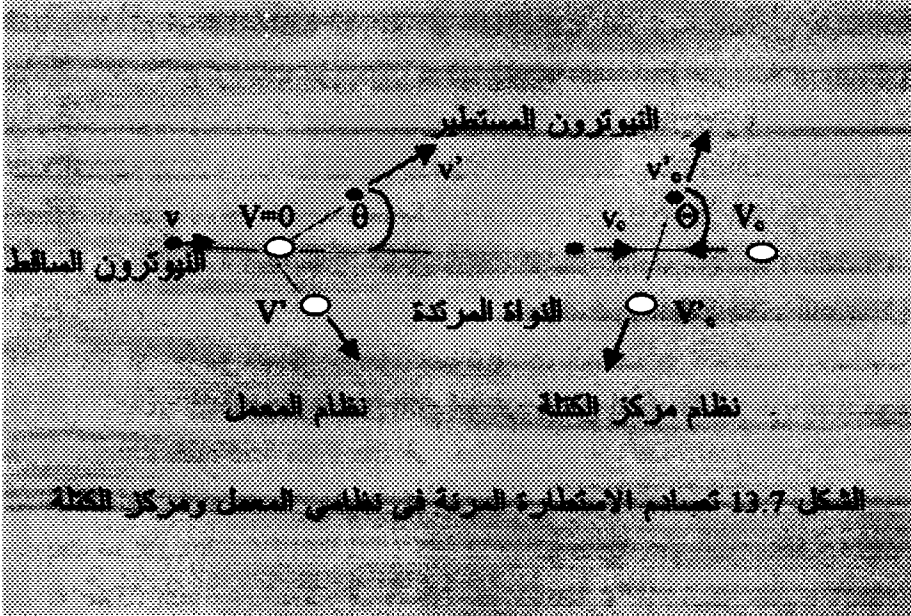
4-7 تصنيف النيوترونات :

التصنيفات المهمة للنيوترونات هي 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 المولد (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 السلمي لتوليد الطاقة النووية من أساسه، حيث إنه في وجود النيوترونات الفورية فقط والتي تجعل الثابت الزمني Time constant للنظام الهندسي النووي في مدى الميكروثانية، لما أمكن تصميم أنظمة تحكم للمفاعل تتلاءم مع هذا الزمن، ولكن بوجود النيوترونات المتأخرة جعلت الثابت الزمني للنظام الهندسي في مدى الثانية والتي أمكن لنظم التحكم من القدرة على السيطرة على تصرف النظام في هذا الزمن. في 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.

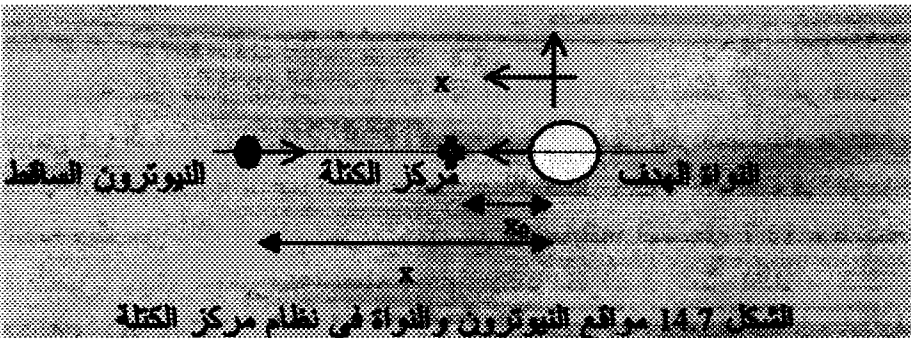
5-7 استطارة النيوترونات فى نظامي المعمل ومركز الكتلة :

عند اصطدام النيوترون بالنواة يمكننا تحليل هذا التفاعل من وجهتي 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 ببعيد التصادم والأخرى تمثل قبل التصادم. هذا وسنتبنى تحليلاتنا في نظام مركز الكتلة لكونها أسهل إلى حد ما.



وحتى يمكننا أن نحل مشكلة تصادم النيوترون مع النواة بالنسبة لنظام مركز الكتلة علينا أن نعرف بعض المصطلحات في ذلك النظام ، وذلك بمراجعة الشكل 14.7 التالي.



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:

$$Mx_0 = m(x-x_0) \quad (4.7)$$

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:

$$x_0 = \frac{x}{1+A} \quad (5.7)$$

كما أن سرعة مركز الكتلة نتحصل عليها بإجراء التفاضل للموقع x_0 بالنسبة للزمن:

$$V_{CM} = \frac{dx_0}{dt} = \frac{1}{1+A} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{1+A} v \quad (6.7)$$

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:

$$v_c = v - V_{CM} = \frac{1}{1+\frac{1}{A}} v \quad (7.7)$$

وتكون السرعة النسبية بالنسبة للنواة الهدف (نفترض أنها ساكنة فى المعمل):

$$V_c = 0 - V_{CM} = -\frac{1}{1+A} v \quad (8.7)$$

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:

$$m v_c + M V_c = \text{الزخم الكلى}$$

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 :

$$m v_c + M V_c = \frac{mM}{m+M} v - \frac{mM}{m+M} v = 0$$

المثال السابق أوضح أن الزخم الكلى قبل التصادم فى نظام مركز الكتلة يساوى صفرًا، واستنادًا على قانون بقاء الزخم Conservation of Momentum

فإن الزخم الكلي بعد التصادم يجب أن يبقى صفرًا. النتيجة المهمة التي تتبع هنا هو أنه في التصادم المرن في نظام مركز الكتلة، فإن الجسمين المتصادمين بعد التصادم يسيران باتجاهين متعاكسين وبنفس سرعتيهما قبل التصادم. لهذا كله فإن تحليلاتنا في 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 مكتملة لها. الجدول التالي يبين ملخصاً لما ذكر أعلاه:

الجدول 2.7 السرعات والزوايا في نظامي مركز الكتلة والمعمل للاستطارة المرنة

نظام مركز الكتلة		نظام المعمل		التمييز
قبل التصادم	بعد التصادم	قبل التصادم	بعد التصادم	
v_c	v_c	v'	v	سرعة النيوترون
V_c	V_c	V'	$V=0$	سرعة النواة
Θ		θ		زاوية ارتداد النيوترون
$180-\Theta$		ϕ		زاوية ارتداد النواة
ثلاثة v_c, V_c, Θ		خمس V, v', V', θ, ϕ		عدد المتغيرات

من الجدول نلاحظ أنه في التصادم المرن بالنسبة لنظام المعمل سنتعامل مع ثلاث سرعات v, v', V' و زاويتين θ, ϕ . في حين أنه في نظام مركز الكتلة ينخفض التعامل إلى سرعتين v_c, V_c وزاوية واحدة فقط Θ .

تحليلات الطاقة :

في نظام المعمل ، فإن الطاقة الحركية للجسيم الساقط ، في حالة الاستطارة المرنة، تساوي الطاقة الكلية، أي أن؛

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (9.7)$$

ولكن فى نظام مركز الكتلة، فإن الطاقة الكلية، هى حاصل جمع كل من طاقة الجسيم وطاقة الهدف، بمعنى؛

$$E_c = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} M V_c^2 \quad (10.7)$$

وبالتعويض بقيمتى كل من V_c ، v_c ، وذلك حسب المعادلتين (7.7) و(8.7) على التوالى ، مع استخدام $A=M/m$ ، نجد أن:

$$E_c = \frac{1}{2} \mu v^2 \quad (11.7)$$

حيث إن μ تسمى الكتلة المقلصة Reduced Mass وتعطى بالمعادلة التالية:

$$\mu = \frac{mM}{m + M} \quad (12.7)$$

بمقارنة المعادلتين (9.7) و (11.7) نجد أن:

$$E_c = \frac{A}{1 + A} E \quad (13.7)$$

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، وبالتالي فإن هذا الجزء من الطاقة غير متوفر لإثارة النواة ومن ثم فهو غير مهم بالنسبة للتفاعل. يمكن حساب هذه الطاقة والخاصة بحركة مركز الكتلة كما يلى:

$$E_{c.m.} = E - E_c = \frac{1}{2} (m - \mu) v^2 = \frac{1}{2} \zeta v^2 \quad (14.7)$$

مثال 3.7

ما هي الكتل الفعالة 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 الفعالة هي: m ، و $\mu = \frac{mM}{m+M}$ و $\zeta = (m - \mu) = \frac{m^2}{m+M}$.

كما يمكننا استنتاج أن:

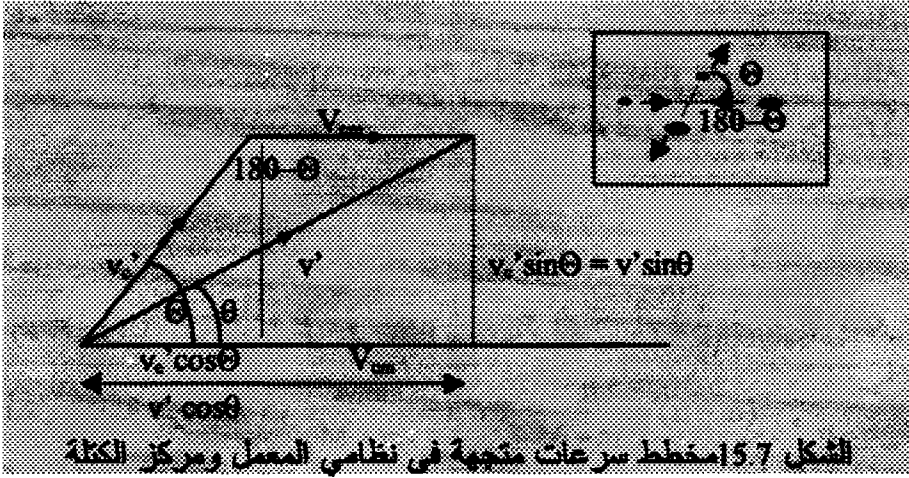
$$\frac{E}{E} = 1, \quad \frac{E_c}{E} = \frac{M}{m+M}, \quad \frac{E_{c.m.}}{E} = \frac{m}{m+M}$$

الفرق في الطاقة $(E-E_c)$ الذي أوردناه سابقا يبين أنه في حالة التفاعلات الماصة للطاقة (Endoergic) والتي تتميز بأن قيمة $Q=Ec$ تكون سالبة فإن الطاقة اللازمة لبدء التفاعل (Threshold Energy) $E=Eth$ أكبر من Q

$$\text{بالقدر } r = \frac{E_{th}}{Q} = \frac{m+M}{M} = \frac{1+A}{A}$$

علاقة طاقتي النيوترون قبل وبعد التصادم:

يرسم مخطوط المتجهات للسرعات كما هو مبين بالشكل 15.7، حيث تمثل θ زاوية ارتداد النيوترون في المعمل والزاوية Θ تمثل زاوية ارتداد النيوترون في نظام مركز الكتلة، كما أن v' تمثل سرعة النيوترون بعد التصادم في نظام المعمل، في حين أن v'_c تمثل سرعة النيوترون بعد التصادم في نظام مركز الكتلة، و V_{cm} تمثل سرعة مركز الكتلة.



من خلال الشكل نلاحظ أنه في الاتجاه العمودي يمكننا القول بأن:

$$v' \sin \theta = v_c' \sin \Theta \quad (15.7)$$

وفي الاتجاه الأفقي فإن:

$$v' \cos \theta = v_c' \cos \Theta + V_{cm} \quad (16.7)$$

بقسمة المعادلتين واعتبار أن $V_{cm}/v_c' = m/M = 1/A$ فيمكننا استنتاج العلاقة بين زاوية الارتداد في نظام المعمل ونظيرتها في نظام مركز الكتلة كما يأتي:

$$\tan \theta = \frac{\sin \Theta}{\cos \Theta + \frac{1}{A}} \quad (17.7)$$

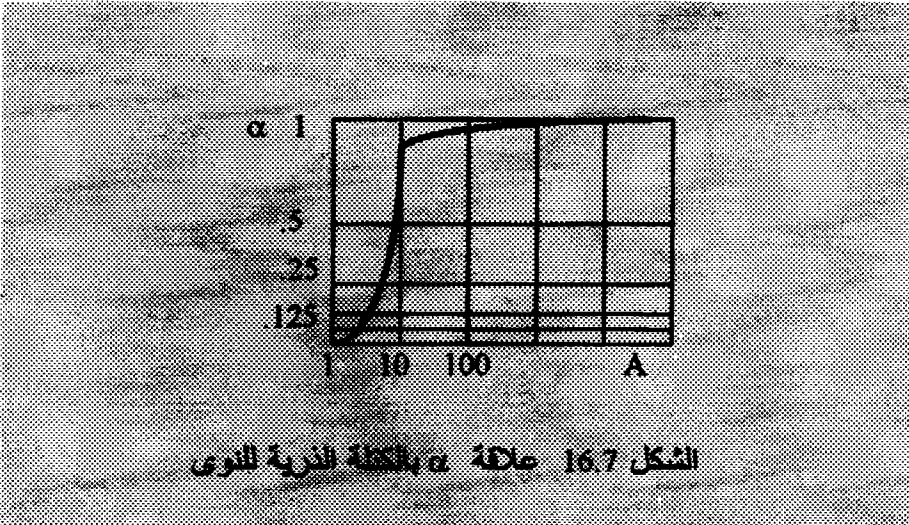
وبالرجوع إلى الشكل 15.7 وباستخدام قانون جيب التمام فيمكننا القول بأن:

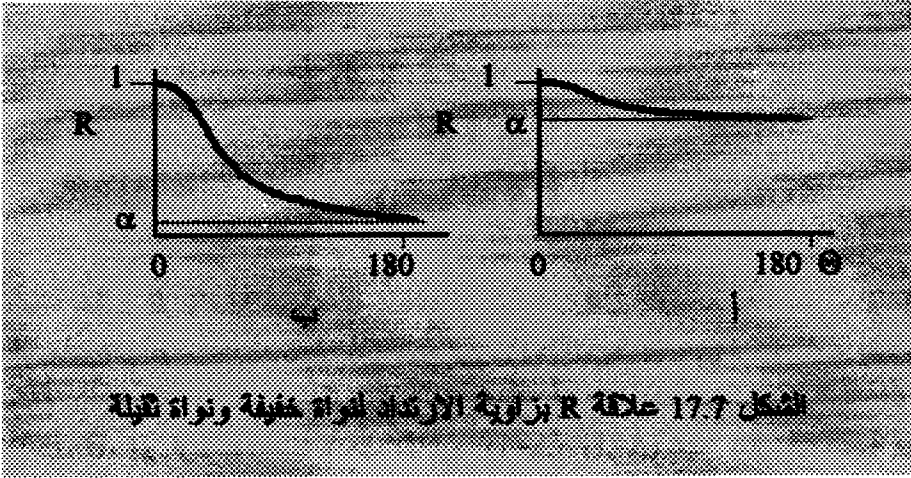
$$v'^2 = v_c'^2 + V_{cm}^2 - 2 v_c' V_{cm} \cos(180 - \Theta) \quad (18.7)$$

باستخدام المعادلتين 7.7 و 8.7 وباعتبار أن $v_c = v_c'$ في حالة التصادم المرن ،
وباعتبار أن $\cos(180-\Theta) = -\cos\Theta$ فيمكننا كتابة ما يلي:

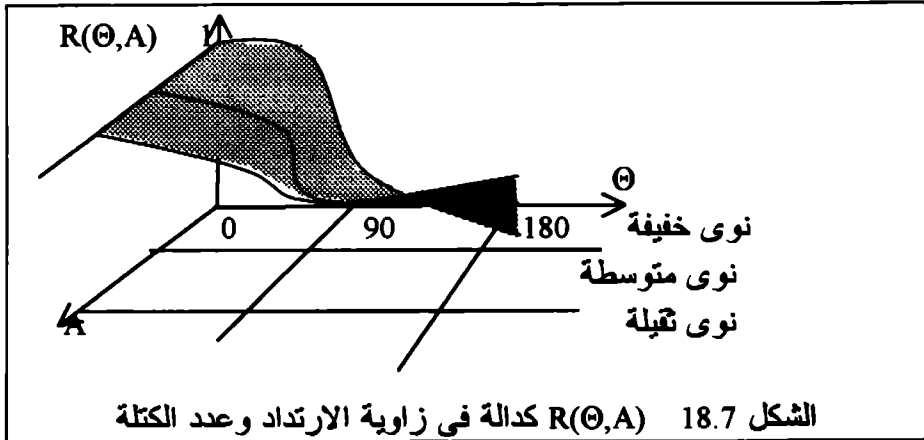
$$\frac{v'^2}{v^2} = \frac{E'}{E} = R(A, \Theta) = \frac{A^2 + 2A \cos\Theta + 1}{(1 + A)^2} \quad (19.7)$$

حيث تمثل R النسبة بين طاقتي النيوترون بعد وقبل التصادم. ففي حالة التصادم الخاطف حيث $\Theta=0$ فإن النيوترون يحتفظ بطاقته أى أن $R=1$ ، فى حين أن النيوترون المرتد يكون فى أننى 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 صفراً 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.





كما يمكننا رسم $R(\Theta, A)$ في ثلاثة أبعاد، والذي يبين لنا كيف تتغير النسبة بتغير كل من زاوية الارتداد و ثقل النواة. الشكل 18.7 يوضح ذلك وهو مستوى يشبه علما يرفرف.



وعند قيم عالية للوزن الذري ($A > 50$)، فإن α يمكن كتابتها كما يلي

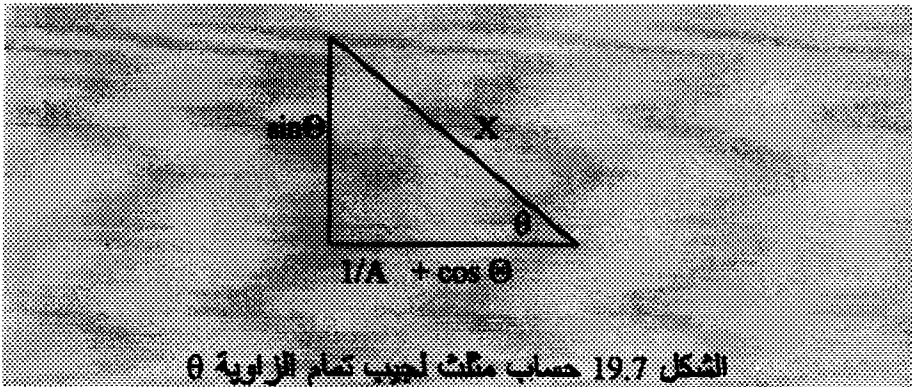
$$\alpha = 1 - \frac{4}{A} \quad (20.7)$$

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، في حين إن، الاستطارة غير المرنة من قبل النوى المتوسطة والثقيلة يكون مهما للنيوترونات ذات الطاقات الأعلى من 1 MeV ، 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 الانشطاري 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



من المثلث يمكننا الاستدلال على $\cos\theta$ بما يلي:

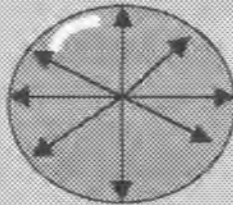
$$\cos\theta = \frac{1 + A \cos\Theta}{\sqrt{1 + 2A \cos\Theta + A^2}} \quad (21.7)$$

وحيث إن الاستطارة في نظام مركز الكتلة تعد متماثلة كرويا Isotropic فيمكننا حساب متوسط جيب تمام الزاوية θ وهي دالة في Θ حسب المعادلة 21.7 وذلك بالتكامل على الزاوية المجسمة Ω Solid angle في نظام مركز الكتلة، أى أن؛

$$\overline{\cos\theta} = \mu = \frac{\int \cos\theta d\Omega}{\int d\Omega} \quad (22.7)$$

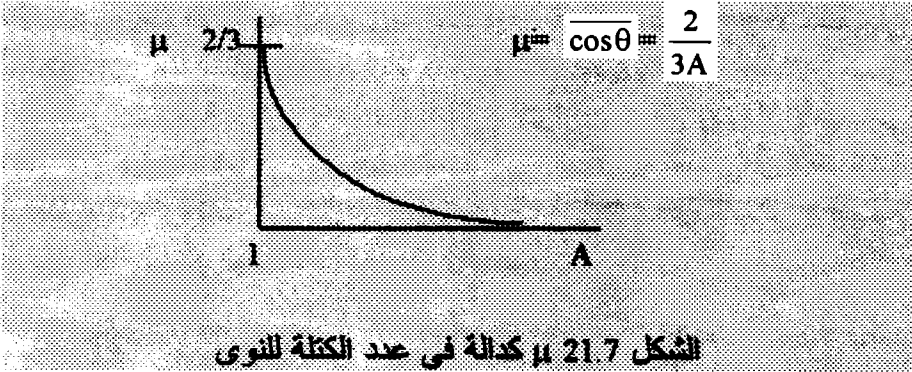
$$\overline{\cos\theta} = \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \cos\theta 2\pi \sin\Theta d\Theta \quad (23.7)$$

وبالتعويض عن $\cos\theta$ بالمعادلة 21.7 وإجراء التكامل بالتعبير عن $\cos\Theta=X$ نجد أن $\mu=2/3A$ ، وفي حالة النوى الثقيلة فإن $\mu=0$ ، 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.



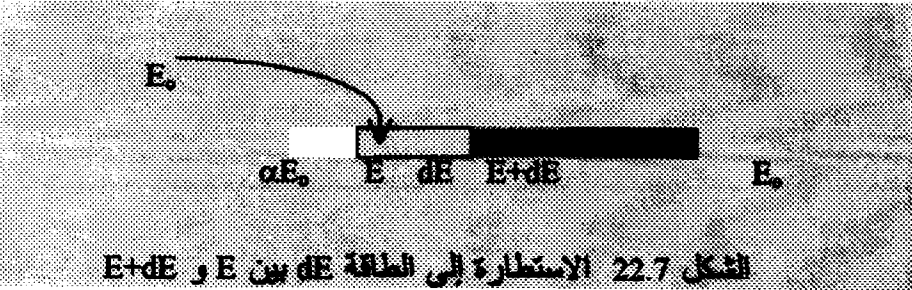
الشكل 20.7 الاستطارة المتماثلة كرويا

كما أن الاستطارة بالنسبة للنوى الخفيفة تتميز بأنها أمامية ، أى أن؛ معظم النيوترونات تستطير في الاتجاه الأمامى (الشكل 21.7).



احتمالية الاستطارة Scattering Probability :

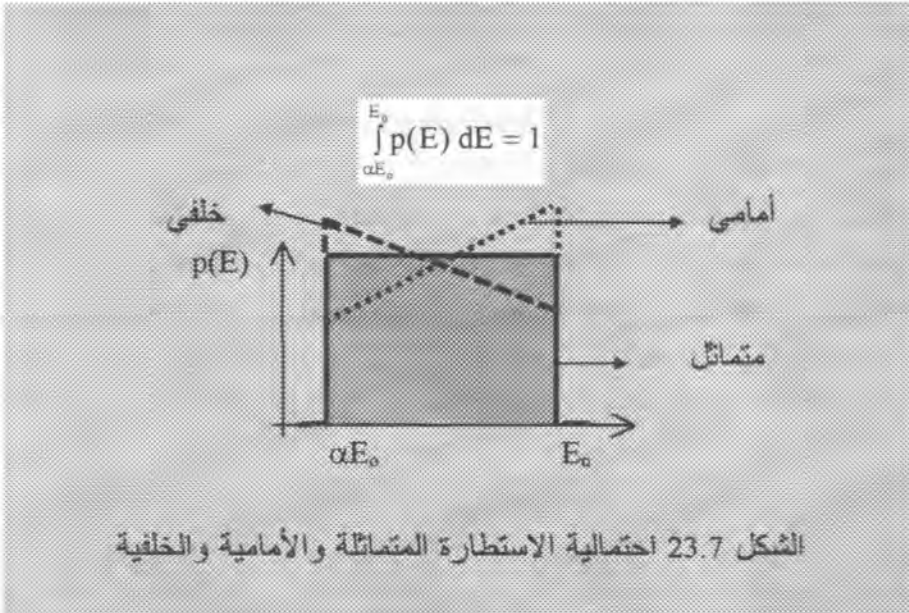
لنفترض أن هناك نيوترون بطاقة E_0 ونريد إيجاد الاحتمالية PdE بأن النيوترون بعد اصطدام واحد فقط ستكون له طاقة بين E و $E+dE$ ، أنظر الشكل 22.7 ، يمكننا فعل ذلك باعتبار أن طاقة النيوترون بعد التصادم ستكون محصورة بين القيمة القصوى E_0 في حالة التصادم الخاطف والقيمة الدنيا αE_0 في حالة التصادم المباشر، أى أن طاقة النيوترون ستكون فى المدى $(1-\alpha) E_0$.



إذا يمكننا تعريف الاحتمالية للاستطارة المتماثلة isotropic scattering لنيوترون بطاقة E_0 إلى dE كما يلي:

$$p \, dE = \frac{dE}{(1 - \alpha)E_0} \quad (24.7)$$

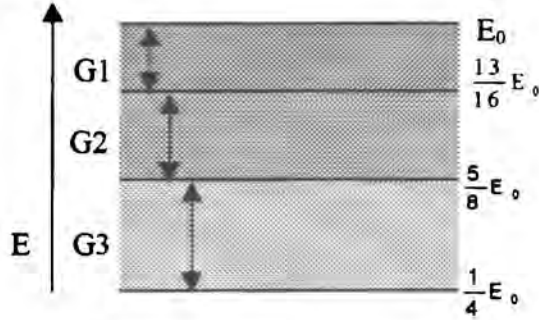
وأن تكامل هذه الدالة بين E_0 و αE_0 يساوى 1، أى أن؛ النيوترون لا يبد وأن يستطير فى ذلك المدى (احتمالية الاستطارة تساوى 100%). هذا وتعنى الاستطارة الأمامية، بأن احتمالية استطارة النيوترونات فى الاتجاه الأمامى أعلى من غيرها، كما أن احتمالية الاستطارة الخلفية تعنى أن احتمالية استطارة النيوترونات إلى الخلف أعلى من غيرها. الشكل التالى يوضح الثلاث احتماليات (المتماثلة، الأمامية، والخلفية).



مثال 4.7

نيوترون بطاقة E_0 استطار تماثلًا من قبل نواة لها قيمة $\alpha = 1/4$. اوجد احتمالية استطارة النيوترون إلى أحد من المجموعات G_1, G_2, G_3 بحيث

يكون مدى هذه المجموعات مقسماً بين الطاقة القصوى والطاقة الدنيا كما هو مبين بالشكل التالي:



الحل:

لحساب احتمالية الاستطارة المتماثلة للمجموعة G تستخدم المعادلة:

$$P_G = \int_{E_L}^{E_H} \frac{1}{(1-\alpha)E_0} dE = \frac{4}{3E_0} (E_H - E_L)$$

إذا الاحتماليات المطلوبة هي:

$$P_{G1} = \frac{4(1 - \frac{13}{16})E_0}{3E_0} = \frac{1}{4}$$

$$P_{G2} = \frac{4(\frac{13}{16} - \frac{10}{16})E_0}{3E_0} = \frac{1}{4}$$

$$P_{G3} = \frac{4(\frac{10}{16} - \frac{4}{16})E_0}{3E_0} = \frac{1}{2}$$

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 في حسابات تباطؤ النيوترونات لأنها كمية لا تعتمد على طاقة النيوترون. المعادلة التالية تبين تعريف ξ (في حالة الاستطارة المتماثلة):

$$\xi = \overline{\ln \frac{E_0}{E}} = \frac{\int_{\alpha E_0}^{E_0} \ln \frac{E_0}{E} p(E) dE}{\int_{\alpha E_0}^{E_0} p(E) dE} = \frac{\alpha \ln \alpha}{1 - \alpha} + 1 \quad (25.7)$$

المعادلة 25.7 تبين أنه في حالة النوى الثقيلة فإن $\xi=0$ ، في حين أن $\xi=1$ عندما $A=1$ ، أي أنه في حالة التصادم مع النوى الثقيلة فإن النيوترون فعليا لا يفقد طاقة ، في حين أنه يفقد كثيرا من طاقته عند التصادم مع الهيدروجين. وعندما تكون A أكبر من 10 يمكن التعبير عن ξ بالمعادلة التالية:

$$\xi \cong \frac{2}{A + \frac{2}{3}} , \quad A > 10 \quad (26.7)$$

كما أن متوسط طاقة النيوترون بعد كل اصطدام يمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$\bar{E} = \frac{\int_{\alpha E_0}^{E_0} E p(E) dE}{\int_{\alpha E_0}^{E_0} p(E) dE} = \frac{(1 + \alpha)}{2} E_0 \quad (27.7)$$

وبالتالي فإن تصادم النيوترونات مع الهيدروجين وبعد التعويض في المعادلة السابقة يتضح أنه في 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:

$$C = \frac{\ln \frac{E_H}{E_L}}{\xi(A)} \quad (28.7)$$

مثال 5.7

احسب عدد الاصطدامات التي يحتاجها نيوترون بطاقة ابتدائية قدرها 2MeV ليتحول إلى نيوترون حرارى طاقته 0.025 eV. وذلك مع الهيدروجين والكربون-12 واليورانيوم-238

الحل:

حيث إن النيوترون ستحدث له تصادمات لتحول طاقته من 2MeV إلى 0.025 eV. وبملاحظة أن :

$$\ln \frac{E_0}{E} = \ln \frac{2 \times 10^6}{.025} = 18.2$$

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_1H	1	0	1	18
$^{12}_6\text{C}$	12	0.716	0.158	115
$^{238}_{92}\text{U}$	238	0.983	.0085	2141

قدرة التباطؤ slowing power ($\xi\Sigma_s$) :

إن ξ تعد مؤشر معقول على تَهْدئة النيوترونات ولكن ليست مثالية لأنه يجب الأخذ في الحسبان اعتبارات كثافة الوسط الذي سيتحرك فيه النيوترون وأيضا احتمالية الاستطارة في 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 سنتيمتر من رحلة النيوترون ، والتي تكون لها قيمة عددية عالية نسبيا بالنسبة للمهدىء الجيد.

نسبة التَهْدئة moderating ratio ($\xi\Sigma_s/\Sigma_a$) :

في القرار عن جدوى الوسط لتَهْدئة النيوترونات يجب اعتبار مدى امتصاص الوسط للنيوترونات، وبالتالي 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 التَهْدئة بنسبة التَهْدئة ويعبر عنها بالمقدار $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$. الجدول التالى مدون به قيم قدرة التباطؤ ونسبة التَهْدئة لعدد من المهدئات.

الجدول 3.7 قدرة التَهْدئة 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 هي أعلاهم بالنسبة للماء الخفيف إلا أنه وبالأخذ في الاعتبار قدرة امتصاص الوسط للنيوترونات فإن الماء الخفيف يعتبر أسوأهم لأن مقطعته المستعرض لامتصاص النيوترونات له قيمة عالية جدا مقارنة بالأوساط الأخرى، في حين أن الماء الثقيل يعد أفضلهم كمهدىء وذلك للقيمة العالية لنسبة التهدئة الخاصة به.

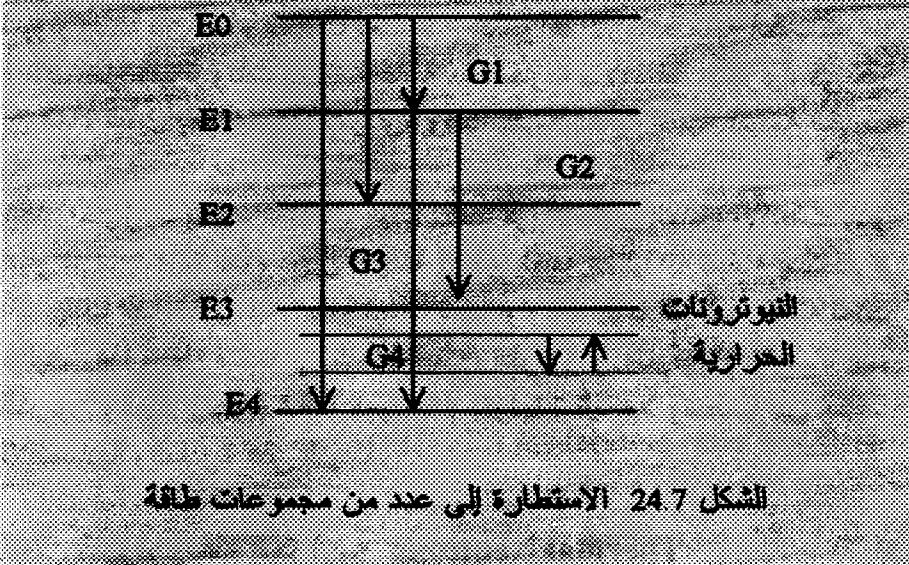
وعند اختيار المهدىء المناسب يجب الأخذ في الاعتبار العامل الاقتصادي. فبالرغم من كفاءة الماء الثقيل للتهدئة إلا أن الكلفة العالية له تجعله يُستخدم في التطبيقات التي تكون فيه الكلفة ليست ذات أولوية. أيضا البريليوم كلفته تعتبر عالية. هذا يجعل استخدام الماء الخفيف والكربون و البارفين (خليطاً بين الكربون والهيدروجين) شائعاً كمهدئات لكونها تمثل حلا وسطاً 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 يمكن النيوترونات السريعة من تخفيض سرعاتها نتيجة التصادم مع الوسط المهدىء حتى تصبح طاقة النيوترونات في حالة اتزان مع طاقة ذرات أو جزيئات الوسط التي تتحرك فيه وهي الطاقة الضئيلة التي 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 طاقت النيوترونات من خلال عدد من الاستطارات لمجموعات مختلفة من الطاقت. يلاحظ من الشكل أن الاستطارة تكون سفلية في مدى الطاقت العليا، في حين نرى أن الاستطارة في مدى الطاقت الدنيا (الحرارية) يمكن أن تكون استطارة سفلية أو استطارة علوية.

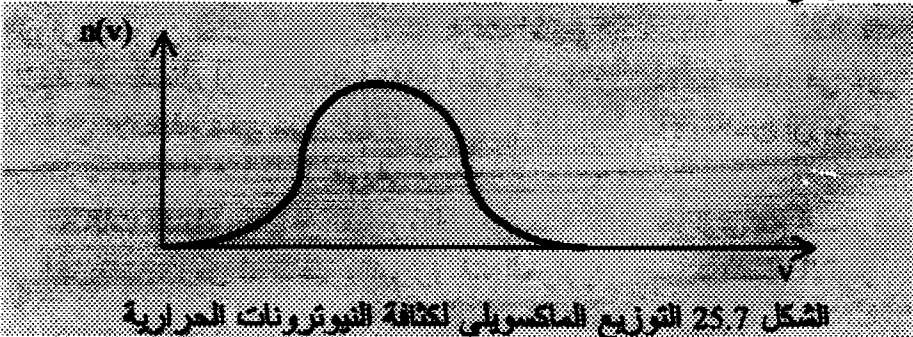
في الطاقت الدنيا، يقال إن النيوترونات في حالة اتزان حراري مع الذرات أو الجزيئات ، ومن ثم تدعى بالنيوترونات الحرارية. عند ذلك الاتزان

الحرارى فإن النيوترونات لها توزيع ماكسويلى بالنسبة لسرعاتها حسب المعادلة التالية:



$$n(v)dv = 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}} dv \quad (29.7)$$

حيث إن $n(v)dv$ تمثل عدد النيوترونات لكل وحدة حجم بسرعات بين v و dv ، كما أن K تمثل ثابت بولتزمان يساوى $1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/K}^\circ$ ، و T تمثل درجة الحرارة المطلقة. المعادلة 29.7 تبين بأنه عندما $v=0$ وكذلك عندما $v=\infty$ فإن $n(v)=0$ ، وهذا ما يوضحه الشكل 25.7 الممثل للتوزيع الماكسويلي المعرف بتلك المعادلة .



الشكل 25.7 التوزيع الماكسويلي لكثافة النيوترونات الحرارية

لإيجاد السرعة الأكثر احتمالاً v_0 ؛ أي السرعة الشائعة بين أغلبية النيوترونات، فإنه يمكن الحصول عليها باعتبار أن تلك السرعة تقابل قمة المنحنى الميّن بالشكل والتي تعني أن $dn/dv = 0$. بأخذ تفاضل المعادلة 29.7 وتسويتها بالصفر فيمكن إيجاد السرعة المطلوبة والتي تعطى بالمعادلة التالية:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2KT}{m}} \quad (30.7)$$

وكذلك يمكن استنتاج أن الطاقة المناظرة لهذه السرعة هي:

$$E_0 = KT \quad (31.7)$$

وباعتبار أن النيوترون له كتلة تساوي 1.67547×10^{-24} gm ، فإنه يمكن حساب السرعة بوحدة المتر لكل ثانية من خلال المعادلة التالية حيث يعوض بدرجة الحرارة بالوحدة المطلقة $[C^0 + 273]$:

$$v_0 = 128\sqrt{T} \left[\frac{m}{sec} \right] \quad (32.7)$$

وبالتالي فإنه عند درجة حرارة الغرفة ($20 C^0$) يمكن حساب السرعة والطاقة الأكثر احتمالاً للنيوترونات الحرارية وهما؛ $v_0 \sim 2200$ m/sec و $E_0 \sim 0.025$ eV .

كما يمكن حساب السرعة المتوسطة من خلال المعادلة التالية:

$$\bar{v} = \frac{\int vn(v)dv}{\int n(v)dv} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_0 = 1.1284 v_0 \quad (33.7)$$

أيضا يمكن استنتاج التوزيع الماكسويلي للنيوترونات الحرارية بدلالة الطاقة بدلا من السرعة ، وهو ما يستدل به من المعادلة التالية:

$$n(E)dE = \frac{2\pi n}{(\pi KT)^{3/2}} e^{-\frac{E}{KT}} \sqrt{E} dE \quad (34.7)$$

ومن ثم يمكن حساب الطاقة المتوسطة من خلال المعادلة التالية:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{3}{2} KT = 1.5 E_0 \quad (35.7)$$

حيث إن v_{rms} تدعى جذر متوسط مربع السرعة root mean square speed

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_0 \quad (36.7)$$

8-7 ملخص :

في هذا الفصل، تم تناول النيوترون بشئ من الدراسة، فقد تم استعراض ماهيته، حيث اتضح أنه يتكون في بنيته من ثلاثة كواركات. كما أن هناك العديد من التفاعلات التي تنتجها ولعل أهم مصدر لإنتاجه يتمثل في استخدام المفاعلات النووية. وحيث إن النيوترون متعادل لا يحمل شحنة، فإنه لا يمكن الكشف عنه مباشرة ولكن عن طريق مادة محولة، هذا وقد تم تعديل طرق الكشف عن النيوترونات. وأخيراً، تم استعراض تصنيف النيوترونات من جهتي نظر، أحدهما يتمثل في التصنيف من حيث الطاقة وهذا مهم جداً في حسابات المفاعلات. والتصنيف الثاني يتعلق بفورية وتأخر صدور النيوترونات من عملية الانشطار، وهذا التصنيف مهم جداً في دراسة حركية المفاعلات لدلالته على الثابت الزمني Time constant لمنظومة الانشطار.

في هذا الفصل، أيضاً تم تناول موضوع استطارة النيوترونات بشئ من التحليل الرياضي الذي مكن من استنتاج معادلة مهمة لها علاقة بتحديد طاقة النيوترونات بعد التصادم كدالة في زاوية الارتداد وعدد كتلة النواة الهدف. أيضاً تم التعرض لمفهوم الاستطارة المتماثلة وكذلك لكل من الاستطارة الأمامية والخلفية. وحيث إن احتمالية الاستطارة الممتدة بالمقطع المستعرض للاستطارة σ ليست كافية لتقييم مدى كفاءة العنصر كمهدىء، لذا كان من الضروري تعريف ξ متوسط لوغاريتم فقد الطاقة لكل اصطدام، وكذلك

قدرة التباطؤ $\xi\Sigma_s$ للأخذ في الحسبان الكثافة الذرية للوسط المسبب للاستطارة، وأخيرًا كان مهم جدًا لغرض التقييم النهائي 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 الماكسويلي 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 $v_0 = 2.2 \times 10^5$ cm/sec و $\sigma_0 = 3840$ b لتفاعل البورون . اثبت أن $\sigma = \sigma_0 \sqrt{\frac{0.025}{E}}$ ، حيث تعطى E بوحدة eV ، و اوجد احتمالية التفاعل لنيوترون ساقط بطاقة 10 KeV .

2.7 - إذا كانت حساسية كاشف BF_3 للنيوترونات البطيئة ($E = 0.025$ eV) تساوى 81% ، وكانت كفاية الكاشف 22% ، وكان حجمه الحساس 58 cm³ ، احسب مساحة المقطع المستعرض للكاشف .
[الحل : 3.82 cm²]

3.7 - إذا استخدم الكاشف فى السؤال السابق كغرفة تأين بحيث وجد أن التيار الكهربى المقاس والنتاج 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 هي 4.1×10^{18} atom.cm⁻³ بحجم حساس 58 cm³ ، فما حساسية الكاشف؟ ثم إذا أستغل هذا الكاشف

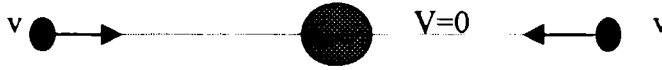
كغرفة تأين في مفاعل حجمه $1m^3$ ، ووجد ان التيار الكهربى المقاس هو $0.1A$ ، اوجد قيمة فيض النيوترونات . ثم إذا علمت أن قدرة المفاعل هي $P=C\phi V$ ، حيث إن P تمثل القدرة (MW) ، و ϕ هو الفيض النيوترونى و $C=0.649 \times 10^{-11} J.cm^{-1}$ لكل انشطار، اوجد قدرة المفاعل.

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 نظامى المعمل و مركز الكتلة للتصادم المرن المبين بالشكل التالى.



7.7 - احسب الزخم الكلى والطاقة الكلية فى نظامى 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.

، $1\text{amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{Kg}$ ، $1.008665 \text{amu} =$ كتلة النيوترون)
 ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{Joule}$
 (الحل : $v = 9.21 \times 10^5 \text{ m/sec}$)

10.7 - اثبت أن $\mu = \frac{2}{3} A$ ، $\overline{\cos \theta} =$

11.7 - اثبت أن $\xi = \frac{\alpha \ln \alpha}{1 - \alpha} + 1$.

(مساندة: إجعل $X = E/E_0$ فى المعادلة 25.7)

12.7 - بين أن المعادلة 25.7 يمكن كتابتها بالصيغة التالية:

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1}$$

13.7 - بين أنه يمكن التعبير عن طاقة النيوترون بعد التصادم بالمعادلة التالية:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1+\alpha}{2} + \frac{1-\alpha}{2} \cos \Theta$$

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 الماكسويلي 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 لامتناص النيوترونات σ_a
 - عرف المقطع المستعرض العينى لامتناص النيوترونات Σ_a

- عرف متوسط المسار الحر لامتنصاص النيوترونات λ_a

- ماذا تعنى قدرة التهتئة $M = \frac{\xi \Sigma_s}{\Sigma_a}$ (ناقش).

17.7 - حوصر نيوترون مستطيرًا بين نواتين لليورانيوم، وبالتالي 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 هي: $C = \frac{\ln \frac{E_0}{E_c}}{\xi}$ ، 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

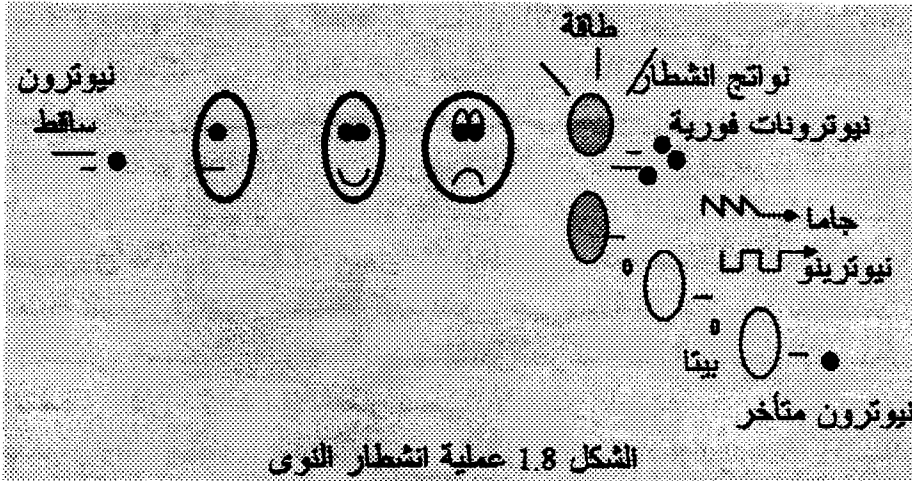
Nuclear Fission الانشطار النووي

- 1-8 نظرية الانشطار.
- 2-8 المقاطع المستعرضة للانشطار النووي.
- 3-8 نواتج الانشطار.
- 4-8 النيوترونات الفورية والمتأخرة.
- 5-8 الطاقة الناتجة من الانشطار.
- 6-8 دورة النيوترونات ومعامل التضاعف K .
- 7-8 ملخص.
- 8-8 مسائل.

1-8 نظرية الانشطار :Fission Theory

يحدث الانشطار في النوى لنظائر بعض العناصر الثقيلة مثل اليورانيوم والبلوتونيوم عند أسرها للنيوترونات. هذه النوى بالكاد تكون مستقرة ومن ثم فإن امتصاصها للنيوترون يضيف إليها طاقة تمكنها من الانشطار فوراً إلى جزئين متساويين تقريباً بطاقة مصاحبة أنياً قدرها حوالي 180 MeV، وكذلك عدد من النيوترونات (2.52 ليورانيوم-235، و 2.95 لبلوتونيوم-239). النيوترونات قد تكون فورية أو نيوترونات متأخرة التي تنتج في أحد مراحل انحلال نواتج الانشطار المسبوقة بإشعاع جسيمات بيتا. يصاحب عملية الانشطار إنتاج أشعة جاما وكذلك النيوتريينو في عملية مصاحبة لانحلال بيتا.

إذا، في المتوسط، تمكن نيوترون واحد ناتج من الانشطار من إحداث انشطار موالى، فإن تفاعلاً متسلسلاً ينشأ عن ذلك. أما إذا ما تمكن أكثر من نيوترون ناشئ من الانشطار من إحداث انشطارات تالية، فإن عدد النيوترونات وكذلك معدل الطاقة المولدة تتزايد أسياً. الشكل 1.8 يبين عملية انشطار أحد النوى الثقيلة.



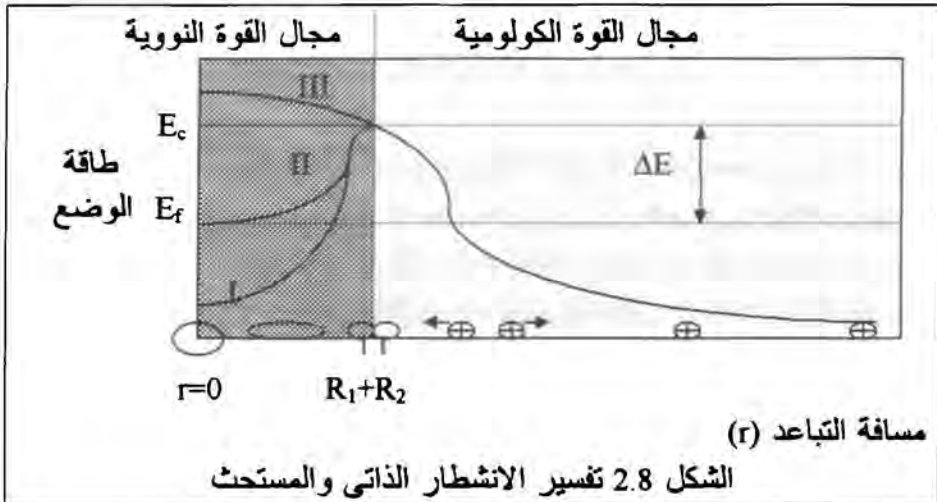
إن النواة في الذرة يمكن أن تتفاعل مع النيوترون الذى يمر بجوارها بطريقتين أساسيتين؛ إما باستطارته وبالتالي انحراف النيوترون عن مساره وفقدانه لجزء من طاقته الحركية، أو تقوم النواة بأسر النيوترون . لذا فللنواة تتأثر بعدة طرق؛ أهمها امتصاص النيوترون أو الانشطار. إن احتمالية استطارة النيوترون (Scattering) أو أسره (Capturing) تقاس بالمقاطع المستعرضة للاستطارة أو الأسر. كما أن المقطع المستعرض للأسر يمكن أن ينظوى 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، وفي 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 البطيء. 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 إليها 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، وأيضاً انشطار النوى الثقيلة بواسطة

النيوترونات البطيئة والسريعة. إن شكل قطرة السائل الممثلة للنواة تعتمد على التوازن بين قوى الشد السطحي ($A^{2/3}$) وقوة التنافر الكولومية ($\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$) فإذا أضيفت الطاقة إلى النواة (القطرة) في صورة طاقة إثارة بسبب أسرها لنيوترون بطيء، فإن تذبذبًا Oscillation ينشأ داخل القطرة. هذه التذبذبات تسعى لتسوية الشكل الكروي للنواة وتتحول إلى شكل اهليلجي (بيضاوي) Ellipsoid. الشد السطحي يسعى إلى إعادة الشكل إلى الشكل الأصلي الكروي، في حين أن طاقة الإثارة تسعى إلى تشويه الشكل أكثر. إذا كانت طاقة الإثارة كبيرة فإن القطرة ربما تأخذ شكل الدمبل (ثمرة الفول السوداني بحبتين)، ومن ثم فإن القوة الكولومية تأخذ دورها في فصل النوتونين إلى كرتيين بحيث تقوم قوة الشد السطحي لكل منهما بالحفاظ على الشكل الكروي ومن ثم تنجز مهمة الانشطار. أما إذا كانت طاقة الإثارة ضعيفة، فإن الشكل الاهليلجي قد يرجع إلى الشكل الكروي، وتحرر طاقة الإثارة في شكل أشعة جاما، ومن ثم يسمى الحدث بالأسر الإشعاعي والذي تشكل نسبة حدوثه حوالي 18% لنواة اليورانيوم-235. فيما يلي نوضح بالشكل آلية الانشطار الذاتي أو الانشطار بنيوترون سويح أو نيوترون بطيء.



الشكل يوضح أن تأثير مجال القوة الكولومية يبدأ من الحالة الحرجة المتمثلة في مساواة البعد بين النويتين الجديتين إلى $r=R_1+R_2$ كما هو موضح بالشكل وذلك يناظر طاقة وضع تساوى E_c . ومن تم ففى الجانب الأيسر للمنحنى هناك إجمالين؛ إما أكبر من E_f وهذا يتطلب طاقة لتسلق المنحنى وذلك يعنى انشطار مُحفز أو مستحث ، أما إذا ما كانت E_c أصغر من E_f فإن شكل المنحنى الإنسيابي يدل على انشطار ذاتى. وكما تم عرضه فى الفصل الخامس من هذا الكتاب بالمعادلة 20.5 والتي تعنى بطاقة إثارة النواة فسوف يعاد كتابتها هنا مضمنة مع معادلة الطاقة الإثارة المستتجة من نموذج قطرة السائل:

$$E_{\text{excit}} = E_c - E_f = KE_{\text{neutron}} + BE_{\text{neutron}} = .89A^{2/3} - .02 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \text{ MeV} \quad (1.8)$$

حيث A تمثل عدد الكتلة للنواة المركبة، و Z تمثل العدد الذرى، و E_f تسلوى حوالى 200 MeV بالنسبة لنواة U-235 ، كما أن E_c تمثل الطاقة الكولومية؛ أى أن:

$$E_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_1 + R_2} \quad (2.8)$$

بعض النوى التى يزيد عدد كتلتها A عن 100 فإن E_f أصغر من E_c بمقدار 50MeV ، ومن ثم يتطلب ذلك حصول النيوترون الساقط على طاقة حركية عالية لاجداث 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 لانشطار هذه النوى بطاقات منخفضة. أما بعض النوى الثقيلة التى يحكمها المنحنى III ، فإن E_f تكبر أو تساوى E_c ومن ثم يحدث بها انشطار ذاتى.

مثال 1-8

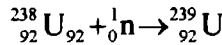
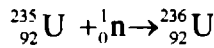
قدر الطاقة اللازمة للنيوترون لإحداث الانشطار في نواتي U-238 و U-235.

الحل:

باستخدام المعادلة 1-8:

$$E_{\text{excit}} = .89A^{2/3} - .02 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \text{ MeV}$$

معادلتى تكوين النواة المركبة للحالتين المطلوبتين هما:



وبتطبيق معادلة طاقة الإثارة على النواة المركبة، نجد ما يلي:

$$E_{\text{excit.}} = 6.9 \text{ MeV} \quad \text{U-236 بالنسبة لنواة}$$

$$E_{\text{excit.}} = 7.3 \text{ MeV} \quad \text{U-238 وبالنسبة لنواة}$$

باستخدام بيانات الملحق 1

فإن كتلة الإلكترونات في ذرة اليورانيوم هي:

$$92 \times 0.000549 = 0.050508 \text{ amu}$$

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:

$$BE = m({}^{235}\text{U}) + m({}^1_0\text{n}) - m({}^{236}\text{U})$$

$$B.E. = 235.043915 + 1.00866520 - 236.045637 = 0.00694 \text{ amu}$$

$$= 0.00694 \text{ amu} \times 931 \text{ MeV/amu} = 6.5 \text{ MeV} = BE({}^{236}\text{U}) - BE({}^{235}\text{U})$$

وبحساب طاقة ترابط النيوترون لنواة U-238 من المعادلة:

$$BE = m({}^{238}\text{U}) + m({}^1_0\text{n}) - m({}^{239}\text{U})$$

$$BE=238.05077+1.00866520-239.05430=0.00513 \text{ amu}$$

$$=0.00513 \text{ amu} \times 931 \text{ MeV/amu} = 4.8 \text{ MeV} = BE(^{239}\text{U}) - BE(^{238}\text{U})$$

مرة أخرى وباستخدام المعادلة 1-8 يمكن حساب مايلي:

الطاقة الحركية للنيوترون المسبب لانشطار نواة U-235 هي:

$$KE_{\text{neutron}} = E_{\text{excit}} - BE_{\text{neutron}} = 6.9 - 6.5 = 0.4 \text{ MeV}$$

و الطاقة الحركية للنيوترون المسبب لانشطار نواة U-238 هي:

$$KE_{\text{neutron}} = E_{\text{excit}} - BE_{\text{neutron}} = 7.3 - 4.8 = 2.5 \text{ MeV}$$

يلاحظ من الحسابات التقريبية أن نواة U-235 تتشطر بنيوترون بطيء مقارنة
بانشطار نواة U-238 بنيوترون سريع.

2-8 المقاطع المستعرضة للانشطار النووي

: Nuclear Fission Cross Section

لقد ورد في نموذج قطرة السائل أن الحد الفردي - الزوجي E_8 مهم في تمييز طاقة الترابط للنوى، حيث إن مساهمته ايجابية في حالة زوجية عدد النيوترونات وزوجية عدد البروتونات في نواة ما في حين أن مساهمته سلبية في حالة فردية كل من النيوترونات والبروتونات، وصفرية المساهمة في حالة فردية النيوترونات وزوجية البروتونات أو العكس. لذا فإن اليورانيوم-235 تحوى 92 بروتون و 143 نيوترون أقل استقراراً من نواة اليورانيوم-238 تحوى 92 بروتون و 146 نيوترون، وهذا يسهل انشطار النواة الأولى بنيوترون بطيء مقارنة بالأخرى التي تتشطر بنيوترون سريع كما ورد ذكره سابقاً. أيضاً النظرية تبين أن تحرير طاقة الانشطار أسهل في حالة العدد الفردي للنيوترونات مقارنة بالعدد الزوجي 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 لانشطارات 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 تتشطر وقد تشع أشعة جاما لتتحول إلى الحالة الأرضية لتلك النواة المركبة. وعليه فإن احتمالية التفاعلين تقاس بما يسمى المقاطع المستعرضة σ_f للأشعة الإشعاعية و σ_f للانشطارات. الجدول التالي يبين هذه المقاطع المجهرية مقاسة بالبارن لبعض العناصر وذلك لنيوترونات حرارية (بطيئة).

الجدول 2.8 المقاطع المستعرضة الحرارية لبعض العناصر

العنصر	σ_f (barn)	σ_c (barn)	σ_f / σ_c
^{235}U	577	101	0.18
اليورانيوم الطبيعي	4.18	3.5	0.84
^{239}Pu	742	286	0.39

يلاحظ أنه نظراً لصغر الوفرة الطبيعية بقدر 0.72% لنواة ^{235}U في اليورانيوم الطبيعي فإن المقطع المستعرض لانشطارات اليورانيوم الطبيعي يكون صغيراً كما هو موضح بالجدول. الخانة الأخيرة من الجدول تبين أن 18% يعتبر أسراً إشعاعياً بالنسبة لنواة اليورانيوم-235، ومن ثم فإن 82% تكون

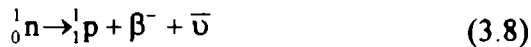
انشطارًا . هذا ويلاحظ أن الأسر الإشعاعي يشكل نسبة 39% بالنسبة للبلوتونيوم على الرغم من العلو النسبي للمقطع المستعرض لانشطار البلوتونيوم مقارنة باليورانيوم-235.

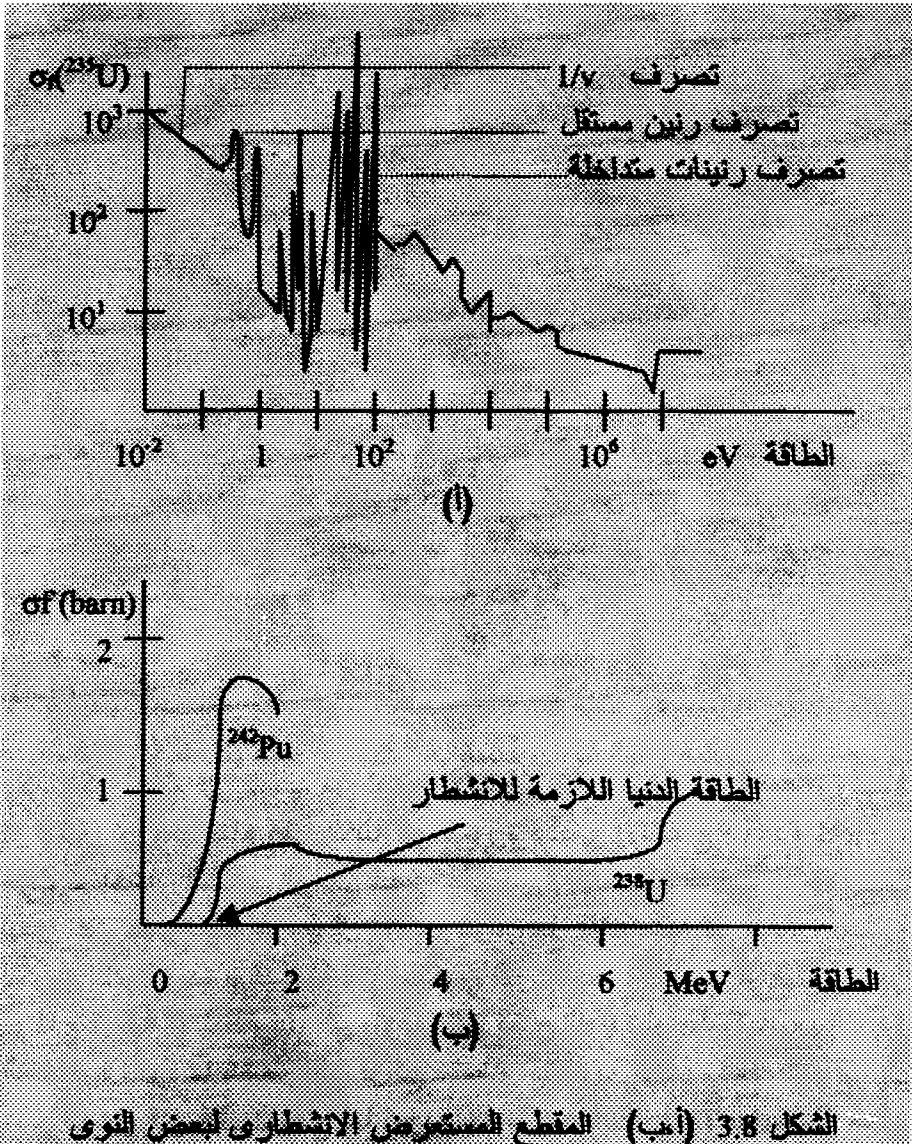
من كل النوى القابلة للانشطار فإن النوى ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu تحمل مقاطع مستعرضة عالية وكذلك أعمار نصفها كبيرة، مما يجعلها ذات أهمية في التطبيقات الكبرى للانشطار. وهي قد توجد طبيعيًا مثل ^{235}U أو يمكن إنتاجها اصطناعياً مثل ^{233}U , ^{239}Pu .

إن المقاطع المستعرضة للانشطار لها اعتماد ملحوظ على طاقة النيوترون الساقط ويمكن ملاحظة أربعة مظاهر لهذا الاعتماد، 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:

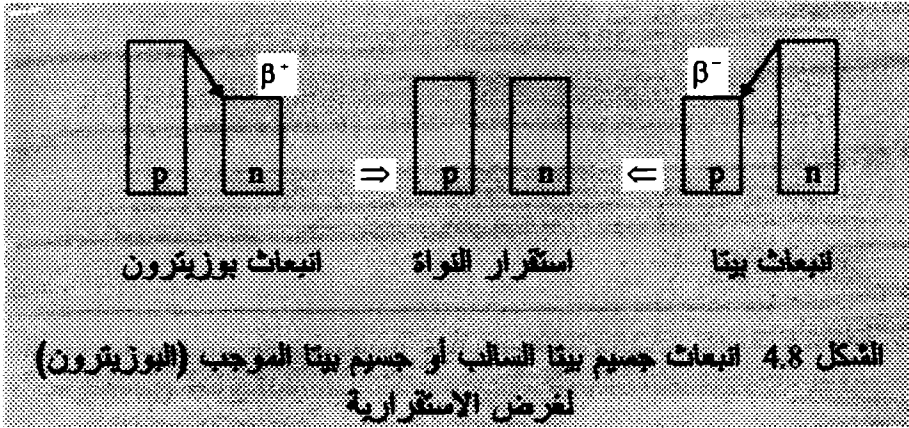
3-8 نواتج الانشطار Fission Products :

نواتج الانشطار هي تلك النوى الناتجة من انشطار النواة المركبة (مثلا ^{236}U) الناتجة من امتصاص النيوترون. إن نواة ^{236}U تحوي عدد 144 من النيوترونات وعدد 92 من البروتونات بنسبة $n/p=1.57$ ، في 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 في عدد النيوترونات مقارنة بعدد البروتونات، وبالتالي فهي غير مستقرة وتسعى إلى الاستقرار إما بانبعث نيوترون إذا كانت النواة الناتجة من الانشطار تحمل طاقة إثارة عالية، أو تشع جسيم β^- بتحول أحد النيوترونات إلى بروتون عبر التفاعل التالي:

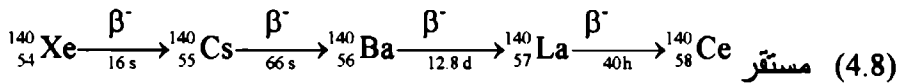




الشكل التالي يوضح انبعاث جسيمات بيتا السالبة أو جسيمات بيتا الموجبة (البوزيترون) بناءً على فائضية النيوترونات أو البروتونات في النوى.

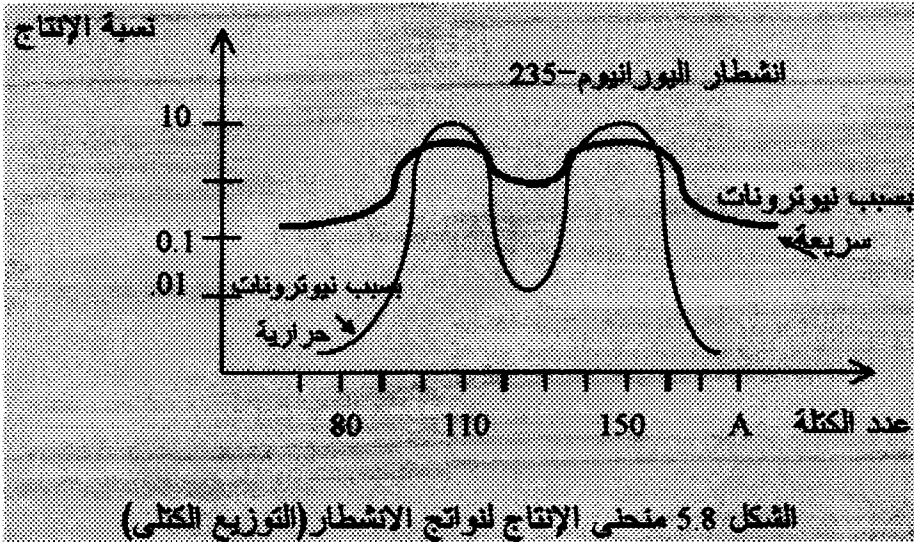


يوجد هناك أكثر من 60 شظية انشطار أى حوالى 30 زوجا من الشظايا. هذه الشظايا تتحلل إشعاعيا، حيث يوجد هناك أكثر من 60 سلسلة انحلال متضمنة ما يقارب من 200 نويدة. أحد أمثلة هذه السلاسل التى تنتهى بالعنصر المستقر السيزيوم Ce موضحة كما يلي.



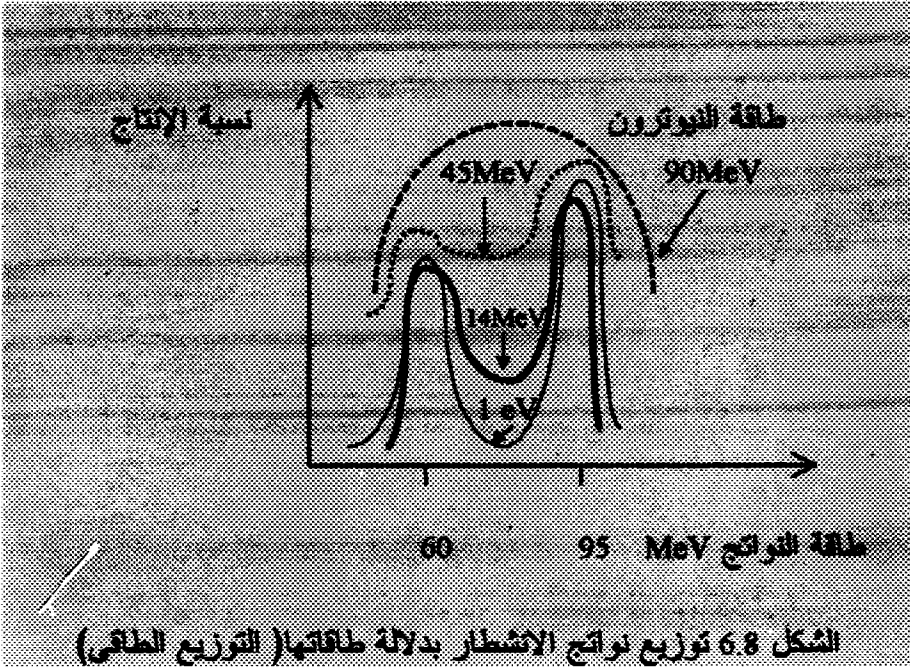
وكما ذكر أعلاه فإن العديد من نواتج الانشطار تنتج نتيجة تلك العملية، وقد تم توثيق توزيعها بناء على الكتلة فى صورة منحنى الإنتاج Yield Curve . حيث تم اختيار المحور الرأسى ليعبر على نسبة الإنتاج، والمحور الأفقى ليعبر عن عدد الكتلة A . يُمَثَل الإنتاج لنويدة ما الاحتمالية فى صورة نسبة لتكوين تلك النويدة أو السلسلة التى ستكون النويدة عضوا فيها. أو قد يعبر الإنتاج كنسبة الانشطارات التى تؤدى إلى إنتاج النويدة أو سلسلتها. إن النويدة المنشطرة نادراً ما تنشط 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 التدرج اللوغارىمى

يعد مناسباً للتعبير عن هذا التنوع. الشكل التالي يبين منحنى الإنتاج لنواتج (شظايا) الانشطار.

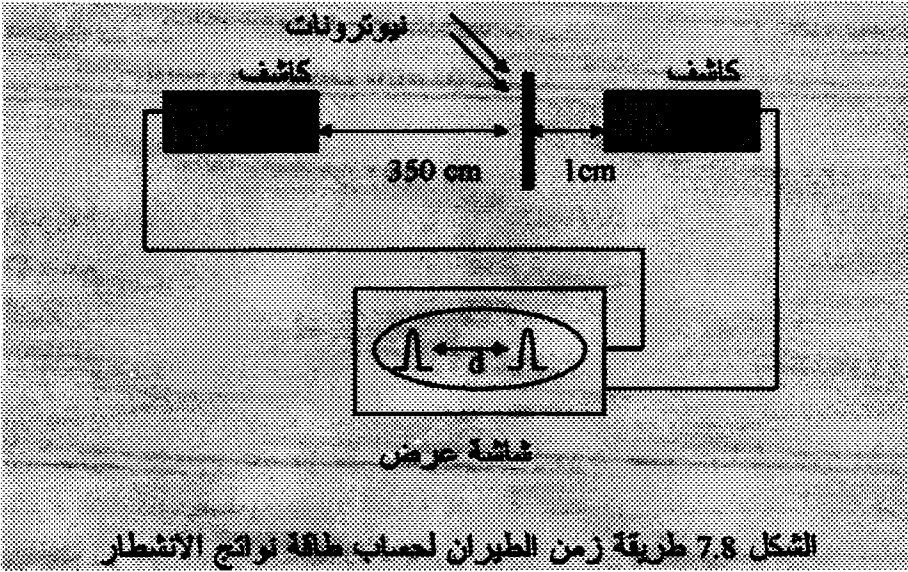


يلاحظ من الشكل أن القيم القصوى تناظر $A=95$ و $A=135$ ، وعليه فإن شكل منحنى الإنتاج في حالة النيوترونات الحرارية غير متمائل بحيث لا توجد نسبة احتمالية عالية لنواتج متساوية الكتلة، حيث يلاحظ أن الاحتمالية تساوي حوالي 0.01% في حين أنه في حالة زيادة الطاقة للنيوترون المسبب للانشطار، ترتفع الاحتمالية لإنتاج نويدات متساوية الكتلة إلى حوالي 1%، وذلك لنيوترونات بسرعة 14MeV، أي بتضاعف 100 مرة بالمقارنة بحالة النيوترونات الحرارية. يلاحظ أيضاً من الشكل أنه بزيادة طاقة النيوترون فإن القيم القصوى للمنحنى المناظر تقل، في حين أن الأطراف أو الأجنحة لذات الشكل ترتفع وذلك يعني بزيادة الاحتمالية في الأطراف (أي 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 التالي لانشطار النوى الثقيلة.



يلاحظ من الشكل أنه بزيادة الطاقة الحركية للنيوترون المسبب للانشطار، فإن احتمالية الانشطار الممتثل (إنتاج نويدتين متقاربتين فى الطاقة) تزداد، ويتضح ذلك جليا عندما تكون طاقة النيوترون حوالى 90MeV حيث تكون هناك قمة واحدة والتي 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 الوميضيين 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 .



هذا ويمكن حساب التوزيع الكتلي للنواتج بدلالة التوزيع الطاقى لها ، وذلك باستخدام قانون حفظ الزخم (كمية الحركة)، حيث يعتبر أن النواة المركبة ساكنة ومن ثم فإن الزخم الابتدائى يساوى صفرًا، وبُعِيد الانشطار فإن النويدتين الناتجتين من الانشطار تتحركان فى اتجاهين مضادين، وعليه فإن الزخمين متساويان وذلك حسب المعادلة التالية:

$$M_2 v_2 = M_1 v_1 \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{M_2}{M_1} \quad (5.8)$$

وباستخدام $E=Mv^2/2$ ، فيمكن استنتاج ما يلى:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{M_2}{M_1} \quad (6.8)$$

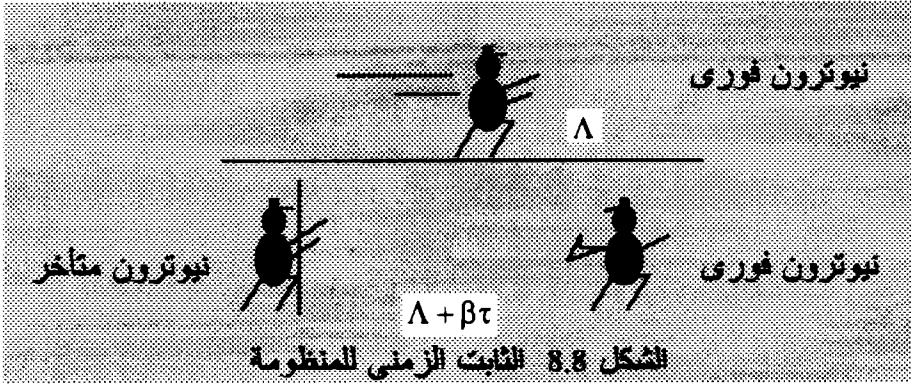
ومن ثم فبمجرد تعيين التوزيع الطاقى يمكن تعيين التوزيع الكتلى إستنادًا على المعادلة 6.8 .

4-8 النيوترونات الفورية والمتأخرة : Prompt and Delayed Neutrons

يُمكن تصنيف النيوترونات من وجهة نظر الطاقة فهناك مثلا النيوترونات السريعة والبطيئة، والتي يترتب عليها نوعية الانشطار النووي فهناك الانشطار السريع وأيضا الانشطار الحرارى. أيضا، يمكن تصنيف النيوترونات من الناحية الزمنية فهناك النيوترونات الفورية التي تنتج فور الانشطار، وهناك النيوترونات المتأخرة التي تنتج بعد انحلالات متعددة لنواتج الانشطار.

إن تصنيف النيوترونات من حيث فوريتها أو تأخرها لعب دورا كبيرا فى نشوء التطبيقات السلمية لتوليد الطاقة النووية. ذلك لأن هناك ما يسمى بالثابت الزمنى Time Constant لمنظومة ما والذي 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 الملى 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 عشر 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 مكن العلماء من تصميم المفاعلات النووية لتوليد الطاقة ومن ثم التطبيق السلمى لمجال الهندسة النووية.

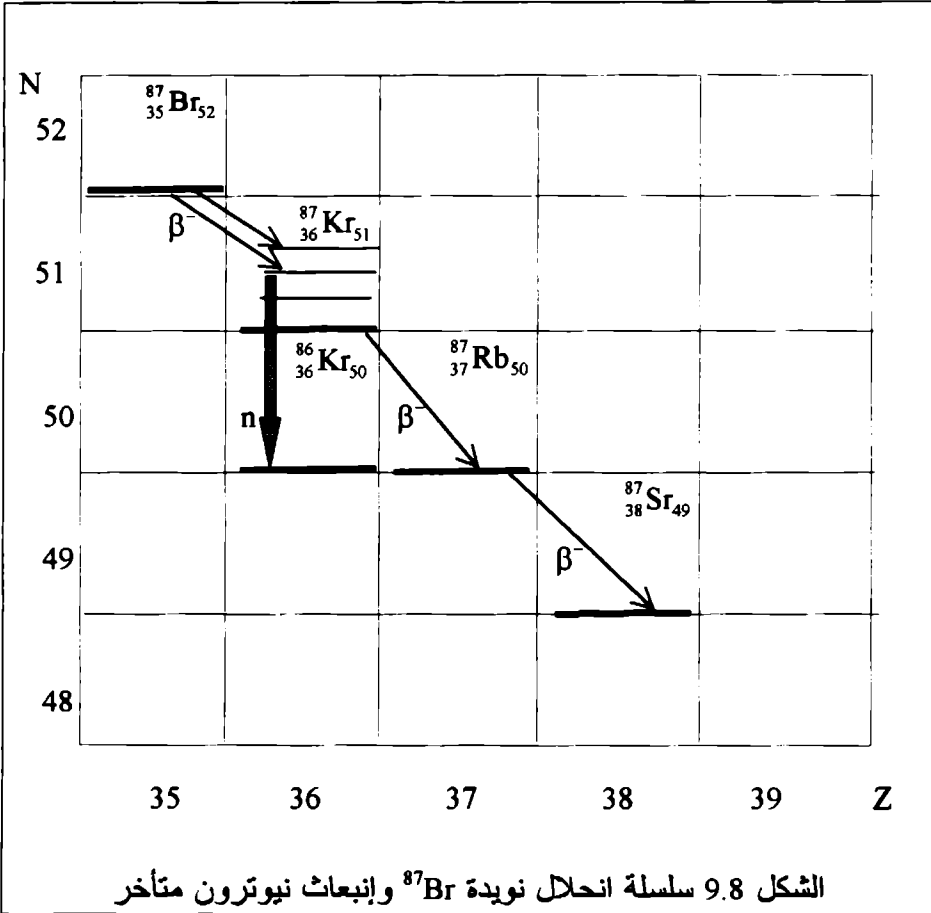
الشكل التالي يعبر كاريكتوريا عن المفاهيم المذكورة أعلاه.



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 التي تشمل هذه 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 يساوي 55 ثانية المجموعة الثانية تتضمن نويدة اليود ^{137}I بعمر النصف للمجموعة يساوي 22 ثانية، أيضا إحدى المجموعات تحوي عنصر ^{138}I وهي مجموعة ذات عمر النصف يساوي 5.6 ثانية. الشكل التالي يبين سلسلة انحلال نويدة ^{87}Br والتي تتحلل بانبعاث جسيمات β^- مع انحلال أحد المستويات المثارة لنويدة الكريبتون ^{87}Kr .

يلاحظ من الشكل 9.8 أن نويدة البروم تتحلل 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، التي بالتالي تتحلل إلى ^{87}Sr بانحلال جسيمات بيتا السالبة. ويلاحظ من الشكل أيضا أن أحد المستويات المثارة لنويدة ^{87}Kr تكون طاقة إثارتها أكبر من طاقة الترابط للنيوترون، وعليه يتحرر هذا النيوترون وهو ما نسميه بالنيوترون المتأخر الذي نتج متأخرا من عملية الانشطار عبر انحلال ناتج الانشطار البروم،

وعليه فإن هذه المجموعة تأخذ نفس قيمة عمر النصف $t_{1/2} = 55 \text{ sec}$ لنويـدة البروم.



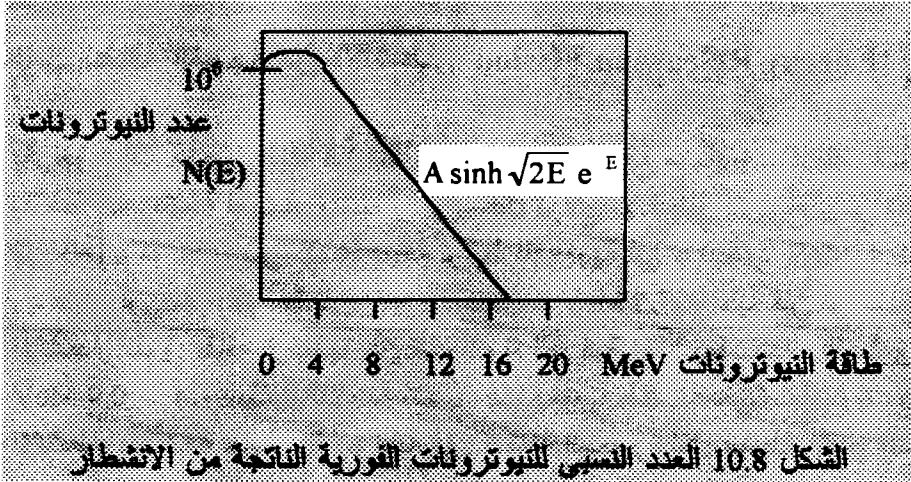
تتنوع طاقة النيوترونات الفورية الناتجة من الانشطار من 0.05MeV إلى 17MeV، وقياس طاقات النيوترونات في هذا المدى العريض ليس بالأمر

السهل. الشكل 10.8 يوضح العدد النسبي للنيوترونات بطاقة معينة $N(E)$ كدالة في الطاقة E .

إن معادلة توزيع عدد النيوترونات كدالة في الطاقة في مدى طاقة محصورة بين 0.075 MeV إلى 17 MeV يمكن إستنتاجها تجريبياً Empirical formula حسب الآتى:

$$N(E) = A \sinh \sqrt{2E} e^{-E} \quad (7.8)$$

والتي منها يمكن حساب متوسط طاقة النيوترونات الفورية الناتجة من الانشطار \bar{E} والتي تساوى 2MeV .



إن متوسط عدد النيوترونات الناتجة من الانشطار هو $\nu > 2$ (أكبر من 2) ويزداد العدد بزيادة طاقة النيوترون المسبب للانشطار. هناك مُعامل آخر مهم والذي 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:

$$\eta = v \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_r} = \frac{v}{1 + \frac{\sigma_r}{\sigma_f}} \quad (8.8)$$

هذا وتمثل نسبة النيوترونات الفورية لليورانيوم-235 ما قدره 99.35% ، في حين تمثل نسبة 65% النيوترونات المتأخرة وهو ما يعبر عنه بجزء النيوترونات المتأخرة $\beta = 0.0065$ ، والتي تساوي حوالى ثلاثة أضعاف نظيرتها لنواة البلوتونيوم ^{239}Pu . وعليه وكما ذكر سابقاً أنه وعلى الرغم من ضآلة نسبة النيوترونات المتأخرة (حوالى 1%) فإن لها تأثير ملحوظ على التصرف الزمنى لأنظمة الانشطار النووية، وتلعب دوراً كبيراً وأساسياً فى عملية التحكم فى تلك المنظومات.

5-8 الطاقة الناتجة من الانشطار Energy Release in Fission

بالرجوع إلى منحى طاقة الترابط للنوى بالفصل الرابع من هذا الكتاب، يلاحظ أنه ونتيجة لعملية الانشطار فإن كتل نواتج الانشطار تتراوح بين 50 إلى 180 وهو ما يناظر متوسط 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 $236(0.9)=212 \text{ MeV}$.

أيضاً، وبالرجوع إلى الفصل الخامس من هذا الكتاب فيمكن حساب قيمة Q لتفاعل الانشطار التالى:



باستخدام معادلة حساب قيمة Q التالية:

$$Q = [M_{^{235}\text{U}} + m_{^1_0\text{n}}] - [M_{^{95}\text{Mo}} + M_{^{139}\text{La}} + 2m_{^1_0\text{n}}] \text{amu} \frac{931\text{MeV}}{\text{amu}} \quad (10.8)$$

مثال 2.8

احسب الطاقة الناتجة من انشطار نواة ^{235}U باستخدام المعادلة (10.8)

الحل

بالرجوع إلى الملحق 1 للوزان الذرية، يمكن حساب الأوزان النووية بعد التخلص من أوزان الإلكترونات المصاحبة لكل ذرة كما يلي:

$${}_{-1}^0\text{e} = 0.000549$$

$${}_{0}^1\text{n} = 1.00866520$$

$${}^{95}\text{Mo} = 94.905839 - 42(0.000549) = 94.882781$$

$${}^{139}\text{La} = 138.90614 - 57(0.000549) = 138.87485$$

$${}^{235}\text{U} = 235.043915 - 92(0.000549) = 234.99341$$

و بالاستناد إلى المعادلة (10.8) نجد أن:

$$Q = \left[M_{^{235}\text{U}} - M_{^{95}\text{Mo}} - M_{^{139}\text{La}} - m_{1\text{n}} \right] \text{amu} \frac{931\text{MeV}}{\text{amu}}$$

$$Q = (234.99341 - 94.882781 - 138.87485 - 1.00866520) \text{amu}$$

$$= 2271148 \text{amu} (931 \text{MeV/amu}) = 211.44\text{MeV}$$

إن توزيع الطاقة الناتجة من الانشطار يمكن التعبير عنه بالجدول التالي:

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 النيوتريونات 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 الذي يليه، وتحت ظروف معينة يمكن أن يتضاعف عدد النيوترونات مع الزمن أو يبقى ثابتاً 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 التالي يوضح دورة النيوترونات الحرارية، والتي منها يمكن تعريف معامل التضاعف.



الشكل يوضح أنه ابتداءً بـنيوترون فإنه نتيجة للانشطار السريع هناك معامل الانشطار السريع (Fast fission factor) ϵ الذي يسبب تواجد عدد من النيوترونات يساوي $1(\epsilon)$ ، يلي ذلك احتمالية تسرب النيوترونات السريعة، ومن ثم فإن الباقي سيكون احتمالية عدم تسرب النيوترونات السريعة (Fast Nonleakage Probability P_f) مضروبة في النيوترونات المتواجدة ϵ وهو ما يساوي ϵP_f ، يلي ذلك أنه هناك الامتصاص للنيوترونات من قبل رنين اليورانيوم وعليه فلو كانت احتمالية الإفلات من الرنين

بعد ذلك وخلال تباطؤ النيوترونات فإن هناك احتمالية عدم تسرب النيوترونات الحرارية (P_T) Thermal Nonleakage Probability ومن ثم فإن العدد الباقي يكون $\epsilon P_T P_f$. ونظرا للإستفادة من النيوترونات الحرارية فى إحداث الانشطار لمادة الوقود وهو ما يعكسه معامل الإستفادة الحرارية Thermal Utilization factor (f)، فإن عدد النيوترونات المتوفر هو $\epsilon P_T P_f$ ، لأن عددًا آخر من النيوترونات سيمتص من قبل مواد أخرى. أخيرا فإن هناك عددا من النيوترونات التي 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 $\epsilon P_T P_f \eta$ 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، $K = \epsilon P_T P_f \eta$. 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:

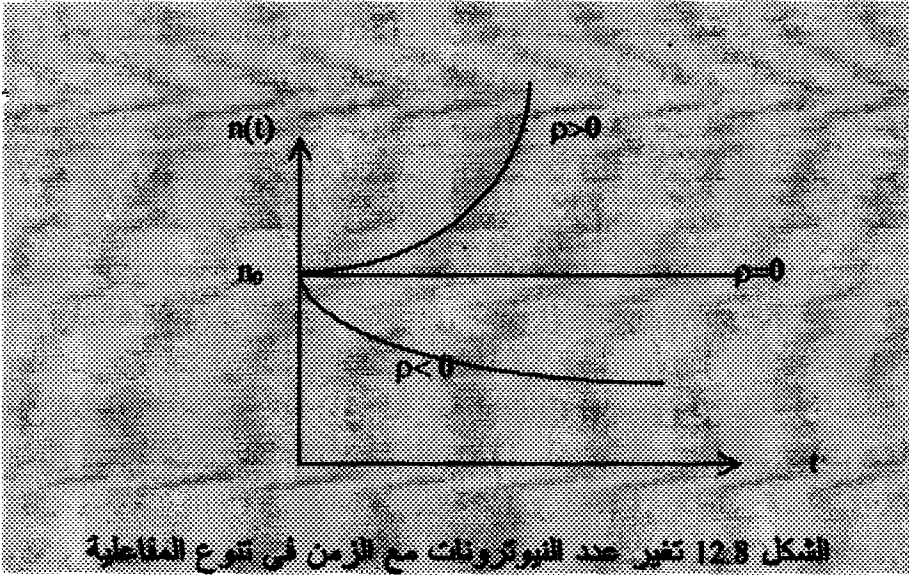
$$\rho = \frac{K - 1}{K} \quad (11.8)$$

هذا و يمكن استنتاج أنه فى وجود النيوترونات الفورية فإن عدد النيوترونات يمكن التعبير عنه بالمعادلة (راجع المسألة 4.8) :

$$n(t) = n_0 e^{\frac{\rho}{\Lambda} t} \quad (12.8)$$

وعليه يكون شكل الدالة $n(t)$ فى الحالات المختلفة للمفاعلية كما هو موضح فى الشكل الموالى. 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 يؤدي إلى زيادة القدرة كلاً

هو موضح بالشكل . وفي 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 ويشغل عند قدرة ثابتة.



7-8 ملخص :

انشطار النوى الثقيلة يحدث نتيجة امتصاص هذه النوى للنيوترونات البطيئة أو النيوترونات السريعة، حيث تنتوع 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 تنشط. ونتيجة لهذا الانشطار تنتج نويدات متوسطة الكتل تسمى نواتج الانشطار، حيث تتعدد هذه الشظايا ولها توزيع جاوسى بقميتين أحدهما حول نويدة خفيفة نسبيا $A=95$ وأخرى حول نويدة ثقيلة نسبيا $A=135$. إن عملية الانشطار تنتج أيضا

نيوترونات فورية في زمن يقارب من 10^{-4} إلى 10^{-6} ثانية ، في حين أن هناك نوع آخر من النيوترونات يسمى بالنيوترونات المتأخرة والذي ينتج نتيجة انحلال نواتج الانشطار أو ما يسمى بأمهات النيوترونات المتأخرة Delayed neutrons precursors، ويعبر عن هذه النيوترونات بست مجموعات، وهي تلعب دورًا أساسيًا في ديناميكية المفاعلات النووية. الطاقة الناتجة من الانشطار تقارب من 200 MeV وتتضمن الطاقة الحركية للنويدات الناتجة من الانشطار، وطاقة النيوترونات، وطاقة بيتا، وطاقة أشعة جاما الفورية والمتأخرة وأيضاً طاقة النيوترونات وهذه الأخيرة ضائعة لا يمكن إستردادها. إن النيوترونات تمر بعدد من الأحداث حتى تنتج جيلاً جديداً من النيوترونات وهذا ما يسمى بدورة النيوترونات، فهناك حدث الانشطار السريع والإفلات للنيوترونات السريعة وأيضاً الامتصاص الرنيني 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. أيضاً هناك الإستفادة من هذه النيوترونات الحرارية من حيث عملية امتصاصها من قبل نواة اليورانيوم. وأخيراً، تتم عملية انبعاث نيوترونات جديدة نتيجة الانشطار الذي يتنافس مع عملية الأسر الإشعاعي. نسبة الجيل التالي من النيوترونات إلى الجيل السابق يسمى بمعامل التضلعف K الذي له علاقة بمعامل المفاعلية ρ . قدرة المفاعلات تزداد وتقص أو تبقى كما هي بناءً على قيمة المفاعلية، حيث توجد ثلاث حالات تمثل الحرجة، وفوق الحرجة ، وتحت الحرجة.

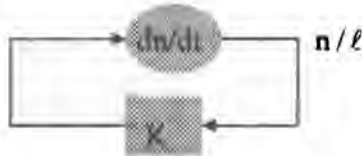
8-8 مسائل :

1.8 - قدر الطاقة اللازمة للنيوترون لإحداث الانشطار في نواة ^{239}Pu .

2.8 - ما هي نهاية القيمة القصوى للمفاعلية ؟

3.8 - كيف يمكن حساب الطاقة المتوسطة للنيوترونات الناتجة من الانشطار باستخدام البيانات في الشكل 10.8 ؟

4.8 - يوضح الشكل التالي العوامل المؤثرة على معدل تغير عدد النيوترونات dn/dt



والتي يمكن التعبير عنها بالمعادلة:

$$\frac{dn}{dt} = (K - 1) \frac{n}{\ell}$$

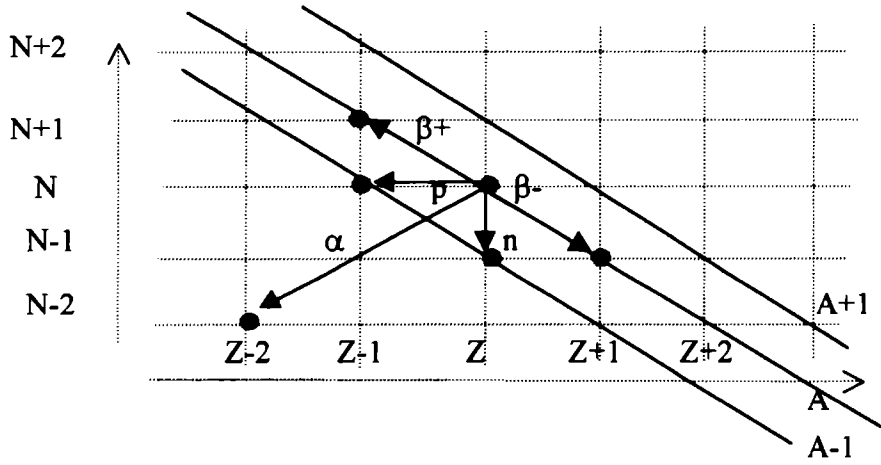
حيث ℓ تمثل زمن حياة النيوترون،

أ- حل المعادلة في حالة وجود الشرط الابتدائي $n(0)=n_0$.

ب- ارسم الأشكال التي تمثل n كدالة في الزمن في الحالات $K=1$, $K>1$, $K<1$.

ج- أعد كتابة المعادلة بدلالة ρ و زمن توليد النيوترونات $\Lambda = \frac{\ell}{K}$.

5.8- في الشكل التالي مبتدئين بالنواة A والتي تحمل N من النيوترونات و Z من البروتونات احسب A, N, Z في كل حالات الانحلال المبينة.





الفصل التاسع

منظومات التفاعل الانشطاري Nuclear Fission Systems

- 1-9 ثنائية إينشتين.
- 2-9 التفاعل المتسلسل مع اليورانيوم.
- 3-9 حسابات K_{eff} وتصميم المفاعلات.
- 4-9 الأنواع الأساسية للمفاعلات.
- 5-9 فيزياء المفاعلات : استاتيكا وديناميكا المفاعلات.
- 6-9 ملخص.
- 7-9 مسائل.

1-9 ثنائية اينشتين :

فيما سبق تم تقديم ثنائية دي برولييه والتي تفيد بأن الجسم من خلال كمية حركته p يمكن التعبير عنه بموجة عبر طول موجته λ وذلك من خلال المعادلة التالية:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1.9)$$

أيضاً، هناك ثنائية أخرى مشهورة جداً وهي ثنائية اينشتين والتي تفيد بأن الكتلة تعبر عن طاقة وأن الطاقة تعبر عن كتلة، وهو ما تشير به المعادلة التالية:

$$E = mc^2 \quad (2.9)$$

حيث m تمثل الكتلة، E تمثل الطاقة، و c تمثل سرعة الضوء.

تفوق الطاقة النووية (تفاعلات نووية) عن الطاقة الكيميائية (تفاعلات كيميائية:تفاعلات أغلفة الإلكترونات في الذرة) بمقدار مليون مرة، مما أحاط أهمية بالغة في محاولة الاستفادة من هذه الطاقة الهائلة لغرض التطبيقات السلمية لتوليد الطاقة، ومن ثم ظهرت المفاعلات الانشطارية.

مثال 1.9

احسب الطاقة الناتجة من انشطار كيلو جرام واحد من اليورانيوم وقارن ذلك بالتفاعلات الكيميائية، إذا علمت أن انفجار كيلوجرام واحد من مادة TNT تولد طاقة تساوي 4.1×10^{13} erg .

الحل:

بحساب فرق الكتلة نتيجة انشطار نواة واحدة من ^{235}U نجد أنها تساوي 3.2×10^{-4} erg وهي ما تناظر 200MeV

كما أن عدد الذرات (النوى) في جرام واحد من عنصر ^{235}U يمكن حسابه كما يلي:

$$N[\#] = \frac{1[\text{g}]}{235[\frac{\text{g}}{\text{mole}}]} \cdot 0.602 \times 10^{24} [\frac{\text{atom}}{\text{mole}}] = 2.56 \times 10^{21} \text{ atom}$$

وعليه فإن الطاقة الناتجة عن انشطار كل الذرات في الجرام الواحد من ^{235}U هي:

$$2.56 \times 10^{21} [\text{atom}] \cdot 3.2 \times 10^{-4} [\frac{\text{erg}}{\text{atom}}] = 8.2 \times 10^{17} \text{ erg}$$

ومن ثم فإن انشطار كيلوجرام واحد من ^{235}U ينتج $8.2 \times 10^{20} \text{ erg}$ فإذا كان انفجار كيلوجرام واحد من مادة TNT يولد طاقة تساوي $4.1 \times 10^{13} \text{ erg}$ ، لذا يمكن حساب عدد الكيلوجرامات من TNT التي تعادل الطاقة الناتجة من انشطار كيلوجرام واحد من اليورانيوم وذلك حسب الآتي:

$$\frac{8.2 \times 10^{20}}{4.1 \times 10^{13}} = 20 \times 10^6 \text{ Kg}$$

هذا يعني أن الطاقة النووية تناظر عشرين مليون مرة الطاقة الكيميائية. يلاحظ أيضا أن جرامًا واحدًا من انشطار اليورانيوم يولد:

$$8.2 \times 10^{17} \text{ erg} = 8.2 \times 10^{10} \text{ Joule} = 8.2 \times 10^{10} \text{ watt.sec} \sim 1 \text{ Mw.day}$$

ومن ثم فإن كيلوجرامًا واحدًا من اليورانيوم يولد 1 Gw.day (واحد جيجارات-يوم) وهذه تعتبر طاقة حرارية يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية بساقتراض 30% كفاءة efficiency ، أي أن الطاقة الكهربائية المولدة تناظر 0.3 Gw.day ، وهذه الطاقة تنتجها محطة توليد كهرباء تقليدية بحرق حوالي 2500 طن من الفحم. هذه الحسابات تجعل استخدام الطاقة النووية لتوليد الطاقة شيئًا ذا جدوى.

2-9 التفاعل المتسلسل مع اليورانيوم :

لحدوث التفاعل المتسلسل في 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 أحداث انشطار
- 3- أسر مواد أخرى للنيوترونات وطبعاً دون حدوث انشطار
- 4- إفلات النيوترونات دون أسرها.

فإذا كانت العمليات أو الأحداث 1، 2، 3، 4 أصغر أو تساوي الحدث 1، فإن التفاعل المتسلسل ممكن بحيث يكون إما فوق الحرجي، أو تفاعل متسلسل حرجي. 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 أي منظومة يضمن فيها حدوث التفاعل المتسلسل. أحد هذه الشروط المهمة هو "الحجم". إن إنتاج النيوترونات يعتمد على حجم المنظومة، في حين أن احتمالية إفلات النيوترونات تعتمد على المساحة السطحية. فإذا كانت المنظومة صغيرة جداً، بحيث تكون نسبة مساحة السطح S إلى الحجم V ($R=S/V$) كبيرة، فإن إفلات النيوترونات من المنظومة يكون كبيراً، وعليه فإن هذه المنظومة يعز عليها المحافظة على التفاعل المتسلسل. وعلى الجانب الآخر، فلو كانت النسبة صغيرة، بمعنى أن الحجم يكون كبيراً، ومن ثم فإن إفلات النيوترونات يكون صغيراً ويكون فقدها بسبب الأسر أو الامتصاص متغلباً على إنتاجها بمعنى أن صغر الحجم لا يؤدي إلى تفاعل متسلسل، كما أن كبر الحجم لا يؤدي إلى تفاعل متسلسل، وعليه هناك حجم حرج $Critical\ Size$ يحدث فيه التفاعل الانشطاري المتسلسل. هذا يخالف التفاعل الكيميائي الذي لا يعتمد على حجم منظومة التفاعل، حيث إن التفاعل يحدث في أي حجم كان.

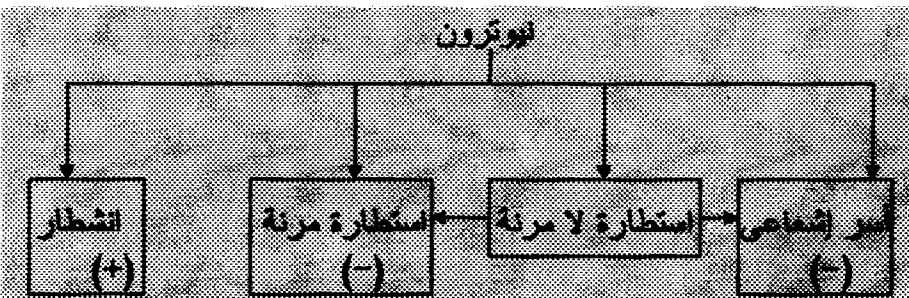
الآن سندرس امكانية حدوث التفاعل المتسلسل مع اليورانيوم الطبيعي فقط. وكما أشرنا أعلاه أن هناك أربعة أحداث متنافسة في حالة عملية الانشطار،

وأيضاً علمنا بأن كلما زاد حجم المنظومة قل إفلات النيوترونات من المنظومة ، وعليه سنفرض أن هناك كتلة كافية من اليورانيوم الطبيعي (أبعاد الكتلة أكبر بكثير من متوسط المسار الحر؛ أى افتراض وسط لانهاى)، ومن ثم يمكن تجاهل إفلات النيوترونات من المنظومة. أيضاً الحدث الثالث يمكن تجاهله بسبب عدم وجود مواد أخرى غير اليورانيوم الطبيعي. وعليه سيكون هناك الحدثان الرئيسيان الأول (الانشطار) والثانى (الامتصاص دون حدوث انشطار)، طبعاً يتخللهما تصادم النيوترونات المرنة Elastic Scattering وغير المرنة Inelastic Scattering .

طبعاً، يحدث الانشطار التلقائى منتجاً نيوترونات سريعة بطاقة متوسطة تساوى 2MeV وبانتاج نيوترونات متوسط Yield يساوى $v=2.5$.

اليورانيوم الطبيعي 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 بضياح النيوترونات (-).



الشكل 1.9 سلبية وإيجابية الأحداث المتنوعة ودلالاتها على عدم استمرار التفاعل المتسلسل فى اليورانيوم الطبيعي

إن حدث الانشطار يمثل الحدث الإيجابي وذلك بسبب إنتاج نيوترونات جديدة. كما أن حدث الأسر الإشعاعي هو حدث سلبي بسبب امتصاص النيوترون وانبعث أشعة جاما دون انشطار اليورانيوم. وحيث إن التصادمات بين النيوترونات ونوى اليورانيوم تؤدي سواء إلى الاستطارة المرنة أو الاستطارة اللامرنة، فإنه في حالة الاستطارة المرنة ونظراً لأن التصادم يحدث مع نوى ثقيلة، فإن النيوترون يفقد طاقة صغيرة نتيجة التصادم (الطاقة الدنيا للتصادم بالنسبة لليورانيوم هي $E=0.98E_0$) وبالتالي 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 الرنيني لنواة اليورانيوم-238، حيث إنه في هذا المدى تكون احتمالية الامتصاص الرنيني أكبر من احتمالية الانشطار لنواة اليورانيوم-235، ومن ثم فإن النيوترون بسبب الاستطارة المرنة يكون له تأثير سلبي نظراً لفقده بسبب الامتصاص الرنيني. أما بالنسبة للاستطارة اللامرنة فإن النيوترون يفقد طاقة ويصبح بطاقة قدرها 0.3MeV وهي أقل من الطاقة اللازمة لإحداث استطارة لامرنة أخرى وأيضاً هي أقل من الطاقة اللازمة لإحداث انشطار لنواة اليورانيوم-238 ، وبالتالي فإما أن النيوترون يتعرض فيما بعد إلى الاستطارة المرنة وهو حدث سلبي بسبب حتمية الامتصاص الرنيني، أو حدوث الأسر الإشعاعي وهو أيضاً سلبي التأثير. مما سبق نجد أنه لا يمكن استمرار الانشطار المتسلسل بسبب كثرة التأثيرات السلبية على التأثير الإيجابي الوحيد.

بالتحليل والدراسة برز حلان هندسيان لهذه المعضلة وهما :

1- إضافة مهدى Moderator من النوى الخفيفة ، وذلك لأن التصادم المون للنيوترونات مع هذه النوى يؤدي إلى فقد طاقة كبيرة للنيوترون في عدد محدود من التصادمات ومن ثم فإن النيوترونات تتحول إلى طاقات تمكنها من تجنب الامتصاص الرنيني لليورانيوم-238 مما يضيف إيجابية لحدث الانشطار. كما أن المقطع المستعرض لانشطار اليورانيوم-235 عالٍ بدرجة

تكفى للتغلب على التأثير السلبي للأسر الإشعاعى . ومن ثم فإن إضافة المهدىء المناسب لليورانيوم الطبيعى مكنّ من حدوث تفاعل متسلسل على الرغم من تدنى وفرة نظير اليورانيوم-235 . وهذا ما نتج عنه ما يسمى بالمفاعلات الحرارية Thermal Reactors .

2- التثرية وذلك برفع نسبة اليورانيوم-235 من نسبة 0.72% إلى نسب أعلى. ومن ثم تتم الاستفادة من وجود احتمالية انشطار لليورانيوم-235 على امتداد تنوع طاقة النيوترونات من meV إلى MeV ، وبالتالي تزداد نسبة الانشطار إيجابيا. وفي حالة اليورانيوم-235 الصافى أو عالى التثرية (90%) فإن الانشطار حتما سيقع ، ذلك لأنه لن يكون التأثير السلبي للاستطارة اللامرنة له دور جدى كما يحدث مع اليورانيوم الطبيعى الذى يحمل نسبة عالية من اليورانيوم-238 (أكثر من 99%) ، كما أن النيوترونات التى تصل إلى طاقات الرنين Resonance Energy، سوف تسبب انشطارا، ذلك لأن النيوترونات بطاقات تساوى طاقة رنين اليورانيوم-238 لها احتمالية 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 معالم التضاعف للوسط اللانهائى K_{∞} .

3-9 حسابات معالم التضاعف K_{∞} وتصميم المفاعلات :

كما ورد فى الفصل الثامن من هذا الكتاب وبالتحديد فى الجزء 6-8 ، فإن معالم التضاعف K يعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$K = \eta p \epsilon f P_t P_f \quad (3.9)$$

وفى حالة الوسط اللانهائى، فإن كلا من احتماليتى عدم الإفلات للنيوترونات السريعة و النيوترونات البطيئة هى 100% أى أنه لا يمكن إفلات

النيوترونات بنوعيهما من الوسط اللانهائي، ومن ثم فإن $P_i = P_f = 1$. هذا يجعل معادلة معامل التضاعف للوسط اللانهائي K_{∞} تعرف كما يلي:

$$K_{\infty} = \eta p \epsilon f \quad (4.9)$$

في المفاعلات المحتوية على اليورانيوم-235 فقط فإن كلا من $\epsilon=1$ و $p=1$ الممثلان لمعامل الانشطار السريع واحتمالية الإفلات من الرنين على التوالي، ذلك لأن اليورانيوم-238 غير موجود. كما أنه في وجود اليورانيوم-238 فإن ϵ تكون أكبر من 1.

أيضا في المفاعلات المتجانسة Homogeneous Reactors والتي فيها يختلط كل من الوقود (المحتوى على اليورانيوم-238 واليورانيوم-235) والمهدىء، فإن $\epsilon=1$. ذلك لأن جسيمات الوقود صغيرة جدا، ومن ثم فإن النيوترونات التي تسبب الانشطار ستصطدم مع المهدىء قبل أن تتحصل على فرصة لإحداث انشطار في اليورانيوم-238.

إن المعاملات الفرعية المكونة لمعامل التضاعف اللانهائي تتنوع اعتماديتها كما يلي:

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 ، لذا فإن أحد المشاكل الأساسية لتصميم المفاعلات ، بعد اختيار نوعية الوقود، هو إيجاد المقادير النسبية لكل المواد المستخدمة في التصميم ، وكذلك أسلوب تجميعها مع بعض لإنتاج أعلى قيمة لـ pf . ذلك بدوره يمنح القيمة القصوى لمعامل التضاعف K_{∞} .

عند تصميم المفاعلات فإنه لضمان التفاعل المتسلسل في حجم محدد من الوسط وكذلك لضمان التحكم في التفاعل المتسلسل بوجود مواد تحكم لامتصاص النيوترونات، فإن ذلك يتطلب أن يكون K_{∞} أكبر من 1. ذلك لأنه لو كان K_{∞} يساوي 1 فإنه بتحديد الوسط (جعله محدود الحجم) سيقل معامل التضاعف الفعلي K عن 1 وذلك بسبب تأثير كل من احتمالية إفلات النيوترونات السريعة P_f واحتمالية النيوترونات البطيئة P_t .

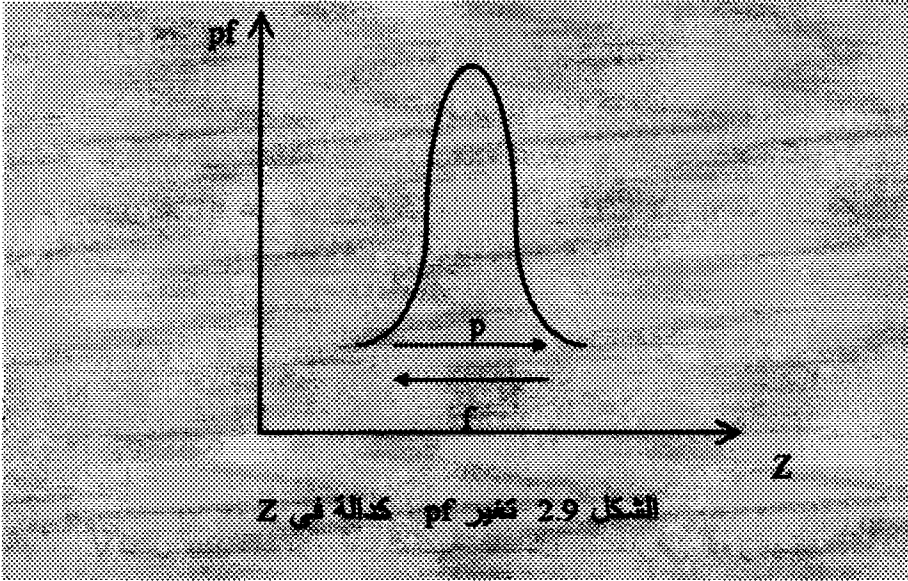
والآن سنحاول دراسة تصميم وسط انشطاري (مفاعل بسيط) بحيث يكون الوسط خليطاً متجانساً بين الوقود والمهدىء. لذا وبما أن الوسط متجانس، فإن $\epsilon=1$. كما أن شرط ضمان التفاعل المتسلسل لوسط محدود الحجم ، فإن K_{∞} أكبر من 1. الآن يمكن التعبير عن هدف التصميم Design Goal بالمعادلة التالية:

$$K_{\infty} > 1 \Rightarrow pf\eta > 1 \Rightarrow pf > \frac{1}{\eta} \quad (5.9)$$

هذا وسوف يكون معامل التصميم هو نسبة المهدىء إلى الوقود $Z = \frac{N_1}{N_0}$ ، حيث إن N_0 تمثل الكثافة الذرية للوقود في الخليط، في حين أن N_1 تمثل الكثافة الذرية للمهدىء في الخليط. إذا يمكننا تلخيص برنامج تصميم المفاعل المتجانس البسيط عبر العبارة التالية:

تصميم المفاعل للحصول على القيمة القصوى لـ $pf > \frac{1}{\eta}$ من خلال خيار تركيبة مناسبة لـ Z من الوقود والمهدىء.

سنجد عبر العرض القادم أن نظير تثرية معينة فإن pf تمر عبر قمة بتغيير قيمة Z ، وهذه القمة قد تجعل من K_{∞} أكبر من 1 أو أقل وذلك حسب نوعية المهدىء . الشكل التالي يوضح ذلك التغيير:



والآن لنحسب قيمة K_{∞} لثلاث من المنظومات الحرارية المتجانسة الخليط (Thermal Homogeneous Systems). الجدول التالي يبين تركيبة الخليط بين الوقود والمهدىء:

الجدول 1.9 نوعية الوقود ونوعية المهدىء في الخليط المتجانس

الوقود	المهدىء	شكل الخليط المتجانس
U	الكربون C	جسيمات مختلطة
UO ₂	ماء عادي H ₂ O	وحلى (Slurry in Liquid Moderator)
UO ₂	ماء ثقيل D ₂ O	وحلى (Slurry in Liquid Moderator)

إذا هدف التصميم هو اختيار قيمة Z (نسبة المهديء 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:

$$pf > \frac{1}{\eta} \quad (6.9)$$

فما هي قيمة η التي تحقق ذلك الشرط؟.
سيتم التعبير عن η عن طريق تركيزات ^{235}U و ^{238}U لأن η تتغير بتغير درجة تثرية اليورانيوم باليورانيوم-235. وذلك كما يلي:

$$\eta = v^{25} \frac{\Sigma_f^{25}}{\Sigma_a} = v^{25} \frac{N_{25} \sigma_f^{25}}{N_{25} \sigma_f^{25} + N_{25} \sigma_r^{25} + N_{28} \sigma_a^{28}} = \frac{v^{25}}{1 + \frac{\sigma_r^{25}}{\sigma_f^{25}} + \frac{\sigma_a^{28}}{\sigma_f^{25}} \frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

حيث v^{25} تمثل عدد النيوترونات الناتجة عند كل انشطاري اليورانيوم-235،
و η تمثل عدد النيوترونات الناتجة عند كل امتصاص والذي يشمل أسر إشعاعي و انشطاري.
هذا وبالتعويض بالقيم التالية:

$$v^{25} = 2.44, \quad \frac{\sigma_r^{25}}{\sigma_f^{25}} = 0.18, \quad \frac{\sigma_a^{28}}{\sigma_f^{25}} = .0047$$

نجد أن:

$$\eta = \frac{2.44}{1.18 + 0.0047 \frac{N_{28}}{N_{25}}} \quad (7.9)$$

يمكن حساب $\frac{N_{28}}{N_{25}}$ بمعلومية درجة التثرية، حيث إن درجة التثرية الوزنية w/o معرفة كما يلي:

$$w/o = \frac{\rho^{25}}{\rho^{25} + \rho^{28}} \quad (8.9)$$

حيث ρ تمثل الكثافة والتي يعبر عنها بالمعادلة التالية:

$$\rho = \frac{NM}{N_{AV}} \quad (9.9)$$

حيث N تمثل الكثافة الذرية [$\#/cm^3$]، M تمثل الوزن الجزيئي [g/mole] ،
و N_{AV} يمثل عدد أفوجادرو [atoms/mole]. بالتعويض بالمعادلة 9.9 في
المعادلة 8.9، نحصل على:

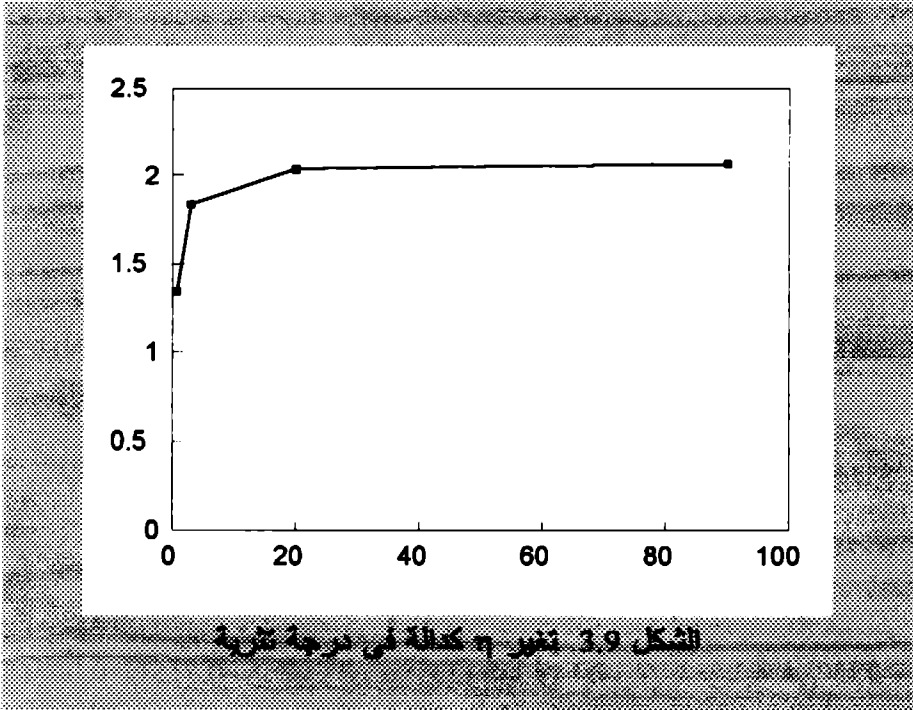
$$w/o = \frac{(NM)^{25} / N_{AV}}{(NM)^{25} / N_{AV} + (NM)^{28} / N_{AV}} = \frac{1}{1 + \frac{N^{28} M^{28}}{N^{25} M^{25}}} \quad (10.9)$$

بالنسبة لليورانيوم الطبيعي فإن درجة التثرية الطبيعية هي
0.715%=0.00715 من اليورانيوم-235، كما أن الأوزان الجزيئية هي 235 ،
و 238 لكل من نظير اليورانيوم-235 واليورانيوم-238 على التوالي.
وبالتعويض بهذه القيم في المعادلة السابقة نحصل على:

$$\frac{N_{28}}{N_{25}} = 137 \quad (11.9)$$

هذا ونلاحظ أن هذه القيمة تتغير بناءً على تغير تثرية اليورانيوم ، فمثلاً في
حالة درجة تثرية تساوي 3% من اليورانيوم-235 ، نجد أن القيمة
تساوي 32 .

إذا يمكن الآن حساب قيمة η لليورانيوم الطبيعي باستخدام المعادلة 10.9
وبالتعويض بنتيجة المعادلة 11.9، نجد أن $\eta = 1.337$. 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 k كدالة في درجة تثرية

مثال 1.9

إذا تم تصميم مفاعل مكون من خليط متجانس من الوقود (يورانيوم-235 ويورانيوم-238) والمهدىء، بحيث كانت احتمالية عدم إفلات النيوترونات البطيئة والنيوترونات السريعة $P_R = P_f * P_t$ تساوى 83%، وكانت قيمة pf تساوى 0.6، احسب درجة تثرية الوقود من اليورانيوم-235 حتى نضمن حرجية المفاعل.

الحل :

لضمان حرجية المفاعل فإن $K = P_R * K_{\infty} = 1$

$$K_{\infty} = \frac{1}{0.83} = 1.205$$

وحيث إنه في الخليط المتجانس تكون جسيمات وقود اليورانيوم صغيرة جداً

(بقطر في حدود الميكرن) ، لذا فإنه من المؤكد أن النيوترونات السريعة من الانشطار سوف تفلت من اليورانيوم قبل الوصول إلى نوى اليورانيوم-238، النيوترون سيفلت إلى المهديء ويتم تهدئته دون شطر اليورانيوم-238.

وعليه فإن $\epsilon = 1$ ما يعنى عدم مساهمة النيوترونات السريعة في الانشطار وهذا ما يضيف أحد المساويء المنظومات المتجانسة وذلك بعدم الاستفانة من النيوترونات السريعة في الانشطار.

كما أن $pf=0.6$ تعنى أن كل من p و f يكونان فى حيز $0.6^{1/2} = 0.775$ ، أو 78% ، لذا فإن ذلك يفيد ما يلي:

1- يجب أن لا يضيع أكثر من 22% من النيوترونات بسبب الامتصاص الرئبي خلال عملية تهئة النيوترونات
2- يجب أن لا يضيع أكثر من 22% من النيوترونات الحرارية بسبب الامتصاص فى المواد غير الوقود

لذا فإن ؛

$$K_{\infty} = pf\eta = 0.6\eta = 1.205$$

$$\eta = \frac{1.205}{0.6} = 2.0083 \quad \text{وعليه}$$

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:

$$\frac{N_{28}}{N_{25}} = \frac{2.44}{2.0083 \cdot 0.0047} - \frac{1.18}{0.0047} = 258.50 - 251.06 = 7.44$$

وباستخدام المعادلة 10.9:

$$w /_0 = \frac{1}{1 + \frac{N^{28} M^{28}}{N^{25} M^{25}}} = \frac{1}{1 + 7.44 \frac{238}{235}} = 0.1172 = 11.7\%$$

إذا فهذا المقاطع متجانس الخليط بين الوقود والمهدىء والمحدد الحجم بحسب أن يكون ذا كثرة قدرها حوالي 12% من اليورانيوم-235 المسمول 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 فى كل المواد.

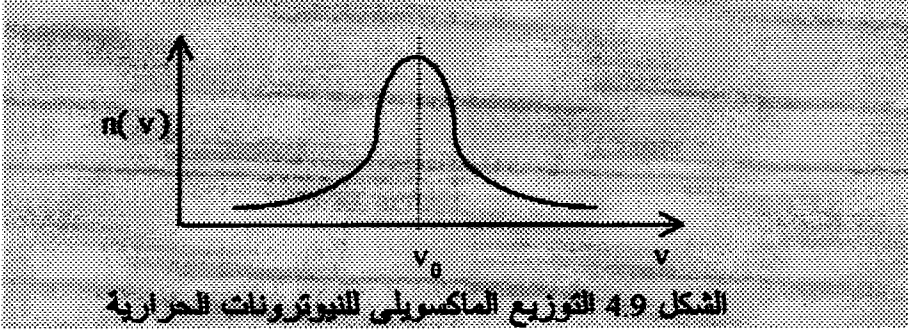
وحيث إنه من شكل منحنى المقطع المستعرض الانشطارى لليورانيوم (^{235}U) فى منطقة طاقة النيوترونات البطيئة، يتضح أن المقطع المستعرض يتناسب مع معكوس سرعة النيوترونات ($1/v$ dependence). وهذا يعنى أن:

$$\frac{\sigma_a}{v_0} = \frac{\sigma_{a0}}{v} \Rightarrow \sigma_a = \frac{v_0 \sigma_{a0}}{v} \quad (12.9)$$

كما أن كثافة النيوترونات الحرارية لها توزيع ماكسويلى كدالة فى السرعة $n(v)$ ، حيث يمكن التعبير عن هذه الكثافة الكلية n بالمعادلة التالية:

$$n = \int_0^{\infty} n(v) dv = \int_0^{\infty} 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \quad (13.9)$$

الشكل التالى يوضح التوزيع الماكسويلى للنيوترونات الحرارية حول سرعة متوسطة v_0 :



لذا فإن معدل التفاعل الامتصاصي يمكن حسابه من خلال حاصل ضرب الفيض flux ($\phi=vn$) و المقطع المستعرض العيني الامتصاصي Macroscopic absorption cross section ($\Sigma_a = \sigma_a N$) كما يلي:

$$R = \Sigma \phi = [\sigma_a(v)N][vn(v)] \quad (14.9)$$

وباستخدام المعادلتين 12.9 و 13.9 بالتعويض في المعادلة السابقة:

$$R = \frac{v_0 \sigma_{a0}}{v} N \quad \forall n = \sigma_{a0} N n v_0 = \sigma_{a0} N \phi_0 = \Sigma_{a0} \phi_0 \quad (15.9)$$

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) وهي $v_0=2200\text{m/sec}$ التي تتاظر الطاقة الحرارية للنيوترونات 0.025 eV ، كما يعتمد على الكثافة الذرية للنوى الهدف N، وأيضا الفيض النيوتروني 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 هي الحرارية ومن ثم سنحتفظ

بتدليل الرموز بالرقمين 0 ، و 1 ليدلا على الوقود والمهدىء على التوالى .
المعادلة هى:

$$f = \frac{\Sigma_{a0}}{\Sigma_{a0} + \Sigma_{a1}} = \frac{\sigma_{a0} N_0 \phi_0}{\sigma_{a0} N_0 \phi_0 + \sigma_{a1} N_1 \phi_0} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma_{a1}}{\Sigma_{a0}}} \quad (16.9)$$

$$f = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{a1} N_1}{\sigma_{a0} N_0}} \quad (17.9)$$

حيث N_1 تمثل الكثافة الذرية للمهدىء، وأن N_0 تمثل الكثافة الذرية للوقود .
أيضا σ_{a1} تمثل المقطع المستعرض المجهرى الامتصاصى الحرارى للمهدىء ،
و σ_{a0} تمثل المقطع المستعرض المجهرى الامتصاصى الحرارى للوقود .
يلاحظ من المعادلة السابقة أن معامل الاستفاداة الحرارى f يعتمد على
الخواص النووية لكل من الوقود والمهدىء، على عكس η التى تعتمد على
الخواص النووية للوقود فقط .

وكما أوردنا فى الجدول 1.9 ، فسيتم حساب قيمة f للأنظمة الثلاثة المقترحة
الممثلة بالوقود النووى وهو اليورانيوم الطبيعى مع أحد المهدئات الثلاثة
هى الماء الخفيف، أو الماء الثقيل، أو الكربون . والتى هى الأساس
للأنواع الرئيسة الموجودة فى العالم ونعنى بها مفاعلات الماء الخفيف
بالولايات المتحدة ، ومفاعلات الكاندو بكندا والهند، وأخيراً المفاعلات
المبردة بالغاز وهى الموجودة بالمملكة المتحدة .

الجدول التالى يوضح بعض الخواص الفيزيائية والنووية لبعض العناصر
اللازمة الداخلة فى التصميم .

الجدول 2.9 بعض الخواص الفيزيائية والنوية لبعض العناصر

N [#/cm ³] x10 ⁻²⁴	σ_a [cm ² /atom] x10 ²⁴ النوى حراري ϕ_0	الكثافة ρ [g/cm ³]	العنصر
-	683	-	²³⁵ U
-	2.71	-	²³⁸ U
0.0478	7.68	19.1	U يورانيوم طبيعي
0.0668	.332	H ₂ O لـ 1.0	H
0.0662	.00046	D ₂ O لـ 1.1	D
0.0803	.0045	1.6	C
-	<.0002~0	-	O

مثال 2.9

1 - احسب المقطع المستعرض الامتصاصي لليورانيوم الطبيعي U

2 - نظرا لوجود شوائب من الماء الخفيف بنسبة ووفرة 0.25% في الماء الثقيل والذي يشكل نسبة 99.75%، وحيث إن الماء الخفيف له مقطع مستعرض امتصاصي كبير نسبيا مقارنة بالمقطع المستعرض للماء الثقيل، احسب المقطع المستعرض المجهرى الفعلى للماء الثقيل (D₂O) σ_a^{eff} ، وقارنه بالبيانات الواردة في الجدول 2.9 .

الحل :

اليورانيوم متكون من النظيرين ²³⁵U و ²³⁸U، 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. وبالتالي تحسب $\sigma_a(U)$ كالتالى:

$$\sigma_a(U) = \frac{N_{25}\sigma_a^{25} + N_{28}\sigma_a^{28}}{N_{25} + N_{28}} = \frac{\sigma_a^{25} + \frac{N_{28}}{N_{25}}\sigma_a^{28}}{1 + \frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

وبالتعويض بالقيم اللازمة الواردة فى الجدول 2.9:

$$\sigma_a(U) = \frac{683 + 137 * 2.71}{1 + 137} = 7.68 \text{ b}$$

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 العينى Macroscopic 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:

$$\begin{aligned} \#(H_2O) &= \frac{\rho}{M(H_2O)} N_{Av} = \frac{1[\frac{g}{cm^3}]}{(2+16)[\frac{g}{mole}]} 0.602 \times 10^{24} \\ &= 0.0334 \times 10^{24} [\frac{mole}{cm^3}] \end{aligned}$$

هذا يعنى أن هناك 0.0334×10^{24} من H_2 و 0.0334×10^{24} من O. ومن ثم فإن هناك $2 \times 0.0334 \times 10^{24} = 0.0668 \times 10^{24}$ من H فقط.

وبالمثل فإن عدد ذرات الديوتيريوم D يمكن حسابه حسب التالى:

$$\#(D_2O) = \frac{\rho}{M(D_2O)} N_{AV} = \frac{1.1[\frac{g}{cm^3}]}{20[\frac{g}{mole}]} 0.602 \times 10^{24} = 0.0331 \times 10^{24} [\frac{mole}{cm^3}]$$

ومن ثم فإن عدد ذرات الديوتيريوم هو 0.0662×10^{24} .

وباستخدام قيم نسب الوفرة للماء الثقيل $m=0.9975$ ، في حين أن الشوائب تمثل $1-m=0.0025$ ، مع التعويض في المعادلة الأولى من هذا المثال فقرة 2 بعد الرجوع إلى الجدول 2.9:

$$\begin{aligned} \Sigma_a^{eff}(D_2O) &= 0.9975[0.0331 * 2 * 0.00046 + 0.0331 * 0] \\ &\quad + 0.0025[0.0334 * 2 * 0.332 + 0.00334 * 0] \\ &= 0.0000304 + 0.0000554 = 0.858 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

يلاحظ من المعادلة السابقة أن تأثير الماء الخفيف على قلة وفرته كشائبة (0.554×10^{-4}) أكبر من تأثير الماء الثقيل (0.304×10^{-4}). كما يلاحظ أن تأثير امتصاص الأكسجين للنيوترون ضئيل جدا بحيث يمكن تجاهله وذلك لصغر المقطع المستعرض الامتصاصي لذلك العنصر.

والآن لحساب المقطع المستعرض المجهرى الفعلى للماء الثقيل نستخدم المعادلة التالية:

$$\sigma_a^{eff}(D_2O) = \frac{\Sigma_a^{eff}(D_2O)}{N(D_2O)} = \frac{0.858 \times 10^{-4}}{0.0331 \times 10^{24}} = 0.0259 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 = 0.00259 \text{ b}$$

وهو فعليا المقطع المستعرض للديوتيريوم $\sigma_a^{eff}(D_2)$ بسبب ضآلة تأثير الأكسجين كما سبق ذكره. لذا يمكن حساب المقطع المستعرض الفعلى لذرة الديوتيريوم حسب التالي:

$$\sigma_a^{eff}(D) = \frac{\sigma_a^{eff}(D_2)}{2} = \frac{0.00259}{2} = 0.0013 \text{ b}$$

يلاحظ أن الرقم المتحصل عليه للمقطع المستعرض الامتصاصي لنيوترون الديوتيريوم $b = 0.0013$ أكبر بالمقارنة بما ورد في الجدول $b = 0.00046$ ، أي بحوالي ثلاثة أضعاف.

والآن يمكن التعامل مع المعادلة (17.9) لحساب معامل الاستفادة الحرارى للمنظومات الثلاث السابق ذكرها ، مع أخذ الملاحظات التالية فى الحساب :

- 1- تجاهل تأثير الأوكسجين بسبب ضالة مقطعه المستعرض للامتصاص سواء 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:

$$f = \frac{1}{1 + 0.00058 \frac{N_1}{N_0}} \quad (18.9)$$

وبالنسبة لمنظومة اليورانيوم-الماء الثقيل ، فإن معامل الاستفادة الحرارى هو:

$$f = \frac{1}{1 + 0.00169 \frac{N_1}{N_0}} \quad (19.9)$$

وبالنسبة لمنظومة اليورانيوم-الماء الخفيف ، فإن معامل الاستفادة الحرارى هو:

$$f = \frac{1}{1 + 0.0432 \frac{N_1}{N_0}} \quad (20.9)$$

إذا فُزن المعادلات الثلاث السابقة يمكن كتابتها في مسورة موحدة بدلالة معامل التسميم $Z=N_1/N_0$ كالآتي:

$$f = \frac{1}{1 + \gamma Z} \quad (21.9)$$

وتعتمد قيمة γ على نوعية المهدىء حسب الجدول التالي:

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 الرنيني p ، حيث يعبر عن هذه الاحتمالية بالمعادلة التالية:

$$p = e^{-\frac{1}{\xi} \frac{N_0}{\sigma_{s,1} N_1} \left(\int \sigma_a \frac{dE}{E} \right)_{\text{eff}}} \quad (22.9)$$

حيث تمثل ξ متوسط لوغاريتم فقد الطاقة لكل اصطدام بالنسبة للمهدىء، كما ورد ذكره في الفصل السابع، المعادلة (25.7).

$$\xi = \ln \frac{E_0}{E} = \frac{\int_{\alpha E_0}^{E_0} \ln \frac{E_0}{E} p(E) dE}{\int_{\alpha E_0}^{E_0} p(E) dE} = \frac{\alpha \ln \alpha}{1 - \alpha} + 1 \quad (23.9)$$

و قيمة α تحسب كما يلي:

$$\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \quad (24.9)$$

الجدول التالي يوضح قيم المقاطع المستعرضة المجهرية لكل ذرة أو لكل جزيء، وكذلك قيمة ξ لعدد من الذرات والجزيئات

الجدول 4.9 قيم σ_s و ξ لبعض العناصر والجزيئات

ξ	σ_s/atom أو σ_s/atom [b]	المادة
-	8.3	U
0.158	4.7	C
1.0	20.5	H
0.725	3.3	D
0.12	3.8	O
0.926	44.8	H ₂ O
0.508	10.4	D ₂ O

بالنظر للجدول سوف يتم استخدام قيم ξ المظللة بالنسبة للثلاث مهندئات المستخدمة وهي الكربون و الماء الخفيف والماء الثقيل.

كما يمكن التعبير عن التكامل الرنيني الفعلى وهو مقياس لامتصاص النيوترون الكلى فى منطقة الرنين بالمعادلة التالية:

$$\left(\int \sigma_s \frac{dE}{E} \right)_{\text{eff}} = 3.9 \left(\frac{\Sigma_s}{N_0} \right)^{0.415} \text{ barn} \quad (25.9)$$

حيث تمثل Σ_s/N_0 المقطع المستعرض العينى لاستطارة النيوترون بواسطة مواد المفاعل بالنسبة لكثافة الوقود فى الخليط. وحيث إنه لا يمكن تجاهل تأثير الأوكسجين فى حالة الاستطارة على نقيض تجاهلنا له فى حالة الامتصاص،

لذا يجب أخذه في الحسبان. هذا وسوف يتم حساب Σ_s/N_0 للأنواع الثلاث من المهدئات على النحو التالي:

بالنسبة لخليط اليورانيوم-كربون، فإن:

$$\frac{\Sigma_s}{N_0} = \frac{N_1 \sigma_s^C + N_0 \sigma_s^U}{N_0} = \frac{N_1}{N_0} \sigma_s^C + \sigma_s^U \quad (26.9)$$

وبالنسبة لخليط اليورانيوم- الماء الثقيل، فإن:

$$\begin{aligned} \frac{\Sigma_s}{N_0} &= \frac{N^{D_2O} \sigma_s^{D_2O} + N^{UO_2} \sigma_s^{UO_2}}{N_0} = \frac{N_1 \sigma_s^{D_2O} + N_0 \sigma_s^{UO_2}}{N_0} \\ &= \frac{N_1 (\sigma_s^{D_2} + \sigma_s^O) + N_0 (\sigma_s^U + \sigma_s^{O_2})}{N_0} = \frac{\frac{N_1}{2} (2\sigma_s^D + \sigma_s^O) + N_0 (\sigma_s^U + 2\sigma_s^O)}{N_0} \\ &= \frac{N_1}{N_0} \sigma_s^D + \sigma_s^U + \left(\frac{1}{2} \frac{N_1}{N_0} + 2 \right) \sigma_s^O \end{aligned} \quad (27.9)$$

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 $\frac{N_1}{2}$. في حين أنه على النقيض N_0 تمثل عدد ذرات الوقود لكل cm^3 ، كما أن المقطع المستعرض للاستطارة بالنسبة لليورانيوم في 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:

$$\frac{\Sigma_s}{N_0} = \frac{N_1}{N_0} \sigma_s^H + \sigma_s^U + \left(\frac{1}{2} \frac{N_1}{N_0} + 2 \right) \sigma_s^O \quad (28.9)$$

وبدلالة معامل التصميم Z ، فيمكننا التعبير عن احتمالية الإفلات من الرنين للحالات الثلاث من المهدئات (H_2O, D_2O, C) بما يلي:

$$p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^C Z} [Z\sigma_s^C + \sigma_s^U]^{0.415}} \quad (29.9) \quad \text{للكربون}$$

$$p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^{D_2O} Z} \left[Z\sigma_s^D + \sigma_s^U + \left(\frac{1}{2}Z + 2\right)\sigma_s^O \right]^{0.415}} \quad (30.9) \quad \text{للماء الثقيل}$$

$$p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^{H_2O} Z} \left[Z\sigma_s^H + \sigma_s^U + \left(\frac{1}{2}Z + 2\right)\sigma_s^O \right]^{0.415}} \quad (31.9) \quad \text{للماء الخفيف}$$

وباستخدام القيم المظلمة بالجدول 4.9 يمكن الحصول على المعادلات التالية:

بالنسبة لمهدئ الكربون:

$$p = e^{-\frac{5.252}{Z} [4.7Z + 8.3]^{0.415}} \quad (32.9)$$

بالنسبة للماء الثقيل:

$$p = e^{-\frac{0.738}{Z} [5.2Z + 15.9]^{0.415}} \quad (33.9)$$

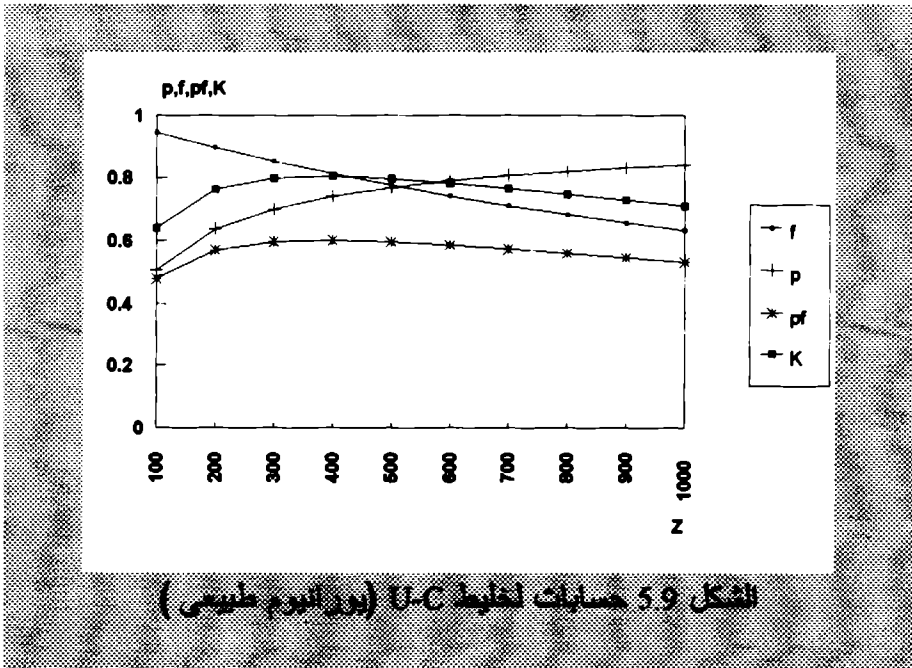
بالنسبة للماء الخفيف:

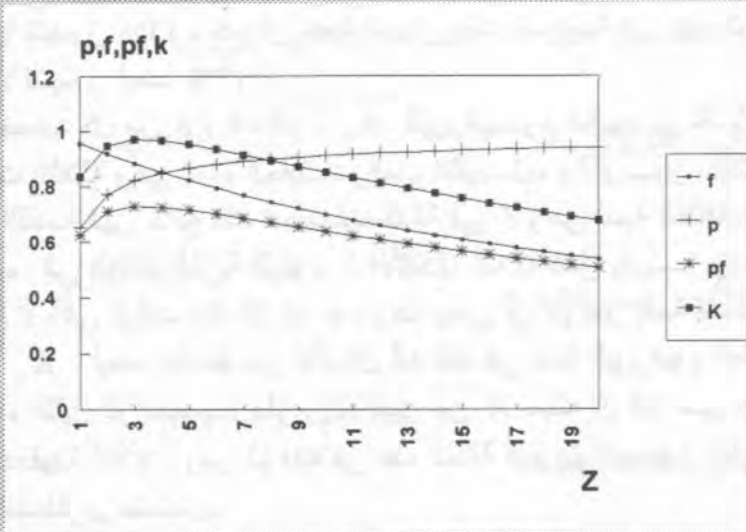
$$p = e^{-\frac{0.094}{Z} [22.4Z + 15.9]^{0.415}} \quad (34.9)$$

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

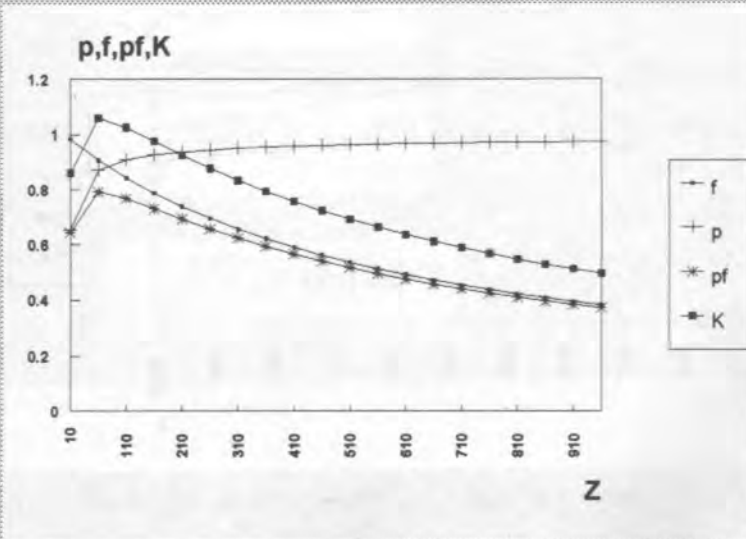
0.87 أو أكبر، والذي يعني أن النيوترونات الممتصة من قبل رنين اليورانيوم يجب الا تتجاوز 13% ، كما أن كمية النيوترونات الممتصة في غير الوقود يجب الا تتجاوز أيضا 13% .

لقد تم حساب كل من p ، f ، pf ، K_{∞} لليورانيوم الطبيعي لكل من المهدئات الثلاثة وهي الماء الخفيف، والماء الثقيل، والكربون. الأشكال الثلاثة القادمة تبين نتائج تلك الحسابات كدالة في Z وهي نسبة الكثافة الذرية للمهدئ إلى الكثافة الذرية للوقود . الأشكال الثلاثة تتفق بأنه بزيادة Z تتناقص f ، في الوقت ذاته تتزايد p ، وهذا يعني أن pf تمر بقيمة قصوى، وكذلك K_{∞} . أيضا يلاحظ من الأشكال أنه فقط في حالة اليورانيوم الطبيعي مع الماء الثقيل تم الحصول على K_{∞} أكبر من 1، حيث إن كلا من f ، p تجاوزت قيمة 87% ، ومن ثم فإنه في هذه الحالة فقط يتم الحصول على تفاعل انشطاري متسلسل.





الشكل 6.9 حسابات لخليط H₂O-UO₂ (يورانيوم طبيعي)



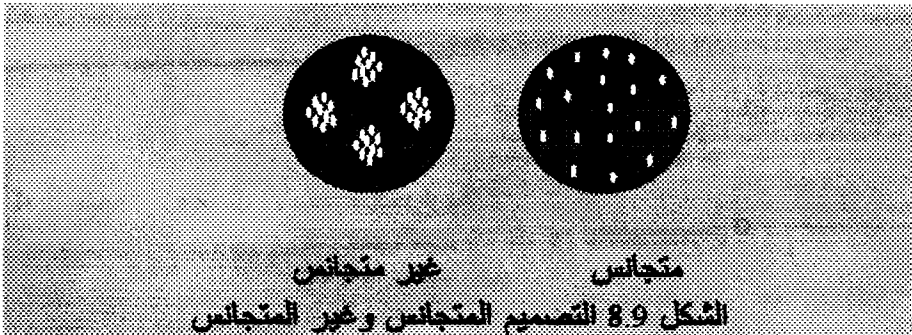
الشكل 7.9 حسابات لخليط D₂O-UO₂ (يورانيوم طبيعي)

الجدول التالي يبين مدى قيم Z التي يتم الحصول فيها على القيمة القصوى لـ K_{∞} وكذلك عما إذا كانت K_{∞} أكبر أو أصغر من 1.

الجدول 5.9 نوعية المفاعلات ومدى ملاءمتها للحفاظ على تفاعل متسلسل مع اليورانيوم الطبيعي

K_{∞}	مدى قيم Z	خليط المفاعل
أصغر من 1	300-500	U-C
أصغر من 1	2-5	H ₂ O-UO ₂
أكبر من 1	50-150	D ₂ O-UO ₂

لقد أوضحنا في السابق أن تصميم الخليط المتجانس Homogeneous يجعل $\epsilon=1$ ، ومن ثم يتم تحييد الانشطارات بسبب النيوترونات السريعة، لذا كان التفكير في التصميم غير المتجانس Hetrogeneous، وذلك بتكوييم Lumping الوقود في تجمعات محاطة بالمهدىء، وخصوصاً في حالة الكربون كمهدىء. أيضاً، بهذا التصميم تزداد احتمالية الإفلات من رنين اليورانيوم، وذلك بسبب وجود النيوترونات في محيط واسع من المهدىء الذي يمكنها من فقد طاقاتها بدرجات كبيرة تمكنها من تجاوز الطاقات اللازمة للامتصاص الرنيني، ومن ثم تقلت هذه النيوترونات من الرنين. وبذلك يمكن الحصول على K_{∞} أكبر من 1. الشكل التالي يوضح الفارق بين 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 متمثلاً فى تثرية اليورانيوم بالنظير يورانيوم-235.

مثال 3.9

اكتب برنامج حاسوبى 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 شيئاً أساسياً لتصميم المفاعلات النووية، وما هذا المثال إلا تأكيد لهذا المفهوم.

لكتابة البرنامج نحتاج إلى المعادلات الأساسية اللازمة لحساب المتغيرات. هذه المعادلات بعد شئ من التحوير للمعادلات ذات العلاقة الواردة فى هذا الفصل يعبر عنها كما يلي:

$$\frac{N_{28}}{N_{25}} = 0.9874 \left(\frac{1}{w} - 1 \right) \quad \text{1- استخدام معادلة التثرية:}$$

$$\eta = \frac{2.44}{1.18 + 0.0047 \frac{N_{28}}{N_{25}}} \quad \text{2- استخدام معادلة } \eta :$$

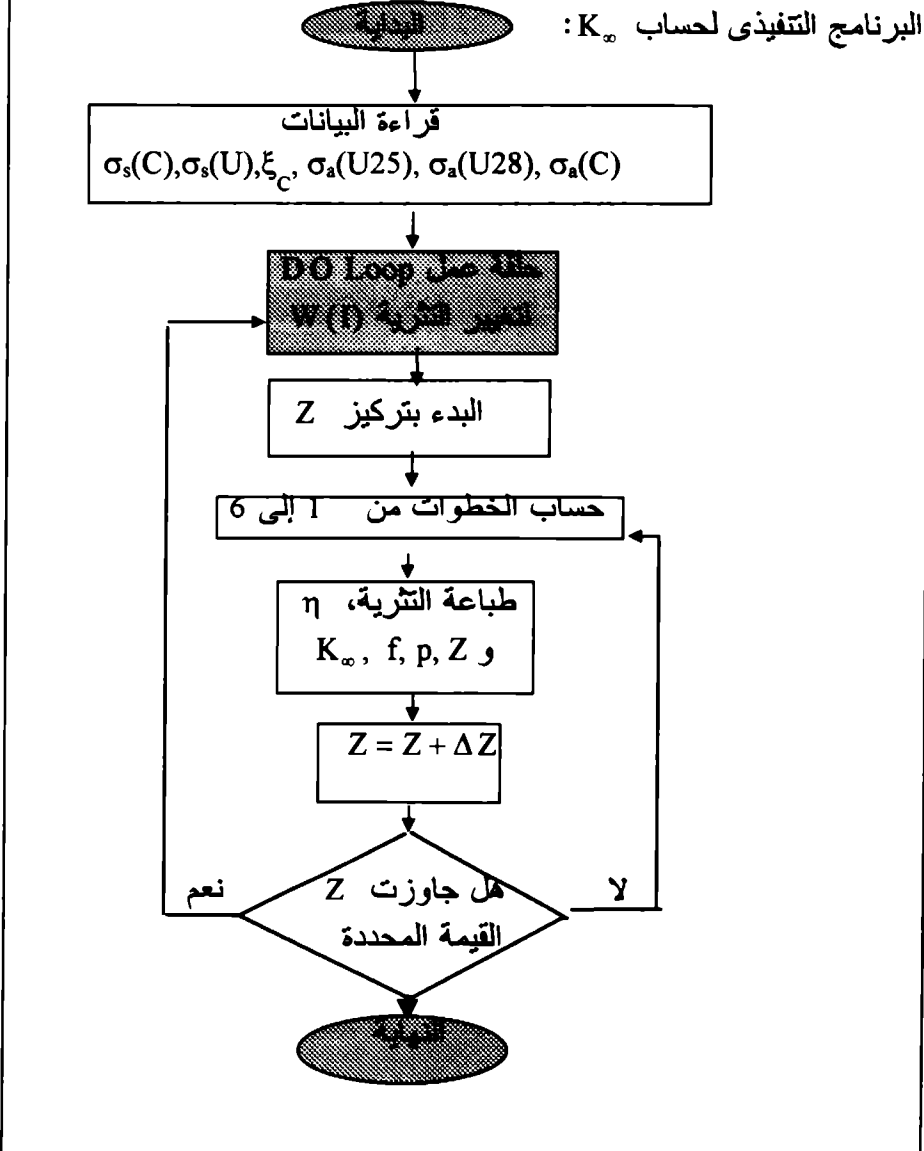
3 - استخدام معادلة المقطع المستعرض الامتصاصى للوقود :

$$\sigma_a^U = \frac{\sigma_a^{25} + \frac{N_{28}}{N_{25}} \sigma_a^{28}}{1 + \frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

$$f = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_a^C}{\sigma_a^U} Z} \quad \text{4 - معادلة معامل الاستفادة الحرارية :}$$

- 5 - معادلة احتمالية الإفلات من الرنين : $p = e^{-\frac{3.9}{\xi\sigma_s^C Z} [Z\sigma_s^C + \sigma_s^U]^{0.415}}$
- 6 - معادلة معامل التضاعف للوسط اللانهائي : $K_\infty = \eta fp$

والآن يمكن كتابة خريطة الانسياب Folw Chart التى تمكن من كتابة البرنامج التنفيذى لحساب K_∞ :



البرنامج الحاسوبي باستخدام لغة الفورتران يبدو كما يلي:

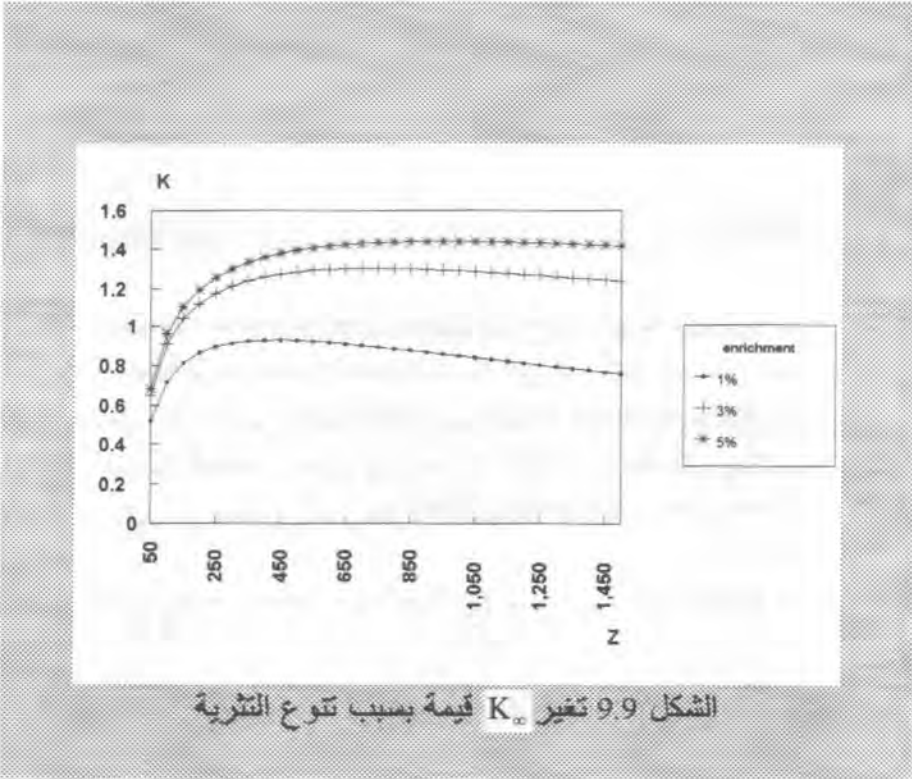
```

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
  RN805=0.9874*(1./W(I)-1.)
  ETA=2.44/(1.18+0.0047*RN805)
  SAU=(SA5+RN805*SA8)/(1.+RN805)
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

```

في المثال السابق تمت كتابة برنامج حاسوبي لحساب قيمة K_{∞} كدالة في Z الممثلة لنسبة تخفيف تركيز الوقود بالمهدىء وذلك لعدد من درجات التثرية باليورانيوم -235. الشكل التالي يوضح نتائج الحسابات لدرجات تثرية هي: 1%، و 3%، و 5%. حيث نرى أنه في حالة تثرية 1% لاتزال قيمة K_{∞} أقل من 1 وبالتالي لا يمكن الحفاظ على تفاعل متسلسل. أما في الحالتين الأخرين فالقيمة تجاوزت 1، وبالتأكيد، كما هو واضح بالشكل، أنه في ظل زيادة التثرية تقل قيمة Z (تقليل نسبة المهدىء للوقود) اللازمة للحصول على

نفس قيمة معامل التضاعف K_{∞} المناظرة للثرية الأقل. وهذا أيضا يوضحانه الجدولان اللاحقان:



الجدول 6.9 القيمة القصوى لـ K_{∞} و Z المناظرة لثرية متنوعة

K_{∞}	الثرية	التركيز Z
0.928751	1%	430
1.302256	3%	730
1.4398822	5%	970

الجدول 7.9 قيم Z المناظرة لقيم K_{∞} القصوى لتثريات مختلفة

5%	3%	1% نثرية	
80-90	100-110	450 ($K_{\infty} = 0.928751$)	$Z \rightarrow K_{\infty}^{MAX(1\%)}$
300-310	750 ($K_{\infty} = 1.302256$)	-	$Z \rightarrow K_{\infty}^{MAX(3\%)}$
950 ($K_{\infty} = 1.4398822$)	-	-	$Z \rightarrow K_{\infty}^{MAX(5\%)}$

لقد تمت ملاحظة حسب العرض السابق أن عملية التهدئة للنيوترونات مع النثرية 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 التي ينتشر فيها النيوترون قبل أن يمتص وهي معرفة بالمعادلة التالية :

$$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \quad (35.9)$$

حيث إن D تمثل معامل الانتشار Diffusion coefficient ، و $\frac{1}{\Sigma_a}$ متوسط

المسار الحر قبل امتصاص النيوترون.

الجدول التالي يوضح القيم المختلفة لـ L^2 لعدد من المهدئات:

الجدول 8.9 L^2 لعدد من المهدئات

L^2 [cm ²]	الكثافة [g/cm ³]	نوع المهدئ
28	1	الماء الخفيف
125	1.1	الماء الثقيل
96	1.85	البيريليوم
364	1.6	الكربون
18	-	اليورانيوم

مثال 4.9

أ- صمم مفاعل كروي من خليط متجانس من اليورانيوم المُثَرَى بنسبة 1.334% مع مهدىء كربون، وذلك بحساب نصف القطر للكرة الحرجة $K=1$

إذا علمت أن :

$$p = 0.7404 \text{ ، و } f = 0.86924 \text{ (أنظر المسألة 11.9 من هذا الفصل)}$$

2 - انبعاج الفيض النيوتروني للكرة Flux Buckling B^2 يعبر عنه

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{R} \right)^2 = \frac{K_{\infty} - 1}{L^2} \text{ بالمعادلة التالية:}$$

ب- أعد التصميم لتثرية 5% وعند $Z=400$.

ج - صمم المفاعل الكروي لخليط من اليورانيوم الطبيعي والماء الثقيل.

د - صمم الكرة مكونة من يورانيوم-235، بحيث تكون حرجة

الحل :

أ-

$$\eta = \frac{2.44}{1.18 + 0.00464078 \left(\frac{1}{w} - 1 \right)} = \frac{2.44}{1.18 + 0.00464078 \left(\frac{1}{.01334} - 1 \right)} = 1.602$$

$$K_{\infty} = \eta fp = 1.602 \times 0.86924 \times 0.7404 = 1.031$$

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، لذا يمكن اعتبار أن $L^2 = L_1^2$ هي 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 - وفي حالة تثرية %5 لنفس قيمة $Z=400$ ، (مع الرجوع إلى المسألة 9.9) فإن:

$$K_\infty = \eta fp = 1.924025 \times 0.95377 \times 0.7404 = 1.3587$$

$$R = \sqrt{\frac{\pi^2 L^2}{\frac{K_\infty}{K} - 1}} = \sqrt{\frac{\pi^2 (364)^2}{1.3587 - 1}} = 19m$$

يلاحظ من هذه الحسابات البسيطة أن المفاعلات المهدئة بالكربون تعد كبيرة الحجم نسبيا وهذا ما تعكسه القيمة الكبيرة نسبيا لطول التباطؤ في الكربون L حسب ما يوضحه الجدول 8.9.

ج - وبالمقارنة ففي خليط من اليورانيوم الطبيعي والماء الثقيل عند قيمة $Z = 60$ ، التى تتاظر القيمة القصوى لـ $K_\infty = 1.05942$ فإن نصف قطر الكرة 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 $K_\infty = \eta = 2.07$ ، كما أن $L^2 = 18 \text{ cm}^2$ ، 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 في 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 (GCR) Gas Cooled Reactors، وتبنت كندا تقنية اليورانيوم الطبيعي مع الماء الثقيل بتصميم مفاعلات الكاندو (CANDU)، في حين تبنت الولايات المتحدة الأمريكية تقنية اليورانيوم المثرى مع الماء الخفيف بتصميم نوعين من المفاعلات وهما مفاعلات الماء المغلي Boiling Water Reactor (BWR) ومفاعلات الماء المضغوط Pressurized Water Reactor (PWR). الجدول التالي يلخص ذلك.

الجدول 9.9 الأنواع الأساسية للمفاعلات

المهدىء	K_{∞}		نوع المفاعل	البلد
	لوقود U طبيعي	لوقود U مثرى		
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 في توكيمات محاطة بالكربون. أما في حالة استخدام الماء الثقيل، فإن الوقود يكون في صورة كبريتات اليورانيوم أو في شكل حبيبات دقيقة من ثاني أكسيد اليورانيوم متوزعة بانتظام في الماء الثقيل في صورة خليط متجانس. أما في حالة الماء الخفيف، فإن الوقود يكون في صورة ثاني أكسيد اليورانيوم وفي 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 قدرة ثابتة، لذا يجب التخلص من الطاقة الناتجة من الانشطار.

الحرارة يتخلص منها من خلال تدوير مبرد في المفاعل .
يتم اختيار المبرد بناءً على :

1 - غرض المفاعل

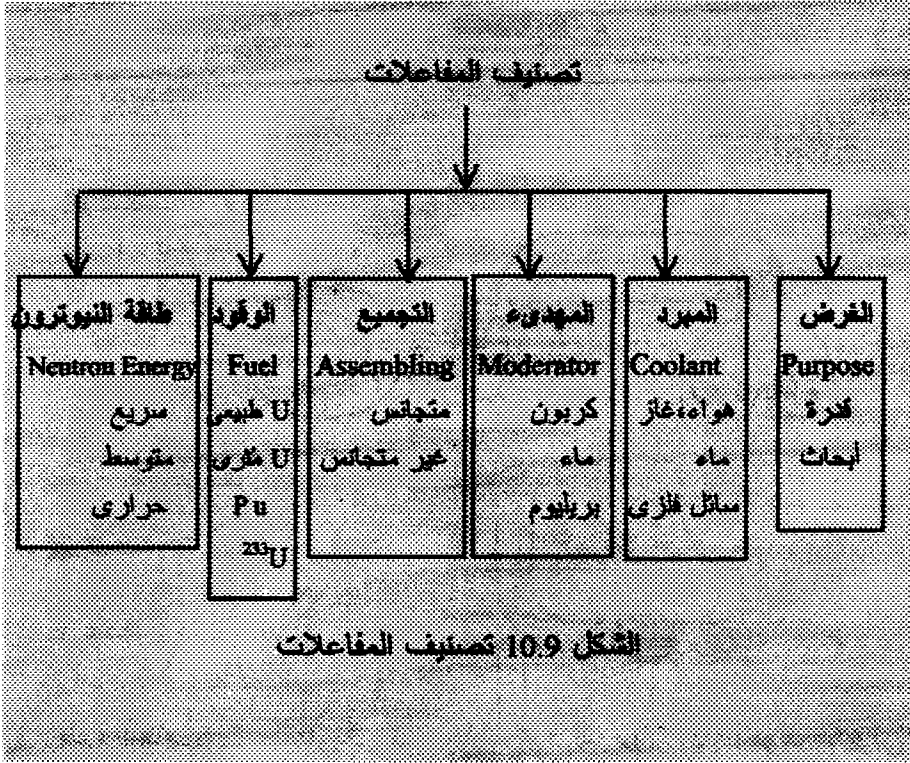
2 - حدود الاعتبارات الهندسية والنوعية

المبرد في ذاته يعتبر شائبة لأنه يساهم في امتصاص النيوترونات دون الانشطار. وعليه، هناك توازن بين كفاءة التخلص من الحرارة و الاقتصاد النيوتروني. نعى بهذا التوازن الآتي:

1 - يمكن الاستغناء عن كفاءة التحويل الحرارى من أجل اقتصاد جيد للنيوترونات (قدرة صغيرة $P=10\text{MW}$ مقابل فيض نيوترونى عال $\phi=10^{17} \text{ cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$) وهو ما نتج عنه مفاعلات الأبحاث Research Reactors، حيث الاهتمام هنا فى الحصول على فيض عال دون الحاجة إلى قدرة ، وبالتالي، فاستخدام مبرد ذى كفاءة تحويل حرارى ضعيفة مثل الهواء يؤدي الغرض.

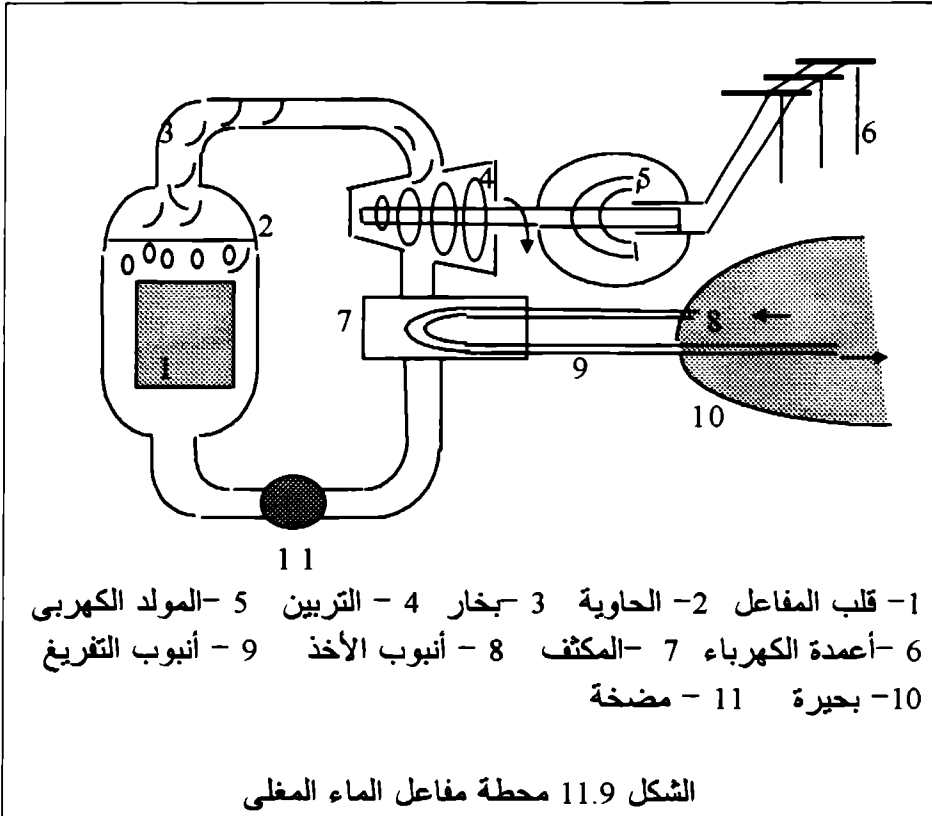
2 - يمكن الاستغناء عن اقتصاد نيوترونى من أجل كفاءة عالية للتحويل الحرارى (فيض نيوترونى أقل $\phi=10^{13} \text{ cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ مقابل قدرة جيدة $P=1000\text{MW}$). وهو ما نتج عنه مفاعلات القدرة Power Reactors . وفى هذه الحالة يُستخدم مبرد ذو كفاءة نقل حرارى عالية حتى ولو كان ماصًا جيدًا للنيوترونات مثل الماء أو مبرد السائل الفلزى Liquid metal .

يمكن تصنيف المفاعلات حسب التصنيفات الواردة فى الشكل التالي:



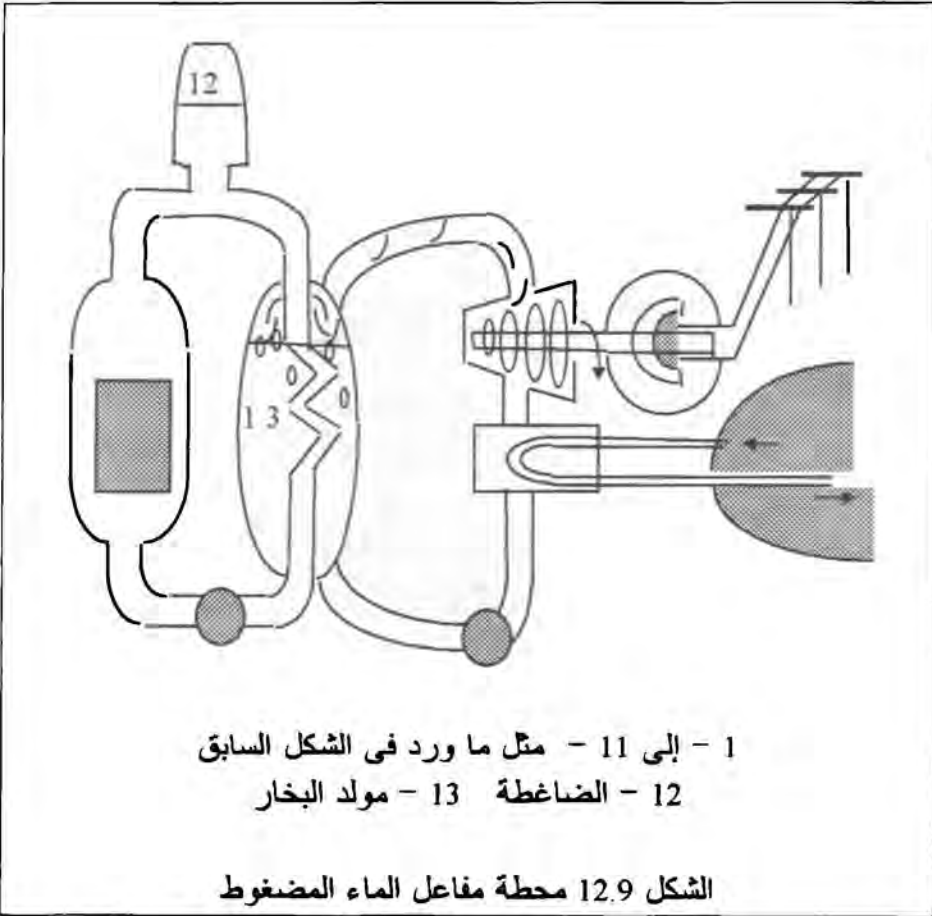
إن التكامل فى التصميم لتحويل الطاقة الحرارية المولدة داخل قلب المفاعل إلى طاقة كهربائية يتطلب تصميم محطة كاملة لذلك الغرض. لعل أشهر المحطات هى محطات مفاعلات الماء المغلى، ومحطات مفاعلات الماء المضغوط. الشكل التالي يوضح التصميم العام لمفاعل الماء المغلى BWR. حيث يتم تولد الطاقة فى قلب المفاعل والتي تسخن الماء فى الحاوية حتى يغلى ثم يمر البخار على التربين ليحرك بدوره الريش الداخلية مسيياً حركة الذراع الذى بدوره يلف داخل المولد الكهربى فى وجود مغناطيس ليولد تياراً كهربياً يسرى فى خطوط الكهرباء. طبعاً، 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 جديد، وهي ما تسمى في مفهوم الديناميكا الحرارية بدورة رانكين Rankin Cycle.



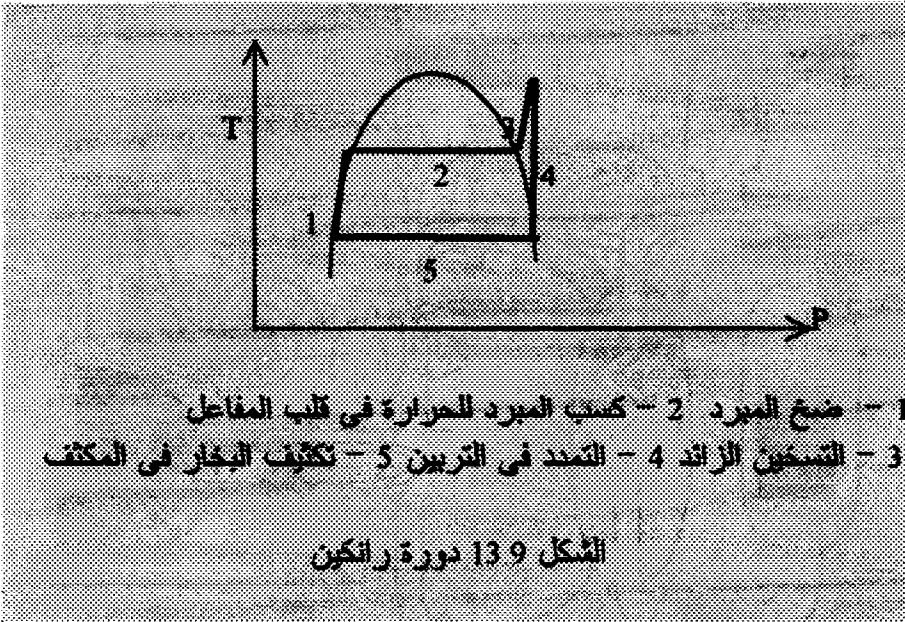
فيما يلي يوضح الشكل (12.9) تصميماً آخر للمحطات النووية والمتمثل فى محطة مفاعل الماء المضغوط Pressurized Water Reactor Power Plant PWR . يتميز هذا التصميم بفصل الحلقة الأولية Primary Circuit عن الحلقة الثانوية Secondary Circuit، وذلك لحماية أكثر وذلك بحصر الإشعاعات فى الحلقة الأولية الخاصة بقلب المفاعل. و لنقل الحرارة وجب ربط الحلقة

الثانية بالأولى عن طريق مولد البخار Steam Generator. هذا وتستخدم الضاغطة لتعديل ضغط الحلقة الأولى 15 Pa (باسكال) والذي في العادة يساوي ضعف ضغط الحلقة الثانية 7 Pa (1000 psi).



يُعبّرُ عن دورة رانكين بشكل يبين العلاقة بين درجة الحرارة T و الإنتروبي S لضغوط التشغيل P . الشكل التالي يوضح تلك العلاقة. حيث يبين الشكل أنه عند المنطقة 1 يتم ضخ المبرد إلى الحاوية من ضغط المكثف إلى

ضغط الحاوية، ثم في 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 في التربين عند النقطة 4، وأخيراً يتم التكثيف بواسطة المكثف عند ضغط أقل (المنطقة 5).



5-9 فيزياء المفاعلات : استاتيكا وديناميكا المفاعلات :

لقد أوردنا في السابق أن المفاعلات بنوعها البحثي والقدرى Power and Research بهما فيض نيوتروني وكذلك يولدان قدرة بمقادير متفاوتة. إنه بتصميم المفاعلات بخليط متجانس من الوقود والمهدىء، يمكن تشكيل ذلك في عدة صور من مكعب إلى كروي إلى إسطواني، وبالتالي يعد من الضروري معرفة كيفية توزيع النيوترونات في 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 لهما خارج نطاق هذا الكتاب.

إن وصف النيوترونات من خلال عمل توازن عليها، وذلك بحساب معدل التغير R على أنه يساوى الفارق بين معدل الإنتاج P ومعدل الفقد L ، وذلك حسب المعادلة التالية:

$$R = P - L \quad (36.9)$$

فإذا تم الوصف استاتيكيًا، فإن معدل التغير R يساوى صفرًا. وتكون المعادلة البسيطة التي تصف انتشار النيوترونات ذات الطاقة الموحدة كدالة في الموقع فقط $\phi(r)$ هي:

$$\nabla^2 \phi + B^2 \phi = 0 \quad (37.9)$$

وهي ما تسمى في العادة بمعادلة المفاعل Reactor Equation، حيث B^2 المسماة بانبعاج الفيض Flux Buckling تمثل المعاملات النووية للوسط Nuclear Parameters، حسب المعادلة التالية:

$$B^2 = \frac{\nu \Sigma_f - \Sigma_a}{D} = \frac{\frac{K_\infty}{K} - 1}{L^2} \quad (38.9)$$

أما ∇^2 تمثل التفاضل الثاني للفيض بالنسبة للموقع وتتنطق "لابلاسيان" Laplacian و لها علاقة بالشكل الهندسي للوسط Geometry. وهي مُعرّفة لبعض الأشكال الهندسية البسيطة كما هو مذكور في الجدول التالي:

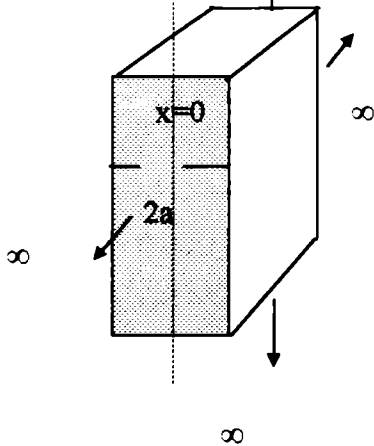
الجدول 10.9 ∇^2 لأشكال بسيطة متنوعة

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	$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} + \frac{d}{dz^2}$

ومن ثم فإن المعادلات هي من الرتبة الثانية وتحتاج لحلها شرطين حديين، في العادة هما التماثل في المركز والذي يعنى أن التفاضل الأول للفيض بالنسبة للمتغير المستقل يساوى صفرًا، والآخر يؤكد أن الفيض عند الطرف الخارجى للمفاعل يساوى صفرًا.

مثال 5.9

اوجد شكل الفيض النيوترونى فى مفاعل على شكل شريحة لانهاية 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 $L^2 = 20 \text{ cm}^2$ ، وأن المفاعل حالته حرجة.



الحل :

نستخدم المعادلتين الرئيسيتين التاليتين:

$$\nabla^2 \phi + B^2 \phi = 0$$

$$B^2 = \frac{v\Sigma_f - \Sigma_a}{D} = \frac{K_{\infty} - 1}{L^2} = 0.025$$

وحيث إن الشريحة لانهاية فى الاتجاهين z, y فعليه تكون المعادلة التفاضلية هي:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + 0.025\phi = 0$$

مع الشرطين الحديين : $\phi(x)|_{x=a} = 0$, $\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=0} = 0$

والتي لها حل:

$$\phi(x) = A \cos \sqrt{.025}x + B \sin \sqrt{.025}x$$

وبتطبيق الشرط الحدي الخاص بالتفاضل يؤدي إلى أن $B=0$ ، ويكون الفيض:

$$\phi(x) = A \cos \sqrt{.025}x$$

في حين أن الشرط الحدي الأول، يمكننا من إيجاد قيمة سمك الشريحة ، وذلك حسب المعادلة التالية :

$$A \cos \sqrt{.025}a = 0$$

والتي تفيد أن : $\sqrt{.025}a = \frac{n\pi}{2}$ لقيم $n=1,3,5,\dots$ ومن ثم فإن a للفيض

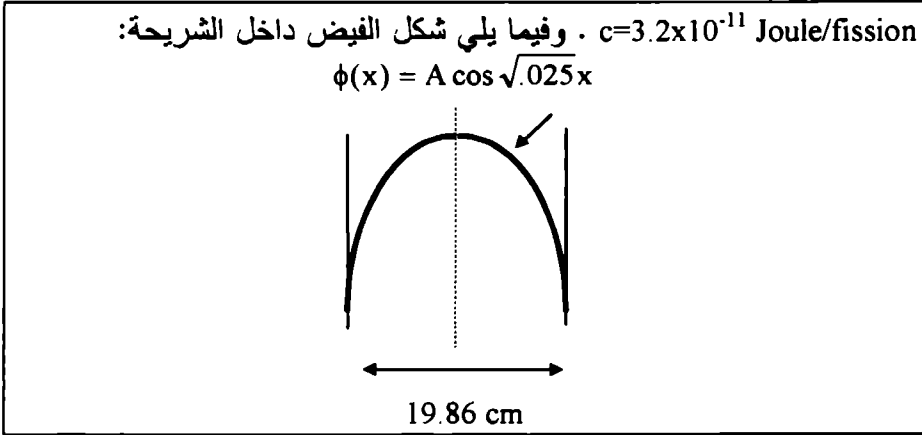
الأساسي Fundamental عندما تكون $n=1$ هي : $a = \frac{\pi}{2\sqrt{.025}} = 9.93\text{cm}$

هذا وتحسب قيمة A من القدرة لكل سم 2 من الشريحة P حسب المعادلة التالية:

$$P = c \int \Sigma_f \phi(x) dx = c \Sigma_f A \int_{-a}^a \cos \sqrt{.025}x dx = 2 \frac{c \Sigma_f A}{\sqrt{.025}} \sin \sqrt{.025} a$$

$$A = \frac{\sqrt{.025}P}{2ac \Sigma_f \sin \sqrt{.025}}$$

حيث إن c تمثل الطاقة الناتجة لكل انشطار وتعطى بالقيمة التالية:



أما في حالة ديناميكا المفاعلات فإن عامل الزمن يبقى في الصورة، والمعادلات النهائية التي تحكم ديناميكية المفاعل تعطى بالمعادلة التالية في حالة الأخذ في الحسبان مجموعة واحدة من النيوترونات المتأخرة . هذه المعادلة تسمى معادلة حركية مفاعل النقطة Point Reactor Kinetics Equation :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P + \lambda C \quad (39.9)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} P - \lambda C \quad (40.9)$$

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 والتي قد تتغير بسبب سحب أو إدخال أعمدة التحكم في المفاعل، أما Λ فهي 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، والتي تصاحبها معادلة مميزة characteristic equation، والتي في العادة تسمى معادلة ساعة المفاعلية Inhour Equation، والتي تُعرف بالمعادلة التالية:

$$\rho = \Lambda \omega + \frac{\beta \omega}{\omega + \lambda} \quad (41.9)$$

والتي يمكن إعادة كتابتها على الصورة التالية:

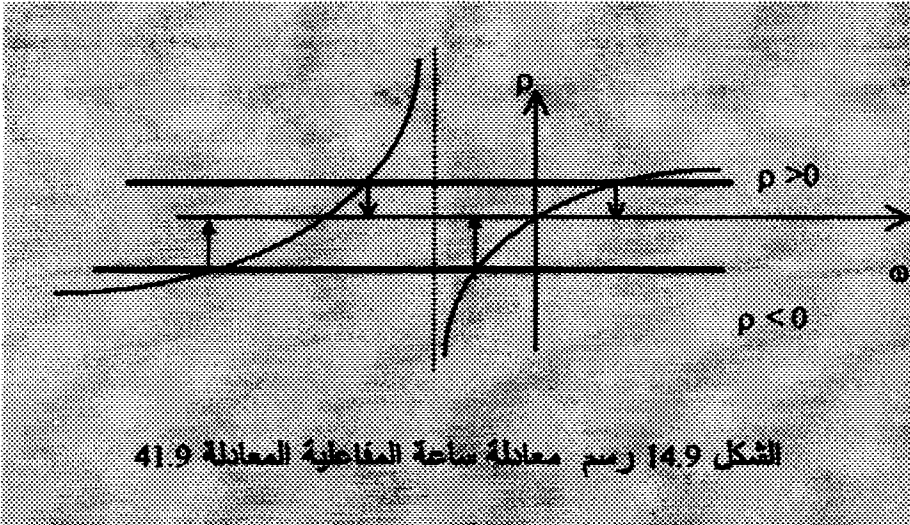
$$f(\omega) = \Lambda\omega^2 + (\Lambda\lambda + \beta - \rho)\omega - \rho\lambda = 0 \quad (42.9)$$

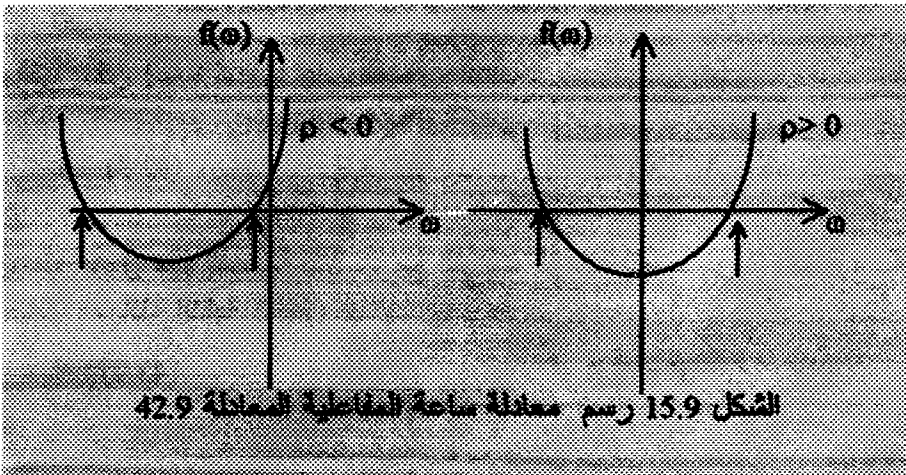
بحيث جذور هذه المعادلة تتناسب مع الثوابت الزمنية لتصرف المنظومة حسب المعادلة التالية:

$$P = \sum_{j=1}^2 A_j e^{\omega_j t} \quad (43.9)$$

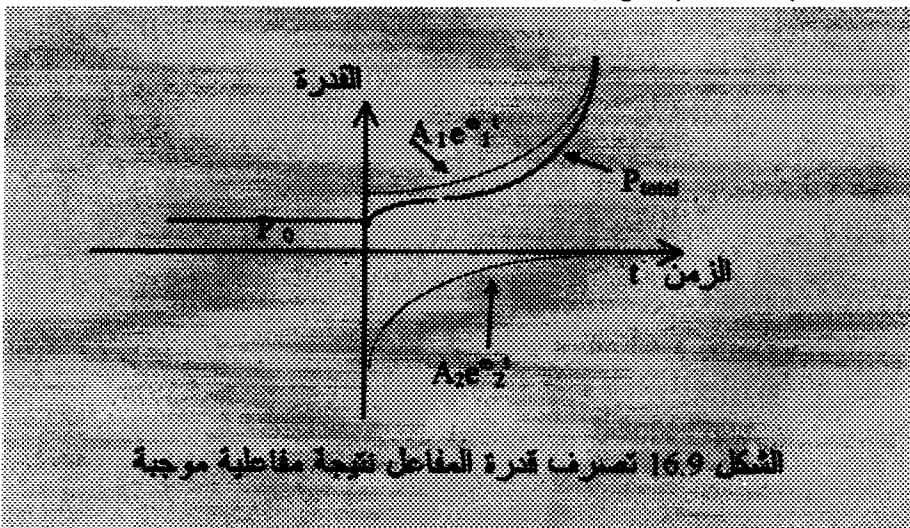
يمكن تعميم المعادلة 42.9 لعدد ست مجموعات في شكل مضموم Compact form، ممثلاً لشكل جديد لمعادلة ساعة المفاعلية .

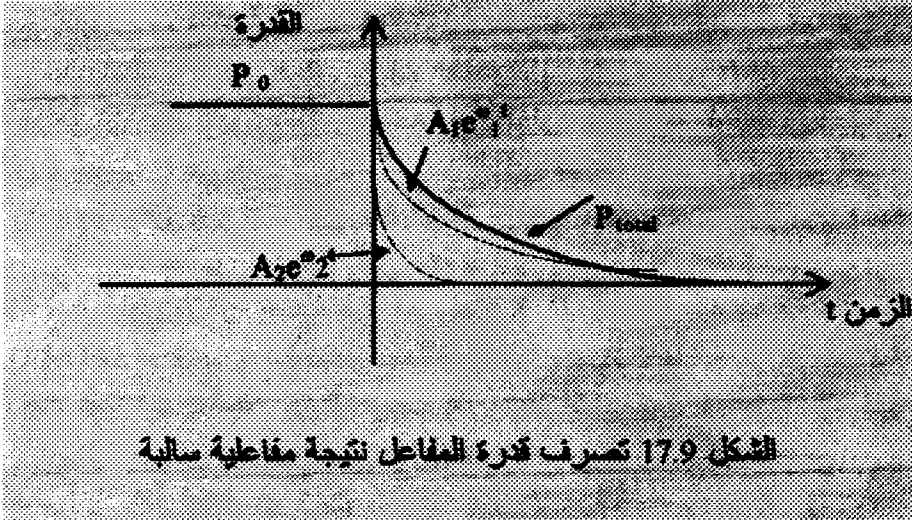
الشكلان التاليان يوضحان بالرسم تصرف كل من المعادلتين 41.9 و 42.9:





الشكلان 14.9 و 15.9 كلاهما يوضحان أن في حالة وجود مفاعلية موجبة (سحب أعمدة التحكم من المفاعل) فإن هناك جذرين لـ ω أحدهما موجب والآخر سالب، في حين أنه في حالة وجود مفاعلية سالبة (إدخال أعمدة التحكم في المفاعل) فإن كلا الجذرين سالب. الجذور السالبة هي تمثل تصرفًا عابرًا، سريعًا ما يزول مع الزمن، في حين أن الجذر الموجب يمثل تأثيرًا إيجابيًا يتزايد مع الزمن. الشكل التالي يوضح تصرف قدرة المفاعل نتيجة مفاعلية موجبة:





6-9 ملخص :

- لا يمكن الحصول على تفاعل متسلسل في وجود اليورانيوم الطبيعي 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 مذى واسع من طاقات النيوترونات من الحرارية وحتى السريعة، وهذا ما يعرضه شكل منحنى المقطع المستعرض الانشطاري 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 (N_1/N_0 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 يعنى أن p ستكبر. لذا يلاحظ أن p ، f تتصرفان عكسيا. هذا يعنى أنه عند تحسين أحدهما بتغير التركيزات، يحدث التأثير العكسى من جانب المعامل الأخر. السبب فى حصول K_{∞} أكبر من 1 بالنسبة لخليط D_2O-UO_2 هو أن f عالية نسبيا حتى قيم عالية من Z وهذا يعطى 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 الامتصاصى العالى) إلا عند قيم صغيرة من $Z=N_1/N_0$ (عند تركيز عالى من الوقود) كما هو موضح بالشكل 6.9، فعلى الرغم من تحسن قيمة f ، إلا 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 نسبيا، 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 (يعنى زيادة Z) فإن ذلك يسبب نقصان قيمة f ، وبالتالي لا يتم الحصول على شرط استمرارية التفاعل المتسلسل.

فى حالة التصميم غير المتجانس تستثمر أيضا الانشطارات بسبب النيوترونات السريعة، مع زيادة قيمة p ، وذلك بسبب العديد من التصادمات فى محيط المهدىء.

أما التثرية وذلك بزيادة تركيز اليورانيوم-235 ، فهى كفيلة بتحقيق شرط استمرارية التفاعل المتسلسل للأنواع الثلاثة من المنظومات وذلك بتصميم متجانس، حيث فى هذه الحالة تتم زيادة كل من f ، η ، وليس p لأن هذه الأخيرة خاصية لليورانيوم-238 ، مع افتراض أن التثرية صغيرة لدرجة أن

اليورانيوم - 238 لا يتغير تركيزه. إن زيادة η هي ذات الأهمية العالية، ومن ثم تكون الأكثر مساهمة في رفع K_{∞} إلى قيمة أكبر من 1.

لقد نتج عن الحلول الهندسية أجيال من المفاعلات تبنتها دول معينة فكندا تبنت مفاعلات الكاندو CANDU ذات وقود يورانيوم طبيعي مع مهدىء الماء الثقيل، في حين تبنت بريطانيا مفاعلات المبردة بالغاز GCR والتي تتعامل مع اليورانيوم المثرى ومهدىء الكربون، في حين تبنت أمريكا مفاعلات الماء الخفيف LWR. وهذه الأخيرة تتوعت تصميماتها بين مفاعلات الماء المغلى BWR و مفاعلات الماء المضغوط PWR. هذا وتعد أستاتيكا وديناميكا المفاعلات من أهم مواضيع فيزياء المفاعلات. التي تمكن من حسابات الفيوض في الأشكال الهندسية المتنوعة للمفاعلات، وكذلك في 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: $\eta=1.8345$ بالنسبة لـ 3%)

2.9 - إذا تم تصميم مفاعل مكون من خليط متجانس من الوقود (يورانيوم-235 و يورانيوم-238) والمهدىء، بحيث كانت احتمالية عدم إفلات النيوترونات البطيئة والنيوترونات السريعة $P_{f1}=P_f \cdot P_i$ 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

$$n = \int_0^{\infty} 4\pi n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$$

للنيوترونات الحرارية هي:

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 هي 9.6%)

6.9 - اشتق معادلة η بالنسبة لوقود اليورانيوم كدالة في درجة التثرية w_0 لليورانيوم-235 .

7.9 - احسب $\sigma_a(U)$ للتثرية 1% و 50% من اليورانيوم-235 باستخدام

$$\sigma_a(U) = \frac{\sigma_a^{25} + \frac{N_{28}}{N_{25}} \sigma_a^{28}}{1 + \frac{N_{28}}{N_{25}}}$$

المعادلة التالية:

8.9 - استخدم أى لغة برمجة حاسوب لبرمجة المعادلة 21.9 (f) والجدول 3.9 (γ)، مع المعادلة 7.9 (η) والمعادلة 10.9 (w₀)، 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 لا تتغير، لأنها لها علاقة باليورانيوم-238، حيث إن التثرية بسيطة ومن ثم فإن تركيز اليورانيوم-238 يكاد يكون هو ذاته

في الطبيعي، لذا يتطلب حسابات η و f ، أيضا استخدم المعادلة الواردة في المسألة 7.9 لحساب المقطع المستعرض لليورانيوم المثرى).

10.9 - ما هي نهايات limits لكل من f و p في حالة ضالة قيمة Z ، وما معنى ذلك فيزيائيا ؟

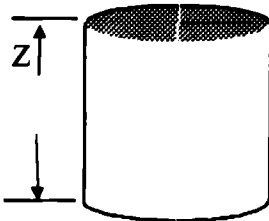
11.9 - إذا كانت القيمة القصوى لاحتمالية الإفلات من الرنين p هي 0.7404 بالنسبة لخليط اليورانيوم الطبيعي مع كربون عند $Z=400$ ، والتي عندها أيضا تكون $K_{\infty}=0.80356$ ، فإذا زادت η بقيمة 20%، احسب التثرية اللازمة لذلك، وكذلك قيمة η ، f ، K_{∞} عند نفس قيمة Z . (افتراض أن p لا تتغير)

(الإجابة: التثرية = 1.344% ، $f=0.86924$ ، $\eta=1.6044$ ،
($K_{\infty}=1.033$)

12.9 - إذا كانت $K_{\infty} = 1.5$ لخليط متجانس من وقود اليورانيوم مثر بنسبة معينة ومهد بماء خفيف . أريد تصميم مفاعل حرج في شكل إسطواني بنصف قطر 100cm، أوجد طول الاسطوانة، إذا علمت أن :

$$B^2 = \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{Z}\right)^2 = \frac{K_{\infty} - 1}{L^2}$$

(إجابة: $Z = 4.07 \text{ m}$)



13.9- في مفاعل إسطواني إذا اعتبر أن الفيض النيوتروني $\phi(r,z)$ يمكن التدليل عليه بفصل المتغيرات بحيث يمكن افتراض أن $\phi(r,z) = R(r)Z(z)$ ، أوجد هذا الفيض النيوتروني باعتبار الشروط الحدية المناسبة وهي تماثل الفيض عند المركز، وانعدام الفيض عند أطراف المفاعل.

- 14.9 - إذا علمت أن $\beta=0.0065$ و $\lambda=0.047$ و $\Lambda =10^{-4}$ ، احسب جذور معادلة ساعة المفاعلية في 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)

- 1-10 تمهيد.
- 2-10 السكان والبيئة والتنمية.
- 3-10 توليد الطاقة الكهربائية.
- 4-10 تحلية المياه.
- 5-10 تطبيقات النظائر المشعة.
- 6-10 الوقاية من التأثير الإشعاعي.
- 7-10 ملخص.

1-10 تمهيد:

هذا الفصل يدلى بتصوير شمولي حول استخدامات الطاقة النووية. فالفصل يتناول إلقاء نظرة عامة على العالم سكانيا وتتمويا وطاقويا وبيئويا، ثم يتم استعراض الحالة الراهنة للعالم لمدى استخدامه للطاقة النووية كمصدر للطاقة. بعد ذلك يتم التعرّيج 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 الإشعاعية. 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 المضىء وهو استخدامات النظائر المشعة فى الصناعة والزراعة والطب تفتح آفاقاً جديدة للتفحص الدقيق لجدوى التعامل مع هذه الطاقة فى ظل التحولات الأمنية اللازمة لحماية الإنسان وبيئته.

" باستخدام تقنية المفاعلات المولدة السريعة، فإن المخزون المتواضع لليورانيوم فى المانيا يعادل طاقياً احتياطى النفط فى ليبيا" (إتحاد كرافت ويرك Kraftwerk Union ، المانيا، 1979) .

إن الدول التى تتمتع بالنفط الأيلى 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

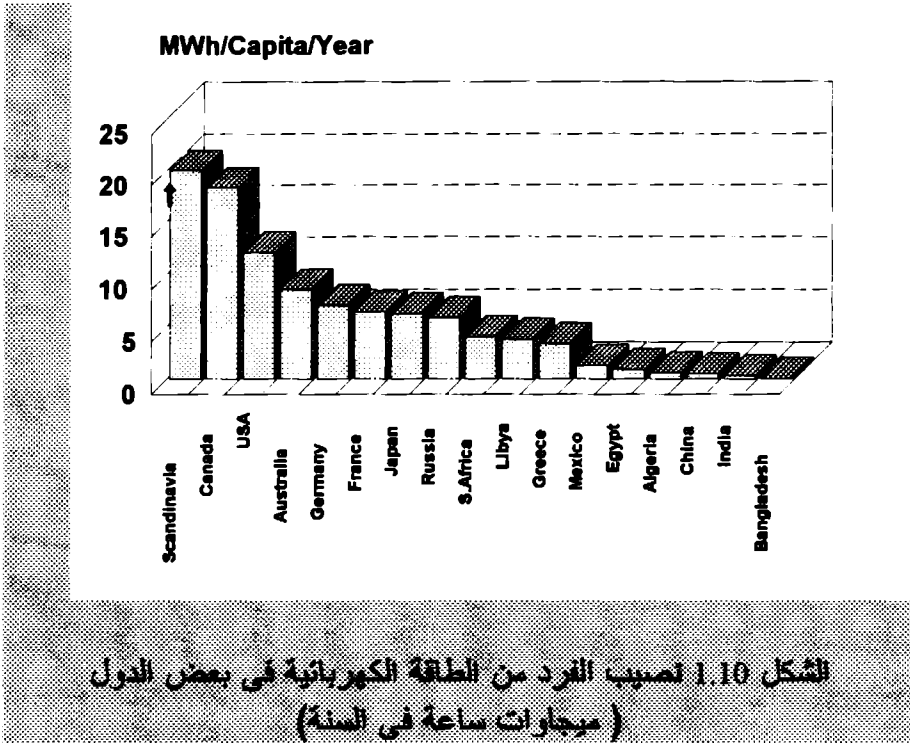
الليل والنهار، لا يؤيد فكرة كون الطاقة الشمسية بديلا مطلقا للنفط. كما أن استغلال طاقة الرياح يشكل فرصة ضئيلة لكون وجود عدد محدود من الوحدات لهذا المصدر والتي تتواجد في مناطق مفعمة بالرياح ذات كثافة سكانية محدودة . كما أن مصادر مساقط المياه غير المستغلة تعد محدودة جدا في العالم، وأيضا فإن الطاقة الجيوحرارية والموجية تقدمان خدماتهما فقط في مناطق نائية من العالم، كما أن طاقة الاندماج النووي تعد في طور الدراسات النظرية، وعليه فإن البديل الحقيقي المتبقى والمقدور عليه تقنيا هو الانشطار النووي. إن الطاقة النووية ومع الاهتمام بالأمان تشكل مصدر طاقة يمكن استغلاله لتوليد الطاقة لإنتاج الكهرباء وكذلك لتحلية مياه البحر وخصوصا في مناطق الجفاف المائي مثل شمال إفريقيا ومناطق الخليج. ليس هذا فقط، بل يمكننا النظر إلى الوجه الآخر من قطعة النقود!، نقصد الاستفادة من الطاقة النووية في الصورة الإشعاعية، حيث إن تطبيقات النظائر المشعة يشكل تولا كبيرا في مجال التطبيقات الزراعية والصناعية والطبية. لذا فإن نظرة اهتمام وتقدير يجب أن توجه إلى هذا المجال في الوطن العربي وأن تتم السيطرة على هذه التقنية من قبل أبناء هذه الأمة لصالح الأجيال القادمة. مع التركيز على استخدام أسلوب توازي (تعدد) البدائل لغرض التخطيط المستقبلي لاحتياجات الطاقة. وعليه سوف يستعرض هذا الفصل جوانب استخدام الطاقة النووية كقدر محتمل في ظل التحولات اللازمة للتغلب على الحذر المصاحب.

10-2 السكان والبيئة والتنمية

الطاقة كمؤشر لتقدم الشعوب

إن أحد المؤشرات التي تعكس درجة تقدم الشعوب المادي يتمثل في مدى استخدام تلك الشعوب للطاقة. فمثلا، إن الدول الصناعية الغربية والتي تشكل حوالي 25% من نسبة سكان العالم تستهلك حوالي 60% من الاستهلاك العالمي للطاقة، حيث إن جل مصادر الطاقة المستغلة ليست محلية بل تستورد من الخارج. في حين أن سكان الدول النامية والتي تشكل حوالي

70% من نسبة سكان العالم تستهلك فقط 15% من الاستهلاك العالمي للطاقة. الشكل التالي يوضح نصيب الفرد من الطاقة الكهربائية في السنة لبعض من دول العالم .



من الشكل يمكن ملاحظة أن أمريكا الشمالية وأوروبا تحضيان بنصيب الأسد في استخدامها للطاقة والذي ينعكس في مدى تقدمها المادي الملحوظ على مستوى العالم .

وفي ظل التطور الحضاري والصناعي الذي تشهده البشرية حالياً فإن مصادر إمدادات الطاقة بدت تحضى باهتمام متزايد. وبدأ التفكير في مصادر الطاقة الحالية ومدى قدرتها على مواكبة مسيرة الحضارة، وجدوى استخدام بدائل أخرى وخصوصاً بعد نمو الوعي البيئي لدى الإنسان وإحساسه بأن الاحتباس الحراري الذي يعانیه الكوكب مرده الاستخدام المفرط لمصادر الوقود الأحفوري وذلك بسبب تراكم غاز ثاني أكسيد الكربون وهو أحد

العوامل التي تنتج عن احتراق الوقود الأحفوري. مثل هذه الظاهرة والتي تساهم فيها الولايات المتحدة وحدها بنسبة 22% ، أدت إلى تنبه العالم لمسدى الخطورة الناجمة عن هذا التهور البيئي والذي يهدد بشكل كبير مظاهر الحياة على كوكبنا، ومن ثم جلس العالم بكيوتو باليابان في أواخر سنة 1997 ف ليخرج بتوصيات متمثلة في تقليص انبعاث الغازات بنسب أقلها 6% على معدل انبعاث سنة 1990.

عوامل تعكس أهمية استخدام طاقات موازية أو بديلة :

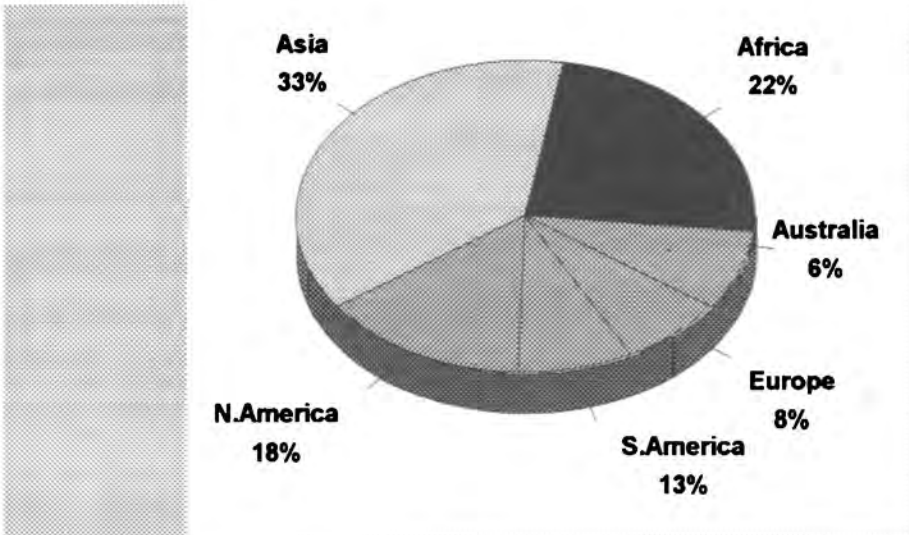
لإدراك مدى أهمية وجود مصدر جديد للطاقة هناك العديد من العوامل التي يجب أن يعتد بها. وهذه العوامل هي:

أولاً: التعداد السكاني والاكتضاض السكاني:

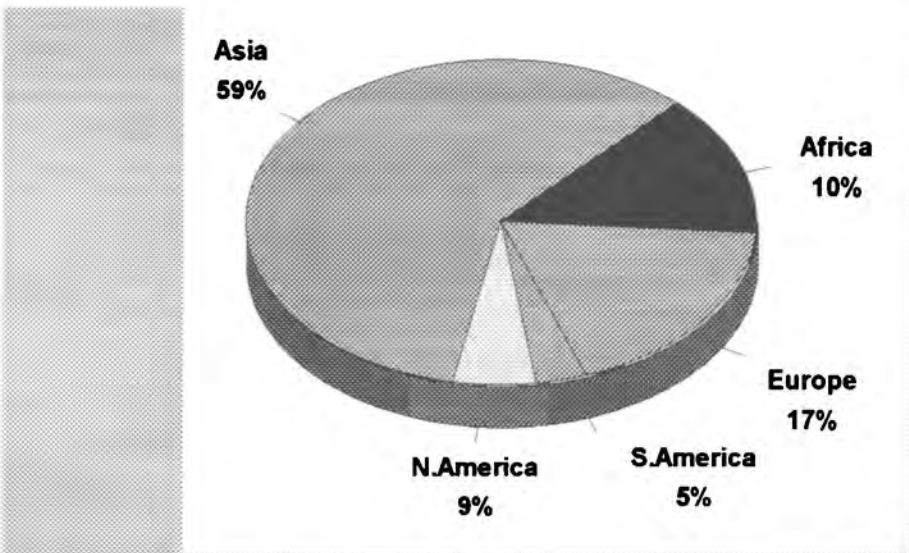
إن التعداد السكاني في تزايد سنة بعد سنة ونسب النمو تراوحت بين 2% إلى 1.4% منذ الستينيات وحتى التسعينيات حسب إحصائيات الأمم المتحدة. كما أن الدول النامية والتي تعد إفريقيا أحد أركانها ستحضى بالنصيب الأكبر في سكان العالم الذي سيبلغ حوالي 8 بليون نسمة مع سنة 2020 . كما أن الاكتضاض السكاني على مستوى القارات يمكن احتسابه من الأرض المتاحة وعدد السكان القاطنين.

من حيث الأرض، فإن الشكل 2.10 يوضح التوزيع النسبي للأرض كقارات . كما أن عدد سكان العالم موزع على النحو الموضح بشكل 3.10.

لو أردنا حساب مؤشر مقدار اكتضاض القارات وذلك بقسمة نسبة عدد السكان إلى نسبة الأرض (مؤشر الاكتضاض = نسبة السكان/نسبة الأرض المتاحة) لتحصلنا على الجدول 1.10:



الشكل 2.10 التوزيع النسبي للأرض المعمورة بالسكان



الشكل 3.10 التوزيع السكاني 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 وهى إفريقيا والأمريكتان متساو، كما أن اكتضاض الفئة الثانية آسيا وأوروبا متساو أيضا وكلاهما مكتضتان أربع أضعاف اكتضاض الفئة الأولى . كما يلاحظ أن أستراليا ضعيفة الاكتضاض.

ثانياً: الفاعلية الاقتصادية:

تشير معظم الإحصاءات إلى أن الدول النامية ستكون أكثر فاعلية اقتصادياً بعد عام 2000 ، ويمكن إرجاع ذلك إلى أن الأغلبية من سكان العالم تتركز فى الدول النامية.

ثالثاً: الطلب على الطاقة :

إن زيادة النمو السكانى وكذلك زيادة الفاعلية الاقتصادية للعالم يـؤدى إلى حتمية زيادة الطلب على الطاقة. وهذا ما تشير إليه الإحصاءات ، حيث يزيد الطلب على الطاقة عالمياً من 11 جيجا طن مكافئ نفط فى سنة 1990 إلى حوالى 20 جيجا طن مكافئ نفط سنة 2020 بنسبة زيادة حوالى 50% كل عشر سنوات ، بحيث يكون للدول الصناعية النصيب الأكبر تليها الدول النامية. كما أن هناك مؤشراً جيداً لإدراك مدى الاستفادة من هذه الطاقة ، هذا المؤشر هو شدة الطاقة ، والذي يعكس كفاءة استخدام الطاقة، الجدول التالى يبين ذلك.

الجدول 2.10 شدة الطاقة Kgoe/\$ (كيلوجرام مكافئ نفط/دولار)

سنة 2020	سنة 1990	
0.202	0.351	الدول الصناعية
0.283	0.409	الدول النامية

يلاحظ من الجدول أن الكفاءة في استخدام الطاقة سوف تزداد وبالإمكان إرجاع ذلك إلى التوقعات بشأن ارتفاع أسعار الطاقة الناتج عن محدودية المخزون من مصادر الوقود الأحفوري وكذلك إلى الاستخدام الأمثل للطاقة للتقليل من التأثيرات السلبية على البيئة.

رابعاً : البيئة :

إن إنتاج واستخدام الطاقة من المصادر التقليدية أدى إلى إحداث تأثيرات سلبية على البيئة. فالتلوث البيئي أصبح واقعاً ملموساً. الجدول 3.10 يوضح مقدار انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون من الوقود الأحفوري لسنة 1990 والمقادير المتوقعة سنة 2020. إن غاز ثاني أكسيد الكربون هو أحد العوامل الرئيسية التي تتسبب في تغيير مناخ الأرض فهو يتراكم في طبقات الجو العليا ويعمل كعاكس لأشعة الشمس المنعكسة من على سطح الأرض مما يؤدي إلى ظاهرة الاحتباس الحراري.

الجدول 3.10 معدل انبعاث ثاني أكسيد الكربون جيجاطن /سنة

2020	1990	
3.0	2.9	الدول الصناعية
1.3	1.3	الكتلة الشرقية
7.2	1.7	الدول النامية
11.5	5.9	العالم

كما يلاحظ من الجدول أن معدل انبعاث الغازات يتضاعف فى سنة 2020 عنه فى سنة 1990 عاكسا ما طرح سابقا من تضاعف الاحتياج للطاقة خلال نفس الفترة الزمنية ، والذي يستتج منه أن ذلك سيحدث إذا ما أستمريت الدول فى تبنى نفس مستوى الاستخدام للوقود الأحفورى المسبب لتلك الانبعاثات. إن ما أشرنا اليه سابقا من نتائج اجتماع كيوتو باليابان، والذي التزمت فيه كثيرا من الدول لتخفيض مستوى الانبعاثات فمثلا التزمت الولايات المتحدة الأمريكية بتخفيض ما نسبته 6% (والتي تملصت منه مع بدايات القرن الواحد والعشرين خلال إدارة بوش الابن) عن مستوى سنة 1990 إلا دليل على التأكيد على أحد أمرين أو كلاهما وهما التحوطات الأمنية المبتكرة اللازمة فى التقنية الأحفورية أو استخدام بدائل طاقة أخرى.

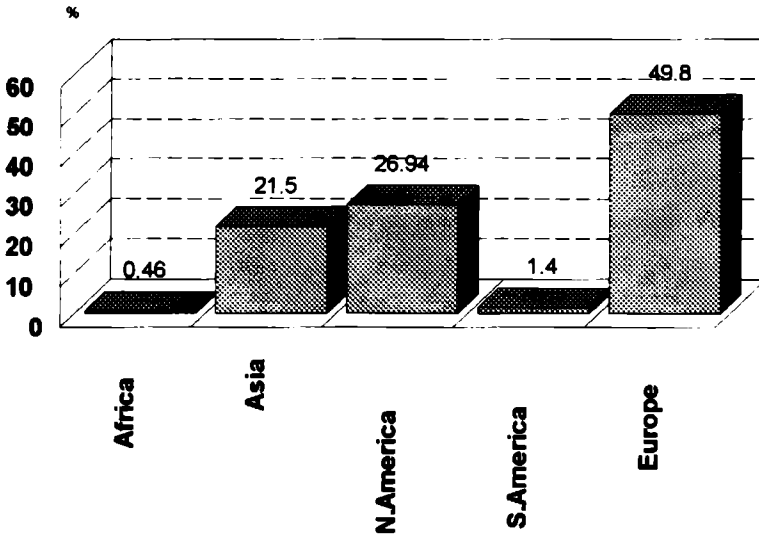
إن القيود البيئية والرغبة فى التنمية تتطلب النظر فى استخدامات بدائل لمصادر الطاقة الأحفورية أو على الأقل مصادر موازية للمصادر الأحفورية (تساهم بالتوازي فى توليد الطاقة). ولعل البديل الأوفر حظا من حيث توفر التقنية اللازمة هى الطاقة النووية .

10-3 توليد الطاقة الكهربائية :

عالميا فإن 15% من دول العالم تستخدم الطاقة النووية ، كما أن هذه الدول المستغلة للطاقة النووية تستخدم نسبة 28% كطاقة نووية من مجمل إنتاجها من الطاقة. ومن مجمل الطاقة المستخدمة فى العالم فإن حوالى 17% هى طاقة نووية . وعلى مستوى الدول فإن فرنسا تستغل 76.4% من احتياجاتها نوويا .

إن الاستخدام المتوازي للعديد من البدائل يعد أحد أهم الأساليب للتعامل مع التقنيات والتآلف معها . كثيرا من الدول ذهبت هذا المنحى فمثلا ومع بدايات القرن الواحد والعشرين فإن اليابان تستخدم حوالى 33.8% نوويا ،

والولايات المتحدة 19.8% نوويا ، والباكستان تسهم بحوالي 1.7% . فى حين أن إفريقيا ليس لها إلا ما تساهم به جنوب إفريقيا من خلال محطتين نوويتين واللّتين تشكلان نسبة 6.7% من الطاقة المولدة بدولة جنوب إفريقيا. هذا وتشير التقديرات الفرنسية فى الثمانينيات من القرن العشرين إلى أن سعر الكيلوات ساعة من الكهرباء المولدة نوويا يبلغ 30% من تكلفة التوليد باستخدام النفط ويبلغ 60% من تكلفة التوليد باستخدام الفحم . إن ذلك بالتأكيد سيوفر عملة يمكن الاستفادة منها فى مواضع أخرى لصالح التنمية. الشكل التالى يوضح نصيب كل قارة كنسبة مئوية من عدد محطات القدرة 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 النووية من مجمل الطاقة النووية المولدة فى دول العالم.

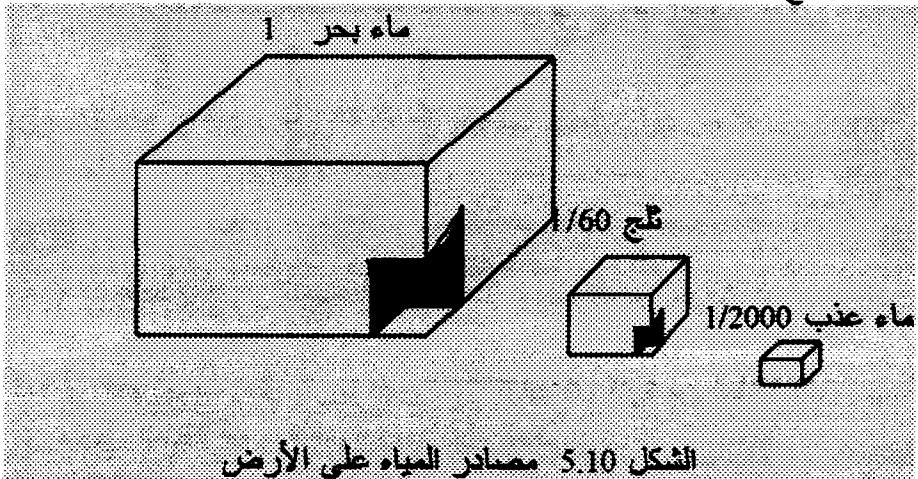
الجدول 4.10 نسب الطاقة النووية من مجمل الطاقة النووية المولدة عالميا
(351327 MWe) سنة 2001

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، والتي تعكس تقدمها النسبي مقارنة بباقي دول إفريقيا، حيث تحضى جنوب إفريقيا إلى جانب تملكها لمحطات قدرة بتملكها إلى مراكز تثرية الوقود وتصنيعه وتخزينه في منطقة بيلندابا. كما تحضى عدد من دول إفريقيا بعدد من مفاعلات الأبحاث في جنوب إفريقيا و ليبيا والجزائر ومصر وغانا والكونغو.

4-10 تحلية المياه :

بالنظر إلى الشكل التالي نرى مصادر المياه على الأرض حيث يغطي البحر ثلاثة أرباع الكرة الأرضية.



تعد الدول الإفريقية المطللة على الصحراء الكبرى من أكثر الدول التي تعلنى 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 الآخر 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 الكهربائية. 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 الكهربائية.

التكلفة المقارنة للطاقة :

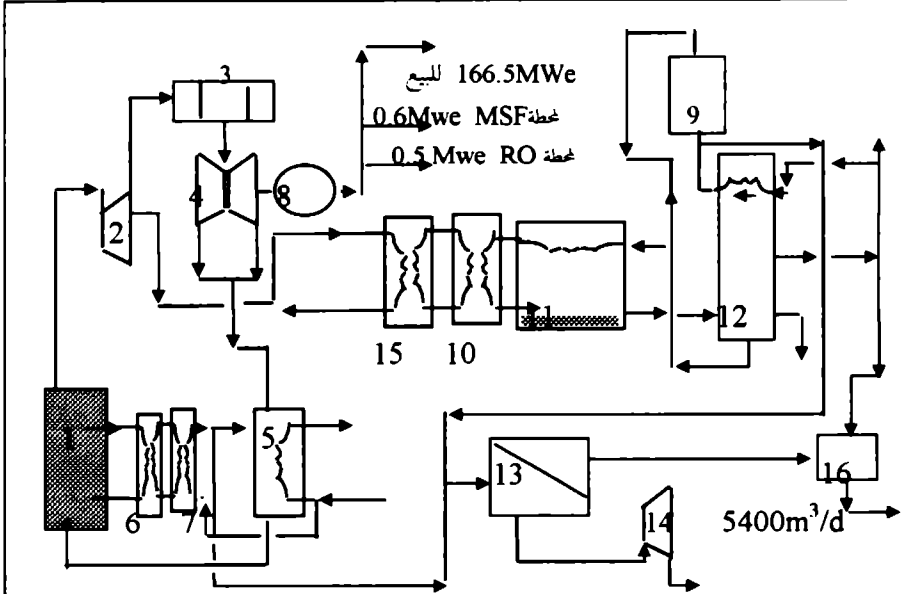
يوضح التحليل الاقتصادي أن تكلفة الطاقة الكهربائية اللازمة لمحطة التحلية لكل من خيارات الوقود الأحفوري والنووي تعد متقاربة بصفة عامة ، وتعتمد التنافسية على حجم المحطة، حيث تعد المحطات النووية الكبيرة (900 ميجا وات) ذات أفضلية على نظيرتها ، في حين تتساوى التكلفة بالنسبة للمحطات متوسطة القدرة (300 - 600 ميجاوات). أما بالنسبة للمفاعلات الصغيرة (50 ميجاوات) فإن محطات الوقود الأحفوري (محركات الديزل) تتميز اقتصاديا. أما في حالة المحطات الحرارية وحيدة الغرض (الحرارة) فإن تكلفة الطاقة تعد متقاربة لكلا البديلين. هذا ويشكل تكلفة عنصر الطاقة ما يوازي 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 في 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 الأحفوري وأيضا ذا جدوى فنية، كما يعد كذلك منافسا من الناحية الاقتصادية للوحدات المتوسطة والكبيرة المندمجة في نظام الشبكة الكهربائية. وتعد محطات توليد الكهرباء النووية الكبيرة والمندمجة في نظام الشبكة الكهربائية والتي توفر الكهرباء لوحدات التحلية-الموزعة في مواقع متعددة- والعامله بالتناضح العكسي أكثر الخيارات أفضلية من حيث التكلفة.

عدد من الدول ولدت الخبرة الجيدة في 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 التالي يوضح شكلا توضيحيا للمنظومة الهندية .



1- المفاعل 2- تربين عالي الضغط 3- فاصل الرطوبة والمسخن المبدئى 4- تربين
ضعيف الضغط 5- مكثف المحطة 6- حلقة تبريد المهدى/الماء 7- حلقة تبريد
ماء البحر/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 المنتج

الشكل 6.10 منظومة نووية لتزويد الطاقة اللازمة لمحطات تحلية متنوعة

10-5 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، وأيضاً، 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 أيضاً دراسة تأثير علف الأبقار على إنتاجية الحليب، وكذلك تطبيق تقنية الحشرات العقيمة لمكافحة ذبابة تسمى tsetse (SIT-Sterile Insect Technique) ، وأيضاً، مكافحة ذبابة الفاكهة. كما يتم دراسة تأثير الكيماويات الزراعية ومخلفاتها فى المحاصيل الزراعية والغذاء والحيوانات عن طريق تحليل محتواها من البروم والكلور، وأيضاً 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 مئرى من الغذاء المعالج بالإشعة على مستوى العالم حتى سنة 1999.

مجالات الصحة والطب النووي :

بعض من هذه النشاطات تتمثل في: تطبيقات تقنية تحليل المناعة الإشعاعي (Radioimmunoassay- RIA)، و استخدام مصورات جاما Gamma camera في التشخيص. هناك مجهودات كبيرة بمساعدة الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA ومنظمة الصحة العالمية WHO في نشر تقنيات الطب النووي في التشخيص والعلاج في العديد من الدول و كذلك إنتاج مستحضرات صيدلانية إشعاعية.

مجالات أخرى:

هناك تطبيقات أخرى في مجالات متنوعة فعلى سبيل المثال؛ تستخدم التقنيات النووية في تقدير المخزون الجوفي للمياه، وكذلك في التقيب 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 الإشعاعي الطبيعي للأنابيب الناقلة للنفط. تستخدم كذلك تحليلات التركيب المادى باستخدام المعجلات (Elemental Analysis)، وأيضا، هناك دراسات عن التطبيقات الصناعية مثل الحساب الدقيق لسلك القطع المدرفلة، وحساب زمن التخليط المتجانس للمواد الصناعية.

6-10 الوقاية من التأثير الإشعاعي:

النفائيات الإشعاعية:

إن الجانب الذى يحذره الناس من جراء استخدام الطاقة النووية بجميع صورها هو التعرض الإشعاعي وإدارة النفائيات. 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

التي تعمل بالفحم 25% من ثاني أكسيد الكربون زيادة على قيمته الطبيعية علاوة على عشرة أمثال ثاني أكسيد الكبريت الموجود بالطبيعة. كما أن المحطة النووية تنتج 30 طنا من الوقود المستهلك سنويا . وللمقارنة فإن الولايات المتحدة تنتج سنويا 3 آلاف طن من الوقود المستهلك سنويا يتم معالجتها ودفنها بطرق تكنولوجية متقدمة في حين أن محطات الوقود التقليدية التي تعادلها في القدرة ينتج عنها حوالى 300 مليون طن من المخلفات الكيميائية الأكثر خطورة على البيئة. كما أن هاجس النفايات قد ينسب إلى الدول التي لها عدد كبير من المحطات النووية ولكن في حالة الدول محدودة العدد فإن المخلفات لا تشكل هاجس رعب من استخدام الطاقة الذرية . هذا وأن الدول الكبرى الممثلة لعدد كبير من المحطات تتجه إلى تقليص حجم مخلفاتها النووية خلال السنين القادمة عن طريق الدراسات والبحوث المستمرة.

إن النفايات المشعة تعرف على أنها 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 الأسلحة النووية.
- 4 - إزالة تلوث المنشآت النووية.
- 5 - الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية فى مجالات الطب والزراعة والصناعة والبحوث.

كما تتنوع النفايات المشعة وتأخذ ثلاث صور هي؛ صلبة، و سائلة، وغازية ويمكن تبويبها من خلال مجموعتين:

- 1 - 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 الإشعاعي كما يلي:

- 1- نفايات منخفضة المستوى الإشعاعي.
- 2- نفايات متوسطة المستوى الإشعاعي.
- 3- نفايات مرتفعة المستوى الإشعاعي.

إدارة النفايات:

وتشمل تداول ومعالجة وتهيئة ونقل وتخزين والتصرف النهائي للنفايات مع تحقيق الهدف الأساسي المتفق عليه وهو الحفاظ على سلامة الأفراد والبيئة من مخاطر هذه النفايات في الحاضر والمستقبل. وفي كل الأحوال فإن التوثيق لكل العمليات الخاصة بإدارة النفايات يعد أمراً أساسياً، بالإضافة إلى التدريب الجيد للقائمين على هذا العمل، مع الرقابة الإشعاعية، وكذلك وجوب التبادل المعلوماتي غير المحظور بين كل الدول لضمان سلامة الإنسان والبيئة.

إدارة النفايات منخفضة ومتوسطة المستوى الإشعاعي:

لقد أصبحت التقنيات المتبعة في معالجة وتداول والتحفظ الآمن لتلك النفايات، حتى يضمحل ما بها من مواد مشعة، أكثر نضوجاً وتتمثل في:

- 1 - الكبس لتقليل حجم النفايات الصلبة غير القابلة للحرق.
- 2 - حرق الأوراق والملابس والمصفيات الملوثة إشعاعياً.
- 3 - الترسيب الكيميائي والترشيح والبخر الحراري والتبادل الأيوني لمختلف السوائل، ثم تثبيت الرواسب المشعة في كتل مصلدة في خلائط إسمنتية أو في الإسفلت أو في 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 الإشعاعي ووضع قواعد وأسس للوقاية الإشعاعية.

أنواع التعرض الإشعاعي:

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 في:

1 - قياس الفاعلية الإشعاعية (Activity (A) ، وهي معدل انحلال النوى، والتي تقاس بالبيكريل Bq والكوري Ci.

2 - قياس التآين في الجو وهو ما يسمى بالتعرض (Exposure (X) والذي يقاس بالروتجن (R) Rontegen أو بوحدة Coulomb/Kg. (يُحتاج إلى 34 eV لتكوين أيون).

3- قياس الجرعة الممتصة (Absorbed Dose (AD) والتي تقاس بالوحدة الكلاسيكية rad أو بالوحدة العالمية Gy والتي تناظر الطاقة الممتصة Joule لكل كتلة Kg.

4- الجرعة المكافئة والتي تعنى بالتأثير البيولوجي أو ما تسمى بـ (Biological Equivalent Dose (BED)، وهي 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 جزءاً بسيطاً من طاقتها في مدى قصير مثل مدى خلية إنسانية. وعلى عكس من ذلك هناك جسيمات أخرى مثل ألفا تفرغ طاقتها في مدى قصير جداً، وعليه فإن التأثير البيولوجي لجسيمات ألفا بقيمة 1 rad أكثر خطورة من نفس الجرعة لجسيمات بيتا أو جاما. وعليه هناك معامل Factor يتم به تقدير هذه الجرعات والذي يعتمد على نوعية الإشعاع ويسمى بعامل النوعية Quality Factor Q، كما أنه هناك معامل آخر لتقدير الجرعة المكافئة للجسم كله Whole Body Equivalent Dose والذي يعتمد على طبيعة العضو المعرض للأشعة، وأخيراً هناك معامل ثالث لتقييم نسبة المخاطرة Risk Factor . الجدول التالي يوضح هذه العلاقات.

في الجدول 6.10، تم افتراض جرعة ممتصة قدرها 0.025 Gy على اعتبار أن معامل نوع الإشعاع يساوي 20 بالنسبة لألفا والذي نتج عنه جرعة مكافئة 0.5 Sv وباعتبار العضو المعرض هو الرئة، فتم اعتبار المعامل المناظر 0.12 ، مما نتج عنه جرعة كاملة للجسم تساوي 0.06 Sv ، وأخيراً، باعتبار نوع المرض على إنه سرطان قاتل، فنتج عن ذلك نسبة المخاطرة بقيمة % 0.6 .

الجدول 6.10 تقدير الجرعة المناسبة

	F3		F2		F1-Q	
نسبة المخاطرة %		الجرعة المكافئة للجسم Sv		الجرعة المكافئة Sv		الجرعة الممتصة Gy
0.6%	مرطبان قتل 10	.06	الرئة 0.12	0.5	α 20	0.025

هذا وينقسم التعرض للإشعاع إلى التعرض المهني والتعرض الطبي والتعرض للجمهور، ومن ثم هناك حدود للجرعات، فهناك حدود للجرعات خاصة بالمهنيين و أخرى خاصة للجمهور كما هو مدون بالجدول التالي:

الجدول 7.10 حدود الجرعات المسموح بها

الجمهور	المهني	النوع
1 mSv	20 mSv	جرعة فعالة في السنة
15 mSv	150 mSv	جرعة مكافئة لعدسة العين في السنة
50 mSv	500 mSv	جرعة مكافئة للجلد في السنة

الوقاية الإشعاعية في الممارسات المطلوبة:

لأداء عمل ما ، يجب تبرير الممارسة أو العمل المطلوب . وفي حالة تبني الممارسة وتبريرها يجب تقرير أفضل السبل لاستخدام الموارد والإمكانات للتقليل من مخاطر الإشعاعات، مع توفر نظام الوقاية الإشعاعية في حالات 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 في التدريب الجيد ، وإيجاد كادر إدارى رسمى وإقامة الأساس العملى لوقاية من لهم علاقة بالعمل الإشعاعى من خلال اختبار المصدر الإشعاعى، و استخدام التدريب 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 الإشعاعية المرجعية متمثلة فى مستويات التسجيل ، ومستويات الفحص ، ومستويات التدخل .
- 6- تقويم الجرعات .
- 7- الإلتزام بالمعايير الوقائية المطلوبة.
- 8- حفظ السجلات.
- 9- التخطيط للطوارئ.

المسح الإشعاعى وشبكات المراقبة الإشعاعية:

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 الإشعاعية 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 الوقائي اللازم. كثير من دول العالم لديها مثل هذه الشبكات، والتي يجب أن تعمم دولياً.

7-10 ملخص:

إن الطاقة النووية بتقنياتها المتاحة تعد بديلاً قوياً لمصادر الطاقة الناتجة عن الوقود الأحفوري وخصوصاً في ظل تنامي الوعي البيئي، وحثية نضوب الوقود الأحفوري، مع إمكانية الاستفادة من النفط مثلاً في الأغراض الصناعية. كما أن الطاقة النووية تنافس مصادر الطاقة الأخرى المتاحة لتوفير الطاقة لغرض تحلية مياه البحر، وعليه فإن إنشاء محطات نووية بالتوازي مع محطات القدرة التقليدية موضوع جدير بالاهتمام. وحيث إن الكلفة المالية لإنشاء محطات نووية ذات قدرة كبيرة قد لا تمكن بعض الدول من إدخالها ضمن ميزانية مصروفاتها، فإن الاتجاه الحديث لبناء محطات صغيرة يعد مشجعاً لمثل هذه الدول. وما التوسع الحديث في استخدام الطاقة النووية من جانبها الآخر المتمثل في النظائر المشعة، إلا دليل آخر على استئناس الطاقة النووية، في ظل التحولات الأمنية اللازمة لحماية الإنسان 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 البيومي، الدار الدولية للنشر والتوزيع ، القاهرة ، الطبعة الثانية، 1989.
- 24- " التَقْوِيم الفنى والاقتصادي 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 العربي الثانى للاستخدامات السلمية للطاقة الذرية الجزء -الأول، أكتوبر 1995.
- 27- عبد المنعم الشريك ، محاضرة خاصة بمركز البحوث النووية بخصوص التطبيقات الصناعية لتغطية المواد ببلورات فى صورتها النانونية 1996/1/28.
- 28- وحدى الرتيمى " الطاقة النووية بين القدر والحذر" المؤتمر الوطنى الأول للمهندسين، مصراتة، 1998.

ملحق الكتل الذرية

جدول بيانات الكتل الذرية لبعض الذرات المختارة

Name	الكتلة amu	الرمز	Z	الإسم
Neutron	1.00866520	${}_0^1n$		النيوترون
Hydrogen	1.00782519	1H	1	الهيدروجين
Deutrium	2.01410222	2H	1	الديوتريوم
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	بيريليوم
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	سيلكون
	28.9764958	^{29}Si		
Phosphorus	30.9737647	^{31}P	15	فسفور
Sulfur	31.9720737	^{32}S	16	كبريت
Chlorine	34.9688511	^{35}Cl	17	كلور
Argon	39.9623842	^{40}Ar	18	أرجون
Potassium	38.9637101	^{39}K	19	بوتاسيوم
Calcium	39.9625889	^{40}Ca	20	كالميوم
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	كريتون
Rubidium	84.911800	⁸⁵ Rb	37	روبيديوم
Strontium	87.905641	⁸⁸ Sr	38	سترونتيوم
Yttrium	88.905871	⁸⁹ Y	39	يتريميوم
Zirconium	89.904699	⁹⁰ Zr	40	زركونيوم
Niobium	92.906382	⁹³ Nb	41	نيوبيوم
Molybdenum	94.905839	⁹⁵ Mo	42	موليبدينيوم
	97.905408	* ⁹⁸ Mo		
Technetium	96.90634	** ⁹⁷ Tc	43	تكنيتيوم
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	تيلوريوم
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	سامريوم
Europium	152.921242	¹⁵³ Eu	63	يوربيوم
Gadolinium	157.924178	¹⁵⁸ Gd	64	جادولينيوم
Terbium	158.925351	¹⁵⁹ Tb	65	تربيوم
Dysprosium	163.929200	¹⁶⁴ Dy	66	ديسروسيوم
Holmium	164.930421	¹⁶⁵ Ho	67	هولميوم
Erbium	167.932383	¹⁶⁸ Er	68	اربيوم
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	ايريديوم
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	بزموت
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	نبتونيوم
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	بيركليوم
Californium	251.079260	^{251}Cf	98	كاليفورنيوم

Einsteinium	253.08473	²⁵³ Es	99	اينشتاينيوم
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 طبيعياً ** 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

يمكنه شغلته لمانى بيتوانه نيتشكون

الوحدة	(الرمز)	الكمية	المقاس
Becquerel	(Bq)	1 disintegration/sec	الفاعلية الإشعاعية Activity
curie	(Ci)	3.7×10^{10} disintegration/sec	(A)
Gray	(Gy)	1 J/Kg	الجرعة الممتصة Absorbed Radiation Dose
rad		100 erg/g	(D)
Sievert	(Sv)	$H = D \cdot Q^+$	الجرعة المكافئة Equivalent Dose
rem		RBE	(H) التأثير البيولوجى للإشعاع Radiation Biological effect

+ معامل النوعية Q Quality factor

مخاراي جولو كى (Q)

ثوابت فيزيائية Physical Constants

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 الذري
- Molar volume: 13.1 cm³/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



- 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)

${}^2_1\text{H}$ الديوتيريوم (Deuterium)

- 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 رباعي القطبية

اليورانيوم Uranium

- Atomic number: 92 العدد الذري
- Molar volume: 12.56 cm³/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

${}^{235}_{92}\text{U}$ 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
 $E_{\beta} = 123.716 \pm 0.869 \text{ keV}$
- 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+ (المغزلية) اللف

²³⁸₉₂U 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: 4.468x10⁹ 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+ (المغزلية) اللف

Plutonium البلوتونيوم

- Atomic number: 94 العدد الذري
- Molar volume: 12.061 cm³/mole الحجم المولارى
- Density: 19.816 (20 C) الكثافة
- Melting point: 639.5 درجة الانصهار
- Boiling point: 3230 C درجة الغليان

$^{239}_{94}\text{Pu}$ 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 الثانوي

Spontaneous fission

- Spin: 1/2+ اللف

[+http://www.envirolink.org](http://www.envirolink.org)



مشروع الكتاب الهندسي

■ أساسيات الهندسة النووية

وجدى محمد الشارف الرئيمى

■ تحليل الدوائر الكهربائية

نور الدين محمود الجالى

■ التحليل العددي للمهندسين

سعد فضيلة - النفاتى الرويعى

■ الكيمياء العضوية

محيى الدين البكوش - المهدي عباد

محمد الشنطة

■ هندسة الرصف

محمد عمران امبارك - محمد خليفة علي

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 وإحالاته 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.

ISBN 9959-816-26-5



9 789959 816269