بسم الله الرحمن الرحيم

جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا

كليـــة الدراسات العليا

بحث تكميلي لنيل درجة الماجستير في الفيزياء بعنوان :

دراسة النيوترونات في مفاعلات الانشطار النووي

Study of the Neutrons in Nuclear Fission Reactors

إعداد الطالبة:

فاطمة عثمان محمود محمد

إشـــــراف:

د. أحمد الحسن الفكي

2015م

الآيـــــــــــة

بسم الله الرحمن الرحيم

قال تعالى :

﴿سَنُرِيهِمْ آيَاتِنَا فِي الْآفَاقِ وَفِي أَنْفُسِهِمْ حَتَّىٰ يَتَبَيَّنَ لَهُمْ أَنَّهُ الْحَقُّ ۗ أَوَلَمْ يَكْفِ بِرَبِّكَ أَنَّهُ عَلَىٰ كُلِّ شَيْءٍ شَهِيدٌ﴾

صدق الله العظيم

سورة فصلت الأيه (53)

الإهـــــــداء

إلى " اللّه " مولاي وربي الواحد الاحد

خالصا لوجهه الكريم حتى يرضى

((وقل رب زدني علما))

إلى من أرجو... أن يكون عملي هذا ، فسيلة أرقى بغرسها ، لقدر شكر جهاده وامانته

((إذا قامت القيامة وفي يد احدكم فسيلة فليغرسها))

إلى رسول الله " محمد" عليه الصلاة و السلام

، ثم...

إلى كل من، احببت في هذه الحياة الدنيا...

" ، احبب من شئت فإنك مفارقه ، واعمل ما شئت فإنك مجزي به "

الشكـــــر والعرفـــــان

في البداية ، الشكر والحمد لله جل في علاه ، فإليه ينتسب الفضل كله في اكمال والكمال ويبقي لله وحده - هذا العمل .

وبعد الحمد لله ، فأنني أتوجه إلي أستاذي الدكتور أحمد الحسن الفكي عميد كلية العلوم جامعة السودان للعلوم والتكنلوجيا والمشرف علي الرسالة الذي لن تفيه اي كلمات حقه ، فلولا دعمه المستمر ماتم هذا العمل . ومن ثم فالشكر موصول لكل أساتذتي الأجلاء الذين تتلمذت علي أيديهم في كل مراحل دراستي حتي أتشرف بوقوفي أمام حضرتكم اليوم.

المستخلص

تم دراسة النيوترونات في مفاعلات الانشطار النووي ، وهدفت الدراسة إلى التعرف على النيوترونات وفهم طبيعة النيوترون والاطلاع على تفاعلاته ومصادره ودراسة كل من الوقود النووي والانشطار النووي،وتمت دراسة نظرية الانشطار النووي في ضوء نموذج القطرةالسائلةووجدت الطاقات الحرجة للانشطار لبعض الأنوية ووصف مفاعل الانشطار النووي ومكوناته وكيفية تحكم النيوترونات فيه.

وتوصلت الدراسة إلى الحسابات اللازمة للمحافظة على استمرار الانشطار النووي في مادة الوقود النووي داخل المفاعل، وسلوك انتقال النيوترون في ضوء نظرية المفاعل النووي في أبسط صورها وطرق عدّ النيوترونات.

Abstract

The study contains neutrons in nuclear fission reactors, and the study aimed to identifyneutrons, understand its nature, its interactions, its resources, and study of both nuclear fuel and nuclear fission.It had been studied the theory of nuclear fission in the light of liquid drop model, and it had been found the fission critical energies of some nuclei and described the nuclear fission reactor , its components, and how to control its neutrons.

The study found the calculations necessary to maintain the continuous of nuclear fission in nuclear fuel into the reactor,and also theneutron transmission behavior in the light of the theory of nuclear reactor in its simplest, and the ways of counting the neutrons.

فهرس الموضوعات

الموضوع	رقم الصفحة
الآية	أ
الإهداء	ب
الشكر والعرفان	ج
المستخلص	د
Abstract	هـ
فهرس الموضوعات	و
فهرس الأشكال	ط
فهرس الجداول	ط
الفصـل الأول	1
(1-1) المقدمـة	1
(1-2) أهداف البحث	1
(1-3) مشكلة البحث	2
(1-4) الدراسات السابقة	2
(1-5) محتوى البحث	3
الفصل الثاني **النيوترونات وتفاعلاتها ومصادرها**	5
(2-1) البنية الذرية	5
(2-1-1) مقدمة	5
(2-1-2) تركيب النواة	5
(2-1-3) قوة التبادل النووي وطاقة الارتباط النووي	6
(2-1-4) النظائر Isotopes	7
(2-2) النيوترونات Neutrons (n)	9
(2-2-1) تفاعل النيوترونات مع الأنوية المختلفة	10
(2-2-2) خواص النيوترونات	10
(2-3) المصادر النيوترونية	11
(2-3-1) مقدمة	11

(2-3-2) المصادر النيوترونية الصغيرة	11
(3-3-2) المصادر النيوترونية المتوسطة	12
(4-3-2) المصادر النيوترونية الكبيرة	13
(4-2) الأنواع المختلفة للتفاعلات النووية المستحثة بالنيوترونات	15
(1-4-2) الأسر الإشعاعي للنيوترونات	15
(2-4-2) التفاعلات التي ينتج عنها انبعاث ألفا	15
(3-4-2) التفاعلات التي ينتج عنها انبعاث البروتونات	16
(4-4-2) التبعثر غير المرن للنيوترونات	17
(5-4-2) التبعثر المرن للنيوترونات	17
(6-4-2) نظرية بوهر للتفاعلات النووية الحادثة بواسطة النيوترونات	18
الفصل الثالث **الوقود النووي والإنشطار**	21
(1-3) مواد الوقود	21
(1-1-3) مقدمة	21
(2-1-3) الخواص المطلوبة لمادة الوقود	21
(3-1-3) إنتاج الوقود النووي الابتدائي Primary Nuclear Fuel	21
(4-1-3) اليورانيوم في الطبيعة	22
(5-1-3) الثوريوم في الطبيعة	23
(6-1-3) المواد النووية الأخرى	23
(2-3) مراحل الحصول على الوقود النووي	24
(1-2-3) اكتشاف اليورانيوم	24
(2-2-3) استخراج اليورانيوم من المناجم	24
(3-2-3) استخلاص اليورانيوم	25
(4-2-3) تنقية اليورانيوم	26
(5-2-3) المعادلات الكيميائية لتحويل أكسيد اليورانيوم إلى غاز UF_6	26
(3-3) الانشطار النووي	28

(3-3-1) مقدمة	28
(3-3-2) نظرية الانشطار النووي	28
الفصل الرابع **المفاعلات النووية**	36
(4-1) مفاعلات الانشطار النووي	36
(4-1-1) مقدمة	36
(4-1-2) المفاعل النووي	36
(4-2) مكونات المفاعل النووي	38
(4-3) تصنيف المفاعلات النووية الانشطارية Fissions Nuclear Reactor Classification	42
(4-4) تحكم النيوترونات في المفاعلات الانشطارية النووية	43
(4-5) السيطرة على قدرة المفاعل النووي	48
(4-6) احتراق وتوليد الوقود النووي	49
الفصل الخامس **سلوك انتقال النيوترون "نظرية المفاعل"** Neutron Transport Behavior (Reactor Theory)	51
(5-1) مفاهيم انتقال النيوترون Neutron Transport Concepts	51
(5-2) نظرية انتشار النيوترون في حالة بقاء النيوترون وحيد السرعة	53
(5-3) ابطاء النيوترونات The slowing Down of Neutrons	56
(5-4) طرق عد النيوترونات	58
الخاتمـة والتوصيات	60
المراجـع	61

فهرس الأشكال

الشكل	رقم الصفحة
شكل (2-1): التركيب النووي	6
شكل(2-2): طاقة الارتباط النووي للنيوكلون الواحد	7
شكل (2-3): بناء النيوترون	9
شكل (3-1): مراحل الانشطار النووي في ضوء نموذج القطرة السائلة	31
شكل (4-1): التفاعل المتسلسل	36
شكل(5-1): حساب تسرب النيوترون	55

فهرس الجداول

الجدول	رقم الصفحة
جدول (3-1) الطاقات الحرجة للانشطار لبعض الأنوية	34
جدول (4-1): بعض مصادر النيوترونات والفيض النيوتروني المنتج منها	38

الفصــل الأول

(1–1) المقدمــة

يعتبـر المفاعـل النـووي مـن أغنــي المصــادر الصـناعية للإشـعاع المـؤين خصوصـاً النيوترونـات ذات الطاقـات العاليـة.والتـي يمكـن تحويلهـا إلـى نيوترونـات منخفضة الطاقة وذلك بعد تمريرها خـلال ماده تعمل على إفقادها للطاقة من خـلال التصـادمات مـع أنويـة هذه المـادة والتـي عادة ماتكون ذات عدد ذري منخفض. هذه النيوترونات المنخفضة الطاقة أو النيوترونـات البطيئـه أصبحت ذات تطبيقات واسعة في مجالات عديده.

(1–2) أهداف البحث

- المفاعلات النووية تعتبر من أفضل مصادر النيوترونات علي الاطلاق.
- مفتاح تصميم قلوب المفاعلات هو وصف إنتاج ، إنتقال وإمتصاص النيوترونات في القلب .
- في حالة الرغبة في إيقاف المفاعل يتم تقليل معامل التكاثر عن واحد صحيح فيصبح عدد النيوترونات الثانوية في التناقص جيل بعد جيل إلى أن يتوقف إنتاج النيوترونات الحرارية وبالتالي يتوقف المفاعل.
- العامل المهم لبدء وأستمرار التفاعل المتسلسل لنواة اليورانيوم 235 مثلاً هو توفر نيوترون بطي واحد علي الأقل.
- سيل النيوترونات المنطلقة من مفاعل نووي يعمل في مستوى معين من القدره يعتمد على سعة قلب المفاعل.

(1-3) مشكلة البحث

- تعتبر المفاعلات النوويه أهم مصدر للطاقة النووية والطاقة النووية ذات نطاق واسع الاستخدام.
- دراسة النيوترونات خصائصها وتفاعلاتها ومصادرها ذات أهمية بالغة في مفاعلات الانشطار النووي نسبة لان النيوترونات ذات اثر بالغ في التفاعل المتسلسل داخل المفاعل وعدم توفرها بنسبه معينه داخل المفاعل يؤدي الي عدم وجود تفاعل متسلسل .

تزداد كمية ناتج التفاعل كلما إزداد السيل النيوتروني ولهذا السبب تعتبر المفاعلات النووية من أكثر الأجهزة المولده للنيوترونات غزارة.

(1-4) الدراسات السابقة

أجراء العديد من العلماء دراسات علي المفاعلات النووية ومن بين هذه الدراسات مهدي أحمد العبيد بحث تكميلي لنيل درجة الماجستير بعنوان المفاعلات النووية – الاستخدامات – المخاطر والمعالجات ابريل 2005م إن المفاعلات النووية تختلف بحسب نوع الوقود المستخدم ونسبة تخصيبه ونوع المهدي والمبرد والشكل الهندسي للمفاعل كما تختلف المفاعلات النووية من حيث الغرض الذي انشأت من اجله فمنها ما انشا بغرض إنتاج طاقة حرارية هائلة ، والغرض الثاني الإستفادة من الطاقة الحركية الكبيرة للنيوترونات في إنتاج نظائر مشعة .

الدارسة ناهد أحمد بلل بحث تكميلي لنيل درجة الماجستير في الفيزياء جامعة السودان للعلوم والتكنلوجيا بعنوان المفاعلات النووية الإنشطارية التصميم والتشغيل والأثار البيئية أغسطس 2005م . أن حدوث الإنشطار أو الإندماج تحث

شروط معينة دون أي تحكم في سرعة التفاعل يؤدي إلي تصاعد هائل من تلك السرعة ويترتب علي ذلك تولد طاقة هائلة وهذا هو مبدأ القنابل النووية ،

ويمكن التحكم في معدل الإنشطار أو الإندماج بحيث يتم التحكم في كمية الطاقة الناتجة واستغلالها للأغراض السلمية .

وفي هذا البحث توصلت الدراسة الي دراسة النيوترونات في مفاعلات الانشطار النووي ، وهدفت الدراسة إلى التعرف على النيوترونات وفهم طبيعة النيوترون والاطلاع على تفاعلاته ومصادره ودراسة كل من الوقود النووي والانشطار النووي،وتمت دراسة نظرية الانشطار النووي في ضوء نموذج القطرة السائلة ووجدت الطاقات الحرجة للانشطار لبعض الأنوية ووصف مفاعل الانشطار النووي ومكوناته وكيفية تحكم النيوترونات فيه.

وتوصلت الدراسة إلى الحسابات اللازمة للمحافظة على استمرار الانشطار النووي في مادة الوقود النووي داخل المفاعل، وسلوك انتقال النيوترون في ضوء نظرية المفاعل النووي في أبسط صورها وطرق عد النيوترونات.

(1–1) محتوى البحث

وقد قسم هذا البحث الي خمسة فصول ، الفصل الأول وفيه المقدمة، أهداف البحث ، مشكلة البحث ، محتوى البحث ، الدراسات السابقة ، الفصل الثاني وهو بعنوان النيوترونات وتفاعلاتها ومصادرها ، حيث يحتوي علي البنية الذرية ، النيوترونات ، المصادر النيوترونية، الانواع المختلفة للتفاعلات النووية المستحثة بالنيوترونات .

الفصل الثالث وهو بعنوان الوقود النووي والإنشطار ، حيث يحتوي على مواد الوقود النووي، مراحل الحصول علي الوقود النووي، الانشطار النووي.

الفصل الرابع وهو بعنوان المفاعلات النوويه ، وفيه مفاعلات الانشطار النووي ، مكونات المفاعل النووي، تصنيف المفاعلات النووية الانشطارية ، تحكم النيوترونات في مفاعلات الإنشطار النووي، السيطرة علي قدرة المفاعل النووي ، احتراق وتوليد الوقود النووي.

الفصل الخامس وهو بعنوان سلوك انتقال النيترون (نظرية المفاعل) ، وفيه مفاهيم إنتقال النيوترون ، نظرية إنشطار النيوترون في حالة بقاء النيوترون وحيد السرعة ، إبطاء النيوترونات ، طرق عد النيوترونات.

الفصل الثاني

النيوترونات وتفاعلاتها ومصادرها

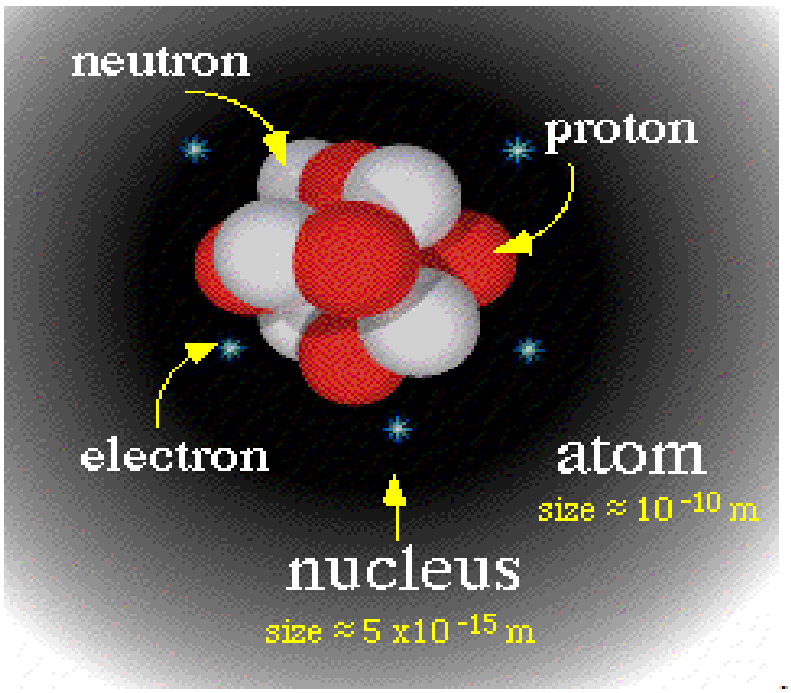
(2−1)البنية الذرية

(2−1−1) مقدمة

تنقسم الذرة إلى منطقتين أساسيتين: النواة والإلكترونات الذرية، وتوجد النواة في مركز الذرة وهي صغيرة جداً بالمقارنة مع الذرة، فقطرها أصغر من $10^{-14}m$ ، بينما يصل قطر الذرة إلى حوالي $10^{-10}m$ ، أي أن النواة تحتل أقل من جزء من مليار من حجم الذرة إلا أن النواة تضم قرابة مجمل كتلة الذرة وتحيط بالنواة سحابة مكونة من عدد (z) من الالكترونات تشغل الحجم الذري[1].

(2−1−2) تركيب النواة

- تتركز النواة في جسيم صغير ذي شحنة موجبة تسمى نواة الذرة Nucleus
- تحتوي النواة على بروتونات (P) ونيوترونات (N) وتسمى البروتونات أو النيوترونات بالنيوكلونات.
- يرمز لأي عناصر بـ $^{A}_{Z}X$
- حيث Z هو العدد الذري ويساوي عدد البروتونات (P) بالنواة وكذلك يساوي عدد الالكترونات eبالذرة المتعادلة كهربياً .
- A هو العدد الكتلي ويساوي مجموع عدد النيوترونات والبروتونات (A=N+Z)



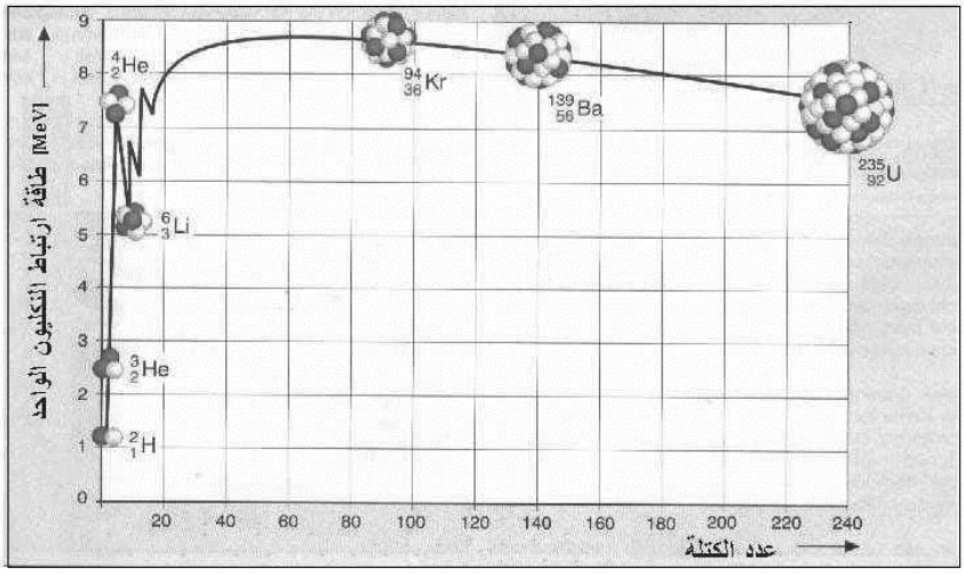
شكل (2−1): التركيب النووي

(2−1−3) قوة التبادل النووي وطاقة الارتباط النووي

تتشكل النواة الذرية من Z بروتون و N نيوترون تجمعهم قوة التبادل النووي Nuclear Interaction ، والتي تؤدي إلى طاقة ارتباط نووية Nuclear Binding Energy قوة التبادل النووي أشد بكثير من القوة الكهرومغنطيسية التي تربط الإلكترونات الذرية بالنواة، ولكن تأثيرها يقتصد على مسافات تصل إلى بضعة فمتومترات (فمتو = 10^{-15}).

يتم تحديد طاقة الارتباط النووي B بقياس الفرق في الكتلة بين النواة المكونة من N نيوترون و Z بروتون، وبين مجموع كتل هذه النيوكلونات، حيث أن الفرق في الكتلة يكافئ الطاقة المستخدمة لجمع النيوكلونات سوية في النواة الذرية، الشكل

التالي يوضح طاقة الارتباط النووي كتابع للعدد الكتلي A بالنسبة للنواة المستقرة تجاه تفكك بيتا. أكثر النوي استقراراً هي نواة الحديد ^{56}Fe . ويوضح الشكل التالي الطريقتين المعروفتين للحصول على الطاقة النووية، دمج النوي الصغيرة (الاندماج النووي Nuclear Fusion) أو شطر النوي الكبيرة (الانشطار النووي Nuclear Fission) [1].



الشكل(2-2): طاقة الارتباط النووي للنيوكلون الواحد [1]

(2-1-4) النظائر Isotopes

هي العناصر التي لها نفس العدد الذري (Z) ولكنها تختلف في العدد الكتلي (A) ، وهذا يعني أنها تتساوى في عدد البروتونات وتختلف في عدد النيوترونات (N) الموجودة في النواة ونتيجة لذلك يكون لها نفس الخواص الكيميائية ولكن تختلف في الخواص الفيزيائية، تصنف النظائر بشكل عام إلى نوعين:

1/ النظائر المستقرة: وهي العناصر التي لا تتغير وتشكل غالبية العناصر الموجودة في الطبيعة[2].

2/ النظائر غير المستقرة (مشعة)

وهي أقل وفرة في الطبيعة من النظائر المستقرة، ويرجع عدم استقرارها لوجود طاقة فائضة داخل نوي ذراتها فتكون في حالة متهيجة تحاول العودة إلى حالة الاستقرار بالتخلص من هذه الطاقة وبشكل تلقائي، وعندما تبعث كل أو جزء من هذه الطاقة تحصل ما يسمى بالتحلل أو الاضمحلال، وبالنتيجة تنتقل نواة الذرة من حالة إلى حالة أخرى إذا أصدرت أشعة جاما أو أنها تتحول إلى نظير آخر إذا أطلقت جسيمات ألفا أو بيتا.

والنظائر إما أن تكون طبيعية مثل نظائر الهيدروجين ^{1}H ، ^{2}H ، ^{3}H والذي يكون العدد الذري لجميع هذه النظائر = 1 . ونظائر اليورانيوم ^{235}U ، ^{236}U ، ^{238}U ، والذي يكون العدد الذري لجميع هذه النظائر= 92 .إما تكون صناعية يتم الحصول عليها من التفاعلات النووية، وبعض العناصر لها نظيرين أو ثلاثة، بينما يصل عدد النظائر في عناصر أخرى مثل السيزيوم والباريوم إلى نحو 30 .

والخواص الكيميائية لجميع نظائر العنصر الواحد متشابهة لكن الخواص الفيزيائية تختلف، فالماء الاعتيادي يتكون من ذرة من الأوكسجين O متصلة بذرتين من الهيدروجين H ، أما عند اتصال ثلاث ذرات من الهيدروجين (التريتيوم) ^{3}H وذرتين من الأوكسجين يتكون ما يسمى بالماء الثقيل في الحالتين له نفس الخواص الكيميائية لكنهما يختلفان في الخواص الفيزيائية [4,3] .

(2-2) النيوترونات Neutrons (n)

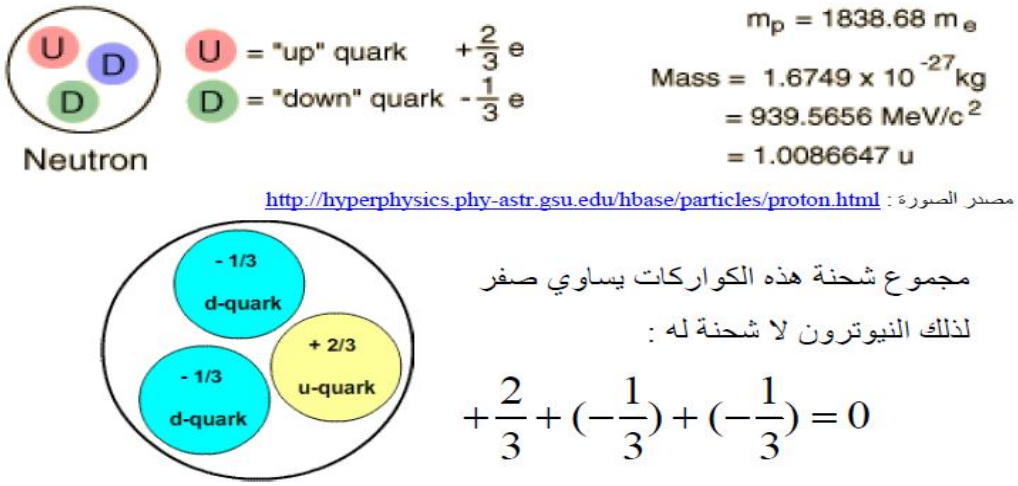
اكتشفها العالم شادويك عام 1932م حيث قذف البريليوم بجسيمات ألفا الناتجة عن تحلل البولونيوم، فنتج عن ذلك جسيمات جديدة لم تكن معروفة من قبل، فهي متعادلة الشحنة ولذلك أسماها بالنيوترونات.

النيوترون جسيم أولي من الهادرون لا شحنة له ويرمز له بالحرف (n) أو ^{0}n وهو أحد مكونات النواة، وكتلته أكبر من كتلة البروتون، النيوترون الحر غير مستقر ويتحلل إلى بروتون بانبعاث جسيم بيتا ونيوترينو مضاد. يتولد النيوترون الحر في الإنشطار النووي، أو الاندماج النووي عند توليد الطاقة النووية، النيوترون هو منطلق التفاعلات في سلسلة التفاعلات النووية[5].

معادلة اضمحلال النيوترون:

$$^{0}n \rightarrow p^{+} + e^{-} + \bar{\nu}_e \qquad (1\text{-}2)$$

العزم المغناطيسي للنيوترون لا يساوي صفر لأنه مركب من ثلاثة كواركات مشحونة، بناء النيوترون متكون من ثلاثة كواركات كما في الشكل:



شكل (2-3): بناء النيوترون

(2-2-1) تفاعل النيوترونات مع الأنوية المختلفة

يمثل تفاعل النيوترونات مع الأنوية المختلفة أحد التفاعلات النووية الشاملة والمتنوعة، ويرجع هذا إلى أن النيوترون يعتبر من المكونات الرئيسية لجميع الأنوية (فيما عدا نواة ذرة الهيدروجين) ويتم التفاعل بين النيوترونات والأنوية المختلفة عند الطاقات المنخفضة، نظراً لأن النيوترون متعادل الشحنة ويمكن أن يخترق حاجز الجهد للنواة بسهولة مهما كانت طاقته منخفضة.

(2-2-2) خواص النيوترونات

النيوترون هو جسيم متعادل الشحنة (z=0) واللف المغزلي له $S_n = \frac{1}{2}$ والعزم المغناطيسي له $\mu_n = 1.9\,\mu_B$ (μ_B هو الماجنتون للنيوترون)

وللنيوترونات عدد باريوني B = +1 ولف مغزلي آيزوتوبي $T = \frac{1}{2}$ بمسقط مقداره $T_Z=\frac{1}{2}$. كما يتميز النيوترون بندبة زوجية (موجية) $P_n = +1$ وكتلة النيوترون m_n=1.00867 a.m.u وهي تساوي 939.6 MeV أو 1838.6 m_e (m_e هي كتلة الالكترون) وتزيد كتلة النيوترون بمقدار 1.3 MeV عن كتلة البروتون.

ويضمحل بإبعاث جسيمات بيتا السالبة بزمن نصف عمر $T_{\frac{1}{2}} = 11\,min$ طبقاً للمعادلة الآتية:

$$n \rightarrow p + \bar{e} + \bar{\nu}_e \qquad (2-2)$$

(2-3)المصادر النيوترونية

(2-3-1) مقدمة

لا يوجد مصدر طبيعي يبعث النيوترونات ولكن توجد مصادر صناعية لتوليد النيوترونات تقسم المصادر النيوترونية إلى ثلاثة أقسام هي:

1. المصادر النيوترونية الصغيرة.
2. المصادر النيوترونية المتوسطة.
3. المصارد النيوترونية الكبيرة [3].

(2-3-2) المصادر النيوترونية الصغيرة

قسمت إلى أربعة أقسام هي:

أ/ مصدر الكالفورينوم-252:

الكالفورينوم-252 هو من العناصر ما بعد اليورانيوم له عمر نصف مقداره 2.65 سنة، ويتحلل بالانشطار انحلالاً واحدا لكل 31 انحلال لجسيمات ألفا. الانشطار الحاصل بالنواة يكون مصحوباً بانبعاث عدد قليل من النيوترونات والذي يختلف لكل انشطار، ومعدل عدد النيوترونات المنبعثة لكل انحلال هو 3.76 نيوترون. ويمتاز بصغر حجمه إذ يتراوح قطره بين 0.8 – 1.2 سم وطوله بين 2.5 – 5سم، وعدد النيوترونات المنبعثة منه يتراوح بين 10^7 - 10^8 نيوترون/ثانية.

ب/ مصادر النظائر المشعة الباعثة لجسيمات α :

يخلط مصدر باعث لجسيمات α مثل نظائر البولونيوم-210 ، الراديوم-226 ، الأمريشيوم 241 والبلوتونيوم 239 مع مسحوق من عنصر مستقر يكون

كهدف لقصف هذه الجسيمات حسب التفاعل نوع (α , n) والذي ينتج عنه انبعاث أحد نيوترونات الهدف الضعيفة الارتباط. كما في المعادلة التالية:

$$\alpha + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{12}_{6}C + n + 5.7\ MeV \qquad (3-2)$$

ج/ المصادر الناتجة عن تفاعل الفوتونات:

يمكن توليد النيوترونات من تفاعل أشعة جاما مع العناصر الخفيفة بحيث تكون طاقة جسيمات جاما أكبر من طاقة ربط النيوترونات مع بعضها في ذرات الهدف. كما في حالة تفاعل جسيمات جاما مع ذرات الديتريوم والبورون.

د/ مولد نيوتروني صغير:

يعتمد عمل المولد على الاندماج بين حزمة من أيونات الديتريوم أو الترتيوم وهدف من معدن مهدرج (يحتوي على نظائر الهيدروجين) [3].

(3-3-2) المصادر النيوترونية المتوسطة

قسمت إلى ثلاثة أقسام هي:

أ/ مصدر التوجيه البلازمي (Plasma focus):

توجه البلازما على ذرات غاز التريتيوم أو الديتريوم فتأينها وترفع درجة حرارتيهما إلى درجات كافية لإحداث الإندماج النووي وانبعاث النيوترونات.

ب/ منظومات الانشطار الفوتوني (Photo-fission Systems):

تتولد النيوترونات عندما تقصف فوتونات طاقتها أكبر من طاقة ربط النيوترونات بالدايبول الرنيني العملاق والذي يؤدي إلى انبعاث النيوترونات أو توليد الانشطار.

طاقة الفوتونات المطلوبة للتفاعل مع المواد الاعتيادية تتراوح بين 7 – 40 MeV . كما يحصل في أجهزة العلاج الاشعاعي ذات الطاقة العالية (Megavolt) والتي تولد الفوتونات ذات الطاقة العالية وعند تفاعلها مع أي هدف تولد النيوترونات. كما يمكن للالكترونات ذات الطاقة MeV 50 أن تولد دايبول رنيني عملاق وتبعث نيوترونات عند سقوطها على هدف.

ج/ المولد النيوتروني:

المصادر النيوترونية المهمة والتي تولد نيوترونات سريعة طاقتهاMeV 14 تتولد نتيجة لقصف هدف من التريتيوم بسيل من نوي الديتريوم التي تصل طاقتها إلى KeV 150 تتميز هذه المصادر بكلفتها الواطئة نسبياً أو يمكن الحصول على النيوترونات بتعجيل بعض الجسيمات مثل البروتون إلى طاقة معينة تمكنه من إحداث التفاعل عند سقوطه على هدف من الليثيوم–7 . لإحداث تفاعل مع نواة الهدف وتنبعث أحد نيوترونات الهدف كما يلي:

$$P + {}^{7}_{3}L \rightarrow {}^{7}_{4}Be + n + 1.63\ Mev \quad (4\text{–}2)$$

(2–3–4) المصادر النيوترونية الكبيرة

أ/ المفاعلات النووية:

عندما يمتص الوقود النووي للمفاعل (اليورانيوم 235) أحد النيوترونات تحصل عملية الانشطار النووي والذي ينتج عنه ذرتين متماثلتين تقريباً في الكتلة ومجموع كتلتيهما أقل من كتلة النواة الأم (اليورانيوم–235) بالإضافة إلى عدد من النيوترونات معدلها يساوي تقريباً 1.5 من النيوترونات تنطلق أثناء عملية الانشطار النووي كما يلي:

$$n + {}^{235}U \rightarrow [A] + [B] + n + \approx 200\ MeV \qquad (5-2)$$

حيث A ، B هما نواتج الانشطار.

ب/ منظومة الإندماج :

يمكن توليد عدد كبير من النيوترونات نتيجة لإندماج التريتيوم أو الديتريوم وتوجد الآن في الدول المتقدمة مثل هذه المصادر لأغراض البحث.

ج/ مصدر نيوتروني بعملية التشظي (Spallation Neutron Source):

تعتبر عملية التشظي بشكل عام انبعاث الجسيمات أو الشظايا من المادة، أما في الفيزياء النووية فتعني انبعاث عدد كبير في النيوكلونات من النوي الثقيلة عند قصفها بحزمة من الجسيمات ذات الطاقة العالية وبذلك يقل عددها الكتلي وتبعث النيوترونات.

ولتوليد النيوترونات تسقط حزمة من البروتونات ذات الطاقة العالية بشكل نبضات قصيرة الأجل على معادن ثقيلة مثل التنجستين أو الرصاص فتشظى هذه المواد وتتهيج نوي الذرات وتتبعث نيوترونات سريعة يمكن تهدئتها إلى الطاقة المطلوبة وتوجيهها [3] .

(2-4) الأنواع المختلفة للتفاعلات النووية المستحثة بالنيوترونات

(2-4-1) الأسر الإشعاعي للنيوترونات

في هذا النوع من التفاعل يتم أسر النيوترون بواسطة نواة الهدف ويتبع ذلك انبعاث فوتونات γ ويمثل هذا التفاعل بالمعادلة التالية:

$$ {}^{A}_{Z}X + n \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X \quad + \gamma \qquad (6\text{-}2) $$

وعادة تكون النواة الناتجة من التفاعل غير مستقرة وتتحول إلى الاستقرار وذلك بابعاث جسيمات B^-

$$ {}^{A+1}_{Z}X \quad \rightarrow {}^{A+1}_{Z+1}Y + B^- + \bar{\upsilon_e} \qquad (7-2) $$

واحتمالية حدوث الأسر الاشعاعي للنيوترونات تكون عالية بالنسبة للنيوترونات البطيئة التي تتراوح طاقتها ما بين الصفر و 500 KeV وتستخدم هذه التفاعلات في الكشف عن هذا النوع من النيوترونات وكمثال لهذا التفاعل:

$$ {}^{115}_{49}In + n \rightarrow {}^{116}_{49}In + \gamma \qquad (8-2) $$

ويضمحل النظير المشع ${}^{116}_{49}In$ وذلك بالتفكك البيتاوي بزمن نصف عمر $T_{1/2} = 54\ min$

$$ {}^{116}_{49}In \rightarrow {}^{116}_{50}Sn + B^-\bar{\upsilon_e} \qquad (9-2) $$

(2-4-2) التفاعلات التي ينتج عنها انبعاث ألفا

يمثل هذا النوع من التفاعل بالمعادلة التالية:

$$ {}^{A}_{Z}X + n \rightarrow {}^{A-3}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \qquad (10-2) $$

ولحدوث هذا النوع من التفاعل يجب أن تتراوح طاقة النيوترونات ما بين 0.5 و 10 MeV وفي بعض الحالات يكون حاجز الجهد لأنوية الهدف منخفضاً ولذلك يتم هذا النوع من التفاعل في هذه الحالات باستخدام النيوترونات الحرارية، وفيما يلي بعض الأمثلة لهذا النوع من التفاعل:

$$^{6}_{3}Li + n \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He \qquad Q = 4.5\ MeV \qquad (11-2)$$

$$^{10}_{5}B + n \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He \qquad Q = 2.4\ MeV \qquad (12-2)$$

ويستخدم هذان التفاعلان في الكشف عن النيوترونات الحرارية وذلك باستخدام غرف التأين التي تحتوي على غشاء من الليثيوم، الكاشفات التي تحتوي على المركب الغازي BF_3 وكشافات زجاج البورون ... وهكذا والمقاطع المستعرضة للتفاعلين (2−11) و (2−12) هما على التوالي 900×10^{-24} ، 400×10^{-24} (900 ، 400 بارن) وكمثال للتفاعل (n, α) الماص للطاقة (أي القيمة Q للتفاعل تكون سالبة) هو[2]:

$$^{14}_{7}N + n \rightarrow ^{11}_{5}B + ^{4}_{2}He \qquad (13-2)$$

(2−4−3) التفاعلات التي ينتج عنها انبعاث البروتونات

تتم التفاعلات من النوع (n,p) وذلك عندما تتراوح طاقة النيوترونات ما بين 0.5 و 10 MeV

$$^{A}_{Z}X + n \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + P \qquad (14-2)$$

وفي العادة تكون القيمة Q للتفاعل أكبر من الصفر (لأن كتلة النيوترون m_n أكبر من كتلة البروتون M_p) أما إذا كانت Q<0 لابد أن تكون طاقة النيوترونات

عالية بدرجة كافية حتى تنتج بروتونات بطاقات عالية حتى تستطيع هذه البروتونات التغلب على الجهد الكولومي لنواة الهدف، وكمثال لهذا التفاعل:

$$^{32}_{16}S \ + \ n \ \rightarrow \ ^{32}_{15}P + \ p \qquad Q \cong 0.92 \ MeV \qquad (15-2)$$

$$^{14}_{7}N + \ n \ \rightarrow \ ^{14}_{6}C + \ p \qquad Q \cong 0.6 \ MeV$$

حيث أن القيمة Q لهذا التفاعل موجبة وللتفاعلين أعلاه يتمان بواسطة النيوترونات الحرارية، ويستخدم هذا التفاعل في الكشف عن هذا النوع من النيوترونات باستخدام المستحلبات الفوتوغرافية النووية حيث يمكننا ملاحظة البروتونات الناتجة من التفاعل بمدى يساوي عدة ميكرونات، أما بالنسبة للتفاعل (2–15) فقد استخدم في الكشف عن النيوترونات المنبعثة نتيجة للانشطار النووي لبعض الأنوية الثقيلة (النيوترونات السريعة)[2] .

(2–4–4) التبعثر غير المرن للنيوترونات

عند قذف أي نواة بنيوترون ذات طاقة تساوي عدداً قليلاً من مئات الكيلو الكترون فولت فإن هذا النيوترون يسبب إثارة لهذه النواة ثم يتركها، ونتيجة لذلك تقل طاقته (ليس من الضروري أن يخرج نفس النيوترون الذي داخل النواة) ويسى هذا التفاعل بالتبعثر غير المرن للنيوترونات[2] .

(2–4–5) التبعثر المرن للنيوترونات

في هذا النوع من التفاعل تظل نواة الهدف في نفس مستوى الطاقة التي كانت عليه قبل التفاعل ويظل النيوترون محتفظاً بطاقة الحركة الابتدائية في مركز الثقل (تكون طاقة الحركة الكلية للنواة والنيوترون ثابتة في النظام المعملي).

ويستخدم التبعثر المرن للنيوترونات في الكشف عن النيوترونات السريعة وذلك بملاحظة أثر النواة المرتدة (غالباً البروتونات المرتدة) باستخدام الغرفة السحابية، الغرفة الفقاعية والمستحلبات النووية.

ويلعب التبعثر المرن دوراً هاماً في عملية تهدئة النيوترونات السريعة في المفاعلات النووية.

(2−4−6) نظرية بوهر للتفاعلات النووية الحادثة بواسطة النيوترونات

إن وجود المستويات قليلة الاتساع ($T \cong 0.1\ eV$) في النواة عند طاقة إثاوتفوق طاقة الترابط للنيوكليون داخل النواة يبدو امراً مبهماً لأول وهلة، وطبقاً لميكانيكا الكم فإن:

$$\Delta E\ .\Delta t\ \equiv\ \hbar \qquad (16-2)$$

حيث $\hbar = 6.6\ \times\ 10^{-16}\ e.v.sec$ وبتطبيق المعادلة$(16-2)$فإن صغر إتساع مستوى الطاقة يشير إلى زيادة العمر للنواة في هذا المستوى، أي أن:

$$\tau = \frac{\hbar}{T} = 6.6\ \times\ 10^{-16}\ /\ 10^{-21}\ sec \qquad (17-2)$$

وهذا يناظر اتساع مستوى الطاقة:

$$\left[T = \frac{\hbar}{\Delta t} = 6.6\ \times\ 10^{-16}\ /\ 10^{-21}\right] (\ T \cong 1\ MeV\ )$$

وقد أمكن تفسير هذا الاختلاف بجانب تفسير زيادة قيمة المقطع المستعرض لتفاعل النيوترونات مع الأنوية وكذلك ارتفاع كثافة المستويات بواسطة العالم بوهر الذي فرض نظرية التفاعلات النووية التي تعتمد على نموذج قطرة السائل للنواة.

طبقاً لنظرية بوهر فإن التفاعل يتم على مرحلتين، في المرحلة الأولى يؤسر النيوترون بواسطة النواة ويتكون ما يسمى بالنواة المركبة ذات طاقة الاثارة W حيث:

$$W = E_n + A\ T_n(A+1) \qquad (18-2)$$

والتي تتميز بقيم محددة لكمية التحرك الزاوية والتماثل ((T_n, ε_n) هي طاقة الترابط وطاقة الحركة للنيوترون على التوالي) وطبقاً للتفاعلات القوية فإن طاقة الاثارة هذه تتوزع بسرعة بين النيوكليونات الموجودة داخل النواة. ومن ثم فإن أياً من هذه النيوكليونات لا يمكن أن يترك النواة إلا إذا اكتسب النيوكليون القريب محيط النواة طاقة تزيد عن طاقة ترابطه داخل النواة ويمكن أن تضمحل النواة المركبة وذلك بابعاث فوتونات γ ، وهذه طريقة بطيئة أيضاً وهذا هو السبب وراء طول زمن العمر للنواة المركبة، لدرجة أن النظام المركب ينسى ميكانيكية تكوينه بسبب طول فترة زمن العمر. ولا تعتمد بارميترات النواة المركبة (الطاقة، كمية التحرك الزاوية والندية) على نوع التفاعل الذي من خلاله تكونت هذه النواة المركبة.

وبعد مرور فترة طويلة τ (زمن العمر للنواة المركبة) تبدأ المرحلة الثانية للتفاعل وهي اضمحلال النواة المركبة وذلك بخروج نيوكليون أو انبعاث فوتون γ (أو بأي طريقة أخرى) واحتمالية اضمحلال النواة المركبة هي ω.

حيث:

$$\omega = 1/\tau\ =\ \mathrm{T}/\hbar \qquad (19-2)$$

حيث إن النواة المركبة يمكن أن تضمحل بطرق مختلفة (إنبعاث بروتون أو انبعاث نيوترون أو انبعاث فوتون جاما، أو...) ، فإن احتمالية الاضمحلال W يمكن التعبير عنها بمجموع الاحتمالات الجزئية:

$$\omega = \omega_p + \omega_n + \omega_\gamma + \cdots = T\frac{p}{\hbar} + T\frac{n}{\hbar} + T\frac{\gamma}{\hbar} + \cdots \qquad (20-2)$$

احتمالية الاضمحلال النسبية للنواة المركبة لنوع ما من الاضمحلال تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\eta_1 = \frac{\omega_i}{\omega} = \frac{T_i}{T} \qquad (21-2)$$

حيث T_i هو الاتساع الجزئي (T_p أو T_n أو T_y أو ...) والاحتمالية النسبية لاضمحلال النواة المركبة لا تعتمد على الطريقة التي تكونت بها هذه النواة. وقد تحقق هذا الاستنتاج عملياً مع مقارنة الاضمحلالات المختلفة للأنوية المركبة المتطابقة (لها نفس القيم لكل من (A , Z , E , I , T , P) التي يمكن الحصول عليها من التفاعلات المختلفة [2,1] .

الفصل الثالث

الوقود النووي والإنشطار

(3-1) مواد الوقود النووي

(3-1-1) مقدمة

مادة الوقود يمكن اعتبارها كمادة هندسية مع خصائص خاصة حيث لها مستوى عالٍ من الانشطار، مع حرارة واشعاع مرتبط يتولد داخلها [6] .

(3-1-2) الخواص المطلوبة لمادة الوقود

1. موصلية حرارية وهي مطلوبة لكي يمكن الوصول إلى كثافة قدرة عالية.
2. مقاومة لتدمير الاشعاع.
3. الاستقرار الكيميائي
4. نقطة انصهار عالية
5. يجب أن تسمح الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمادة بتصنيع اقتصادي.
6. مادة الوقود يجب أن يكون لها معامل تمدد منخفض.
7. يجب أن يكون تركيز الذرات الانشطارية في المادة عالي، الذرات الأخرى ذات المقطع المستعرض الكبير لامتصاص النيوترون يجب أن تكون غائبة.

(3-1-3) إنتاج الوقود النووي الابتدائي Primary Nuclear Fuel

في اليورانيوم الطبيعي يكون تخصيب ^{235}U هو 0.7% فقط وهو لا يستطيع الوفاء بحاجة المفاعلات المختلفة. فمعظم مفاعلات التوليد تحتاج ^{235}U مخصب حتى 90%. لإنتاج اليورانيوم في المناجم على هيئة غفل يورانيت (بتشبلند) وكارنوتيت (مركب اليورانيوم فاناديوم). وتحتوي أنواع الغفل الأخرى على نسبة مئوية

صغيرة جداً من اليورانيوم والخامات السابقة تعتبر مصادر جيدة لليورانيوم، ويشتق اليورانيوم من خاماته على صورة معدنية، ويعامل الخام من المناجم بمخلوط من أحماض الكبريتيك والنتريك.

وفي هذا المخلوط يكون اليورانيوم الحديد ، الألمونيوم ، الزنك ...الخ قابلة للذوبان ولكن الباريوم والرصاص يكونان كبريتات غير قابلة للذوبان وتترسب. ولإزالة الرواسب يرشح المحلول الحامضي ثم يخلط المحلول الحامضي مع كمية جيدة من الصودا لجعل المحلول قاعدي الطبيعة. وبعد الترشيح يكون متاحاً محلول يحتوي على اليورانيوم ويعامل بحامض نتريك كافي لجعل المحلول حامضي ويتحول اليوارنيوم إلى محلول ايثر، وتعرف العملية بالاستخراج الانتقائي ومن هذه العملية يتم الحصول على يورانيوم ذو نقاوة عالية ويستخدم ذلك للحصول على يورانيوم معدني.

أثناء انتاج اليورانيوم للمفاعلات يجب اتخاذ عناية خاصة لفصل المواد الممتصة للنيوترونات أي الكادميوم، الانديوم والبورون، وعند تعرض نترات اليورانيل للحريق نحصل على U_3O_8 في الصورة النقية [6] .

(3-1-4) اليورانيوم في الطبيعة

اكتشف اليورانيوم كعنصر من عناصر القشرة الأرضية في عام 1789م وفي عام 1842م تم فصله في صورة نقية لأول مرة، ولكنه لم يحظ بالاهتمام اللائق بعد اكتشاف الانشطار ودخول البشرية في عصر الطاقة النووية. يوجد اليورانيوم في صخور القشرة الأرضية بنسبة ضئيلة، فمتوسط وجوده في الصخور الجرانيتية هو 8 جرامات في الطن، مع عناصر أخرى على هيئة معادن اليورانينيت وهو أكسيد اليورانيوم الطبيعي ويتميز بلونه الأسود وكثافته العالية ونشاطه الاشعاعي، وتتراوح نسبة اليوانيوم فيه من حوالي 46% إلي 88% وقد يوجد في صورة أخرى تسمى بالنشبلند (U_3O_8). تأتي في المرتبة الثانية مجموعة من المعادن الثانوية وهي

مركبات أكثر تعقيداً من الأكسيد وتتميز بألوانها الأصفر والبرتقالي والأخضر الزاهي وتتراوح نسبة اليورانيوم بها حوالي 55% إلى 60% ولها أيضاً نشاط إشعاعي، وعندما يتركز واحد أو أكثر من معادن اليورانيوم في طبقة صخرية فإن ذلك يسمى راسباً معدنياً Mineral Depose أو خامة Orc لليورانيوم.

يتواجد اليورانيوم الطبيعي في ثلاثة نظائر هي U^{238} و U^{235} وU^{234} وهناك نظير صناعي قابل للانشطار هو U^{233} [7].

(3-1-5) الثوريوم في الطبيعة

اكتشف الثوريوم في عام 1828م بواسطة برزيليوس السويدي في معادنه وهو الثوريت، ولكنه لم يستخدم إلا في عام 1885م حين اكتشف أن أكسيد الثوريوم يتوهج بالتسخين وتتم الاستفادة منه لأنه يصبح وقود نووي بعد تحوله إلى يورانيوم 233.

يوجد الثوريوم في الطبيعة على هيئة نظير واحد فقط وزنه الذري 232 وتبلغ نسبة وجوده ثلاثة أمثال اليورانيوم وأهم المعادن كمصدر للثوريوم وهو المونازيت.

ويتم استخلاص الثوريوم من المونازيت مع العناصر النادرة بمعالجته بالصودا الكاوية مع التسخين لعدة ساعات حتى تذوب هذه العناصر في المحلول، ثم يعاد ترسيبها وفصلها بوسائل كيميائية مختلفة[7] .

(3-1-6) المواد النووية الأخرى

بالإضافة إلى عنصري الوقود النووي، فهنالك مواد أخرى تدخل في تصنيع الوقود النووي ولا يمكن الاستغناء عنها في هذا المجال، وهي المواد التي تستخدم لتغليف الوقود أو في تصنيع قطبان التحكم وقضبان الأمان في المفاعلات. وهنالك أيضاً المواد التي تدخل في تجهيز مصادر النيوترونات والعاكسات النيوترونية التي

تحيط بقلب المفاعل، وكذلك المواد التي تدخل في الدروع الواقية من الإشعاع، ومن أمثلتها الزيركونيوم والكادميوم والبريليوم وغيرها، وهي كلها فلزات تستخدم في الخامات المعدنية بصفة عامة[9,8] .

(3-2) مراحل الحصول على الوقود النووي

(3-2-1) اكتشاف اليورانيوم

يتم البحث دائماً عن أثر اليورانيوم في أبنائه والذي يشع أشعة قاما وغالباً ما يكون البزموث (Bi) ويتم الرصد بعدة طرق منها الآتي:

1. الرصد بوساطة المحطات الأرضية:

باستخدام مقاييس أشعة قاما وألفا يقاس المستوى الإشعاعي ومن ثم يحدد مستوى الوقود وقد تؤخذ عينات صخرية للتحليل.

2. الرصد بواسطة الطائرات:

يتم مسح الإشعاع الأرضي على ارتفاعات منخفضة وذلك باستخدام أجهزة غاية في الحساسية تُحمل على الطائرات وهي طريقة مكلفة جداً .

3. الرصد في الماء:

تؤخذ عينات من المياه الجوفية أو السطحية وهي طريقة عالية الكفاءة وتستخدم حالياً على مدى واسع جداً [10].

(3-2-2) استخراج اليورانيوم من المناجم

بعد العثور على خام اليورانيوم في منطقة ما، تجرى الدراسات اللازمة لاستخراجه وذلك بعد اتخاذ القرار السياسي باستخدامه، حيث يتم فتح المنجم المناسب حسب عمق راسب اليورانيوم وهذه النسبة تحدد بقياس شدة الإشعاع المنبعث من الخام.

عادة تتراوح نسبة اليورانيوم في خامات المناجم بين 0.5% – 1% وقد تزيد هذه النسبة أو تقل حتى تصل إلى 0.025% في بعض الخامات[10] .

(3-2-3) استخلاص اليورانيوم

يوجد اليورانيوم في الطبيعة في الحجر الرملي وحصى الكوارتز وفي عروق تمتد داخل التشكيلات الحجرية وإلى درجة أقل من أنواع أخرى من المستودعات الطبيعية. أكبر احتياطي يوجد في امريكا وكندا وجنوب افريقيا واستراليا وفرنسا. تحتوي خامات اليورانيوم الجيد على 4% من اليورانيوم ولكن مستودعات هذا النوع قد استنفدت.

أما عن استخلاص اليورانيوم 235 من اليورانيوم الطبيعي ورفع نسبته من 0.7% إلى 90% أو يزيد ليكون صالحاً كمتفجر نووي، فهي من العمليات الصناعية المكلفة جداً لأن النظيران يتطابقان في خصائصهما الكيميائية، والاختلاف الوحيد بينهما هو الفرق الضئيل في الكثافة، وقد وجد أن أفضل طريقة لفصلهما تعتمد على هذا الفرق الضئيل، يوتم ذلك بتحويل اليورانيوم إلى سادس فلوريد اليورانيوم Uranium Hexa-floride ، وهو مركب غازي، ثم امراره خلال مرشحات خاصة بحيث يمر سادس فلوريد اليورانيوم 235 أسرع قليلاً من النظير الآخر فيخرج من المرشح بتركيز أعلى قليلاً، وبتكرار العملية عدة مرات خلال خلايا متتابعة من هذه المرشحات يمكن تركيز اليورانيوم 235 بنسبة مختلفة.

هنالك طريقتين لاستخلاص اليورانيوم من خاماته هما:

أ/ الطريقة الحمضية ويستخدم فيها حمض الكبريتيك كعامل أساسي في إذابة اليورانيوم.

ب/ الطريقة القلوية وفيها يستخدم مركب قلوي مثل كربونات الكالسيوم كمذيب لليورانيوم[12,11] .

(3-2-4) تنقية اليورانيوم

يحتاج تصنيع الوقود النووي إلى يورانيوم نقي جداً ، لأن اي شوائب موجودة به يمكن أن تكون ماصة للنيوترونات وتقلل كفاءته كوقود ولهذا يتعرض الراسب الأصفر إلى اختبارات كيميائية صارمة، وفي هذه المرحلة تعاد إذابة الراسب الأصفر وتستخدم وسائل كيميائية مختلفة لتنقية اليورانيوم من الشوائب التي لا زالت عالقة به .[7]

(3-2-5) المعادلات الكيميائية لتحويل أكسيد اليورانيوم إلى غاز UF_6

يحتوي خام اليورانيوم الجيد على حوالي 2 – 5% يورانيوم على هيئة أكسيد اليورانيوم (U_3O_8) بمعدل يتراوح بين 20 – 50 كيلوجرام من (U_3O_8) لكل طن من الخام. وباستمرار عمليات الترسيب والتخفيف نستطيع أن نحصل على مركب (U_3O_8) بنسبة تتراوح بين 70 – 80% من الخام وهذا ما يعرف بالكعكة الصفراء (Yellow Cake).

ويمكن تحضير أكسيد اليورانيوم UO_2 من الكعكة الصفراء بالتصعيد Uolatility ويتم ذلك بمعالجتها بالأمونيا عند درجة حرارة معينة أو عن طريق التفاعل:

$$U_3O_8 + 2H_2 \longrightarrow 3\ UO_2 + 2H_2O \qquad (1\text{-}3)$$

ويتم تحضير رابع فلوريد اليورانيوم UF_4 من UO_2 حسب العلاقة:

$$UO_2 + 4HF \longrightarrow 2H_2O + UF_4 \qquad (2\text{-}3)$$

ثم يعامل رابع فلوريد اليورانيوم بغاز الفلور وينتج سادس فلوريد اليورانيوم UF_6 حيث:

$$UF_4 + F_2 \longrightarrow UF_6 \qquad (3\text{-}3)$$

ومن خصائص سادس فلوريد اليورانيوم أننا نستطيع التحكم في تركيز اليورانيوم 235 وذلك بزيادة هذا التركيز (ما يعرف بعملية التخصيب) وذلك عن طريق الانتشار أو الطرد المركزي أو الفصل الليزري.

كما ويمكن الحصول على اليورانيوم المعدني وذلك حسب التفاعل:

$$UF_4 + 2Ca \longrightarrow U + 2CaF_2 \qquad (4\text{-}3)$$

$$UF_4 + 2Mg \longrightarrow U + 2MgF_2 \qquad (5\text{-}3)$$

المحاليل على هيئة مركبات كيميائية يورانية مع بعض الشوائب[10] .

(3-3) الانشطار النووي

(3-3-1) مقدمة

ينتج الانشطار النووي عندما تكون القوى النووية غير كافية لإبقاء النواة وحدة متماسكة، ويحدث ذلك كلما كبرت النواة بازدياد العدد الذري، إذ أن قوة التنافر الكهربائية بين البروتونات تزداد مع مربع العدد الذري مما يضعف إلى درجة كبيرة من تماسك النواة ويتسبب في عدم استقرارها للأعداد الذرية العالية هذا يفسر تواجد عدد محدد من العناصر المستقرة في الطبيعة إذ أن العناصر الثقيلة تكون غير مستقرة بعد تجاوز عدد معين من البروتونات لأنها تتحلل اشعاعياً ولا تراها في الطبيعة.

الانشطار النووي نوعان:

1. الانشطار الذاتي: ويحدث تلقائياً في بعض النوي الثقيلة غير المستقرة.
2. الانشطار بالحث: ويحدث عندما تحصل النواة على طاقة إضافية بامتصاصها أحد النيوترونات مثلاً [3] .

(3-3-2) نظرية الانشطار النووي

ليس هناك نظرية كاملة لتصنيف الانشطار النووي ولكن يمكن تفسير الكثير من خصائص هذا الانشطار في ضوء نموذج القطرة السائلة وبناءً على هذا النموذج استطاع بوهر وديلر عام 1939م وضع نظرية تصف الانشطار النووي. كما تم ادخال الكثير من التحسينات على هذه النظرية منذ ذلك الوقت.

في ضوء نموذج القطرة السائلة نجد أن النواة تأخذ شكلاً كروياً عندما تكون في مستوى الاستقرار الأرضي، وتأخذ النواة هذا الشكل الكروي على البروتونات

الموجبة الشحنة ومن ثم تنتج قوة تنافر كهربي فيما بين هذه الشحنات عبارة عن قوة كولوم حيث تحاول هذه القوة إحداث تشويه للشكل الكروي للنواة وذلك عندما تحاول الجسيمات المشحونة أن تتنافر مع بعضها البعض، ومن ثم فإن طاقة النواة الكلية تنقسم إلى هذين التأثيرين أي أن:

$$E = 4\pi\, R^2 K + \frac{3\, Z^2 e^2}{5x\ 4\pi\ \varepsilon_0 R} \qquad (6\text{-}3)$$

حيث K ≡ معامل التوتر السطحي

ε_0 ≡ سماحيه الفراغ

R ≡ نصف قطر النواة و Z عددها الذري

يمثل الحد الأول في هذه المعادلة طاقة التوتر السطحي كما تبينها المعادلة التالية:

$$E_s = 4\pi\, R^2 k \;\longrightarrow\; 4\pi\, k \left[r_0 A^{\frac{1}{3}}\right]^2 \longrightarrow (4\pi\, k\, r_0^2)\, A^{\frac{2}{3}} \qquad (7\text{-}3)$$

$$E_s = b\, A^{\frac{2}{3}}$$

حيث b هو مقدار ثابت يمكن تعيينه بالتجربة.

أما الحد الثاني فيمثل طاقة التنافر الكهربي كما تبينها المعادلة التالية:

$$E = \frac{3}{5}\ \frac{Z^2 e^2}{R} \qquad (8\text{-}3)$$

مع ملاحظة أنه تم إضافة المقدار $\frac{1}{4\pi\ \varepsilon_0}$ ليعبر عن القوة الكهربية في الفراغ وبالتالي فإن النواة تقع تحت تأثير هذين الحدين حيث تحاول قوة التوتر السطحي أن تحافظ على الشكل الكروي واستقرار النواة (قوة تجاذب)، أما قوة التنافر الكهربي

فتحاول تمزيق النواة فإذا ما أثيرت النواة لسبب أو لآخر (إما باعطائها طاقة عن طريق قذفها بجسيم نووي أو بأية وسيلة أخرى) فإن ذلك يعمل على تشويه شكلها عن الشكل الكروي، ومن ثم تصبح النواة في مستويات إثارة معينة. فإذا كانت النواة متماثلة حول محور معين فإن شكلها يمكن أن يوصف بالعلاقة:

$$R = R_0[1 + \alpha_2 y_2^0(\theta) + \alpha_4 y_4^0(\theta) + \cdots] \qquad (9\text{-}3)$$

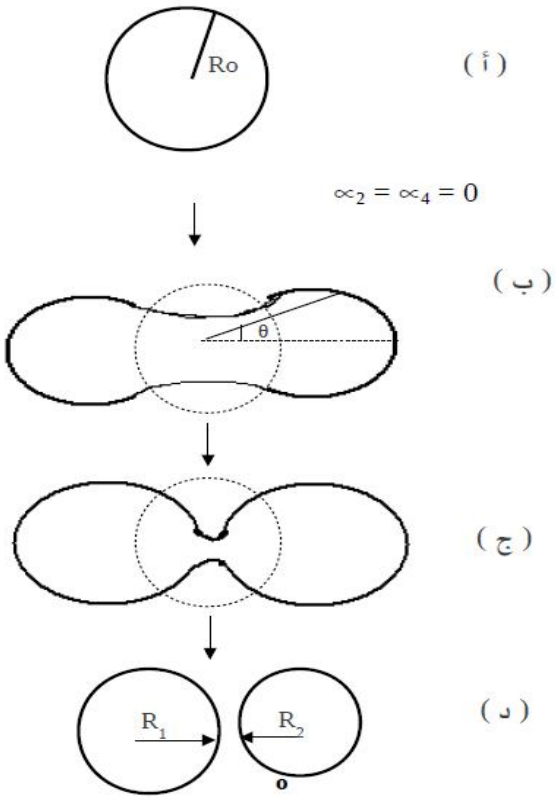
حيث α_2 ، $\alpha_4 \equiv$ معاملات التشويه التي تعتمد على درجة تشويه النواة.

$R_0 \equiv$ نصف قطر النواة الكروية.

$R \equiv$ نصف قطر النواة المشوهة.

$Y \equiv$ متعددة حدود ليجندر.

في الأنوية الخفيفة نجد أن قوة التنافر الكهربية صغيرة حيث تزداد قوة التوتر السطحي والقوة النووية وتصبح النواة كروية الشكل. أما في الأنوية الثقيلة جداً فإن كبر حجم النواة يؤدي إلى زيادة قوة التنافر الكهربي ومن ثم تستطيع هذه القوة التغلب على التوتر السطحي مما ينتج عنه انقسام مما ينتج عنه انقسام أو انشطار النواة. ومن ثم فإن عملية الانشطار النووي التي يمكن تمثيلها بالشكل (2−1) التالي حيث يبين لنا نواة كروية في البداية ثم تثار هذه النواة مما ينتج عنه بدء ظهور التشوهات فيها وتستمر هذه التشوهات حتى تنقسم النواة في النهاية إلى نواتين مختلفتين وهذا هو الانشطار النووي.



الشكل (3−1): مراحل الانشطار النووي في ضوء نموذج القطرة السائلة

نلاحظ في الشكل السابق أن الحجم النووي في جميع المراحل لم يتغير، في الشكل (أ) نجد أن النواة كروية وهنا فإن $(0 = \alpha_1 = \alpha_2)$ وبذلك فإن $R = R_0$. في الشكل (ب) يظهر التشوه وتأخذ R العلاقة (3-5) في الشكل (ج) يزداد التشوه وهنا نصل إلى درجة عالية من الإثارة فإذا كانت قوة التوتر السطحي ما زالت أكبر من قوة التنافر الكهربي فإن النواة تعود إلى شكلها الكروي الأصلي وهنا تفقد النواة طاقة إثارتها بإطلاق الاشعاع النووي (جسيمات α, β, γ ...الخ) إذا أصبحت قوة التوتر السطحي أصغر من قوة التنافر الكهربي سوف تنجح.

نقل النواة إلى المرحلة (د) حيث يتم انقسام النواة إلى نواتين أصغر منها. وهكذا نرى أن النواة يمكنها أن تنشطر تلقائياً إذا كانت طاقة التوتر السطحي لها أقل من أو تساوي طاقة التنافر الكهربي ويمكن ايجاد الشرط اللازم لذلك كما يلي:

تعطى طاقة التوتر السطحي (E_s) للنواة المشوهة بالعلاقة:

$$E_s \sim E_s^0 \left(1 + \frac{2}{3}\alpha_2^2\right) \qquad (10\text{-}3)$$

حيث E_s ≡ طاقة التوتر السطحي للنواة الكروية.

α_s ≡ معامل التشوه

أما طاقة التنافر الكهربي (E_e) فتعطى بالعلاقة:

$$E_e \sim E_e^0 \left(1 - \frac{\alpha_2^2}{5}\right) \qquad (11\text{-}3)$$

حيث E_e ≡ طاقة تنافر النواة الكروية.

من المعادلتين السابقتين يمكن ايجاد طاقة التشوه ΔV

$$\Delta V = (E_s - E_s^0) + (E_e - E_e^0) \qquad (12\text{-}3)$$

أي أن:

$$\Delta V = \frac{\alpha_2^2}{5}\left(2E_s - E_e\right) \qquad (13\text{-}3)$$

تبين هذه المعادلة أن القطرة السائلة ستكون مستقرة إذا كان:

$$2E_s > E_e$$

ويمكن تعريف معامل الانشطار (x) حيث:

$$x = E_e/2E_s \qquad (14\text{-}3)$$

ومن ثم فإن:

أ. إذا كانت $x<1$ فإن النواة ستكون مستقرة.

ب. إذا كانت $x>1$ فإن النواة ستنشطر.

ويمكن حساب x من العلاقات الأساسية لنموذج القطرة حيث نجد أن:

$$E_e = \frac{3}{5} Z^2 e^2 / R$$

وبالتعويض عن قيمة الثوابت نجد أن:

$$E_e^0 = \frac{0.711 Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \ MeV \qquad (15\text{-}3)$$

أما طاقة التوتر السطحي E_s فإنها تعطى بالعلاقة:

$$E_s = b\, A^{\frac{2}{3}}$$

أي أن:

$$E_s^0 = 17.8\, A^{2/3} \ MeV \qquad (16\text{-}3)$$

من المعادلتين (3-15) و (3-16) وبالتعويض في المعادلة (3-13) نجد أن:

$$x = \frac{Z^2}{A} \cdot \frac{1}{50.13} \qquad (17\text{-}3)$$

وبالتالي فإن هذه المعادلة تمثل شرط حدوث الانشطار النووي التلقائي والآني للأنوية فإذا كانت $Z^2/A > 50.13$ فإن ذلك يعني أن النواة سوف تنشطر تلقائياً spontaneously وآنياً Instantaneously [18,17,10,8] .

الجدول (3-1) الطاقات الحرجة للانشطار لبعض الأنوية

النواة الهدف	Z^2/A	معامل الانشطار (x)	E_c (MeV)	طاقة ترابط النيوترونات MeV	$W-E_c$
ثوريوم 232	24.91	0.70	5.9	5.1	- 0.8
يورانيوم 238	35.56	0.71	5.9	4.8	- 1.1
يورانيوم 235	36.02	0.72	5.8	6.4	+ 0.6
يورانيوم 233	36.40	0.72	5.5	6.7	+ 1.2
بلوتونيـــــوم 239	37.0	0.73	5.5	6.4	+ 0.9

و في ضوء نموذج قطرة السائل فإن بوهر وويلر قاما بحساب الطاقة الحرجة (E_c) لبعض العناصر بافتراض تكون نواة مركبة تمر بالمراحل اللازمة للانشطار كما في الشكل (3−1) .

يبين الجدول (3−1) الطاقة الحرجة لبعض الأنوية عند قذفها بالنيترونات الحرارية ، كما يبين أيضا طاقة ترابط النيوترون في النواة المركبة (W) . نلاحظ أن طاقة إثارة النواة المركبة هي ببساطة عبارة عن طاقة ترابط النيوترون الذي امتص بواسطة النواة الهدف. العمود الأخير من الجدول يبين الفرق بين طاقة الإثارة الناتجة في النواة المركبة والطاقة الحرجة اللازمة لحدوث الانشطار ($W-E_c$) حيث تبين القيم الموجبة أن W أكبر من E_c ومن ثم يحدث الانشطار لمثل تلك الأنوية. وعندما ($W-E_c$) تأخذ قيمة سالبة فإن هذا يعني أن W اقل من الطاقة الحرجة وبالتالي لا يحدث الانشطار. كما يبين الجدول أن الثوريوم232 واليورانيوم238 هي أنوية غير قابلة للانشطار بالنيوترونات الحرارية لأن قيم ($W-E_c$) سالبة ، وبالتالي

فإنه كي يتم الانشطار لهذه النظائر فلابد من زيادة طاقة النيترونات الساقطة بطاقة تساوي الفرق بين W، E_c على الأقل ، أي حوالي 1 Mev وبالتالي يمكن لهذه الأنوية أن تنتشر عند قذفها بالنيترونات السريعة (بطاقة 1 Mev) كما نلاحظ في الجدول أن أنوية $^{235,233}U$ والبلوتونيوم239 يمكنها الانشطار عند امتصاصها للنيوترونات الحرارية أو السريعة وبالتالي فهي تنشطر عند قذفها بنيوترونات أياً كانت طاقتها. أما الحالة (3) فتمثل تلك الأنوية التي يمكنها الانشطار آنيا وتلقائيا.

ونلاحظ من الجدول (3−1) أنه كلما زادت النسبة Z^2/A فإن احتمال الانشطار يزداد لأن النواة تقترب من شرط الانشطار التلقائي [19,18,2] .

الفصل الرابع

المفاعلات النووية

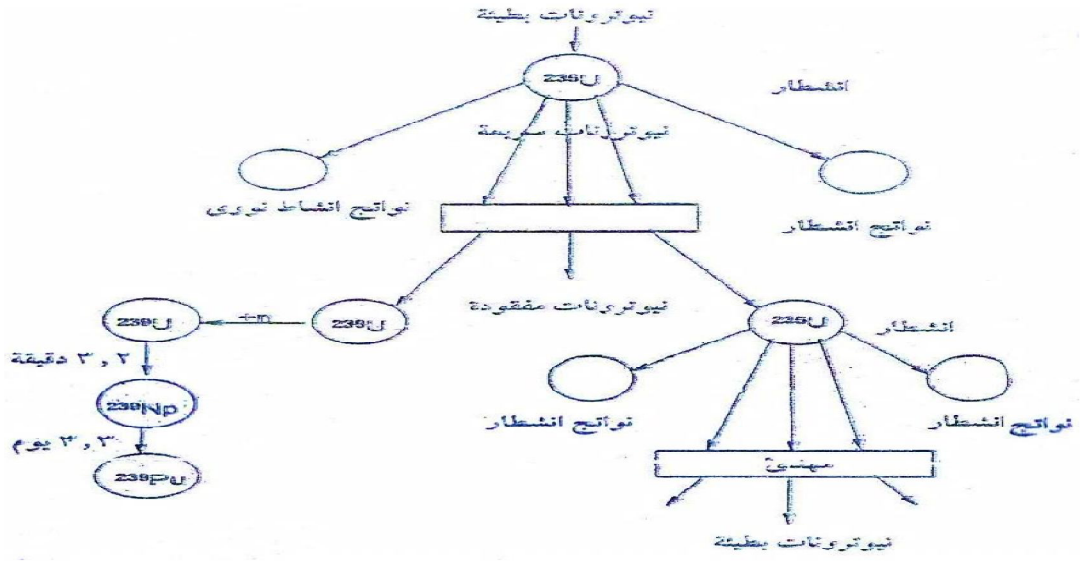
(4-1) مفاعلات الانشطار النووي

(4-1-1) مقدمة

مما لاشك فيه أن المفاعلات النووية تعتبر من أفضل مصادر النيوترونات على الإطلاق [6].

(4-1-2) المفاعل النووي

والمفاعل النووي جهاز يحتوي على مادة قابلة للانشطار النووي كاليورانيوم-235 والبلوتونيوم-239 واليورانيوم-233. ويجري تنظيم المفاعل بحيث يمكن التحكم في التفاعل النووي الذاتي واستمراره بما يعرف بالتفاعل المتسلسل Chain Reaction . إن العامل المهم لبدء واستمرار التفاعل المتسلسل لنواة اليورانيوم-235 مثلاً هو توافر نيوترون بطئ واحد على الأقل كما يبدو في الشكل التالي:[18,6]



[7] شكل (4-1): التفاعل المتسلسل

ولما كانت أغلب مفاعلات الأبحاث النووية تولد النيوترونات الحرارية، فإنها تحتوي على مهدئات moderators لتحويل النيوترونات السريعة إلى نيوترونات بطيئة تتراوح طاقتها بين 2.5 MeV – 0.6تقريباً . والمواد المهدئة ذات عدد كتلة صغير، ومقطعها العرضي لامتصاص النيوترونات قليل، كالماء العادي والماء الثقيل والجرافيت والبريليوم وغيرها. وهنالك علاقة وثيقة بين سيل النيوترونات المتولدة في المفاعل ومقدار الطاقة الصادرة عن التفاعل المتسلسل، فمن الثابت أن ما مقداره 190 MeV من الطاقة الصادرة عن انشطار نووي يتحول إلى طاقة حرارية عدا نسبة صغيرة تقدر بحوالي 11MeV تنقل بعيداً عن المفاعل لتصاحب انبعاث النيوترونات. وبعبارة أخرى فإن الطاقة المتحولة إلى حرارة وقدرها مليون واط MW تنتج من كل 3×10^{16} انشطارا في الثانية الواحدة لنواة اليورانيوم−235 ويصاحب هذه الطاقة انبعاث 7×10^{16} نيوترون لكل ثانية.

إن سيل النيوترونات المنطلقة من مفاعل نووي يعمل في مستوى معين من القدرة Power يعتمد على سعة قلب المفاعل Core ، وهو الجزء الذي يضم الوقود النووي، وإن أية محاولة لزيادة السيل النيوتروني تتطلب توافر عدد من العناصر الفنية الخاصة بتصميم المفاعلات كرفع كفاءة أجهزة التبريد وزيادة كمية الوقود النووي. وحتى لو توافر هذان العنصران فإن احتراق نسبة 30% – 40% من الوقود أو تسممه بنواتج الانشطار لابد وأن يؤثرا على كفاءة المفاعل وحسن أدائه.

ويعتبر السيل النيوتروني عنصراً هاماً في اجراء التفاعلات النووية، حيث تزداد كمية ناتج التفاعل كلما ازداد السيل النيوتروني، ولهذا السبب بالذات تعتبر المفاعلات النووية من أكثر الأجهزة المولدة للنيوترونات غزارة. ويشير الجدول التالي إلى عدد من مصادر النيوترونات والسيل النيوتروني المنتج فيها [13].

جدول (4−1): بعض مصادر النيوترونات والفيض النيوتروني المنتج منها

المصدر	سيل النيوترونات الحرارية Neutron cm^2 sec^{-1}
Ra + Be	1×10^5
Po + Be	2×10^4
مولد فان دي جراف (بطاقة 1 MeV على Be)	1×10^7
مفاعل حمام السباحة swimming	2×10^{13}
مفاعل فحص المواد MTR	7×10^{14}

(4−2) مكونات المفاعل النووي

يتركب المفاعل بصورة عامة من عدة أجزاء يمكن تفصيلها كما يلي:

1/ قلب المفاعل Reactor Core

يسمى الجزء المركزي في المفاعل بالقلب وفي جميع المفاعلات باستثناء المفاعل المولد Breeder Reactor ويحتوي قلب المفاعل على الوقود والمهدئات والمبردات في حين لا يحتوي المفاعل المولد على مادة تهدئة [9] .

2/ الوقود Fuel

هو المادة القابلة للانشطار وهذه المادة حتى الآن تنحصر في أحد ثلاثة نظائر فقط: اليورانيوم ^{235}U وهو عنصر طبيعي، والبلوتونيوم ^{239}Pu وهو عنصر صناعي يحضر من اليورانيوم ^{238}U بالتفاعل النووي الذي يشمل اقتناص نيوترون

يتبعه فقد جسيمين بيتا متتاليين، وكذلك اليورانيوم ^{233}U وهو عنصر صناعي ويمكن تحضيره من الثوريوم ^{232}Th.

وهنالك خمسة أنواع من الوقود النووي وهي اليورانيوم عالي التخصيب Highly Enriched Uranium ، واليورانيوم منخفض التخصيب Low Enriched Uranium ، والبلوتونيوم واليورانيوم ^{233}U وكذلك توجد مادتان خصبتان هما اليورانيوم ^{238}U والثوريوم ^{232}Th [8,1] .

3/ المبردات Coolants

تستخدم المبردات لسحب الحرارة من المفاعلات وهناك أنواع كثيرة منها حسب تصميم المفاعل والغرض الذي من أجله أنشئ المفاعل وكذلك لاعتبارات أخرى كثيرة ومن أشهر المبردات وأبسطها الماء العادي والذي يعرف بالماء الخفيف حيث تعرف المفاعلات التي تبرد بواسطة الماء العادي بمفاعلات الماء الخفيف (LWR).

وهناك بعض أنواع المبردات المستخدمة وهي:

- الماء العادي.
- الماء الثقيل.
- المعادن السائلة.
- الغازات.

4/ المهدئات Moderators

هي عبارة عن مادة مبطئة للنيوترونات تقوم بتحويل النيوترونات السريعة إلى نيوترونات حرارية ونظراً لأن المواد ذات العدد الكتلي الصغير هي أكثر المواد فعالية

في هذا الشأن فإن أكثر المواد استخداماً للتهدئة هي الماء العادي والخفيف وكذلك الجرافيت، ويستعمل البريليوم وأكسيد البريليوم والسيراميك في بعض المفاعلات لكن تكلفتها العالية تحد من استخدامها على نطاق واسع.

5/ قضبان التحكم Control Rods

من أهم الأمور التي تجب التنبه لها والتحكم فيها في المفاعلات النووية هو معامل التضاعف (k) لأنه لو زاد عن الواحد الصحيح فستصبح الحرارة المتولدة داخل المفاعل أكثر مما يستطيع الماء المستخدم في التبريد حملها إلى خارج المفاعل وبذلك ترتفع درجة حرارة المفاعل مما يهدد بانصهار قلب المفاعل الموجود به الوقود، وحتى يمكن التحكم في معامل التضاعف ليظل قريباً من الواحد الصحيح يستخدم قضبان تحكم مصنوعة من الكادميوم أو البورون، وقد تكون قضبان التحكم على شكل اسطوانات أو تكون على شكل شرائح [9] .

6/ دثار الوقود Fuel Depleted

يوجد هذا الجزء في المفاعل المولد فقط وهو عبارة عن مادة انشطارية غير حرارية مثل اليورانيوم U^{238} تحيط بقلب المفاعل، والهدف من ذلك الاستفادة من النيوترونات المتسربة من قلب المفاعل لتحويل قسم من أنوية الدثار.

يتولد في دثار الوقود كمية لا بأس بها من الطاقة نتيجة الانشطارات التي تحدث فيها لذلك فإنه يجب تبريدها أيضاً .

7/ العاكس النيوتروني Reflector of neutron

يلي قلب المفاعل تماماً أو دثار الوقود إن وجد ما يسمى بالعاكس وهو يتكون من نفس مادة المهدئ أو مادة أخرى لها نفس خواص المهدئ تقوم بارجاع جزء من

النيوترونات مثل تسربها للخارج إلى قلب المفاعل وبذلك يقل فقد النيوترونات وهذا يؤدي إلى تقليل الكتلة الحرجة للوقود التي يحدث عندها التفاعل المتسلسل.

8/ وعاء المفاعل Reactor Vessel

يحتوي وعاء المفاعل على جميع الأجزاء التي سبق ذكرها، وفي بعض المفاعلات التي تعمل تحت ضغط عالي يسمى وعاء المفاعل بوعاء الضغط، ولتقليل التأثيرات الحرارية على الوعاء يوجد في بعض المفاعلات درع حراري Thermal Shield وهو عبارة عن مادة موهنة لأشعة γ مثل الفولاذ ونظراً لارتفاع حرارة الدرع الحراري نتيجة امتصاص أشعة γ فإنه يجب تبريده [8] .

9/ حاجز الاشعاعات Radiation Shield

لحماية العاملين في المفاعل وحماية السكان المحيطين بمكان المفاعل والبيئة جميعها بشكل عام يتم إحاطة وعاء المفاعل بطبقة سميكة من الخرسانة لمنع النيوترونات أو أشعة جاما من التسرب للأجواء المحيطة وتسمى هذه الطبقة بحاجز الاشعاعات.

10/ حاوي المفاعل Reactor Containment

بالإضافة إلى الأجزاء سابقة الذكر والتي تتعلق جميعها بعملية الانشطار فإن هناك أجزاء مساعدة غير نووية يشتمل عليها المفاعل كنظام تزويد البخار والتوربينات ...الخ.

وتقع جميع هذه الأجزاء النووية وغير النووية في بناء حصين من الخرسانة يسمى حاوي المفاعل ويقوم هذا الحاوي بحماية العاملين من تسرب أية اشعاعات

من المفاعل في حالة حصول حادثة كما يقوم بحماية المفاعل من أي تأثيرات خارجية مثل الصواعق، البراكين، الفيضانات وسقوط الطائرات [14,1] .

(4-3) تصنيف المفاعلات النووية الانشطارية

Fissions Nuclear Reactor Classification

تصنف المفاعلات حسب عدة قواعد، منها:

1/ حسب طاقة النيوترون أو فعاليته

أ. المفاعلات السريعة: إن أغلبية الانشطارات تحدث بواسطة طاقة النيوترونات السريعة، ويكون معدل الطاقة عدة مئات من الكيلو الكترون فولت.

ب. المفاعلات الحرارية: إن أغلب الانشطارات تحدث بواسطة النيوترونات الحرارية.

ج. المفاعلات المتوسطة: والانشطارات في هذا النوع تحدث بواسطة النيوترونات ذات الطاقة المتوسطة.

2/ حسب التركيب (الشكل العام) لقلب المفاعل

أ. متجانسة:الوقود والمهدئ يكونان خليطاً متجانساً .

ب. المفاعلات المتغايرة أو اللا متجانسة.

3/ حسب امكانية انتاج مواد جديدة قابلة للانشطار

أ. مفاعلات محولة: وهي تلك التي تنتج مواد قابلة للانشطار أقل مما تستهلك، وتعتبر كل مفاعلات اليورانيوم ضمن هذه المجموعة.

ب. المفاعلات المولدة: وهي تلك التي تنتج مواد قابلة للانشطار أكثر مما تستهلك، وكمثال المفاعلات الحرارية والسريعة التي تشتغل على القاعدة نفسها.

4/ تصنيف المفاعلات حسب التطبيقات

أ. المفاعلات الاختبارية.

ب. المفاعلات الاثباتية.

ج. مفاعلات الأبحاث.

د. المفاعلات المقامة لغرض التدريب.

هـ. مفاعلات القدرة أو مفاعلات الطاقة [17,9].

(4-4) تحكم النيوترونات في مفاعلات الانشطار النووي

إن العامل الفريد في حدوث واستمرار التفاعل المتسلسل ينحصر في انبعاث عدد من النيوترونات عندما تمتص ذرة الوقود النووي واحدا منها. وكل نيوترون من تلك النيوترونات عندما يمتص من قبل ذرة أخرى من ذرات الوقود يولد مزيداً من النيوترونات، وهكذا يستمر التفاعل المتسلسل ويشار إلى ذلك العامل بعامل التكاثر Multiplication Factor ويرمز له بالحرف K ويساوي:

$$K = \frac{\text{عدد النيوترونات المنبعثة}}{\text{عدد النيوترونات المقودة}}$$

فإذا كان مقدار K أقل من واحد فلن يحدث تفاعل متسلسل وإذا كان مساوياً إلى واحد فإن التفاعل المتسلسل يستمر بمعدل ثابت. أما إذا كان أكبر من واحد فإن عدد الانشطارات يستمر في الزيادة مما يؤدي إلى حدوث تفاعلات متفرقة. ويطلق

على الحالة التي يكون فيها $K = 1$ بالحالة الحرجة Critical وعلى الحالة التي يكون فيها $K > 1$ بالحالة ما فوق الحرجة Supercritical.

ولما كان التفاعل المتسلسل يحتاج إلى نيوترون واحد لكل انشطار، فإن عدد النيوترونات يزداد بمقدار $(K - 1)$ في كل عملية. أما معدل التغير في عدد النيوترونات في التفاعل المتسلسل فيحسب على النحو التالي:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(K-1)}{\tau} \qquad (1\text{-}4)$$

ويمثل N عدد النيوترونات وτ متوسط الزمن الذي يفصل بين عمليتي انبعاث النيوترونات المتعاقبة. وبتكامل المعادلة أعلاه نحصل على:

$$N = N_0 e^{(K-1)t/\tau} \qquad (2\text{-}4)$$

وتمثل N_0 عدد النيوترونات عندما يكون τ = صفر. وعندما يكون τ صغيراً جداً (أي في حالة عدم استعمال مهدئ Moderator بحيث يحدث الانشطار بواسطة النيوترونات السريعة) وعندما يصبح $K < 1$ بصورة مفاجئة فإن التسلسل يتحول إلى انفجار عاصف كما هو الحال في القنابل النووية الانشطارية.

وتصمم المفاعلات النووية بحيث تكون قيمة K أكثر من واحد أي حوالي 1.01 أو 1.02 فلو بدأت عملية الانشطار بمائة نيوترون فسوف يتولد $100 \times 1.01 = 101$ نيوترون في العملية الأولى وسيتولد $101 \times 1.01 = 102.01$ نيوترون في العملية الثانية وهكذا...

وتتم السيطرة على التفاعل المتسلسل في المفاعلات بإدخال قضبان السيطرة، وهي مصنوعة من عناصر لها قدرة عالية على امتصاص النيوترونات كفلز الكادميوم مثلاً. ولابد من التنويه بأن السيطرة على التفاعل المتسلسل تصبح صعبة إذا كانت الفترة الزمنية τ قصيرة جداً. ومن أهم خواص مادة قضبان التحكم والسيطرة

هو عدم تحولها لمادة مشعة حينما تمتص نيوترونا. والكادميوم له هذه الخاصية ولكن درجة انصهاره قليلة نسبياً 704 درجة مئوية عليه فيمكن استخدامه فقط في المفاعلات التي تعمل عند درجات حرارة منخفضة. ويمكن استخدام سبيكة من Ag 15% In + 5% Cd + ولها درجة انصهار أكبر ويفضل الهافنيوم في هذه الحالة، ولكن سعره مرتفع، أو سبيكة البورال Boral وهي B_4C في الألمونيوم Al. وتستخدم هذه المواد على هيئة قضبان أو أطباق في العاكس أو في قلب المفاعل.

ولنفترض أن $\tau = 10^{-3}$ sec و $K = 1.001$ ، وبتطبيق المعادلة السابقة نحصل على النتيجة التالية:

$$N = N_0 e^{\frac{(1.001-1)t}{0.001}}$$

$$= N_0 e^{t} \qquad (3\text{-}4)$$

ويظهر من تلك النتيجة أن مقدار N يزداد بمقدار (e) ضعفاً في كل ثانية أي حوالي 20.000 ضعفا كل عشر ثوان. وهذه الزيادة في عدد النيوترونات كبيرة مما يصعب معها السيطرة بسهولة على التفاعل المتسلسل.إن الصعوبات التي تواجه مصممي المفاعلات النووية تنحصر في توفير الظروف الفنية التي تجعل المفاعل يعمل بعامل تكاثر يتجاوز الواحد بقليل. ونظراً لأهمية تلك الظروف فلندرس الوضع الذي يكون فيه $K = 1$. ولنفترض أيضاً أنه في كل حادثة انشطار يتولد ما معدله 2.5 نيوترون وأن عدد الانشطارات التي تحدث في فترة معينة هو 100 انشطار، فتتوزع عندئذ النيوترونات على الشكل التالي:

100 نيوترون بطئ تمتص من قبل ^{235}U لينشطر مولدا 250 نيوتروناً وعلى ذلك فإن:

250 نيوترونا سريعا تتولد في قلب المفاعل منها:

20 نيوترونا سريعا تفلت من قلب المفاعل

90 نيوترونا سريعا تمتص من قبل U^{238} دون انشطار مكونة U^{239}

140 نيوترونا سريعا تأخذ في التباطؤ منها:

10 نيوترونات بطيئة تفلت من قلب المفاعل

130 نيوترونا بطيئا تمتص في قلب المفاعل منها:

30 نيوترونا تمتص من قبل U^{235} (دون انشطار) والمهدئ والمبرد.

100 نيوترون بطئ تمتص من قبل U^{235} مكونة انشطارا جديداً، وهذا تبدأ سلسلة الانشطارات من جديد.

إن استمرارية التفاعل الانشطاري تتوقف على عدة عوامل منها أبعاد قلب المفاعل. فإذا ما افترضنا أن أبعاد المفاعل غير محدودة بالقدر الذي لا يسمح للنيوترونات بالإفلات، فإن عدد النيوترونات البطيئة التي تمتص من قبل اليورانيوم الطبيعي U^{238} والذي يحتوي على نسبة ضئيلة من U^{235} هو n نيوترون. فلو كانت جميع النيوترونات تولد انشطارات جديدة فسوف نحصل على nV من النيوترونات، حيث يشير V إلى معدل عدد النيوترونات السريعة المتولدة في عملية انشطارية واحدة (ويساوي 2.5 لليورانيوم−235). وفي الواقع نجد أن بعض النيوترونات المتولدة تمتص من قبل U^{235} ، U^{238} دون أن تساهم في إحداث الانشطار. لذا فإن مقدار V يصبح أقل من قيمته الفعلية ويؤول إلى المقدار η الذي يمثل المعدل الواقعي للنيوترونات المتولدة ويحسب على النحو التالي:

$$\eta = \frac{N^{235}\ \sigma_f^{235}}{N^{235}\ \sigma_f^{235} + N^{235}\ \sigma_c^{235} + N^{238}\ \sigma_c^{238}} \times V \qquad (4\text{-}4)$$

وترمز N^{235} ، N^{238} إلى عدد نوي اليورانيوم −238 ، 235 في وحدة الحجم، σ_c إلى المقطع العرضي لأسر النيوترونات و σ_f إلى المقطع العرضي الانشطاري، وبقسمة البسط والمقامة للمعادلة أعلاه على N^{238} تصبح كما يلي:

$$\eta = \frac{R\ \sigma_f^{235}}{R\ \sigma_f^{235} + R\ \sigma_c^{235} + R\ \sigma_c^{238}} \times V \qquad (5\text{-}4)$$

وتشير R إلى نسبة (N235/N238) وتساوي في اليورانيوم الطبيعي 0.00715 ، إن المقطع العرضي الانشطاري (بالبارن) لليورانيوم 235 بالنيوترونات الحرارية = 290 ولليورانيوم 238 = صفراً، والمقطع العرضي لأسر النيوترونات لليورانيوم 235 = 108 ولليورانيوم 238 = 2.8 ، وبالتعويض في المعادلة (3-5) نحصل على:

$$\eta = \frac{0.00715 \times 590}{0.00715 \times 590 + 0.00715 \times 108 + 0.00715 \times 2.8} \times 2.5 = 1.3 \qquad (6\text{-}4)$$

ويحسب مقدار η لليورانيوم 235 النقي على النحو التالي:

$$= \frac{590}{590+108+2.8} \times 2.5 = 2.1$$

وكلما زادت قيمة R وذلك عن طريق تخصيب اليورانيوم فإن قيمة η تزداد. نستنتج مما تقدم بأن η يزداد كلما ازداد تركيز اليورانيوم 235.

لقد افترضنا في المثال السابق أن أبعاد قلب المفاعل غير محدودة. ولغرض معرفة تأثير الأبعاد المحدودة فيما يتعلق بموضوع إفلات النيوترونات منها لابد من الافتراض بأن هناك احتمالا ، P ، بعدم إفلات النيوترونات من قلب المفاعل. فلكي يستمر التفاعل المتسلسل يجب أن يكون:

$$K_{eff} = KP = 1$$

حيث يشير K_{eff} إلى عامل التكاثر الفعال .

ونجد في المفاعلات ذات الأبعاد المحدودة أن مقدار P يقل عن الواحد، وعليه يجب أن تكون قيمة K أكبر من واحد. وبغرض زيادة مقدار P لابد من توسيع قلب المفاعل إلى الحد الذي يصبح فيه KP=1 بحيث نحصل على ما يسمى بالحجم الحرج Critical Volume ، وهو الحجم الذي يساعد على توليد النيوترونات بمعدلات تكفي لاستمرار التفاعل المتسلسل. ويلاحظ أنه كلما تزداد قيمة K تقل قيمة P. ولما كانت قيمة K تزداد بزيادة كمية U^{235} في الوقود النووي فإن ذلك يؤدي إلى اختزال الحجم الحرج بحيث يصل إلى حده الأدنى في حالة استخدام اليورانيوم 235 النقي كما هو الحال في أجهزة التفاعل الانشطاري الانفجاري. ويمكن أيضاً اختزال حجم قلب المفاعل أكثر فأكثر إذا ما أحيط القلب بعاكس Reflector للنيوترونات كالجرافيت مثلاُ.فقد وجد مثلا أن مفاعلاً اسطوانياً ارتفاعه 177سم ونصف قطره 95 سم وحجمه 5.19 $م^3$ تختزل أبعاده بحيث يصبح ارتفاعه 122.5 سم ونصف قطره 91.5 سم وحجمه 3.2 $م^3$ فيما لو استخدم عاكس من الجرافيت سمكه 20 سم، وكلما زادت نسبة U^{235} في الوقود أمكن اختزال الحجم الحرج.

ومن الوجهة العملية لابد من جعل الحجم الفعلي لقلب المفاعل أكبر بقليل من الحجم الحرج لكي يصبح PK أكثر من واحد بقليل [13,6] .

(4-5) السيطرة على قدرة المفاعل النووي

تعتمد قدرة المفاعل النووي على عدد نوي اليورانيوم المنشطرة في الثانية الواحدة، وهي بدورها تتناسب مع عدد النيوترونات المتوافرة في المفاعل. وإذا افترضنا أن المفاعل مصمم بحيث يزيد Keff عن واحد بقليل بحيث يزداد عدد نوي اليورانيوم المنشطرة في الثانية الواحدة باستمرار وبالتالي تزداد قدرة المفاعل. وعندما تصل قدرة المفاعل إلى الحد المطلوب تعدل ظروف عمل المفاعل بحيث تصبح Keff مساوية إلى واحد. وهنا يتساوى عدد النيوترونات المتولدة مع عدد النيوترونات

المفقودة. وكما أوضحنا سابقاً بأن KP = Keff كما أن K تعتمد على نوع المفاعل و P على سعته وكلاهما ثابت في النوع الواحد من المفاعلات. ولغرض تغيير قيمة Keff لابد من التحكم بقيمة P، وذلك باستعمال ما يعرف بقضبان السيطرة Control Rods وهي مصنوعة من عناصر ماصة للنيوترونات كالكادميوم والبورون وغيرهما. وعند إدخال تلك القضبان في قلب المفاعل تمتص النيوترونات وتقل نتيجة لذلك Keff ، P .

إن الفيض في عامل التكاثر Excess Multiplication Factor ويرمز له Kexc والذي يساوي:

$$K_{exc} = (K_{eff} - 1) \qquad (7\text{-}4)$$

يرتبط بفاعلية المفاعل Q ، Reactor Reactivity بالعلاقة التالية:

$$\frac{K_{exc}}{K_{eff}} = \frac{(K_{eff}-1)}{K_{eff}} = Q \qquad (8\text{-}4)$$

ففي التشغيل الاعتيادي للمفاعل يكون مقدار Keff قريباً من الواحد، فيصبح مقدار Q مساوياً لفاعلية المفاعل على وجه التقريب. وإذا ما وصل المفاعل إلى الحالة الحرجة تصبح Keff = 1 و Q =صفراً . وإذا ما أصبحت Q أقل من صفر يصل المفاعل إلى ما يسمى بالحالة تحت الحرجة Subcritical [9,6].

(4-6) احتراق وتوليد الوقود النووي

من بين جميع نظائر اليورانيوم المتوافرة في الطبيعة يعتبر النظير U^{235} الوحيد الذي ينشطر بواسطة النيوترونات البطيئة ليبعث مزيداً من النيوترونات. ويطلق على هذا النظير بالوقود الأساسي Primary Fuel. أما اليورانيوم 238 ، وهو النظير الأكثر توافرا في الطبيعة فإنه يمتص النيوترونات متحولا إلى اليورانيوم

239. وهذا النظير غير مستقر إذ ينحل بأن يبعث بجسيمات بيتا بعمر نصفي 2.3 دقيقة، مكوناً النيتونيوم 239، وينحل هذا النظير بجسيمات بيتا بعمر نصفي قدره 2.3 يوم متحولاً إلى البلوتونيوم 239 كالآتي:

$$^{238}\mathrm{U} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{239}\mathrm{U} \underset{2.3\ \mathrm{min}}{\overset{\beta}{\rightarrow}} {}^{239}\mathrm{Np} \underset{2.3\ \mathrm{day}}{\overset{\beta}{\rightarrow}} {}^{239}\mathrm{U} \quad (9\text{-}4)$$

والبلوتونيوم 239 ينشطر هو الآخر بواسطة النيوترونات الحرارية مطلقاً ثلاثة نيوترونات فهو من هذه الناحية يشبه اليورانيوم 235 ويطلق عليه الوقود الثانوي.

فالمفاعلات التي تستخدم اليورانيوم 238 والمخصب Enriched بنسبة معينة من اليورانيوم 235 كوقود، تولد في نهاية احتراق هذا الوقود البلوتونيوم 239.

إن نسبة ذرات الوقود الثانوي إلى عدد ذرات الوقود الأساسي تدعى نسبة التحول Conversion Ratio وتساوي 0.9 في مفاعلات اليورانيوم الاعتيادية. وتشير تلك النسبة إلى أن الوقود النووي سوف يستهلك كلياً في نهاية المطاف.

لقد أصبح بالإمكان تصميم مفاعلات نووية جديدة بنسبة تحول تساوي أو تزيد عن الواحد وذلك بتقليص النيوترونات المفقودة من المفاعل، وتدعى هذه المفاعلات بالمفاعلات المولدة Breeder Reactors.

مما تجدر الإشارة إليه أن المفاعلات النووية لا تعمل بصورة مستمرة إذا ما تم تزويدها بالوقود فقط. فمن المعلوم أن فاعلية المفاعل تقل تدريجياً وذلك بسبب تجمع فضلات الاحتراق Slug المحتوية على عشرات النظائر والتي تمتص النيوترونات اللازمة لاستمرار التفاعل المتسلسل وهنا لابد من استبدال الوقود المحترق بوقود جديد [13,6] .

الفصل الخامس

سلوك انتقال النيوترون "نظرية المفاعل"

Neutron Transport Behavior (Reactor Theory)

(5–1) مفاهيم انتقال النيوترون Neutron Transport Concepts

مفتاح تصميم قلوب المفاعلات هو وصف إنتاج، انتقال، وامتصاص النيوترونات في القلب. وكما سنرى، فإن التوازن بين معدلات إنتاج النيوترون والفقد تحدد معظم مطالب التصميم الفيزيائي. وحيث تتحرك النيوترونات خلال وسط ما، يمكن أن يكون غازي، سائل، أو صلب، فإنه يصطدم مع نوي ذرات الوسط وفي أي تصادم يمكن أن يمتص النيوترون بواسطة النواة ويمكن أن يتشتت أو يستطير (يتفرق) بمرونة أو بعدم مرونة. ويمكن أن يؤدي الامتصاص إلى فقد النيوترون، مثلاً بواسطة اقتناص مشع أو بزيادة في عدد النيوترونات بالانشطار، نيوترونات الانشطار يكون لها عادة طاقات مختلفة وتتحرك في اتجاهات مختلفة عن النيوترونات الساقطة وعلاوة على ذلك نتيجة للاستطارة سيكون هناك تغير في الموقع الطاقة واتجاه حركة النيوترون ، تفاعل النيوترونات مع نوي وسط ما تؤدي إلى انتقال النيوترونات من موقع إلى آخر، من طاقة إلى أخرى، ومن اتجاه إلى آخر.

تعتبر كثافة النيوترون في عنصر حجم عند نقطة ما في قلب المفاعل، هذه الكثافة ستكون مختلفة لطاقات النيوترون المختلفة، وهكذا فإن الكثافة N ستكون معتمدة على الطاقة E وستتغير الكثافة أيضاً من نقطة إلى نقطة، ويمكن أن يكون لها اعتماد زاوي حول عنصر الحجم السابق.

ويعطى اهتمامنا الجاري إلى مبدأ بقاء النيوترون أو توازن النيوترون في عنصر الحجم الصغير الذي يعبر فيه عن كثافة النيوترون الزاوية ويمكن الحصول على تعبيرات للمعدلات التي تدخل وتغادر عندها النيوترونات ذات الطاقة المعطاة إلى عنصر الحجم المجموع الجبري لهذه التعبيرات يمثل المعدل الصافي للتغير مع زمن كثافة النيوترونات للطاقة الموصوفة واتجاه الحركة عند موقع معين. وتكون النتيجة هي" معادلة انتقال النيوترون" والتي تعبر عن توزيع النيوترونات في الفراغ، الطاقة، والزمن في مسلك مستقيم. وإذا كانت الشروط بحيث لا تتغير كثافة النيوترون مع الزمن، حينئذٍ ترجع المعادلة إلى النظام في حالة مستقرة. وأحياناً تسمى معادلة انتقال النيوترون "معادلة بولتزمان" بسبب مماثلها للصيغة المشتقة بواسطة بولتزمان الخاصة بالنظرية الكينتيه للغازات .

وحيث إن النيوترونات ذات الطاقة المعطاة والتي تتحرك في اتجاه محدد يمكن أن تنتج من تصادمات مستطيرة، بواسطة نيوترونات ذو طاقات واتجاهات عبر مدى واسع، فإن تكامل مصطلحات الاستطارة يجب أن تنفذ عبر كل الطاقات الابتدائية واتجاهات الحركة. وبالتالي فإن معادلة الانتقال تكون معادلة تفاضلية تكاملية والتي حُلّت في حالات قليلة بسيطة جداً . ومع ذلك فإن المعادلة أساسية لحساب الشروط الحرجة في أي مفاعل، التوزيع الفضائي لتدفق النيوترون عند طاقات مختلفة، وكميات أخرى تشكل الأساس لتصميم المفاعل النووي. ولذلك للأغراض العملية تستخدم تقريبات متعددة ونحصل على حلول عددية بواسطة خطوات حسابية، تطبيقات نظرية الانتقالات هذه تكون قابلة للتطبيق حيث تتغير كثافة النيوترون بسرعة كدالة في الاتجاه مثل ما يحدث في تدريجات المفاعل وقريباً من الممتصات القوية.

مثال آخر في حسابات الخلية المطلوبة لتطوير المقاطع المستعرضة للقلوب المتغايرة مثل تلك التي في PWRs ، BWRs.

واحدة من أبسط التقريبات لنظرية الانتقال المستخدمة على نطاق واسع هي "تقريب نظرية الانتشار" diffusion theory approximation . وقد أعطيت هذا الاسم لأنها تشمل علاقة مماثلة لقانون Fick المشهور الذي يطبق في الغازات والمحاليل. مثالياً، يجب أن تشتق معادلة نظرية الانتشار من معادلة الانتقال transport equation ولكن حيث إن هذا اجراء معقد، فإن الاتجاه الذي سيستخدم هنا هو البدء مع قانون Fick للانتشار. وسيتحد ذلك مع معادلة بقاء النيوترونات لطاقة مفردة لاشتقاق شكل مفيد لمعادلة الانتشار[6] .

(5–2) نظرية انشطار النيوترون في حالة بقاء النيوترون وحيد السرعة

للغرض الحالي فإنه يمكن التعبير عن مبدأ بقاء النيوترون في صيغة بسيطة لنظام من النيوترونات وحيدة الطاقة، والتي يرجع إليها بالنيوترونات وحيدة السرعة حيث إنهم جميعاً لهم نفس السرعة.

نعتبر عنصر حجم من وسط يتفاعل فيه نيوترونات ذات سرعة واحدة مع النوي (جمع نواة)، في هذا النظام الفرضي ستترك الاستطارة scattering طاقة النيوترونات (والسرعة) بدون تغيير. ويمكن إنتاج النيوترونات من مصدر (أو مصادر) ويمكن أن تفقد بالامتصاص في تفاعلات عديدة مع النوي أو بالتسرب من عنصر الحجم، المعدل الصافي لتغير كثافة النيوترون n مع الزمن أي $\partial n/\partial t$ يعطى عندئذ بواسطة معادلة بقاء النيوترون الآتية:

المعدل الصافي للتغير لكل وحدة حجم = معدل الفقد بالتسرب لكل وحدة حجم – معدل الفقد بالامتصاص لكل وحدة حجم – معدل الإنتاج من المصادر لكل وحدة حجم

أو: $\partial n/\partial t$ = التسرب – الامتصاص – المصادر (1–5)

حيث إن مصطلحات المصادر، الامتصاص والتسرب ترجع إلى المعدلات الزمنية لهذه العمليات لكل وحدة حجم.

تعتمد كمية مصادر النيوترون على الظروف، وفي الوقت الحاضر ستمثل بالرمز S والذي هو معدل إنتاج النيوترونات/متر مكعب/ ثانية. ويمكن التعبير عن معدل امتصاص النيوترونات بـ $\sum a\phi$ حيث $\sum a$ المقطع المستعرض الماكروسكوبي للامتصاص لنيوترونات السرعة الواحدة في النظام، و ϕ هي تدفق هذه النيوترونات. ومن هنا فإن المعادلة (4–1) أعلاه يمكن أن تكتب كالآتي:

$$S - \sum a\phi - Leakage = \frac{\partial n}{\partial t} \qquad (2\text{-}5)$$

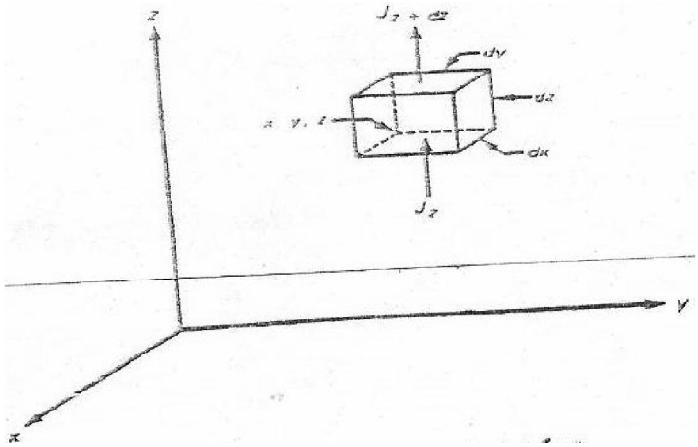
تؤسس حسابات تسرب النيوترون على استخدام "كثافة تيار النيوترون". وتعرف كثافة التيار J_z في الاتجاه -Z بالعدد الصافي من النيوترونات التي تعبر وحدة مساحة السطح في الاتجاه -z في وحدة الزمن. افترض عنصر حجم متعامد dv أبعاده dx, dz, dy موضوعة عند أي نقطة احداثياتها z, y, x . اعتبر الوجهان ذات المساحة dx dy الموازية للمستوى x-y أي متعامدة على الاتجاه -z عدد الالكترونات الداخلة إلى الوجه السفلي كل ثانية تكون $J_z dxdy$ بينما العدد الذي يترك الوجه العلوي يمكن أن يمثل بواسطة J_z+d_z حيث J_z , J_z+d_z هما كثافات تيار النيوترون عند الوجهان السفلي والعلوي على الترتيب. ويكون المعدل الصافي لفقد

النيوترونات الخارجة من عنصر الحجم المعطى خلال الأوجه الموازية للمستوى x-y هي:

$$(J_z + d_z - J_z)dx\,dy = \frac{\partial J_z}{\partial z}\ (dx\,dy\,dz) \qquad (3\text{-}5)$$

وبالقسمة على dx dy dz (حجم العنصر) فإننا نحصل على:

$\frac{\partial J_z}{\partial z}$ = معدل فقد النيوترونات / وحدة حجم في الاتجاه z-



شكل(5−1): حساب تسرب النيوترون[6]

ويمكن اشتقاق تعبيرات مماثلة للاتجاهات x ، y ولذلك فإن:

$$\text{معدل الفقد } \left(\text{أو التسرب}\right) = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z}$$

$$= divj = \nabla.j \qquad (4\text{-}5)$$

حيث:

j= متجه كثافة تيار النيوترون، أي العدد الصافي من النيوترونات المارة في اتجاه معطى في وحدة الزمن خلال وحدة مساحة عمودية على اتجاه التدفق. الرمز ∇ يمثل عامل تشغيل التفرق في مصطلحات المتجهات.

والآن يمكن إدخال معدل التسرب في المعادلة لبقاء النيوترونات وحيدة السرعة كالآتي:

$$S(r,t) - \sum_a \phi(r,t) - \nabla.J(r,t) = \frac{\partial n(r,t)}{\partial t} \qquad (5\text{-}5)$$

حيث إن الإزاحة الزاوية (y,t) [(argument (r,t)] تشير إلى أن الكميات النسبية تؤثر عند نقطة (متجه) r في النظام عند زمن t . المعادلة أعلاه تكون عامة للنيوترونات وحيدة السرعة ولا تعتمد على نظرية الانتشار.

(5-3) ابطاء النيوترونات The slowing Down of Neutrons

يعطى تقريب المجموعة الواحدة دراسات عميقة مفيدة لبعض الخصائص الأساسية للأنظمة التكاثرية، ولكن ومن الواضح أنها غير كافية لتحليل المفاعل النووي. معظم النيوترونات التي تنتج في الانشطار يكون لها طاقات (1-2) Mev ، وتنخفض هذه الطاقات، أي أن النيوترونات تبطئ بواسطة التصادمات المرنة وغير المرنة مع النوي الذرية. وبالتالي في أي مفاعل يمكن تواجد نيوترونات ذات مدى واسع من الطاقات، من كسر صغير من الev إلى عدة Mev قليلة.

في أي مفاعل سريع يتم تجنب المواد ذات عدد الكتلة المنخفض _كلما أمكن_ لأنها ستخفض طاقات النيوترون في تصادمات الاستطارة المرنة. وهكذا، تكون نسبة عالية من النيوترونات لها طاقات عالية، في المدى الذي تلعب فيه الاستطارة الغير مرنة بأنوية اليورانيوم والبلوتونيوم، مثلاً دوراً هاماً .

وفي المقابل، تشمل المفاعلات الحرارية على مُهدئات لغرض محدد هو ابطاء النيوترونات إلى الطاقات الحرارية حيث تحدث معظم الانشطارات، في التحليل

النظري الدقيق للمفاعلات الحرارية، يجب السماح لكل من الاستطارة المرنة وغير المرنة.

وينشأ معظم الابطاء مع ذلك من الاستطارة المرنة (التفرق المرن) بواسطة المهدئ، ويكون التطور الرياضي البسيط ممكناً في حالة الافتراضات الآتية:

1. النوي تكون ساكنة بالنسبة للنيوترونات.
2. النوي غير مقيدة في جزيئات صلبة، سائلة أو غازية.

ويمكن معالجة الابطاء بواسطة الميكانيكا الكلاسيكية، مع كل تصادم بين نيوترون ونواة يؤدي إلى تخفيض في طاقة النيوترون.

رأينا أنه لطاقات النيوترون تحت قليل من ev أن النواة المستطيرة يجب أن تعتبر كقيد، فيما عدا الغاز وحيد الذرة. وعلاوة على ذلك، فإن الطاقات الحرارية للنوي لا يمكن اهمالها الآن مقارنة مع طاقات حركة النيوترونات. ولا تكون الاستطارة غير المرنة منخفضة الطاقة هي المهمة فقط، ولكن يمكن أن يكتسب النيوترون طاقة عند التصادم سواء كان مرناً أو غير مرن، مع النواة المستطيرة. هذا السلوك يسمى "استطارة صاعدة" Up – scattering ، وهو في تناقض مع نواة المهدئ بسبب الاعتبارات السابقة، يوجد جانبين محدودين لابطاء النيوترونات. فالمصطلح تهدئة moderation يطبق على الابطاء من المدى من طاقات الانشطار إلى حوالي 1ev ، منطقة الطاقة هذه تسمى منطقة التهدئة moderating region والابطاء تحت حوالي 1 ev يرجع إليه لـ thermalization وستكون المناقشات الرئيسية هنا منصبه على عملية تهدئة النيوترون حتى يكون الفرضان السابقان (1)، (2) متحققان[6] .

(5-4) طرق عد النيوترونات

لأن النيوترونات لا تتفاعل مع الالكترونات فإنه لا يحدث تأين ابتدائي يذكر، وعليه فإن أجهزة عد النيوترونات تختلف عن أجهزة عد الجسيمات المشحونة. ولكن هناك مبدءان يعتمد عليهما في عد النيوترونات هما:

تفاعل نووي للنيوترونات يولد جسيمات مشحونة مثل $^{10}B \quad (n,\alpha)^{7}Li$ وهو تفاعل طارد للطاقة بمقدار $2.5+$ MeV. ارتداد النوايا الخفيفة بعد تصادمها بالنيوترونات.

وفي كلتا الحالتين فإن الجسيمات الثانوية تحدث تأين في الوسط التي تتواجد فيه، وأي من الطريقتين يعتمد عليها يحسمه طاقة النيوترون المراد عده. فإذا كانت طاقة النيوترونات قليلة، أي في حدود آلاف من eV فإن التفاعل الأول يتم الاعتماد عليه، أما إذا كانت طاقة النيوترون عالية، أي في حدود MeV أو أكثر فإن التفاعل الثاني يتم الاعتماد عليه.

في التفاعل الأول تنتج جسيمات ألفا وكذلك نوايا ذرة الليثيوم وذلك يحدث تأين غزير، وعلى ذلك فإن غرفة التأين يمكن الاعتماد عليها. فإذا ما كان غاز BF_3 جزء من غاز التأين في الغرفة أو تم تغطية جدران الغرفة بطبقة رقيقة من معدن البورون فإنه يمكن عد النيوترونات الساقطة. وحيث أن نسبة وفرة B10 في البورون الطبيعي هي 19% فإنه يمكن استخدام البورون الطبيعي لهذا الغرض ويمكن أيضاً استخدام البورون المخصب (Enriched). وحجم عادي من غرف التأين يمكن من عد كل نيوترون يسقط وسط الغرفة.

والتفاعل ^{3}H $^{3}He(n,p)$ يولد بروتونات ونواة ذرة التريتيوم ويمكن أن يستخدم في عد النيوترونات باستخدام التناسبية Proportional Counter. والتأين في هذه الحالة تحدثه البروتونات والتريتيوم.

وكذلك فإنه من الممكن استخدام المستحلب الفوتوغرافي Photographic Emulsion والتي إذا ما سقطت عليها نيوترونات فإنه بعد تحميض Development هذه الألواح فإنه يمكن رؤية خطوط من حبيبات الفضة. وفي هذه الحالة فإن النيوترونات نفسها لا تؤثر على هاليد الفضة، ولكن إذا ما احتوى المستحلب على مركب البورون مثل البوراكس فإن الجسيمات المشحونة المتولدة يمكن عدها.

يمكن استخدام طرق الطيف الوميضي وذلك باستخدام بلورة فوسفورية لمركب من مركبات البورون محتوية على كبريتيد الخارصين مع الفضة (Ag) ZnS أو يوديد الصوديوم مع الثاليوم (TI) NaI. وكذلك فإنه يمكن تصنيع سائل أو مادة بلاستيكية وميضية حينما يضاف إليها مركب بورات الميثيل، ومن الممكن عد النيوترونات الحرارية باستخدام بلورة (Eu) LiI [6,5].

الخاتمــة والتوصيات

الحمد لله الذي بفضله تتم النعم ، والحمد لله الذي وفقني على كتابة هذا البحث الذي تحدثت فيه عن دراسة النيوترونات في مفاعلات الانشطار النووي ، والذي قسمته إلى أربع فصول رئيسية.

حيث تناول الفصل الأول النيوترونات وتفاعلاتها ومصادرها ، بينما تناول الفصل الثاني الوقود النووي والانشطار، ثم تناول الفصل الثالث المفاعلات النووية ، وأخيرا تناول الفصل الرابع سلوك انتقال النيوترون (نظرية المفاعل).

وأخيرا توصي الدراسة بضرورة أخذ الحذر والاحتياطات اللازمة في استخدام المفاعلات النووية ، ودراسة كيفية التحكم في النيوترونات فيها، وضرورة دراسة سلوك انتقال النيوترونات ، وإجراء الحسابات اللازمة لاستمرار أو إيقاف الانشطارات النووية داخل المفاعل.

المراجــع

[1]سامي حداد ، الوقاية الإشعاعية وامان مصادر الأشعة ، مبادي الفيزياء النووية ، هيئة الطلقة الذرية السورية بالتعاون مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

[2]احمد الناغي ، محمد نبيل يس البكري ،2005م، الفيزياء النووية ، الطبعة الثانية، ملتزم الطبع والنشر دار الفكر العربي القاهرة .

[3]عزاب طاهر الكناني ، 2009م ، الفيزياء النووية والطبية ، الطبعة الأولي ، دار الفجر والنشر والتوزيع .

[4]محمود بركات فؤاد بركات ، 1431هـ – 2010م ، الكيمياء النووية والإشعاعية في خدمة البشرية ، الطبعة الاولى ، دار الفكر العربي ، القاهرة .

[5]جلال الحاج عبد ،2010م ، فيزياء الجسيمات الاولية ،جامعة القاهرة.

[6]وحيد مصطفي أحمد ، الأستخدامات السلبية لهندسة الطاقة والقدرة النووية ، الطبعة الاولي ، دار الكتب للنشر والتوزي ، القاهرة .

[7]بسام محمد داخل ، محمد شريف عودة ، أحمد أحمد القاضي ، مبادي الفيزياء النووية وتقنياتها ، مركز النشر العلمي ، جامعة الملك عبد العزيز .

[8]محمد شحاته الدغمة ، علي محمد جمعة ، 2000م ، الفيزياء النووية ، الجزء الأول ، الطبعة الاولى ، مكتبة الفلاح ، الامارات العربية المتحدة ، جامعة الفاتح.

[9]محمد عبد الرحمن الشيخ ، أحمد نصر كراشي ، 1425هـ – 2004م ، هندسة الإشعاع النووي، النشر العلمي والمطابع المملكة العربية السعودية .

[10] مهدي احمد العبيد جار النبي ، 2005م ، المفاعلات النووية – الاستخدامات والمخاطر والمعالجات ، جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا .

[11] خضر عبد العباس حمزة ، غسان هاشم الخطيب، 1989م ، الطاقة الذرية واستخداماتها ، الطبعة الأولى، منشورات منظمة الطاقة الذرية العراقية.

[12] صافي عبد حسن ، 2008م – 1429هـ ، الفيزياء النووية ، الطبعة الأولى ، دار صفاء للنشر والتوزيع عمان .

[13] عبد الحكيم طه قنديل،2003م–1424هـ، النواة والانشطار النووي (المفاعلات النووية–الوقاية من الاشعاعات النووية ترويض المواد المشعة لخدمة الانسان الطبعة الاولى.

[14] محمد شحاته الدغمة ، علي محمد جمعة ، 2000م ، الفيزياء النووية ، الجزء الثاني ، الطبعة الاولي ، مكتبة الفلاح ، الامارات العربية المتحدة ، جامعة الفتح الإمارات .

[15] ممدوح عبد الغفور حسن ، 1420هـ – 2000م ، الطبعة الأولى، دار الفكر العربي القاهرة .

[16] ناهد أحمد بلل ، 2005م ، المفاعلات النووية الإنشطارية التصميم والتشغيل والآثار البيئية ، أغسطس ،جامعة السودان للعلوم والتكنلوجيا .

المواقع الإلكترونية

[17] www.Nucler Fission Reactor

[18] www.Irag of Tomorrow

[19] www.Jalal alhajabed.com