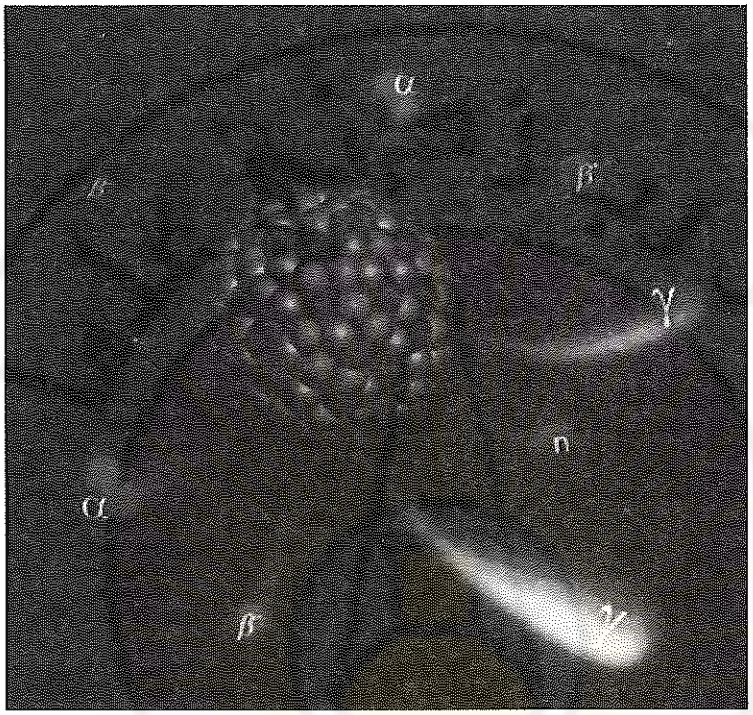
السنة: الرابعة

القسم: الكيمياء

الاختصاص: الكيمياء البحتة



الكيمياء الإشعاعية والنووية

منشورات جامعة دمشق
كلية العلوم

الكيمياء الإشعاعية والنووية

الدكتور
محمد خالد الشيباني

جامعة دمشق

1432 - 1433هـ
2011 - 2012 م

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفهرس

الموضوع	الصفحة
المقدمة	11
الفصل الأول: بنية الذرة	13
1.1- مقدمة	13
2.1- فرضية رذرفورد	13
3.1- نموذج بور في بنية الذرة	14
4.1- النموذج الذري الحديث	17
الفصل الثاني: بنية النواة والخصائص النووية	19
1.2- مقدمة	19
2.2- نماذج البنية النووية	20
3.2- الخصائص النووية	26
الفصل الثالث: الجسيمات النووية الأولية	43
1.3- الإلكترونات	43
2.3- البروتونات	43
3.3- جسيمات ألفا	43
4.3- الفوتونات	44
5.3- البوزيترونات	44
6.3- النترونات	45
7.3- النترينو	46
الفصل الرابع: النظائر	49
1.4- مقدمة	49

2.4- أهمية فصل النظائر 51
3.4- طرائق فصل النظائر 52
الفصل الخامس: النشاط الإشعاعي الطبيعي 63
1.5- اكتشاف النشاط الطبيعي 63
2.5- قانون التفكك الإشعاعي 65
3.5- التوازن الإشعاعي 70
الفصل السادس: أنماط النشاط الإشعاعي 81
1.6- التفكك من النمط ألفا 81
2.6- التفكك من النمط بيتا 85
3.6- التفكك من النمط غاما 92
4.6- التفكك بالانقلاب الداخلي 94
5.6- الانشطار التلقائي 95
الفصل السابع: أسر العناصر المشعة 97
1.7- مقدمة 97
2.7- أسر العناصر المشعة الطبيعية 97
1.2.7- أسرة اليورانيوم 97
2.2.7- أسرة الثوريوم 98
3.2.7- أسرة الأكتينيوم 98
3.7- العناصر المشعة الصنعية 102
الفصل الثامن: التفاعلات النووية 105
1.8- مقدمة 105
2.8- أنواع التفاعلات النووية 106

3.8- النواة المركبة 108
4.8- نماذج التفاعلات النووية 109
5.8- المقطع العرضي للتفاعل النووي σ 111
الفصل التاسع: قوانين الانحفاظ في التفاعلات النووية 117
1.9- قانون انحفاظ الطاقة 117
2.9- قانون انحفاظ الاندفاع 118
3.9- قانون انحفاظ عزم الاندفاع 120
4.9- قانون انحفاظ الشحنة 121
5.9- قانون انحفاظ عدد النكلونات 121
الفصل العاشر: التفاعل النووي المتسلسل (الانشطار والاندماج النووي) 123
1.10- مقدمة 123
2.10- المنابع الرئيسية للنترونات 126
3.10- المبادئ الأساسية للتفاعل النووي المتسلسل 128
4.10- الانشطار النووي 132
5.10- الاندماج النووي 142
الفصل الحادي عشر: المفاعلات والمسرّعات النووية 149
1.11- المفاعل النووي 149
2.11- أنواع المفاعلات النووية 152
3.11- المسرِّعات النووية 162
4.11- الأجزاء الرئيسية للمسرّع 164
5.11- أنواع المسرِّعات 166

الفصل الثاني عشر: عناصر مابعد اليورانيوم 189
1.12- مقدمة 189
2.12- مجال الثباتية 191
3.12- اصطناع عناصر مابعد اليورانيوم 192
4.12- تاريخ اكتشاف عناصر مابعد اليورانيوم 196
الفصل الثالث عشر: التفاعلات الكيماوية الإشعاعية 213
1.13- التفاعلات الأولية والثانوية 213
2.13- التفاعلات الإشعاعية في الغازات 215
3.13- التفاعلات الإشعاعية في المحاليل المائية 217
4.13- التفاعلات الإشعاعية في المركبات العضوية 218
5.13- التفاعلات الإشعاعية في المركبات اللاعضوية الصلبة 220
الفصل الرابع عشر: كشف الإشعاع المؤين وقياسه 223
1.14- مقدمة 223
2.14- حجرة التأين (التشرد) 223
3.14- العداد التناسبي 225
4.14- عداد غايغر- ميلر 226
5.14- عدادات أنصاف النواقل 230
6.14- عداد الوميض 231
7.14- وحدات قياس الإشعاع 235
الفصل الخامس عشر: أضرار الإشعاع والوقاية منه 239
1.15- مقدمة 239
2.15- التلوث الإشعاعي 240

3.15- إزالة التلوث 241
4.15- الوقاية من الإشعاع 243
5.15- أخطار الإشعاع البيولوجية 245
الفصل السادس عشر: تطبيقات النشاط الإشعاعي 249
1.16- استخدام النظائر المشعة في الكيمياء 249
1.1.16- التطبيقات في الكيمياء التحليلية 249
2.1.16- التطبيقات في الكيمياء الفيزيائية والبنيوية 261
3.1.16- التطبيقات في الكيمياء الحيوية 266
2.16- استخدام النظائر المشعة في العلوم الجيولوجية والآثار 269
3.16- استخدام النظائر المشعة في علوم المياه والترسبات 271
4.16- استخدام النظائر المشعة في الطب وعلم وظائف الأعضاء 272
5.16- استخدام النظائر المشعة في الصناعة 273

- مسائل عامة 277
- ملحق 285
- المصطلحات العلمية 313
- المراجع العلمية 329

Damascus University

وقل رب زدني علما
Damascus University

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمـــــــــــــة

تحظى الكيمياء الإشعاعية بموقعٍ بارزٍ بين العلوم الكيماوية, وهي حقل مهـم من حقول الكيمياء المعاصرة, حيث تتنـاول دراسـة العمليـات والفعاليـات الكيماوية من خلال ظاهرة النشاط الإشعاعي للنوى المشعة, وإنَّ هذه الظاهرة التي اكتشفها بكيريل وكوري قبل أكثر من مئة عام تطورت بـسرعة لتقـدم للإنسانية علوماً وتطبيقات لم تألفها من قبل كالفيزياء النووية والكيمياء النووية والإشعاعية وكيمياء الإشعاع والبيولوجيا الإشعاعية وعلـم الأرض النـووي والطب النووي وغيرها.

لقد استمرت الأبحاث وتوالت الاكتشافات في هذا المجال من الكيمياء بحيـث استطاع عالم اليوم أن يستفيد من الجهود المبذولة ضمن هذا المـضمار وأن يحرر طاقة نوى الذرات ويحصل على الطاقة النووية الهائلة التي ينعم بهـا اليوم. إلاَّ أنَّ استخدام مصادر الطاقة هذه محفوف بكثير من الأخطار يتجلَّـى أهمها في نضوب مخزون الوقود النووي في المستقبل البعيد وكـذلك نـشوء مايسمى النفاية النووية التي تهدد حياة الإنسان والبيئة بالتلوث الإشعاعي.

إنَّ هذه الأخطار تدفع اليوم العديد من الدول إلى التفكير في بنـاء محطـات نووية لتوليد الطاقة الكهربائية عبر مفاعلات الاندماج النووي التي تعتمد على مواد أولية متوفرة في الطبيعة, وعلاوةً على ذلك تُعدُّ أكثر أمناً ومنبعاً أكبـر للطاقة.

لقد نمت مادة الكتاب من خلال تدريسها لعدد من الـسنين كمقـرر دراسـي, وشعرت بأن تأليف مقرر دراسي شامل يجمع مابين المفاهيم الأساسية للكيمياء الإشعاعية والنووية وتطبيقاتها الواسعة في المجالات المختلفة يتطلـب بـذل

جهود مضاعفة نظراً لسعة المواضيع في هذا المجال, فكانت هذه المحاولة المتواضعة التي آمل أن أكون قد وفقت فيها.

يشتمل الكتاب على عدة فصول:

يبحث الفصل الأول والثاني والثالث والرابع في بنية الذرة والنواة والخصائص النووية وكذلك الجسيمات النووية الأولية والنظائر. في حين يهتم الفصل الخامس والسادس والسابع بالحديث عن النشاط الإشعاعي الطبيعي وأنماط النشاط الإشعاعي وأسر العناصر المشعة.

ويتحدث الفصل الثامن عن التفاعلات النووية والتاسع عن قوانين الانحفاظ في التفاعلات النووية. أما الفصلان العاشر والحادي عشر فقد خُصصا للحديث عن التفاعل النووي المتسلسل والمفاعلات والمسرِّعات النووية, في حين تفرَّد الفصل الثاني عشر في الحديث عن عناصر ما بعد اليورانيوم. وقد تناول الفصل الثالث عشر الحديث عن التفاعلات الكيماوية الإشعاعية, في حين اهتم الفصل الرابع عشر والخامس عشر بالحديث عن كشف الإشعاع المؤين وقياسه والأضرار الإشعاعية. وأخيراً فقد تفرد الفصل السادس عشر بالحديث عن موضوع مهم جداً هو تطبيقات النشاط الإشعاعي.

وقد تضمن الكتاب ملحقاً بأهم الأشكال والجداول الهامة والمستخدمة في مجال الكيمياء الإشعاعية والنووية , وكذلك بقائمة المصطلحات العلمية باللغة الإنكليزية.

أخيراً أرجو ألاَّ يبخل علي الأخوة الزملاء والقرّاء من تقديم ملاحظاتهم ونقدهم الهادف لكي يتم تدارك الهفوات لاحقاً. والله ولي التوفيق.

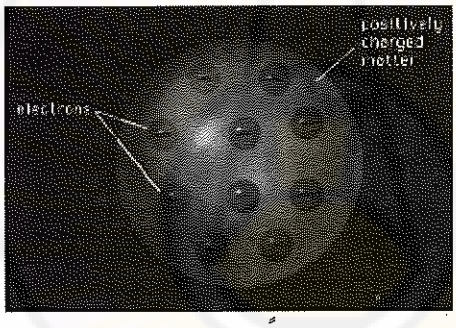
المؤلف

الفصل الأول

بنية الذرة

1-1- مقدمة:

لقد كان العالم تومسون أول من اقترح نموذجاً للذرة بدون سابق تصور وذلك بعد نظرية دالتون التي افترضت الذرة على أنها كرة غير مرئية. فقد تخيل تومسون الذرة على أنها مجموعة من الشحنات الموجبة متوزعة بشكل مناسب داخل حجم الذرة بينما تتوضع الشحنات السالبة في مواقع تؤمن مسألة التعادل في الشحنة كما في الشكل(1).



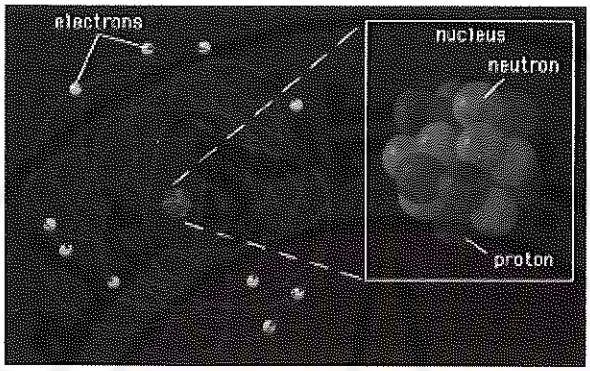
الشكل(1): بنية الذرة وفقاً لنموذج كلفن- تومسون

وقد ظلّ هذا التصور للذرة سائداً إلى أن أتى العالم رذرفورد ليعطي فرضيته الشهيرة في بنية الذرة .

1-2- فرضية رذرفورد:

افترض رذرفورد الذرة على أنها كرة تتوضع في مركزها الشحنات الموجبة وسماها نواة الذرة بينما الإلكترونات السالبة تتوضع حول النواة في مدارات دائرية [مشبهاً ذلك بحركة الكواكب حول الشمس] ، حيث يتأمن

استمرار دوران الإلكترون حول النواة بفضل محصلة قـوى التجـاذب بـين الإلكترون والنواة والقوى النابذة التي تسعى إلى إبعاد الإلكترون الدائر حـول مداره عن النواة الشكل(2).



الشكل(2):بنية الذرة وفقاً لنموذج رذرفورد

إن هذا النموذج كما هو معروف لم يكتب له البقاء بسبب عدم مقدرته على تفسير ظهور الخطوط الطيفية للعناصر، إذ إنه وفقاً لنموذج رذرفـورد فإن الإلكترون الدائر حول مداره يُشعُّ طاقةً لإعطاء الخطوط الطيفية وبالتالي سيفقد جزءاً من طاقته ومع استمرار ظهور الخطوط الطيفية يـستمر فقـدان الإلكترون لطاقته مما يؤدي إلى تناقص نصف قطر مداره مع استمرار فقدان الطاقة . وبالتالي سيتحول المدار الدائري للإلكترون إلى مدار حلزوني وسيقع الإلكترون في نهاية المطاف في النواة وهذا ما يخالف الواقع .

1-3- نموذج بور في بنية الذرة :

لقد بقي هذا التصور للذرة سائداً حتى عام 1913 حيث قام العالم نيلز بور باقتراح نموذجه في شرح بنية ذرة الهدروجين والذرات المشابهة (نـواة موجبة وإلكترونات سالبة) ويتضمن هذا النموذج عدة نقاط هي:

1) قبل بور نموذج رذرفورد في بنية الذرة من حيث المشابهة بين حركة الإلكترون السالب حول النواة الموجبة وبين حركة الكواكب حول الشمس.

2) قبل بالمفاهيم الكوانتية لكلٍّ من بلانك وآنيشتاين من حيث أن للطاقة بنية مادية حبيبية . وأنّ هذه الطاقة تنتقل بكميات محددة تتناسب مع التواتر وفقاً لعلاقة بلانك $E=h.\nu$

3) توقَّع بور أنه يوجد في الذرة وحول النواة سويات طاقية مستقرة يخضع لها الإلكترون .

4) لا يشعُّ الإلكترون أية طاقة طالما بقي دائراً في مداره حول النواة .

5) يشع الإلكترون الطاقة فقط عندما ينتقل من مدار أعلى إلى مدار أخفض . كما يستطيع الإلكترون امتصاص الطاقة ليرتقي إلى مدار أعلى وهذا ما تعبر عنه علاقة بلانك $\Delta E = E_2 - E_1 = n\, h.\nu$

ΔE : الطاقة المشعة أو الممتصة .

E_2 : السوية الطاقية الأعلى .

E_1 : السوية الطاقية الأدنى .

n : عدد صحيح موجب .

ν : تواتر الضوء المشع أو الممتص .

h : ثابت بلانك .

6) إنَّ الإلكترون يدور على مدارات محددة وهذه المدارات يجب أن يكون لها عزم زاوي مكمم ويتبع الشرط الذي أتى به سمرفيلد فيما بعد وهو:

$$m\, vr = n\frac{h}{2\pi}$$

m : كتلة الإلكترون .

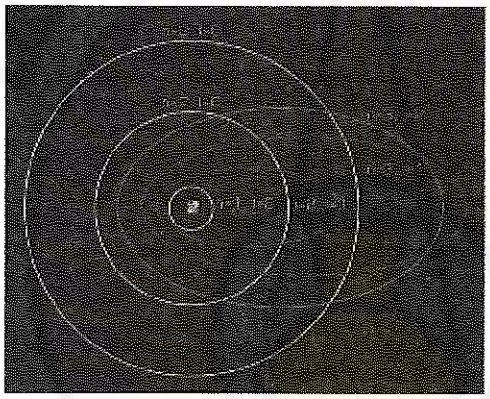
v : سرعته .

r : نصف قطر المدار الذي يدور عليه الإلكترون .

n : عدد صحيح .

h : ثابت بلانك .

لقد تمكن بور وفقاً لهذا النموذج من تفسير الخطوط الطيفية في ذرة الهدروجين وشبيهاتها والشكل(3) يوضح هذا النموذج والذي عُرف بنموذج بور – سمرفيلد.



الشكل(3): نموذج بور–سمرفيلد للذرة

مما تقدم نجد أن بور حدد طاقة للإلكترونات وتحدث عن المجالات الطاقية بينما لم يذكر رذرفورد عن الطاقة شيئاً ولا عن تحرك الإلكترونات, كما قال إنّ الذرة مسطحة و قد ادّعى أنه يستطيع تحديد مكان الإلكترون وسرعته في آنٍ واحدٍ وعدَّ الإلكترون مادة فقط حيث عجز نموذجه عن تفسير أطياف باقي العناصر.

1-4- النموذج الذري الحديث: ينصُّ هذا النموذج على أن الذرة تتكون من نواة تحتوي على الشحنة الموجبة (بروتونات) تتركز فيها معظم الكتلة ومحاطة بإلكترونات سالبة الشحنة تتحرك بسرعة كبيرة ولها خواص الموجات بموجب معادلة رياضية وموجودة في فراغ حول النواة يكون احتمال وجودها فيه أكثر من 90% تسمى المجالات الإلكترونية. ولقد اعتمد هذا النموذج على مبدأ الطبيعة المزدوجة للإلكترون أي أنه عبارة عن مادة وله خواص الموجات بينما قال بور إنه مادة فقط واعتمد كذلك على مبدأ عدم التأكد في تحديد مكان الإلكترون وسرعته في حين ادَّعى بور أنه يستطيع تحديدهما معاً. ولقد وضع شرودينغر معادلة لتحديد وفهم حركة الإلكترونات الموجية, سميت باسمه حيث مزج في هذه المعادلة الأفكار التي أتى بها بروغلي (Louis de Broglie) في عام 1921 عن الطبيعة المزدوجة الموجية-الجسيمية للمادة ومبدأ عدم التأكد الذي وضعه هايزنبرغ (Werner Heisenberg) في عام 1923.

$$H\Psi = E\Psi$$

حيث H: ثابت الهاملتوني, E: الطاقة و Ψ: تابع يمثل المدار

إنَّ حلَّ هذه المعادلة (وهو معقد جداً بالنسبة للذرات العليا ذات العدد الذري الكبير) يمكن في الحقيقة أن يعطي تصور ويتنبأ بخصائص وفعاليات كل الذرات والجزيئات. فالمدارات الذرية والطاقات الكوانتية هي العوامل الأساسية المستخدمة لتحديد وشرح خصائص وفعاليات الذرات والجزيئات في النظرية الكوانتية الحديثة.

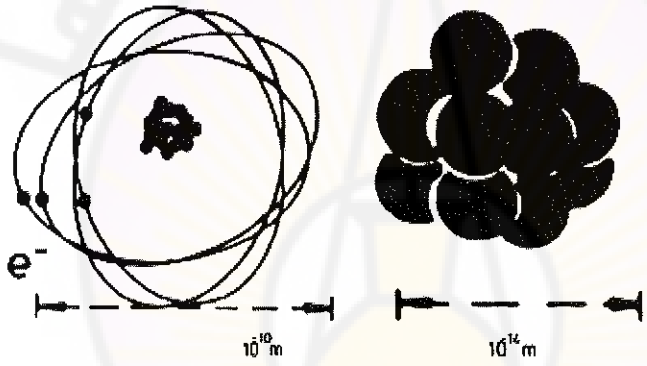
وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثاني

بنية النواة والخصائص النووية

2-1- مقدمة:

تتألف الذرة من نواة مشحونة إيجاباً تدور حولها هالة من الإلكترونات المشحونة سلباً, وكما هو معروف تشكل نواة الذرة كامل كتلة الذرة تقريباً وتحتل مكاناً صغيراً داخل حجم الذرة الشكل (4).



الشكل (4): الحجوم النسبية للذرة والنواة

والنواة تتألف بشكل عام من A جسيما نووياً (نيكلوناً) منها Z بروتون موجب و N نترون معتدل الشحنة وكما هو معروف فإن للبروتون والنترون الكتلة نفسها تقريباً , والعزم السبيني نفسه أما العزم المغناطيسي لأحدهما فيختلف عن الآخر . فالعدد A ($A = Z + N$) يُحدد كتلة النواة بينما يحدد العدد Z الصفات الكيماوية للعنصر وموقع العنصر في الجدول الدوري . كما أنه يوجد عدد كبير من الجسيمات النووية التي سنأتي على ذكرها لاحقاً . يُرمز عادة للعنصر بـ $_ZM^A$, مثل $_8O^{16}$, $_7N^{14}$ ....

وتعدُّ النوى الخفيفة [$A \leq 40$] ثابتة حيث يكون فيها

$Z \approx N \approx A/2$ أما في النوى الثقيلة فيكون $N > Z$.

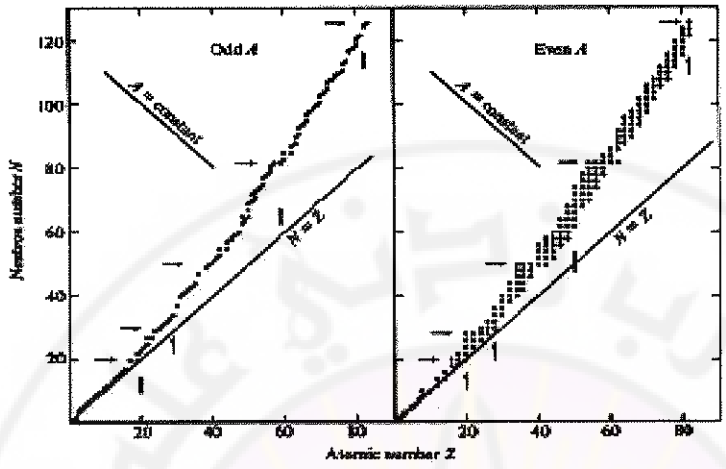
فالعناصر التي تتشابه بالعدد الكتلي وتختلف بالعدد الذري ندعوها ايزوبار مثل U^{239} , Pu^{239} , Am^{239}. في حين نسمي العناصر التي لها العدد الذري نفسه وتختلف بالعدد الكتلي بالنظائر "إيزوتوب" مثل C^{11}, C^{12}, C^{13}. بينما ندعو العناصر المتساوية بعدد نتروناتها ومختلفة بعددها الذري "إيزوتون" وهي نادرة. لقد استخدم مصطلح (النظير) بشكل واسع في الماضي ليشمل كافة الأصناف النووية المتميزة بأعدادها الذرية وأعداد كتلها مما أدى إلى كثير من اللبس إلا أن كومان Kohman اقترح مصطلحاً جديداً هو النكليد بدلاً عن النظير, فعناصر الجدول الدوري لا يتجاوز اليوم 118 عنصراً, في حين نجد أن عدد نكليداته يفوق الـ 1500 نكليد.

2-2- نماذج البنية النووية:

2-2-1- نموذج النواة ذات الطبقات (Shell model):

لقد دلّت الدراسة على أن العناصر التي تحتوي نواها على أعداد سحرية من البروتونات و النترونات هي عناصر مستقرة .

والأعداد السحرية هي 126 , 82 , 50 , 28 , 20 , 8 , 2 { Z أو N , وقد كانت هذه الأعداد منطلقاً لفكرة وجود الطبقات النووية داخل النواة ونشوء فكرة نموذج النواة ذات الطبقات ، وإن تشكل الطبقات داخل النواة هو نتيجة لمبدأ باولي الذي ينص على استحالة وجود جسيمين في مدار أوطبقة واحدة في حالتين كوانتيتن متماثلتين . ويوضح الشكل(5) المنحى الذي تأخذه النكليدات المشعة في وضع الاستقرار حيث نلاحظ أنه كلما ازداد عدد النترونات وكذلك رقم الشحنة ابتعدت النكليدات عن وضع الاستقرار.



الشكل (5): منحني الاستقرار للنكليدات

لقد سُميت النوى التي فيها عدد البروتونات أو النترونات يساوي أحد الأعداد المذكورة بالنوى السحرية . فمثلاً تمتلئ الطبقة الأولى في النواة السحرية $_2He^4$ والطبقة الثانية في النواة السحرية $_8O^{16}$ والطبقة الثالثة في $_{20}Ca^{40}$ وهكذا . . . .

وبما أنَّ للنوى السحرية طبقات مغلقة من البروتونات أو النترونات أو لكلاهما معاً فإنَّ استقرارها يكون أشد . فإذا ما تجاوز عدد النيكلونات العدد السحري يُلاحظ نقصان مفاجئ في طاقة الارتباط ، فمثلاً إن احتمال قيام النوى التي عدد نتروناتها سحري بأسر نتروني مشع (γ , n) صغير جداً ، ومن جهة أخرى إذا كان التفكك β يؤدي إلى نواة فيها نترون زائد على العدد السحري, فإن طاقة الإثارة المتخلفة في النواة بعد التفكك تكون كافية غالباً لإطلاق نترون من النواة يسمى النترون المتأخر. وإذا لم تكن طاقة الإثارة كافية بعد التفكك β, فإن هذا الطاقة تخرج على شكل كوانتات (فوتونات) من النوع γ ولا ينبعث نترون. إذاً فالتفكك المُولِّد لنواة سحرية يكون دوماً

مصحوباً بتحرر طاقة كبيرة الأمر الذي يشير مباشرة إلى طاقة الارتباط العالية للنيكلونات داخل النوى السحرية . فنموذج النواة ذات الطبقات هو نموذج ميكانيكي كمي تماماً وبمقدوره حل معادلة شرودينغر للنواة ذات الشكل الكروي, وهو يعتمد على الفرضيات نفسها التي استخدمت لوصف النواة في نموذج غاز فرمي, ولكن مع إضافة المفهوم القوي (سبين-مدار). إن هذا النموذج قادر كذلك على التنبؤ بنجاح بالأعداد السحرية النووية وكذلك بسبينات ونوعيات الحالات الأساسية للنواة وبمفهوم التزاوج في الصيغة الجمعية نصف التجريبية. ولكن في الوقت نفسها يعجز هذا النموذج عن التنبؤ بالعزوم المغنطيسية. إن نموذج النواة ذات الطبقات كأي نموذج نووي آخر ليس شاملاً ولا يفسر خصائص كل النوى.

2-2-2- نموذج القطرة السائلة للنواة (Liquid-drop model):

لقد استخدم هذا النموذج لتوضيح فكرة ارتباط النيكلونات وتأثيرها ببعضها بعضاً داخل النواة فقد وجد أنه من المناسب تشبيه النواة بقطرة مائعة ، فالقوى الفاعلة في جزيئات المائع لها كرة تأثير محدودة شأنها في ذلك شأن القوى النووية . حيث إنَّ الجسيمات النووية مثل جزيئات المائع تتمتع بحركية كافية , ويُستدل على ذلك من وجود عزوم مدارية كبيرة لدى بعض الجسيمات النووية . فعند إثارة النواة بطاقة معينة تتوزع هذه الطاقة على كافة الجسيمات النووية توزعاً احصائياً كما تتوزع على الجزيئات داخل قطرة المائع عند تسخينه . إن نموذج النواة (القطرة المائعة) الذي اقترحه فرنكل ثم طوره بور يفسرٌ تفسيراً جيداً الكثير من خصائص النوى, ويبقى عاجزاً عن تفسير بعض الخصائص كون الجسيمات الموجودة داخل النواة هي

جسيمات تتمتع بخصائص موجية وتخضع للقوانين الكوانتية على عكس الجسيمات داخل القطرة المائعة, وكذلك لا يمكن للجسيمات داخل النواة أن تتماثل فلكل جسيم أعدادٌ كوانتية تصفه حتى لو تماثل جسيمان بكل الأعداد الكوانتية فيجب أن يكون سبيناهما متعاكسين وهذا مخالف لما هو عليه الحال للجسيمات داخل القطرة المائعة.

إنَّ هذا النموذج يفترض أنَّ كل النوى تمتلك كثافات كتلية متشابهة مع طاقات ارتباط متناسبة تقريباً مع كتلها كما هو الحال في القطرة السائلة المشحونة الكلاسيكية. إن هذا النموذج يؤدي إلى صيغة جمعية نصف تجريبية التي تعطي وصفاً جيداً حول الكتل المتوسطة وطاقات الارتباط. فهذا النموذج هو نموذج كلاسيكي إلى حدٍّ كبيرٍ مع بعض المفاهيم الميكانيكية الكمومية (مثل مفاهيم التزاوج واللاتناظر) التي أُدخلت على نحوٍ خاص.

2-2-3- نموذج غاز فرمي (Fermi gas model):

يُمثل هذا النموذج النواة ببئر كموني تتحرك فيه النيكلونات وهو يتجاهل القوى النووية بين هذه النيكلونات ويدرس النواة إحصائياً وفق النظرية الحركية للغازات. ولا يتناول هذا النموذج السبين والنوعية وإنما يوضح سويات التحريض التي ليس بمقدور نموذج النواة ذات الطبقات تفسيرها.

إن هذا النموذج يُقر أن قعر البئر مملوء بالعدد المسموح به من النيكلونات (بروتونات ونترونات) وذلك مع عدم وجود أمكنة فارغة(ثقوب). تمثل النواة في أدنى سوية طاقة ممكنة غازاً في درجة الصفر المطلق. عند تحريض النواة إلى درجة أعلى يصبح بمقدور نيكلون واحد أو أكثر أن يترك سويته إلى سوية طاقية فارغة أعلى من سوية فرمي E_f. وهكذا نجد أنه بتمثيل النواة

بالغاز وبتطبيق طرائق الميكانيك الاحصائي نحصل على سوية فرمي مقدرة بـ Mev في حالة البروتون وهي:

$$E_f=33.8\ (Z/A)^{2/3}$$

وفي حالة النترون تكون $E_f=33.8\ (A-Z/A)^{2/3}$

ووفق هذا النموذج يصغر المجال بين سويات الطاقة بسرعة مع ازدياد طاقة التحريض, وخاصة في حالة النوى الثقيلة وهي تهتز أكثر فأكثر حتى تصل إلى سوية فرمي. ويُعطى عدد السويات من أجل كل (1Mev) بالعلاقة

$$p=c.e^{2\sqrt{A.E}}$$

حيث p كثافة السويات , $(E=aT^2)$ طاقة التحريض , (A) العدد الكتلي , (T) درجة الحرارة, وأما (c,a) فهي ثوابت تختلف باختلاف العدد الكتلي.

فوفقاً لهذا النموذج يمكن قياس درجات الحرارة النووية وسويات الطاقة تجريبياً وذلك من دراسة أطياف طاقات البروتونات والنترونات التي تصدر من النوى المحرّضة.

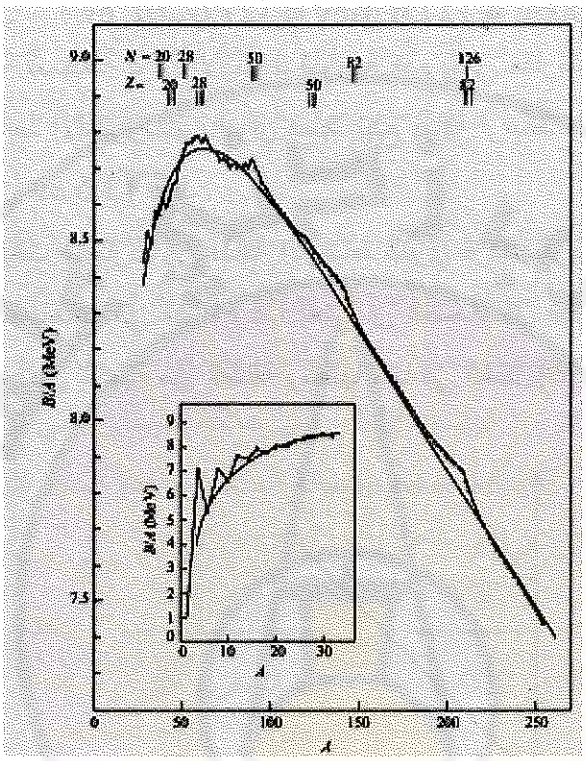
2-2-4- النموذج الجمعي (Collective model):

سُمّي هذا النموذج بالجمعي لأنه جمع بين نموذجي النواة ذات الطبقات ونموذج النواة القطرة السائلة. وقد اقترح هذا النموذج كلاً من Teller, Goldhaber and Migdal وذلك لتفسير ثنائي الأقطاب الذي يحدث نتيجة امتصاص النوى للطاقة, حيث تهتز جميع بروتونات النواة بالنسبة لكامل النترونات. ويمكن تمثيل البروتونات والنترونات بسائلين متداخلين معاً ولهما حركة اهتزازية (أي حركة ذهاب وإياب لأحدهما بالنسبة للآخر), حيث يتعلق تواتر التجاوب وبالتالي طاقة التجاوب بأبعاد النواة الهدف, التي تشوهت نتيجة امتصاص الطاقة, وبالتالي سيكون لها أبعاد مختلفة وفق المحاور الثلاث

وسيكون لهل أيضاً طاقتا تجاوب مختلفتان. فالنموذج الجمعي هو نموذج كمي ميكانيكي تماماً, ولكن في هذه الحالة يُسمح للنواة بأن تعاني تشوهات يبعدها عن الشكل الكروي التام المستخدم في نموذج النواة ذات الطبقات, وهو يُري النواة بأنها تجويف متين من النيكلونات التي تتوضع في طبقات مملوءة كما هو الحال في نموذج النواة ذات الطبقات ولكن مع وجود نيكلونات تكافؤية خارجية تسلك سلوك الجزيئات السطحية في القطرة السائلة. والنتيجة هي أن هذا النموذج يستطيع التنبؤ بثنائي القطب المغنطيسي وكذلك بالعزوم المغنطيسية ورباعي الأقطاب الكهربائي بنجاحٍ إلى حدٍّ ما. وقد تمَّ وفق هذا النموذج أيضاً الكشف عن أنماط إضافية أخرى للإثارة مثل الاهتزاز والدوران والتأكد منها تجريبياً.

مما تقدم يبدو واضحاً بأنه لايوجد في الوقت الحاضر نموذجٌ نووي عالمي شامل, وكلُّ الذي بين أيدينا في الوقت الحالي هو عدد من النماذج والنظريات التي تمتلك مجالات ضيقة من التطبيق وهي ليست قادرةً دائماً على توضيح كل الملاحظات. فعلى سبيل المثال أبدى نموذج النواة ذات الطبقات مقدرة على إعطاء قيم مقنعة حول توجهات السبين وتكافؤات (أو تماثلات) الحالات الأساسية للنواة, ولكنه لم يكن قادراً بشكلٍ من الأشكال على التنبؤ بتوجهات السبين للحالات المثارة. وبالطبع فإنَّ نموذج النواة ذات الطبقات لا يملك شيئاً على الإطلاق للتعبير حول المجالات الواسعة لظواهر الفيزياء النووية. ولقد أُجريت بعض المحاولات لدمج خصائص النماذج المختلفة آنفة الذكر والحصول على خصائص كالتي أعطيت في النموذج الجمعي بشيءٍ من النجاح.

لوجدنا تابعية جديدة لِـــ δE بالنسبة لِـــ A تختلف عن تابعية ΔE.
كما في الشكل(7).



الشكل(7):تابعية الطاقة النكلونية للعدد الكتلي A

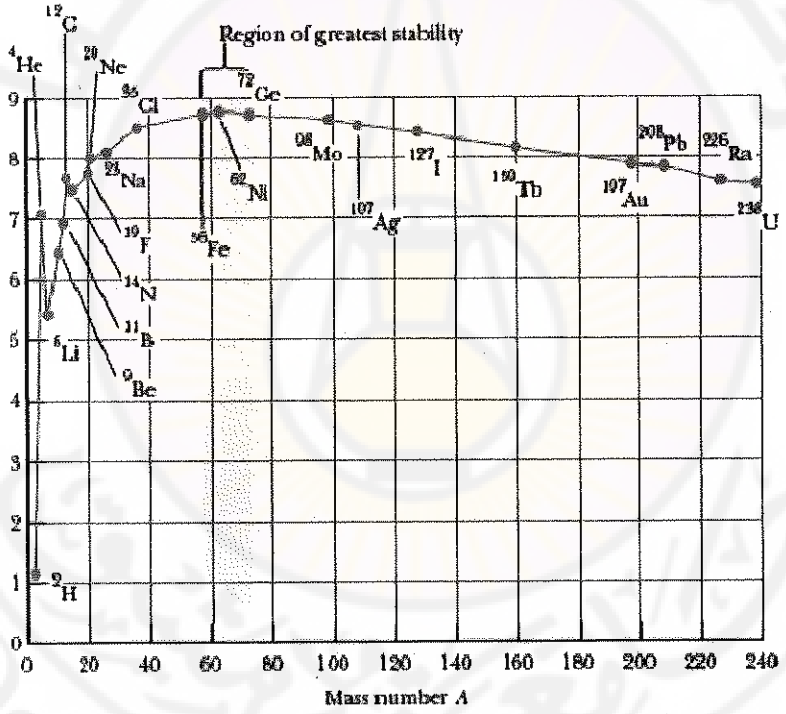
ومن تأمل هذا الخط البياني يمكن استخلاص النتائج التالية :

1- δE ليست ذات قيمة ثابتة في كافة النوى وبالتالي فإن النيكلونات غير مرتبطة في مختلف النوى بدرجة المتانة نفسها والنيكلونات تكون أقـــوى ارتباطاً في النوى التي بترواح عددها الكتلي من 40 إلى 100 وتكون δE في هذا المجال ثابتة تقريباً يبلغ حوالي 8,7 Mev لكلِّ نيكلون نووي .

2- في النوى حيث A > 100 تتناقص δE بازدياد عدد النيكلونـــات في النواة . حيث تبلغ طاقة الارتباط الوسطية في اليورانيوم 7,5 Mev .

3 – في النوى حيث A قليل أو صغير تتناقص δE بنقصان عدد النيكلونات في النواة.

والشيء الذي نلاحظه على منحني طاقة الارتباط الوسطية وجود نهايات عظمى وصغرى في مجال العناصر ذات العدد الكتلي الصغير. فمثلاً نلاحظ وجود $_3Li^6$, $_5B^{10}$ عند النهايات الصغرى وهذه النوى مكونة كما نلاحظ من عدد فردي من البروتونات والنترونات بينما عند النهايات العظمى نجد عناصر مثل $_2He^4$, $_6C^{12}$, $_8O^{16}$ وهي مكونة من عدد زوجي من البروتونات و النترونات كما هو موضح في الشكل(8).



الشكل(8): النهايات الصغرى والعظمى على منحني طاقة الارتباط الوسطية

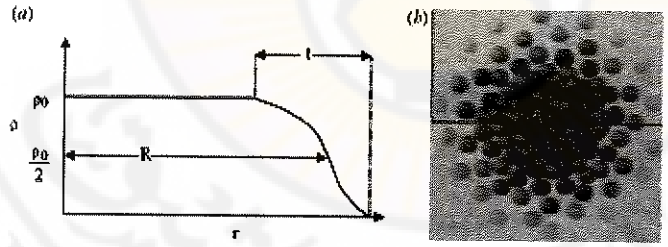
ومنه نستنتج أن النوى [الزوجية – الزوجية] أي الحاوية عدداً زوجياً من (N , P) تكون ذات طاقة ارتباط كبيرة نسبياً ونيكلوناتها هي

الأمتن ارتباطاً . أما النوى [الزوجية – الفردية] أي المحتوية على عدد زوجي من P وعدد فردي من N أو بالعكس . فإن طاقة الارتباط تكون أصغر من النوى الزوجية . أما النوى [الفردية – الفردية] أي المحتوية على عدد فردي من النترونات والبروتونات فتكون طاقة الارتباط الوسطية فيها هي الأصغر نسبياً.

إنَّ هذه الظاهرة وفوارق طاقة الارتباط بين أنواع النوى المذكورة لا تقتصر على النوى الخفيفة فقط بل تنسحب على كافة النوى بغض النظر عن عدد نيكلوناتها .

2-3-2- الكمون النووي والقوى النووية:

إنَّ توزع النكلونات داخل حيز النواة ذو طبيعة معقدة, وإنَّ كثافة النكلونات تنقص كلما ابتعدنا عن مركز النواة كما في الشكل التوضيحي الذي أورده R.Mackintosh في توزع الكثافة النووية الشكل(9), حيث تمثل ρ الكثافة النووية و r نصف القطر النووي المتغير و R نصف قطر النواة.



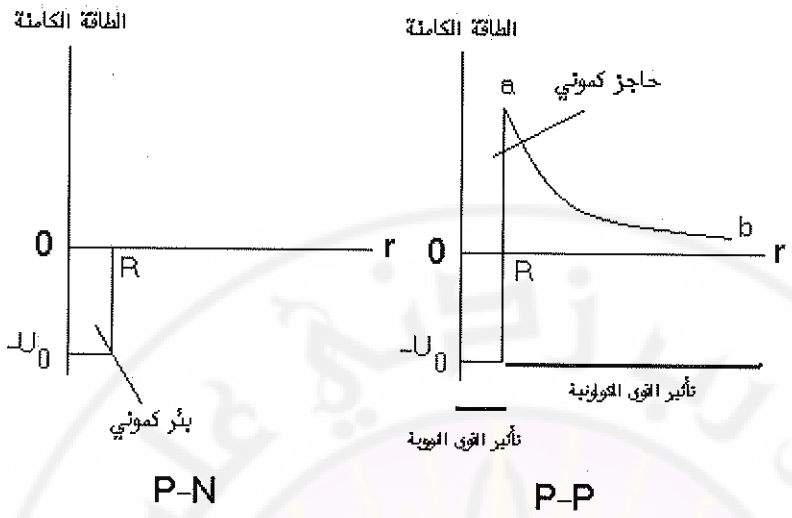
الشكل (9): توزع الكثافة النووية

ربما يتبادر إلى الأذهان السؤال الآتي. ماهي طبيعة القوى التي تربط نيكلونات النواة هذا الربط المتين؟ هل هذه القوى قوى تثاقلية أم أنها قوى كولونية أم أنها نوع آخر من القوى وغير مألوف يسمى بالقوى النووية؟

إن القوى التثاقلية لا يمكن لها أن تربط نيكلونات النواة هذا الربط المتين وكذلك القوى الكولونية الفاعلة في البروتونات فهي قوى تدافع . أما طبيعة القوى المؤثرة في البروتونات فهي تتجلى بشكل واضح عند دراسة تبعثر حزمة من البروتونات في غاز الهدروجين . فقد تبين نتيجة الدراسة أنه إذا كانت طاقة البروتونات صغيرة تبعثرت بروتونات هذه الحزمة في اتجاهات مختلفة وهذا يدل على أن هذه القوى هي قوى كولونية فقط . أما إذا ازدادت طاقة الحزمة البروتونية فإن طابع التبعثر يتغير وهذا دليل على أن هناك قوى إضافية غير كولونية تعمل بين البروتونات عندما تصبح المسافة بينها صغيرة نسبياً .

ومن دراسة طبيعة التبعثر الحاصل تبين أن القوى الإضافية هي قوى تجاذب تفوق قوى كولون بمرات عديدة وذلك فقط عندما تصبح المسافة بين البروتونات أصغر من $2.10^{-15}m$ غير أن نصف قطر تأثير هذه القوى محدود وهي تتم على حساب تناقص الكتلة.

ولقد أجريت دراسة أخرى لتبعثر حزمة البروتونات بالديتونات (الحاوية على بروتون ونترون) وبينت الدراسة أن القوى النووية تعمل أيضاً بين بروتون ونترون وليس فقط بين بروتون و بروتون . وعليه يمكن أن نستنتج بأنه يتفاعل أيٌّ نيكلونين بقوى نووية متماثلة في القدر والطابع, وإن قوة التفاعل الكلية بين بروتون – بروتون تختلف بفعل القوى الكولونية عن قوة التفاعل الكلية بين بروتون ونتروتون فيجب أن لا ننسى أنَّ قوى كولون تنقص طاقة ارتباط النوى. وهذا الأمر يمكن تصوره وتمثيله بتبعية الطاقة الكامنة للمسافة في الجملتين P-N , P-P الشكل(10).



الشكل(10): رسم توضيحي لتبعية الطاقة الكامنة للمسافة في الجملتين P-N , P-P

إنّ القوة الدافعة $k.e^2/r^2$ هي قوة تدافع بين شحنتي البروتون, بينما الطاقة الكامنة لتفاعل البروتونين فتبلغ $k.e^2/r$, أي أن هذه الطاقة تزداد عند تقارب البروتونين ويحدث التزايد على طول القطعة ab من المنحني إلى أن تصبح المسافة بين البروتونين مساوية R حيث يبدأ تأثير قوى الجذب النووية. عندئذ يهبط المنحني بانحدار شديد وسبب هذا الهبوط الشديد للطاقة هو تغير القوى النووية مع المسافة بسرعة أكبر بكثير من سرعة تغير القوى الكولونية . وبما أن الطاقة الكامنة لقوى التجاذب سالبة فإن الطاقة الكلية للقوى الكولونية والنووية ستكون سالبة . ومنه نستنتج أن الطاقة الكامنة للبروتون داخل النواة هي طاقة سالبة . أي أن ارتباط البروتون بالنواة متين وهذا ما دعا إلى إدخال مفهوم الحاجز الكموني. أي أن على البروتون أن يمتلك قدراً من الطاقة الحركية يفوق القيمة العظمى للطاقة الكامنة (ارتفاع

الحاجز الكموني) لكي يستطيع أن يتخطى الحاجز الكموني دخولاً أو خروجاً من النواة .

– أما لو تأملنا منحني الطاقة للجملة N - P فإننا لن نلاحظ الجزء العلوي للمنحني نتيجة انعدام القوى الكولونية (الطاقة الكامنة تساوي الصفر). أي أن النترون لا يتأثر في حركته باتجاه البروتون بأي قوة حتى تصبح المسافة بينهما مساوية R حيث يبدأ عندها تأثير القوى النووية وعندها يبدأ التابع الكموني بالهبوط بسرعة مشكلاً ما يسمى بئراً كمونياً . ولكي ينفلت النترون من النواة فيجب أن تكون طاقته الحركية كافية أما من أجل دخول النترون إلى النواة فيستطيعه النترون مهما كانت طاقته بسبب انعدام قوى التدافع .

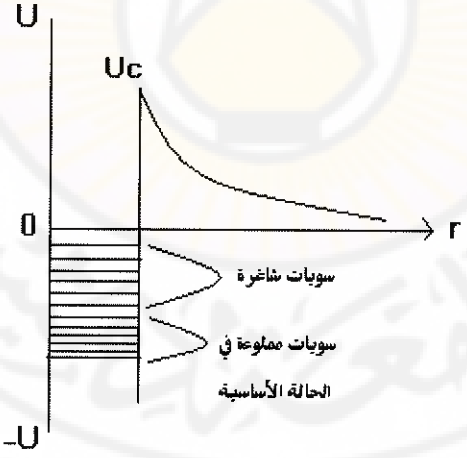
ولقد بينت الدراسات العديدة بأن مقدار الكمون لا يتوقف على المسافة بين النيكلونات فقط بل وعلى توجه سبيناتها . فمن المعروف أن للبروتون والنترون عزم ميكانيكي خاص يدعى السبين كما أن للقوى النووية طابع التكافؤ أي أنها تشبه القوى الكيماوية في تفاعل الذرات مع بعضها بعضاً أي أن الجسيمات النووية لا تستطيع الارتباط بعدد غير محدد من الجسيمات. ومعنى هذا أن تفاعل الجسيمات النووية يبلغ حدَّ الاشباع متى بلغ عددها حداً معيناً .

2-3-3- سويات الطاقة في النواة :

عند اكتساب النواة طاقة بفعل تأثير خارجي كأن تصطدم النواة بجسيم ما أو تمتص كوانتاً γ فإنه يصبح لدى النواة فائضا طاقياً وتسمى عندها النواة نواة مثارة . فإذا تعدت طاقة الإثارة طاقة ارتباط النيكلون تنتقل النواة إلى حالتها الأساسية عن طريق اطلاق نيكلون يحمل معه طاقة الإثارة كلها

ويستهلك جزء منها في العمل ضد القوى النووية الجاذبة وغالباً ما يكون هذا النيكلون نتروناً لأن النترونات لا تعبأ بالحاجز الكموني الذي يعوق البروتونات عن النفوذ إلى النواة أو الإفلات منها . أما النواة المتبقية فتصل إلى حالتها الأساسية غير المثارة عن طريق اطلاق كوانتاً γ.

أمّا إذا كانت طاقة إثارة النواة لا تتعدى طاقة ارتباط النيكلون (والتي تبلغ 8Mev) فإن انتقال النواة إلى حالتها الأساسية يتم عن طريق اطلاق كوانتاً أو بضعة كوانتات γ، وقد بينت التجربة أن طيف أشعة γ الصادر عن النواة ذو طابع خطي غير مستمر أي أن كوانتات γ لها قيم محددة منفصلة الأمر الذي دلّ بشكل مباشر على كون النواة جملة كوانتية تتوضع فيها النيكلونات وفق سويات طاقة منفصلة ، وهذا يشبه تماماً حالة الإلكترونات في المدارات الذرية . فعندما تثار النواة يمكن لنيكلون فيها أو أكثر أن يقفز إلى سويات طاقية أعلى وعند عودة هذه النيكلونات إلى سوياتها الأصلية نحصل على ما يسمى طيفاً طاقياً نووياً ويمكن تمثيل ذلك بالشكل(11).

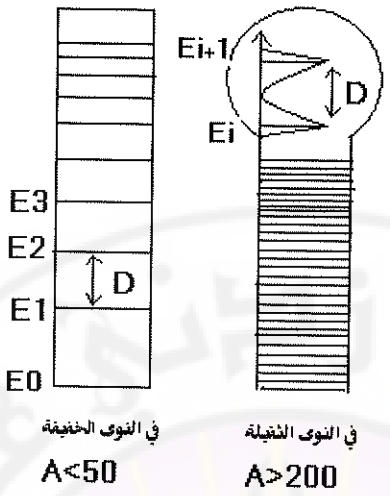


الشكل (11): رسم توضيحي لسويات الطاقة في النواة

ولكن بما أنه لا توجد نظرية شاملة للقوى النووية فإن التنبؤ بالطيوف النووية أمر متعذر , وأن المعطيات التجريبية تبين أنه لا يوجد نظام معروف إلى الآن في ترتيب سويات الطاقة النووية , وإن التأثير المتبادل القوي بين النيكلونات وغياب جسم مركزي في النواة يحددان الطابع المعقد للطيوف النووية , حيث نحصل لدى إضافة نيكلون إضافي إلى النواة على طيف طاقي جديد للنواة .

ولكن في الوقت نفسه تدل التجربة على وجود خصائص نظامية بشكل عام للطيوف النووية تتميز بوجود قيم طاقية في مجالات محددة تؤخذ هذه القيم على أنها متوسط المسافة بين سويتين متتاليتين في النواة . فكلما كانت طاقة الإثارة أكبر وعدد النيكلونات أكثر كانت المسافة المتوسطة D بين السويات أقصر وكانت سويات النواة أكثر تقارباً على سلم الطاقة . وقد لوحظت السويات الطاقية المنخفضة عند اصدار النواة لكوانتات γ أما السويات المرتفعة وهي القريبة من طاقة ارتباط النترون فقد لوحظت عند امتصاص النوى لنترونات أو لدى تبعثر النترونات بالنوى .

– ففي النوى الخفيفة تكون السويات متباعدة وتقع السوية المثارة الأولى E_1 مثلاً عند الطاقة 1Mev ~ بينما تقع E_1 في النوى الثقيلة عند الطاقة 0,1Mev ~ أو أقل من ذلك كما في الشكل (12).



الشكل(12): رسم توضيحي لسويات الطاقة في النوى الثقيلة والخفيفة

فبارتفاع طاقة الإثارة للنواة تزداد السويات الطاقية فيها تقارباً إلى أن ينتهي الأمر باختفاء البنية المنفصلة للسويات الطاقية في النواة ويغدو الطيف النووي متصلاً . إن هذه الظاهرة أدت إلى إدخال مفهوم أو مصطلح جديد لسويات الطاقة في النواة ألا وهو عرض السوية الطاقية وهو بالتعريف المسافة على السلم الطاقي بين تلك القيمتين اللتين يكون عندهما احتمال تشكل الحالة المثارة مساوياً نصف قيمته العظمى . وإن سبب ظهور عرض للسويات الطاقية المنفصلة في النواة ناجم عن الطبيعة الجسيمية الموجية للجسيمات الدقيقة داخلها ، وتتوقف قيمة عرض السوية على الخصائص الذاتية للسوية ويزداد عرضها بازدياد طاقة الإثارة . وقد لوحظ تجريبياً عندما تمتص النواة نترونات بطيئة نشوء سويات عرضها 0,1ev وهذه القيمة أصغر بكثير من المسافة بين السويات حتى عندما يكون مجال طاقة الإثارة من مرتبة طاقة ارتباط النترون .

2-3-4- سبين النواة وعزمها المغناطيسي:

لقد أدى استخدام المطياف ذي مقدرة الفصل العالية جداً إلى ايضاح ورؤية كل خط من خطوط البنية الدقيقة أو حتى فوق الدقيقة للطيوف النووية. ويمكن أن نفسر هذه البنية الدقيقة للخط الطيفي (الذي هو في الحقيقة مؤلف من بضعة خطوط متجاورة ومتقاربة جداً) بأن ننسب للنوى عزوم اندفاع وعزوماً مغنطيسية وأن نطبق على النواة نفس القواعد الكوانتية المعروفة بالنسبة للإلكترونات . وعليه فإنَّ لكلٍّ من البروتون والنترون سبيناً يساوي ½±, وبالإضافة إلى ذلك تملك النيكلونات أيضاً بفضل حركتها داخل النواة ما يسمى عزم اندفاع مداري ℓ و بالتالي فإنَّ عزم الاندفاع الكلي j للنيكلون داخل النواة يساوي إما مجموع ℓ و S في حال توازي $\vec{\ell}$ و $\vec{S}$ وإما الفرق بينهما في تعاكسهما أي $j = \ell \pm ½$.

وبالتالي يكون العزم الميكانيكي الكلي للنواة I يساوي إلى ناتج جمع العزوم j لكل نيكلون على حدة أي $I = \sum j$

وشعاعياً تعطى بالعلاقة : $\left|\vec{I}\right| = \sqrt{I(I+1)}\,\bar{h}$

حيث $\bar{h}$ وحدة القياس وتساوي $\bar{h} = h/2\pi$.

إذاً إن سبين النواة يشتمل بالإضافة إلى سبينات النيكلونات على عزومها المدارية أيضاً .

* توضح النتائج التجريبية أن العزم الكلي I للنوى المستقرة الفردية لا يتعدى 9/2 وللنوى الزوجية يتراوح بين (0 – 5) وإن $I = 0$ لكافة النوى الزوجية - الزوجية دون استثناء ، وذلك بفضل تعادل عزوم النيكلونات الكلية والمتعاكسة مثنى مثنى .

بالإضافة إلى ذلك فإنه يرتبط بسبين البروتون أيضاً عزم مغناطيسي μ_p يعبر عنه بدلالة المغنتون النووي μ_N ويحسب من مغنتون بور بعد استبدال كتلة البروتون بكتلة الإلكترون أي أن المغنتون النووي أصغر من مغنتون بور بحوالي ألفي مرة.

$$\mu_N = e/ m_p \times \overline{h} / 2 = 5{,}05095.10^{-27}\ J.T^{-1}$$

وقد وجد أن μ_p للبروتون الحر غير المرتبط بنواة القيمة $\mu_p = 2{,}7935\ \mu_N$ ويفسر الفرق بين μ_p و μ_N بالحركة المدارية للميزون π^+ حيث أن $P \leftrightarrow n + \pi^+$. وعلى الرغم من أن النترون لا يحمل شحنة كهربائية فإن له عزماً مغناطيسياً مساوياً $\mu_n = -\ 1{,}9135\ \mu_N$ وذلك إذا كان حراً وإشارة الناقص تعني أنَّ العزم المغناطيسي للنترون يعاكس سبينه . أيضاً إنَّ وجود العزم المغناطيسي للنترون والذي هو غير متوقع مرده إلى الحركة المدارية للشحنة السالبة المرتبطة به حيث أن $n \leftrightarrow P + \pi^-$.

إذاً فالعزوم المغنطيسية للنوى تُعزى إلى العزوم المغنطيسية للبروتونات والنترونات من جهة ومن جهة ثانية إلى حركة البروتونات في النواة. و بالمشابهة مع العزم الكلي للنيكلون داخل النواة و المؤلف من جزأين $\overrightarrow{J} = \overrightarrow{\ell} + \overrightarrow{S}$ يمكن تمثيل العزم المغناطيسي للنيكلون بالعلاقة .

$$\mu = (g_\ell \,.\, \ell + g_s\, S)\ \mu_N (*)$$

حيث g_ℓ و g_s المعاملان الجيرومغنطيسيان المداري والسبيني , وهما مختلفان في حالة البروتون و النترون . فباعتبار $S = \pm ½$

يكون بالنسبة للبروتون $\left.\begin{matrix} g_\ell = 1 \\ g_s = 5{,}58 \end{matrix}\right\}$

(حيث يغدو الحد الثاني في العلاقة (*) مساوياً μ_p للبروتون الحر)

ويكون للنترون $\left.\begin{matrix} g_\ell=0 \\ g_s=-3,82 \end{matrix}\right\}$

(حيث يغدو الحد الثاني في العلاقة (*) مساوياً μ_n للنترون الحر)

وأخيراً يمكن التعبير عن العزم المغناطيسي للنواة بالرمز $\overrightarrow{\mu_I}$ أي أنه العزم الناشئ عن مساهمة كافة النيكلونات والمحمول على استقامة شعاع سبين النواة $\vec{I}$ ولذلك يمكن عدُّ العزمين المغنطيسي و الميكانيكي (السبيني) مرتبطين بعلاقة خطية

$$\mu_I = g_I \cdot I \quad (\mu_N)$$

حيث g_I المضروب الجيرومغناطيسي للنواة. ويعبر عنه بدلالة ℓ و g_s و g_ℓ فمثلاً.

	$I\ (\hbar)$	$\mu_I\ (\mu_N)$
H^2	1	+ 0,857407
H^3	½	+ 2,97884
He^3	½	- 2,127544
He^4	0	———

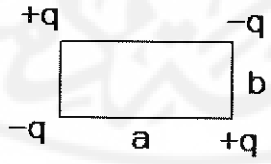
حيث (μ_N) و $(\hbar)$ هما واحدتا القياس.

2-3-5- العزم الكهربائي الرباعي للنواة :

تعطي الشحنة الكهربائية للنواة Z_e فكرة عن عدد البروتونات وعن قيمة الكمون الكولوني لها . وكذلك تعيين الخواص الكيماوية للعنصر تبعاً لها. ولكن لا نستطيع من معرفة Z_e كيفية توزع النيكلونات داخل النواة . فمن أجل أخذ فكرة عن كيفية توزع النيكلونات داخل النواة تم دراسة العزم الكهربائي الثنائي للنواة. وهو مقدار كهربائي مميز ومعقد فمن المعروف أن العزم الثنائي d لشحنتي نقطتين متساويتين ومتعاكستين بالاتجاه (عزم ثنائي القطب) هو $d = q \cdot a$ a

$$+q \quad \longrightarrow \quad -q$$

ويمكن لذي القطبين أن يتشكل ليس فقط في شحنة موجبة وأخرى سالبة بل يمكن تشكله من شحنة موجبة (أو سالبة) وأخرى صفرية (جسيم معتدل), وبما أن النواة تتألف من بروتونات (موجبة) ونترونات (معتدلة) ففي حال عدم انطباق مركزي ثقل البروتونات و النترونات يكون للنواة عزم كهربائي ثنائي . وإن العزم الثنائي للنوى يساوي الصفر إذا كانت في حالتها الأساسية . وهناك مقدار أكثر تعقيداً هو العزم الكهربائي الرباعي للنواة الذي هو معيار حيود توزع شحنة النواة الكهربائية عن التوزع المتناظر الكروي. إن رباعي القطب يتألف من ذي قطبين متماثلين وموجهين توجيهاً متعاكساً ومنزاحين مسافة قدرها b ويعطى بالعلاقة $Q_0 = 2\,bd = 2qab$



فبفرض أن شحنة النواة موزعة بكثافة حجمية ρ فإن العزم الرباعي يكون $Q_0 = \int \rho Z d\tau$ حيث $d\tau$ عنصر حجمي و Z محور تناظر للنواة .

$$Q_0 = \int(3z^2 - r^2) \rho d\tau$$

حيث

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

r^2 : مربع نصف القطر المنتجه لعنصر الحجم $d\tau$

فإذا كانت ρ ثابتة يتعين العزم الرباعي من شكل النواة فقط . فإذا كانت النواة على هيئة قطع ناقص دوراني كان .

$$Q_0 = 2/5\ Z_e (b^2 - a^2)$$

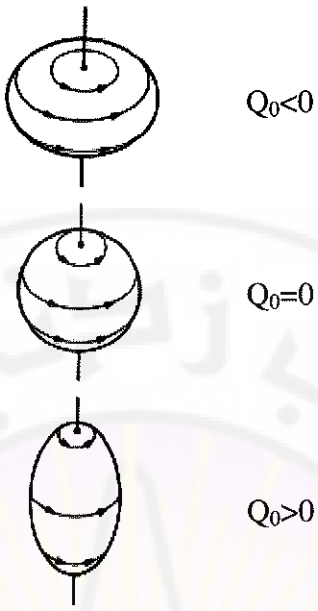
حيث b تمثل نصف محور القطع الناقص باتجاه السبين (المحور Z) و a نصف المحور في الاتجاه المعامد .

وهنا تميز ثلاث حالات :

1) $b > a \leftrightarrow$ النواة ممتدة وفق السبين ولها شكل مغزل و $Q_0 > 0$ أي العزم موجب .

2) $b < a \leftrightarrow$ النواة مضغوطة وفق السبين ولها شكل عدسة و $Q_0 < 0$ أي العزم سالب .

3) $a = b \leftrightarrow$ النواة تتمتع بتناظر كروي و $Q_0 = 0$ وهو حال النوى التي سبينها 0 أو ½ . والشكل(13) يبين تشوهات شكل النواة عن الشكل المتناظر الكروي.



الشكل(13): تغيرات شكل النواة عن الشكل المتناظر الكروي

في الحقيقة يتصل العزم الرباعي بسبين النواة I اتصالاً وثيقاً ويُعطى العــزم الرباعي للنواة في الحالة العامة بالعلاقة .

$$Q = \frac{I(2I-1)}{(I+1)(2I+3)} Q_0$$

وبالتالي فالقوى التي تتمتع بعزم رباعي هي التي يكون سبينها $I \geq 1$.

إن النوى التي يختلف عزمها الرباعي الكهربائي عن الــصفر تولــد حقــلاً كهربائياً لا يتمتع بتناظر كروي ، الأمر الذي يؤدي إلى تشكل سويات طاقــة إضافية للإلكترونات الذرية ، وبالتالي إلى توليد خطوط إضافية في البنية فوق الدقيقة للطيوق الذرية . وتتوقف المسافة بين هذه الخطوط على قيمة العــزم الرباعي للنواة .

الفصل الثالث

الجسيمات النووية الأولية

3-1- الإلكترونات β^- :

التي تنبعث من نوى النكليدات المشعة أثناء تفككها وتعطي أشعة β^- وتبلغ شحنة الإلكترون السالبة $4,8x10^{-10}$ وحدة كهربائية ساكنة وكتلته الساكنة $9,1082.10^{-28}g$ وهي تزداد كلما ازدادت سرعته وفق العلاقة

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

حيث v: سرعة الإلكترون c : سرعة الضوء

m_o : كتلته الساكنة m : كتلته في السرعة v

3-2- البروتونات P:

إن اكتشاف الإلكترون دفع العلماء إلى التحري عن جسيم يحمل شحنة موجبة. وقد نجح العالم غولد شتاين عام 1886 في اكتشاف البروتون في الأشعة القنالية (Canal Rays) وقد بُرهن على أن البروتون ما هو إلاّ أيونات ذرات الهدروجين وكتلته تبلغ $1,673.10^{-24}g$ أو 1.007825 وحدة كتلة ذرية وشحنته تساوي شحنة الإلكترون بالقيمة وتعاكسها بالإشارة .

3-3- جسيمات ألفا (α):

تتألف من نواة ذرة الهيلوم -4 وهي تنطلق من بعض العناصر المشعة الموجودة في الطبيعة وتتراوح طاقتها بين Mev (4-11) وسرعاتها

تكون عادة في المجال $1,4x10^9$ و $2,2x10^9$ سم/ثا . وهي تتميز بقدرتها العالية على تأيين المواد التي تخترقها, فعند اختراقها لطبقة من الهواء فإنها تولد ما بين 50 إلى 100 ألف زوج أيوني وذلك بانتزاع إلكتروناتها .

3-4- الفوتونات:

هي أشعة كهرومغنطيسية تسلك سلوك الدقائق وهو ما يظهر من معادلة اينشتاين الكهروضوئية .

$$h\upsilon = \underbrace{\tfrac{1}{2} mv^2}_{\text{السلوك المادي}} + \underbrace{P}_{\text{السلوك الموجي}}$$

حيث تمثل المعادلة التفاعل ما بين الفوتونات والإلكترونات فعندما تصطدم الفوتونات بالمادة فإن ذلك يؤدي إلى انتزاع إلكتروناتها التي تنطلق بطاقة حركية قدرها $\frac{1}{2}mv^2$ ، بينما P فيمثل الطاقة اللازمة لانتزاع الإلكترون ووفق مبادئ انحفاظ الكتلة و الطاقة يصبح للفوتون كتلة وطاقة وتتراوح طاقات الفوتونات ما بين 100 Kev وعدة Mev .

وطاقة الفوتون تحسب من علاقة بلانك

$$E = h\upsilon = h\frac{C}{\lambda}$$

أما كتلته فتحسب من العلاقة

$$m = \frac{h\upsilon}{C^2}$$

3-5- البوزترونات β^+:

لقد لاحظ العالم ديراك أن المعادلة الموجية النسبية للإلكترونات لها حلول تنطبق على وضعين للإلكترون أحدهما موجب و الثاني سالب وذلك من

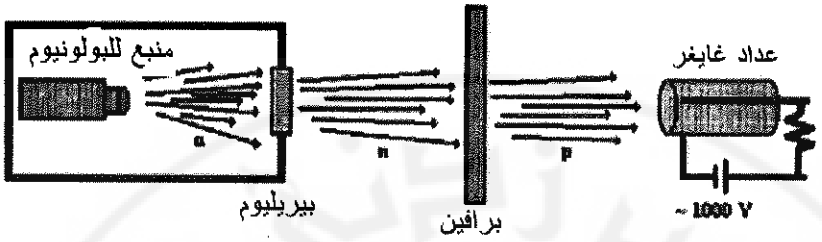
حيث حالات الطاقة لا من حيث نوع الشحنة الكهربائية ومروراً بالحالة الخاصة للطاقة وهي الصفر. وإن المعنى الفيزيائي لحالة الطاقة السالبة يتلخص من وجهة نظر ديراك بأن جميع حالات أو مواقع الطاقة السالبة مملوءة بصورة اعتيادية فعندما يُرفع إلكترون من حالة طاقية سالبة إلى أخرى موجبة فإن ذلك يتطلب صرف طاقة يزيد عن $2mc^2$ (وهي الطاقة اللازمة لإيجاد إلكترونين) وهذا ما يُفسر بانطلاق إلكترون عادي من بحر الإلكترونات غير المتناهي كما تصوره ديراك تاركاً في موقعه فجوة لها خصائص الإلكترون الموجب أو ما يعرف بالبوزيترون .

فالبوزيترون ماهو إلا جسيم كتلته تساوي كتلة الإلكترون ويعاكسه بالإشارة. وقد تم اكتشاف البوزيترون من قبل العالم أندرسون أثناء دراسته للأشعة الكونية عام 1932 . وكذلك تنتج البوزيترونات أثناء تفكك بعض النكليدات المشعة . وقد عززت ظاهرة اتحاد الإلكترون والبوزيترون وتحولهما إلى فوتونات وتحرر طاقة قدرها $2mc^2$ نظرية ديراك. وللبوزيترونات أعمار غاية في القصر تتراوح بين 10^{-9} من الثانية في المواد الصلبة و 10^{-7} في الغازات.

3-6- النترونات n:

وهي دقائق غير مشحونة تخترق النواة الموجبة بسهولة . وفي هذه الحالة إما أن يُمتص النترون من قبل النواة ويبقى داخلها أو يصطدم بها اصطداماً مرناً وتبلغ كتلته 1,00898 وحدة كتلة ذرية أو $1,6745.10^{-24}$ g ويمكن للنترون أن يتفكك إلى بروتون و إلكترون $n \rightarrow p + \bar{e}$.

ولقد كانت التجربة التي أجراها شادويك في عام 1932 الخطوة الأولى التي قادت إلى اكتشاف النترون كما هو موضح بالشكل(14).



الشكل(14): رسم توضيحي لعملية انتاج النترونات

3-7- النترينو ν:

لقد لاحظ جيمس شادويك Shadwick 1914 في أثناء دراسته لطيف أشعة بيتا الذي هو طيف مستمر ومتصل بأن الطاقة الحركية لأشعة β^- متغيرة ومذبذبة كما أكدت حسابات عزوم الاندفاع والكتلة والطاقة في معادلة تحول النترون إلى بروتون وإلكترون وجوب وجود جسيم معتدل الشحنة تقل كتلته كثيراً عن كتلة الإلكترون, وبالاستناد إلى مبدأ انحفاظ الطاقة صيغت معادلة تحول النترون وفق الشكل

$${}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}e^\circ + {}_0\nu^\circ$$

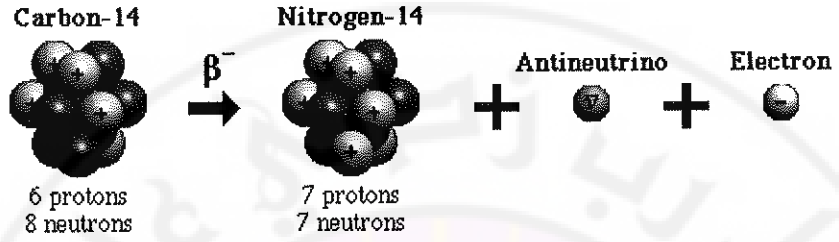
فالمعادلة تؤكد أن انطلاق جسيم بيتا يرافقه انطلاق جسيم معتدل وكتلته الساكنة مقاربة للصفر دُعي فيما بعد بالنترينو حيث تتوزع طاقة التفكك بين جسيم بيتا و النترينو.

وكذلك ينطلق جسيم شبيه بالنترينو نسميه النترينو المضاد وهو يماثل النترينو من حيث الكتلة وانعدام الشحنة لكنه يختلف عنه في بعض الخصائص النووية وذلك عند تحول البروتون إلى نترون .

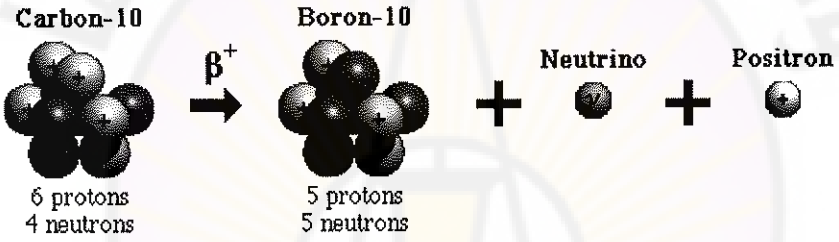
$${}_1p^1 \rightarrow {}_0n^1 + {}_{+1}e^\circ + {}_0\overline{\nu}^\circ$$

وكمثال على تولد جسيمات النترينو والنترينو المضاد هو مانلاحظه عند تحلل الكربون-10 والكربون-14 على التوالي.

تفكك بيتا - سالب



تفكك بيتا - موجب



* كما أنه يتولد نتيجة التفاعلات النووية جسيمات طاقة داخل النواة مثل الليبتونات والميزونات والباريونات.

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الرابع

النظائر

4-1- مقدمة:

لقد اكتشفت النظائر في عام 1907 من قبل العالم سودي (Soddy) الذي أطلق عليها اسم (isotopes) ومعناه باليونانية متساوي المكان, وتعرّف النظائر بأنها عناصر تحتوي نواها على عدد ذري (Z) متماثل و بالتالي تتشابه بخواصها الكيماوية. ولكنها تختلف بعدد نتروناتها (N) أي بكتلها الذرية (A) وبالتالي تختلف بخواصها الفيزيائية .

وتقسم النظائر إلى نوعين نوع غير مشع مثل C^{12} و C^{13} ونوع آخر من النظائر مشع أي يصدر إشعاعات (α , β , γ) مثل C^{11} و C^{14} . وهكذا نجد أنه يمكن لكتل نوى ذرات العنصر الواحد أن تختلف على الرغم من تساوي شحناتها .

وكما نعلم فإن النوى تحوي بروتونات تعين شحنة النواة وعددها Z ونترونات معتدلة الشحنة وقد اعتمد على تسمية كلا النوعين بالنيكلونات فالنيكلون هو نترون أو بروتون . أما العدد الكتلي A فيعبر عن كتلة النواة من بروتونات ونترونات أي : $A = Z + N$

كما اصطلح على اطلاق اسم نكليد على الذرة تمييزاً لها عن العنصر فكما هو معروف يبلغ عدد العناصر الكيماوية حوالي (100) بينما يبلغ عدد النكليدات المختلفة لجميع العناصر حوالي (1500) حتى الآن .

فالنظائر باختصار هي نكليدات متماثلة في عددها الذري Z ومختلفة في عددها الكتلي A . مثل : $C^{14} - C^{13} - C^{12}$

والايزوبارات هي نكليدات متماثلة في عددها الكتلي ومختلفة في عددها الذري Z مثل U^{239} و Pu^{239}

أما الإيزوتونات فهي نكليدات متماثلة في عدد نتروناتها N ومختلفة في عددها الذري Z.

نظراً لاختلاف الخصائص الفيزيائية للنظائر فقد اصطلح على تمثيل العنصر بالرمز الكيماوي له مع كتابة العدد الذري Z إلى يسار الرمز الكيماوي وأسفله وكتابة العدد الكتلي A إلى يمين أو يسار الرمز الكيماوي وأعلاه بالشكل ${}_{Z}X^{A}$ حيث X : رمز العنصر مثل ${}_{92}U^{235}$ و ${}_{92}U^{238}$ ونظراً لكون رمز العنصر الكيماوي يغني عن ذكر عدده الذري فيمكن الكتابة أيضاً U^{235} و U^{238} . . . .

إنَّ اختلاف عدد النترونات في نوى نظائر العنصر لا يؤدي إلى اختلاف في علاقة الربط بين الكهربائية الموجبة للنواة والسالبة للإلكترونات المحيطة بها . إلاَّ أنَّ تغير كتلة النظير يغير من قيمة الشحنة النوعية للشاردة الموجبة لنظير العنصر (حيث أن الشحنة النوعية للنظير هي نسبة شحنة نواته إلى كتلته) . فمثلاً في حالة نظيري الأوكسجين O^{18} و O^{16} فإن تغير الكتلة النسبي هو 2/16=12% أما لو أخذنا U^{238} و U^{235} فالنسبة هي 3/235=1% , أي أن التغير في الشحنة النوعية صغير جداً في حالة اليورانيوم وهنا تكمن صعوبة تخصيب اليورانيوم للحصول مثلاً على U^{235} لاستخدامه في مجال المفاعلات أو الأسلحة النووية .

ويجري عادة التحري عن وجود نظائر العناصر ونسبها بواسطة جهاز " مطياف الكتلة " الذي صنعه العالم أستون عام 1919 .

4-2- أهمية فصل النظائر:

إن الخصائص النووية المختلفة للنظائر تنطوي على أهمية عملية كبيرة. ولنذكر هنا مثالاً على ذلك اليورانيوم-235 U^{235} الذي تبلغ نسبته في اليورانيوم الطبيعي 0,72% فقط .

إن اليورانيوم-235 ينشطر بالنترونات الحرارية بنسبة عالية بالمقارنة مع U^{238} وهذا يعني أن U^{235} يصلح لأن يكون الوقود النووي للمفاعلات وليس U^{238}. وإن النترونات الحرارية هي تلك التي تكون طاقتها (E<<1ev) , لذلك فإن عمل المفاعل يتعلق بشكل رئيسي بنسبة الـ U^{235} في قضبان الوقود النووي للمفاعل . ومثال آخر على أهمية فصل النظائر نجده أيضاً في حالة الماء الديتيرومي D_2O الذي يملك مقطع عرضاني للتفاعل أصغر بكثير جداً من المقطع العرضي الذي يملكه الماء العادي H_2O تجاه النترونات الحرارية حيث [(بارن) $\sigma_D = 0,0057$ b بينما $\sigma_H = 0,33$ b] لذلك يستخدم الماء الديتيرومي في المفاعلات لتبريدها و لكبح النترونات الناشئة والمسببة للانشطار, وكذلك الأمر فيما لو استعرضنا نظائر عنصر الليثيوم الذي يتكون من Li - 6 7,4% و Li - 7 92,6% هذه النظائر تُري أيضاً خصائص نووية مختلفة جداً فالنظير Li - 6 يمتلك مقطع عرضاني كبير جداً للتفاعل بالنسبة للنترونات الحرارية وهو يساوي ($\sigma = 953$ b) الأمر الذي دعا إلى استخدامه كمادة أساسية في مفاعلات الاندماج النووي حيث تتم التفاعلات .

(إنتاج التريتيوم) $${}_3Li^6 + {}_0n^1 \rightarrow {}_1H^3 + {}_2He^4$$

(اندماج بين التريتيوم و الديتريوم) $${}_1H^3 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1$$

وهذه كانت الخطوة الأساسية لتصنيع القنبلة الهدروجينية .

وعلى العكس من ذلك فإنّ Li-7 يمتلك بالمقارنة مع Li-6 مقطعاً عرضانياً للتفاعل صغير جداً (σ = 0,037 b) تجاه النترونات الحرارية ولهذا السبب يستخدم النظير Li-7 كمادة تبريد في المفاعلات ذات الطاقة العالية .

كذلك الأمر في ميادين الطب حيث يجري استخدام نظائر محددة بطاقات وأنصاف أعمار معينة لأغراض التشخيص والمعالجة الطبية وهذا يستلزم نقاوة عالية للنظير المستخدم. وكذلك الأمر في ميادين الصناعة وميادين البحث العلمي .

من هذه الأمثلة نجد أهمية فصل النظائر لاستخدامها فيما بعد في ميادين العمل المختلفة . ولا ننسى أن عملية فصل النظائر من العمليات المعقدة والصعبة جداً والمكلفة أيضاً .

ونظراً لأهمية فصل النظائر فقد ابتكرت طرائق فصل مختلفة فيزيائية وكيماوية.

4-3- طرائق فصل النظائر:

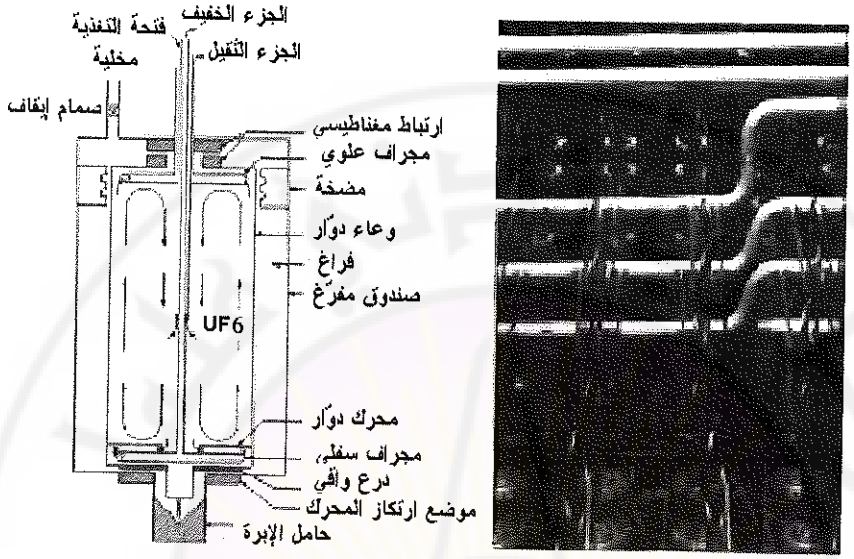
4-3-1- طريقة الانتشار الغازي:

التي ابتكرت لأول مرة عام 1932 من قبل العالم هرتز حيث قام بفصل نظائر عنصر النيون . وكذلك استخدمت هذه الطريقة في الحرب العالمية الثانية في الولايات المتحدة الأمريكية من أجل فصل وانتاج اليورانيوم الشطور U^{235} حيث تم تحويل اليورانيوم إلى سداسي فلور اليورانيوم أي

$^{235}UF_6$ (M = 349) و $^{238}UF_6$ (M = 352)

ومن الأوزان الذرية حُسب معامل الفصل الأعظمي وكان α_{max}=1,0043 ومن هذا الرقم يظهر صعوبة هذه الطريقة وتعدد مراحلها .

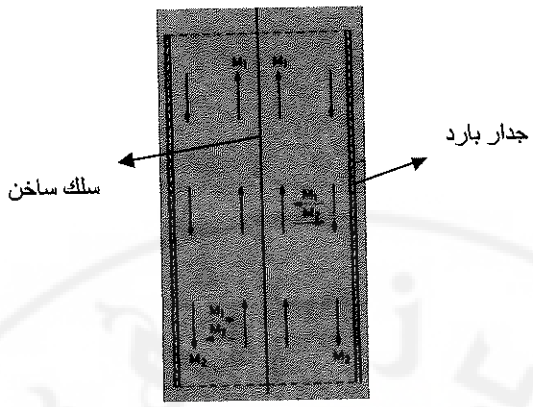
وقد حُصل على U^{235} وفق هذه الطريقة بنسبة 90% , والشكل (15) يمثـل جهاز الطرد المركزي المستخدم لذلك.



الشكل(15): جهاز الطرد المركزي لتركيز $^{235}UF_6$, إلى اليمين تظهر عملية الطرد المركزي المتعاقب

4-3-2- طريقة الانتشار الحراري:

تعتمد هذه الطريقة على حقيقة كون النظائر ذات الوزن الذري الأكبر تتجمع في الجزء الأبرد لأنبوبة الفصل الحراري المؤلفة من أسطوانة جدرانها باردة ويمر من منتصفها سلك دافئ كما في الشكل (16).

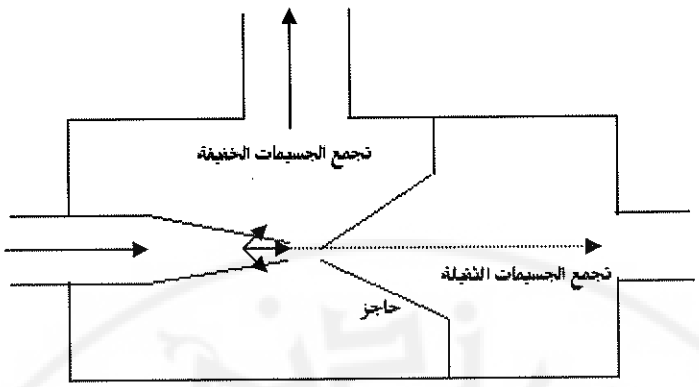


الشكل (16):أنبوبة الفصل بالانتشار الحراري حيث $M_2 > M_1$

يحدث الانتشار الحراري بين الجدار البارد والسلك الساخن، وتكون جهة الانتشار نحو الأسفل بجانب الجدار البارد و العكس بالعكس. وبذلك تتجمع الجسيمات الأثقل في أسفل الأنبوب والأخف في أعلاه. لقد استطاع العالم سيلزيوس استخدام هذه الطريقة لفصل نظائر عنصر النيون بشكل نقي وكذلك الكثير من مركبات الكربون مثل ^{13}C باستخدام $^{13}CH_4$.

4-3-3- طريقة الانتشار بالضغط:

لقد ابتكرت هذه الطريقة من قبل العالم الألماني بيكر. وهي أيضاً تصلح لمزيج غازي من النظائر, فعبر تصادم الجسيمات في الحجرة المفرغة يحدث فرز لهذه الجسيمات حيث تتجه الجسيمات الأخف وتنحرف إلى أعلى الأنبوب بينما تتجمع الجسيمات الأثقل في اتجاه جريان الغاز كما في الشكل(17).



الشكل(17): شكل تخطيطي لطريقة الفصل بالانتشار بالضغط

إن العيب الأساسي في هذه الطريقة هو أنه يجب العمل عند ضغط منخفض جداً, وبالمقابل يكون أيضاً مقدار العبور عند الحجوم الكبيرة نسبياً منخفض جداً.

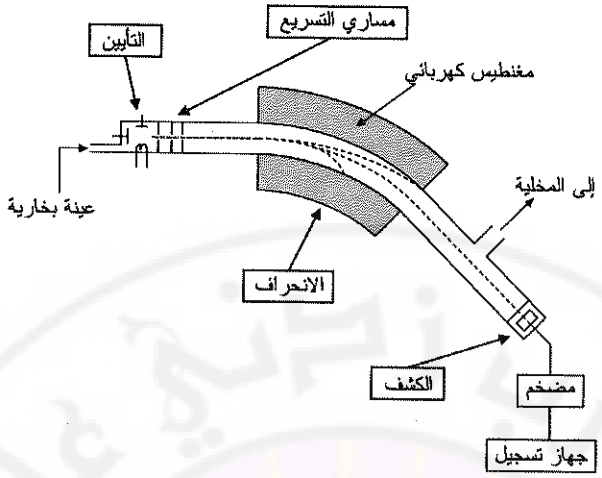
4-3-4- الفصل الإلكترومغناطيسي:

إن هذا الفصل هو نفسه ما يعرف الفصل باستخدام المطياف الكتلوي ويتلخص مبدأ هذا الفصل بإمرار تيار من الأيونات من منبع أيوني في حقل كهربائي حيث يجري تسريع هذه الأيونات وكذلك في حقل مغناطيسي حيث يجري انحراف لمسار الأيونات في هذا الحقل, الشكل (18), وبالتالي ترسم هذه الأيونات أثناء حركتها في الحقل المغناطيسي خطاً دائرياً له نصف القطر التالي .

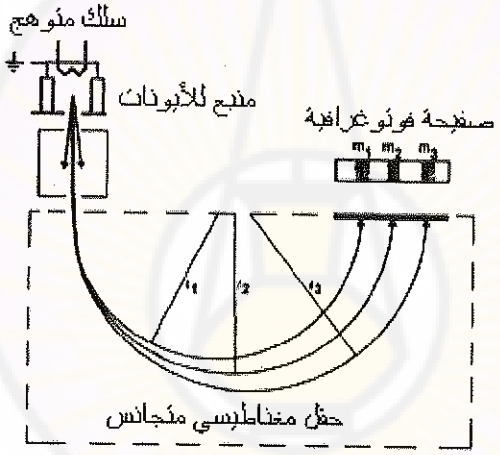
$$r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mU}{Z.e}}$$

B : شدة الحقل المغناطيسي Z.e : شحنة الأيون

m : كتلة الأيون U : جهد الحقل الكهربائي المسرِّع



(a)



(b)

الشكل(18): (a) رسم تخطيطي لمطياف كتلوي (b) مبدأ فصل النظائر الإلكترومغناطيسي

4-3-5- الفصل بالتقطير:

إن عملية فصل النظائر عبر التقطير يعتمد على الاختلاف في ضغط البخار لكل نظير . فعبر نسبة ضغط البخار يُمكن أن يعطى عامـــل الفـــصل الأعظمي فمثلاً من أجل الماء يكون عامل الفصل

$$\alpha_{max} = \frac{P_{H2O}}{P_{HDO}} = 1{,}076\ (20^{\circ}C)$$

كذلك يبلغ الفرق في درجة الغليان لكلٍ من H_2O وD_2O 1.4 درجة.

إن عملية تحضير H_2O^{18} عبر تقطير الماء ووفقاً لمبدأ هذه الطريقة مـــازال يحظى بالأهمية. والجدول (1) يبين نسب ضغط البخار لبعض أزواج المواد.

جدول(1):نسب ضغط البخار عند درجات حرارة مختلفة

زوج المواد	درجة الحرارة K^0	نسب ضغط البخار Pثقيل/Pخفيف
H_2/HD	23	1.60
H_2O/HDO	273.2	1.12
	293.2	1.076
	313.2	1.059
	333.2	1.046
	353.2	1.035
	373.2	1.026
H_2O/D_2O	373.2	1.052
NH_3/ND_3	330.3	1.11
$^{10}BF_3/^{11}BF_3$	173	0.993
$^{12}CH_4/^{13}CH_4$	90.2	1.005
	156.2	1.003
$^{12}CO/^{13}CO$	68.2	1.011
	81.2	1.0069
$^{16}CO/^{18}CO$	68.2	1.0081
	81.2	1.0050
$^{16}O^{16}O/^{16}O^{18}O$	90.2	1.0054

وكذلك يقود ارتفاع معامل الفصل للهدروجين H_2 والهدروجين الديترومي HD إلى فصل سريع وأسرع من عملية الفصل عبر تقطير الماء . وعند درجات الحرارة المنخفضة يجري التفاعل

$$2HD \leftrightarrow H_2 + D_2$$

حيث تستخدم الوسطاء من أجل تسريع هذا التفاعل . وبعد عملية تقطير الديتريوم يجري حرقه بوجود الوسيط المناسب حيث نحصل على D_2O بمردود يبلغ % 99.9 .

4-3-6- الفصل بالطريقة الكهربائية (الكتروليزه):

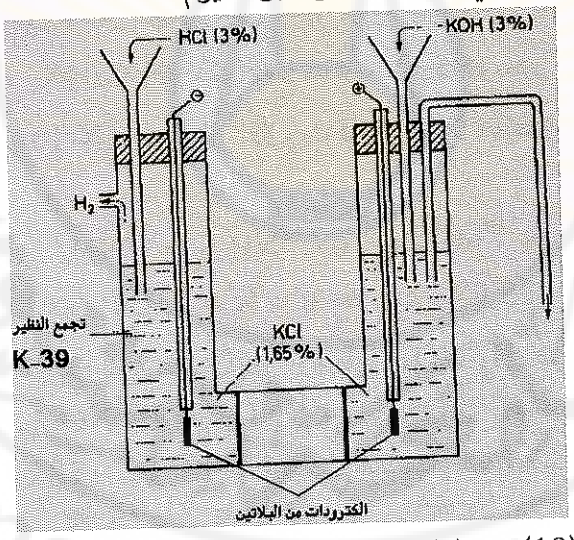
إن الفصل وفق هذه الطريقة استخدم عام 1933 من قبل العالمان لويس ومكدونالد لفصل الهدروجين والديتريوم . حيث قاما بإخضاع محلول ممدد لهدروكسيد أحد العناصر القلوية لحقل كهربائي لفترة طويلة وعبر حركة الأيونات في هذا الحقل وجدا أن الديتريوم يتجمع في الماء المتبقي بشكل ملحوظ وهذا مردّه إلى أن سرعة رحلان (جريان) أيونات الهدروجين هو أكبر بكثير من سرعة رحلان أيونات الديتريوم. ولذلك سيكون الهدروجين المتشكل عند المهبط أفقر بالديتريوم منه من المحلول الالكتروليتي. وذلك إذا تذكرنا أن الماء الطبيعي يحتوي على نسبة ديتريوم تبلغ 0.0156%.

إنّ عملية الفصل وفق هذه الطريقة تتم في خلايا خاصة على مراحل حيث يجري تقطير الماء من الإلكتروليت في نهاية كل مرحلة بحيث يمكن تقليص حجم الالكتروليت بنسبة 1/10 في كل مرحلة . وفي نهاية الأمر نحصل على عامل فصل كلي يبلغ حوالي 6,5 , وهذا يعني أنه يلزم 5 إلى 7 مراحل من أجل الحصول على D_2O بنسبة مئوية عالية . إن هذه الطريقة في الواقع مكلفة وهي ليست اقتصادية بالشكل الكافي من أجل فصل نظائر لعناصر أخرى.

4-3-7- الفصل بطريقة الرحلان الأيوني:

إنّ سرع الرحلان المختلفة لأيونات النظائر في المحلول أو المصهور الملحي يمكن أن تستخدم كقاعدة أولية لفصل النظائر . فعند خضوع الأيونات لحقل كهربائي يستطيع الأيون الأسرع أن يسبق الأيون الأقل سرعة في طريقه إلى الالكترود.

لقد استخدم في هذه الطريقة خلايا متعددة منها مثلاً خلية لفصل نظائر البوتاسيوم وذلك عبر إخضاع محلول لحقل كهربائي حيث يتم تعديل كلاً من الأساس الناشئ عند الكاتود بإضافة حمض HCl وكذلك تعديل الحمض الناشئ عند الأنود بإضافة KOH. وبعد مرور مدة 19 يوم من عمل الخلية مع مرور تيار شدته 0,5A في الخلية لُوحظ ارتفاع لنسبة K - 41 : K – 39 من 14,2 إلى 24 وهذا ما يوافق عامل فصل قدره $\alpha = 1,0022$, والشكل (19) يمثل مخطط تفصيلي لفصل نظائر البوتاسيوم.



الشكل(19):مخطط لفصل نظائر البوتاسيوم على أساس سرع الرحلان المختلفة للنظائر في الحقل الكهربائي

وكذلك تمَّ فيما بعد استخدام مثل هذه الخلايا لفصل نظائر الليثيوم باستخدام مصهور ملح كلوريد الليثيوم عند 650 °C وباستخدام إلكترودات من الغرافيت ، فبعد مرور 8 أيام و باستخدام تيار شدته 300 أمبير ساعي لوحظ ارتفاع لنسبة Li-6 في حجرة الكاتود من 7,4 إلى 20%.

4-3-8- الفصل باستخدام تفاعلات التبادل:

لقد حظيت هذه الطريقة قديماً بأهمية كبيرة لأن عوامل الفصل المحصول عليها وفقاً لهذه الطريقة كانت مرتفعة . ففي هذه الطريقة تتعلق عوامل الفصل α بثوابت التوازن للتفاعلات وكذلك بدرجة حرارة التفاعل .

فمثلاً يمكن الحصول على الماء HDO عبر التفاعل .

$$HD_{(g)} + H_2O_{(aq.)} \leftrightarrow H_{2(g)} + HDO_{(aq.)}$$

وذلك باستخدام حوافز من البلاتين أو النيكل عند 80 °C . وكذلك عبر التفاعل

$$HDS_{(g)} + H_2O_{(aq.)} \leftrightarrow H_2S_{(g)} + HDO_{(aq.)}$$

فمن أجل فصل نظائر الهدروجين مثلاً هناك العديد من تفاعلات التبادل مثل: HX/H_2O، HX_1/HX_2، مركبتان/H_2O، فوسفين/H_2O، أمين/H_2O أما لفصل النظير N-15 من نظائر الآزوت فيمكن مثلاً استخدام تفاعلات التبادل التالية :

$$^{15}NH_{3(g)} + {}^{14}NH_4{}^{+}_{(aq.)} \leftrightarrow {}^{14}NH_{3(g)} + {}^{15}NH_4{}^{+}_{(aq.)}$$

ويبلغ عامل الفصل $\alpha = K = 1{,}034$ عند الدرجة 25 °C

وكذلك من التفاعل بين غاز ^{15}NO ومحلول $H^{14}NO_3$ على مراحل .

$$^{15}NO_{(g)} + H^{14}NO_{3(aq.)} \leftrightarrow {}^{14}NO_{(g)} + H^{15}NO_{3(aq.)}$$

وكذلك لفصل C - 12 و C - 13 فقد تمَّ استخدام التفاعلات.

$$H^{12}CN_{(g)} + {}^{13}CN^{-}_{(aq.)} \leftrightarrow H^{13}CN_{(g)} + {}^{12}CN^{-}_{(aq.)}$$

$$^{13}CO_{2(g)} + H^{12}CO_3{}^{-}_{(aq.)} \leftrightarrow {}^{12}CO_{2(g)} + H^{13}CO_3{}^{-}_{(aq.)}$$

4-3-9- الفصل باستخدام المبادل الأيوني:

تُعدُّ هذه الطريقة من الطرائق الهامة لفصل النظائر نظراً لسهولتها وعامل الفصل في هذه الطريقة يتعلق بشكل رئيسي بثابت التوازن للجملة المراد فصلها من أيونات النظائر فمثلاً :

$$^{7}Li^{+} + {}^{6}\overline{Li} \leftrightarrow {}^{6}Li^{+} + {}^{7}\overline{Li}$$

يتمُّ فصل نظائر الليثيوم باستخدام مبادل أيوني بنجاح والخط فوق الرمز يعني أن هذه الأيونات تبقى عالقة في المبادل الأيوني والأيونات الأخرى تمر عبره.

4-3-10- فصل النظائر بالليزر:

تختلف نظائر اليورانيوم اختلافاً بسيطاً في مواقع مستوياتها الإلكترونية والمستويات الاهتزازية لجزيئاتها. فاختلاف الطاقة بين مستويين في ذرتي اليورانيوم هو في حدود 2,1 إلكترون فولت (الضوء الأحمر _البرتقالي) في حين تختلف القيم الحقيقية لليورانيوم 235 (^{235}U) واليورانيوم 238 (^{238}U) بمقدار $4,2\times10^{-5}$ إلكترون فولط . إن وجود الليزر الذي يمكن إنتاجه بأطوال موجية معينة بدقة متناهية بحيث تكون لها المقدرة على إثارة ذرات اليورانيوم 235 دون التأثير في ذرات اليورانيوم 238 أوجد الرغبة في تطوير طريقة لفصل النظائر تعتمد على الليزر.

وتقنية فصل النظائر بالليزر المعتمدة على البخار الذري Atomic Vapour Laser Isotope Separation قد بحثت في عدة دول وكانت جديرة بأن تبرز كتقنية جديدة في مجال فصل النظائر. وفي هذه العملية فإنه لفصل النظير يتم إجراء تأيين انتقائي لذرات اليورانيوم 235 دون اليورانيوم 238. ثم يتم تجميعها باستخدام مجالين كهربائي ومغناطيسي. ويتطلب تأيين ذرات اليورانيوم 235 مايقارب 6,2 إلكترون فولط من الطاقة. وهذه الطاقة يمكن

الحصول عليها بواسطة ثلاثة فوتونات ليزر ذات اللون الأحمر _ البرتقالي. ويتم توليد بخار ذرات اليورانيوم بقذف فلز اليورانيوم بواسطة شعاع من الإلكترونات, وتتأيين ذرات اليورانيوم 235 الموجودة في البخار بوساطة طاقة ملائمة من فوتونات الليزر. بعد ذلك يتم تحويل أيونات اليورانيوم 235 إلى قطب التجميع للحصول على اليورانيوم 235. في حين تبقى ذرات اليورانيوم 238 غير المتأين كي تجمع في اتجاه آخر. ومعاملات الفصل المرحلية المثالية يمكن أن تصل إلى 15 , إلا أن القيم من 5 إلى10 تُعدُّ قيماً واقعية عملياً. وتتطلب عملية إثراء اليورانيوم 235 حتى نسبة 3% مرحلة واحدة فقط والطاقة المستهلكة تقدر بحوالي 100 كيلو واط. ساعة/كغم (100kWh/kg swu).

وفي طريقة الفصل الجزيئي للنظائر بالليزر Molecular Laser Istope Separation, يتم إثارة جزيئات سادس فلوريد اليورانيوم 235 ($^{235}UF_6$) انتقائياً بوساطة ليزر الأشعة تحت الحمراء (Infra-red Laser) , ثم يتم تعريضها لأشعة ليزر فوق بنفسجية (Ultra-violet Laser) وذلك لتفكيك $^{235}UF_6$، إلى فلوريد اليورانيوم 235 ($^{235}UF_6$ وF) الذي هو مادة صلبة تتكاثف من الغاز في حين أن جزيئات $^{238}UF_6$ لاتتأثر. ولكون UF_6 له طيفٌ معقدٌ فإنَّ هذا يجعل الإثارة الانتقائية لجزيئات UF_6 أمراً بالغ الصعوبة. وهناك عدد من الطرق المبتكرة لهذا الغرض, مثل التبريد بالنفث لبخار UF_6 التي مازالت تحت الدراسة والتطوير. وإلى الآن لايوجد معلومات عن معامل الفصل الذي تم تحقيقه بهذه الطريقة.

الفصل الخامس

النشاط الإشعاعي الطبيعي

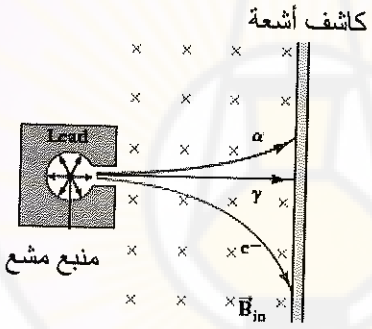
5-1- اكتشاف النشاط الإشعاعي:

إن أول من اكتشف حقيقة النشاط الإشعاعي هو العالم بيكرل وذلك في عام 1896 وذلك عبر ملاحظته لاسوداد لوحات التصوير الفوتوغرافية عندما وضعها أمام مادة متألقة من كبريتات اليورانيوم و البوتاسيوم المضاعفة, والظاهرة نفسها لوحظت أيضا من قبل العالم شميدت عام 1898 عند عمله ببعض أملاح الثوريوم . ولقد قادت التجارب الكيماوية التي أجريت من قبل M.CURIE عام 1898على تراب البتشبلند الغني بأملاح اليورانيوم إلى اكتشاف عنصري البولونيوم و الراديوم . ولقد اكتشف في التجارب اللاحقة التي أجريت فيما بعد عددٌ كبيرٌ من النكليدات النشطة إشعاعياً والناشئة عن تفكك اليورانيوم والثوريوم . ولقد وضعت هذه النكليدات في أماكنها في الجدول وذلك بعد أن أدخل العالم SODDY مصطلح اسم النظير عام 1913 ووضعت كذلك جداول لأسر العناصر المشعة وعبر ملاحظة هذه الجداول يمكن للمرء أن يلاحظ التحولات الإشعاعية المصحوبة بإطلاق جسيمات α و يسمى (تحول من النوع α) أو بإطلاق جسيمات β (تحول من النوع β) أو بإطلاق فوتونات (تحول من النوع γ) . فعند التحول α يتناقص العدد الكتلي (A) بمقدار (4) وكذلك العدد الذري (Z) بمقدار (2) بينما في التحول β لا يتغير العدد الكتلي ويزداد العدد الذري بمقدار (1) .

وعلاوةً على ذلك فقد أثبت بيكرل كذلك أن هذه الإشعاعات لها خاصية تأيين الهواء وجعله ناقلاً كهربائياً فهي تشابه في ذلك أشعة (X) .

فإذا ما وضعت مادة مشحونة كهربائياً في جوار عينة مشعة مثل اليورانيوم فقدت المادة شحنتها بفعل ناقلية الهواء , أي أن الهواء تأين وأصبح ناقلاً. وهذه الظاهرة هي التي قادت في الواقع إلى قياس شدة الإشعاع وكشفه. كذلك يمكن حرف اتجاه مسار أشعة α و β بفعل الحقل الكهربائي وكذلك بفعل الحقل المغناطيسي كونها جسيمات مشحونة. فأشعة α هي عبارة عن نوى ذرات الهليوم وهي موجبة بينما أشعة β^- فهي إلكترونات سالبة .

بينما نجد أن أشعة γ لا تتأثر في كلا الحقلين كونها غير مشحونة فأشعة γ هي أشعة كهرطيسية تشبه أشعة X والأشعة الضوئية وإنما أطوال موجاتها قصيرة الشكل(20).



الشكل(20):انحراف أشعة β وα في الحقل الكهربائي والمغناطيسي

قبل أن نذكر القانون الزمني للنشاط الإشعاعي يجب أن نذكر أن النوى غير المستقرة تسعى لتغيير بنيتها والاستقرار عبر تغير واحد على الأقل من المتغيرات الثلاثة : العدد الكتلي A ، العدد الذري Z وسوية طاقة النواة . ففي معظم الحالات تنقسم النواة إلى قسمين غير متساويين وفق

$$X \rightarrow Y^* + \text{جسيم}$$

$$Y^* \rightarrow Y + h\upsilon \quad (\text{فوتون}) \quad (\text{نواة مثارة})$$

حيث إنَّ الجسيم أصغر بكثير من النواة المتبقية Y . حيث نسمي النواة X (نواة نشيطة إشعاعياً) .

5-2- قانون التفكك الإشعاعي:

تتصف النوى النشطة إشعاعياً بظاهرة التفكك الإشعاعي وهذا التفكك لا يتعلق بالتركيب الكيماوي للذرة ولا بدرجة الحرارة أو الضغط ولا حتى بعمر النواة . فبسبب هذا التفكك يتناقص عدد الذرات الابتدائية بمرور الزمن وهذا التناقص دلت التجربة على أنه يخضع لقانون أسي ويتناسب التناقص الإشعاعي لمادة مشعة في الفترة الزمنية dt مع عدد النوى الأصلي للمادة المشعة N ويعطى قانون سرعة التفكك بالعلاقة .

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

حيث λ ثابت التفكك. وإشارة الناقص تدل على تناقص عدد النوى الأصلية للمادة .

$$\int -\frac{dN}{N} = \lambda \int dt \leftrightarrow -\ell n\, N = \lambda.t + C$$

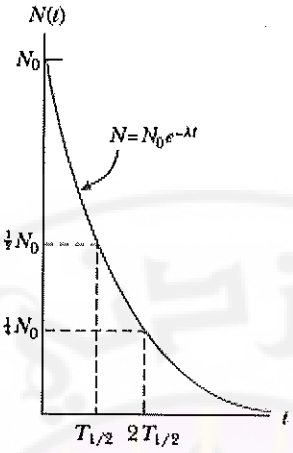
حيث $C = \ell n\, N_O$ عند اللحظة $t = O$ ومنه

$$-\ell n\, N = \lambda.t - \ell n\, N_O$$

$$\ell n\, \frac{N}{N_O} = -\lambda\, t$$

ومنه نجد أن $N = N_O \cdot e^{-\lambda t}$ (1)

أي أن عدد النوى N المتبقية يتناقص أسياً مع الزمن وفق العلاقة (1) كما هو موضح في الشكل(21).



الشكل(21):التغير الأسي لعدد النوى المشعة مع الزمن

إن أي تفكك يتميز بعمر النصف $t_{½}$ أو ما يعرف بالدور وهو الزمن اللازم لتفكك نصف عدد الذرات الأصلي .

أي

$$\frac{N}{N_0} = ½ = e^{-\lambda t_{½}}$$

أي

$$t_{½} = T = \frac{\ell n 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad (2)$$

أي أن λ لها أبعاد مقلوب الزمن.

وإن العمر الوسطي τ لأية مادة مشعة هو $1/\lambda$

حيث

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t\,\lambda\,N\,dt = \lambda \int_0^{\infty} t.e^{-\lambda t}\,dt = \frac{1}{\lambda}$$

أي $\lambda\,\tau = 1$ أو $T = 0,693\,\tau$

وبالتالي نستطيع كتابة قانون التفكك الإشعاعي بالشكل

$$N = N_0.e^{-t/\tau} = N_0 \cdot e^{-0,693t/T} \quad (3)$$

و بشكل عام يتم تحديد الدور أو عمر النصف للمادة المشعة عبر الرسم البياني لـ $\ln N/N_0$ بدلالة t فنحصل على مستقيم ميله $-\lambda$ ومن الميل نستطيع حساب الدور T .

* يُقاس النشاط لكمية معينة من مادة مشعة بعدد التفككات في الثانية . ويعبر عنه بالعلاقة

$$A \equiv \lambda.N = \lambda.e^{-\lambda t} . N_0 = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \left(\tfrac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}} \quad (4)$$

حيث $A_0 \equiv \lambda.N_0$ و $A=A_0/2$

إن وحدة النشاط الإشعاعي في الجملة الدولية للوحدات SI هي البكرل وهو بالتعريف تفكك واحد في الثانية.

أما قديماً فقد استخدمت وحدة الكوري Ci حيث

$1Ci = 3,7.10^{10}\ Bq = 37GBq$

وقد اختير هذا الرقم لأنه يعبر بالتقريب عن نشاط غرام واحد من الراديوم معزولاً عن نواتج تفككه .

مثال: يتفكك C^{14} إلى N^{14} تفككاً من النمط β^- وبعمر نصف قدره 5730 y , فإذا كان 1g من عينة من الكربون تشتمل على 15 تفككاً في الدقيقة ماذا سيصبح النشاط الإشعاعي بعد مرور عشرة آلاف سنة.

الحل:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \ln 2/5730 = 1.210 \times 10^{-4}\ y^{-1}$$

$$A = (15 dis/min) \times e^{-(1.210 \times 10^{-4})(10000)}$$

$$A = 4.5\ dis/min$$

وكذلك يستخدم أيضاً الميلي كوري والميكروكوري .

$1mCi = 3{,}7.10^{7}\ Bq = 37\ MBq$

$1\mu Ci = 3{,}7.10^{4}\ Bq = 37\ KBq$

ومن تعريف الكوري يمكن أن نجد عدد الذرات التي تعطي نشاطاً قدره 1Ci

$$N(1Ci) = \frac{3{,}7 \cdot 10^{10}}{\lambda}$$

و بالتذكر أنّ كتلة الذرة تساوي

$$\frac{\text{الكتلة المولية}\quad M}{\text{عدد أفوغادرو}\quad N_A}$$

نكتب

$$m(1Ci) = N(1Ci) \cdot \frac{M}{N_A} = \frac{3{,}7 \cdot 10^{10}}{\lambda} \cdot \frac{M}{N_A}$$

أو بالنسبة للبيكرل نكتب

$$(g)\ m(1Bq) = \frac{1}{N_A} \cdot \frac{M(g)}{\lambda\,(S^{-1})}$$

كذلك يمكن كتابة العلاقة الأخيرة بدلالة الدور مع تعويض قيمة N_A

$$m(1Ci) \approx 8{,}9 \cdot 10^{-14} \cdot M \cdot T$$
$$(g) \qquad\qquad (g)\ (S)$$

مثال :

ما هو عدد الذرات N والكتلة m لعينة من نظير الفوسفور (P - 32) الذي يبلغ عمر النصف له ($t_{½} = 14{,}3d$) ونشاطها الإشعاعي 1Ci.

باستخدام العلاقة نجد

$$N = \frac{3,7.10^{10}}{\lambda} = \frac{3,7.10^{10}}{\frac{\ell n2}{t_{½}}} = \frac{3,7.10^{10} \cdot t_{½}}{ln2}$$

عدد الذرات النشطة إشعاعياً

$$N = \frac{3,7.10^{10}}{0,693} \cdot 14,3 \cdot 24 \cdot 3600 = 6,6 \cdot 10^{16}$$

ومنه تكون كتلة هذه الذرات

$$m = \frac{32x6,6.10^{16}}{6,02 \times 10^{23}} = 3,5 \cdot 10^{-6} g = 3,5 \mu g$$

مقدار آخر مهم وهو النشاط الإشعاعي النوعي a_S الذي يعتمد على مجموع الكتل للنظائر المستقرة و غير المستقرة في عينة العنصر .

أي

$$a_S = a/m \ (Ci/g)$$

وأحياناً يمكن استخدام عدد المولات للمركب الكيماوي المدروس فتصبح العلاقة .

$$a_S = a/n \ (Ci/mol)$$

فغالباً ما يُعبر مثلاً عن النشاط الإشعاعي النوعي للبنزين الموسوم بـ ^{14}C بواحدة mCi/mmol أو Ci/mol

وبالمشابهة مع العلاقة (4) نستطيع كتابة

$$a_S = a_{So} \cdot e^{-\lambda t} = a_{So} (½)^{t/t_{½}} \qquad (5)$$

فالنشاط الإشعاعي النوعي يعدُّ مقداراً مهماً جداً للكيماوي في مجال الكيمياء الإشعاعية فالعينات يجري بيعها أو تسليمها إلى مراكز البحث وقد كتب عليها قيمة النشاط الإشعاعي النوعي . فإذا ما عرفت قيمة الكتلة

والنشاط الإشعاعي النوعي لعينة ما أمكن للكيماوي أن يستنتج معلومات عن التفاعلات الذرية أو الجزيئية التي تجري في تفاعل ما. والعمل يصبح أكثر امتاعاً وأكثر سهولة بالنسبة للكيماوي فيما لو استخدم نظيرين مختلفين في وسم مركب معين وعُرف النشاط الإشعاعي النوعي لكليهما.

مثال ذلك استخدام C-14 و T (التريتيوم) مثلاً في وسم مركب عضوي وملاحقة التحولات الحاصلة في تفاعل ما عبر قياس النشاط الإشعاعي لكلا النظيرين .

5-3- التوازن الإشعاعي:

سنستعرض تحت هذا العنوان ظاهرة مهمة للنكليدات المشعة ألا وهي ظاهرة التوازن الإشعاعي فعندما تحدث تفككات على نوى المادة المشعة تتفكك النوى الأصلية المشعة لتعطي نوى جديدة مشعة التي تتفكك بدورها أيضا, نسمي نوى المادة المشعة الأصلية بالنكليد الأم أما النوى المشعة الناتجة عنها فنسميها بالنكليد البنت .

نكليد (1) $\rightarrow$ نكليد (2) $\rightarrow$ نكليد (3)

$$X_1 \xrightarrow{T_1} X_2 \xrightarrow{T_2} X_3$$

إن نسبة تشكل النكليد البنت تعطى رياضياً بالعلاقة

$$dN_2/dt = - dN_1/dt - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

أي أن عدد الذرات البنت المتولدة N_2 يزداد من جهة بمقدار $\lambda_1 N_1 dt$ الذي يمثل تفكك X_1 المُولِّد لـ X_2 ومن جهة ثانية ينقص بمقدار $\lambda_2 N_2 dt$ نتيجة تفكك X_2 .

وبما أن $N_1 = N_1^0 . e^{-\lambda_1 t}$

فبالتعويض في العلاقة الأخيرة نجد

$$dN_2/dt + \lambda_2 N_2 - \lambda_1 N_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t} = 0$$

وهي معادلة خطية تفاضلية من المرتبة الأولى .

وهي تصف العلاقة بين النكليد الأم X_1 و النكليد البنت X_2 وإن حل هذه المعادلة هو

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) + N_2^o e^{-\lambda_2 t}$$

حيث N_2^0 هو عدد الذرات المشعة المتشكلة في اللحظة $t = 0$ للنكليد X_2

$e^{-\lambda_1 t}$: يصف تشكل النكليد البنت من النكليد الأم .

$e^{-\lambda_2 t}$: يصف تفكك (تحلل) النكليد البنت بينما

$N_2^0 \cdot e^{-\lambda_2 t}$ فهو يصف تفكك الذرات الموجودة في اللحظة t=0 للنكليد البنت

فإذا فرضنا أنه في اللحظة t=0 قد أجريت عملية فصل كمي عندئذٍ سيكون $N_2^0 = O$ وبذلك سنحصل من المعادلة الأخيرة على معادلة أبسط .

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) \qquad (1)$$

فإذا عزلنا المقدار $e^{-\lambda_1 t}$ خارج القوس نحصل على الشكل

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t} \left[1 - e^{-(-\lambda_2 - \lambda_1)t} \right]$$

أو

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \left[1 - e^{-(-\lambda_2 - \lambda_1)t} \right] \qquad (2)$$

هذه المعادلة تصف حالة استقرار التوازن الإشعاعي كتابع للزمن مع الأخذ بالحسبان الفصل الكمي للنكليد البنت عن النكليد الأم. وعند الوصـــول إلى حالة التوازن الإشعاعي تؤول العلاقة الأخيرة إلى الشكل

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1$$

أي

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

وعندما تصبح النسبة N_2 / N_1 ثابتة يمكننا ادخال عمر النـــصف $t_{½}$ بدلاً من ثابتة التفكك (التحلل) الإشعاعي λ . فنجد

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \ell n2 \left(\frac{1}{t_{½}(2)} - \frac{1}{t_{½}(1)} \right) = \ell n2 \frac{t_{½}(1) - t_{½}(2)}{t_{½}(1) \cdot t_{½}(2)}$$

بالتعويض في العلاقة (2) نجد

$$N_2 = \frac{\frac{t_{½}(2)}{t_{½}(1)}}{1 - \frac{t_{½}(2)}{t_{½}(1)}} N_1 \left[1 - (½)^{\{1 - t_{½}(2)/t_{½}(1)\} \cdot 1/t_{½}(2)} \right]$$

من العلاقة الأخيرة يمكننا أن نلاحظ أنه من أجل دراسة جملة مشعة من النكليدات كما في حالتنا هذه فمن المهم مراقبة عمر النصف للنكليد البنت وأنه كلما كان توضع واستقرار التوازن الإشعاعي بطيئاً كانت أعمار النصف للنكليد الأم والبنت متقاربة ومتشابهة تقريباً.

ومن المهم أن ندرك أن المسألة في حالة التوازن الإشعاعي ليست مسألة توازن ترموديناميكي أو حركية تفاعل ، فالتوازن الإشعاعي ليس بعكوس وهو علاوةً على ذلك لا يمثل حالة ثابتة مطلقة أو متموضعة .

واستناداً إلى العلاقة الأخيرة نجد أنه من المفيد استعراض بعض الحالات التي يمكن أن نصادفها عند دراسة حالات التوازن الإشعاعي لجمل مشعة مختلفة.

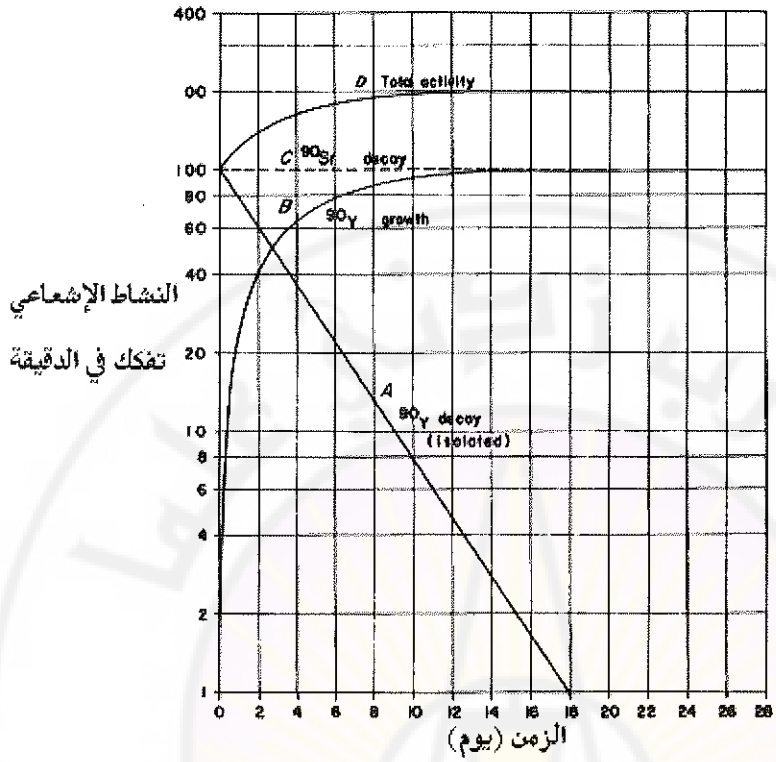
1) $t_{1/2}(1) >> t_{1/2}(2)$: أي أن عمر النصف للنكليد الأم أكبر بكثير من عمر النصف للنكليد البنت أي ($\lambda_2 >> \lambda_1$) وتسمى هذه الحالة حالة توازن دائم (أبدي) .عندئذٍ تؤول العلاقة (1) إلى الشكل

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

$$= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 . e^{-\lambda_2 t} \left(e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1 \right)$$

$$\approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 e^{-\lambda_2 t} \left(e^{\lambda_2 t} - 1 \right) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 \left(1 - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

وهذه الحالة يمكن ملاحظتها وتمثيلها بيانياً عند تفكك نظير السترونسيوم Sr^{90} وتشكل نظير الإيتريوم Y^{90} كما في الشكل(22).



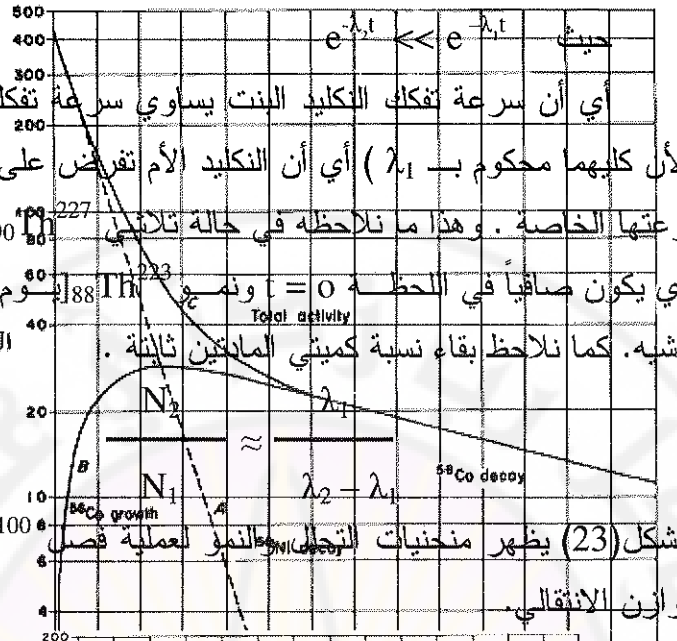
الشكل(22): منحنيات التحلل والنمو لعملية فصل Sr^{90}/Y^{90} في التوازن الدائم. حيث يمثل (A) تحلل Y^{90} المعزول و(B نمو Y^{90} مع Sr^{90} و(C) تحلل Sr^{90} المعزول و (D) النشاط الاشعاعي الكلي لـــ Sr^{90} المعزول

2) $t_{½}(1)>t_{½}(2)$: أي أن عمر النصف للنكليد الأم أكبر من عمـــر النصف للنكليد البنت ولكن في هذه الحالة لا يمكن إهمال التفكك الإشـــعاعي للنكليد الأم. في هذه الحالة لدينا ($\lambda_2>\lambda_1$) ونقول إنه لدينا حالة توازن انتقالي في هذه الحالة تؤول العلاقة (1) إلى الشكل

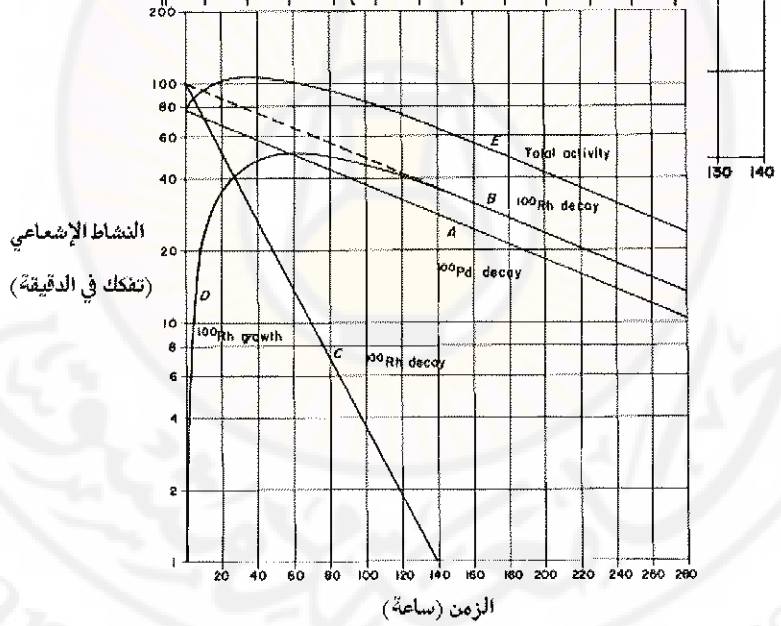
$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1$$

حيث $e^{-\lambda_2 t} \ll e^{-\lambda_1 t}$

أي أن سرعة تفكك النكليد البنت يساوي سرعة تفكك النكليد الأم . (لأن كليهما محكوم بـ λ_1) أي أن النكليد الأم تفرض على النكليد البنت سرعتها الخاصة . وهذا ما نلاحظه في حالة تلاشي Th^{227}_{90} [T_1=18,2 يوم] الذي يكون صافياً في اللحظة t = o ونمو Th^{223}_{88} [T_2=11,7 يوم] ثم تلاشيه. كما نلاحظ بقاء نسبة كميتي المادتين ثابتة .



والشكل(23) يظهر منحنيات التحلل والنمو لعملية فصل Pd^{100}/Rh^{100} في التوازن الانتقالي.



الشكل(23): منحنيات التحلل والنمو اللاحقة لعملية فصل Pd^{100}/Rh^{100} في التوازن الانتقالي. حيث (A) تحلل النكليد الأم Pd^{100} المعزول. (B) تحلل

النكليد البنت Rh^{100} في التوازن الانتقالي, حيث يدل الجـزء المـنقط لهـذا المنحني على تحلل Rh^{100} في حالة كون النكليدين غير مفصولين. (C) تحلل Rh^{100} بعد فصله عن أمه. (D) نمو النكليد البنت Rh^{100} مـع النكليـد الأم المعزول Pd^{100}. (E) النشاط الإشعاعي الكلي للنكليد المعزول Pd^{100}.

3) $t_{1/2}(1)<t_{1/2}(2)$: أي أن عمر النصف للنكليد الأم أصغر من عمر النصف للنكليد البنت ($\lambda_1>\lambda_2$) . أي أن المادة المـشعة الأم أسـرع تفككـاً وبالتالي أقصر عمراً ولن نحصل في هذه الحالة على توازن إشعاعي .

في هذه الحالة وبعد تفكك و تلاشي المادة الأم ستؤول المعادلة (1) إلى الشكل

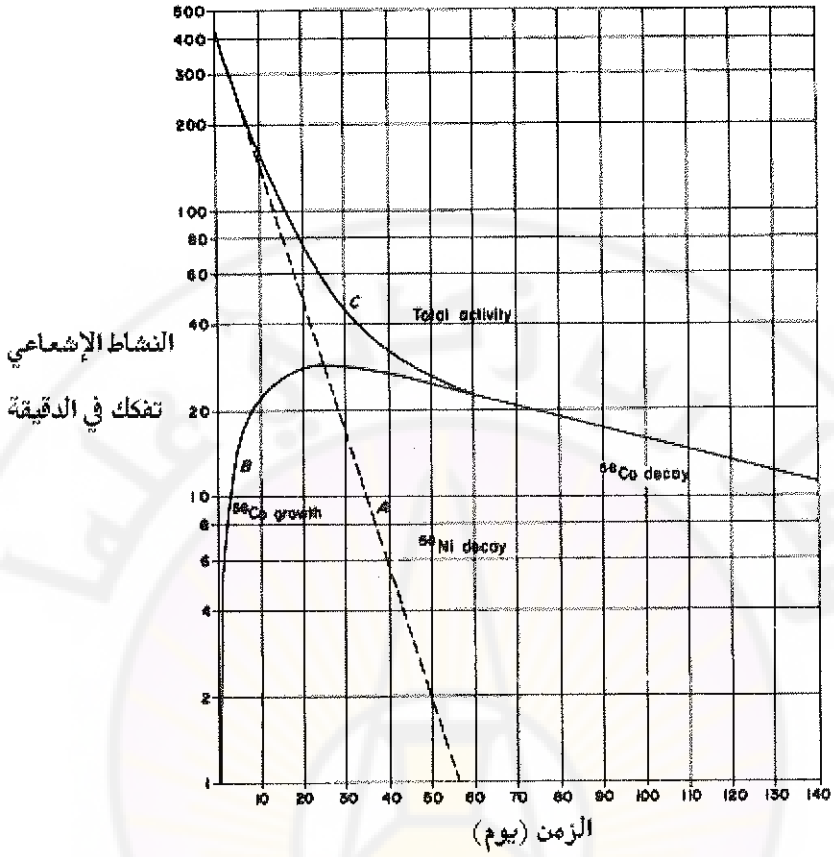
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1^o . e^{-\lambda_2 t}$$

حيث بعد زمن كاف يصبح الحد $e^{-\lambda_1 t}$ مهملاً أمام $e^{-\lambda_2 t}$

أي أن النكليد البنت N_2 يتفكك بحسب ثابت سرعته الخاصة λ_2 .

مثال ذلك تفكك البولونيوم $_{84}PO^{218}$ (دقيقة $T_1=3,05$) الذي يكـون صافياً في اللحظة t=o ونمو $_{82}Pb^{214}$ (دقيقة $T_2=26,8$) ثم تفككه.

والـشكل(24) يظهـر منحنيـات التحلـل والنمـو للنكليـدين الأم والبنـت $Ni^{56}(t_{1/2}=6.1d)/Co^{56}(t_{1/2}=77d)$.



الشكل(24): منحنيات التحلل والنمو للنكليدين الأم والبنت $Ni^{56}(t_{½}=6.1d)/Co^{56}(t_{½}=77d)$ التابعة لعملية الفصل أو التحضير الطازج للنكليد الأم Ni^{56} حيث (A) تحلل النكليد الأم النقي Ni^{56} . (B) نمو النكليد البنت Co^{56}. (C) النشاط الإشعاعي الكلي الذي يمثل كلاً من تحلل Ni^{56} والنمو والتحلل المتزامن للنكليد البنت Co^{56}.

4) $t_{½}(1)\approx t_{½}(2)$: أي تشابه عمر النصف لكلٍ من النكليد الأم والبنت أي ($\lambda_1\approx\lambda_2$) هنا نميز حالتين إذا كان $t_{½}$ (2) (بقليل)$>t_{½}(1)$ فسنحصل على توازن إشعاعي بالتدريج, أما إذا كان $t_{½}$ (2) (بقليل)$<t_{½}(1)$ فهنا لن ندرك حالة التوازن الإشعاعي .

أخيراً نذكر أنَّ التوازن الإشعاعي يمكن أن يتحقق أيضاً في عينة تضم عدة نكليدات ويكون النشاط الإشعاعي للعينة معطى بالعلاقة

$$\Sigma \lambda_i N_i$$

$$(1) \rightarrow (2) \rightarrow (3) \rightarrow (4) \rightarrow (n)$$

وبالمثل كما مرَّ معنا في التوازن بين نكليدين يمكن معالجة الأمر في هذه الحالة وسنحصل على المعادلات التفاضلية التالية .

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad , \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad , \quad \frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n$$

وحلُّ هذه المعادلات سيكون في الشكل

$$N_n(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \ldots\ldots + C_n e^{-\lambda_n t}$$

حيث تمثل المعاملات الثابتة المقادير

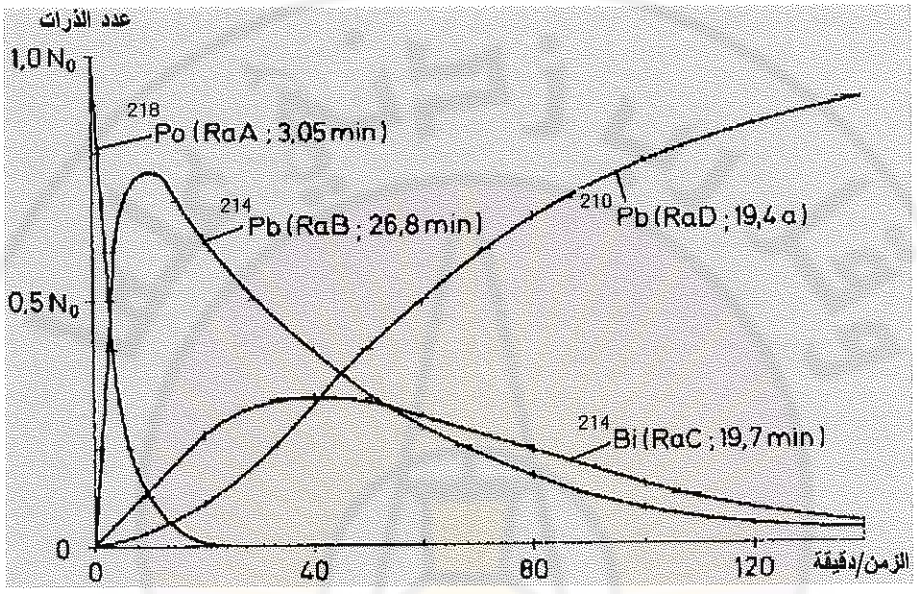
$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \ldots (\lambda_n - \lambda_1)} N_1^0$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \ldots (\lambda_n - \lambda_2)} N_1^0$$

$$C_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \ldots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} N_1^0$$

وكمثال على هذا التوازن الانتقالي نذكر التـــوازن بـــين البولونيـــوم ونواتج تفككه الشكل(25).

$$PO^{218} \xrightarrow[\alpha]{3,05m} pb^{214} \xrightarrow[\beta^-]{26,8m} Bi^{214} \xrightarrow[\alpha]{19,7m} pb^{210} \ (T=21a)$$



الشكل(25): التوازن الانتقالي بين البولونيوم ونواتج تفككه

إن نظير البولونيوم يتلاشى بسرعة بينما يتلاشـــى كـــلاً مـــن pb^{214} وBi^{214} بعد مرور زمن يقارب الساعتين ولا تبقى منهما إلاّ آثـــاراً ضـــئيلة وسينشأ منهما نظير الرصاص pb^{210} الطويل العمر.

Damascus University


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السادس

أنماط النشاط الإشعاعي

6-1- التفكك من النمط α:

يحدث هذا التفكك على الأغلب في الذرات المشعة الثقيلة التي فيها Z>83 وهي العناصر المشعة الطبيعية و الصنعية, وتتراوح طاقاتها بين Mev(8-4) . ويُعد po^{212m} النكليد المشع الوحيد تقريباً الذي يُطلق دقيقة α بطاقة عالية تبلغ Mev 11,7 , وإنَّ هذه الأشعة هي أشعة موجبة الشحنة حيث بين رذرفورد أن جسيم α ليس سوى نواة ذرة الهليوم $_2He^4$ ووفقاً لقانون انحفاظ الكتلة والشحنة يمكننا كتابة .

$$_ZX^A \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + {}_2He^4$$

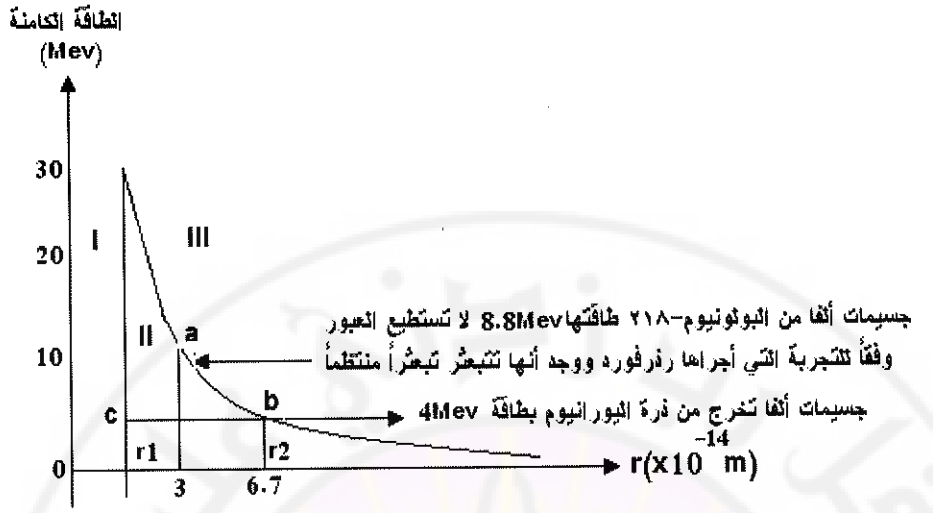
ويجدر بالذكر أن النواة التي تصدر جسيم α يقلُّ عددها الذري بمقدار 2 وتصبح نواة للعنصر الذي يسبقها بمكانين في الجدول الدوري للعناصر .

والنواة الوليدة Y الناتجة تستقر عن طريق التفكك α أيضاً أو β أو إصدار فوتون γ إذا كانت غير مستقرة . وإما أن تكون النواة الوليدة Y مستقرة .

إن طاقة جسيمات α تكون محددة تماماً وهي متساوية الطاقة إذا كانت النواة الوليدة Y غير مثارة أما إذا كانت النواة الوليدة مثارة في سويات مختلفة من الطاقة فإن طاقة التفكك تكون ذات قيم مختلفة. وبوجه عام نقول إن طيف أشعة α هو طيف خطي ، أي أنه تنتج من العنصر المدروس عدة زمر من جسيمات α ولكلٍّ زمرة طاقة معينة.

من المشاكل التي واجهت العلماء في الماضي هو إيجاد تفسير منطقي لنفاذ جسيم α من غلاف النواة أثناء عملية التفكك وهو يحمل طاقة أقل بكثير من طاقة الحاجز الكموني . فمن المعروف أن ذرة اليورانيوم تصدر جسيمات α بطاقة حركية $E_k^{\alpha}=4Mev$ وإن ارتفاع الحاجز الكموني في ذرة اليورانيوم يبلغ حوالي $U_B=28,8Mev$, فالسؤال المطروح كيف تستطيع جسيمات α تخطي الحاجز الكموني وعبوره مع أن طاقتها الحركية أقل بكثير من طاقة ارتفاع الحاجز الكموني $U_B>E_k^{\alpha}$. لقد تم تفسير هذا التناقض في ضوء نظريات الميكانيكا الموجية من قبل كاموف وكيرني وكوندن عام 1928 حيث تمكنوا من حل معادلة شرودنغر لجسيم α وسلوكه في النواة مفترضين أن التابع الموجي لجسيم α لا يمكن أن يؤول إلى الصفر عندما يَكون على تماس لغلاف النواة ، وهو شرط لاحتمال خلاص الجسيم من النواة .

لقد استطاع الميكانيك الكوانتي تفسير ظهور جسيمات α في النقطة b الشكل(26) دون امتلاكها طاقة عالية تمكنها من التغلب على الحاجز الكموني فالجسيم α غير مستقر في نقطة واحدة واحتمال وجوده في العنصر الحجمي dv يتعين بالجداء $\Psi\Psi^* dv$ حيث Ψ هو التابع الموجي الذي يصف حالة الجسيم بتابعية إحداثياته والزمن, وهو تابع مستمر. ونظراً لذلك يكون احتمال تواجد جسيم α حتى في المنطقة الثانية مغايراً للصفر, وعليه فإن الجسيمات الموجودة على السوية cb لها احتمال معين في اختراق الحاجز الكموني وتُسمَّى ظاهرة الاختراق هذه بالمفعول أو الأثر النفقي.



الشكل(26): شكل توضيحي للمفعول أو الأثر النفقي

ويحسب احتمال مرور أو اختراق جسيم α للحاجز الكموني باستخدام معادلة شرودنغر, وإن هذا الاحتمال D المسمى نفوذية الحاجز الكموني يعطى بالعلاقة الآتية:

$$D = e^{\frac{-4\pi}{h}\sqrt{2m}\int_{r_1}^{r_2}\sqrt{U-E_k^{\alpha}}\,dr}$$

حيث :

U : طاقة الجسيم الكامنة

E_k^{α} : طاقته الحركية

m : كتلته

h : ثابت بلانك

r_2 , r_1 : فاصلتا النقطتين b , c على الترتيب.

ومن أجل حساب احتمال التفكك وإصدار جسيم α في ثانيـــة واحـــدة نضرب الاحتمال D بعدد تصادمات جسيم α بالحاجز الكموني فـــي الثانيـــة ورمزه n وهو يساوي

$$n = \frac{1}{t_0} = \frac{v}{2R} = \sqrt{\frac{E_k^{\alpha}}{2mR^2}}$$

t_0 : الزمن الذي يقطع خلاله جسيم α المسافة 2R (وهي قطر النواة)

v : سرعة جسيم α

ويكون احتمال التفكك هو

$$\lambda \sim \sqrt{E_k^{\alpha} / 2mR^2} \cdot e^{\frac{-4\pi}{h}\sqrt{2m}\int_{r_1}^{r_2}\sqrt{U-E_k^{\alpha}}\,dr}$$

تبين العلاقة الاخيرة تبعية احتمال التفكك للطاقة

فمثلاً يتفكك $U^{238} \leftarrow \alpha$ وطاقته 4Mev ويكون احتمال التفكك $\lambda = 5.10^{-18}$

و يتفكك $U^{234} \leftarrow \alpha$ وطاقته 4,36Mev ويكون احتمال التفكك $\lambda = 2.10^{-14}$

و يتفكك $Ra^{226} \leftarrow \alpha$ وطاقته 4,68Mev ويكون احتمال التفكك $\lambda=1,4.10^{-11}$

و يتفكك $Po^{214} \leftarrow \alpha$ وطاقته 7,49 ويكون احتمال التفكك $\lambda = 4,54.10^{+7}$

فبازدياد طاقة جسيم α يزداد احتمال التفكك بسرعة كبيـــرة بـــسبب التابع الأسي الذي يتوقف على مقادير الطاقة. فالعلاقة الأخيرة تبـــين مـــدى الانسجام الكبير الكمي والكيفي للمعطيات التجريبيـــة مـــع القـــيم المحـــسوبة بواسطتها .

ومن ذلك نجد أن قوانين الفيزياء التقليدية ليس بمقدورها دائماً إعطاء تفسير للظواهر النووية مثل ظاهرة التفكك لجسيم α في حين أعطت قوانين الميكانيك الموجي أجوبة مقبولة لتلك الظواهر .

فجسيمات α يمكن أن تكون ذات طاقة واحدة أو متعددة الطاقات ففي الحالة الأولى تنتقل النواة الأم المثارة مباشرة إلى حالة الاستقرار أما في الحالة الثانية فتنتقل النواة الأم المثارة إلى نواة أخرى وليدة مثارة أيضاً وهكذا إلى أن تصل النواة الوليدة إلى حالة الاستقرار وهذه الظاهرة تؤدي إلى تعدد طاقات جسيمات α المنبعثة من نكليد ما . تجدر الإشارة إلى أن طاقة التفكك الكلية تشتمل على طاقة جسيم α وعلى طاقة الارتداد للنواة الوليدة .

أخيراً نسأل لماذا ينقذف جسيم من النواة المشعة دون سواه كالبروتون أو الديتون ... إلخ . وللإجابة عن هذا السؤال يكفي أن نتذكر طاقة الارتباط الكبيرة جداً لجسيم α البالغة 28,3Mev وبالتالي ستكون الطاقة المتحررة عن انطلاق جسيم α أعظمية .

فلقد بينت الدراسة أن طاقة تفكك Th^{232} تكون موجبة عند اصدار جسيم α وسالبة عندما تصدر نظير هيدروجيني ما أو نواة ليثيوم .

6-2- التفكك من النمط β:

يتميز هذا النوع بتحولات إيزوبارية أي أن عدد النيكلونات يبقى ثابتاً وتكون هذه التحولات مصحوبة بإصدار إلكترونات سالبة أو موجبة وتوجد ثلاث طرائق تؤدي إلى عملية تفكك β وهي:

أ- إصدار إلكترونات سالبة .

ب- إصدار إلكترونات موجبة .

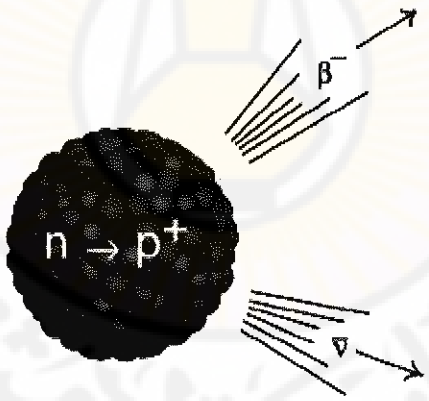
ج- الأسر الإلكتروني .

6-2-1- التفكك من النمط β^-:

إن التفكك بإصدار أشعة β^- يؤدي إلى نواة عنصر يقع في المكان الذي يلي العنصر مباشرة في الجدول الدوري . وهذا التفكك يحدث في النوى التي لديها فائض نتروني ونمثله بالعلاقة العامة

$$_ZX^A \rightarrow {}_{Z+1}Y^A + {}_{-1}e^0$$

أي النسبة $N/Z>1$ $(N/Z>(N/Z)_{stable})$ وتسعى النوى لتصغير عدد نتروناتها و بالتالي زيادة عدد بروتوناتها لتصل طاقتها إلى الحد الأدنى. أي أن عدد البروتونات يزداد بمقدار واحد وينقص عدد النترونات بمقدار واحد وفقاً للتحليل الذي أورده فيرمي في نظريته حيث قال إن النترون داخل النواة يعاني تفككاً هو $n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}$



حيث ينشئ بروتون وإلكترون نتيجة لذلك وكذلك جسيم طاقي دعاه بالنترينو ورمزه $\overline{\nu}$ وذلك لإزالة التناقض فيما يخص مبدأ انخفاظ السبين (سبين النترون = ½). كما أن ادخال جسيم النترينو للمعادلة أزال أيضاً في الحقيقة الصورة المبهمة لطيف أشعة β المستمر فلو أن تحول النواة المشعة

أعطى فقط إلكترونات لوجب أن يكون لها جميعاً الطاقة نفسها E_{max} ، ولكن التجربة تبين أن الإلكترونات الناشئة لها طيف طاقي مستمر بين الصفر وE_{max} . وهذا يؤكد وجود النترينو وأن الطاقة المتحررة تتوزع عليهما بنسب مختلفة وذات طابع إحصائي . فتارة تكون حصة النترينو من طاقة التحول أكبر من حصة الإلكترون وتارة أخرى يحدث العكس.

ويُعطى عدد طرائق توزع الطاقة بين الإلكترون والنترينو وفقاً لنظرية فرمي بالعلاقة

$$\frac{dn}{dE_\circ} = \frac{16\pi^2}{h^6 C^3} (E_\circ - E_e)^2 p_e^2 dp_e$$

حيث :

p_e : كمية الحركة للإلكترون

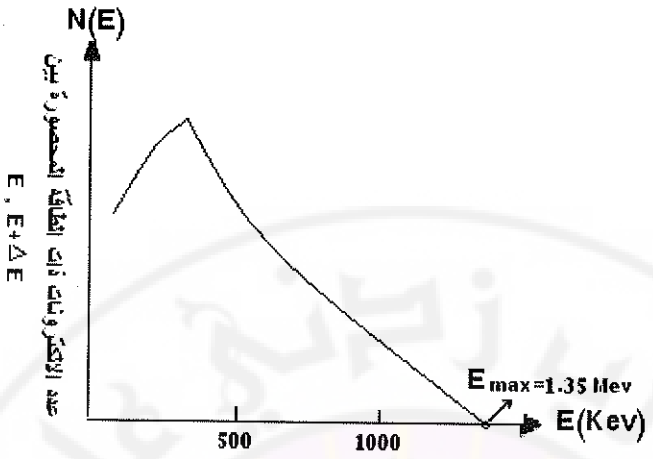
E_e : الطاقة الحركية للإلكترون

$E_\circ$: الطاقة الكلية لأحد تفككات β

h : ثابت بلانك

C : سرعة الضوء

فلو استعرضنا مثلاً الطيف الخاص لتفكك نظير البوتاسيوم K^{40} (الشكل 27) لوجدنا الطابع المستمر للطيف β.



الشكل(27)

(يلاحظ في الشكل (27) أن الطاقة تجمعت كلها تقريبا لدى النترينو وهذا هو سبب ظهور القيمة الحدية E_{max} كما يمكن أن تتجمع الطاقة كلها لدى الإلكترون في بعض الحالات النادرة).

إن الحصول على معلومات تُؤكد وجود النترينو مباشرة أمر صعب المنال, لأنه جسيم معتدل كهربائياً وبالتالي فإن الحقلين الكهربائي والمغناطيسي للذرات لا يؤثران فيه. ولقد جرت محاولات لقياس كتلة النترينو وذلك بالاستفادة من شكل الطيف β وقد قدرت كتلته بحوالي 1/2000 من كتلة الإلكترون . ولا يمكن عدُّ النترينو فوتوناً لأن للفوتون سبيناً يساوي الواحد بينما النترينو له سبين مقداره ½ . كما أن الفوتونات تتفاعل مع الإلكترونات (أثر كومبتون والأثر الفوتوكهربائي) في حين أن النترينو لا يتفاعل عملياً مع الإلكترونات.

ولقد تمكن كلٌّ من العالمين كوفان Cowan ورايـنس Reines في عام 1953 من الحصول على برهان تجريبي لتفاعل النترينو مع النوى محولاً البروتون إلى نترون وذلك عبر تسجيل تحول عدد من البروتونات إلى

نترونات أثناء عبور سيل من النترينو للهدروجين الناشئ ضمن المفاعل النووي . أخيراً نذكر أن التحولات البتاوية تحرر طاقة تكون محصورة في المجال 13,4Mev – 18,6Kev .

P^{32} (14,2 d)

وكمثال على ذلك

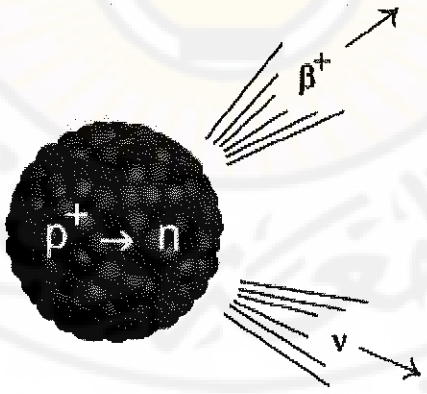
β^-(1,707Mev)

S^{32}

$$P^{32} \xrightarrow{(14,2\ d)} S^{32} + \beta^-$$

6-2-2- التفكك من النمط β^+:

إنَّ التفكك للنواة المشعة وفق هذا النمط يؤدي إلى نواة وليدة تقع قبل النواة الأم مباشرة في الجدول الدوري . ويحدث هذا التفكك في النوى الخفيفة التي لديها فائض بروتوني أي $N/Z<1$ $(N/Z<(N/Z)_{stable})$ وهو ناتج عن تحول البروتون إلى نترون داخل النواة .



$$_1P^1 \rightarrow {}_0n^1 + {}_{+1}e^{\circ} + \nu$$

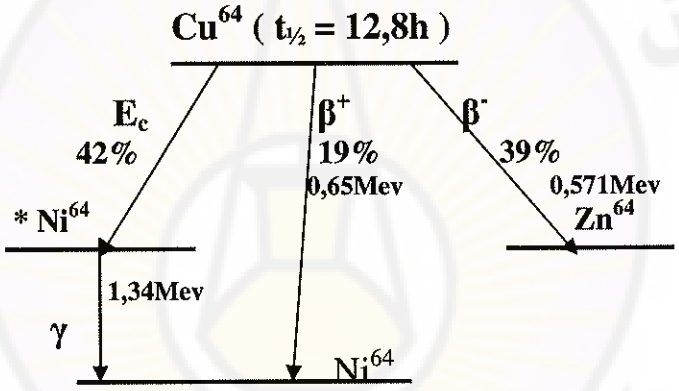
وبشكل عام يُرمز إلى التحول الإشعاعي من هذا النمط بالشكل العام

$$_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{Z-1}Y^{A} + {}_{+1}e^{\circ}$$

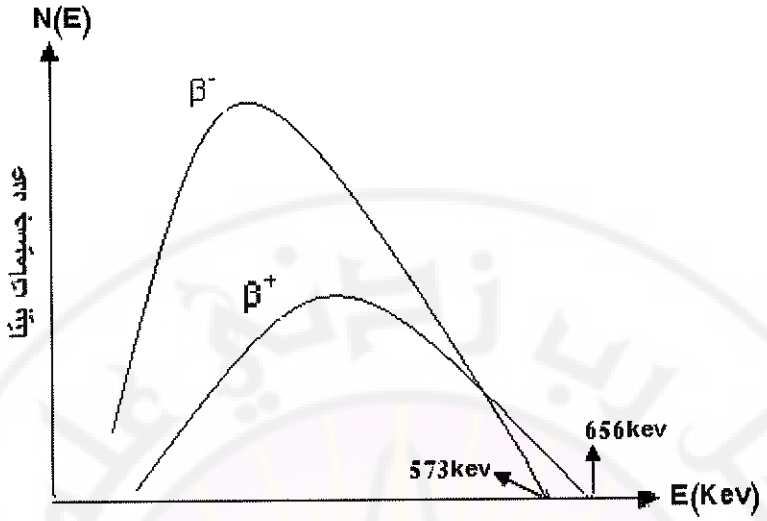
ويتأكد نشوء النترينو أثناء التحول من التوزع الطاقي للبوزترونات ، فطيف البوزترونات يشبه طيف الإلكترونات باستمراريته ووجود قيمة حديـــة له E_{max} . إن هذا النوع من التفكك يكون ممكناً إذا كان الفارق الطاقي بـــين كتلة النواة المشعة وكتلة ناتج التفكك يزيد على المقدار $2m_{\circ}C^2$ حيث تمثـــل $m_{\circ}$ الكتلة السكونية للإلكترون أو البوزيترون .

وكمثال على التفكك بالبوزيترون هو تفكك النحاس وتحوله إلى نيكل .

$$_{29}Cu^{64} \rightarrow {}_{28}Ni^{64} + {}_{+1}e^{\circ}$$



والشكل(28) يبين التوزع الطاقي للإلكترونات والبوزيترونات في حالة تحلل النكليد Cu-64.



الشكل(28): التوزع الطاقي للإلكترونات والبوزيترونات في حالة تحلل النكليد Cu-64

6-2-3- التفكك بأسر الإلكترون E_c:

يحدث هذا النوع من التفكك الإشعاعي في النوى الثقيلة ذات الفائض البروتوني أيضاً أي $(N/Z<(N/Z)_{stable})$ ويتحول أحد بروتونات النواة إلى نترون من دون نشوء بوزيترون . وهذا الذي تنبأ به يوكاوا Yukawa نظرياً حيث قال إنه من الممكن تحقق مبدأ انحفاظ الشحنة عن طريق اختفاء جسيم داخل الذرة . وفي الواقع إن عملية التقاط البروتون في النواة لأحد إلكترونات الطبقة K في الذرة يُحقق هذا التصور حيث يختفي في آن واحد شحنة موجبة وأخرى سالبة. وفق $_1P^1 + _{-1}e^\circ \rightarrow _0n^1$

وسيكون لهذا التحول المخطط العام $_ZX^A + _{-1}e^\circ \rightarrow _{Z-1}Y^A + \nu$

وقد وضع الجسيم ν في المعادلة لتحقيق مبدأ انحفاظ السبين. إذاً فالنوى ذات الفائض البروتوني يمكن تفككها بأحد الطريقين :

1) إطلاق بوزيترون ونترينو (تفكك β^+).

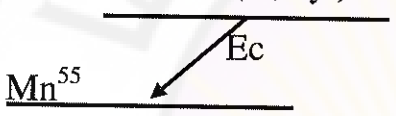
2) التقاط إلكترون من الطبقة الذرية K وإطلاق نترينو.

وقد أكد العالم الفارس Alvarez أن التفكك بالأسر الإلكتروني هو أمر شائع في النوى التي تعاني من نقص في عدد النترونات حيث يُلاحظ أن النسبة E_c/β^+ تزداد كلما ازداد العدد الذري للنوى المشعة وحتى طاقة معينة.

ويحصل التفكك بالأسر الإلكتروني من وجهة النظر الطاقية إذا كان الفارق الطاقي بين كتلة النواة المشعة وكتلة إيزوبارها الناشئ عنها يقع في المجال بين الصفر وأقل من المقدار $2m_oc^2$ أي

$$(M_Z - M_{Z-1})\ 931{,}5 < 1{,}02 Mev$$

مثال ذلك تحلل أو تفكك الحديد Fe^{55} (2,6 y)



إنّ عملية أسر الإلكترون من الطبقة K القريبة للنواة يتزامن مع إصدار إشعاعي سيني مميز للعنصر الجديد الناشئ ذي الشحنة Z-1 . حيث يحصل شاغر في المدار K مما يقود إلى هبوط إلكترون من الطبقة الأعلى ويؤدي ذلك إلى نشوء إشعاع سيني مميز. وفي بعض النوى المشعة يمكن أن يتساوى احتمال تفكك النواة عن طريق إصدار البوزيترونات مع احتمال تفككها عن طريق الأسر الإلكتروني وهذا ما نلاحظه عن تفكك عنصر الفاناديوم, فنصف النوى تسلك الطريق

$$_{23}V^{48} \rightarrow {}_{22}Ti^{48} + e^+ + \nu$$

و النصف الآخر يتفكك وفق

$$_{23}V^{48} + e^- \rightarrow {}_{22}Ti^{48} + \nu$$

6-3- التفكك من النمط γ:

هذه الأشعة تصاحب غالباً التفككات α و β , وقد ثبت علمياً أن أشعة γ تصدر من النواة المتشكلة فور نشوئها وليس من المادة المشعة. وهذا

الأسلوب من التفكك تسلكه النوى التي هي في حالات مثارة عند عودتها لحالة الاستقرار. تتراوح طاقة أشعة غاما في المجال الطـــاقي (7Mev-10Kev). وفي أثناء هذا الإصدار من الأشعة لا يتغير تركيب النواة حيث يبقـــى العـــدد الكتلي وشحنة النواة ثابتاً . وقد تبين من خلال قياس طاقة فوتونات أشـــعة γ أن طيف أشعة γ له في معظم الأحوال طابع خطـــي أي هـــو عبـــارة عـــن مجموعات من الكوانتات المحددة الطاقة . وهذا يدل مباشرةً علـــى أن طاقـــة النوى ليست اختيارية ولها قيم محددة تماماً . إن النوى التي تطلـــق أشـــعة γ فقط تتميز بأنصاف أعمار قصيرة للغاية من مرتبة 10^{-13} ثانية, حيث يصعب قياسها. ولكن في المقابل نرى أن بعض النوى المثارة تتفكك بأنصاف أعمار تصل أحياناً إلى 600 سنة كما هو الحال في نواة الاريد يوم Ir^{192} وتـــسمى مثل هذه الحالة بالحالة الإيزوميرية للنواة (أو حالة ما بعد الاستقرار), وقـــد كان العالم الألماني Hahn أول من اكتشف هذه الحالة ســـنة 1921, حيـــث لاحظ بين نواتج التفكك β للثوريـــوم إيزومير ين للبروتكتينيـــوم أنـــصاف أعمارهما 6,7 ساعة و 1,22 دقيقة .

$$_{90}Th^{234} \rightarrow {}_{91}Pa^{234} + \beta^- + \nu$$

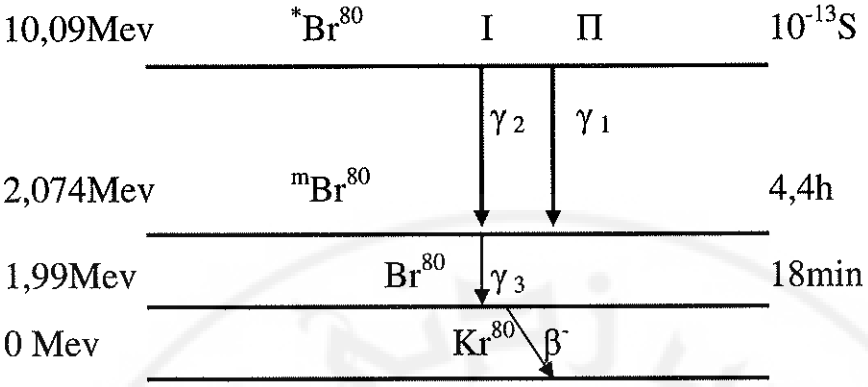
$$_{90}Th^{234} \rightarrow {}_{91}{}^{m}Pa^{234} + \beta^- + \nu$$

ويُرمز للإيزوميرية بالحرف m فـــوق العنـــصر وهـــو اختـــصار للكلمـــة (metastable) وتعني شبه مستقر.

ونفس الشيء حصل عليه الفيزيائي كرشاتوف 1935 عنـــدما قـــذف البروم Br^{79} بالنترونات . فحصل على

$$Br^{79} + n \rightarrow {}^{*}Br^{80}$$

والمخطط التالي يوضح كيفية الوصول إلى حالة الاستقرار بالنـــسبة لذرات البروم المثارة الناشئة.



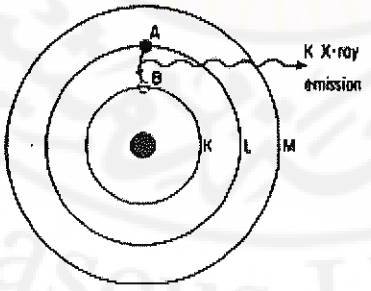
في الواقع هناك طريقتان لتخليص النواة شبه المستقرة $^{m}Br^{80}$ من طاقة إثارتها إما عن طريق التفكك γ $^{m}Br^{80} \rightarrow Br^{80} + \gamma$

أو عن طريق الانقلاب الداخلي $^{m}Br^{80} \rightarrow Br^{80} + e^{-}$

حيث يُلاحظ التفكك β^{-} تجريبياً بدور قدره 18min عقب عملية القذف النتروني للبروم .

6-4- التفكك بالانقلاب الداخلي:

عند حدوث هذا التحول في النوى المثارة تنتقل طاقة الإثارة للنواة مباشرة إلى إلكترون مداري فيخرج هذا الإلكترون خارج الذرة ويمتلئ المدار الشاغر في الطبقة الإلكترونية الداخلية بإلكترون من طبقة خارجية حيث تصدر الذرة عندئذ أشعة سينية مميزة كما في الشكل (29).



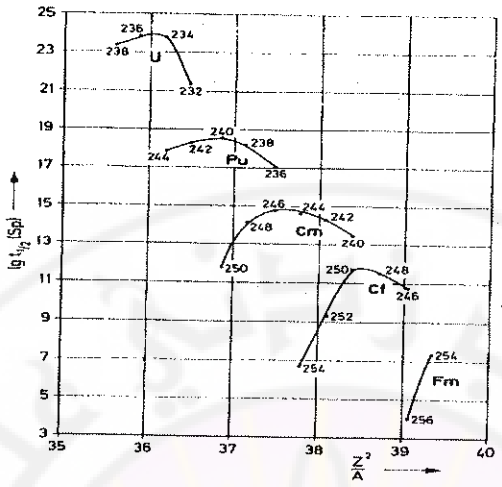
الشكل(29): رسم توضيحي لانبعاث أشعة-X في الانقلاب الداخلي

وسيولد هذا الانقلاب الداخلي أيضاً طيفاً مميزاً لأشعة β الناشئة ذات الطاقات المنفصلة وليست متصلة كما هو الحال في التفكك β^- وهذا مردَّه إلى أن طاقة ارتباط الإلكترون بكل طبقة ذرية لها قيمة محددة تماماً .

فطاقة الإثارة للنواة في هذا الانقلاب تُصرف في كسر الرابطة بين الإلكترون والنواة ويتحول الجزء المتبقي منها إلى طاقة حركية للإلكترون, وإن هذه المقادير يمكن قياسها تجريبياً.

6-5- الانشطار التلقائي:

شكل آخر للتحلل أو التفكك الإشعاعي هو الانشطار التلقائي للنكليدات الثقيلة الحاوية على عدد كبير من النترونات, وإن مقارنة أعمار النصف الموجودة من أجل الانشطار التلقائي تُري أن أعمار النصف هذه تتناقص بشكل كبير مع ازدياد العدد الذري للنكليدات . فبحسب موديل الانشطار لقطرة السائل يجب أن يكون الانشطار التلقائي تابعاً للمقدار Z^2/A ، وقد مُثلت في الشكل(30) تبعية لوغارتم عمر النصف الخاص بالانشطار التلقائي كتابع للمقدار Z^2/A وذلك من أجل النوى المتماثلة.



الشكل(30)

ومن الشكل(30) يتضح أن أثبت حالة يكون فيها النكليد تجاه الانشطار التلقائي هي تلك الموافقة للعدد الكتلي المتوسط للنظير, مثال ذلك (Pu-240)، وعندما تكون الأعداد الكتلية للنظير منخفضة أو مرتفعة يلاحظ هبوط عمر النصف المتعلق بالانشطار التلقائي , مثال ذلك (Pu-244 , Pu-236) .

علاوةً على ذلك فإن الانشطار التلقائي يمكن أن يحدث وفق طرائق مختلفة بحيث يتولد عن النظير المنشطر تلقائياً نكليدات مشعة مختلفة الكتلة والعدد الذري والطاقة, وتستقر هذه النكليدات الجديدة غالباً بعد تحولات من النمط β^- أو γ . ولكل نكليد مشع ثقيل خصائص مختلفة عن أي نكليد آخر ينشطر تلقائياً وذلك يتعلق ببنية نواة النكليد نفسها وحالتها الطاقية .

فمن الناحية النظرية يمكن النظر إلى عملية حدوث الانشطار التلقائي تماماً كما يحدث في حالة التفكك وأن الأمر يتعلق جداً بطاقة العتبة للحاجز الكموني للنواة .

الفصل السابع

أسر العناصر المشعّة

7-1- مقدمة:

إنّ العناصر الثقيلة المتوفرة في الطبيعة والتي يزيد عددها الذري عن 83 (عنصر البزموت) تُعد عناصر مشعة, حيث تنتمي هذه العناصر إلى أسر نتيجة التفككات الإشعاعية المتعاقبة التي جرت عليها وتصنف أسر العناصر المشعة الطبيعية في ثلاث مجموعات :

1) أسرة اليورانيوم Uranium Series

2) أسرة الثوريوم Thorium Series

3) أسرة الأكتينيوم Actinium Series

إن هذه العناصر المشعة تُطلق أثناء تفككها جسيمات α أو β (التي تكون مصحوبة بأشعة γ).

7-2- أسر العناصر المشعة الطبيعية:

7-2-1- أسرة اليورانيوم:

إنّ العنصر الجد في هذه الأسرة هو U^{238} الذي له نصف عمر يبلغ 4.5 مليار سنة وتنتهي هذه الأسرة بعد أربعة عشر تفككاً [ثمانية منها عن طريق التفكك بأشعة α وستة عن طريق التفكك بأشعة β^-] في عنصر الرصاص المستقر $_{82}pb^{206}$. وإن العدد الكتلي الموافق لأفراد هذه الأسرة هو $A = 4n + 2$ حيث $51 \leq n \leq 59$.

فمثلاً بالنسبة لليورانيوم نحصل على $A = 4x59 + 2 = 238$

7-2-2- أسرة الثوريوم:

إن العنصر الجد هو Th^{232} الذي يبلغ نصف عمره T=14 مليار سنة وتنتهي هذه الأسرة أيضاً بعد عشرة تفككات [ستة تفككات α وأربعة β^-] في عنصر الرصاص المستقر pb^{208} . وإن العدد الكتلي الموافق لأفراد هذه الأسرة هو A=4n حيث $52 \leq n \leq 58$.

7-2-3- أسرة الأكتينيوم:

تبدأ هذه الأسرة بعنصر اليورانيوم -235 المشع والذي له نصف عمر T=0,71 مليار سنة وتنتهي هذه الأسرة بعد أحد عشر تفككاً [سبعة تفككات α وأربعة β^-] بعنصر الرصاص المستقر pb^{207} ويكون العدد الكتلي الموافق لأفراد هذه الأسرة معطى بالعلاقة A=4n+3 حيث $51 \leq n \leq 58$.

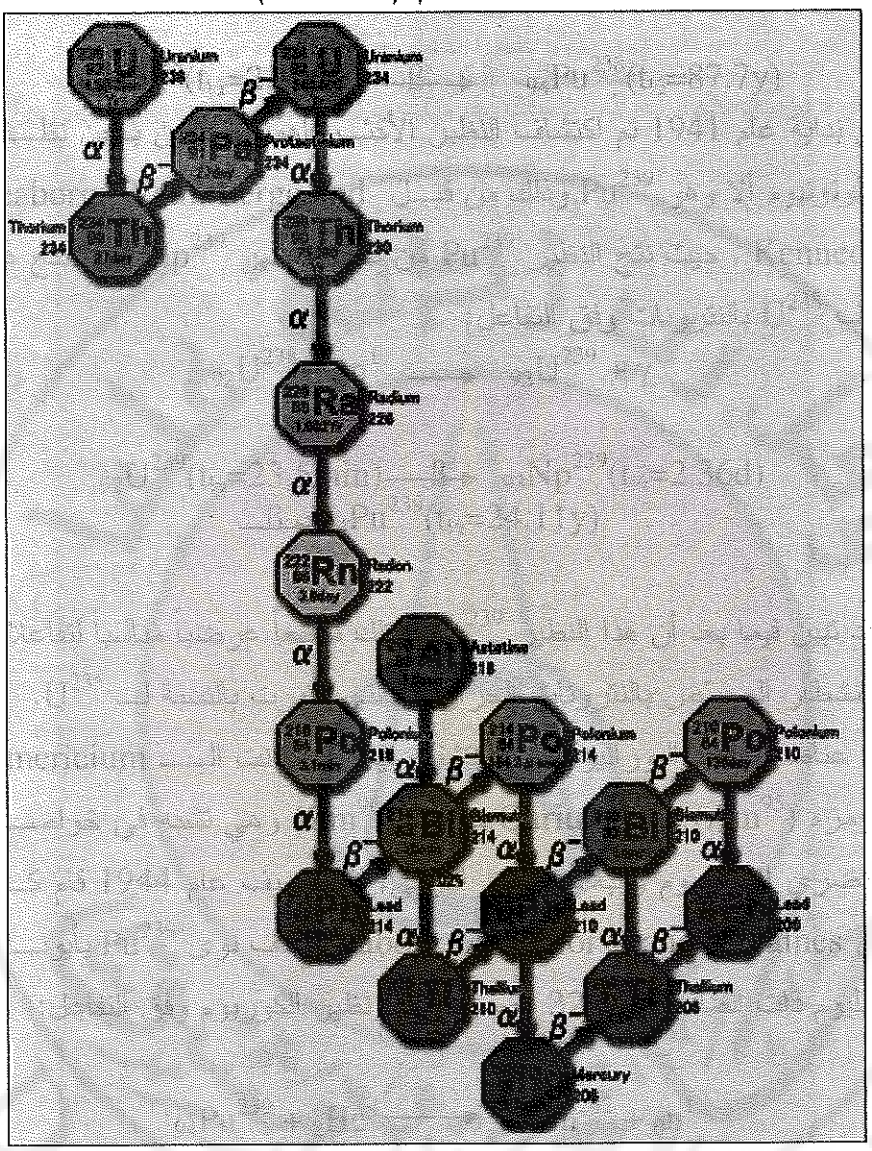
وكانت هناك مجموعة رابعة هي سلسلة النبتونيوم, وهي لاتوجد في الطبيعة الآن نظراً لأن عمر النصف لأطول عناصرها عمراً Np^{237} هو $2,2.10^6$ سنة , وهو أقل بكثير من عمر الأرض, وتنتهي بعنصر البزموت Bi^{209} .

هذا وقد بيّنت الدراسات والبحوث الإشعاعية-الكيماوية الدقيقة أن بعض العناصر الخفيفة له أيضاً نظائر طبيعية مشعة مثل $K^{40}(T=1,3.10^{10}a)$ و $V^{50}(T=5.10^{15}a)$ وكذلك $Rb^{87}(6.10^{10}a)$ وعناصر أخرى أيضاً. وإن لهذه النظائر أدواراً طويلة جداً . وكذلك عنصر الكربون المشع C^{14} ذو عمر النصف 5730 سنة الذي لا ينتمي أيضاً إلى العناصر المشعة الثقيلة والذي ينتج باستمرار من تفاعل الأشعة الكونية (نترونات) مع غاز الآزوت N^{14}

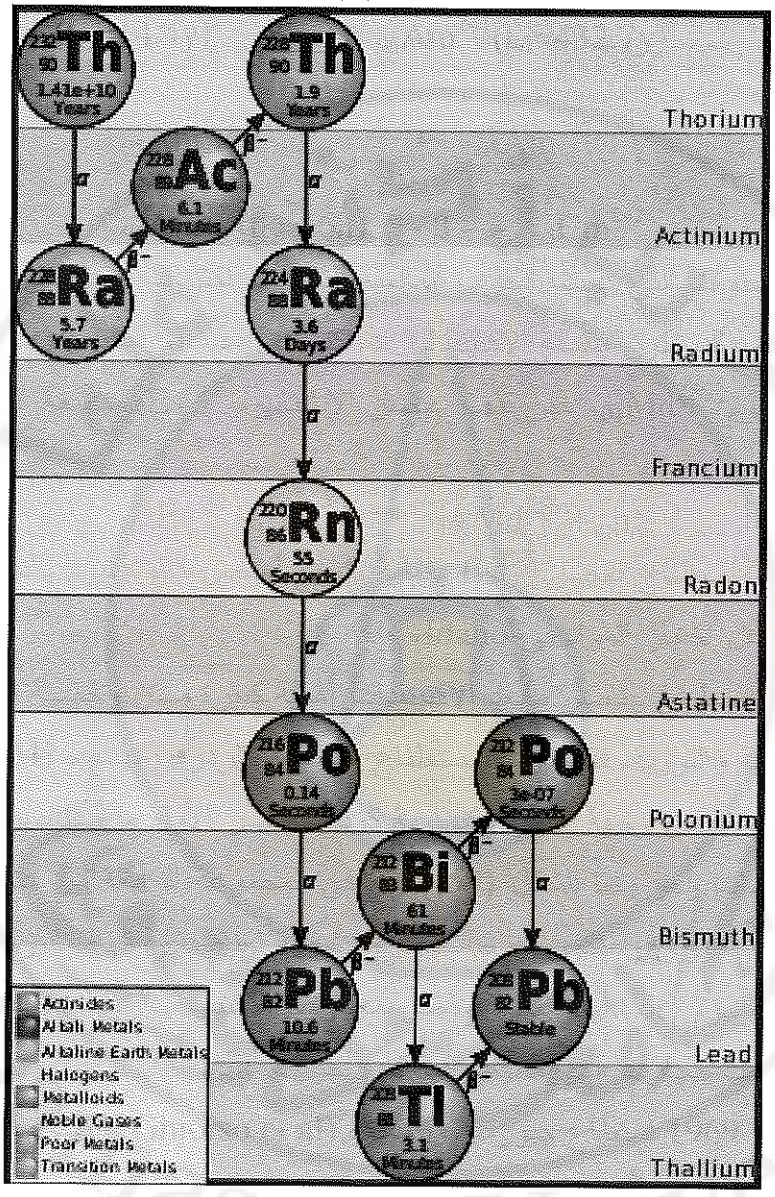
$$_7N^{14} + _0n^1 \rightarrow _6C^{14} + _1p^1$$

والجداول المرفقة تبين التفككات والتحولات التي تطرأ داخل كل أسرة.

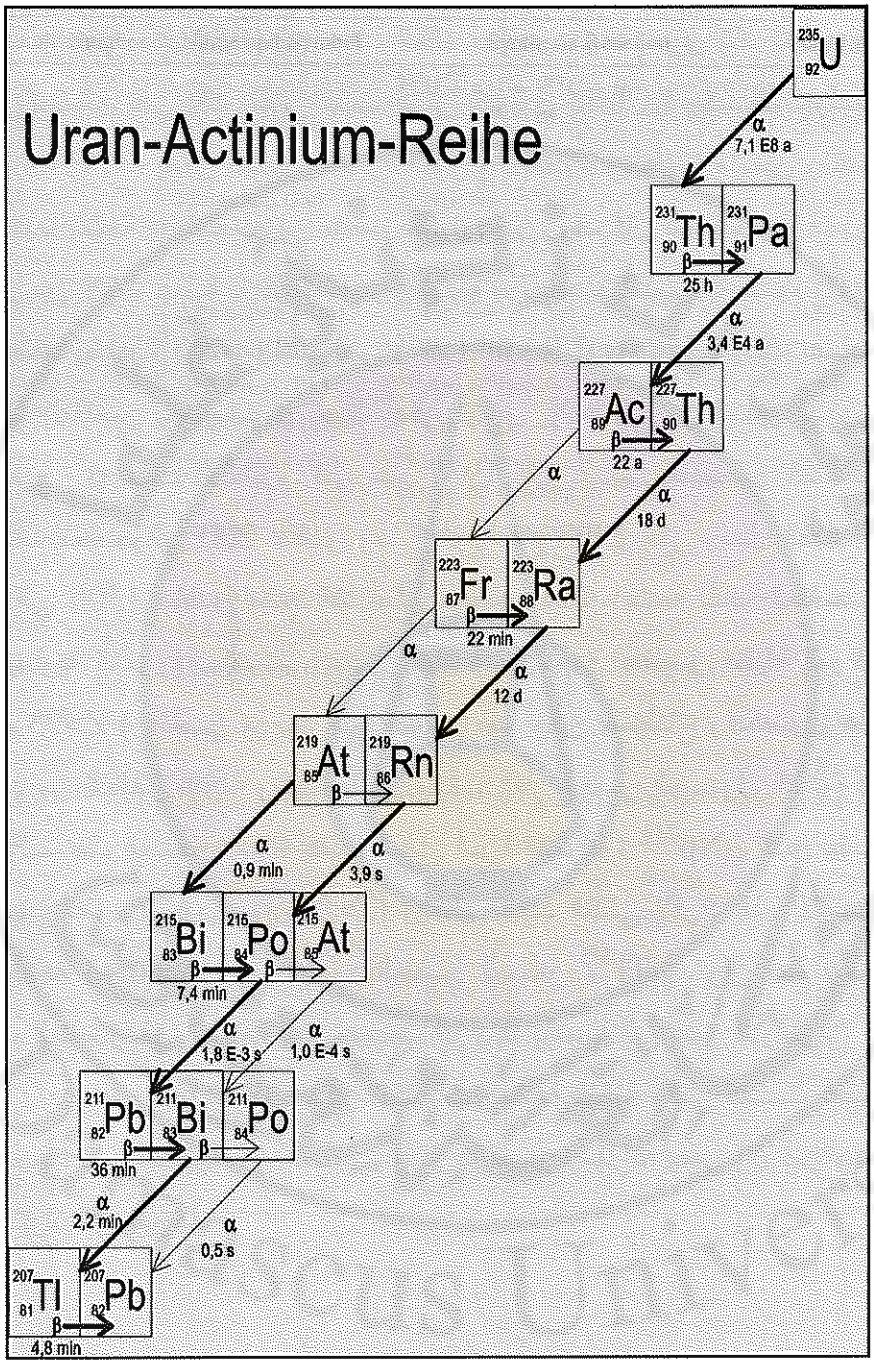
سلالة اليورانيوم (A=4n+2)



سلالة الثوريوم (A=4n)



سلالة الأكتينيوم (A=4n+3)



7-3- العناصر المشعة الصنعية:

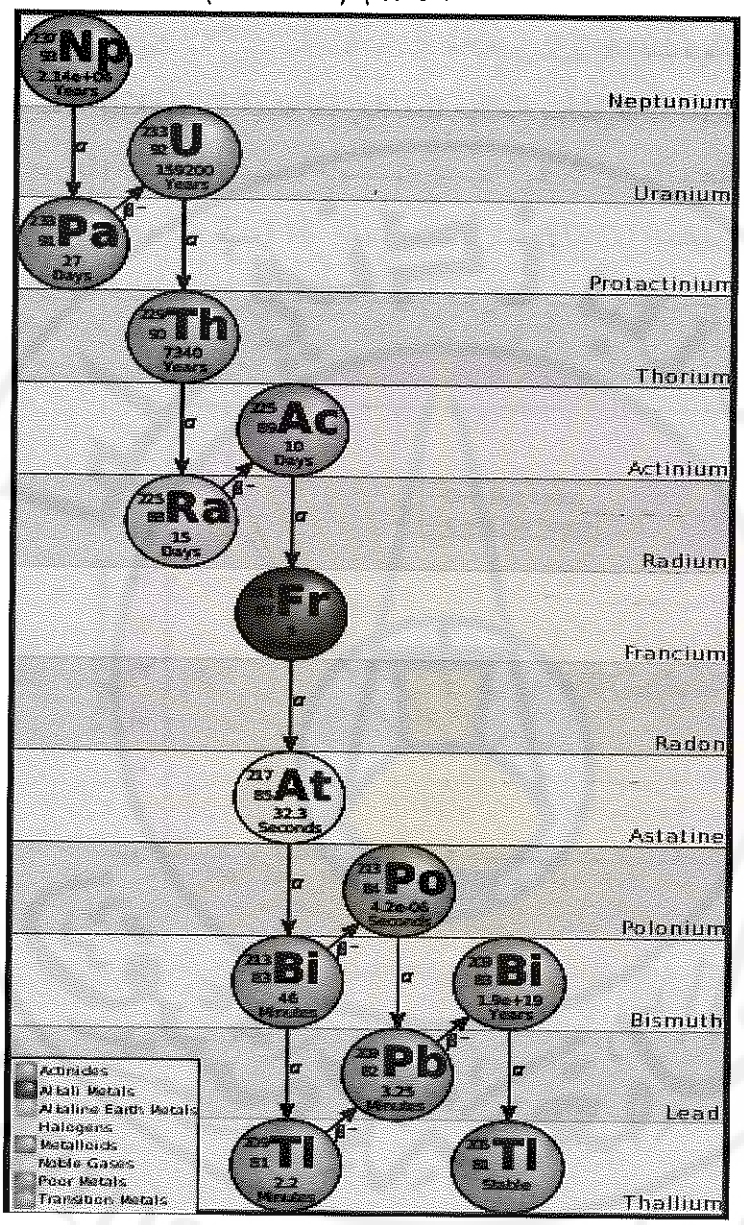
حتى عام 1934 لم يعرف العالم عناصر مشعة سوى تلك المتوفرة في الطبيعة. ففي ذلك العام أعلنت إيرين كيوري I.Curie وكذلك جوليو F.Joliot بأنه يمكن تنشيط عنصرا البور والألمنيوم وجعلهما مشعين وذلك بقذفهما بأشعة α المنبعثة من عنصر البولونيوم . وقد كان العالم رذرفورد أول من لاحظ عملية توالد العناصر المشعة من بعضها صنعياً عام 1910 وسمّاها بظاهرة الإشعاع المحرّض (Induced Radiation) وذلك عندما قذف العناصر بجسيمات α. حيث أمكن انتاج N^{13} المشع من قذف البور، وإنتاج p^{30} بقذف الألمنيوم. ففي عام 1937 كان عدد العناصر المشعة المصطنعة حوالي 200 عنصر وما إن حل عام 1963 حتى وصل العدد إلى حوالي 1300 عنصر مشع. فقد أمكن تحضير نظائر مشعة لكافة العناصر الكيماوية المعروفة باستثناء عنصر الهليوم. وبالنسبة للعناصر الثقيلة الموافقة لـ $Z>93$ (عناصر ما بعد اليورانيوم) فقد أمكن اصطناع والحصول على عدد من النظائر الثقيلة ووضعها في مكانها الفارغ في الجدول الدوري، وتُؤلف هذه العناصر أسرة جديدة تسمى أسرة النبتونيوم $_{93}Np^{237}$ الذي يبلغ نصف عمره (مليون سنة $T=2,2$) ويعطى العدد الكتلي لأفراد هذه الأسرة بالعلاقة $A=4n+1$ وهي تنتهي بالعنصر المستقر $_{81}Tl^{205}$. وإن عدم وجود هذه العناصر في الطبيعة يفسر بصغر أدوارها بالنسبة إلى عمر الأرض.

وعلى سبيل المثال نذكر النكليدات المشعة التالية والتي كانت غير موجودة في الطبيعة لأن أنصاف أعمارها قصيرة مقارنة بعمر الأرض وهي لا تتولد من غيرها.

النكليد	الدور
$_{43}Tc^{99}$	$2,2 \times 10^{5}$ سنة
$_{61}Pm^{145}$	حوالي 30 سنة
$_{85}At^{210}$	8,3 ساعة
$_{87}Fr^{223}$	22 دقيقة

Damascus University

سلالة النبتونيوم (A=4n+1)



الفصل الثامن

التفاعلات النووية

8-1- مقدمة:

إنّ التفاعل النووي هو عملية تفاعل نواة لعنصر ما أو جسيم أو فوتون مع نواة ذرة أخرى في فترة زمنية قصيرة جداً تقارب 10^{-12} من الثانية وأقل من ذلك لإنتاج نواة جديدة وجسيمات أخرى مع بقاء قانون انحفاظ الشحنة والكتلة والطاقة ساري المفعول. وقد كان العالم رذرفورد أول من لاحظ التفاعلات النووية عند ما قذف نوى ذرات الآزوت بجسيمات α المنبعثة من البولونيوم وحصل بنتيجة ذلك على نوى ذرات الأوكسجين $_8O^{17}$ بالإضافة إلى البروتونات.

$$_7N^{14} + _2He^4 \rightarrow _8O^{17} + _1P^1 + Q \text{ (طاقة)}$$

حيث Q=-1.19Mev وبالتالي فالتفاعل ماص للطاقة. وقد كان هذا التفاعل أول برهان تجريبي على وجود البروتونات الموجبة داخل النواة .

وكذلك تفاعل نوى ذرات الهليوم مع نواة ذرة الألمنيوم:

$$_{13}Al^{27} + _2He^4 \rightarrow _{15}P^{30} + _0n^1 + Q$$

Q : ممكن أن تكون موجبة أو سالبة

يُرمز لمثل هذه التفاعلات عادة بالرمز $Al^{27}(\alpha,n)p^{30}$

وبشكل عام نكتب $a + _zX^A \rightarrow _{\acute{z}}Y^{\acute{A}}$

$$X^A(a,b)Y^{\acute{A}}$$

ولقد دُرس أكثر من عشرة آلاف تفاعل نووي بعد اكتشاف رذرفورد له .

إن التفاعلات النووية تشبه التفاعلات الكيماوية من حيث انحفاظ الطاقة والشحنة والاندفاع والكتلة ولكن تختلف عنها في كون التفاعلات

الكيماوية تجري بمقادير كبيرة جداً مقارنة بالتفاعلات النووية. كما أن احتمال حدوث التفاعل النووي ضئيل جداً مقارنة بالتفاعل الكيماوي بسبب صغر حجم النوى واحتمال اصطدام بعضها ببعض . وهنا نميز عدة أنـــواع للتفـــاعلات النووية.

8-2- أنواع التفاعلات النووية:

8-2-1- التفاعل (a,a): إنه يصف تبعثر الجسيمات a وهنا نميز حالتين:

التبعثر المرن :

حيث يتفاعل الجسيم a مع حقل النواة الكهربائي فقط ويبقـــى تركيـــب النواة دون تغير ولا يحدث إلاَّ توزع جديد للطاقة الحركية بين الجسيم والنواة.

التبعثر غير المرن :

حيث تحدث فيه إثارة للنواة المقذوفة بجسيم a من دون تغييـــر فـــي تركيبها حيث يذهب قسم من الطاقة الحركية للجسيم لإثارة النواة . ويصاحب عملية التبعثر غير المرن انبعاث لأشعة γ من النواة المثارة.

8-2-2- التفاعل (a,b): حيث يُمتص الجسيم a من قبل النـــواة وينبعـــث عوضاً عنه الجسيم b فيتغير بذلك تركيب النواة.

8-2-3- التفاعل (a,γ): تفاعل الأسر الإشعاعي للجسيم a حيـــث يحـــدث امتصاص الجسيم وانبعاث كوانتات γ في الوقت نفسه.

8-2-4- التفاعل (γ,b): تفاعل الأثر الفوتوني النووي حيث تُمتص أشعة γ وينبعث جسيم b من النواة نتيجة إثارتها.

والجدول التالي يعطي فكرة عامة عن النكليد الجديد الذي نحصل عليه عبر التفاعلات النووية.

		α,2n	α,n	
P,2n	P,n d,2n	α , t P,γ d , n	t,n	α,p
	d,t n,2n γ,n p,pn	النكليد (النواة الهدف)	d,p n,γ t,d	t,p
P, α	d, α	N,d γ,p	n,p d,z	
	n, α			

Z=p ↑

→ A – Z = N

أمثلة :

$_7N^{14} + _2He^4 \rightarrow (_9F^{18}) \rightarrow _8O^{17} + _1H^1$

$_7N^{14}$ (α,p) $_8O^{17}$ الاختصار هو

$_4Be^9 + _2He^4 \rightarrow (_6C^{13}) \rightarrow _6C^{12} + _0n^1$

Be^9 (α, n) C^{12} والاختصار هو

وقد كان هذا التفاعل الذي أجراه شادويك (1932) بداية الطريق لاكتشاف النترون .

$_5B^{11} + _1H^1 \rightarrow (_6C^{12}) \rightarrow _6C^{11} + _0n^1$

B^{11} (p, n) C^{11}

$_1H^2 + _1H^2 \rightarrow _1H^3 + _1H^1$

d (d,p) t

Be^9 (α, n) C^{12} وكذلك

8-4-2- التفاعل النووي المصحوب بإصدار جسيمات مشحونة:

في هذه التفاعلات ينطلق جسيم مشحون كالبروتون أو الديتون أو جسيم α من النواة المركبة وهنا يجب أن تكون طاقة الجسيم كبيرة حتى يستطيع الجسيم تخطي الحاجز الكموني .

إن احتمال خروج الجسيمات المشحونة من النواة المركبة يزداد كلما ازدادت طاقة إثارة النواة المركبة وصغر عدد جسيماتها. فعند دخول نترون بطاقة عالية إلى نواة عنصر ما تنبعث غالباً جسيمات مشحونة.

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}{}^{*}X^{A+1} \rightarrow {}_{Z-1}Y^{A} + {}_{1}H^{1}$$

$$_{Z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{Z}{}^{*}X^{A+1} \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-3} + {}_{2}He^{4}$$

هذه التفاعلات تحدث أيضاً عند قذف النوى الخفيفة بنترونات ذات طاقة حركية صغيرة ، أما في حالة قذف النوى الثقيلة بالنترونات ذات الطاقة الحركية الصغيرة فإن احتمال تجمع طاقة كبيرة كافية لاجتياز حاجز الكمون لدى الجسيم المشحون يكون صغيراً وبالتالي ستتخلص النواة المركبة من طاقة إثارتها بإطلاق كوانتات γ.

8-4-3- التفاعل النووي المصحوب بإصدار النترونات:

إنَّ خروج النترونات من النواة المثارة لا يتطلب طاقةً كبيرةً كما في حالة الجسيمات المشحونة وذلك لانعدام الحاجز الكموني أمام النترونات. ففي النوى المتوسطة الكتلة والتي تكون طاقة إثارتها غير مرتفعة يكون التحلل الذي تعانية النواة المركبة هو خروج كوانتات γ وكذلك النترون, فإذا كانت النواة المركبة قد تشكلت نتيجة أسر نترون, فإن تركيبها بعد خروج النترون لن يتغير، وهذا ما يسمى عادةً بالتبعثر المرن للنترونات. أما إذا كانت طاقة الجسيم الداخل إلى النواة كبيرة فإن النواة تسخن إلى درجة حرارة عالية

بحيث يخرج منها عدة جسيمات. فمثلاً عند قذف ذرات عنصر الفضة بجسيمات α ذات الطاقة 15Mev فإنه ينبعث نترونين من النواة المركبة ، أما إذا بلغت طاقة جسيمات α 23Mev فينبعث عندئذ ثلاثة نترونات.

وكمثال على ذلك استخدام الديتونات ذات الطاقة (20-40)Mev في قذف النوى .

$$_{57}La^{139} + {}_1D^2 \rightarrow {}_{58}{}^{*}Ce^{141} \rightarrow {}_{58}Ce^{137} + 4\,{}_0n^1$$

$$_{51}Sb^{121} + {}_1D^2 \rightarrow {}_{52}{}^{*}Te^{123} \rightarrow {}_{52}Te^{119} + 4\,{}_0n^1$$

أما إذا بلغت طاقة الديتونات 50 Mev فإنه يصدر خمس نترونات

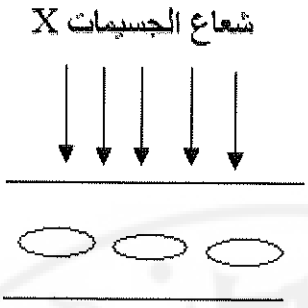
$$_{51}Sb^{121} + {}_1D^2 \rightarrow {}_{52}{}^{*}Te^{123} \rightarrow {}_{52}Te^{118} + 5\,{}_0n^1$$

8-5- المقطع العرضي للتفاعل النووي σ:

إنَّ المقطع العرضي للتفاعل σ مقدار هام جداً ، فعند معرفته ومعرفة كثافة تدفق الجسيمات Φ يمكن التنبؤ مسبقاً بكيفية جريان التفاعلات النووية.

إن التحديد التجريبي لقيمة المقطع العرضي للتفاعل النووي يتم عبر قياس مردود التفاعل النووي كتابع لطاقة الجسيمات المستخدمة كقذائف في هذا التفاعل . وبشكل خاص فقد تم اختبار ودراسة المقاطع العرضية من أجل النترونات ذات الطاقات المختلفة كقذائف.

وللزيادة في الإيضاح يمكن للمرء أن يتصور المقطع العرضي للتفاعل كالتالي: إن شعاع الجسيمات X ذو كثافة التدفق المحددة Φ يصطدم بالجسم الهدف (تارغت Target) الذي يحتوي على ذرات النكليد A المتوزعة على شكل صفائح رقيقة جداً على سطح الجسم الحامل لها. فكلما كانت الذرات الهدف هذه كبيرة كبر احتمال التصادم مع جسيمات الأشعة القادمة إليها كما في الشكل(31).



الشكل(31)

ويُقاس عادة المقطع العرضي للتفاعل النووي بواحدة تدعى البارن .

حيث $1\text{barn}\ (1\text{b}) = 10^{-24}\text{cm}^2$

وذلك لأن نصف قطر النوى الذرية هو من مرتبة 10^{-12} cm وبالتالي يكون مقطعها من مرتبة 10^{-24}cm^2 .

علاوةً على ذلك فإنه يمكن للمرء أن يجد قيم مختلفة للمقطع العرضي σ للنكليد الواحد نفسه الذي يدخل تفاعلات نووية مختلفة. ويُرمز عادة للمقطع العرضي للنكليد A مثلاً برموز مختلفة وذلك بحسب طاقة القذائف التي يواجهها .

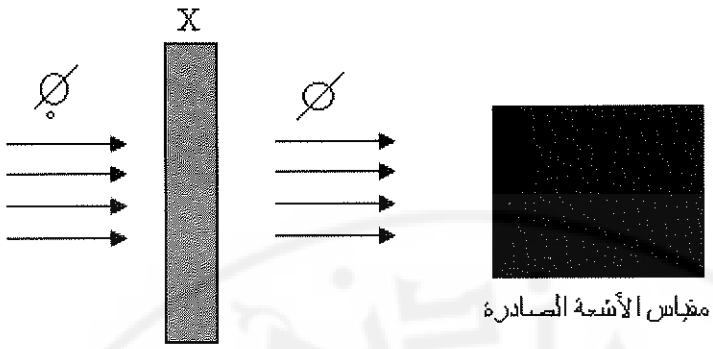
ففي حالة امتصاص (أو اصطياد) القذائف يكون σ_a^A

وفي الانتثار والتبعثر يكون σ_s^A

ويرمز للمقطع الكلي σ_t^A

حيث $\sigma_t^A = \sum \sigma_i^A$

وهو يمكن تحديده ببساطة عبر ملاحظة الرسم التمثيلي في الشكل(32).



الشكل(32)

عبر ملاحظة النقصان الذي يطرأ على كثافة التدفق Φ للإشعاع يمكن معرفة وقياس المقطع العرضي الكلي للنكليد. فعند عبور الإشعاع لطبقة رقيقة جداً من التارغت ذات السماكة dx تتغير كثافة التدفق للجسيمات التي يحملها الإشعاع بالمقدار $-d\Phi = \sigma_t^A \Phi N_A dx$

N_A : عدد ذرات النكليد A في $1cm^3$

وإن تكامل العلاقة السابقة يُعطي $-\sigma_t^A N_A X$

$$\Phi = \Phi_0 . e$$

وذلك عند افتراض تغير σ_t^A مهملاً داخل التارغت ومنه نجد:

$$\sigma_t^A = \frac{\ln (\Phi_0/\Phi)}{N_A . x}$$

أما في حالة احتواء التارغت على نكليدات أخرى إلى جانب النكليد A وقادرة على التفاعل مع القذائف المستخدمة عندئذٍ تُستخدم العلاقة العامة .

$$-d\Phi = \Phi \sum \sigma_t^j . N_j dx$$

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل التاسع

قوانين الانحفاظ في التفاعلات النووية

9-1- قانون انحفاظ الطاقة:

ينصُّ هذا القانون على أنَّ الطاقة الكلية للجسيمات أو النوى قبل التفاعل تساوي الطاقة الكلية للجسيمات أو النوى الناشئة بعد التفاعل .

$$ {}_{Z}X^{A}\ (a,b)\ {}_{Z'}Y^{A'} $$

أي $(M + m_a)\,C^2 + E + E_a = (M` + m_b)\,C^2 + E` + E_b$

M : كتلة النواة السكونية ، E طاقتها الحركية

m_a : كتلة الجسيم السكونية ، E_a طاقته الحركية

$M`$ : كتلة النواة الناشئة السكونية ، $E`$ طاقتها الحركية

m_b : كتلة الجسيم الناشئ السكونية ، E_b طاقته الحركية

$$(M + m_a - M - m_b)\,C^2 = E` + E_b - (E + E_a)$$

تغير الطاقة الحركية فرق الطاقة السكونية

ومنه تكون طاقة التفاعل $Q = \Delta M\,C^2 = E` + E_b - (E + E_a)$

وبدلالة الكتل الذرية عوضاً عن الكتل النووية تكون ΔM

$$\Delta M = M - M` + m_a - m_b - (Z - Z`)\,m_e$$

وإذا عبرنا عن كتل النكليدات بواحدة الكتل الذرية u يكون

$$Q = 931{,}5.\Delta m\ (mev)$$

وبما أن النواة الأصلية الهدف تكون عادة ساكنة في المختبر فإن $E = 0$

$$Q = E` + E_b - E_a$$

أو بدلالة الكتل نكتب $Q = [M + m_a - (M` + m_b)]\,C^2$ (*)

1) $Q > o$ أي $M + m_a > M` + m_b$ أي $E_a < E` + E_b$

وبالتالي التفاعل ناشر للطاقة.

2) $Q < o$ أي $M + m_a < M` + m_b$ $\qquad E_a > E` + E_b$ أي

وبالتالي التفاعل ماص للطاقة .

يمكن التأكد تجريبياً من العلاقة (*) التي تمثل قانون انحفاظ الطاقة وذلك عبر قياس كتل كافة الجسيمات الداخلة في التفاعل والخارجة عنه بمطياف الكتلة كما يمكن حساب طاقة التفاعل Q من معرفة الطاقة الحركية E_a للجسيم الوارد وقياس الطاقتين الحركيتين لناتج التفاعل . وقد قيست كتلة النترون باستخدام قانون انحفاظ الطاقة حيث لا يمكن قياسها بمطياف الكتلة لاعتداله كهربائياً .

9-2- قانون انحفاظ الاندفاع:

الذي ينص على أن الاندفاع الكلي للجسيمات قبل التفاعل يساوي الاندفاع الكلي للجسيمات الناتجة من التفاعل .

أي $\overrightarrow{P_1} + \overrightarrow{P_2} = \overrightarrow{P_3} + \overrightarrow{P_4}$

ولما كانت النواة الهدف ساكنة كان $\overrightarrow{P_2} = o$ أي

$$\overrightarrow{P_1} = \overrightarrow{P_3} + \overrightarrow{P_4} \qquad (1)$$

ويمكن تجريبياً قياس القيم المطلقة لاندفاع الجسيمات بواسطة المطياف المغناطيسي أو عن طريق قياس طاقة الجسيمات لأن الطاقة والاندفاع يرتبطان بالعلاقة .

$$E = \frac{P^2}{2m}$$

ماذا يُستفاد من قانون انحفاظ الاندفاع ؟

يُستفاد منه في بيان إسهام الطاقة الحركية للجسيم في طاقة الإثارة وكذلك في حساب طاقة عتبة التفاعل الماص للطاقة.

من (1) نجد

$$(2)\quad m_a V_a = (m_a + M)V_n \rightarrow V^2_n = \frac{m^2_a V^2_a}{(ma + M)^2}$$

سرعة النواة المركبة اندفاع النواة المركبة اندفاع الجسيم

وإن الطاقة الحركية للنواة المركبة هي

$$(3)\quad E_n = \tfrac{1}{2}(m_a + M)V^2_n$$

$$E_n = E_a \frac{m_a}{m_a + M} \longleftarrow E_a = \tfrac{1}{2} m_a V^2_a$$ وبما أن

ولما كان جزءٌ من الطاقة الحركية للجسيم يتحول إلى طاقة إثارة تُحتفظ في النواة المركبة وتساوي

$$E^* = E_a - E_n$$

طاقة إثارة النواة المركبة طاقةحركية للجسيم طاقةحركية للنواة المركبة

ومنه بالتعويض

$$(4)\quad E^* = E_a - E_n = E_a \frac{M}{m_a + M}$$

ففي التفاعلات الماصة للطاقة تكون طاقة العتبة أكبر من طاقة التفاعل $|Q|$, إذ يجب في هذه التفاعلات أن تكون E^* مساوية $|Q|$ على الأقل أي

$$E^* = |Q|$$

فإنه باستخدام العلاقة (4) نجد قيمة طاقة العتبة للتفاعل

$$(5)\ E_{th} = E_a = |Q| \frac{m_a + M}{M} = |Q|\left(1 + \frac{m_a}{M}\right)$$

مثال :

احسب طاقة العتبة للتفاعل . ${}_4Be^9(p,n){}_5B^9$

$M(Be^9) = 9,0122u$, $M(B^9) = 9,0133u$

$m_p = 1,0073u$, $m_n = 1,0087u$

$\Delta M = 9,0122 + 1,0073 - (9,0133 + 1,0087) = -2,5.10^{-3}\ u$

وتكون طاقة التفاعل . $Q = 931,5.\Delta M = -2,328\ Mev$

وتكون طاقة العتبة للبروتون

$$E_{th} = \frac{9+1}{9} x\ 2,328 \approx 2,58\ Mev$$

9-3- قانون انحفاظ عزم الاندفاع (الاندفاع الزاوي):

يبقى الاندفاع الزاوي في التفاعلات النووية محفوظاً، وإن الاندفاع الزاوي للنواة المركبة الناتجة يكون مساوياً لإحدى القيم الممكنة للعزم الزاوي المحصول عليه من جمع العزم الزاوي للجسيمات إلى العزم الزاوي لحركتها النسبية.

فالعزم الزاوي المداري للنواة الهدف يأخذ القيم $\ell.h/2\pi$ حيث ℓ عدد صحيح أو معدوم. فإذا كان للجسيم الوارد (كالنترون أو البروتون) سبين يساوي ½± فإن العزم الزاوي الكلي للنواة المركبة سيكون $(\ell \pm ½)h/2\pi$ وإن العزم الزاوي المداري هو بالتعريف r x p حيث :

P : كمية حركة الجسيم الوارد.

r : بعده عن النواة.

فلو صدم جسيم ما نواة الهدف في مكان ما حيث (ℓ=3) مثلاً فقد تدور النواة الهدف عندئذ حول محور بعزم زاوي $\overrightarrow{D}$ طوله $3h/2\pi$ ويعامد مسار الجسيم الوارد. وبشكل عام تُطلق النواة المركبة بعد الصدم مباشرة جسيمات وأشعة حيث يمكن لهذه الجسيمات و الأشعة أن تحمل جزءً من العزم الزاوي.

9-4- قانون انحفاظ الشحنة:

حيث يبقى المجموع الجبري للشحنات قبل التفاعل وبعده متساوياً.

9-5- قانون انحفاظ عدد النيكلونات:

حيث يبقى عدد النيكلونات في التفاعلات النووية محفوظاً.

Damascus University

وقل رب زدني علما
Damascus University

الفصل العاشر

التفاعل النووي المتسلسل

(الانشطار والاندماج النووي)

10-1- مقدمة:

يُعدُّ تفاعل النترونات مع النوى من أهم التفاعلات النووية نظراً لسهولة التفاعل ومقدرة النترون العبور إلى النواة مهما كانت طاقته. فإذا ما عبر نترون إلى نوى النظائر الخفيفة أدى ذلك غالباً إلى خروج جسيمات مشحونة مثال : $_{12}Mg^{24} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{11}Na^{24} + {}_1H^1$

فكلما زادت طاقة النترونات العابرة ازداد احتمال حدوث هذا التفاعل. كما يمكن أن يحصل إلى جانب ذلك تفاعلات أسر كما في المثال.

$_{13}Al^{27} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{13}Al^{28} + \gamma$

وتجدر الملاحظة إلى كون النوى الناتجة المتشكلة عبر تفاعل نتروني هي نوى نشطة إشعاعياً مثل (Na^{24},Al^{28}..) وبالتالي نخلص إلى القول إنه يُستفاد من التفاعلات النترونية في الحصول على النظائر المشعة المختلفة. وغالباً ما تعاني النوى المتشكلة نتيجة تفاعل الأسر النتروني تحولاً β^- (بسبب الفائض النتروني).

أما في النوى المتوسطة فتتنافس تفاعلات الأسر وعملية التبعثر اللامرن للنترون التي تتم وفق المخطط العام.

$zX^A + {}_0n^1 \rightarrow z'X^A + {}_0n^1$ (تفاعل تبعثر نتروني)

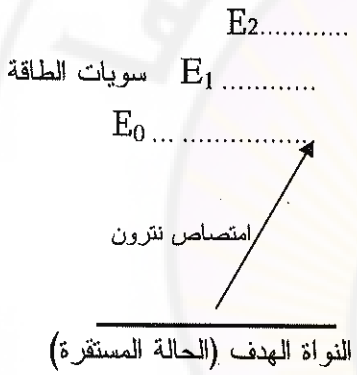
حيث إنَّ النترون الصادر تكون طاقته مختلفة عن طاقة النترون الوارد, وإن النواة الناتجة المثارة تتخلص من طاقة إثارتها عبر خروج كوانتات γ. وبما

أن للنترون خصائص موجية تحكمه, فإن هذه الخصائص هي التي تحدد دخول النترون إلى النواة. فالنترونات ذات الطول الموجي المعين وبالتالي ذات الطاقة المحددة هي التي تدخل وتشكل النواة المركبة بفعالية أكبر (ظواهر تجاوبية) وإن احتمال تشكل نواة مركبة في تفاعل نتروني يعطى بالشرط التالي . $E_s + m_n c^2 + Mc^2 = E^i_s$

E_s : الطاقة الحركية للنترون m_n : كتلته

M_i : كتلة النواة الهدف

E_s^i : إحدى الحالات الطاقية للنواة المركبة



لقد مُثلت النتائج التجريبية المحصول عليها بيانياً وهي تبين تبعية مقطع تفاعل أسر نوى U^{238} للنترونات بالنسبة لطاقة النترونات وقد وجد أن المقطع العرضي للتفاعل يأخذ قيمة عظمى عندما تكون طاقة النترونات مساوية 6,75ev.

إن المقطع العرضي للتفاعل النووي $X + a \rightarrow Y + b$

يُعطى بالعلاقة الرياضية المسماة بعلاقة برايت وفنكر

$$\sigma_{ab} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{T_a T_b}{(E-E_r)^2 + T^2/4}$$

حيث

E: الطاقة الكلية للنترون (الحركية والكامنة)

E_r : مقدار الطاقة اللازمة للامتصاص التجاوبي

λ: طول موجة النترون وهو يساوي

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

T_a و T_b: هما العرضان الجزئيان لسويات الطاقة في النواة المركبة أي احتمال انبعاث الدقيقتين a , b من النواة المركبة من مستوى كم معين.

T : العرض الكلي للسوية (مجموع العروض الجزئية)

فعندما $E=E_r$ أي الطاقة الكلية للنترون = طاقة الامتصاص التجاوبي للنترون فإن σ_{ab} تأخذ قيمة أعظمية، وعندما تنقص طاقة النترون يزداد طول موجته فيزداد σ_{ab}, ومنه نستنتج أن النترونات البطيئة أكثر فعالية في تحقيق التفاعلات النووية وهي أكثر فعالية في النفوذ إلى النوى من النترونات السريعة. لذلك كثيراً ما يُلجأ إلى تهدئة النترونات بجعلها تتصادم تصادماً مرناً مع الذرات فتخسر جزءاً من طاقتها الحركية, وخير وسيلة لإجراء مثل هذه التصادمات هواستخدام النوى الخفيفة مثل الهدروجين (مركبات البرافينات الحاوية على عدد كبير من ذرات الهدروجين) وعن طريق هذه التصادمات تصبح الطاقة الحركية للنترونات من مرتبة طاقة الحركة الحرارية ولذلك غالباً ما تسمى بالنترونات الحرارية وهي على درجة عالية من الأهمية في إحداث الانشطار النووي كما سنرى لاحقاً.

10-2- المنابع الرئيسية للنترونات:

10-2-1- المنابع المشعة:

تُعدُّ التفاعلات النووية من بين المصادر المهمة للنترونات المستخدمة في إجراء التفاعلات النووية في المختبرات .

فلو مُزجت النظائر المشعة الطبيعية أو الصنعية التي تطلق أشعة α وγ مع عناصر خفيفة مزجاً جيداً لحصلنا على مصدر للنترونات . ومن جهة أخرى يمكن بإحاطة أحد منابع أشعة غاما بعنصر خفيف كالبريليوم أو الماء الثقيل (الماء الديتريومي) أن نحصل على منبع مناسب للنترونات أيضاً. وذلك لأن قيمة طاقة العتبة للبريليوم والديتريوم تقل من 5Mev للتفاعل (γ,n) والجدول(2) يُعطي نماذج عن بعض هذه التفاعلات .

جدول(2): بعض نماذج التفاعلات النووية المصدرة للنترونات

المنبع	التفاعل	Q (Mev)	طاقة النترون (Mev)	عدد النترونات لكل 10^6 تفكك
Be + Ra	$Be^9(\alpha,n)C^{12}$	5,65	13	460
Be + Ra	$Be^{11}(\alpha,n)N^{14}$	0,28	6	180
Be + Pu^{239}	$Be^9(\alpha,n)C^{12}$	5,65	11	60
Be + Na^{24}	$Be^9(\gamma,n)Be^8$	1,67-	0,8	3,8
D_2O+ Na^{24}	$H^2(\gamma,n)H^1$	2,23-	0,2	7,8

كما أن عملية الانشطار النووي يعد مصدراً للنترونات أيضاً ويُعد نظير الكاليفورنيوم-252 مثالاً مهماً على ذلك حيث يبلغ نصف عمره 2,55 سنة ويتفكك بنسبة 96,6 % بجسيمات α وبنسبة 3,4 % بالانشطار التلقائي حيث يُطلق 3,5 نترون لكل انشطار أي يطلق حوالي 10^6x2,4 نترون/ مايكروغرام/ثانية.

10-2-2- المُسرّعات:

يمكن الحصول على مردود جيد من النترونات باستخدام المسرِّعات الأيونية. فعبر التفاعل $H^2(d,n)He^3$ يمكن الحصول على النترونات, حيث إن الديترونات المسرّعة إلى طاقة 1Mev والتي تسقط على هدف سميك من D_2O في المسرِّع تُنتج حوالي 80 نترون لكل 10^7 ديترون. وإن النترونات المتولدة بهذه الطريقة تكون أحادية الطاقة فيما لو كانت الديترونات المسرّعة أحادية الطاقة .

وكذلك التفاعل النووي $H^3(d,n)He^4$ للحصول على النترونات باستخدام المسرِّعات لتسريع الديتريوم ويُعدُّ هذا التفاعل ناشر للطاقة حيث تبلغ Q=17,6 وتكون طاقة النترونات الناتجة عبر هذا التفاعل مرتفعة وتبلغ 14Mev .

كما تستخدم الأشعة السينية المتولدة بواسطة المُولِّدات الكهروستاتية مثل مسرعات البيتاترون (Betatrons) كقذيفة لإنتاج النترونات في التفاعلات النووية التالية وغيرها $Be^9(\gamma,n)Be^8$ و $H^2(\gamma,n)H^1$.

وإن النترونات الناتجة عبر هذه الطريقة هي نترونات سريعة.

10-2-3- المفاعلات النووية:

تُعدُّ المفاعلات النووية من أفضل منابع النترونات ، والمفاعل النووي عبارة عن جهاز يحوي مادةً قابلةً للانشطار مثل U^{235} أو U^{233} أو Pu^{239}. ويجري تنظيم عمل المفاعل عبر التحكم بالتفاعل النووي المتسلسل الذي يحدث في داخله.

إنَّ السيل النتروني المتولد في المفاعل يُعدُّ من أهم عناصر التفاعلات النووية لأن مردود التفاعل يزداد كلما ازدادت غزارة السيل النتروني. والجدول التالي يوضح منابع النترونات وغزارة السيل النتروني فيها .

المنبع	غزارة سيل النترونات الحرارية /Cm^2/ ثانية
Ra + Be	10^5 x 1
Po + Be	10^4 x 2
مُولِّدة فان دي غراف (d بشدة 1Mev على Be)	10^7 x 1
المسرِّع الرحوي (d بشدة 14Mev على Be)	10^9 x 3
مفاعل بركة السباحة	10^{13} x 2
مفاعل فحص المواد MTR	10^{14} x 7

10-3- المبادئ الأساسية للتفاعل النووي المتسلسل:

إنَّ العامل الرئيس في حدوث واستمرار التفاعل النووي المتسلسل ينحصر في خروج عدد من النترونات من ذرة الوقود النووي التي امتصت نتروناً واحداً. وإن كل نترون ناتج يمكن أن يُمتص من قبل ذرة وقود نووي أخرى مؤدياً إلى شطرها وتوليد مزيد من النترونات وبهذه الصورة يستمر حدوث التفاعل المتسلسل وإن عامل التكاثر المهم يُعطى بالعلاقة التالية:

$$K = \frac{\text{عدد النترونات المتولدة}}{\text{عدد النترونات المفقودة}}$$

فعندما تكون $K<1$ فإن التفاعل المتسلسل غير قابل للحدوث

وعندما تكون K>1 فإن التفاعل المتسلسل يستمر بسبب ازدياد معدل الانشطار (الحالة فوق الحرجة)

وإذا كان K=1 فإن التفاعل المتسلسل يستمر بمعدل ثابت (الحالة الحرجة).

ولما كان كل نترون بطيء يسبب انشطاراً واحداً, فإن معدل ازدياد النترونات يكون بالمقدار K-1 لكل عملية, وبالتالي يكون معدل التغير في عدد النترونات في التفاعل المتسلسل على النحو التالي:

$$dN/dt = N(K-1)/\tau$$

حيث N: عدد النترونات الثانوية

τ: متوسط الزمن الفاصل بين عمليتين لانبعاث النترونات المتعاقبة

وبالتكامل نجد:

$$N=N_0e^{(K-1)t/\tau}$$

حيث N_0: عدد النترونات عندما t=0

في حالة عدم استعمال مهدئ (Moderator) بحيث تحدث عملية الانشطار بواسطة النترونات السريعة تصبح K>1 بصورة مفاجئة مما يؤدي إلى حدوث التفاعل المتسلسل بصورة سريعة جداً وينتج عن ذلك انفجار هائل كما هو الحال في القنابل النووية الانشطارية. إن عملية السيطرة على التفاعل المتسلسل في المفاعل تتم بواسطة إدخال قضبان إلى قلب المفاعل وهي حاوية على عناصر ذات قدرة عالية على امتصاص النترونات مثل الكادميوم, وإن السيطرة على التفاعل المتسلسل تصبح صعبة عندما تكون الفترة الزمنية τ قصيرة جداً. من أجل ذلك تصمم المفاعلات عادةً بحيث تكون قيمة K أكبر من واحد بقليل أي 1,01 أو 1,02 , فإذا مابدأ التفاعل بمئة نترون مثلاً فسوف يتولد 101=1,01 x 100 نترون في العملية الأولى و 102,01 نترون في العملية الثانية وهكذا.

إنَّ النترونات المتولِّدة في قلب المفاعل يمكن أن تتبدد وفق طرائق مختلفة, فلو استعرضنا مثلاً الحالة التي يكون فيها عامل التكاثر K=1 وإذا فرضنا أنه في كل حالة انشطار يتولد حوالي 2,5 نترون وأن عدد الانشطارات يساوي 100 في فترة زمنية معينة عندئذ يمكن تصور العمليات الحاصلة على النترونـــات على النحو التالي:

100 نترون بطيء يُمتص من قبل U^{235} لينشطر معطياً 250 نتروناً

250 نتروناً سريعاً تتولد في قلب المفاعل

20 نتروناً سريعاً تفلت (تتسرب) من قلب المفاعل

90 نتروناً سريعاً تمتص من قبل U^{238} دون انشطار

140 نتروناً سريعاً تأخذ بالتباطؤ

10 نترونات بطيئة تفلت من قلب المفاعل

130 نتروناً بطيئاً تمتص في قلب المفاعل

30 نتروناً تمتص من قبل U^{235} (بدون انشطار) والمهدئ والمبرد

100 نتروناً بطيئاً تمتص من قبل U^{235} محدثة انشطاراً

وبهذه الصورة تبدأ سلسلة الانشطارات من جديد .

إذاً من أجل الإبقاء على التفاعل النووي المتسلسل مستمراً يجب تهدئة النترونات الثانوية وتحويلها إلى نترونات حرارية بطيئة ومن أجل ذلك تمزج عادةً المادة الانشطارية في المفاعل مع مادة مبطئة للنترونات ويمكن التعبيـــر رياضياً عن معامل التكاثر لهذا المزيج الناتج بالعلاقة التاليـــة التـــي تـــسمى صيغة المضاريب الأربعة $K = \varepsilon\eta\rho f$

حيث تمثل K: معامل التكاثر

η : عدد النترونات الثانوية المتولدة نتيجة ولوج نترون حراري واحد إلى نواة المادة الانشطارية.

أما المضروب ρ : فهو يشير إلى أن جزءاً فقط من النترونات الثانوية يتحول إلى حراري . أي هو احتمال تحول النترونات الثانوية إلى حرارية, حيث يمكن أن تقع هذه النترونات في أسر نوى المادة المهدئة والمواد الأخرى ويمكن لبعضها أن يتسرب ويغادر مكان التفاعل قبل أن يهدأ .

أما f فهو معامل الانتفاع بالنترونات الحرارية وهو يمثل الجزء من النترونات الحرارية المتشكلة الذي تصطاده نوى المادة الانشطارية .

أما ε فهو يمثل النترونات الثانوية الناشئة عن امتصاص النترونات الثانوية السريعة حيث يمكن للنترونات الثانوية أن تقع في أسر نوى U^{235} و U^{238} قبل أن تهدأ محدثة بذلك انشطارات إضافية ونترونات ثانوية .

لذلك فإن معامل التكاثر سيكون أكبر من الجداء $\eta\rho f$ بالمقدار ε الذي يسببه امتصاص النترونات السريعة .

من الواضح أننا نستطيع جعل التفاعل النووي المتسلسل يتنامى أي (جعل $K>1$) وذلك عن طريق التأثير على المضاريب الأربعة وجعلها تبلغ حدها الأقصى, فبوسعنا التأثير على كل من المضاريب ρ ، f ، ε ولكن لا نستطيع التأثير على η لأنه يتعلق بخصائص المادة الانشطارية نفسها .

فزيادة المضروب f مثلاً يتوقف عل التخلص من الشوائب وقبل كلِّ شيءٍ الكادميوم والبور التي تقوم بامتصاص النترونات الحرارية بشدة . كما يمكن التأثير على المضروب ρ وزيادته عن طريق استخدام اليورانيوم والمهدئ النقيين بشكلٍ كافٍ, عندئذٍ لن يبقى طريق لضياع النترونات عند تهدئتها إلاّ تسربها عبر الإناء الموجودة فيه أو عبر امتصاصها من قبل الـــ

U^{238} ، فمن أجل تقليل امتصاص الـ U^{238} للنترونات يجب أن تتعدى النترونات وتجتاز الحيز الطاقي الخطر الذي يمتد بين (5-1000)ev حيث إنه في هذا المجال يمكن أن يحدث امتصاص تجاوبي للنترونات من قبل الـ U^{238} وقد وجدنا سابقاً عندما استعرضنا المنحني الذي يمثل تبعية مقطع تفاعل أسر نوى U^{238} للنترونات بالنسبة لطاقة النترونات أن هذا الامتصاص التجاوبي يكون على أشده عندما تكون طاقة النترونات مساوية 6,75ev . ومن أجل بلوغ هذا الهدف لا يوزع اليورانيوم والمهدئ بانتظام في قلب المفاعل وإنما يوضع اليورانيوم على شكل كتل ويملأ الفراغ بينها مادة المهدئ . فبهذا التوزيع تستطيع النترونات السريعة أن تهدأ حتى طاقة تقل عن 5ev بعيداً عن اليورانيوم بعد ذلك ستصل هذه النترونات الحرارية المهدئة بسلام إلى نوى U^{235} وتقوم بشطرها.

كما يمكن التقليل من تسرب النترونات عبر الإناء الذي يحويها عن طريق جعل أبعاد الإناء كبيرة نسبياً وجعل كمية اليورانيوم أيضاً كبيرة, كذلك إحاطة منطقة اليورانيوم بمادة عاكسة للنترونات الأمر الذي يقلل من ضياع النترونات فيزداد بذلك المضروب ρ وبالتالي معامل التكاثر K . وبشكل عام يمكن زيادة قيمة ρ و f عن طريق رفع تركيز U^{235} في الوقود النووي .

10-4- الانشطار النووي:

كما ذكرنا سابقاً فإن النوى الثقيلة غير ثابتة فما يتعلق بالانشطار. وإن الانشطار التلقائي يبدأ عادةً لدى النوى ذات العدد الذري الكبير نسبياً. وعبر تأثير أشعة مناسبة في نكليدات العناصر الثقيلة يُمكن أن يُحرّض

الانشطار فيها وهذا ما يُعرف باسم الانشطار الصنعي أو القسري للنوى. وتنشطر النوى طوعاً عندما تحقق الشرط .

$$\frac{Z^2}{A} > \left(\frac{Z^2}{A}\right)_{lim} = 45$$

حيث نرى أن العناصر في آخر الجدول الدوري تحقق النسبة $Z/A \approx 0.39$ وبالاستفادة من الشرط السابق يكون

$$Z = 45 \frac{A}{Z} = 115$$

وبالتالي فإن النوى التي شحنتها تساوي أو أكبر من 115 تعاني انشطاراً تلقائياً . وتجدر الملاحظة إلى أن الانشطار يمكن أن يحدث على النوى التي فيها $Z^2/A<45$ (أي التي لديها طاقة تقل عن الحاجز الكموني الانشطاري) ففي هذه الحالة تنشطر النوى على غرار التفكك α (الأثر النفقي), و بالتالي يكون هذا الانشطار شكل من أشكال النشاط الإشعاعي.

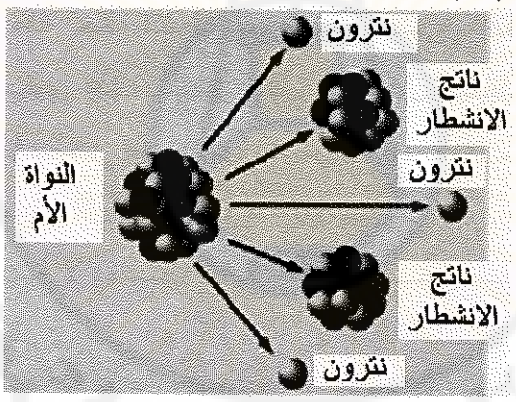
فمثلاً نجد أن U^{235} ينشطر طوعاً بدور قدره 10^{12}-10^{13} سنة أما U^{238} فينشطر طوعاً بصورة أقل وبدور قدره 10^{17} سنة.

إذاً بصورة عامة لا يحدث الانشطار التلقائي ما دام $Z^2/A<45$ ولكن إذا أعطيت النوى التي فيها $Z^2/A<45$ طاقة إضافية كافية أمكن انشطار هذه النوى ويُسمى مثل هذا الانشطار (الانشطار بالفوتونات) . لقد اكتشفت إمكانية انشطار النوى الصنعي أو القسري من قبل العالمين هان O.Hahn وشتراس مان F. Strassmann عام 1938 وذلك عند محاولة إنتاج العناصر الشبيهة باليورانيوم بتأثير النترونات على اليورانيوم، عند ذلك وجدا أنه قد نشأ نتيجة لذلك عناصر أخف من اليورانيوم بصورة واضحة وقد عللاً ذلك آنذاك بانشطار النوى بواسطة النترونات. أي $U(n,f)Ba^{140}$

حيث:

n : النترون المقذوف و Fission : F للدلالة على عملية الانشطار .

فعندما يدخل النترون إلى النواة يكسبها طاقة تساوي مجموع طاقته الحركية وطاقة ارتباطه في النواة المركبة المتشكلة, وبالتالي تكون النواة المركبة في حالة شديدة الإثارة الأمر الذي يجعل انشطارها ممكناً. فمن المهم التمييز بين النترونات ذات الطاقات العالية (التي هي غير مناسبة لإجراء تفاعل نووي متسلسل) والنترونات ذات الطاقات المنخفضة القادرة على إجراء التفاعل النووي المتسلسل, وأهم هذه النترونات النترونات الحرارية. فبشكل عام عند دخول نترون ذي طاقة منخفضة إلى نواة نكليد ثقيل فإنه يحدث انشطاراً لهذا النكليد إلى قسمين مع تولد عدة نترونات وتحرر كمٍّ هائلٍ من الطاقة, الشكل(35).



الشكل(35)

$$A + n \rightarrow B + D + xn + \Delta E$$

حيث $x \approx 2.4$ عند انشطار U^{235} و $x \approx 2.9$ عند انشطار Pu^{239}

إنَّ أهم ميزة للانشطار النووي الحراري هو نشوء شظايا انشطار غير متماثلة بشكل مفضل والتي تمتلك فائضاً كبيراً من النترونات. حيث يجري تحللها وتلاشيها عبر التفكك β^- وكمثال على هذا الانشطار انشطار اليورانيوم U^{235}.

$$_{92}U^{235} + {}_0n^1 \rightarrow {}^*({}_{92}U^{236}) \rightarrow {}_{36}Kr^{90} + {}_{56}Ba^{143} + 3\ {}_0n^1$$

$$\beta^- \mid 33\ s \qquad \beta^- \mid 12\ s$$

$$_{37}Rb^{90} \qquad {}_{57}La^{143}$$

$$\beta^- \mid 2{,}9\ min \qquad \beta^- \mid 14\ min$$

$$_{38}Sr^{90} \qquad {}_{58}Ce^{143}$$

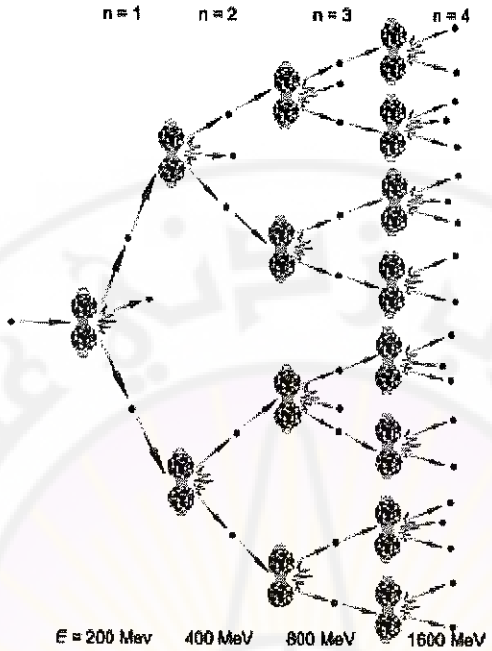
$$\beta^-\ 28{,}1\ a \qquad \beta^-\ \beta 3\ h$$

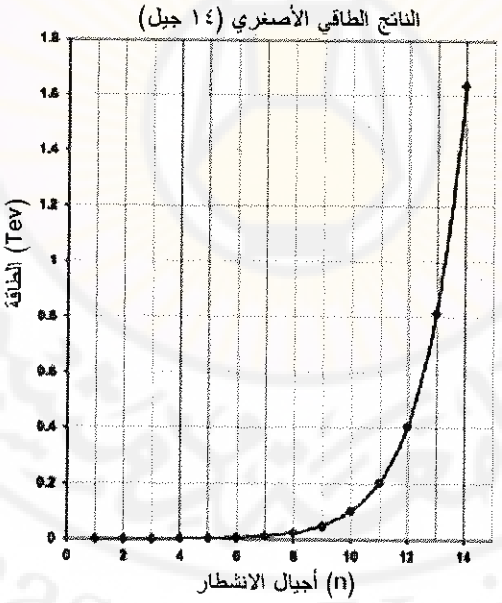
$$_{39}Y^{90} \qquad {}_{59}Pr^{143}$$

$$\beta^- \mid 64\ h \qquad \beta^- \mid 13{,}6\ d$$

$$_{40}Zr^{90} \qquad {}_{60}Nd^{143}$$

يبين الشكل(36) التفاعل النووي المتسلسل الذي يحدث عند دخول نترون حراري إلى نواة نكليد ثقيل مترافقاً بانتشار كمٍّ هائلٍ من الطاقة بازدياد عدد أجيال الانشطار (n).





الشكل(36): الانشطار النووي المتسلسل الذي يحدث عند دخول نترون حراري إلى نواة نكليد ثقيل

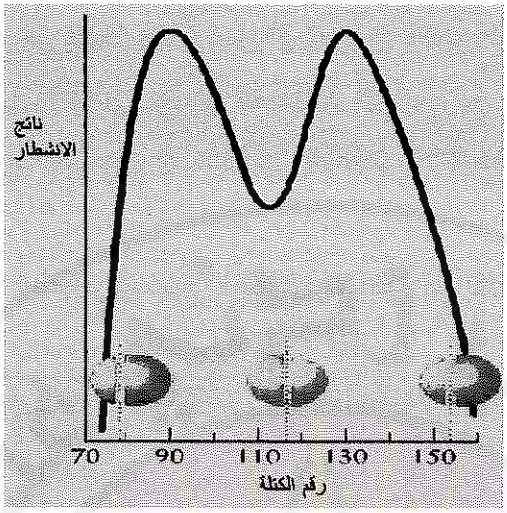
إنَّ المنحني البياني في الشكل(36) يُبين أن الازدياد الكبير في الطاقة يحـــدث فقط ابتداءً من الجيل(14) في سلسلة التفاعلات الانشطارية. ويبين الجدول(3) قيم الطاقة الأصغرية للأجيال المختلفة في تفاعلات الانشطار التسلسلية لـــــ U^{235}.

جدول(3): ناتج الطاقة الأصغري للأجيال المختلفة في تفاعلات الانشطار التسلسلية لـــ U^{235}

عدد أجيال الانشطار(n)	الناتج الطاقي الأصغري (Mev)
1	2.00×10^{2}
5	3.20×10^{3}
10	1.02×10^{5}
20	1.05×10^{8}
30	1.07×10^{11}
40	1.10×10^{14}
50	1.12×10^{17}
60	1.15×10^{20}
70	1.18×10^{23}
80	1.21×10^{26}

إنَّ انشطار النواة يتوقف على درجة إثارة النواة وكذلك على بنيتها .
إنَّ الانشطار المتناظر إلى كتلتين متساويتين لا يكون الأكثر احتمـــالاً دائمـــاً. فمثلاً ينشطر U^{235} غالباً انشطاراً غير متناظرٍ ويعطي الشظايا عنـــد حـــوالي رقمي الكتلة 90 و130 , كما في الشكل (37).

غالباً تنشطر بشكل غير متناظر $\rightarrow {}^{*}(U^{236}) \rightarrow U^{235} + {}_{0}n^{1}$



الشكل(37)

أما إذا تشكلت النواة U^{236} من دخول جسيم α ذي الطاقة 38Mev إلى نـــواة Th^{232} فإن انشطار U^{236} يحدث بشكل متناظر إلى حدٍّ كبيرٍ.

غالباً تنشطر بشكل متناظر $\rightarrow$ $^{*}(U^{236}) \rightarrow Th^{232} + \alpha$

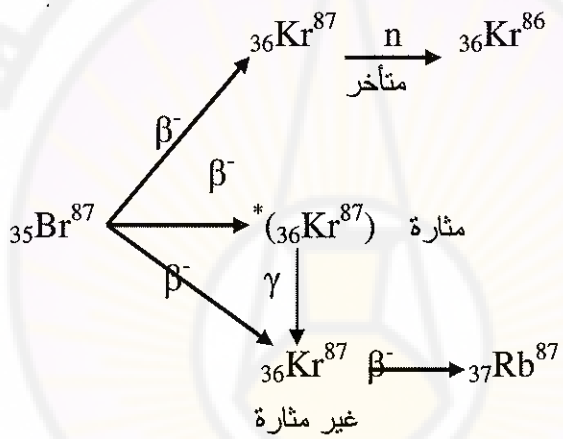
وكذلك عند قذف البزموت Bi^{209} بالديتونات ذات الطاقة 22Mev فإنه يحدث غالباً انشطارٌ متناظرٌ.

إنَّ النترونات الحرة المتشكلة لحظة الانشطار اصطلح على تـــسميتها (بالنترونات الثانوية) وعددها يختلف كما أسلفنا من تفاعل إلى آخر . ففـــي حالة انشطار الـــ U^{235} يكون بحوالي 2,4 أما في حالة انشطار البلوتونيـــوم Pu^{239} فهو بحوالي 2,9 .

كما بيَّنت التجارب التي أجريت أن قسماً أيضاً من النترونات يتحرر بعد عملية الانشطار بقليل وقد ســـميت (بالنترونـــات المتـــأخرة) وكميتهـــا صغيرة مقارنة مع النترونات الثانوية, وهي تنشأ خلال التحولات الإشـــعاعية للشظايا الناتجة حيث تتشكل نوى ذات فائضٍ طاقي كافٍ لاقتلاع النترونـــات,

وبما أنَّ هذه النوى تتشكل أثناء التحول الإشعاعي, فإنَّ هـذه النترونـات لا تظهر إلا بعد انقضاء بعض الوقت من عملية الانشطار. ولهذه النترونات دورٌ بارزٌ في عمل المفاعلات النووية حيث تسهل إلى حدٍّ كبيـرٍ عمليـة اقـلاع المفاعل والتحكم به . وجديرٌ بالذكر أن هذه النترونات غير متجانسة وتختلف في أعمارها .

مثال ذلك: التفكك الإشعاعي للبروم $_{35}Br^{87}$ الذي يمكن أن يتفكك وفق ثـلاث طرائق حيث ينطلق جسيم β^- إلاّ أن الطاقة المتحررة تختلف من طريق إلـى آخر.



إنَّ الطاقة المتحررة عن الانشطار النووي كبيرة جداً ويكفي أن نعلـم أنَّ انشطار واحد غرام من U^{235} الذي يحوي $2,56x10^{21}$ نواة يُحرر طاقـة قدرها $2,56.10^{21} \times 2.10^{8} \times 1,6.10^{-19} \approx 8,2.10^{10}\ J$

إنَّ القسم الرئيسي من طاقة الانشطار يتحرر على شكل طاقة حركية للشظايا وتُوقف الشظايا في طبقة رقيقة جداً من المادة حيث تتحـول طاقـة الانشطار إلى حرارة تسخن طبقة المادة الملاصقة لمكان الانشطار, كمـا أنَّ

قسماً من طاقة الانشطار ينطلق على شكل أشعة β^- ويـصاحب التفكـك β^- نشوء أشعة γ والنترينو.

شكل الطاقة	الطاقة الوسطية لكل انشطار (Mev)
طاقة الشظايا	162
طاقة الإلكترونات β^-	5
طاقة أشعة γ في التفكك β^-	5
طاقة أشعة γ المنبعثة عند الانشطار	6
الطاقة التي تحملها النترونات الثانوية	6
طاقة النترينو	11
	195

حيث إنَّ الطاقة الوسطية للانشطار الواحد تتراوح في المجال (190-200)Mev

– احتراق الوقود النووي وتحول الطاقة الانشطارية :

كما أسلفنا يُعدُّ U^{235} النظير الوحيد من نظائر اليورانيوم الطبيعية التي تنشطر بالنترونات البطيئة حيث يطلق عليه بالوقود الأساسي للمفاعل .

أما النظير U^{238} فهو الأكثر وفرةً في الطبيعة وهو يمتصُّ النترونات أيـضاً متحولاً إلى Pu^{239} في سلسلة إشعاعية هي :

$$U^{238} + {}_0n^1 \rightarrow U^{239} \xrightarrow[t_{1/2}=23min]{\beta^-} Np^{239} \xrightarrow[t_{1/2}=2.3d]{\beta^-} Pu^{239}$$

* إنَّ البلوتونيوم – 239 الناشئ يُطلق عليه الوقود الثانوي لأنه ينشطر أيضاً بالنترونات الحرارية معطياً ثلاثة نترونات . وإن نسبة عدد ذرات الوقود الثانوي إلى عدد ذرات الوقود الأساسي تسمى نسبة التحول (Conversion Ratio) وهي تساوي 0.9 في مفاعلات اليورانيوم الاعتيادية. ولقد أمكن تصميم مفاعلات نووية بنسبة تحول تساوي أو تزيد عن الواحد وذلك عن طريق تقليص النترونات المفقودة من المفاعل وتسمى مثل هذه المفاعلات بالمفاعلات الولودة .

كما ذكرنا أن عملية انشطار الوقود النووي تولد شظايا تتراوح كتلها بين 90 و 130 ونترونات فإن الطاقة الانشطارية تكون

$$\Delta M = 235,124 + 1,0089 - (94,955 + 138,955 + 2x1,0089)$$
$$= 0,215 \text{ amu}$$

ومنه تكون الطاقة المثالية المتحررة $E = 0,215 \times 931,5 = 200$ Mev

وإن مقدار الطاقة المتحررة من انشطار كيلو غرام واحد من اليورانيوم -235 يكون

$$1000/235 \times 6,02x10^{23} \times 184 = 10^{26} \text{ Mev}$$

أي ما يكافئ عشرين مليون كيلوواط / ساعة .

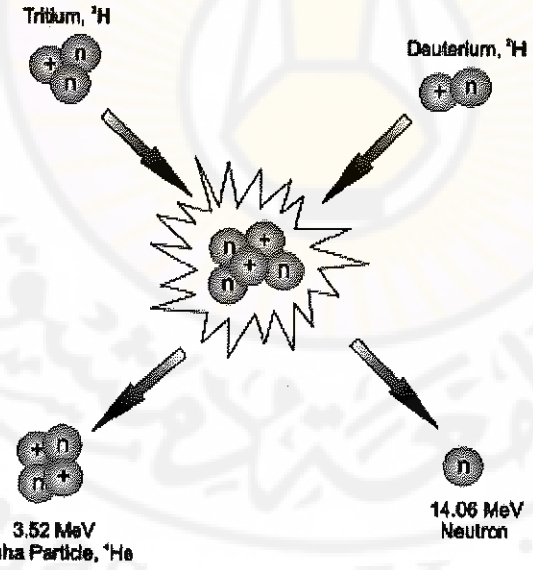
حيث 184 Mev هي الطاقة الفعلية المتحررة من الانشطار الواحد.

10-5- الاندماج النووي:

إنَّ الطاقة الهائلة الناتجة عن عملية الانشطار النووي يمكن إنتاجها كذلك بل وأكبر منها بكثير من عملية تعاكس عملية الانشطار ألا وهي عملية الاندماج النووي . إنَّ اندماج نواتين خفيفتين لتشكيل نواة أثقل يؤدي إلى نشوء نواة مستقرة حيث ترتبط فيها النيكلونات بقوة أكبر مما كانت عليه فعند اندماج نواتي هيدروجين ينتج نواة هليوم عالية الاستقرار مع تولد كمٍّ هائلٍ جداً من الطاقة. ففي القنبلة الهدروجينية يتم اندماج نظيري الهدروجين (الديتريوم والتريتيوم) ويتشكل نتيجة ذلك الهليوم المستقر ونترون ويتولد طاقة هائلة كما في الشكل(38).

$$_1H^2 + _1H^3 \rightarrow _2He^4 + _0n^1$$

ويعدُّ هذا التفاعل من التفاعلات النووية الهامة التي تجري في الشمس ومصدراً للجزء الأكبر من طاقتها .



الشكل(38): اندماج الديتريوم والتريتيوم وتشكل الهليوم المستقر

لنحسب الطاقة المتولدة عن اندماج أربعة ذرات هيدروجين لتشكيل الهليوم .

$$4p \rightarrow He^4 + 2e^+ + 2\nu + \Delta E$$

$$\Delta E = (4m_p - m_{He} - 2m_e)\, C^2$$

أو

$$\Delta E = (4M_H - M_{He} - 2m_e)\, C^2$$

ومنه بالتعويض

$$\Delta E = 931,5\ (4x1,0078252 - 4,0026031 - 2x0,0005486)\ Mev$$

$$\Delta E = 24,69\ Mev$$

ويُضاف لمقدار الطاقة هذا أيضاً الطاقة الناتجة عن إشعاع الإبادة (أو الفناء) الناتج عن تصادم البوزيترون مع الإلكترون $e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu$ وتبلغ $(2x1,02)Mev$ ومن جهة أخرى تبلغ الطاقة التي يأخذها النترينو معه عند خروجه 2% من قيمة ΔE وتبلغ الطاقة المتحررة الكلية بالإجمال 26,2Mev وهو مقدار كبير إذا ما قورن مع الطاقة المتحررة عند الانشطار حيث يُقابل كل وحدة كتل ذرية مقدار من الطاقة قدره 6,5Mev أما في حالة الانشطار فيقابل كل وحدة كتل ذرية تحرر طاقة قدرها $0,8\ Mev \approx$.

على الرغم من أن مقدار الطاقة المتحررة من تفاعل الاندماج كبيرٌ جداً, فإن إجراء تفاعلات الاندماج عملياً ليس بالأمر السهل وذلك بسبب طاقة التنشيط العالية لهذه التفاعلات والبالغة حوالي (30GJ/mol) وهذا مردّه إلى التدافع الكهراكدي بين النوى المندمجة . فمن أجل ذلك يلزم إجراء تفاعلات الاندماج عند درجات حرارة مرتفعة جداً حوالي 200 مليون درجة مئوية ويمكن تأمين درجة الحرارة التي يبدأ عندها الاندماج النووي بواسطة تفاعل انشطار نووي الذي يعمل كعود ثقاب ذري كما هو الحال في القنبلة الهدروجينية , وإن الطاقة المتحررة عن عملية الاندماج الأولي تكفي لحدوث تفاعل اندماج آخر وانتشاره كتفاعل سلسلي.

معيقات أخرى أيضاً تقف في وجه تحقيق تفاعل الاندماج النووي هي ايجاد وعاء قادر على تحمل حرارة عالية من مرتبة $2x10^8K$ حيث يجري تفكك المواد والجزيئات وتأين الذرات عند هذه الدرجة وتصل إلى حالة جديدة للمادة تسمى (البلازما) التي هي ليست بالسائلة ولا بالصلبة ولا غازية تحوّل كل شيءٍ تمسّه إلى بخار.

ولقد عُرفت أيضاً تفاعلات اندماج تجري عند درجات حرارة عالية حوالي $(10^9\text{-}10^8)K$ ، فعند هذه الدرجة يمكن للهليوم أن يندمج مع نفسه معطياً "ولكن بكميات ضئيلة" عنصر البريليوم-8.

$$He^4 + He^4 \leftrightarrow Be^8$$

وإنَّ الكمية المنخفضة الناتجة والطاقة العالية المتحررة كافية لاستمرار التفاعل بالشكل

$$Be^8 + He^4 \rightarrow O^{12} + \gamma$$
$$C^{12} + He^4 \rightarrow O^{16} + \gamma$$

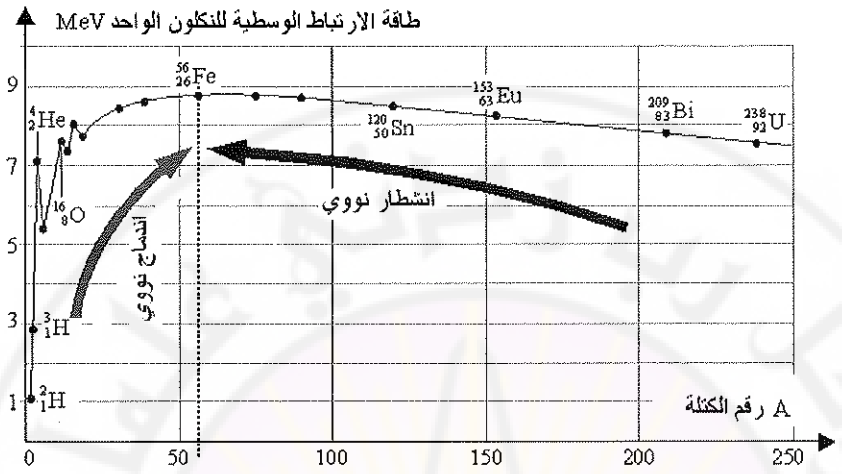
وعند درجات حرارة عالية أيضاً من مرتبة 10^9K يمكن C^{12} و O^{16} أن يندمجا وفق التفاعلات .

$$C^{12} + C^{12} \rightarrow Mg^{24} + \gamma$$
$$C^{12} + C^{12} \rightarrow Na^{23} + P$$
$$C^{12} + C^{12} \rightarrow Ne^{20} + He^4$$
$$C^{12} + O^{16} \rightarrow Si^{28} + \gamma$$
$$C^{12} + O^{16} \rightarrow Mg^{24} + He^4$$
$$O^{16} + O^{16} \rightarrow S^{32} + \gamma$$
$$O^{16} + O^{16} \rightarrow Si^{28} + He^4$$

وإنَّ جسيمات α الناتجة عبر هذه التفاعلات تكون ذات طاقة عالية قادرة على تحقيق تفاعل نووي من الشكل (α,γ) مثل

$$S^{32} + He^4 \rightarrow Ar^{36} + \gamma$$

وبشكل عام تميل النوى الخفيفة للاندماج في حين يُلاحظ ميل النـــوى الثقيلـــة للانشطار كما هو موضح في الشكل(39).



الشكل(39)

كما تحظى التفاعلات النووية (d,d) و (d,t) بأهمية كبيرة بالمقارنـــة مع التفاعل بين البروتونات (p,p) نظراً لامتلاك الديترون والتريتيوم مقـــاطع عرضانية مرتفعة .

ومن هذه التفاعلات

$$d + d \rightarrow t + p + 4Mev$$
$$d + t \rightarrow He^4 + n + 17{,}6Mev$$

والتفاعل الكلي

$$3d \rightarrow He^4 + p + n + 21{,}6Mev$$

وكذلك

$$d + d \rightarrow He^3 + n + 3{,}3Mev$$
$$d + He^3 \rightarrow He^4 + p + 18{,}3Mev$$

والتفاعل الكلي

$$3d \rightarrow He^4 + p + n + 21{,}6Mev$$

الطاقة الكلية المتحررة هي 21,6Mev أي بمعدل 3,5Mev لكل وحدة كتل ذرية .

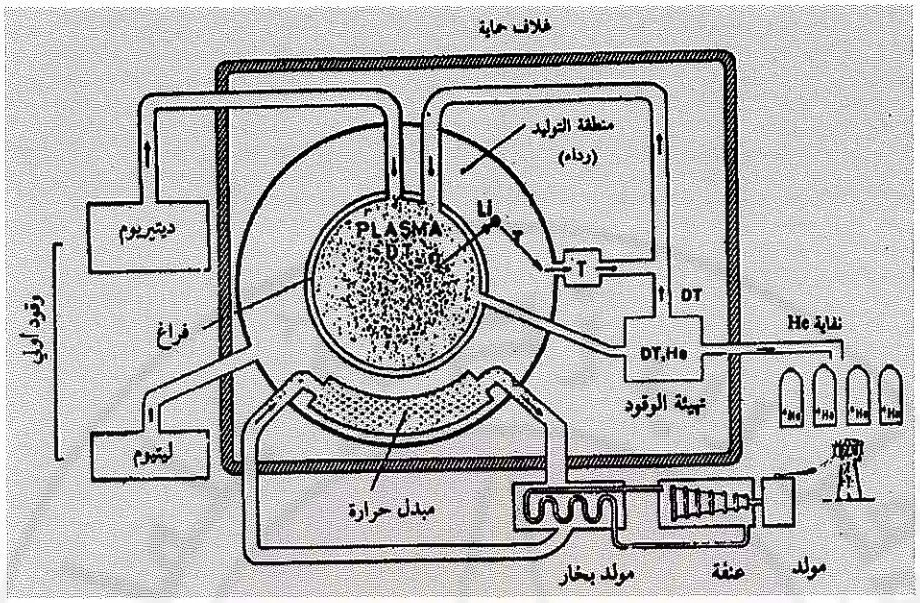
– لقد بُذلت جهودٌ مكثفةٌ لبناء مفاعل نووي يعمل بالاندماج ولكن كل المحاولات التي أجريت لتحقيق ذلك اصطدمت بصعوباتٍ كثيرة . فمثلاً تم بناء مفاعل في Zeta بريطانيا وكذلك Stellatron و Perhapsatron في الولايات المتحدة .

ولعلَّ من أبرز هذه المحاولات هي المفاعل التي تعمل بالأشعة الليزرية العالية الطاقة لإثارة تفاعل الاندماج في المفاعل الحاوي على كريات زجاجية صغيرة بقطر 0.1 مم ملئت بالديتريوم والتريتيوم, الشكل(40). حيث يصطدم شعاع الليزر بهذه الكريات مجبراً إيّاها على الاندماج ويتشكل نتيجة ذلك نوى الهليوم والنترونات حيث تتفاعل هذه النترونات مع الليثيوم المنصهر فيتحرر كمٌ هائلٌ من الطاقة ويعاد توليد التريتيوم من جديد وفق التفاعلات .

$$ {}_1H^2 + {}_1H^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 $$
$$ {}_3Li^6 + {}_0n^1 \rightarrow {}_2He^4 + {}_1H^3 $$

والتفاعل الكلي

$$ {}_1H^2 + {}_3Li^6 \rightarrow 2\ {}_2He^4 $$



الشكل(40): مخطط لمفاعل نووي يعمل بالاندماج

إنَّ من محاسن تفاعلات الاندماج هي أنها تفاعلات نظيفة نواتجها غالباً عناصر مستقرة, أما نواتج الانشطار النووي فهي غالباً غير مستقرة ونشطة إشعاعيا. بالإضافة إلى ذلك أن تفاعل الاندماج يعتمد على نوى خفيفة كمواد أولية وهي متوفرة في الطبيعة وأكثر انتشاراً من النظائر الثقيلة التي تلزم للانشطار النووي. وكما ذكرنا فإن المردود الطاقي من تفاعل الاندماج أكبر بعدة مرات من تفاعل الانشطار وإن الطاقة المتحررة عبر اندماج 1Kg من الديتريوم تعادل حرق $8x10^6Kg$ من الفحم بينما تكون الطاقة المتحررة عبر انشطار 1Kg من مادة انشطارية معادلة إلى حرق $2x10^6Kg$ من الفحم.

Damascus University

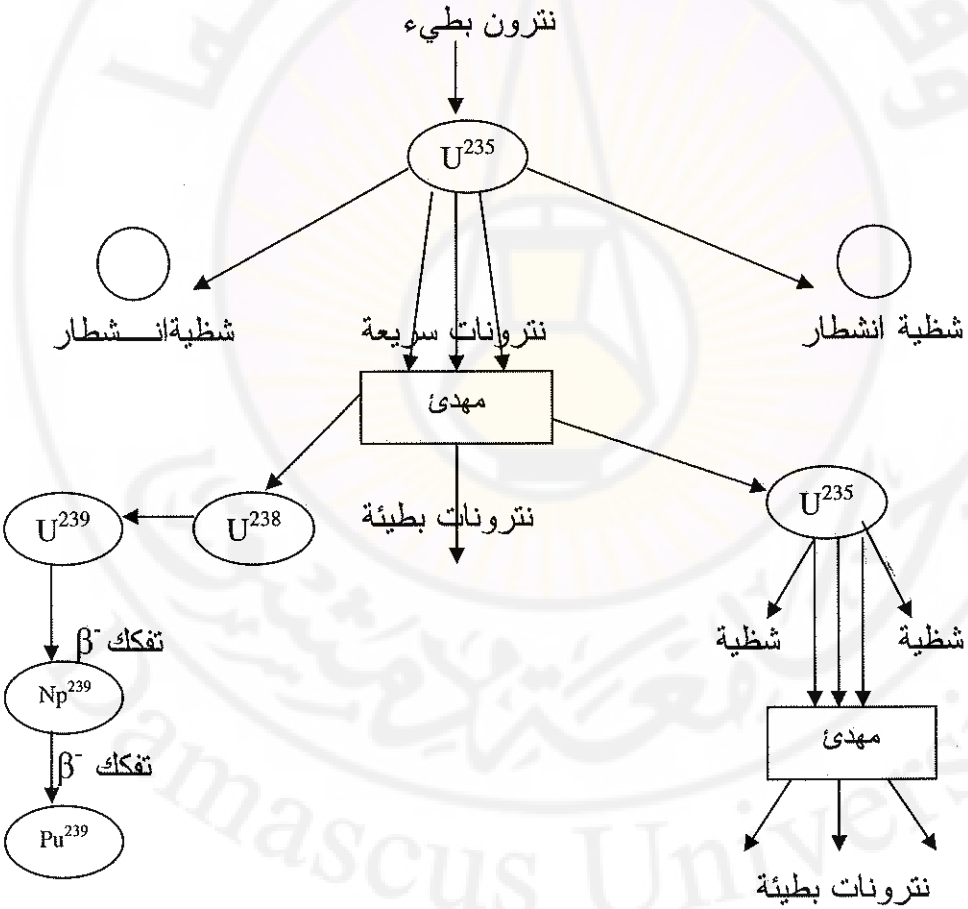

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الحادي عشر

المفاعلات والمسرّعات النووية

11-1- المفاعل النووي:

إنَّ من أهم مبادئ عمل المفاعل هو توفر نترون واحد بطيء على الأقل لبدء التفاعل النووي المتسلسل . فمثلاً لو استعرضنا الأمور الهامة التي تحدث على اليورانيوم المستخدم كوقود في المفاعل لوجدنا .

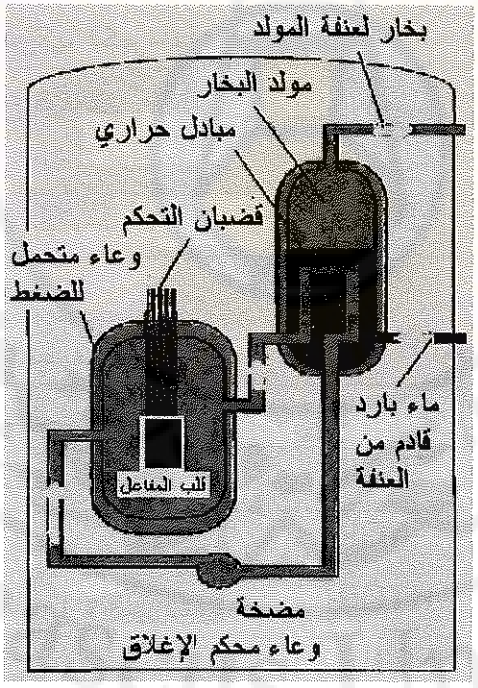


فالمُهدِّئات تقوم بتحويل النترونات السريعة إلى بطيئة تتراوح طاقتها بين (0,6 - 2,5) Mev تقريباً . والمهدئات هي مواد ذات عدد كتلي منخفض وتتميز بمقطع عرضي صغير تجاه امتصاص النترون مثل الغرافيت والبريليوم والماء العادي والماء الثقيل .... الخ. إن كل انشطار نووي يولد طاقة وسطية تعادل تقريباً Mev(190-200), حيث يتحول معظم هذه الطاقة إلى طاقة حرارية ما عدا قسم صغير منها يقدر بـ 11Mev يتبدد على شكل طاقة مصاحبة لانبعاث النترينو . وإن كل $3x10^{16}$ انشطار في الثانية على نواة الـ U^{235} يولد طاقة تتحول إلى حرارة وقدرها مليون واط MW, ويُرافق هذه الطاقة خروج حوالي $7x10^{16}$ نترون/ثانية.

إن التفاعل النووي المتسلسل يجري في المفاعلات النووية في وعاء مملوء باليورانيوم والمهدئ ومحاط بمادة عاكسة للنترونات, الشكل(41). كما يحاط قلب المفاعل بغلاف واقٍ من تأثير النترونات وأشعة γ (وهو غالباً من البيتون والرصاص السميكين). فلكي تكون قيمة المضروب f كافية يجب أن تكون المنطقة الفعالة (قلب المفاعل) كبيرة إلى حدٍّ كافٍ, ويجب أيضاً أن تحقق شرط الحد الحرج K=1 حتى يصبح التفاعل المتسلسل ممكناً ويبدأ المفاعل بعمله . ويمكن التحكم بعمل المفاعل (أي معامل التكاثر) عن طريق إنزال قضبان التحكم في قلب المفاعل وهي مواد تمتص النترونات الحرارية بشدة في قلب المفاعل وتدعى هذه المواد بالمواد المنظمة مثل الكادميوم والبور, ويتم التحكم بحركتها آلياً في قلب المفاعل عن طريق حجرة تأين متصلة بها. فإذا كانت كمية هذه المواد كافية أمكن كبح وإيقاف المفاعل حيث يغدو K <1 , ويتم ذلك عادةً باستخدام قضيب غليظ من الكادميوم موجود في قلب المفاعل.

فالمفاعل هو جهاز يسمح بحدوث تفاعل انشطاري متسلسل يمكن التحكم بـه بطريقة يتم بها إنتاج الطاقة أو النترونات لأغراض البحث العلمي أو لإنتـاج النظائر. والمواد الأساسية في المفاعل النووي هي:

1- الوقود النووي الذي يحافظ على استمرار تفاعل الانشطار التسلسلي.
2- المهدئ لتبطئة النترونات السريعة وتحسين احتمالية حدوث التفاعـل الانشطاري.
3- الغلاف الذي يحوي أقراص الوقود أو قضبان الوقود بحيـث تبقـى نواتج الانشطار النشطة إشعاعياً حبيسة تفادياً لانطلاقها للبيئة.
4- المبرد, وذلك لامتصاص الحرارة الناتجة عن التفاعل النووي.
5- عناصر التحكم, وذلك لامتصاص النترونات والـتحكم فـي معـدل حدوث الانشطار التسلسلي.



الشكل(41): مخطط لبنية مفاعل انشطاري بنظام تبريد مائي تحت الضغط

يجري تحويل الطاقة الحرارية الهائلة [المتولدة في قلب المفاعل من جراء اصطدام الشظايا والنترونات والإلكترونات وأشعة γ بجدران قلب المفاعل] إلى طاقة كهربائية وذلك عن طريق استخدام هذه الحرارة الهائلة لتبخير الماء أو أي مائع مناسب آخر حيث يتولد بخار ضغطه عالٍ جداً يستطيع تحريك عنفة ومُولِّد كهربائي متصلاً بها, حيث يجري الماء الذي يبرد قلب المفاعل (ماء مشع) في دورة محكمة الإغلاق ويمر عبر مبادل حراري ينقل الحرارة إلى الماء الذي يجري في دورة ثانية (ماء غير مشع) والذي يتحول إلى بخار يدير عنفة المُولِّد .

11-2- أنواع المفاعلات النووية:

تُصنَّف مفاعلات القوى غالباً بناءً على نوع المبرد المستخدم. وفيما يلي بعض الأنماط البارزة من المفاعلات التي تعمل حالياً في العالم لإنتاج الكهرباء مع بيان قدراتها الكهربائية:

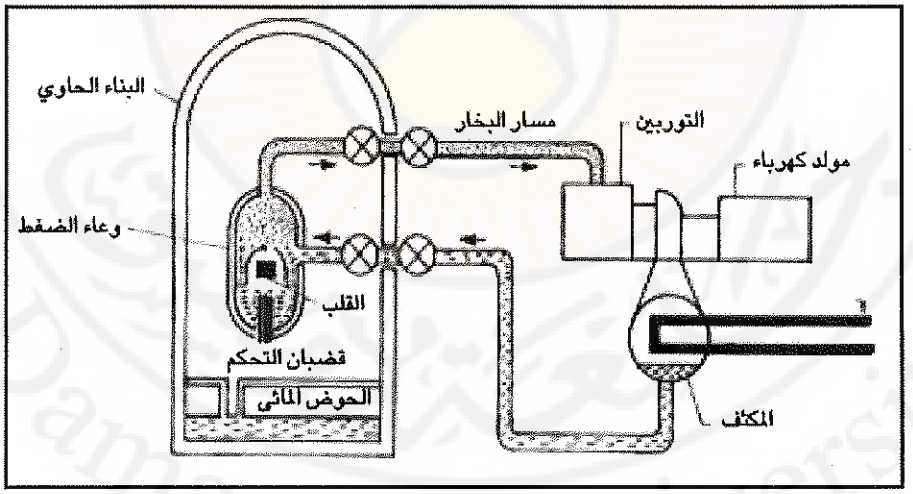
نوع المفاعل	رمزه	القدرة الكهربائية (ميغاواط)
مفاعل الماء المغلي	BWR	75555
مفاعل الماء المضغوط	PWR	213733
مفاعل الماء الثقيل المضغوط	PHWR	18737
مفاعل الماء الخفيف المهدأ بالجرافيت	LWGR	14965
المفاعلات المبردة بالغاز	GCR	4059
المفاعلات المتطورة المبردة بالغاز	AGR	8315
المفاعلات مرتفعة الحرارة المبردة بالغاز	HTGR	غير موجودة حالياً
المفاعلات الولودة المبردة بالفلز السائل	LMFBR	2297

11-2-1- مفاعل الماء المغلي(BWR):

تتطلب المفاعلات التي تستخدم الماء الخفيف كمهدئ أو مبرد إثراء (تخصيب) اليورانيوم, كما هو الحال في مفاعلات الماء المغلي ومفاعلات الماء المضغوط ومفاعلات الماء الخفيف المهدأ بالجرافيت. أما إذا كانت مادة التغليف المستخدمة تمتص النترونات, فإن تخصيب اليورانيوم يصبح لازماً, كما في حالة المفاعلات المتطورة المبردة بالغاز (AGR).

إن الوقود المستخدم في مفاعلات الماء المغلي هو أكسيد اليورانيوم الذي يحوي نسبة (3-1.5)% من اليورانيوم-235, وتستخدم سبيكة الزركونيوم لغرض التغليف ويحاط المفاعل بوعاء من الفولاذ القوي غير القابل للصدأ.

كما أن الماء المنساب خلال المفاعل يستخدم كمبرد وفي الوقت نفسه كمهدئ ويكون مضغوطاً حتى 70 ضغط جوي, وذلك كي يحصل الغليان عند 285 درجة مئوية. ويتم تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية بفعالية جيدة بواسطة العنفات. ويبين الشكل (42) مخططاً توضيحياً لمفاعلات الماء المغلي.



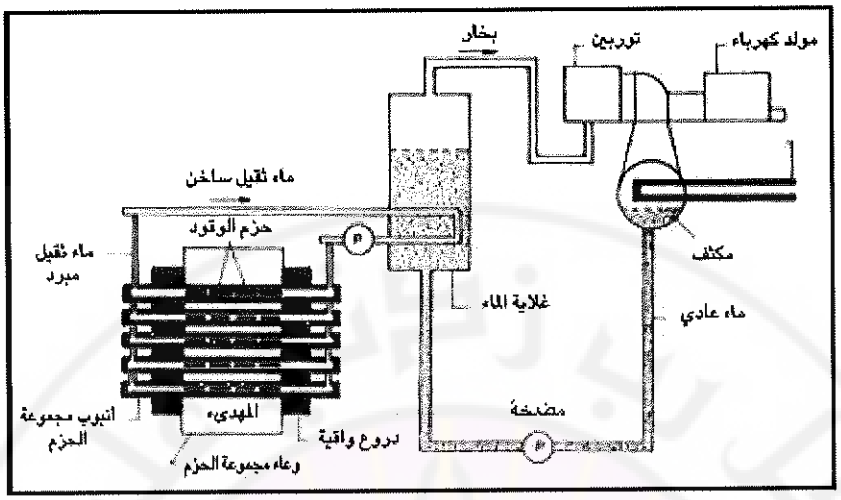
الشكل (42): مخطط توضيحي لمفاعلات الماء المغلي

11-2-2- مفاعل الماء المضغوط (PWR):

تتشابه مفاعلات الماء المضغوط مع مفاعلات الماء المغلي من حيث الوقود وكذلك من حيث التغليف. ولكن الضغط داخل مفاعل الماء المضغوط يكون عند حوالي 145 ضغطاً جوياً. بحيث لا يغلي الماء حتى مع الوصول إلى حرارة 310 درجة مئوية. ولذلك يجب أن يكون وعاء المفاعل في هذا النوع من المفاعلات أمتن منه في مفاعلات الماء المغلي. وينقل هذا الماء عالي الحرارة إلى مبادل حراري لإنتاج البخار ومن ثم يعاد إلى المفاعل من جديد. إن البخار الناتج في المبادل يستخدم لإنتاج الكهرباء. يعد هذا النوع من المفاعلات من المفاعلات الأكثر شيوعاً في العالم.

11-2-3- مفاعل الماء الثقيل المضغوط (PHWR):

يعتمد مفاعل الماء الثقيل المضغوط على استخدام وقود أكسيد اليورانيوم الطبيعي مع سبيكة الزركونيوم كمادة تغليف. وخلاف النوعين المذكورين سابقاً, فإن هذا النوع لايستخدم فيه وعاء ضغط عال لاحتواء مكونات لب المفاعل, وبدلاً من ذلك فإن الوقود يتم احتواؤه في عدد من أنابيب الضغط التي يتم تركيبها في وعاء كبيرٍ يدعى كالاندريا (Calandria). ويتم ملء الوعاء بالماء الثقيل المستخدم للتهدئة ويحفظ بارداً (عند أقل من 85 درجة مئوية), وتركب قضبان التحكم في الوعاء. ويأخذ الماء الثقيل المستخدم لتبريد الوقود دورته خلال أنابيب الضغط وذلك تحت ضغط 85 ضغط جوي وعند درجة حرارة حوالي 300 درجة مئوية. ويبين الشكل (43) رسماً تخطيطياً لمثل هذا المفاعل.



الشكل(43): مفاعل الماء الثقيل المضغوط (PHWR)

11-2-4- مفاعل الماء الخفيف المهدأ بالجرافيت (LWGR):

إنَّ أول مفاعل استخدم لإنتاج الكهرباء كان من النوع المبرد بالماء الخفيف والمهدأ بالجرافيت. وهذا المفاعل ذو أنبوب ضغط كمفاعل الماء الثقيل المضغوط ولكن الأنبوب هنا رأسي. وقد استخدم في هذا المفاعل أكسيد اليورانيوم كوقود بنسبة إثراء بين 1.5 و 2 % , واستخدم الزركونيوم كمادة تغليف. ويتكون المهدئ من قوالب مستطيلة مصفوفة من الجرافيت, في حين يستخدم الماء المنساب خلال أنابيب الضغط كمبرد للمفاعل. يستخدم هذا المبدأ فقط في الاتحاد السوفيتي سابقاً, وتصل القدرة الإجمالية المشغلة حالياً لهذا النوع من المفاعلات إلى حوالي 14965 ميغاواط. ولقد كان مفاعل حادث تشرنوبل الشهير من هذا النوع.

11-2-5- المفاعلات المبردة بالغاز (GCR)، (AGR)، (HTGR):

وقد تم تطوير المفاعلات المبردة بالغاز (GCR) في المملكة المتحدة وفرنسا على ضوء خبرتهما في مفاعلات انتاج البلوتونيوم. ويستخدم في هذه المفاعلات فلز اليورانيوم الطبيعي المغلف بالماجنوكس (سبيكة المغنزيوم) كوقود للمفاعل. ولذلك تسمى مثل هذه المفاعلات أحياناً بمفاعلات الماجنوكس. ولتهدئة هذه المفاعلات يستخدم الجرافيت ، وللتبريد يستخدم غاز ثاني أكسيد الكربون. وتصل درجة حرارة المبرد في المتوسط إلى 400 درجة مئوية، ويصل الضغط إلى حوالي 20 ضغط جوي. وتصل القدرة الإجمالية الحالية لهذا النوع من المفاعلات في العالم إلى 4059 ميغاواط كهرباء.

وقد طورت المملكة المتحدة المفاعل المتقدم المبرد بالغاز (AGR) بالاستفادة من فكرة المفاعلات المبردة بالغاز. وفي هذا المفاعل يستخدم الجرافيت كمهدئ وغاز ثاني أكسيد الكربون كمبرد. ويكون الوقود على شكل حبيبات من ثاني أكسيد اليورانيوم المحتوية يورانيوم-235 بنسبة من 1.2 إلى 2.3% موضوعة في أنابيب من الفولاذ غير القابل للصدأ. وتصل درجة الحرارة عند مخرج غاز التبريد للمفاعل إلى 650 درجة مئوية ، ويصل الضغط إلى حوالي 40 ضغط جوي. يستخدم هذا النوع من المفاعلات في المملكة المتحدة.

يختلف مفاعل الحرارة العالية المبرد بالغاز (HTGR) في مبدأ عمله عن المفاعلات الأخرى في أنه لايستخدم التغليف الفلزي المعتاد للوقود الذي يكون على شكل كريات صغيرة جداً (بقطر 0.2 مم) من $(U,Th)C_2$ أو $(U,Th)O_2$ والتي تكون مغطاة بطبقات من الجرافيت وكربيد السيليكون

كنوع من التغليف. وتخلط هذه الكريات مع الكربون وتدرج في وقود المفاعل بالشكل المرغوب فيه. ويستعمل الجرافيت والهيليوم كمهدئ ومبرد على الترتيب. وتكون درجة إثراء اليورانيوم في حدود 20 إلى 90 %, وتصل درجة الحرارة عند مخرج الهيليوم إلى 740 درجة مئوية, ويصل الضغط إلى 50 ضغط جوي. وقد تم تشغيل مفاعلين فقط من هذا النوع في العالم الأول في الولايات المتحدة الأمريكية بطاقة 330 ميغاواط كهرباء والثاني في ألمانيا بطاقة 300 ميغاواط كهرباء وكلاهما من مفاعلات القوى.

11-2-6- المفاعلات الولودة (LMFBR):

لم تعد المفاعلات التي تعتمد على U^{235} كوقود تلبي الحاجات المستقبلية من الطاقة لأن كمية U^{235} قليلة جداً وقد تنتهي قريباً . من هذا المنطلق عكف العلماء على تطوير نوع جديد من المفاعلات والبحث عن مواد قابلة للانشطار تحل محل هذا النظير النادر . وبعد جهدٍ وعناء تمكنوا من تصميم مفاعل يستخدم U^{238} المتوفر في الطبيعة , فقد قاموا باستبدال قضبان من U^{238} ببعض قضبان التحكم حيث يمكن لبعض النترونات الناتجة أن تمتص من قبل الـ U^{238} ويتم التفاعل التالي

$$U^{238} + {}_0n^1 \rightarrow U^{239}$$

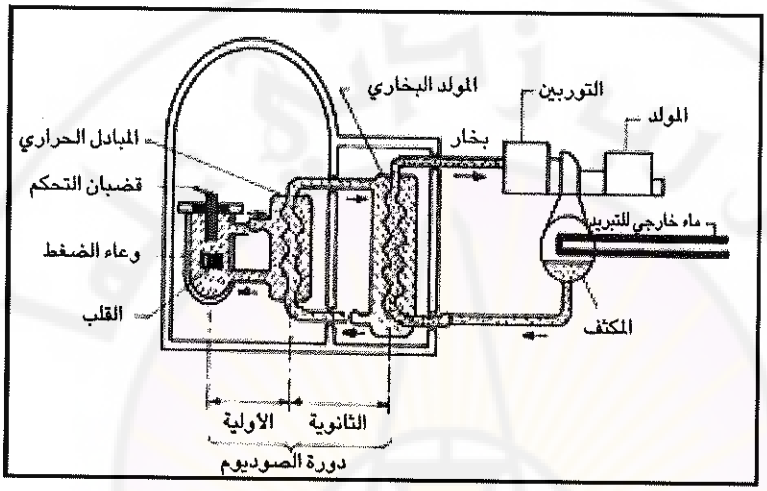
ونحصل على الـ U^{239} الذي يتفكك إشعاعياً وبسرعة معطياً Pu^{239}

$$U^{239} \rightarrow Np^{239} + {}_{-1}e^{\circ}$$

$$Np^{239} \rightarrow pu^{239} + {}_{-1}e^{\circ}$$

والبلوتونيوم مادة قابلة للانشطار مثل الـ U^{235} . فمن ميزات المفاعلات المُولِّدة أنها لا تنتج الطاقة فقط وإنما صُممت للحصول على الـ Pu^{239} وذلك عبر اصطدام النترونات السريعة بنوى الـ U^{238} . وبالتالي أصبح من

الممكن استخدام الـ U^{238} الموجودة في الطبيعة في إنتاج الطاقة . إن المفاعلات الولودة تعمل عند درجات حرارة أعلى وتستحدم المعادن السائلة مثل معدن الصوديوم في عملية التبريد, والشكل(44) يوضح دورة عمل وأجزاء هذا النمط من المفاعلات.



الشكل(44): مفاعل ولود سريع مبرد بالفلز المنصهر(LMFBR)

تعتمد المفاعلات الولودة السريعة المبردة بالفلز المنصهر على استخدام النترونات السريعة, وبذلك لاتوجد هنا ضرورة لاستخدام مهدئ. إن استخدام النترونات السريعة يسمح بتحويل اليورانيوم- 238 إلى بلوتونيوم-239. وتسمى المفاعلات التي يكون فيها كمية المواد الانشطارية الناتجة أكبر من كمية المواد الانشطارية المستهلكة بالمفاعلات الولودة, وبما أنه لايستخدم مهدئ في المفاعل فإن تركيز المواد الانشطارية يجب أن يكون عالياً. وحالياً يستخدم خليط من أكسيدي اليورانيوم والبلوتونيوم كوقود بحيث يحوي 25% من أكسيد البلوتونيوم. يغلف هذا الوقود بأنابيب من الفولاذ غير القابل للصدأ ويتم تبريده بفلز الصوديوم المنصهر, حيث تصل حرارة المبرد (الصوديوم) إلى 620 درجة مئوية, في حين يصل ضغطه إلى 3 ضغط جوي. يحاط قلب

المفاعل بعناصر تحوي غطاءً من ثاي أكسيد اليورانيوم (UO_2) وذلك للحصول على البلوتونيوم بشكلٍ فعّالٍ.

هناك ثلاث دول تملك هذا النوع من مفاعلات القوى وهي: فرنسا (بقدرات 250 و1200ميغاواط كهرباء) والمملكة المتحدة (بقدرة 250 ميغاواط كهرباء) والاتحاد السوفيتي (سابقاً)(300 و600 ميغاواط كهرباء).وما زالت الأبحاث في هذا المجال قائمةً في كلٍّ من الولايات المتحدة الأمريكية وألمانيا واليابان والهند.

11-2-7- المفاعل الغرافيتي (GR):

تمَّ بناء أول مفاعل غرافيتي في الولايات المتحدة عام 1943 حيث يتألف قلب المفاعل من عدد من قطع الغرافيت مجهزة بأكثر من ألف قناة للوقود النووي, حيث يتسع لحوالي 35 طن من اليورانيوم موضوعة على شكل قضبان مغلفة بالألمنيوم ويتم تبريد الوقود بالهواء ويعمل الغرافيت كعاكس للنترونات. يُحاط قلب المفاعل بسماكة 7 أقدام من البيتون مزودة بقنوات لتحريك قضبان التحكم. من أغراض هذا النوع من المفاعلات إنتاج Pu^{239} بدءاً من U^{239} . أما مساوئ هذه المفاعلات فهي تلويث الهواء المستخدم للتبريد عن طريق التفاعل .

$$Ar^{40}(n, \gamma)\ Ar^{41}\ (t_{1/2}=109min)$$

مثل هذا المفاعل أصبح استخدامه محدوداً في الوقت الحاضر .

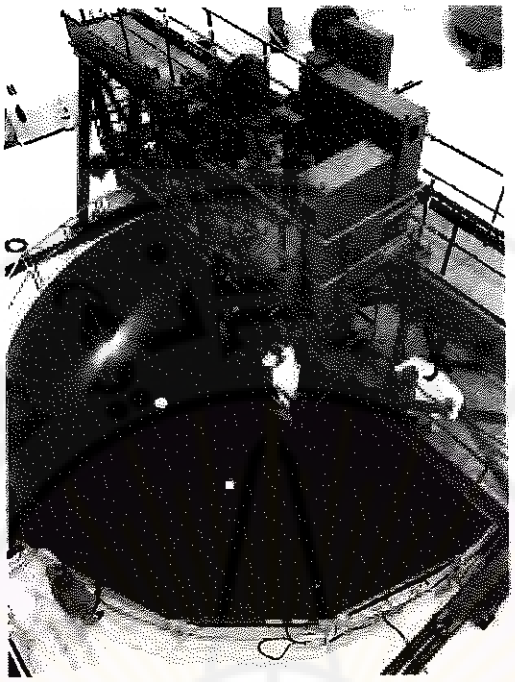
11-2-8- مفاعلات فحص المواد (MTR):

الهدف من بناء هذه المفاعلات هو دراسة سلوك وخواص المواد المختلفة في مستويات عليا من الإشعاع . ويحتوي قلب هذا المفاعل على

اليورانيوم المخصب بنسبة تصل إلى 93% من U^{235} كوقود وكذلك يستخدم الماء العادي فيه كمهدئ ومبرد ، بينما يستخدم البريليوم كعاكس أول والغرافيت كعاكس ثان بسمك 4 أقدام . أما الدرع الواقي المحيط بقلب المفاعل فهو من البيتون بسمك 9 أقدام , والمفاعل مجهز بقنوات لدراسة المواد وفحصها ومن أجل إجراء التجارب . ويتم التحكم بالتفاعل المتسلسل فيه بواسطة قضبان الكادميوم . إن مثل هذه المفاعلات تعاني من مشكلة التسمم بعنصر الكزينون Xe^{135} وهو نظير مشع عمر النصف له 9,2 ساعة ومقطعه العرضي $2,7x10^{6}b$ وهو يتولد أثناء تشغيل المفاعل ويؤدي إلى انخفاض معامل التكاثر بحوالي 0.04 وعند إيقاف المفاعل يصعب تشغيله مجدداً لازدياد نسبة Xe^{135} من تفكك أمه I^{135} ($t_{½}$=6,7h), حيث ينخفض معامل التكاثر بنسبة 0.3 ولا يستعيد المفاعل قدرته على العمل إلا بعد مرور يومين على الأقل.

11-2-9- مفاعلات بركة السباحة (LWR):

في هذا النوع يُعلق قلب المفاعل في بركة من الماء إلى عمق حوالي 25 قدماً, حيث يعمل الماء كمهدئ ومبرد وعاكس ودرع واق, الشكل(45). أما الوقود فهو يتألف من اليورانيوم المخصب U^{235} بنسبة بين (20-93) % ومحاط بالألمنيوم, وتقدر الكتلة الحرجة بـ 2500 غرام من U^{235} وحجم قلب المفاعل بحوالي 2 قدم^3 . يتم التحكم بالمفاعل بقضبان مصنوعة من الكادميوم وكربيد البور. وتتراوح قدرة هذه المفاعلات بين 100 كيلوواط و 5 مليون واط . ويبلغ سيل النترونات فيها حوالي $10^{13}x5$ نترون / سم^2 / ثا.

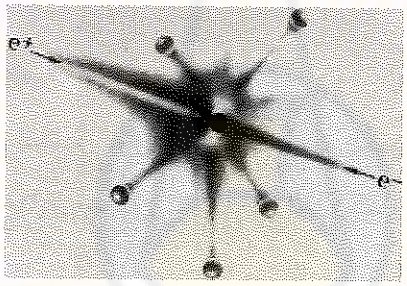


الشكل(45): صورة لمفاعل نووي يستخدم الماء الخفيف رمزه (LWR), حيث قلب المفاعل مغمور دائماً في الماء كما هو موضح.

Damascus University

11-3- المُسرّعات النووية:

يستخدم الفيزيائيون مسرعات الجسيمات لدراسة طبيعة المادة والطاقة, حيث تُسرع الجسيمات المشحونة (الأيونات) عبر مجال كهربائي في أنبوب مفرّغ أجوف, وفي نهاية المطاف يتم صدم كل أيون مع هدف ثابت (Target) أو جسيم متحرك آخر, ومن تحليل نتائج الاصطدام يستطيع العلماء فهم التفاعلات التي تحكم الكون على المستوى مادون الذري. إن مسارات الجسيمات المسرّعة يمكن أن تكون مستقيمة أو حلزونية (لولبية) وإما دائرية. إن كلا المسرِّعين السيكلوترون (ذو المسار الحلزوني) والسنكروترون (ذو المسار الدائري) يستخدمان حقلاً مغنطيسياً قوياً للسيطرة على مسارات الجسيمات.



على الرغم من أن طريقة تحطيم (أو صدم) الجسيمات بالمسرِّعات يمكن أن تبدو للوهلة الأولى تقنية شاذة لدراسة هذه الجسيمات, إلاّ أنها أعطت العلماء (أكثر من أي طريقة أخرى) المزيد من المعرفة حول الكون على المستوى مادون الذري. ولقد تم صنع أنواع عديدة من المسرِّعات التي تتمايز عن بعضها بعضاً بآلية تسريعها للجسيمات وبأنواع الجسيمات المسرّعة وطاقاتها المكتسبة. فعلى سبيل المثال يمكن للجسيمات المشحونة أن تتسارع في مجال كهربائي ساكن عن طريق وضع الأقطاب الكهربائية عند نهايتي أنبوب مفرَّغ مع تطبيق فرق كمون عالٍ, حيث تمكن بذلك الفيزيائيان البريطانيان

J.D.Cockcroftand , E.Walton من تسريع البروتونات إلى 250.000ev. مسرّع آخر كهربائي ساكن هو مسرّع فان دي غراف الذي تم تصنيعه من قبل الفيزيائي الأمريكي Robert Jemison Van de Graaff. إن هذا المسرّع يستخدم المبادئ نفسها المستخدمة في مُولِّد فان دي غراف, وإن آلية التسريع فيه تتم عبر تطبيق فرق كمون (جهد) بين قطبين يتم عبرهما نقل الشحنات على حزام متحرك وتسريعها إلى طاقات عالية وأعلى من (15Mev) (15مليون إلكترون فولت).

يتكون المسرّع بصفة عامة من مصدر للجسيمات المشحونة مثل إلكترونات منبعثة من فتيلة ساخنة أو من ذرات متأينة حيث تنطلق هذه الجسيمات المشحونة تحت تأثير فرق جهد كهربائي يتراوح من 1 إلى 10 مليون فولت. يتم تحديد مسار هذه الجسيمات المسرّعة لتكون شعاع ينطلق باتجاه الهدف, ويكون داخل المسرّع مفرغ من الهواء (تحت ضغط منخفض) لتفادي تشتت الجسيمات المسرّعة عند تصادمها مع ذرات الهواء.

تصنف المسرّعات إلى ثلاثة أقسام بناءً على الطاقة المستخدمة للتسريع وهي:

11-3-1- المسرّعات المنخفضة الطاقة:

حيث تنتج جسيمات مسرّعة بطاقة تتراوح بين 10 إلى 100 مليون إلكترون فولت وفي أغلب الأحيان تستخدم هذه المسرّعات لدراسة تشتت الجسيمات المسرّعة بتفاعلها مع مادة الهدف.

11-3-2- المسرّعات ذات الطاقة المتوسطة:

حيث تنتج شعاع من الجسيمات المسرّعة بطاقة تفوق 100 مليون إلكترون فولت لتصل 1000 مليون إلكترون فولت. وعند هذه الطاقة يتم دراسة تصادم

النكلونات مع أنوية العناصر وقد ينتج عن هذه التصادمات توليد جسيمات أخرى مثل الميزون وفي هذا المسرِّعات يتم دراسة القوى النووية والتحقق من تركيب النواة .

11-3-3- المسرّعات ذات الطاقة العالية:

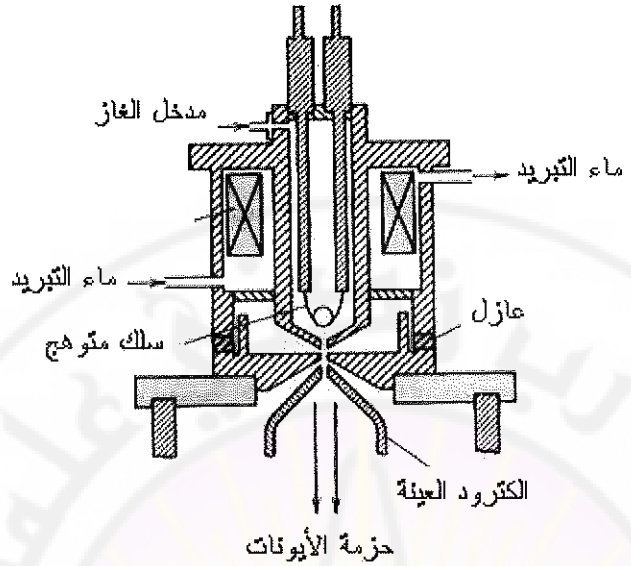
وهي تنتج شعاع من الجسيمات المسرّعة بطاقة تفوق 1000 مليون إلكترون فولت. ويكون الغرض من هذه المسرِّعات هو إنتاج جسيمات جديدة من خلال اصطدام هذه الجسيمات المسرّعة بأنوية العناصر ومن ثم دراسة خصائص الجسيمات الناتجة.

وقد تم تصميم مسرّعات نووية تصل طاقة التسريع فيها إلى 10000000 إلكترون فولت.

11-4-الأجزاء الرئيسية للمسرّع:

11-4-1- مصدر الجسيمات المشحونة(Ion source):

وهو المصدر الرئيسي للجسيمات المسرّعة ويتكون من غاز متأين بواسطة التفريغ الكهربائي ويتم استخلاص الجسيمات ذات الشحنة الموجبة من خلال الكترود سالب ذي جهد 10000فولت, الشكل(46).



الشكل(46): مصدر الجسيمات المشحونة

11-4-2- ناقل الشعاع (beam optics):

وهو عبارة عن عدد من الموجهات المكونة من أجهزة كهربائية ومغنطيسية لتوجيه الجسيمات المسرّعة في المسار المحدد لها داخل المسرِّع وهي تشبه العدسات في الضوء وتعتمد على قوة لورنز Lorentz force

$$F = q(vxB)$$

11-4-3- الهدف (Target):

وهو المادة التي توضع في نهاية المسرِّع بهدف التجربة تحت الدراسة. فمثلاً تجربة nuclear spectroscopy حيث يتم دراسة مستويات الطاقة ومساحة المقطع فإن الهدف في هذه الحالة يكون شريحة سمكها 10 ميكرون، أما في حالة دراسة إنتاج جسيمات ثانوية من تصادم الأنوية المسرّعة مع الهدف فإن الهدف يكون سميكاً يصل سمكه إلى 10 سنتيمتر بحيث يمتص طاقة

الجسيمات المسرّعة. وفي كلا الحالتين يتم تبريد الهدف حتى لاتتغير درجة حرارته من جرّاء تصادم الجسيمات المسرّعة معه .

11-4-4- الكاشف (Detector):

وهو الجزء الأساسي الذي تعتمد عليه القياسات المراد الحصول عليها من التجربة مثل تحديد نوعية الجسيمات الناتجة من التصادم وطاقتها وزمن بقائها وتوزيعها الزاوي.

11-5- أنواع المسرّعات:

1) المسرِّع الكهروستاتيكي Electrostatic accelerator

2) مسرِّع السيكلوترون Cyclotron accelerator

3) المسرِّع الخطي Linear accelerator

4) مسرّع السنكروترون Synchrotrons accelerator

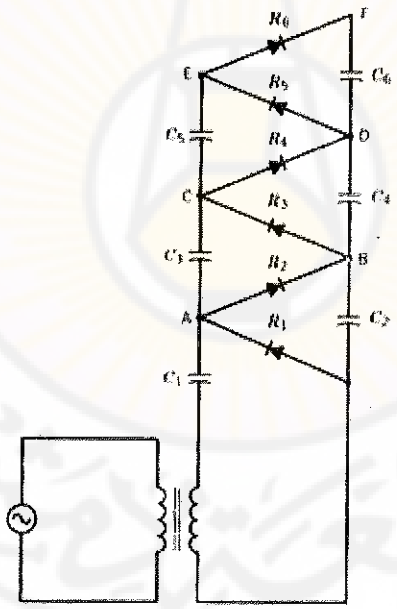
5) المسرِّع التصادمي Colliding-Beam accelerator

11-5-1- المسرّع الكهروستاتيكي Electrostatic accelerator

أبسط أنواع المسرِّعات التي تستخدم لتسريع الجسيمات المشحونة خلال فرق

جهد ثابت من خلال العلاقة $E = qV$ حيث V فرق جهد التسريع ويصل إلى 10 مليون فولت و q شحنة الجسيمات المسرّعة و E الطاقة الحركية للجسيمات. وهذا يعني أن الطاقة التي يمكن أن يكتسبها الجسيم المسرّع تصل إلى 10 مليون إلكترون فولت لكل وحدة شحنة وهذه الطاقة كافية لدراسة التركيب النووي للنواة.

إنّ أول مسرّع تم تصميمه على هذا الأساس كان في 1932 بواسطة العالمين Cockcroft and Walton حيث وصل فرق جهد التسريع إلى 800 ألف فولت واعتمد مبدأ عمله على شحن مكثفات على التوازي ومن ثم تحويلها إلى توصيل على التوالي من خلال الدائرة الموضحة في الشكل(47).

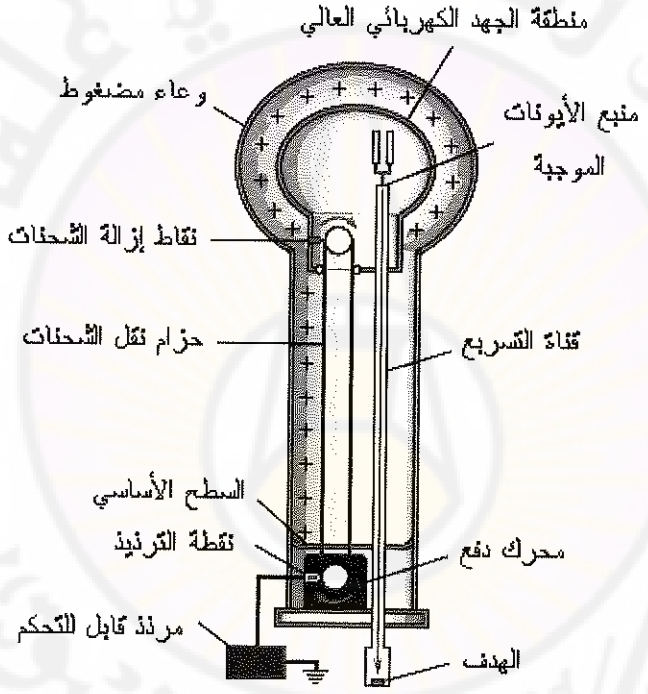


الشكل(47)

وتسمى هذه الطريقة بمضاعفة فرق الجهد voltage multiplication واستخدم في أول تجربة نووية في التفاعل التالي

$$p + Li^7 \rightarrow He^4 + He^4$$

وفي الوقت الحالي فإن هذا النوع من المسرِّعات يعتمد على مُولِّد فان ديجراف الذي طوره العالم Van de Graaff في عام 1932 كما في الشكل(48).



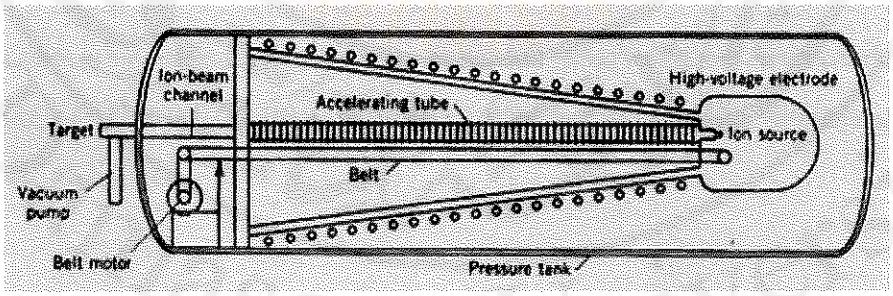
الشكل(48): مُولِّد فان ديجراف (Van de Graaff generator)

وتعتمد فكرة عمل مُولِّد فان ديجراف على المبادئ الكهربائية الساكنة حيث نعلم أن الشحنة الكهربائية تستقر على سطح الموصل في الحالة الكهروستاتيكية وتنقل الشحنة الكهربائية من خلال حزام من مادة عازلة وفي أغلب الأحيان من الحرير ويحصل الحزام على الشحنة الكهربائية من جهاز

corona discharge وهو رأس مدبب من مادة موصلة مطبق عليه فرق جهد عالي يصل إلى 20 ألف فولت وعند الرأس المدبب حيث تزداد كثافة الشحنة عليه يحدث تفريغ كهربائي يعمل على تأيين الهواء فتندفع الأيونات الموجبة بقوة التنافر في اتجاه الحزام المتحرك حاملاً شحنة موجبة إلى القشرة الكروية التي تشكل مكثف كهربائي مع الأرض. فعندما يتم شحن الموصل الداخلي تنتقل الشحنة إلى القشرة الكروية المتصلة مع الموصل الداخلي كما في الشكل(49) وتستقر الشحنة على السطح الخارجي للقشرة وتعتمد قيمة الشحنة على العلاقة

$$V = Q/C$$

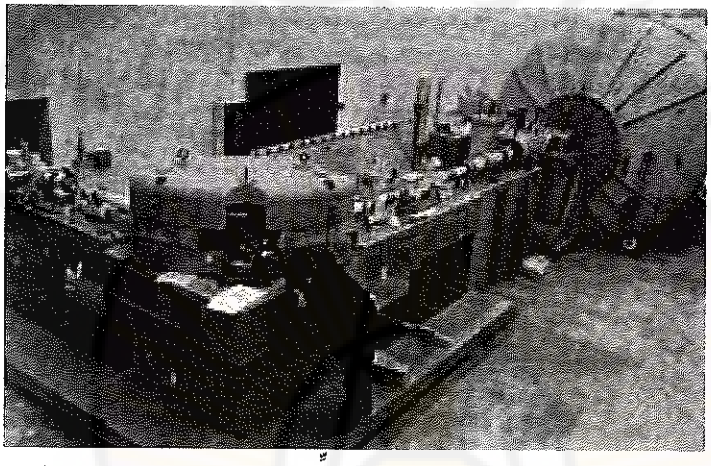
حيث C سعة المكثف و Q الشحنة و V فرق الجهد الناتج. ومن الناحية النظرية فإنه يمكن أن يزداد الجهد الكهربائي إلى مالا نهاية لأن سعة المكثف لانهائية وكلما ازدادت قيمة الشحنة ازدادت قيمة الجهد, ولكن من الناحية العملية فإن قيمة عالية للجهد الكهربائي تؤدي إلى تأيين الهواء ويصبح موصل مما يؤدي إلى وضع حد لزيادة فرق الجهد الكهربائي الممكن الحصول عليه. وللتغلب على هذه المشكلة يتم وضع مُولِّد فان ديجراف في حاوية تحتوي على غاز عازل كهربائياً مثل غاز SF_6 عند ضغط 10 إلى 20 ضغط جوي.



الشكل(49)

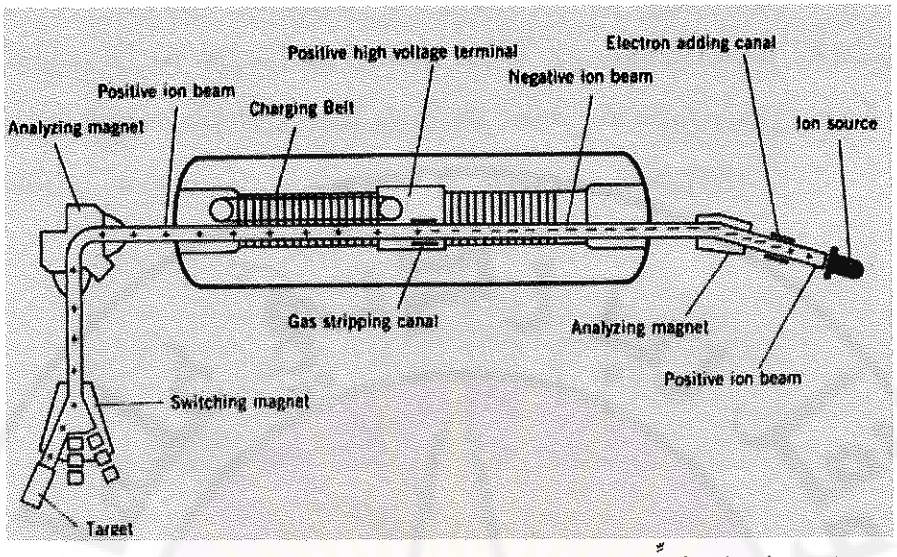
يمتاز مُولِّد فان ديجراف عن مُولِّد والتن كوكفورت بثبات قيمة فـرق الجهـد وهذه مهمة جداً في دراسة مساحة مقطع التصادمات النووية لدراسة مستويات الطاقة النووية .

تمتلك العديد من الجامعات الأمريكية والمراكز البحثية مُولِّد فان ديجراف وفي الصورة التالية نلاحظ مختبر مجهز بمُولِّد فان ديجراف.



حيث نلاحظ على اليمين من الصورة مُولِّد فان ديجـراف داخـل مـستودع يحتوي على غاز عازل والجسيمات المسرّعة تنطلق داخـل الأنبـوب وفـي الوسط مغناطيس يعمل على دوران الجسيمات المعدلة باتجاه الهـدف علـى يسار الصورة .

من المُولِّدات المتطورة المعتمدة على مُولِّد فان ديجراف مُولِّـد تانـدم فـان ديجراف Tandem Van de Graaff والموضح في الـشكل التخطيطـي التالي شكل(50).



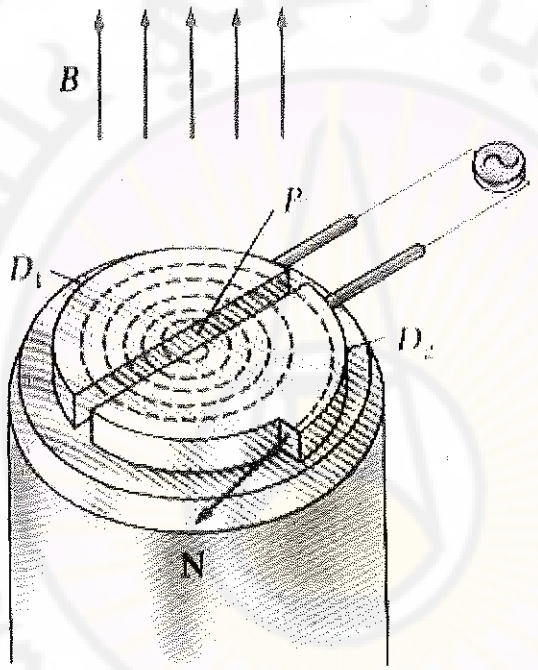
الشكل(50): مُولِّد تاندم فان ديجراف (Tandem Van de Graaff)

ويمكن الحصول على فرق جهد 20 مليون فولت ويستخدم هذا المسرِّع في دراسة تفاعل الأيونات الثقيلة. ونلاحظ على يسار الصورة المغناطيس الذي يعمل على حرف الجسيمات المسرّعة وكذلك المغناطيس الذي يعمل على توجيه الجسيمات إلى عدة مسارات مختلفة وكل مسار يخصص لتجربة محددة .

11-5-2- مسرّع السيكلوترون: Cyclotron accelerator

يُعدُّ جهاز السيكلوترون جهازاً حديثاً تم تصميمه في عام 1934 ويستخدم في تسريع الجسيمات المشحونة إلى سرعات هائلة تستخدم في تجارب التصادمات النووية, حيث يستخدم هنا أيضاً كلٌّ من المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي لهذا الغرض.

فكرة العمل: يتكون السيكلوترون من وعاءين منفصلين على شكل الحرف الإنجليزي D مفرغين من الهواء لتقليل احتكاك الجسيمات المسرّعة مع جزيئات الهواء. يطبق فرق جهد متردد على طرفي الوعاءين ويطبق مجال مغناطيسي عمودي على الوعاءين كما هو موضح في الشكل(51).



الشكل(51):رسم تخطيطي لمسرّع السيكلوترون(**Cyclotron accelerator)**

يتم إطلاق الجسيمات المراد تسريعها في وسط المنطقة الفاصلة بين الوعاءين لتأخذ مساراً دائرياً وتعود إلى الوسط الفاصل في فترة زمنية قدرها T/2 حيث T هو الزمن الدوري .

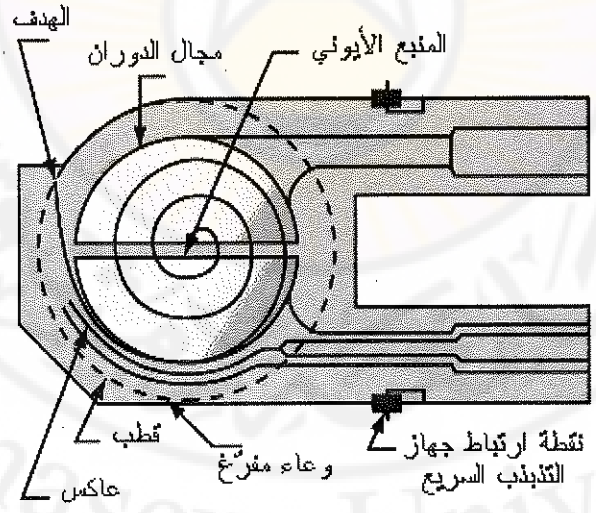
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

وبضبط تردد فرق الجهد المطبق بين الوعاءين لقلب قطبيتهما ليتوافق مع وصول الجسم المشحون للمنطقة الفاصلة حيث يكون مجالاً كهربائياً يكسب الشحنة دفعة لتزيد من سرعتها وبالتالي يزداد نصف قطر الدوران للجسم المشحون تدريجياً حتى يصل إلى نصف قطر الوعاء وعندها يخرج الجسيم المشحون من المسرّع (السيكلوترون) بسرعة كبيرة, كما في الشكل(52), وتعتمد على المعادلة.

$$v = qBr/m$$

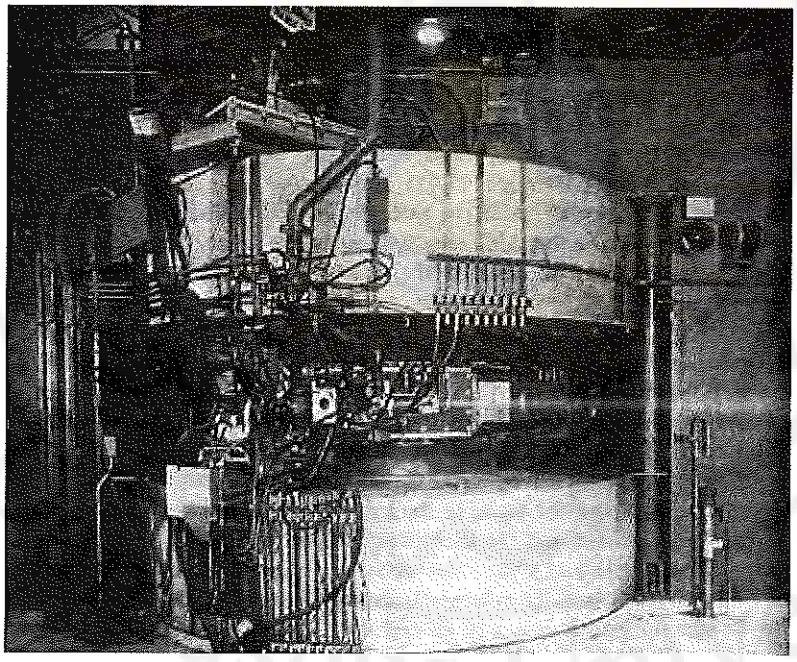
حيث v سرعة الجسيم, q شحنته, m كتلته, r نصف قطر دورانه, B شدة الحقل المغناطيسي المطبق.

وهذا يعني أن سرعة الجسيمات المسرّعة تتناسب طرداً مع المجال المغناطيسي المطبق ومع نصف القطر.



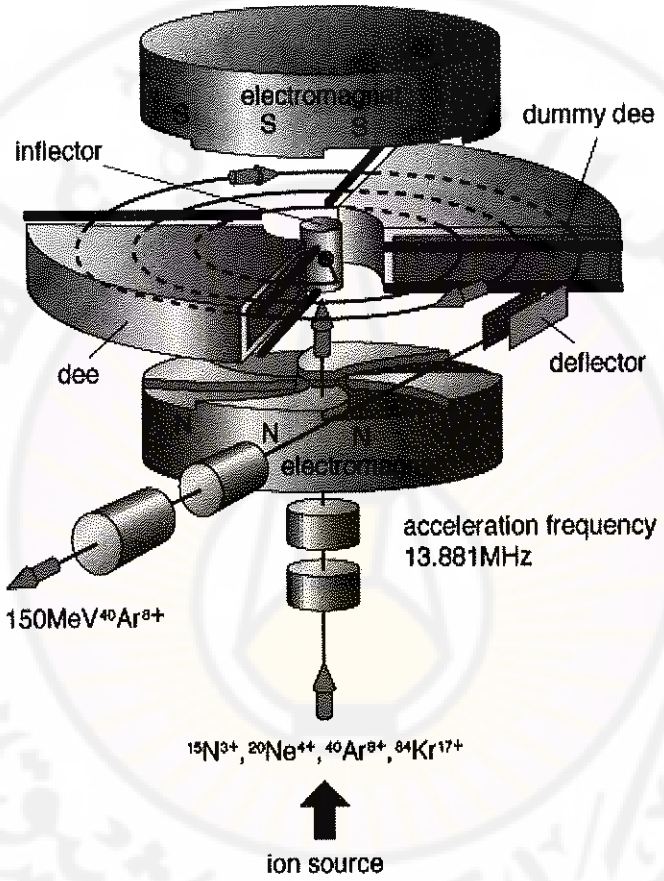
الشكل(52): رسم توضيحي لآلية تسريع الأيونات في السيكلوترون

إنَّ أول مسرّع تم تصنيعه على هـذا الأسـاس بواسـطة Lawrence and Livingston في بيركلي بالولايات المتحدة في 1931 وكان نصف قطـره 12.5سم والمجال المغناطيسي 1.3 تسلا وقد أنتج بروتونات مسرّعة بطاقة 1.2 مليون إلكترون فولت. وبعد عدة سنوات تم تطوير مسرّع السيكلوترون ليصل نصف قطره إلى 35 سم وطاقة تسريع البروتونـات تـصل إلـى 10 مليون إلكترون فولت. وفيما بعد تم بناء مسرّع سيكلترون نصف قطـره 75 سم وطاقة تسريع البروتونات تـصل إلـى 20 مليـون إلكتـرون فولـت . في الصورة التالية,الشكل(53), يبدو مـسرّع الـسيكلوترون فـي مختبـر Argonne National Laboratory حيث يتـضح المغنـاطيس العلـوي والسفلي كذلك تُظهر الصورة شعاع الجسيمات الذي ينطلق من المسرِّع نتيجة تأيينه للهواء.



الشكل(53)

كما تم مؤخراً اصطناع مسرّع سيكلوترون جديد ومتطور قابل للتزويد بأنواع أيونية مختلفة وتسريعها في فترة زمنية قصيرة ويُرمز له بـ AVF-Cyclotron (الشكل54).



الشكل(54): رسم تخطيطي لمسرّع AVF-Cyclotron ذي حزمة الأيونات المختلطة.

فمثلاً يمكن لهذا المسرِّع تسريع حزمة من الأيونات المختلفة مثل N , Ne , Ar , Kr حيث يتم توليدها من المنبع وحقنها في السيكلوترون حيث يتم تسريعها.

إنّ أيونات الأرغون المتسارعة يمكن نزعها عند تحديد قيمة التردد النوعية وجعلها مساوية لـ (13.881 MHz), والجدول(4) يُري العلاقة بين تردد التسريع وطاقة حزم الأشعة المختلفة عند القيمة (M/Q=5).

جدول(4): طاقة حزم الأيونات المختلفة عند القيمة (M/Q=5)

ion	M/Q	acceleration frequency (MHz)	energy (MeV)
nitrogen ($^{15}N^{3+}$)	4.9995	13.868	56
neon ($^{20}Ne^{4+}$)	4.9976	13.873	75
argon ($^{40}Ar^{8+}$)	4.9948	13.881	150
krypton ($^{84}Kr^{17+}$)	4.9354	14.047	323

إنّ الأنواع الأربعة للأيونات حول القيمة (M/Q=5) تمتلك ترددات تسريع نوعية قريبة من بعضها بعضاً. وإن قيمة التردد RF التي تحدد الأيون يمكن أن تُضبط وتُعدل بفترة قصيرة. وبمعنى آخر يمكن القول إنّ عدة أنواع مختلفة من الأيونات يمكن تسليمها لمستخدميها على التوالي في زمن قصير.

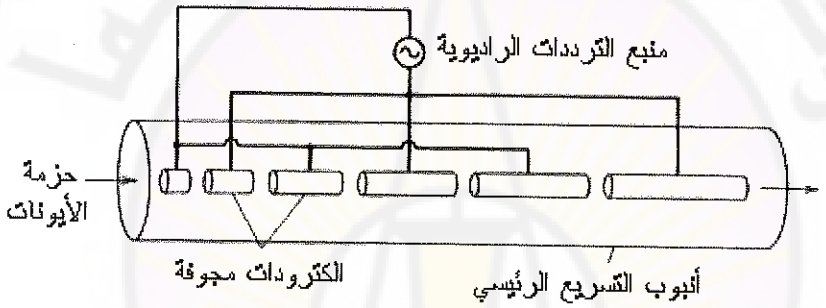
إنّ المسرِّع AVF-Cyclotron يمكن أن يُسرّع تشكيلة واسعة من الأيونات بدءاً من الأيونات الخفيفة مثل الهدروجين والهليوم وانتهاءً بالأيونات الثقيلة مثل الأرغون والكزينون. وفي مختبرات JAERI يجري حالياً في مجالات

علم المواد والتقنية الحيوية استخدام شتى أنواع الأيونات المسرّعة بالسيكلوترون. إن هذا السيكلوترون يمتلك أكثر من 100 متحوّل تجريبي مثل الحقل المغنطيسي الحلزوني الرئيسي وتردد التسريع اللذين يجب أن يُضبطا بشكل دقيق لتسريع صنف أيوني معين. وعندما يقتضي الأمر تغيير الصنف الأيوني يتطلب ذلك ما يقارب الساعتين لإعادة ضبط المتغيرات العملية بشكل دقيق وتحسينها. لذا فإنه من غير المناسب لمسرّع السيكلوترون AVF التسريع المتعاقب لأصناف عديدة من الأيونات. ولقد تم التغلب بنجاح على صعوبات وعوائق السيكلوترون AVF في المسرِّعات الأيونية المعدّة لإجراء تطبيقات التشعيع المتقدمة في مدينة Takasaki اليابانية وذلك بتطوير تقنية تسريع حزمة الأيونات المختلطة, التي تعد واحدة من أكثر الطرائق كفاءةً لتغيير نوع الأيون و/أو الطاقة.

إن حزم الأيونات المختلفة والمكونة من عدة أيونات تمتلك قيمة متشابهة جداً للنسبة M/Q (نسبة الكتلة إلى الشحنة) , وهي قد تم توليدها من مصدر أيوني يعتمد على الرنين (أو التجاوب) الإلكتروني في السيكلوترون (ECR), ويتم حقنها في السيكلوترون في الوقت نفسه ومن ثم يتم إخراجها منفصلة عن بعضها وذلك بضبط الحقل المغنطيسي بشكل دقيق أو عن طريق تغيير طفيف في تردد التسريع (الذي هو معين ومحدد بالنسبة لكل نوع من الأيونات). وطالما أنه بالإمكان تغيير التردد بشكل طفيف في زمن قصير (أقل من 30 ثانية) فإن العديد من أنواع الأيونات يمكن أن تُجهّز بالتتابع من أجل عملية التشعيع. إن النجاح في تطوير تقنية تسريع الحزمة المختلطة أحرز قفزة نوعية في كفاءة العمل بالنسبة للسيكلترون AVF في مختبرات TIARA في Takasaki.

11-5-3- المسرّع الخطي: Linear accelerator

يُدعى هذا المسرّع باسم لیناك Linac وفيه يتم تسريع الجسيمات المشحونة على مراحل بواسطة فرق جهد متردد كما في السيكلوترون ولكن الفرق أن مسار الجسيمات المشحونة يكون في خط مستقيم حيث لا نحتاج إلى المغناطيس الباهظ التكلفة. يتكون المسرّع الخطي كما في الشكل التوضيحي التالي, شكل(55), من عدة سلاسل من الالكترودات ذات الشكل الاسطواني والتي ترتبط ببعضها بعضاً من خلال مصدر فرق جهد متردد.



الشكل(55): رسم توضيحي للمسرّع الخطي

تكتسب الجسيمات المسرّعة طاقتها من الفجوة بين الأسطوانات نتيجة لفرق الجهد المطبق عليها وفي داخل الأسطوانة حيث لا يوجد مجال تندفع الجسيمات تحت تأثير قوة اندفاعها لفترة من الزمن تساوي نصف الزمن الدوري لفرق الجهد المتردد لحين تغير قطبية فرق الجهد المطبق على الأسطوانة التي تليها .

وتعتمد فكرة عمل المسرّع الخطي على التزامن بين الطاقة التي يكتسبها الجسيم المشحون بين الاسطوانات مع المجال الكهربائي المتردد المطبق على الأسطوانات ولضبط هذا التزامن فإن طول الأسطوانة يصمم بناء على سرعة

الجسيمات المسرّعة بعد كل مرحلة، فإذا كان نصف الزمن الـدوري للجهـد المطبق هو t/2 فإن طول الأسطوانة رقم n يعطى بالمعادلة.

$$L_n = v_n t/2$$

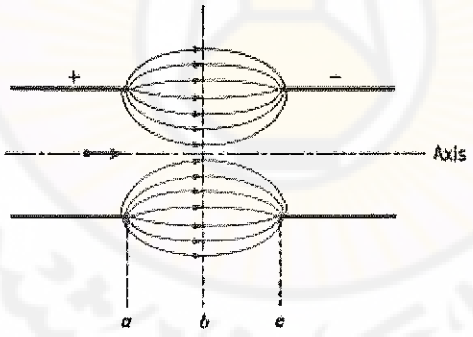
والطاقة الحركية المكتسبة للجسيمات بعد مرورها من الأسـطوانة رقـم n يعطى بالعلاقة

$$1/2\ m(v_n)^2 = neV_o$$

ومن المعادلتين السابقتين يكون طول الأسطوانة رقم n هو:

$$L_n = \left(\frac{neV_o}{2m}\right)^{1/2} t$$

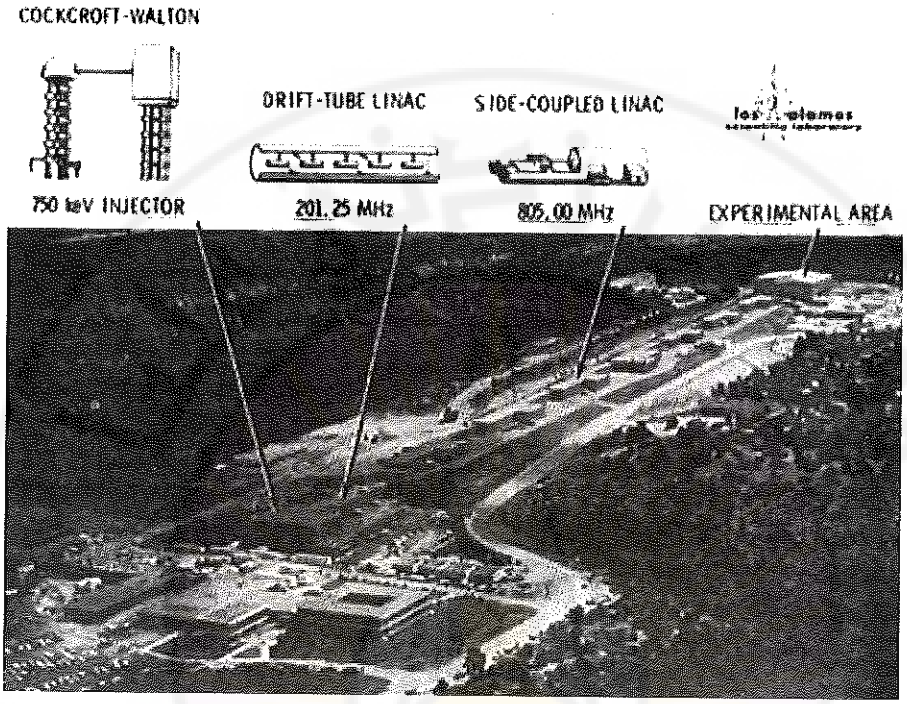
وعند خروج الجسيمات المسرّعة من الأسطوانة تتعرض إلى مجال كهربائي كما في الشكل التوضيحي التالي شكل(56).



الشكل(56)

وكمثال على المسرِّع الخطي هو المسرِّع الموجود في جامعة ستانفورد فـي الولايات المتحدة والذي أنتج في 1967 ضمن برنامج أبحاث فيزياء الطاقـة العالية وهذا المسرِّع يعطي الإلكترونات المسرّعة طاقة تصل إلى 1.2 جيجا

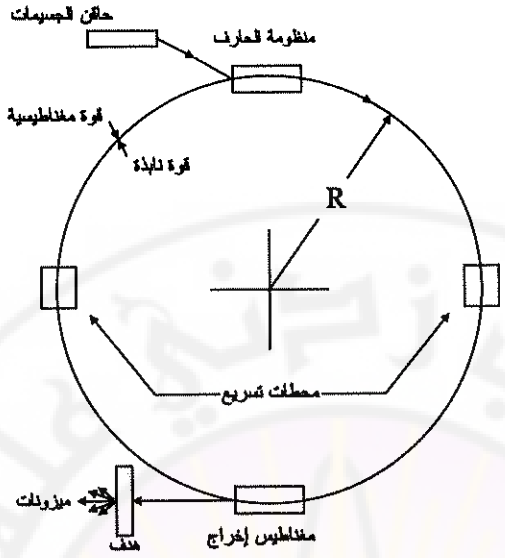
إلكترون فولت $1.2x10^9$ eV والتجارب التي عُملت بواسطة هـذا المسرّع على تشتت الإلكترونات المسرّعة لتحديد نصف قطر النواة .



مسرّع خطي في Los Alamos Meson Physics Laboratory يبلغ طوله نصف ميل

11-5-4- مسرّع السنكروترون Synchrotrons accelerator

السنكروترون جهاز دائري الشكل يستخدم لتسريع الجسيمات، كالإلكترونات أو البروتونات أو أيونات الذرات الثقيلة، إلى سرعات قريبة جداً من سرعة الضوء، وذلك بتمرير هذه الجسيمات بشكل متكرر عبر حقل كهربائي متناوب ذي تردد ثابت أو متغير, حيث ترسم مساراً دائرياً ذا نصف قطر ثابت عملياً.



الشكل(57) الأجزاء الأساسية لمسرع السنكروترون

يبين الشكل(57) الأجزاء الأساسية لمسرع السنكروترون وهي كما يلي:

1ـ حاقن الجسيمات: وفيه تتولد الجسيمات التي يُراد تسريعها، كالإلكترونات أو البروتونات أو الأيونات، وتعطى سرعة ابتدائية عالية عن طريق مسرع خطي.

2ـ حجرة مفرغة من الهواء تأخذ شكل أنبوب دائري نصف قطره كبير، قد يصل في حال البروتونات إلى مئات الأمتار.

3ـ مغانط كهربائية لتوليد حقل مغنطيسي B عمودي على مسار الجسيمات، مما يجعلها ترسم مساراً دائرياً يرتبط نصف قطره R بشحنة الجسيم |e| وسرعته V وكتلته m بالعلاقة:

$$R = mV/eB \quad (1)$$

وهي علاقة تنشأ من توازن جداء كتلة الجسيم m بتسارعه المركزي V^2/R مع القوة ذات المنشأ المغنطيسي, وتجدر الإشارة إلى أن رسم الجسيم المسار الدائري الذي طوله $2\pi R$ بالسرعة V، يتم خلال زمن T مستقل عن سرعة الجسيم، وذلك لأن:

$$T=2\pi R/V =2\pi m/eB \quad (2)$$

وهذا أمرٌ مهمٌّ في تصميم مسرع السنكروترون، طالما أن سرعة الجسيمات لاتقترب من سرعة الضوء، وإذا حدث ذلك فيجب أخذ تغير الكتلة m بتغير السرعة وفقاً لمتطلبات النظرية النسبية، التي تنص على أن كتلة الجسيم السكونية m_0 تغدو m عند السرعة v بحسب العلاقة:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \quad (3)$$

حيث تمثل c سرعة الضوء في الخلاء.

4 ــ واسطة تركيز focusing للجسيمات: وهي حقل مغنطيسي B عمودي على المسار، ويلاحظ من العلاقة الأخيرة (3) أن زيادة v تؤدي إلى زيادة m، ولكي يبقى نصف قطر مسار الجسيمات ثابتاً، فلابدَّ من زيادة B بازدياد السرعة، وهكذا يضبط مسار الجسيمات على مسار دائري ذي نصف قطر ثابت عملياً.

5 ــ محطات تسريع للجسيمات acceleration stations: وقد يوجد على المسار أكثر من محطة تكسب الجسيمات التي تمر فيها سرعة إضافية e|E| بفضل القوة التي تخضع لها. يُشار هنا إلى أن الحقول الكهربائية المستخدمة E هي حقول متناوبة، غالباً ما تكون ثابتة التردد f. وينبغي اختيار التردد بحيث يتوافق وصول الجسيم إليها وهي في الاتجاه المناسب لتسريعه، أي متزامناً مع وصوله.

6 ــ واسطة إخراج ejection system ولها شكل صفيحة يطبق عليها جهد كهربائي مناسب، يجذب الجسيمات ويقذفها خارج المسرِّع، وقد يستخدم حقل مغناطيسي مناسب لهذه الغاية كما هو واضح في الشكل.

تصدر الشحنات الكهربائية عند تسريعها إشعاعاً كهرمغنطيسياً، وهذا ما يحدث أيضاً لدى اقتراب إلكترون من نواة ذرة مثلاً، ويسمى الإشعاع عندها إشعاع الكبح، وهو ما يحدث كذلك في هوائيات الإرسال الإذاعي والتلفزيوني.

أما الإشعاع الصادر جراء تسريع الجسيمات في مسار دائري فيسمى بالإشعاع السنكروتروني synchrotron radiation وهو إشعاع ينبغي التعامل معه بحذر، لذا تبنى المسرِّعات تحت الأرض لحماية العاملين من أخطاره.

إن الإشعاع السنكروتروني غير مرغوب فيه في المسرِّعات، لأنه يمثل ضياعاً للطاقة التي تكتسبها الجسيمات، ويمكن تقليل هذه الضياعات عن طريق زيادة نصف قطر المسرِّع R بحيث يغدو التسارع النابذ v^2/R صغيراً.

يُشار إلى أن ضياع الطاقة بالإشعاع Δw يتناسب مع القوة الرابعة للطاقة التي يبلغها الجسيم، ويعطى في حالة تسريع الإلكترونات في مسار دائري نصف قطره R بالعلاقة:

$$\Delta w = 8.85 \times 10^{4} w^{4} / R$$

حيث تقدر w بالـ GeV و R بالأمتار.

يمتلك الإشعاع السنكروتروني من جهة أخرى مميزات تجعله مصدر مميز للإشعاع، فهو مصدر ممتاز للأمواج الكهرمغنطيسية عالية التردد متحكم فيه، وهو منبع للأشعة السينية خال من الذُّرى، ولايحتاج إلى تجميع، إذ إن إشعاعاته متوازية فيما بينها، وهذا ما يميزه من الإشعاع الصادر عن أنابيب توليد الأشعة السينية التقليدية. كما يتصف الإشعاع السنكروتروني بشدته العالية واستقطابيته المرتفعة, كذلك يمتاز بحزمته الضيقة التي لاتتجاوز أبعادها ميلمتراً مربعاً واحداً. إن هذه الصفات كلها مجتمعةً جعلت من الإشعاع السنكروتروني أداة فعالة في دراسة انتظام الذرات في الجزيئات وفي البلورات.

يُشار أيضاً إلى أن للسنكروترون استخدامات أخرى، منها: توليد الجسيمات الأولية كالميزونات، كما تستخدم الجسيمات العالية الطاقة بفضل سلوكها سلوك أمواج لدراسة بنية الجسيمات الأخرى، لمقدرة التمييز العالية التي تتصف بها عندئذ.

وأخيراً فهي تستعمل لتوليد نظائر مشعة قصيرة عمر النصف يستفاد منها في التطبيقات الطبية والتشخيصية والعلاجية، إضافة إلى التطبيقات

الصناعية كتشعيع الأغذية والمواد البوليميرية لإكسابها صفات فيزيائية جديدة ومفيدة.

11-5-5- المسرّع التصادمي: Colliding-Beam accelerator

يستخدم المسرِّع التصادمي في مجال الفيزياء النووية ذات الطاقة العالية لإنتاج جسيمات جديدة من خلال تحويل أكبر قدر ممكن من طاقة حركة الجسيمات المسرّعة إلى طاقة تكوين (كتلة) لجسيمات جديدة. فبفرض أنه لدينا شعاع من الجسيمات مثل البروتونات تم تسريعها لتصطدم بهدف من ذرات الهدروجين لتنتج جسيمات جديدة X كما في المعادلة التالية :

$$P + P \longrightarrow P + P + X$$

فالمسرِّع التصادمي هو جهاز يقوم بتسريع وتخزين أشعة الجسيمات الأولية مثل البروتونات والإلكترونات. فلو فرضنا أن حزمتين من الأشعة تسيران باتجاهين متعاكسين بسرعة تقارب سرعة الضوء وموجهة بحيث تتصادم مع بعضها ضمن مركز مسار دائري الشكل, ففي مثل هذا التفاعل ستتجمع الطاقة المحمولة بواسطة الجسيمات في حجم صغير جداً, الأمر الذي سيؤدي إلى نشوء حالة ذات كثافة طاقية عالية جداً. وإن هذه الحالة الجديدة سوف تنتج تشكيلة واسعة من الجسيمات مثل (البيونات , الكايونات , البروتونات .....إلخ) التي يمكن اصطيادها في القرص الدائري ومن ثم تحديد هويتها, وإن الإشارات التي يتم التقاطها يمكن أن تعكس حالة مجهولة للمادة حتى الآن أو جسيم أساسي جديد.

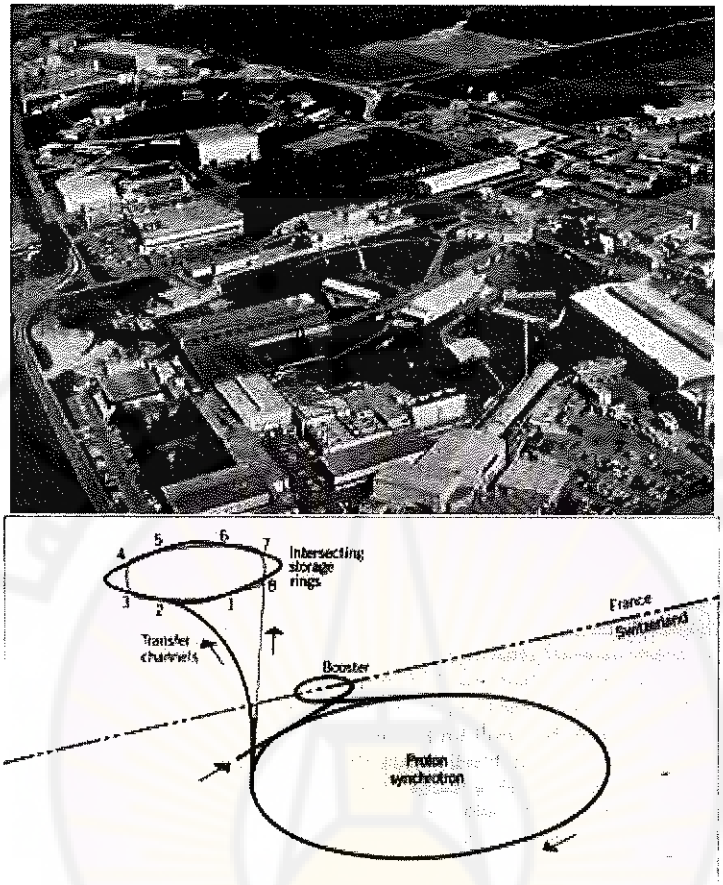
في حين أن المجهر الإلكتروني يقوم بكشف وتشخيص أبعاد بنية المادة من المرتبة 10^{-8}cm , نجد أن المسرّع التصادمي الذي يستخدم جزيئات ذات محتوى طاقي أعلى يستطيع كشف المادة بمقياس من المرتبة 10^{-17}cm.

وباختصار يمكن القول إنه كلما كانت طاقة أشعة التصادم أعلى كانت مقدرة الكشف والتشخيص والكثافة الطاقية وحساسية الإشارات في مجالات الفيزياء الحديثة أعلى.

وعادة تقاس طاقة الأشعة بالإلكترون فولت ويمكن استخدام واحدات من مضاعفات الـ eV مثل GeV أو TeV وذلك حسب البحث المدروس.

في الصورة أدناه (شكل 58) يظهر أكبر مسرّع للجسيمات (LHC) وهو تابع للمنظمة الأوروبية للأبحاث النووية (سيرن-CERN) التي تقع على الحدود الفرنسية-السويسرية. إن من مهام هذا المسرّع هو اكتشاف جسيمات بوزون هيغس (boson Higgs) التي لم تكشف هويتها بعد من قبل الفيزيائيين ولكن جرى الحديث عنها ضمن نظرية النموذج المعياري منذ أكثر من أربعين سنة.

يتكون هذا المسرّع من أنبوب كبير دائري الشكل مدفون تحت الأرض يجري فيه حزمتان من البروتونات باتجاهين متعاكسين ويتم تصادم هاتين الحزمتين مع بعضها بعضاً عندما تقترب سرعتها من سرعة الضوء, وقد ركبت أربعة مجسات في هذا المسرّع لاستقبال وتحليل الجسيمات الناشئة عن التصادم مباشرةً.



شكل(58): مسرّع الجسيمات (LHC) الواقع على الحدود الفرنسية-السويسرية والتابع للمنظمة الأوروبية للأبحاث النووية (سيرن-CERN)

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثاني عشر

عناصر مابعد اليورانيوم

1.12- مقدمة:

أحياناً يجب على الباحث أن يسلك طريقاً ضيقاً قد يوصله إلى الهدف، وقد يُخطئ في أحيانٍ أخرى السبيل. بهذه الروح بدأت التجارب لصنع العناصر الجديدة فائقة الثقل superheavy، والتي يمكن إنتاجها بطريقة طويلة معقدة، يتم فيها قذف نوى الذرات بعضها ببعض بسرعات هائلة، آملين باندماج هذه النوى. لكن النواتج الناجمة عن ذلك تكون في غاية الهشاشة، ولا تلبث أن تتحطم فور تشكُّلها.

فمن أجل اصطناع نواة فائقة الثقل يجب قذف نواة العنصر الثقيل بجسيمات أو نوى خفيفة بقوة تكفي للتغلب على التنافر الطبيعي بين النواتين الموجبتي الشحنة, حيث تندمج النواتان إحداهما في الأخرى لتكونا نواة مركبة قليلة الثبات. تطلق النواة حال تكونها نتروناً أو أكثر لتنتج نظير العنصر المتشكل أو جسيمات مشحونة كالإلكترون مثلاً لتتحول إلى نواة عنصر جديد, وفي كثيرٍ من الأحيان تلجأ النوى الثقيلة المتشكلة إلى عملية الانشطار التلقائي للتخلص من الفائض الطاقي الذي تحمله. وتحت ظروف غير عادية فقط، يمكن أن يُكتب لعنصر جديد أن يفلت من التفتت والانشطار أثناء عملية الإنتاج وأن يستقر على شكل ثابت، وهي حالة نسميها الحالة الحضيضية (الدنيا) ground state. ولكن حتى لو توافرت هذه الظروف، فإن معدل إنتاج هذا العنصر يكون بسيطاً جداً ويحتاج إلى زمنٍ طويل لإنتاجه. فمثلاً من أجل إنتاج العنصر 112 يتطلب الأمر إجراء تجربة استمرت 25 يوماً

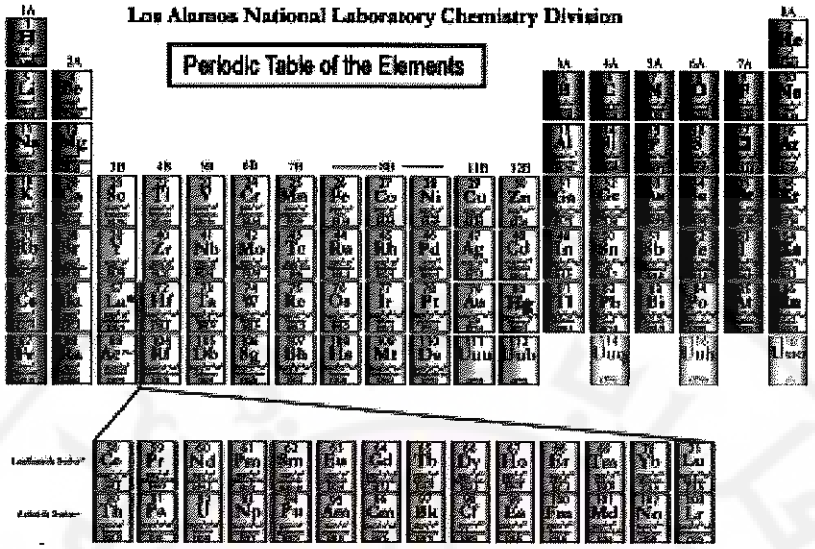
وتمخضت عن صنع ذرتين فقط من هذا العنصر، واللتين لم تعيشا سوى عدد قليل من الميكروثانية (أجزاء من مليون جزء من الثانية).

في هذا البحث سنناقش كيفية اصطناع العناصر فائقة الثقل ومراحل اكتشافها. يُري الجدول(5) القائمة الحالية لأسماء هذه العناصر كما يُـري الـشكل(59) أماكن هذه العناصر في الجدول الدوري.

الجدول(5): عناصر مابعد اليورانيوم

الرمز	العنصر	العدد الذري
Np	Neptunium	93
Pu	Plutonium	94
Am	Americium	95
Cm	Curium	96
Bk	Berkelium	97
Cf	Californium	98
Es	Einsteinium	99
Fm	Fermium	100
Md	Mendelevium	101
No	Nobelium	102
Lr	Lawrencium	103
Rf	Rutherfordium	104
Db	Dubnium	105
Sg	Seaborgium	106
Bh	Bohrium	107
Hs	Hassium	108
Mt	Meitnerium	109
Ds	Darmstadtium	110
Rg		111
		112
		113
		114
		115
		116
		117
		118

العناصر (112-118) لم يجرِ تسميتها منذ عام 2005



الشكل(59): الجدول الدوري الحديث تظهر فيه عناصر مابعد اليورانيوم

2.12- مجال الثباتية:

منذ عام 2005 يوجد حوالي 260 نكليداً من نكليدات مابعد اليورانيوم, وإن كل هذه النكليدات غير ثابتة وعمر النصف لها محصور في المجال (10^{-9} - 10^{17})S . إنَّ أطول النكليدات عمراً هي تلك التي تمتلك قيماً منخفضة للعدد الذري Z , فعند ازدياد Z يصبح عمر النكليد أقصر ويبلغ أجزاء صغيرة جداً من الثانية بالنسبة للعناصر الأثقل.

إن كل نكليدات مايعد اليورانيوم غير ثابتة وتتفكك وفقاً للنمط ألفا, حيث إنَّ طاقة جسيم ألفا (Q_α) لكل هذه النكليدات موجبة. علاوةً على ذلك فإن النكليدات التي فيها النسبة n/p مختلفة عن النسبة للنكليدات على طول مجال الثباتية β ستتحلل سواءً وفق النمط β^- أو β^+/Ec.

أمَّا بالنسبة للنكليدات الأكثر ثقلاً فإنه يغلب عليها التفكك من النمط Ec أكثر من النمط β^+, وبناءً على ذلك فإن النكليدات الثقيلة الفقيرة بالنترونات ستتفكك

وفق النمط Ec. وعند ازدياد العدد الذري لهذه النكليدات فإن احتمال التفكك بالانشطار التلقائي (SF) سيزداد. كما تتفكك بعض نكليدات مابعد اليورانيوم بأكثر من نمط تفكك مثل SF, Ec, α وبنسب مختلفة حيث يتعلق ذلك بقيمة (A,Z) للنكليدات.

3.12- اصطناع عناصر مابعد اليورانيوم:

تُعدُّ النوى الثقيلة بشكلٍ عام نوى قابلة للانشطار إلى حدٍّ كبيرٍ. فإذا ما تمَّ اصطناع النوى الثقيلة بطرائق الإثارة المعروفة والهامة فإن هذه النوى سوف تتحلل بالانشطار, لذا ينبغي على المرء أن يوازن بعناية فائقة العوامل التي تحكم انتاج نواة جديدة بتلك العوامل التي تحكم بقائها. إن عوامل الانتاج تحدد مردود نواتج التفاعل الأساسية بينما تحدد عوامل البقاء كيفية تخلص نوى المنتج الأولي من طاقة إثارتها عن طريق الاشعاع مما يسمح لها بالبقاء, أو أن تتخلص تلك النوى من طاقة إثارتها بالانشطار مما يؤدي إلى تحطمها. وإنَّ من بين عوامل الانتاج مواد هامة مثل المادة البادئة والنوى الهدف التي يجب أن تكون متوفرة بشكلٍ كافٍ ومناسب للدراسة اللاحقة. فالاصطناع النووي يماثل بشكلٍ من الأشكال الاصطناع في مجال الكيمياء العضوية أو اللاعضوية, فعلى الكيميائيين أو الفيزيائيين الصناعيين أن يدركوا التفاعلات الجارية ضمناً وكذلك إدراك بنية واستقرار الحالات الوسطية الناشئة.

إنَّ تفاعلات الاصطناع التي استخدمت لاكتشاف عناصر مابعد اليورانيوم معطاة في الجدول (6), حيث يظهر في الجدول أن كل هذه التفاعلات هي تفاعلات اندماج كاملة يتم فيها اندماج لكل النوى المتفاعلة ثم تتوازن وأخيراً تستقر بإطلاق طاقة إثارتها بأسلوب مستقل عن طريقة تشكلها. بالإضافة إلى

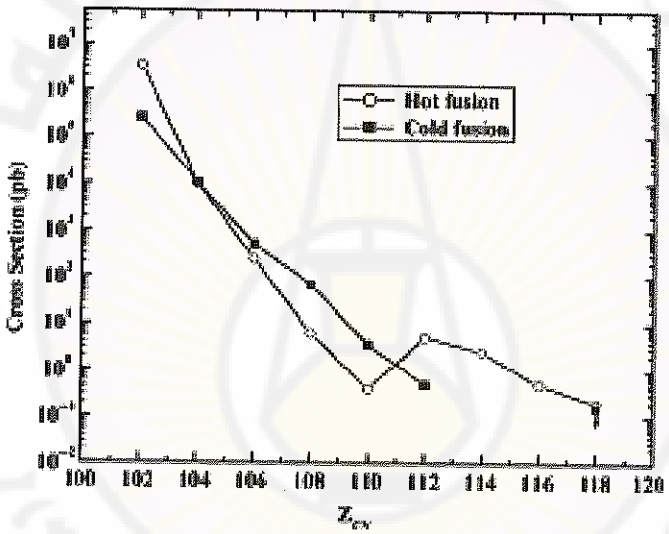
ذلك فإنه من المحتمل أيضاً أن تتمّ تفاعلات انتاج أخرى يحدث فيها أسراً جزئياً للنواة المقذوفة. وإن التفاعلات في الجدول (6) يمكن أن تقسم إلى أربعة أصناف:

- تفاعلات محرّضة بالنترونات مثل (Z=93,95,99,100)
- تفاعلات محرّضة بجسيمات مشحونة وخفيفة مثل (Z=94,96-98,101)
- تفاعلات الاندماج الحارة مثل (Z=102-106)
- تفاعلات الاندماج الباردة مثل (Z=107-113)

في التفاعلات المحرّضة بالنترونات والمستخدمة لاصطناع نوى ما بعد اليورانيوم لا يُعدُّ أسر النترون المسبب الحقيقي لاصطناع نواة جديدة وإنما تفاعلا التفكك الاشعاعي اللاحقين. كما تسمح أيضاً تفاعلات الجسيمات الخفيفة المشحونة مع نوى عناصر الاكتينيدات الهدف بزيادة العدد الذري للمنتج بمقدار واحد أو اثنين للنواة الهدف. فمن أجل اصطناع العناصر الثقيلة جداً يجب إدخال عدة بروتونات لنواة العنصر الهدف الثقيل. وإن تفاعلات الاندماج الحارة مع نوى عناصر الاكتينيدات الهدف تقود إلى نوى مركبة وسطية مثارة جداً التي تتفكك غالباً بالانشطار وأحياناً بانبعاث النترونات وهذا يؤدي بالطبع إلى انتاج نوى ثقيلة جديدة. وعلى أية حال عند ازدياد العدد الذري لنوى المنتج فإن احتمال الانشطار يؤدي إلى احتمالات للبقاء سيئة جداً بالنسبة للنوى الجديدة المتشكلة. ولقد أشار الفيزيائي النووي Yuri Oganessian بأنه يوجد طريقة لحل هذه المشكلة تتمثل بدمج نوى مقذوفة ثقيلة مع نوى ضمن منطقة من الرصاص والبزموت, فبسبب الاستقرار الخاص لنوى الرصاص والبزموت, فإن النوى المندمجة الناتجة ستتشكل على

البارد ويمكن باحتمالية معقولة أن تتفكك وتتخلص من طاقة إثارتها عبر إطلاق نترون وحيد.

يوضح الشكل (60) القياسات الحالية للمقاطع العرضية لتفاعلات الاندماج البارد كتابع للعدد الذري Z في الجملة المندمجة بشكل كامل (المربعات السوداء), وإن نقطة الاندماج البارد عند القيمة Z=118 هي بعيدة عن هذا المنحني. كما تمثل المربعات الفارغة البيضاء المقاطع العرضية لتفاعلات الاندماج الحار.



الشكل(60): مخطط بياني للمقاطع العرضية الملاحظة عند إنتاج العناصر الثقيلة عبر الاندماج البارد والحار

الجدول(6): تفاعلات اصطناع عناصر مابعد اليورانيوم

Atomic Number	Name and Symbol	Synthesis Reaction	Half-Life
		$^{238}U + n \longrightarrow {}^{239}U + \gamma$	
93	Neptunium (Np)	$^{239}U + \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}Np$	2.35 d
		$^{238}U + {}^{2}H \longrightarrow {}^{238}Np + 2n$	
94	Plutonium (Pu)	$^{238}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{238}Pu$	86.4 y
		$^{239}Pu + n \longrightarrow {}^{240}Pu + \gamma$	
		$^{240}Pu + n \longrightarrow {}^{240}Pu + \gamma$	
95	Americium (Am)	$^{241}Pu \xrightarrow{\beta^-} {}^{241}Am$	433 y
96	Curium (Cm)	$^{239}Pu + {}^{4}He \longrightarrow {}^{242}Cm + n$	162.5 d
97	Berkelium (Bk)	$^{241}Am + {}^{4}He \longrightarrow {}^{243}Bk + 2n$	4.5 h
98	Californium (Cf)	$^{242}Cm + {}^{4}He \longrightarrow {}^{245}Cf + n$	44 min
99	Einsteinium (Es)	"Mike" thermonuclear explosion (leading to ^{253}Es)	20 d
100	Fermium (Fm)	"Mike" thermonuclear explosion (leading to ^{255}Fm)	20 h
101	Mendelevium (Md)	$^{253}Es + {}^{4}He \longrightarrow {}^{256}Md + n$	76 min
102	Nobelium (No)	$^{244}Cm + {}^{12}C \longrightarrow {}^{252}No + 4n$	2.3 s
103	Lawrencium (Lr)	$^{250,251,252}Cf + {}^{11}B \longrightarrow {}^{258}Lr + 3\text{–}5n$	4.3 s
		$^{250,251,252}Cf + {}^{10}B \longrightarrow {}^{258}Lr + 2\text{–}4n$	
104	Rutherfordium (Rf)	$^{249}Cf + {}^{12}C \longrightarrow {}^{257}Rf + 4n$	3.4 s
		$+ {}^{13}C \longrightarrow {}^{259}Rf + 3n$	3.8 s
105	Dubnium (Db)	$^{249}Cf + {}^{15}N \longrightarrow {}^{260}Db + 4n$	1.5 s
106	Seaborgium (Sg)	$^{249}Cf + {}^{18}O \longrightarrow {}^{263}Sg + 4n$	0.9 s
107	Bohrium (Bh)	$^{209}Bi + {}^{54}Cr \longrightarrow {}^{262}Bh + n$	102 ms
108	Hassium (Hs)	$^{208}Pb + {}^{58}Fe \longrightarrow {}^{265}Hs + n$	1.8 ms
109	Meitnerium (Mt)	$^{209}Bi + {}^{58}Fe \longrightarrow {}^{266}Mt + n$	3.4 ms
110	Darmstadtium (Ds)	$^{209}Bi + {}^{59}Co \longrightarrow {}^{267}Ds + n$	4 μs
		$^{208}Pb + {}^{62}Ni \longrightarrow {}^{269}Ds + n$	170 μs
		$^{208}Pb + {}^{64}Ni \longrightarrow {}^{271}Ds + n$	56 ms
		$^{244}Pu + {}^{34}S \longrightarrow {}^{273}Ds + 5n$	118 ms
111	Roentgenium (Rg)	$^{209}Bi + {}^{64}Ni \longrightarrow {}^{272}Rg + n$	1.5 ms
112	—	$^{208}Pb + {}^{70}Zn \longrightarrow {}^{277}112 + n$	240 μs
113	—	$^{209}Bi + {}^{70}Zn \longrightarrow {}^{278}113 + n$	340 μs

4.12- تاريخ اكتشاف عناصر مابعد اليورانيوم:

أجريت المحاولات العلمية الأولى لاصطناع عناصر مابعد اليورانيوم من قبل كلٍّ من Emilio Segre and Enrico Fermi ومجموعتي عملهما في روما عام 1934 , وذلك بعد فترة وجيزة من اكتشاف النترون. لقد قامت هذه المجموعة بتشعيع اليورانيوم بالنترونات البطيئة وحصلت على نواتج مشعة مختلفة, حيث تم الاعتقاد أنها ستقود إلى عناصر جديدة, ولكن الدراسات الكيماوية المفصّلة التي أجريت من قبل Fritz Strassman and Otto Hahn في برلين بينت أن هذه النواتج ماهي إلا نظائر لعناصر معروفة تم الحصول عليها عند انشطار اليورانيوم إلى شظيتين متساويتين تقريباً. إن هذا الاكتشاف للانشطار النووي في شهر ديسمبر من عام 1938 كان ناتجاً ثانوياً وعرضياً في محاولات Otto Hahn لاصطناع عناصر مابعد اليورانيوم.

في عام 1940 أوضح كلٌ من Philip Abelson and Mc Millan اللذان تابعا أبحاثهما في هذا المجال أنه عند تعريض U^{238} لحزمة من النترونات يتشكل نظير مشع له العدد الذري 93 وقد تبين لهما فيما بعد أنه عنصر النبتونيوم Np^{238} الذي يتشكل وفق التفاعل التالي:

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma$$

$$_{92}U^{239}(t_{½}=23.5min) \xrightarrow{\beta^-} {}_{93}Np^{239}(t_{½}=2.36d)$$

بعد ذلك تمكن الكيماوي Seaborg وزملاؤه في جامعة كاليفورنيا في بركيلي وباستخدام السيكلوترون من اصطناع نظير النبتونيوم Np^{238} وذلك عبر قذف اليورانيوم بالجسيمات المشحونة مثل الديتريوم (H^2) وعند تفكك النظير Np^{238} الناشئ تفككاً من النمط β^- نشأ النظير الجديد Pu^{238} وفق التفاعل:

$$_{92}U^{238} + {}_{1}H^{2} \longrightarrow {}_{93}Np^{238} + 2n$$

$$_{93}Np^{238}(t_{½}=2.12d) \xrightarrow{ß^-} {}_{94}Pu^{238}(t_{½}=87.7y)$$

في بداية عام 1941 تم اكتشاف النظير الأكثر أهمية من بين نظائر البلوتونيوم ألا وهو Pu^{239} وذلك من قبل Seaborg, Wahl, Serge and Kennedy , حيث نتج النظير Pu^{239} من تفكك النظير Np^{239} الذي نتج عند قذف U^{238} بالنترونات وفق التفاعل:

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma$$

$$_{92}U^{239}(t_{½}=23.5min) \xrightarrow{ß^-} {}_{93}Np^{239}(t_{½}=2.36d) \xrightarrow{ß^-} {}_{94}Pu^{239}(t_{½}=24.11y)$$

وقد تبين فيما بعد أن هذا النظير Pu^{239} يمتلك مقطعاً عرضياً مناسباً لتفاعلات الانشطار المحرّض بالنترونات الحرارية كالتي ظهرت بالنسبة لـ U^{235}.

إن عناصر مابعد اليورانيوم التي اكتشفت فيما بعد كانت الـ Americium ورمزه (Am^{95}) والـ Curium ورمزه (Cm^{96}) وهي تشبه في خواصها عنصري الايريديوم والبلاتين على التوالي. ففي صيف عام 1944 قام كلاً من Seaborg, A. Ghiorso and R. James بقذف نوى Pu^{239} بأيونات الهليوم ذات الطاقة 32 Mev فحصلوا على نظير الكوريوم وفق التفاعل:

$$_{94}Pu^{239} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{96}Cm^{242} + {}_{0}n^{1}$$

كما تم أيضاً اصطناع نظير الكوريوم ونظير الأمريكيوم من قبل Seaborg وفريق عمله في نهاية عام 1942 وبداية عام 1945 عبر قذف نظير البلوتونيوم Pu^{239} بالنترونات في داخل المفاعل النووي وفق التفاعلات:

$$_{94}Pu^{239} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{94}Pu^{240} + \gamma$$

$$_{94}Pu^{240} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{94}Pu^{241} + \gamma$$

$$_{94}Pu^{241}(t_{½}=14.4y) \xrightarrow{ß^-} {}_{95}Am^{241}(t_{½}=432.7y)$$

$$_{95}Am^{241} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{95}Am^{242} + \gamma$$

$$_{95}Am^{242}(t_{½}=16h) \xrightarrow{ß^-} {}_{95}Cm^{242}$$

وفي السنوات التي عقبت الحرب العالمية الثانية تم اكتشاف العناصر (97-103) وبذلك تكون سلسلة الاكتينيدات قد اكتملت. فمثلاً تم اصطناع عنصر المندليفيوم $_{101}Md^{256}$ عبر قذف عنصر الانشتانيوم $_{99}Es^{253}$ بأشعة ألفا وفق التفاعل:

$$_{99}Es^{253} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{101}Md^{256} + {}_{0}n^{1}$$

حيث تم اصطناع عنصر Es^{253} بعملية تشعيع لعنصر البلوتونيوم بالنترونات في مفاعل اختبار المواد في Idaho.

إن في اصطناع عناصر مابعد الاكتينيدات أهمية كبيرة من وجهة النظر الكيماوية والنووية. فقد كان لاصطناع عنصر الرذرفورديوم (Z=104) أهمية بالغة من وجهة النظر الكيماوية كونه العنصر الأول من عناصر مابعد الاكتينيدات وهو وفقاً للشكل (59) سيقع في المجموعة الرابعة من عناصر الجدول الدوري وستكون له صفات مشابهة لعناصر الهافانيوم (Hf) والزركونيوم (Zr), ولا يشبه عناصر مجموعة الاكتينيدات الثقيلة, وقد تم إثبات ذلك بتجارب الكروماتوغرافيا التي أجريت عليه.

في عام 1969 استطاع جيورسو وزملاؤه (Ghiorso et al) إنتاج نظائر العنصر (Z=104) في بركيلي باستخدام التفاعلات النووية التالية:

$$_{98}Cf^{249} + _{6}C^{12} \longrightarrow {}_{104}Rf^{257} + 4_{0}n^{1}$$

$$_{98}Cf^{249} + _{6}C^{13} \longrightarrow {}_{104}Rf^{259} + 3_{0}n^{1}$$

وقد تمَّ تحديد الأعداد الذرية لهذه النظائر عبر ملاحظة النظائر البنت الناشئة والمعروفة (وهي عنصر النوبيليوم No^{102}) من هذه النوى. وفي عام 1970 أخبر جيورسو وزملاؤه عن ملاحظة نظير جديد للعنصر 105 تم اصطناعه وفقاً للتفاعل:

$$_{98}Cf^{249} + _{7}N^{15} \longrightarrow {}_{105}Db^{260}(t_{½}=1.5s) + 4_{0}n^{1}$$

وقد تمَّ معرفة كلاً من Z,A لهذا النظير بملاحظة الارتباطات الكائنة بين النظير الأم Db^{260} والنظير البنت الناشئ عنه Lr^{256}. وقد اقترح تسمية هذا العنصر بـ هاهنيوم تكريماً للعالم الألماني النووي Otto Hahn ومجموعة عمله مكتشفي الانشطار. ولكن في عام 1992 اعتمد فريق العمل العالمي (Barber et al) تسمية هذا العنصر بـ دبنيوم وأعطوه الرمز Db.

في عام 1974 اصطنع العنصر 106 من قبل جيورسو وفريق عمله في بركيلي باستخدام التفاعل النووي:

$$_{98}Cf^{249} + _{8}O^{18} \longrightarrow {}_{106}Sg^{263}(t_{½}=0.8s) + 4_{0}n^{1}$$

وقد تم تحديد هوية هذا العنصر بالصلات الوراثية للنظائر البنت الناشئة عنه وهي No^{255} و Rf^{259} , وقد تم تأكيد اصطناع هذا العنصر من قبل (Gregorich et al) في عام 1994. ولقد اقترح إعطاء اسم سيبورغيوم لهذا العنصر والرمز Sg تكريماً للعالم النووي Seaborg.

في عام 1981 استطاع مينسن برغ وفريق عمله (G. Munzenberg et al) في مدينة دارم شتات الألمانية اصطناع عنصر Bh^{262} عبر تفاعل الاندماج البارد (cold fusion).

$$_{83}Bi^{209} + _{24}Cr^{54} \longrightarrow {}_{107}Bh^{262}(t_{½}=102ms) + {}_{0}n^{1}$$

وقد تم تحديد هوية هذا العنصر بالصلات الوراثية للنظائر البنت الناشئة عنه وهي Cf^{246} and Fm^{250}, Md^{250}, Lr^{254}, Db^{258}. وقد سمي هذا العنصر بوريوم ورمزه Bh إكراماً للعالم نيلز بور.

في عام 1984 استطاع مينسن برغ وفريق عمله في مدينة دارم شتات الألمانية اصطناع عنصر الهاسيوم Hs^{265} وذلك عبر تفاعل الاندماج البارد $Pb^{208}(Fe^{58},n)Hs^{265}$. وقد تم تحديد هوية هذا العنصر وعدده الذري البالغ 108 من دراسة النوى البنت الناشئة عنه وهي Sg^{261} , Rf^{257}. وقد حُدد عمر النصف له بحوالي 1.8ms وهو يتحلل بإطلاق جسيمات ألفا. وإن المقطع العرضي الفعّال والمنتج له كان حوالي (20 pb). وفي العام نفسه أيضاً أكّد أوكنسيان وفريق عمله (Ogaessian et al) الحصول على هذا العنصر ونظائر أخرى له $Hs^{263-265}$ وذلك عبر التفاعلات:

$Pb^{208}(Fe^{58},n)$, $Pb^{207}(Fe^{58},n)$, $Pb^{206}(Fe^{58},n)$, $Bi^{209}(Mn^{55},n)$

ولقد لاحظ فريق العمل هذا انشطارات تلقائية وتفككات من النمط ألفا للنوى البنت الكبيرة الناشئة, وقد سمي هذا العنصر بـ Hassium نسبة إلى مدينة Hesse في ألمانيا حيث كان يجري العمل هناك.

في الواقع لاحظ مينسن وفريق عمله في عام 1982–1984 نشوء ذرة تعود للعنصر 109 وذلك عبر تفاعل الاندماج $Bi^{209}(Fe^{58},n)$ ولقد كان تحلل هذا العنصر ضعيفاً مقارنة بالنوى البنت الناشئة عنه وهي , Db^{258} , Rf^{258} Bh^{262}, وقد قدّر المقطع العرضي الفعّال المنتج بحوالي (10pb). إن اكتشاف هذا العنصر أُكد فيما بعد باصطناع أكثر من ذرة منه في دارم شتات في ألمانيا وكذلك حفيد هذا العنصر وهو Cf^{246} في دوبنا. ولقد اقترح المكتشفون لهذا العنصر اسم Meitnerrium وأعطوه الرمز Mt تكريماً للعالم Lise Meitner.

في عام 1991 درس جيورسو وفريق عمله تفاعل الاندماج بين Co^{59},Bi^{209} ونتيجة لعملهم حصلوا على ناتج وحيد هو العنصر $_{110}Ds^{267}$ الذي لوحظ تحلله بإطلاق جسيمات ألفا بطاقة قدرها 11.6 Mev بعد 4ms من عملية الحقن, وبذلك كان الدليل على تشكل العنصر 110 ضعيفاً لعدم قابلية كشف تحلل النوى البنت الناشئة عنه وهي Hs^{263} على الرغم من أنه تمت ملاحظة تحلل نوى أخرى تشكلت ضمن سلسلة التفككات الحاصلة.

إن الشكوك التي جالت في أذهان العلماء آنذاك حول إمكانية تشكل العنصر Ds تم بترها بشكل نهائي من قبل هوفمان وفريق عمله عام 1995 (Hofmann et al) الذي عمل في مدينة دارم شتات , حيث لاحظ تشكل عدة ذرات من العنصر $_{110}Ds^{269}$ عبر تفاعل الاندماج $Pb^{208}(Ni^{62},n)$, ولقد تم إثبات هوية هذا العنصر عبر ملاحظة الصلات الوراثية للنوى البنت المتشكلة وهي Hs^{265}, Sg^{261}, Rf^{257}, No^{253}. كما تم فيما بعد انتاج العنصر $_{110}Ds^{271}$ الأغنى بالنترونات من قبل هوفمان عام 1998 وباستخدام التفاعل $Pb^{208}(Ni^{64},n)$. كما تم قبل ذلك ملاحظة تشكل النظير $_{110}Ds^{273}$ الغني جداً بالنترونات من قبل (Lazarev et al) عام 1996 عبر التفاعل $Pu^{244}(S^{34},5n)$. لقد سمي هذا النظير بـ Darmstadtium نسبة للمدينة الألمانية التي تم اكتشافه فيها.

في خضم هذه الاكتشافات المتلاحقة لاحظ هوفمان وفريق عمله أيضاً عام 1994 تشكل نظير العنصر 111^{272} ($t_{½}$=1.5 ms) وذلك باستخدام تفاعل الاندماج $Bi^{209}(Ni^{64},n)$. وقد تم ملاحظة ثلاث سلاسل للتفكك عقبت هذا التشكل تعود لتفكك النظير 111^{272} حسب ماأثبته هوفمان لاحقاً في عام 2002. إن سلاسل التفكك الملاحظة للعنصر 111^{272} تعود بشكل مقنع إلى

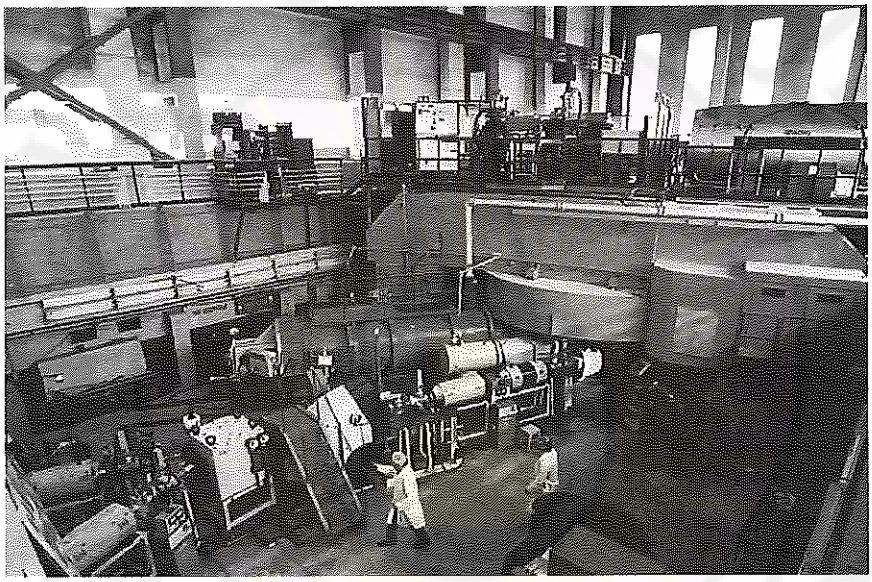
النوى الناشئة عنه وهي Mt^{268}, Bh^{264}, Db^{260}, Lr^{265}. وقد تم تأكيد اكتشاف هذا العنصر من قبل فولدن وفريق عمله (Folden et al) في عام 2004 في معهد بركيلي الوطني للأبحاث وكذلك في بكين من قبل Morita عام 2004. وقد أُعطي الاسم Roentgenium لهذا العنصر ورُمز له بـ (Rg). في عام 1995 أخبر هوفمان وفريق عمله (Hofmann et al) عن اصطناع عنصر 112^{277} عبر التفاعل $Pb^{208}(Zn^{70},n)$ وقد تم رصد سلسلتي تحلل إشعاعيتين للعنصر 112^{277} إلى النوى البنت الناشئة وهي Ds^{273}, Hs^{269}, Sg^{265}, Rf^{261}, No^{257}. وقد تمَّ تأكيد هذه النتائج أيضاً من قبل RIKEN. إن إجراء المزيد من ضبط شدة حزمة الأيونات وتعزيز حساسية أجهزة الكشف مكّن الفريق من إنتاج العنصر 111 عام 1994 والعنصر 112 عام 1995. وقد بلغ عمر النصف للعنصر 112 ما مقداره 240 ميكروثانية، وأمكن إنتاج ذرتين منه فقط خلال 25 يوماً من تشغيل المسرِّع.

في عام 2004 أعلن موريتا وفريق عمله عن تمكنه من اصطناع ذرة واحدة تعود للعنصر 113 وذلك عبر تفاعل الاندماج ($Bi^{209}+Zn^{70}$), ولقد كانت قيمة المقطع العرضي المنتج لهذا التفاعل (55fb), فبسبب هذه القيمة الصغيرة تطلبت العملية قصف لمدة عدة أشهر.

في عام 1975 بدأ في الواقع العمل بمسرع الأيونات الثقيلة المسمى المسرِّع الخطي الشامل UNILAC (والموجود بمعهد أبحاث الأيونات الثقيلة GSI)، وذلك على أساس من فكرة تصوَّرها <C. شميلزر> من جامعة هايدلبرغ بألمانيا (وأول مدير للمعهد GSI).

وكانت هذه الآلة غير المسبوقة هي الأولى التي يمكنها تسريع جميع أنواع الأيونات، بما في ذلك أيونات اليورانيوم عند طاقات مستمرة ومحكومة،

موفرة بذلك مرونة كبيرة في المحاولات الهادفة إلى دمج نواتين. وكان أحد الأهداف الرئيسية من استخدام المسرِّع UNILAC صنع العناصر من 107 إلى 114 على الأقل، والتي نطلق عليها العناصر الفائقة الثقل. ويعود الاهتمام بالعنصر 114 إلى كون الحسابات النظرية تشير إلى أن هذا العنصر يتمتع بثبات خاص؛ لأن نواته لا بدَّ أن تمتلك ما يُطْلِق عليه الفيزيائيون الغلاف (القشرة) المغلق closed shell.



الشكل (61): مسرع الأيونات الثقيلة المسمى المسرِّع الخطي الشامل UNILAC (والموجود بمعهد أبحاث الأيونات الثقيلة GSI في مدينة دارم شتات في ألمانيا)

وفي عام 1999 تمكن أوكانسيان وفريق عمله (Oganessian et al) من اصطناع خمس ذرات من العنصر 114 باستخدام تفاعل الاندماج

(Ca^{48}+$Pu^{242,244}$). إن طول أعمار النصف لنظائر العنصر 114 التي تـمَّ الحصول عليها أثبت بشكل لا لبس فيه وجود (جزيرة من الاستقرار) عند هذا العنصر الجديد (Z=114,N=184). ويُعدُّ الوصول إلى هذه الجزيرة غايـة في الأهمية؛ لأنه يثبت الاستنتاج النظري بأن أعداداً معينة «سـحرية» مـن البروتونات والنترونات تؤدي إلى نوى شديدة الترابط بصورة خاصة وإلـى أغلفة مستقرة مغلقة شبيهة بتشكيلات الإلكترونـات المتمثلـة فـي طبقـات المدارات الذرية المملوءة التي تمنح الغازات النبيلة سلوكها الكيماوي الخامل وتحدد دورية وتفاعلية العناصر الكيماوية.

إنَّ أحد أسباب صعوبة الوصول إلى جزيرة الاستقرار هو أنَّ لهذه النوى عدداً من النترونات مقابل كل بروتون يفوق ما هو مألوف في النـوى المـستقرة المعروفة. فلقد وقع الاختيار على تفاعل نووي يتم فيه إدخال أكبر عدد ممكن من النترونات إلى النوى التي جرى اصطناعها، وذلك بتشعيع (البلوتونيـوم 244) (وهو نظير فريد للبلوتونيوم وأكثرها ثقلاً) بسيل كثيف مـن أيونـات (الكالسيوم 48)، وهو نظير نادر وباهظ الثمن وغني بالنترونات. ولقد لاحظ فريق العمل المؤلف من علماء يعملون في مركز الأبحاث في دوبنا ومختبـر لورنس القومي في الولايات المتحدة تفاعلات الاندماج التالية:

$$_{20}Ca^{48} + {}_{94}Pu^{244} \longrightarrow 114^{289}(t_{1/2}=21s) + 3{}_0n^1$$

$$_{20}Ca^{48} + {}_{94}Pu^{244} \longrightarrow 114^{288}(t_{1/2}=1.9s) + 4{}_0n^1$$

$$_{20}Ca^{48} + {}_{94}Pu^{242} \longrightarrow 114^{287}(t_{1/2}=5.4s) + 3{}_0n^1$$

وكل هذه النوى الجديدة الناشئة تم رصدها عبر تفككها المتعاقب بإطلاق جسيمات ألفا مع انتهاء سلاسل تفككها في الانشطار التلقائي.

إنَّ الأبحاث السابقة حول العناصر فائقة الثقل لم تنجح باستخدام تفاعلات مماثلة لأنها لم تكن تنتج إلا القليل من هذه النوى, كأن تتكون نواة واحدة منها خلال بضعة أسابيع وذلك وسط خلفية تبلغ تريليونات من الأصناف النووية الأخرى, وبمضاعفة حساسية طريقة الكشف مئات المرات مقارنةً بالطريقة التي استخدمت في محاولات سابقة, أمكن كشف العناصر الجديدة المصطنعة قبل أن تضمحل وتزول.

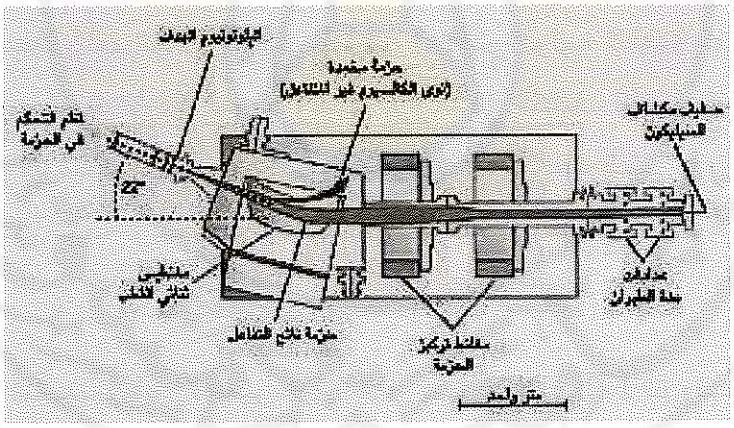
لقد أُجريت تجارب في سيكلوترون الأيونات الثقيلة بمعهد JINR بمدينة دوبنا بالقرب من موسكو, حيث سُرّعت أيونات Ca^{48} إلى ما يقارب عُشر سرعة الضوء، وسُلطت على الهدف الذي تكوَّن من عدة ميلي غرامات من البلوتونيوم Pu^{244} كانت قد طُليت كهربائياً على وريقات رقيقة من التيتانيوم. ومن أجل كشف نوى الاندماج الجديدة المراد اصطناعها، تم اللجوء إلى وسيلة لفصل النواتج المرغوبة عن كل ما عداها مما يتكون أثناء إجراء التجربة. وكانت البصمة المتوقعة لاضمحلال النواة المرغوبة فائقة الثقل هي عبارة عن سلسلة من تفككات ألفا؛ إذ يضمحل العنصر 114 إلى العنصر 112 الذي يضمحل بدوره إلى العنصر110 ومنه إلى العنصر 108 إلى أن نبتعد عن جزيرة الاستقرار ويحدث الانشطار التلقائي. ولسوء الحظ، فإن التفكك ألفا ومعدلات الانشطار الناجمة عن تفككات النوى غير المرغوب فيها المتكونة كذلك أثناء إجراء التجربة، يمكن أن تُنتج متتاليات من الأحداث العشوائية يمكنها أن تحاكي متتالية اضمحلال العنصر 114, حيث إنه في كلٍّ

ثانية يتم إنتاج البلايين من هذه النوى غير المرغوبة، فـــي حـــين أن معـــدل الإنتاج المتوقع لنظير العنصر 114 يقل كثيراً عن ذرة واحدة كل يوم. لـــذا فإنه من الأهمية بمكان أن نخمد هذه التفاعلات المصاحبة غير المرغوبة من أجل التعرف على تفاعل العنصر 114 عند حدوثه.

ومن أجل تحقيق ذلك ابتكر العلماء في دوبنا جهاز فصل مملوءاً بالغاز، زُوّد بوسيلة إرسال فاعلة للنواتج التي يتم البحث عنها، وبكشف فعـــال لمتتاليـــات الاضمحلال المشعة التي تعلن عن حدوثها، وقد قام هذا الجهاز الفاصل أيضاً بالحدِّ من تكوُّن النواتج غير المرغوبة. وكانت نواتج اندماج الأيونات الثقيلـــة (وهي مزيج من نوى العنصر 114 المصطنع ونواتج الاندماج الأخرى) ترتد عن الهدف وتدخل في غرفة مُلئت بغاز الهدروجين منخفض الضغط محصور بين أوجه قطبي مغنطيس ثنائي القطب. تتفاعل الأيونات الثقيلة المرتدة مـــع ذرات غاز الهدروجين، أما تلك التي ترتبط إلكتروناتها بنواها بطاقة تقل عن الطاقة التي يوفرها التصادم فتفقد في الغالب. ويُضبط الحقل المغنطيسي بحيث لا تتمكن سوى النوى المعنية من الوصول إلى صف الكواشف الإشعاعية. أما جسيمات حزمة Ca^{48} غير المتفاعلة فإنها تمر عبر الهدروجين بسرعة عالية وتكون شديدة التأين بحيث يحرفها الحقل المغنطيـــسي بعيـــداً عـــن طريـــق الجسيمات التي يتم البحث عنها. ويقوم الفاصل الممتلئ بالغاز كذلك بتخميـــد تكوّن النواتج غير المرغوبة الأخرى الناجمة عن التفاعلات النووية الجانبية.

تُركَّز نواتج التفاعل الخارجة من المغانط الثنائية القطب بواسطة مجموعـــة من رباعيات القطب quadrupoles المغنطيسية، ثم تمرر عبر عدّاد مـــدة الطيران TOF flight-of-time حيث يتم كشفها وبيان موقعهـــا. وقـــد

مكنت الإشارة الناجمة عن عداد مدة الطيران (TOF) من التمييز بين تـأثير النواتج المارة عبر الفاصل وبين الاضمحلال المشع للنواتج الموجودة سلفاً في كاشف الإشعاع. ويمكن استخدام مدة الطيران خلال العداد TOF للتمييز بين الأعداد الذرية المنخفضة والعالية. إضافة إلى ذلك، فإن الكاشف الإشـعاعي الذي يبين الموقع خفَّض من معدل تداخل الخلفية، لأنه يسمح بالتعرّف علـى التفاعلات غير المرغوب فيها وإهمالها. وقد أتاحت جميع هـذه الإمكانـات كشف نوى العنصر 114 التي تم البحث عنها وقياسها. والشكل (62) يبـين رسماً تخطيطياً للجهاز الذي اعتمد في هذا الصدد في مختبرات دوبنا, حيـث يظهر فيه انثناء حزم نواتج التفاعل الناجمة عن هـدف البلوتونيـوم بفـضل المغنطيس ثنائي القطب ومن ثم يجري توجيه النوى المرغوبة نحو صـفيف الكواشف الاشعاعية السيليكونية الدقيقة, حيث يقوم الباحثون بربط التفككـات النووية هناك بالمواقع ليتعرّفوا على النظائر التي تم اصطناعها عند الهدف.



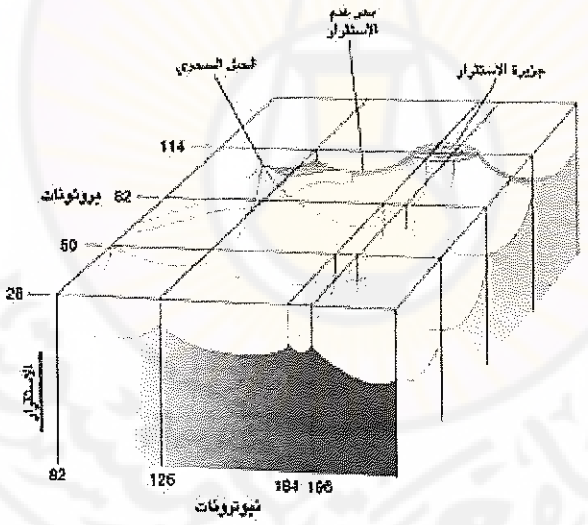
الشكل (62): رسمٌ تخطيطي للجهاز الذي تمَّ اعتماده في مختبرات دوبنا لتوليد العناصر الثقيلة

لقد أجريت التجربة الأولى لفترة دامت أربعين يوماً؛ وذلك خلال شهري 11 و 1998/12. وخلال تلك الفترة تم رصد الإشارات الناجمة عن اضمحلال ما مجموعه ثلاثة انشطارات تلقائية مما يدل على تكوّن ثلاث نوى مركّبة، وعلى أنها مرت عبر الفاصل قبل الانشطار. ولقد عاشت نواتان منها مدة تقارب ملّي ثانية واحدة لكل منهما، وكانتا نتاج تفاعلات غير مرغوب فيها نجمت عن اضمحلال نواة عنصر الأمريكيوم (Am^{244}). لكن واحداً فقط من هذه الأحداث (ذرة واحدة بعد 40 يوماً من التشعيع!) تضمّن غرزاً في الكاشف تبعته ثلاثة تفككات ألفا (أي فقدان متتابع لبروتونين ونترونين، وفي كل مرة ينجم اضمحلال يؤدي إلى تكوّن عنصر عدده الذري أخفض) حدثت جميعها عند الموقع نفسه في صفيف الكواشف.

وكانت هذه هي بالضبط بصمة الاضمحلال التي كانت متوقعة، إذ كانت العلاقة بين طاقات التفككات ومددها متطابقة مع ما جرى توقعه نظرياً بالنسبة إلى اضمحلال أحد نظائر العنصر 114 والعناصر الوليدة الناجمة عنه. إن مدة طيران النواة الأولية المرتدة وطاقة غرزها في الكاشف كانا متطابقين أيضا مع التوقعات. وتشير المعدلات العشوائية في الكاشف إلى أن احتمال حدوث ذلك نتيجة ارتباطات عشوائية لأحداث الخلفية هو أقل من واحد في المئة.

إن عمر النصف لنظير العنصر 114 الذي يحتوي على 175 نترونا يبلغ حوالي 30.4 ثانية. وهو يضمحل ليكوّن العنصر 112 وهذا بدوره يضمحل ليكوّن العنصر 110 والذي يضمحل أيضا ليكون العنصر 108. ويعدُّ نظير العنصر 108 الذي يحتوي على 169 نتروناً خارج حدود جزيرة الاستقرار،

ويضمحل عبر انشطار تلقائي. وقد أنتجت تجربة لاحقة أجريت في دوبنا نظيراً أخف للعنصر 114 فيه 173 نتروناً، وهو أقرب إلى حافة جزيرة الاستقرار ويبلغ عمر النصف لهذا النظير الخفيف نحو خمس ثوان، يتعرض بعدها لاضمحلال ألفا مكوناً نواته الوليدة وهي العنصر 112، وتضمحل النواة الوليدة بدورها بانشطار تلقائي خلال ثلاث دقائق. إن الشكل (63) يمثل رسماً تخطيطياً لجزيرة الاستقرار التي تحدث عنها الباحثون نظرياً منذ عام 1966 حيث قالوا إنَّ هذه الجزيرة ينبغي أن يكون في مركزها نظير يحتوي على 114 بروتوناً و184 نتروناً , وقد وصل الباحثون حديثاً إلى شواطئ هذه الجزيرة عندما اصطنعوا نظيراً يحتوي على 114 بروتوناً و175 نتروناً.



الشكل(63): رسمٌ تخطيطي يوضح قمم الاستقرار المتمثلة بعنصر الرصاص (الجبل السحري) وبالعنصر 114 (جزيرة الاستقرار) وذلك في خضم بحر عدم الاستقرار

لقد تمَّ إثبات وجود جزيرة الاستقرار، وقد تم قياس مقدار أثرهـا. إنَّ عمـر العنصر 114 الذي يحتوي على 175 نتروناً أطول بأكثر من ألف مرة مـن عمر النظير الذي يحتوي على 174 نتروناً، والذي ينتج كجزء مـن سلـسلة اضمحلال العنصر 118 والذي اكتشف حديثا في مختبر لـورنس بيركلـي الوطني. أما العنصر 112 الذي يحتوي على 173 نتروناً فعمره أطول بأكثر من مليون مرة من عمر النظير الذي يحتوي علـى 165 نتروناً، والـذي اكتشف في دارمشتات عام 1996. إن طول أعمار النصف لنواتج الانـدماج التي تم اصطناعها يجعل دراستها أسهل كثيراً، ومثل هذه الدراسات يمكن أن تغير الطريقة التي ننظر بها إلى الخواص الأساسية للمادة.

وكتتمة لهذا العمل قام أوكانسيان وفريق عمله في عام 2001 باصطناع ثلاث ذرات للعنصر 116 باستخدام التفاعل:

$$_{20}Ca^{48} + {}_{96}Cm^{248} \longrightarrow 116^{292}(t_{½}=0.05s) + 4_0n^1$$

عند إجراء هذا التفاعل لُوحظ ثلاثة تفككات طاقية من النمط ألفا على النـواة الوليدة الناشئة وتبع ذلك حدوث انشطار تلقائي.

كما أخبر أوكانسيان في عام 2002 في مقالة غير منشورة تحدث فيها عـن تمكنه من اصطناع ذرتين للعنصر 118 باستخدام تفاعل الانـدماج التـالي: $Cf^{249}(Ca^{48},3n)118^{294}$ وقد تم نشر ذلك وتوثيقه في عـام 2004. فـي الواقع أخبر نينوف وفريق عمله (Ninov et al) فـي عـام 1999 أنهـم أجروا تفاعلاً ناجحاً أدى إلى الحصول على ثلاث ذرات للعنصر 118 وذلك باستخدام تفاعل الاندماج $Pb^{208}(Kr^{86},n)118^{293}$, ولكن فـي مختبـرات

عديدة أخرى لم يتمكن العاملون فيها إعادة انتاج العنصر 118 وفقاً لهذا التفاعل, ربما كان ذلك عائداً إلى الشروط التجريبية الخاصة التي أُجري فيها التفاعل.

في عام 2004 أخبر أيضاً أوكانسيان وفريق عمله عن اصطناعه للعنصر 115 عبر التفاعل النووي $Am^{245}(Ca^{48},xn)115^{291-x}$, وقد تمت ملاحظة العنصر 113 كنواة بنت ناشئة عن التفكك من النمط ألفا للعنصر المصطنع 115.

مما تقدم يبدو أن العناصر فائقة الثقل قد تكون أكثر استقراراً مما جرى التنبؤ به نظرياً. وعلى أساس التجربة وأعمال الآخرين يبدو المستقبل مشرقاً بالنسبة إلى دراسة حدود الاستقرار النووي، وهناك آفاق كثيرة لإجراء أبحاث جديدة وتحقيق اكتشافات غير متوقعة.


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثالث عشر

التفاعلات الكيماوية الإشعاعية

1.13- التفاعلات الأولية والثانوية:

إنَّ كيمياء الإشعاع تقتصر على التفاعلات الكيماوية التي تُحرَّضُ بواسطة الأشعة المؤينة, بينما الكيمياء الضوئية تهتم بالتغيرات المادية الكيماوية التي تحدث بتأثير الضوء وبشكل خاص في المجال المرئي والمجال ما فوق البنفسجي. إن الفوتونات الضوئية تمتلك طاقات في المجال

$$1ev\ (\lambda \approx 12400A^{\circ}) \rightarrow 10ev\ (\lambda \approx 1240A^{\circ})$$

وبالتالي يمكن لهذه الأشعة في أحسن حالاتها أن تحدث تفاعلاً أولياً مثل

$$Br_2 \longrightarrow 2Br$$

وعلى العكس من ذلك يمكن لفوتونات أشعة γ والجسيمات العنصرية ذات الطاقة العالية مثل الإلكترونات (إشعاع β^-) والبروتونات وكذلك جسيمات α أن تحرّض تفاعلات أولية كثيرة جداً, وبما أن طاقة هذه الجسيمات عالية وتتراوح بين (10Mev - 100ev) فإنه يمكن أن تحدث تفاعلات تأين أيضاً . وبحسب طاقة الإشعاع أو الجسيمات يمكن أن يتأين أو يثار آلاف الذرات أو الجزيئات و بالتالي نخلص إلى القول بأن التأين والإثارة هما من أهم ميزات التفاعلات الأولية في الكيمياء الإشعاعية .

$$M \rightarrow M^+ + e^- \qquad (\text{تأين})$$

$$M \rightarrow M^* \qquad (\text{إثارة})$$

إن الأيونات الناتجة M^+ والذرات أو الجزيئات المثارة M^* يمكن أن تُتابع تفاعلها في طرائق مختلفة وهذه التفاعلات الثانوية التي تحدث يمكن

دراستها بشكل جيد في الطور الغازي. وإن أهم التفاعلات التـــي يمكـــن أن تدخلها الأيونات هي :

$M^+ \rightarrow R^+ + R^\circ$ (تشرد)

غالباً ما يحدث (إعادة ارتباط) $M^+ + e^- \rightarrow M^*$

(تفاعل كيماوي) $M^+ + X \rightarrow Y^+$

(انتقال الشحنة) $M^+ + X \rightarrow M + X^+$

نادر الحدوث (إصدار إلكترونات) $M^+ \rightarrow M^{+n} + (n-1)\, e^-$

وكذلك الأمر بالنسبة للذرات أو الجزيئات المثارة حيث يمكنها الدخول في عدد كبير من التفاعلات أيضاً .

غالباً ما يحدث (فلورة) $M^* \rightarrow M + h\nu$

غالباً ما يحدث (تشرد وإعطاء الجذور) $M^* \rightarrow 2R^\circ$

نادر الحدوث (تشرد وإعطاء الأيونات) $M^* \rightarrow R^+ + R^-$

(تفاعل كيماوي) $M^* + X \rightarrow Y$

(تفاعل تصادم) $M^* + X \rightarrow M + X + E_k$

(انتقال لطاقة الإثارة)

$$\left.\begin{array}{l} M^* + X \rightarrow M + X^* \\ M^* + M \rightarrow M + M^* \end{array}\right\}$$

إن هذه التفاعلات الثانوية سريعة جداً وهي تحدث بفتـــرات زمنيـــة صغيرة جداً من مرتبة (10^{-7} – 10^{-10}) في الثانية , وإن نواتج هذه التفاعلات يمكن البرهان عليها إلى حدٍّ ما بواسطة المطياف الكتلوي.

ومن أجل إجراء هذه التفاعلات يُعتمـــد علـــى النكليـــدات المـــشعة والمسرِّعات والمفاعلات النووية كمنابع للإشعاع . فلقد استخدم لزمن طويـــل

عنصر الراديوم Ra^{226} في الطب كمنبع لإشعاع α . بينما يحظى كلٌ من Co^{60} و Cs^{137} بأهمية كبيرة في الكيمياء الإشعاعية وكذلك في الطب كونها منبع لإشعاع γ . وعندما تكون هذه المنابع عالية الطاقة مثلاً Co^{60} (10^5Ci) يتم حفظ هذه المنابع في أوعية رصاصية سميكة أو في خلايا بيتونية سميكة.

وكذلك تستخدم المسرّعات الإلكترونية بشكل كبير مثل مسرع فان دي غراف الذي يعطي إلكترونات بطاقة تتراوح بين Mev(3-1), وكذلك المسرّعات الخطية التي تعطي بزمن قصير يتراوح بين 1μS إلى عدة nS نبضة عالية تتراوح طاقة إلكتروناتها بين Mev(100-1).

وكذلك تستخدم نواتج المفاعلات النووية التي تعطي إشعاع γ الشديد جداً وتياراً من النترونات الذي يسبب تفاعلاً نووياً من النوع (n,γ), حيث أن هذه الأشعة الشديدة تحرّض على نشوء تفاعلات تأين كيماوية إشعاعية. كما يستخدم إشعاع γ الشديد لنواتج انشطار الوقود النووي في المفاعل لأغراض صناعية ولفترات طويلة تصل إلى أشهر وعادةً تُخزن مثل هذه المنابع في مخازن مائية كبيرة , حيث ينخفض نشاطها الإشعاعي بسرعة وبعد فترة زمنية يمكن أن يُجرى عليها عمليات إعادة تصنيع وفرز.

2.13- التفاعلات الإشعاعية في الغازات :

عند تأثير الإشعاع المؤين في الهواء تنشأ أكاسيد الأزوت , ولقد قام العالم هارتك (Harteck) بإجراء تفاعلات كثيرة ضمن هذا الإطار. وهذه التفاعلات كانت على قدر كبير من الأهمية بالنسبة للمفاعلات التي تبرد بالهواء. ولطالما كان يستخدم غاز CO_2 في المفاعلات كمبرد. وقد دفع هذا الأمر إلى دراسة تفاعلات غاز CO_2 الإشعاعية بشكلٍ كافٍ.

فعند سقوط الإشعاع المؤين على غاز CO_2 يحصل تفكك لهذا الأكسيد .

$$CO_2 \rightarrow CO + O$$
$$CO_2 \rightarrow C + O + O$$

تفاعل تأين

ويتبع هذا التفكك تفاعلات لاحقة هي

$$CO + C \rightarrow C_2O$$
$$C_2O + CO \rightarrow C_3O_2$$
$$C_3O_2 + O \rightarrow CO_2 + C_2O$$

وسيكون الناتج الرئيسي هو CO_2 وسنحصل في نهاية المطاف على نـــواتج التفاعل الثانوية التي هي نواتج بوليمرية و O_2 .

وكذلك الأمر عندما يسقط إشعاع مؤين على غاز NO_2 تحـــصل التفـــاعلات التالية :

(تأين)

$$NO_2 \rightarrow NO + O$$
$$NO_2 \rightarrow N + O + O$$

(تفاعلات لاحقة)

$$O + NO_2 \rightarrow NO + O2$$
$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$
$$NO_2 + N \rightarrow 2NO$$

وسيكون الناتج الرئيسي هو NO_2 والنواتج الثانوية ســـتكون N_2O و N_2 و O_2 وذلك نتيجة للتفاعلات الثانوية التي تحصل وهي :

(تفاعلات ثانوية)

$$NO_2 + N \rightarrow N_2O + O$$
$$N_2O \rightarrow N_2 + O$$
$$NO_2 + N \rightarrow N_2 + 2O$$
$$2O \rightarrow O_2$$

وكذلك الأمر فيما لو عُرّض الماء لإشعاع مؤين.

$$H_2O \rightarrow H^{\cdot} + {}^{\cdot}OH$$

فلو كان لدينا مزيج من H_2O / D_2

فإن الإشعاع المؤين سيؤدي إلى تشكل $H^{\cdot} + D_2 \rightarrow HD + D^{\cdot}$

ولو عُرّض غاز الهدروجين لإشعاع مؤين فسنحصل على الأيونات

$$H_2 \rightarrow H_2^{+} + e^{-}$$

وقد تم البرهان على نشوء هذه الأيونات بالمطياف الكتلوي.

3.13- التفاعلات الإشعاعية في المحاليل المائية :

في عام 1901 لاحظ كلّ من SOODY و CURIE أن المحاليل الحاوية على أملاح الراديوم ينتج عنها غازات مثل H_2 و O_2 وكذلك يتشكل H_2O_2. الأمر الذي أدى إلى استنتاج أن الماء يتحلل إشعاعياً عندما يذاب فيه مركبات نشطة إشعاعيا أو عندما يتعرض لإشعاع مؤين من الخارج .

وتُعدُّ التفاعلات الأولية التالية من أهم التفاعلات التي يجريها الإشعاع المؤين على الماء.

$H_2O \rightarrow H_2O^{+} + e^{-}$ (تأين)

$H_2O \rightarrow (H_2O)^{*}$ (إثارة)

وإنَّ نواتج التفاعل الأولية يمكن أن تتفاعل بعدد كبير من الطرائق وستعطي تفاعلات ثانوية مختلفة .

$$H_2O^{+} + H_2O \rightarrow H_3O^{+} + {}^{\cdot}OH$$
$$2\,{}^{\cdot}OH \rightarrow H_2O_2$$
$$H_2O^{+} + e^{-} \rightarrow H_2O^{*}$$
$$H_2O^{*} \rightarrow H^{\cdot} + {}^{\cdot}OH$$
$$H^{\cdot} + H^{\cdot} \rightarrow H_2$$
$$H^{\cdot} + {}^{\cdot}OH \rightarrow H_2O$$

وكناتج رئيسي للتفاعل نحصل على الماء والماء الأكسجيني. وعلاوةً على ذلك يمكن أن يظهر الفعل المرجع لِـ $H^{\cdot}$ والفعل المؤكسد لِـ $OH^{\cdot}$ في محاليل حاوية على شوارد معدنية مثل

$$H^{\cdot} + Ce^{+4} \rightarrow H^{+} + Ce^{+3}$$
$$^{\cdot}OH + Fe^{+2} \rightarrow {}^{-}OH + Fe^{+3}$$

وفي المحاليل المائية الحاوية على O_2 المنحل فيها يمكن أن يتشكل جذر الهيدروبروكسيد $HO_2^{\cdot}$ الذي يمكن أن يدخل في تفاعلات إما كمؤكسد أو كمرجع .

$$H^{\cdot} + O_2 \rightarrow HO_2^{\cdot}$$
$$HO_2^{\cdot} + Ce^{+4} \rightarrow H^{+} + O_2 + Ce^{+3}$$
$$HO_2^{\cdot} + Fe^{+2} \rightarrow HO_2^{-} + Fe^{+3}$$
$$HO_2^{-} + H_2O \rightarrow H_2O_2 + OH^{-}$$

وإن عملية أكسدة Fe^{II} إلى Fe^{III} في المحلول الحمضي الحاوي على الهواء مثال ذلك (محلول $10^{-3}M\ (NH_4)_2\ Fe\ (SO4)_2$ في $(H_2SO_4\ 0{,}1N$ تستخدم عادة في تعيين الجرعة الممتصة (Dosimetrie).

4.13- التفاعلات الإشعاعية في المركبات العضوية:

تستخدم عادةً الطرائق الطيفية والكروماتوغرافيا الغازية وكذلك الطرائق الطيفية الكتلوية . في التعرف على نواتج تفاعل الإشعاع المؤين في المادة العضوية . فلو عرّض غاز الميتان مثلاً لإشعاع مؤين, فإنه غالباً ما ينتج جذر الميثيل

$$CH_4 \rightarrow CH_4^{*} \rightarrow {}^{\cdot}CH_3 + H^{\cdot}$$

وإنَّ نواتج التحلل الإشعاعي للميتان باستخدام منابع مختلفة من الأشعة ستكون كمايلي:

نواتج التفاعل	أشعة α من Rn	إلكترونات من المسرّعات	أشعة γ
H_2	4,8	5,7	6,4
C_2H_6	1,9	2,1	2,1
C_2H_4	0	0,05	0,13
C_3H_8	0,35	0,14	0,26
C_4H_{10}	0	0,04	0,13

إنَّ عملية كسر الرابطة C-H في المركبات العضوية الهيدروكربونية البسيطة يكون ملحوظاً أما في المركبات العليا فإنه يدخل أيضاً كسر للرابطة C-C . وعند وجود الأكسجين إلى جانب هذه المركبات تنشأ الكيتونات والكحولات والبروكسيدات والحموض وأيضاً الماء ولكن بكميات ضئيلة . وكذلك عند وجود الهالوجينات فإنه تحصل تفاعلات هلجنة سلسلية . بينما تعطي المركبات الهيدروكربونية غير المشبعة عند تعريضها للإشعاع الهدروجين ولكن بكمية ضئيلة ويكون الناتج الرئيسي عبارة عن جزيئات ضخمة (بوليمرات) . فعند تعريض الاستيلين مثلاً لإشعاع مؤين يكون الناتج الرئيسي عبارة عن بوليمرات وإلى جانب ذلك يتشكل البنزن بنسبة تتراوح بين (15-20)%. وتعد تفاعلات البلمرة بالإشعاع للمركبات غير المشبعة مثل ڤينيل كلوريد أو الستيرول ذات أهمية صناعية لأن التفاعلات السلسلية يمكن أن تجري على هذه المركبات وسنحصل على مزيج من النواتج المختلفة.

كما أن التفاعلات الإشعاعية تحدث على المركبات الهالوجينية غالباً بكسر الرابطة لأن هذه الرابطة ذات طاقة منخفضة .

* فمثلاً ينشأ غاز كلور الهدروجين لدى تعريض الكلوروفورم للإشعاع

$$CHCl_3 \rightarrow \cdot CHCl_2 + \cdot Cl$$

$$\cdot Cl + CHCl_3 \rightarrow HCl + \cdot CCl_3$$

$$\cdot CCl_3 + \cdot CCl_3 \rightarrow CCl_3 - CCl_3$$

وكذلك يمكن أن يؤدي وجود الهالوجينات الحرة المشعة إلى تفاعلات استبدال مع مركب كيماوي وتشكل مركباً موسوماً بنظير مشع مثل

$$RI \rightarrow \cdot R + \cdot I$$
$$\cdot R + I_2^{131} \rightarrow RI^{131} + \cdot I^{131}$$

أما في حالة الكحولات والألدهيدات والكيتونات والحموض الكربوكسيلية فإنه غالباً ما يحدث الانشطار وكسر للرابطة المجاورة للزمرة الوظيفية .

$$R + COOH \rightarrow RH + CO_2$$

أما المركبات الأروماتية العطرية فتعدُّ مركبات ثابتة إلى حدٍّ كبيرٍ تجاه الإشعاع المؤين فمثلاً .

	قيم - G
نظامي الهكسان	7,6
حلقي الهكسان	6.2
بنزن	0,66
تلوين	2,4

ففي حالة البنزن مثلاً يكون الناتج الرئيسي بوليميراً والنواتج الثانوية هيدروجين وأستيلين بكميات ضئيلة.

أما تأثير الإشعاع المؤين على المركبات البوليميرية العليا فيؤدي إلى حدوث تفاعلات تشابك إلى جانب تفاعلات التكسير وسيكون الهدروجين الناتج الثانوي لهذه التفاعلات.

5.13- التفاعلات الإشعاعية في المركبات اللاعضوية الصلبة:

إلى جانب التغيرات في الخواص الفيزيائية التي تحدث على المركبات اللاعضوية الصلبة تُلاحظ أيضا تفاعلات كيماوية.

فأشعة γ وكذلك الإلكترونات لا تُحدث في المعادن بشكل عام تغيرات فيزيائية ملموسة ولكن هذه التغيرات تحدث بالتأكيد على أنصاف النواقل وكذلك على الشبكات البلّورية للأيونات أما النترونات والبروتونات والجسيمات الثقيلة الأخرى فهي تُحدث سواءً في المعادن أو في أنصاف النواقل تغيرات فيزيائية.

وذلك مردُّه بشكل رئيسي إلى التصادمات أو التفاعلات الحاصلة مع نوى الذرات. علاوةً على ذلك يحدث في أنصاف النواقل عمليات إثارة وتأين في الطبقات الإلكترونية الشيء الذي يؤدي إلى نشوء ثقوب (أماكن خالية من الإلكترونات) في بنيتها مما يؤدي إلى ظهور تغيرات في الناقلية والكثافة والخواص الظاهرية المرئية لها. ففي الشبكات البلّورية للأيونات يصل جزء من الإلكترونات المتولدة بفعل الإشعاع المؤين إلى عصابة الناقلية ويساهم في عملية النقل مما يزيد الناقلية وكذلك الثقوب الناشئة أيضاً يمكنها أن تتحرك وتساهم في النقل.

أما البلُّورات الجزيئية مثل المركبات الصلبة العضوية وكذلك المركبات الصلبة غير البلورية فتأخذ في سلوكها تجاه الإشعاع المؤين حيزاً أو مكاناً وسطاً بين الشبكات البلورية الأيونية والسوائل. ففي مثل هذه المركبات يحصل أيضاً ازدياد للناقلية نتيجة كسر الروابط وتحرر الإلكترونات وكذلك يلاحظ عليها تغيرات لونية.

* وبصورة عامة نقول إنَّ التفاعلات الكيماوية يمكن أن تحدث في المركبات اللاعضوية من قبل الليبتونات (أشعة γ أو الإلكترونات) وذلك عبر عمليات التأين والإثارة وكذلك من قبل النيكلونات عبر التصادمات أو التفاعلات مع نوى الذرات. فتصادم النترونات والبروتونات والجسيمات

الثقيلة الأخرى مع نوى الذرات في المركبات الصلبة يؤدي إلى توليد ذرات مرتدة, وهي التي تسلك سلوكاً يشبه سلوك الذرات المرتدة الناشئة عن التفاعلات (n,γ).

فعبر إسقاط إشعاع مؤين على بلّورة من الثلج في الدرجة $(77^{\circ}K)$ أمكن توليد جذور $H^{\cdot}$ و $OH^{\cdot}$ وبُرهن على وجودها بالرنين أو التجاوب البارامغناطيسي ، وعند رفع درجة الحرارة إلى $(115^{\circ}K)$ اختفت هذه الجذور بعودة اتحادها مع بعضها بعضاً.

* * *

الفصل الرابع عشر

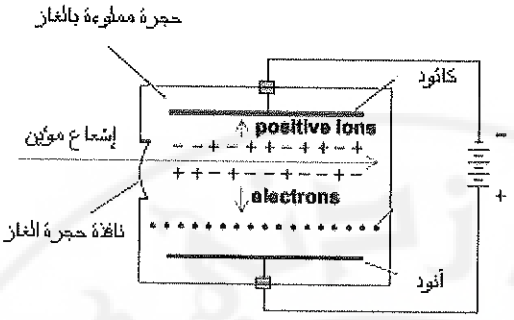
كشف الإشعاع المؤين وقياسه

1.14- مقدمة:

إنَّ الجسيمات الأولية المراد قياسها وكشفها هي جسيمات متناهية في الصغر يحمل بعضها شحنة وبعضها الآخر عديم الشحنة. فلقد جدّ العلماء واجتهدوا في تصنيع أجهزة دقيقة حساسة للغاية تستطيع كشف الإشعاع وجسيماته المؤلفة له. وقد صُمّم وصُنع العديد من أجهزة قياس الإشعاع حيث اعتمدت كل هذه الأجهزة على ما تخلفه الجسيمات من آثار وظواهر في الأوساط التي تجتازها أو في المواد التي تتفاعل معها. وسنتناول في هذا البحث بعض الأجهزة المعتمدة في كشف الإشعاع التي تعتمد على حادثة التشرد كمبدأ لعملها.

2.14- حجرة التأين (التشرد):

تُعدُّ حجرة التأين من أكثر الكواشف شيوعاً ويمكن استخدامها لقياس أي نوع من الإشعاع . حيث تستخدم لقياس عدد الجسميمات المشحونة التي قامت بتشريد الهواء الموجود في الحجرة . وهي عبارة عن أسطوانة معدنية يمكن لجدارها الجانبي أن يكون على شكل اسطوانتين متداخلتين بحيث يمكن سحبهما لزيادة حجم الحجرة أو إنقاصها , وتحتوي الحجرة على صفيحتين معدنيتين يمثلان القطب الموجب والسالب وموصولين مع مصدر لفرق كمون كهربائي (بطارية مثلاً) تمنع الأيونات المتولدة من عودة اتحادها وكذلك مكثف ومقاومة كما في الشكل(64).



الشكل(64): رسم تخطيطي لعداد حجرة التأين

فعند تطبيق فرق كمون كافٍ على القطبين فإن الأيونات الموجبة ستتجه إلى القطب السالب و السالبة إلى القطب الموجب حيث تتشكل في الغرفة نبضة كهربائية تنتقل عبر المقاومة إلى مقياس النبضات وإن سعة النبضة يتوقف على عدد الأزواج الأيونية المتولدة بتأثير الأشعة وعلى سعة المكثف.

$$V = n.e/C$$

n : عدد الأزواج

e : الشحنة الإلكترونية

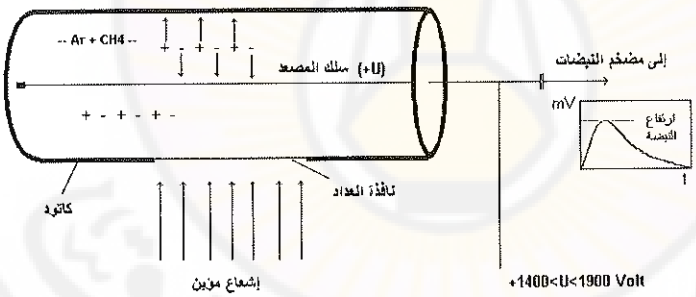
C : سعة المكثف

وعلى هذا الأساس صُمّم العديد من أجهزة كشف الإشعاع التي تُحمل بالجيب وحجمها لا يتعدى حجم قلم الحبر , حيث يستخدمه العاملون في المفاعلات والمختبرات النووية وهو يتألف من مسريين أحدهما على شكل سلك دقيق والمسرى الثاني عبارة عن غطاء من الغرافيت ويُشحن هذا الكاشف بكمون معين بواسطة مُولِّد خاص.

3.14- العداد التناسبي:

يتميز بقدرته على تكبير النبضة المتولدة من التشرد الأولي الابتدائي للغاز الموجود في حجرة التأين وذلك بفعل الإشعاع المتولد عن تصادمات الشوارد المتشكلة أثناء تحركها نحو المساري مع جزيئات الغاز حيث إن جزيئات أو ذرات الغاز تصدر فوتونات عند عودتها إلى سويتها الأساسية , هذه الفوتونات تقتلع إلكترونات (إلكترونات ثانوية) من مادة جدار أسطوانة العدّاد أو من جزيئات غاز أخرى الشيء الذي يؤدي إلى ازدياد الانفراغ في الغاز والحصول على نبضة كبيرة حتى ولو كان الإشعاع القادم إلى حجرة التأين في الجهاز صغير جداً.

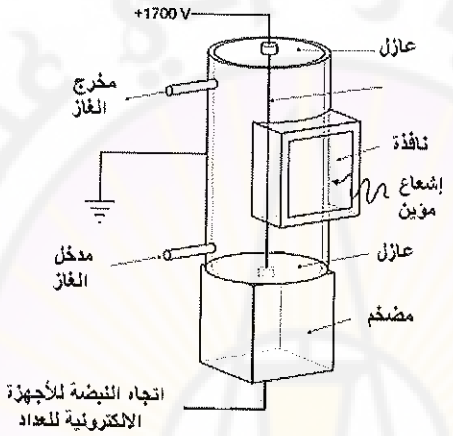
ويتألف العداد من كاثود أسطواني الشكل ومن آنود عبارة عن سلك قطره 0.01 ملم مشدود وسط الجسم الأسطواني للجهاز ومعزول عنه الشكل(65).



الشكل(65): رسم تخطيطي للعداد التناسبي

تتميز هذه العدّادات بقدرتها السريعة على العد واستقبال عدد كبير من الجسيمات المشعة أو الفوتونات في فترات زمنية قصيرة جداً وتسجيلها. كما أن بمقدور العداد التناسبي التمييز بين جسيمات α و β مثلاً, وقياس طاقات الجسيمات وهذا ما يميزه عن عداد غايغر.

وهناك عدة أنواع من العدادات التناسبية وأكثرها انتشاراً هو العداد التناسبي ذو الغاز الجاري الذي يُستخدم فيه مزيج من غاز الأرغون والميتان أو غيرها من الغازات وذلك عند الضغط الجوي العادي الشكل(66). كما يمكن أن يعمل العدّاد بوجود كمية محددة وثابتة من الغاز محكمة الإغلاق ويسمى العدد عندئذٍ بالعداد المغلق.



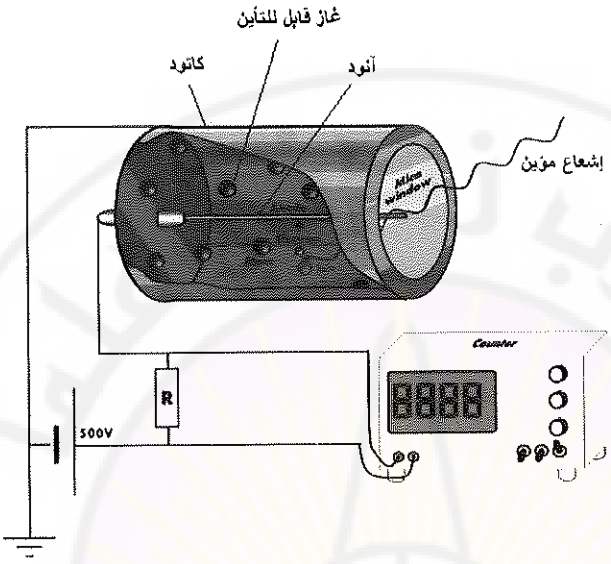
الشكل(66): مخطط للعداد تناسبي ذو الغاز الجاري

يختلف العداد التناسبي عن حجرة التشرد في أن فرق الكمون فيها لا يسمح بتزايد الشوارد وإن معامل التزايد يمثل النسبة بين عدد الشوارد المتكونة وعدد الجسيمات الواردة وقيمته تساوي الواحد في حجرة التشرد, أما في العدادات التناسبية فقد تصل قيمته إلى عدة آلاف.

4.14- عداد غايغر-ميلر: Geiger – Müller Counter

يتألف من أنبوبة اسطوانية الشكل قطرها بضعة سنتيمترات وتحوي مزيجاً من غاز الأرغون وأبخرة الكحول ويوجد في وسط هذه الأنبوبة سلك

من النتغستين قطر 0.15 ملم موصول بالأرض عن طريق مقاومة R. يُمثـــل جدار الأسطوانة القطب السالب بينما يمثل السلك القطب الموجب الشكل(67).



الشكل(67): رسم تخطيطي لعداد غايغر–ميلر

في هذا النوع جعل فرق الكمون بين السلك وجدار الأسطوانة أكبـــر منه في العداد التناسبي بحيث لا يكون كافياً لتوليد تيار مستمر داخل الأنبوبة. فعند عبور الجسيمات المشحونة إلى داخل أنبوبة العداد فإنها تحـــدث تـــشرداً للغاز نتيجة التصادم . ومن أجل عملية الانفراغ التي تعقب حادثة التشرد فقد صمِّم نوعين مختلفين لعدادات غايغر– ميلر أحدها ذاتي الإطفاء والآخر غير ذاتي الإطفاء, فالعدادات غير ذاتية الإطفاء يعتمد فيها علـــى دارة خارجيـــة إلكترونية تقوم بعملية الإطفاء أو الإخماد عن طريق خفض الجهد لفترة تكفي لتعادل الشوارد الموجبة والأفضل وإيقاف الإلكترونات الثانوية عن التكـــاثر. أما العدادات ذاتية الإطفاء وهي الأفضل والمستخدمة بشكل كبير فيعتمد مبـــدأ عملها على مزج غاز العدّاد (الغازات الخاملة وبـــشكل خـــاص النيـــون أو

الأرغون) بغاز مطفأ يوقف عملية الانفراغ بدون أي تدخل خـــارجي. ومـــن أجل هذا الغرض تستخدم أبخرة أو غازات المركبات العضوية متعددة الذرات مثل الكحول الإيتيلي والميتان والإيتر وخلات الأميل وغيرها وكذلك تستخدم الغازات الهالوجينية بصورة أفضل مثل البروم و الكلور. وفي أغلب الحالات يقوم مصممو هذا العدادات بملأ أنبوبة العداد بـــ 90 جزءاً من غاز الأرغون المسمى غاز العد و10 أجزاء من بخار الكحول المسمى غاز الإطفـــاء . وإن عملية الإطفاء في العدادات ذاتية الإطفاء تتم كالآتي.

في البدء يتشكل في أنبوبة العداد نتيجة سقوط الإشعاع المؤين عليـــه وابل كثيف من الإلكترونات (بسبب تشرد غاز العد الأرغون أو النيون) بعد ذلك تقوم جزيئات غاز الإطفاء (وهو في حالتنا أبخرة الكحول) بامتصاص الفوتونات المنبعثة من ذرات غاز الأرغون الخامل المثارة وذلك على طـــول سلك العداد (القطب الموجب) بحيث لا تستطيع هذه الفوتونات الوصول إلى سطح الكاتود وتحرير إلكترونات إضافية منه , حيث تصرف طاقة الفوتونات على إثارة أو تحلل جزيئات البخار من دون أن تتشرد . علاوةً على ذلك تقوم أيونات الغاز الخامل الموجبة الناتجة بإعطاء شحنتها إلـــى جزيئـــات الغـــاز المطفيء عند التصادم معها لأن طاقة تأينها أقل من طاقة تأين ذرات غاز العد الخامل , وعندها ستتحرك جزيئات الغاز المطفأ المشحونة إلى جدار أنبوبـــة العداد عوضاً عن غاز العد , وعند حودث عملية التعادل الكهربـــائي علـــى سطح الكاتود تتولد طاقة إثارة تقود إلى عملية تشرد إضافية للجزيئات الشيء الذي يؤدي إلى توليد إلكترونات ثانوية جديدة وبالتالي تصل عملية الانفـــراغ إلى نهايتها وتتوقف . إن عملية انفراغ غاز أخرى جديدة يمكن لها أن تحدث فيما لو دخلت جسيمات جديدة إلى أنبوبة العداد وقامت بتشريد الغاز فيها.

يتميز هذا النوع من العدادات بانخفاض جهد تشغيله وبطول هضبته (390-500) فولت وبمقاومة لتغيرات درجة الحرارة وبطول عمره. إن الفترة الزمنية اللازمة للعداد حتى يقوم بتسجيل نبضتين متعاقبتين يُسمى بزمن الفصل للعداد τ_A وإن معامل الفصل للعداد يُعطى بالعلاقة .

$$f_\tau = Z/Z_w = 1 - Z.\tau_A$$

حيث:

Z: نسبة العد المقاسة

Z_w: نسبة العد الحقيقية

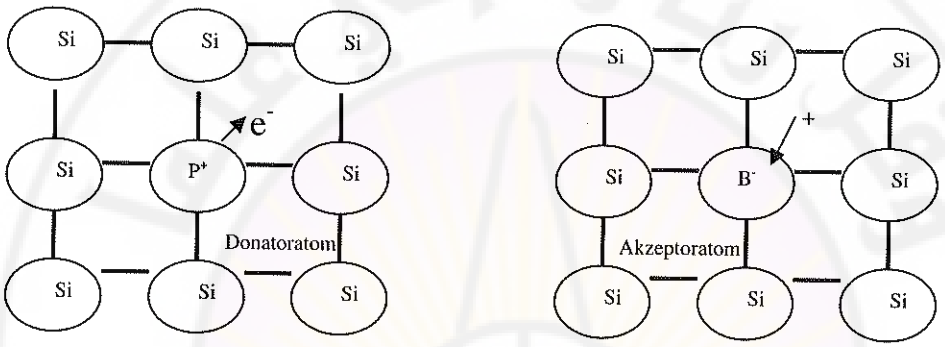
τ_A: زمن الفصل للعداد

إنَّ هذا النوع من العدادات يمتلك مقدرة رصد عالية بالنسبة لأشعة α و β وتصل إلى حوالي 100%. أما من أجل رصد والبرهان على أشعة γ وأشعة رونتجن فالأمر متوقف على عدد الإلكترونات الثانوية المتحررة من جدار أنبوبة العد وبالتالي فمقدرة رصد الجهاز من أجل هذه الأنواع من الأشعة يتعلق بشكل أساسي بنوع وسماكة مادة الكاتود في أنبوبة العداد , ومن جهة أخرى يتعلق بطاقة فوتونات أشعة γ وأشعة رونتجن الداخلة إلى أنبوبة العداد.

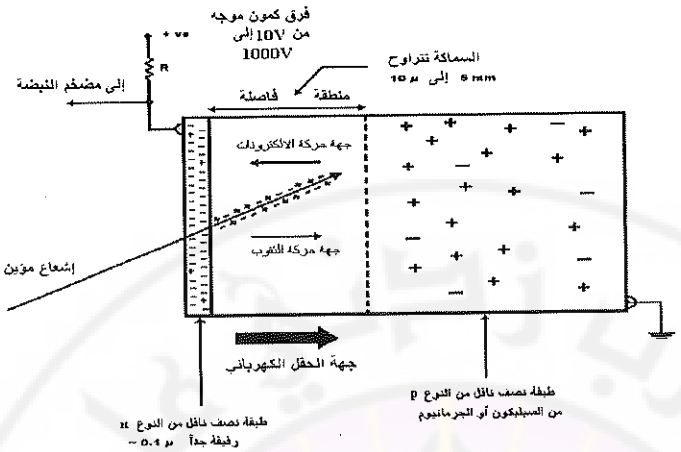
إنَّ عمر العدادات ذاتية الإخماد أو الإطفاء قصير بسبب التشرد الحاصل على جزيئات غاز الإطفاء فالعدادات ذاتية الإطفاء التي تعمل بالأبخرة العضوية تمتلك فترة زمنية نبضية تصل إلى 10^8 نبضة, أما العدادات ذاتية الإطفاء والتي تعمل بالغازات الهالوجينية فتمتلك فترة زمنية نبضية تصل إلى 10^{10} نبضة وذلك لأن جزيئات الهالوجين المتشردة تعود وتتحد مجدداً بحيث تبقى محفوظة داخل أنبوبة الجهاز لفترة زمنية طويلة.

5.14- عدادات أنصاف النواقل:

لو استعرضنا نصف ناقل من السيليسيوم وجعلنا نصف ناقل من السيليسيوم من النوع N (بإضافة الفوسفور كشائبة) على تماس مع نصف ناقل من السيليسيوم من النوع P (بإضافة البور كشائبة) فإننا نلاحظ نشوء فرق في الكمون بينهما نسميه جهد التماس الشكل(68).



إنَّ انتقال الثقوب والإلكترونات في كلا نصفي الناقل يتم بتحريض السيليسيوم إما برفع درجة حرارته أو بتطبيق فرق كمون خارجي. فمبدأ عمل عدادات أنصاف النواقل يعتمد على سقوط إشعاع مؤين في منطقة التماس وتحرير أزواج من الإلكترونات والثقوب الإضافية التي يجري توجيهها عبر تطبيق حقل كهربائي. إن نبضة الجهد الناشئة يجري تضخيمها وتسجيلها بواسطة أجهزة إلكترونية موصولة.



الشكل(68): رسم تخطيطي لنموذج عداد أو كاشف نصف ناقل من النوع (p-n)

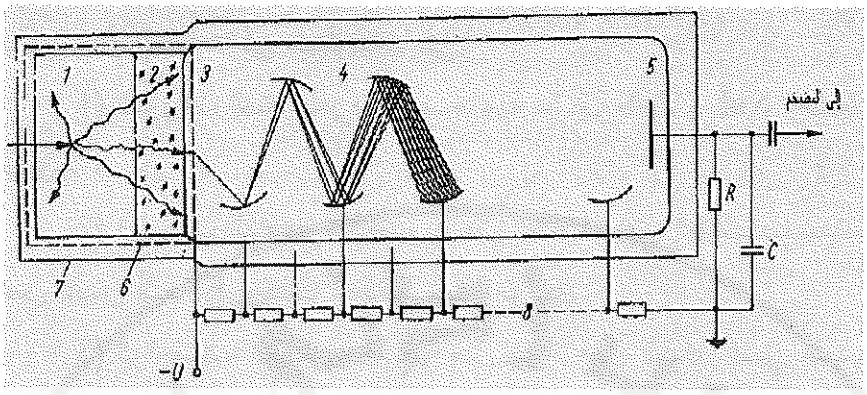
6.14- عدّاد الوميض:

في حين أنّ البرهان على الإشعاع المؤين في حجر التشرد وأنابيب العدّ اعتمد بشكل أساسي على تشكيل حوامل الشحنة الكهربائية في الغازات فإن مبدأ عمل عدادات الوميض يختلف جذرياً عن مبدأ عمل حجر التشرد وأنابيب العد حيث يعتمد عداد الوميض على ومضات الضوء المنبعثة من الذرات أو الجزيئات المثارة للأجسام الصلبة أو السائلة من أجل قياس الإشعاع, وإن عداد الوميض يتألف بشكل أساسي من:

1- وامض: يتم فيه توليد ضوء تفلور بعد سقوط الإشعاع عليه.

2- مضاعف فوتوني: ورمزه (SEV) الذي هو عبارة عن مضاعف للإلكترونات الثانوية الذي يقوم بتحويل الومضات الضوئية إلى نبضات كهربائية . ومن أجل تشغيل وعمل هذا العداد يلزم وصله بمنابع فرق كمون عالية وثابتة وكذلك أجهزة إلكترونية لتضخيم وتحليل وتسجيل النبضات. إن عدادات الوميض تنتمي إلى أجهزة القياس الحساسة والمهمة جداً. فعندما

يسقط إشعاع مؤين على الوامض يقوم بإعطاء طاقته سواء بشكل جزئي أو بشكل كامل عبر عمليات تأين أو إثارة إلى ذرات أو جزيئات مادة الوامض ونتيجة لذلك ينبعث من الوامض ضوء تفلور ينتشر في كل الاتجاهات, وإن كوانتات هذا الضوء يجب أن تصل كلها ما أمكن إلى الكاتود الفوتوني للمضاعف الفوتوني ومن أجل ذلك يوصل الوامض بنافذة المضاعف الفوتوني بشكل مباشر أو عبر مادة ناقلة للضوء مثل البلكسي غلاسPlexiglas أو الكوارتز. إن استخدام طبقات رقيقة جداً من زيت السيليكون بين الوامص والناقل الضوئي والجدار الزجاجي للمضاعف الفوتوني يُقلل من خسائر ظواهر الانعكاس التي يمكن أن تحدث . بعد ذلك يصل القسم الأول من الإلكترونات المنتزعة بالفوتونات إلى إلكترود التصادم الأول (دينود Dynode) للمضاعف الفوتوني. وإن كل إلكترون فوتوني يصدم الإلكترود الأول يحرر من مادة الإلكترود ∂ إلكتروناً ثانوياً التي تصل بدورها إلى الدينود الثاني محرّرة عدداً أكبر من الإلكترونات الثانوية وهكذا تستمر العملية من دينود إلى آخر ويتكاثر عدد الإلكترونات ويعظم داخل المضاعف الفوتوني إلى أن يصل إلى الآنود عدد كبير من الإلكترونات مسبباً بذلك حدوث فرق كبير في الكمون ومُولِّداً نبضة كهربائية ملموسة (لجسيم مشع سقط على الوامض) يقوم الجهاز بتضخيمها وتسجيلها. وعبر قياس ارتفاع النبضة المسجّلة في مؤخرة الجهاز يمكن للمرء تقدير طاقة الإشعاع الممتص.



الشكل(69): مخطط تفصيلي لعداد الوميض

1-وامض 2- ناقل للضوء 3- كاتود فوتوني 4- دينودات 5- آنود 6- عاكس 7-وعاء كتيم حاجز للضوء 8- موزع للجهد

في مثل هذه العدادات تستخدم وامضات مختلفة سواءً عضوية أو غير عضوية التي هي قادرة على إعطاء ضوء تفلور نتيجة سقوط إشعاع مؤين عليها . وتختار عادة بحيث تكون قادرة أيضاً على تحقيق الامتصاص الكامل للإشعاع الساقط . فمن أجل تسجيل دقائق α و β يكفي عادةً استخدام رقائق أو أغطية رقيقة جداً توضع على نافذة الوامض يعبر منها الإشعاع ويكون سمكها من مرتبة مدى الدقائق المشعة α و β. أما من أجل كشف أشعة رونتجن أو γ فيعتمد مبدأ عمل الجهاز على الإلكترونات الثانوية المتولدة عبر المفعول الكهرضوئي ومفعول كومبتون وكذلك مفعول تشكل الأزواج في الوامض . وهنا لا ضير من استخدام أغطية سميكة توضع على نافذة الوامض. أما من أجل الكشف عن النترونات السريعة فيتم عبر البروتونات المرتدة المتشكلة في مادة الوامض الغنية بالهدروجين . أما من أجل كشف النترونات البطيئة (الحرارية) فتستخدم الوامضات الحاوية على الليثيوم.

وقد قسمت الوامضات في مجموعات هي:

1) البلُّورات المتفسفرة اللاعضوية مثل ZnS و NaI المنشط بالتاليوم.

2) البلُّورات المتفسفرة العضوية مثل الانتراسين المناسب بشكل خاص لقياس أشعة β وكذلك النفتالين وبارا ترفنيل.

3) الوامضات العضوية السائلة مثل باراترفنيل المذاب في مذيب خاص ومركب 5,2-دي فنيل أوكسازول , وكذلك 4,1-دي-[2- (5- فنيل أوكسازوليل)] البنزن.

4) الوامضات العضوية البوليمرية , مثل بولي ستيرول و بولي ڤنيل التلوين وهي تناسب بشكل خاص للكشف عن أشعة β.

أخيراً نذكر أن مقدرة الفصل الزمنية لهذا العداد تكون حسب نوع الوامض المستخدم وهي أفضل من مقدرة فصل العدادات الأخرى.

7.14- وحدات قياس الإشعاع:

لقد استخدم قديماً واحدة الرونتجن ورمزها R في قياس الإشعاع وهذه الواحدة مناسبة بشكل خاص لقياس أشعة X وγ وآثار هذه الأشعة في الهواء حيث إنّ امتصاص مقدار من الأشعة قدره 1R في 1 كيلوغرام من الهواء الجاف يؤدي إلى نشوء $1,61 \times 10^{15}$ زوجاً أيونياً.

وإذا علمنا أن الطاقة الوسطية اللازمة لإحداث زوج من الأيونات في الهواء هي $5,4 \times 10^{-18}$ جول, فإن مقدار الطاقة الممتصة في الهواء المقابل لتعرض قدرة 1R يكون

$$1,61 \times 10^{15} \times 5,4 \times 10^{-18} = 8,69 \times 10^{-3} \text{ J/kg}$$

أما توضع الطاقة في النسج الحية فهي أعلى غالباً منه في الهواء.

فبالنسبة لأشعة غاما التي طاقاتها غالباً تتراوح بين (0,1-2)Mev فإن مقدار الطاقة الممتصة الموافق لتعرض قدره 1R للنسج الحية تساوي $9,6 \times 10^{-3}$ جول لكل كيلو غرام نسيج حي. فالرونتجن إذاً واحدة لقياس التعرض الذي يعبر عن كمية التأين الذي تحدثه أشعة X أو γ. ومن أجل تسهيل العمل مع الأشعة أُدخل مفهوم الجرعة الممتصة واستخدمت وحدات الغري والراد لها .

فالجرعة الممتصة هي مقياس لتوضع الطاقة الناجم عن أي نوع من أنواع الأشعة المؤينة وذلك في أي وسط.

وقد استخدم قديماً واحدة الراد للتعبير عن الجرعة الممتصة حيث إنّ الراد الواحد يُعادل توضع للطاقة بمقدار 0,01J/kg . ومنذ عام 1975 أُدخلت إلى وحدات الجملة الدولية SI واحدة الغري وهي بالتعريف الجرعة الممتصة في 1 كغ عندما تكون الطاقة الممتصة مساوية واحد جول.

$$1\text{Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$$

وبالتالي فإن 1R يُعطي جرعة ممتصة في الهواء مقدارها .

$8,69 . 10^{-3} / 0,01 = 0,869$ rad

$9,6 . 10^{-3} / 0,01 = 0,96$ rad ومقدارها في النسج الحية .

أما معدل الجرعة الذي هو المعدل الزمني للجرعة فيعبر عنه بناتج قسمة الجرعة الممتصة على زمن امتصاصها . مثل غري/سنة أو ميلي غري/أسبوع ..

على الرغم من أن الغري والراد واحدتان ذات أهمية كبيرة في عالم الإشعاع المؤين فقد وجد أن جرعة ممتصة من نوع معين من أنواع الإشعاع لا تحدث بالضرورة نفس الضرر في النسج الحية, الشيء الذي دفع إلى إدخال مفهوم الجرعة المكافئة التي تعبر عن الضرر البيولوجي . فقد وجد مثلاً أن 1 راد من أشعة α يُحدث الضرر البيولوجي الذي يحدثه 20 راد من إشعاع γ . ولذلك كان لا بد على العاملين في مجال الأشعة النووية من إدخال عامل النوعية Q الذي يعكس قدرة كل إشعاع على إحداث الضرر في النسج الحية, وبالتالي تكون

الجرعة المكافئة (ريم) = الجرعة الممتصة (راد) x Q (عامل النوعية)

ومنذ عام 1979 أدخلت إلى جملة الوحدات الدولية SI واحدة السيفرت ورمزها Sv عوضاً عن واحدة الريم ورمزها rem التي كانت مستخدمة حيث إنَّ :

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

وبالتالي تكون الجرعة المكافئة(Sv) = الجرعة الممتصة (غري)x Q

وإن قيمة عامل النوعية Q تتوقف على مقدار التأين الذي يحدثه الإشعاع لدى مروره. فجسيم α مثلاً يولد حوالي عشرة ملايين زوج من الأيونات في كل سنتيمتر يجتازه في الأنسجة ، بينما جسيم β وأشعة غاما وأشعة X فتولد حوالي مئة ألف زوج في السنتيمتر. وبالتالي وضع العلماء جدولاً خاصاً بذلك يبين الفعل المؤين وخطورة كلِّ نوع من الإشعاع.

نوع الإشعاع	عامل النوعية (التأثير البيولوجي)
رونتجن ، غاما و β	1
النترونات السريعة	10
النترونات الحرارية	2,5
البروتونات	10
أشعة-α	10
النوى المرتدة	20

حيث إنَّ النترونات تولد عبر تصادمها المرن أو غير المرن نوى مرتدة وأشعة γ . حيث تسبب النوى المرتدة تأينات خاصة عالية جداً في النسيج الحي.

مثال : تعرض عامل في مختبر نووي إلى الجرعات التالية في سنة كاملة .

أشعة غاما	0.02 Gy (2rad)
نترونات حرارية	0.005 Gy (0.5rad)
نترونات سريعة	0.001 Gy (0.1rad)

ما هي الجرعة المكافئة الكلية التي تلقاها ؟

الجرعة المكافئة = الجرعة الممتصة x Q

جرعة γ المكافئة = 0.02 x 1 = 0.02 Sv (2rem)

جرعة N_s المكافئة = 0.005 x 2.5 = 0.0115 Sv (1.15rem)

جرعة N_f المكافئة = 0.001 x 10 = 0.01 Sv (1rem)

الجرعة الكلية المكافئة = 0.0415 Sv (4.15rem)

ولقد وضع العلماء جدولاً خاصاً يحـــدد مقـــادير الجـــرع الممتـــصة الطبيعية بالنسبة للإشعاع الداخلي والخارجي للإنسان.

الجرعة بـــ ميلي ريم / سنة

	كامل الجسم	العظام	الرئة
الإشعاع الخارجي			
الأشعة الكونية	35	35	35
الإشعاع الأرضي	70	70	70
الإشعاع الداخلي			
K^{40}	19	5	19
C^{14}	1,5	1,5	1,5
Ra^{226}	5	50	5
Rn^{220}, Rn^{222}	-	-	120
الجرعة الكلية	≈ 130	≈ 160	≈ 250

الفصل الخامس عشر

أضرار الإشعاع والوقاية منه

1.15- مقدمة:

إنَّ كوكب الأرض يتعرض بشكل مستمر إلى الأشعة الكونية القادمة من الفضاء الخارجي وكذلك تراب الأرض الحاوي على النظائر المشعة الطبيعية مثل اليورانيوم والراديوم والرادون والبوتاسيوم -40 والكربون -14.. الخ ، حيث تتم هجرة المواد المشعة من أعماق الأرض إلى سطحها عن طريق المياه الجوفية, فلذلك نجد أن التراب الغضاري والصخور البركانية كالبازلت هي أغنى الصخور بالنظائر المشعة . علاوةً على ذلك توجد النظائر المشعة حتى في الأنسجة الحيوانية والنباتية التي تعطي الإشعاع من داخل هذه الأنسجة مثل K-40 ، R-226 ، C-14 . والجدول التالي يبين اختلاف توزع النظائر المشعة باختلاف الأنسجة.

	K-40	**Ra-226**
	10^{-9} x (كوري/كغ)	10^{-12} x (كوري/كغ)
البقول	10 – 7,4	91,4 - 0
الخضر	3,4 – 2,3	7 – 2,9
الحبوب	2,7 – 1,9	2,6 - 2
السمك	2,1	8 – 0,7
الحليب	1,2	2,4 – 1,3
اللحم	2,2 – 0,9	5 – 0,8

2.15- التلوث الإشعاعي:

إن التلوث الحاصل على تركيب الأرض مردّه بشكل رئيسي إلى التجارب على الأسلحة النووية ويأتي في الدرجة الثانية فضلات المواد المشعة للمفاعلات النووية . كما يحدث التلوث نتيجة كارثة مفاجئة كالتسرب الإشعاعي الذي حصل في المحطة النووية لتوليد الطاقة في ولاية بنسلفانيا 1979 بسبب تعطل وحدة التبريد, الأمر الذي رفع درجة حرارة المفاعل. وكحادثة التسرب الإشعاعي التي حصلت في تشرنبل في الاتحاد السوفيتي السابق التي لوثت قسماً كبيراً من البلدان الأوروبية وعلاوة على ذلك فقد تم رصد آثار من الإشعاع في سورية في محافظة القنيطرة نُقلت بواسطة الغيوم التي أمطرت هناك. ويعد نظير السترونسيوم-90 من أشد العناصر تأثيراً لأنه يشبه عنصر الكالسيوم ويستطيع أن يحل محله في العظام . وقد وجد أن نسبة هذا النظير في المياه العذبة كانت أقل من 2×10^{-12} كوري/ليتر عام 1960 علماً بأن النسبة المسموح بها هي 3×10^{-11} كوري/ليتر . وإن سبب هذا النقص في مياه الينابيع مردّه إلى تمديد المواد المشعة بالماء وتفككها وترسبها وامتصاصها. أما المياه الجوفية المحاطة بطبقات الأرض الصخرية فهي في مأمن من التلوث بالمواد المشعة ولا تتلوث إلى عندما تكون على تماس مع مناجم المواد المشعة . وكذلك غاز الرادون الذي يعد عنصر رئيسي في تلويث الجو وقد لوحظ أن كميته تتناقص كلما ارتفعنا عن سطح الأرض وتبلغ كميته في الطبقة الهوائية وفوق اليابسة 1×10^{-13} كوري/ليتر و 1×10^{-15} فوق المحيطات, وإن التركيز الأعظمي المسموح به هو 1×10^{-12} كوري/ليتر . وكذلك نظير الكربون-14 الموجود في الهواء على شكل $^{14}CO_2$ فإن تركيزه الوسطي في الجو هو $7,2 \times 10^{-9}$ كوري/كغ من

الكربون . وقد ازدادت هذه النسبة نتيجة التفجيرات النووية بمعدل 30 % في عام 1960 عنها في عام 1953.

وإن المصدر الرئيسي لتلوث المياه والمواد الغذائية ناجم عن انشطار اليورانيوم والبلوتونيوم والنظائر المشعة الأخرى الموجودة في مناطق الانفجار (كانفجار ناكازاكي وهيروشيما). فعندما تتحمل ذرات الغبار بالنظائر المشعة تأتي الرياح لتنثرها في كل مكان على سطح الأرض. وإن فترة بقاء التلوث الإشعاعي في المياه والأغذية والعلف تتوقف على سرعة تفكك المواد المشعة وقد تتراوح هذه الفترة بين ساعات أو أيام أو أشهر أو عدة سنوات.

3.15- إزالة التلوث:

يجري الكشف عن مياه الشرب والمواد الغذائية والأعلاف بشكل دوري, فإذا ثبت تلوثها خضعت عندئذ لعملية تطهير. وهذه العملية تجري فقط على المقادير الكبيرة ذات القيمة الاقتصادية أما المواد القليلة الملوثة فيجري اتلافها.

إنَّ عمليات التطهير للمواد الغذائية والمعلبات تجري بغسل الغلاف الساتر لها بشكل جيد, فمثلاً يطهر السمك واللحوم والخضار والحبوب بغسلها بتيار مائي مرات عديدة في مكان خاص مهيأ لذلك وإذا بقي التلوث في اللحوم أو السمك أكبر من الحد المسموح فيلجأ عادةً إلى اقتطاع الطبقة السطحية منها بعمق ½سم وإذا لم تف هذه الطريقة بالغرض عُمد إلى حفظها وتركها مدة طويلة من الزمن بانتظار حدوث تطهير طبيعي لها. وإذا كانت الأغذية غير قابلة للحفظ يُعمد إلى إتلافها . أما المواد السائلة الملوثة فيتم تركها لترقد فترة من الزمن أو تُرسب المادة الملوثة منها, كما تستخدم طرائق الترشيح وطرائق

التبادل الأيوني لإجراء عملية تطهير السوائل. وقد وضعت مجموعة من الاحتياطات لمنع التلوث مثل عزل الغرف والمستودعات بإحكام لمنع دخول الهواء الملوث وكذلك تغليف المواد الغذائية لحفظها من الغبار الذري , أما مياه الشرب المكشوفة فيجري فحصها بشكل يومي أثناء الحروب للتأكد من سلامتها. وفي مراكز الأبحاث النووية يتبع العاملون فيها عدة قواعد صحية للمحافظة على سلامتهم, مثل حمل أجهزة قياس الإشعاع ولبس الحذاء والقفازات المخصصة للعمل في المختبرات النووية واستعمال الدروع الرصاصية للحد من التعرض إلى أشعة γ والإشعاعات الأخرى المختلفة. كما وجد أنه من المناسب إعادة استعمال مواد التبريد من ماء وهواء في المفاعلات وحصرها داخل حجرة المفاعل وعدم تسريبها إلى الفضاء الخارجي.

كما أن فضلات المواد المشعة والأدوات والثياب الملوثة تدفن في حفرعميقة من الأرض جدرانها ماصة للإشعاع مانعة للتسرب . أما الفضلات التي تحوي مواد مشعة طويلة العمر فتوضع في أوعية محكمة الإغلاق وتُرمى في قاع المحيطات أو في أماكن مهجورة من الجبال أو الصحراء . ويجب أن لا تزيد شدة الإشعاع الصادر من الحفر العميقة عن 0.05 رونتجن.

أما بالنسبة لفضلات اليود -131 الفائضة فتضاف إليها كمية من يود البوتاسيوم غير المشع بغية تخفيفها بحيث تصبح الشدة الإشعاعية لها 10ميكروكوري/ليتر ثم يترك المزيج ينساب إلى المجاري العامة . وكذلك الأمر بالنسبة للفوسفور المشع . أما الكربون – 14 فيحرق ليتحول إلى غاز

$^{14}CO_2$ الـذي يمتـزج مـع الهـواء وتـصبح شـدته الإشـعاعية 0,01 ميكروكوري/ليتر ومن ثم يتلاشى في الهواء.

4.15- الوقاية من الإشعاع:

بناءً على المؤتمرات الدولية التي انعقدت لدراسة أثر الإشـعاع فـي البيئة والكائن الحي . فقد تم التوصية بطريقتين رئيسيتين للوقاية من الإشعاع أولهما.

أ) جعل حاجز واقٍ سميك بشكل كافٍ وعامل امتـصاصه للإشـعاع مرتفع بين مصدر الإشعاع والجسم المراد وقايته . فإذا كان عامل امتصاص الحاجز الواقي كبيراً تم الاكتفاء بحاجز رقيق مثـل الرصـاص والكـادميوم والبرافين . أما إذا كان عام الامتصاص صغيراً نسبياً فيجب استخدام حـاجز سميك كما في حالة الحديد أو النحاس أو الخشب .

وترتبط الشدة الإشعاعية (I) بسماكة الحاجز (X) وبعامل امتصاصه (μ) بالعلاقة الأسية التالية: $I = I_o \cdot e^{-\mu x}$

ويُعرّف عامل الامتصاص بأنه التناقص اللوغارتمي للشدة الإشعاعية بالنسبة لواحدة السمك . أما السماكة النووية فهي حاصل جداء سمك الحـاجز الماص مقدراً بالسم بكثافة مادته مقدرة بالغرام/سم^3 , وبالتالي تقدر الـسماكة النووية بـ (غرام / سم^2) فمثلاً العدد 11.4 غ /سم^2 يدل على سماكة تعادل 4.22 سم من الألمنيوم .

ب) يمكن الوقاية أيضاً من الإشعاع بالابتعاد عن مصدر الإشعاع فمن المعلوم أن شدة الإشعاع وتأثيره المؤين تتناقص عكساً مع ازدياد المسافة بين المنبع المشع وموضع جهاز القياس (أو مكان الكائن الحي) وفقاً للعلاقة.

$$I = J_\gamma \frac{A}{b^2}$$

حيث: I : الشدة الإشعاعية وتقاس بالرونتجن في الساعة

J_γ: ثابت يتعلق بالعنصر المشع

b : المسافة وتقاس بالمتر

A : النشاط الإشعاعي للمنبع المشع ويقاس بالكوري

مثال :

ما هي الشدة الإشعاعية لنظير الكوبالت CO^{60} على بعد متر واحد من المنبع إذا كانت شدة الكوبالت الإشعاعية المستخدمة للمعالجة الطبية هي 5066 كوري, وأن $J_\gamma = 1,3$.

$$I = 1,3 \cdot \frac{5066}{1} = 6585,8 \text{ r/h}$$

ومن الوسائل الأخرى المساعدة على الوقاية من الإشعاع استخدام أجهزة قياس الإشعاع لتحديد الجرعة الممتصة وتحديد ساعات العمل للعاملين في المختبرات النووية فعدد ساعات العمل المسموح بها تساوي نسبة 300 ميلي روتنجن (وهي الحد الأعلى لكمية الإشعاع خلال أسبوع) إلى كمية الإشعاع التي تعرض لها العامل في الساعة مقدرة بالميلي روتنجن. كما تتم الوقاية من إشعاع النترونات السريعة باستخدام عازل من البرافين سمكه 50 سم ، بالإضافة إلى جدار من الإسمنت المسلح ومع ذلك يجتاز 10 % من النترونات هذا الجدار وقد صمّم الفيزيائيون في كلية الهندسة في جامعة فيينا

لباساً واقياً للنترونات حيث يجتاز 0.1 % فقط من الإشعاع النتروني 2 سم من سماكة هذا اللباس الواقي.

5.15- أخطار الإشعاع البيولوجية:

إنَّ الطاقة الممتصة من الإشعاع المؤين تقوم لدى عبور الإشعاع لنسيج الكائن الحي بإحداث تغييرات جزيئية بنيوية في خلايا النسج, وإن مقدار التخريب الناتج يتعلق بطبيعة المادة الماصة للإشعاع وبطاقة الجسيمات وبشدة الإشعاع.

وإنَّ مقدار التخريب الحاصل في النسج الحية يعبر عنه عادة بالجرعة الممتصة . وإن الأضرار التي يمكن أن يسببها الإشعاع يمكن أن تكون كبيرة بحيث إنها تسبب الوفاة إذا كانت شدة الإشعاع عالية , ويمكن أن تكون هذه الأضرار أضرار وراثية تتناقلها الأجيال إذا أصاب الإشعاع الأعضاء التناسلية.

فعند عبور الإشعاع إلى الخلايا الحية فإنه يصادف الهدروجين الموجود بكثرة في جسم الكائن الحي, فلو كان هذا الإشعاع إشعاعاً نترونياً, فإن تأثر بروتونات ذرات الهدروجين بالنترونات سيكون كبيراً وسيؤدي ذلك إلى حدوث انفصام في سلاسل الخلايا الحية وبالتالي إلى شلل الكائن الحي. ومثل هذه الظواهر لوحظت عند انفجار مفاعل نووي أو قنبلة نترونية التي تعطي إشعاعاً نترونياً شديداً. فلو تعرض إنسان إلى جرعة من إشعاع نتروني قدرها 8000 (Rem) ضمن دائرة نصف قطرها 800 متر, فإن ذلك يؤدي إلى شلله مباشرة, أما إذا كانت الجرعة أقل من ذلك بحدود 700 (Rem), فإنه يفقد وعيه في الساعات الأولى نتيجة أعراض قلبية ومن ثمَّ يصاب بالتقيؤ

والإسهال ويشاهد على جلده تجمع الدم على شكل بقع وحدوث رعشة وحمّى ثم يهزل جسمه خلال الأسبوع الثاني من تاريخ تعرضه للإشعاع ويموت.

أما إذا كانت الجرعة في المجال (300 – 550) Rem ضمن دائرة نصف قطرها 1400م, فإنه يُصاب بفقدان الوعي في الساعات الأولى ثم بالتقيؤ والإسهال ثم سقوط شعره في الأسبوع الثاني ويصاب بالحمى وينتفخ جلده ويدمى أنفه وفمه ويكون احتمال الوفاة بمعدل 50 % فيما لو كانت الجرعة 450 (Rem), أما إذا كانت الجرعة (100– 250) Rem فيصاب في اليوم الأول بفقدان الوعي والتقيؤ والإسهال, وفي الأسبوع الثالث بسقوط الشعر وأوجاع في الحلق ونزف في الدم وتتشكل بقع دموية على جلده ويهزل جسمه وتعتل صحته.

وقد عُرِّضت حيوانات لتأثير الإشعاع النتروني فوجد أن 80 % منها التي تلقت جرعة قدرها 4600 راد قد شُلّت خلال ثماني دقائق وتبع ذلك الموت في فترة (7 – 132) ساعة.

لو سألنا الآن أنفسنا عن سبب ظهور كلٍّ هذه العوارض المرضية نتيجة مرور الأشعة المؤينة في الخلايا الحية ولو حاولنا تفسير ذلك من وجهة النظر الطاقية لوجدنا أن للخلية الحية طاقة تساوي مجموع طاقات مكوناتها, حيث إنَّ بعض هذه الطاقة دائم في الخلية وبعضها الآخر في حالة تجدد مع الوسط الخارجي, وإذا مثلنا الخلية بهزازة طاقتها تتناسب مع تواترها الخاص فإنه عند ورود طاقة خارجية إلى الخلية, فإن هذه الطاقة إما أن تميت الخلية إذا كان مقدار الطاقة كبيراً وإما أن لا تؤثر فيها إذا كان مقدار الطاقة صغيراً وإما أن تمتص الخلية الطاقة فتتضخم ويؤدي هذا إلى انقسامها وتسرطنها.

وإن الأمثلة على التبادل الطاقي بين الخلية والوسط الخارجي كثيرة. فمثلاً إن احتكاك الجلد بعامل خارجي معين ووفق إيقاع معين وبصورة مستمرة قد يسبب تسرطن الجلد في موضع الاحتكاك.

كذلك إذا تعرضت بعض الخلايا الحية لصدمة خارجية كتعرض عظم الوجه مثلاً لصدمة انفجار طنجرة بخار, فإن ذلك قد يؤدي إلى تسرطن العظم كذلك تأثير الأشعة الشمسية فوق البنفسجية في خلايا الجلد قد يسبب تسرطنها إذا تحقق شرط توافق التواتر لطاقة الخلية والطاقة الواردة إليها. وكذلك حرارة لفافة التبغ قد تسبب تسرطن الشفاه وكذلك تأثير جسيمات α التي تسبب تسرطن الدم إذا ما ولجت هذه الجسيمات إلى الدورة الدموية ... إلخ من الأمثلة الكثيرة.

إنَّ المعالجة السرطانية الجيدة بالمواد المشعة تتوقف على مدى دقة تعيين طاقة الخلية المتسرطنة وتحديد تواتر الإشعاع الواجب استخدامه , لأن زيادة طاقة الخلية يؤدي إلى تطورات في بنية الخلية فقد تتحد بعض مكونات الخلية وتشكل مكونات أخرى حية ذات طاقة معينة ويطلق بعض العلماء على هذه المكونات الحية اسم الفيروس كما أنه يمكن أن يؤدي إلى تكسير للروابط وبالتالي انفصام عرى الترابط في المركبات البيولوجية الضخمة داخل الخلية مؤدياً إلى موت الخلية.


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السادس عشر

تطبيقات النشاط الإشعاعي

1.16- استخدام النظائر المشعة في الكيمياء:

1.1.16- التطبيقات في الكيمياء التحليلية:

1) التحليل بالتنشيط:

يُعدُّ التحليل بالتنشيط فرعاً حديثاً نسبياً من فروع التحليل الكيماوي الإشعاعي الدقيق, حيث يمتاز على جميع طرائق التحليل الكيماوي والفيزيائي بحساسيته العالية. فوفقاً لهذه الطريقة أمكن تقدير وقياس جزء من ألف بليون جزء من الغرام لبعض العناصر. وتستخدم هذه الطريقة على الأخص عند فحص وتقدير درجة نقاء العناصر والسبائك ومواد الترانزستور وكذلك تعيين آثار السموم والتلوث البيئي وكذلك في مجال ضبط الجودة الصناعية وفي مجال علم الجرائم وغيرها من المجالات.

إنَّ الأساس الذي تعتمد عليه هذه الطريقة يقوم على تشعيع نظير مستقر بالنترونات أو الإشعاعات الأخرى , حيث يتحول النظير المستقر إلى مشع غير مستقر يُرسل إشعاعات مميزة له يتم عن طريقها تعيين تركيز النظير من مقدار الإشعاع الصادر عنه.

ومن التفاعلات النووية المستخدمة بكثرة في مجال التحليل بالتنشيط هو التفاعل (n,γ) حيث تستخدم في هذا التفاعل النترونات الحرارية التي تكون طاقتها حوالي 0,025 ev فمثلاً.

$$_{33}As^{75} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{33}As^{76} + \gamma$$

يعبر عنه بـ $As^{75}(n,\gamma)As^{76}$

وكذلك

$_{55}Cs^{133} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{55}Cs^{134} + \gamma$ $\qquad Cs^{133}(n,\gamma)Cs^{134}$

كذلك تستخدم التفاعلات النووية (n,p) الذي يتطلب نترونات بطاقة أعلى مثال ذلك. $_{16}S^{32}(n,p)_{15}p^{32}$

وكذلك التفاعل (n,α) مثال ذلك . $_{13}Al^{27}(n,\alpha)_{11}Na^{24}$

وتفاعلات نووية أخرى يمكن أن تستخدم مثل .

... (n , fission) , (p, γ) , (p,n) , (n,2n)

إن التحليل وفق هذه الطريقة له هدفان رئيسيان الأول هو التحليل الوصفي للعناصر (أي تحديد هوية العنصر) والثاني تعيين تركيز العناصر عن طريق قياس مقدار الأشعة الصادرة عنها.

فتحديد هوية العنصر (تحليل وصفي) تتم بتشخيص نوع وطبيعة الإشعاعات الصادرة عن العينة المشعة بواسطة أجهزة القياس. وكذلك قياس طاقات الإشعاعات المنبعثة وتعيين أعمار النصف للنوى المشعة الناشئة في العينة.

أما عند التحليل الكمي للعناصر فإنه إضافة إلى الخطوات السابقة يتم قياس شدة النشاط الإشعاعي الذي يتناسب طرداً مع كمية العنصر المشع وذلك باستخدام العدادات المناسبة.

إنَّ التحريض الإشعاعي للعينة المدروسة لا يعتمد فقط على كمية العنصر المطلوب تحليله ووفرة نظائره القابلة للتنشيط وإنما يتعلق بعدة عوامل هي :

أ) المقطع العرضي لنواة العنصر الهدف.

ب) سيل النترونات وطاقتها.

ج) فترة التشعيع الزمنية.

د) خصائص التفكك الإشعاعي للنوى المشعة الناشئة.

هـ) نوع الأجهزة المستخدمة في قياس النشاط الإشعاعي ومقدرة فصلها.

إن معدل النشاط الإشعاعي المتشكل خلال فترة التشعيع يُعطى بالعلاقة .

$$A = \sigma \Phi N \ (1-e^{-0.693ti/t½})$$

حيث:

σ: المقطع العرضي للتفاعل النووي (سم^2)

Φ: سيل النترونات (نترون/سم^2.ثانية)

N: عدد ذرات النظير المستقر المطلوب تنشيطه

$t_{½}$: عمر النصف للنظير المشع الناشئ

t_i: فترة التشعيع

ونظراً لأهمية التحليل بالتنشيط فقد تعدى استخدام هذه الطريقة حقول التحليل الكيماوي إلى مجالات أخرى مختلفة مثل :

- تشخيص العناصر المختلفة وتعيينها وانتشارها في الأرض (خامات الأرض).
- تحليل مواد الشهب والنيازك والكواكب والقمر لمعرفة العناصر الموجودة فيها فكثير من المحطات الكونية التي أرسلت إلى الفضاء زودت بمُولِّدات نترونية لدراسة العناصر الموجودة في الأجرام السماوية (كيمياء الكون) .
- تحليل مياه الأنهار والبحيرات والبحار (كيمياء المياه) .
- تقدير أعمار الصخور.
- تقدير أعمار المستحاثات للنسج الحية وتحولاتها . (علوم الاحياء) .
- تشخيص وتقدير عدد من العناصر في مجالات البحوث الطبية (الطب) .

2) التحليل بالتخفيف (التمديد):

أ) تقدير المواد غير المشعة بواسطة مواد مشعة:

وفق هذه الطريقة يمكن تقدير وحساب عدد ذرات عنصر ما أو وزنه في عنية ما عن طريق وسم هذا العنصر بنظير مشع مناسب ومن ثم تحليل عينة صغيرة منها لمعرفة عدد ذرات العنصر إلى عدد ذرات النظير المشع فعلى سبيل المثال نفرض أن W_0 تمثل وزناً مجهولاً لمادة غير مشعة يُطلب تحليلها وموجودة في العنية إلى جانب مواد أخرى. فالطريقة تعتمد على إضافة وزن معلوم W من المادة النقية المطلوب تحليلها مع كمية صغيرة جداً (آثار) لأحد نظائر هذه المادة المشعة والتي نشاطها الإشعاعي A_0 إلى العينة. بعد ذلك يؤخذ وزن معلوم P من العينة بوسائل كيماوية كالترسيب مثلاً وبشرط أن يكونP نقياً ويقاس النشاط الإشعاعي له وليكن A. عندئذٍ نستطيع حساب الوزن المجهول للمادة W_0 من العلاقة

$$\frac{W_0 + W}{P} = \frac{A_0}{A}$$

أي:

$$W_0 = A_0 \left(\frac{P}{A} - \frac{W}{A_0}\right)$$

مثال :

احسب النسبة المئوية للحديد في عينة من خام الحديد وزنها 1 غرام أذيبت في مذيب مناسب ثم أضيف إليها 10 ملغ من الحديد الموسوم بالحديد Fe^{59} المشع والذي نشاطه الإشعاعي الكلي يساوي 10000 نبضة / دقيقة ,

ثم فصل جزء نقي من الحديد بإضافة هيدروكسيد الأمونيوم وكان وزن عنصر الحديد فيه 0.3 غرام ونشاطه الإشعاعي 5000 نبضة / دقيقة .

الحل :

$$W_0 = A_0 \left(\frac{P}{A} - \frac{W}{A_0}\right)$$

$$= 10000 \left(\frac{0,3}{5000} - \frac{0,01}{10000}\right)$$

ومنه

$$\% Fe = 0,59 \times \frac{100}{1} = 59\%$$

تطبق هذه الطريقة بدقة ونجاح ليس فقط في مجال الكيمياء اللاعضوية وإنما في الكيمياء العضوية والحيوية وغيرها. فعلى سبيل المثال تم تحليل مزيج مؤلف من كبريت ثنائي البنزيل وسلفوكسيد ثنائي البنزيل وسلفون ثنائي البنزيل وذلك بإضافة مقادير معلومة من المركبات المذكورة موسومة بالكبريت – 35.

ب) تقدير المواد المشعة بواسطة مواد غير مشعة:

حيث يُضاف وفق هذه الطريقة مقدار معلوم من النظير غير المشع إلى النظير المشع المجهول ومن ثم يفصل جزء من المزيج على شكل راسب نقي ويقاس نشاطه الإشعاعي، ويحسب النشاط الإشعاعي للنظير المجهول في العينة وفق

$$A_0 = A \frac{W_1}{W_2}$$

A_0 : النشاط الإشعاعي للنظير المجهول

A : النشاط الإشعاعي للجزء النقي المفصول

W_1 : وزن الجسم الحامل غير المشع والمضاف إلى المحلول المجهول

W_2 : وزن الجزء النقي المفصول

ج) تقدير النشاط الإشعاعي باستخدام نظير مشع آخر:

تستخدم هذه الطريقة في تقدير النشاط الإشعاعي لنظير مشع موجود في عينة وذلك عندما لا يوجد للنظير المشع نظير مستقر أو لأن استعماله غير مرغوب فيه. ويتم ذلك بإضافة كمية معلومة من نظير مشع مناسب إلى النظير المشع المجهول الموجود في العينة بشرط توافق الصفات الإشعاعية لكليهما. ثم يتم فصل جزء نقي منهما ويقاس النشاط الإشعاعي للنظيرين ويحسب النشاط للنظير المجهول بالعلاقة:

$$A^{\circ}_1 = A_1 \frac{A^{\circ}_2}{A_2}$$

A°_1 : النشاط الإشعاعي الكلي للنظير المشع المجهول

A_1 : النشاط الإشعاعي المفصول للنظير المشع المجهول

A°_2 : النشاط الإشعاعي الكلي للنظير المضاف

A_2 : النشاط الإشعاعي المفصول للنظير المضاف

3) التحليل بالتخفيف النظيري تحت المكافئ:

تعتمد على إضافة كمية معلومة أو حجم معين من كاشف مناسب لا تكفي للتفاعل مع كل المادة المطلوبة للتحليل وإنما تتفاعل مع جزء قليل منها (دون المقادير المكافئة لها). كما تُضاف نفس الكمية من الكاشف إلى

محلول قياسي يحتوي على النظير المشع المماثل للمادة المجهولة. فمثلاً لو أضيفت إلى عينة من محلول الفضة مجهولة التركيز X مقدار معلوم من محلول الفضة - 110 المشعة وليكن Y, ثم أضيفت إلى كلٍّ من المحلول (X+Y) المجهول ومحلول الفضة المشعة Y محلول كاشف يودات الصوديوم $NaIO_3$ بمقادير متساوية ودون المقدار المكافئ للفضة في النموذجين، عندئذٍ سيكون مقدار يودات الفضة المترسبة في الحالتين متساوية ومقدارها Z. بعد ذلك يقاس النشاط ليودات الفضة المجهولة وليكن A_1 وليودات الفضة للمحلول القياسي وليكن A_2 وبحسب تركيز الفضة X في العينة وفق العلاقة.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{Z}{(X + Y - Z)}$$

وإنَّ طرائق الفصل لا تقتصر هنا على الترسيب فقط بل يستخدم الاستخلاص بالمذيبات أو المبادلات الأيونية للفصل.

4) استخدام النظائر المشعة في التحليل الكروماتوغرافي:

إن استخدام النظائر المشعة في التحليل الكروماتوغرافي يُلغي خطوة إظهار وتحديد مواقع الحزم الصعبة نوعاً ما سواء في الكروماتوغرافية الورقية أو كروماتوغرافيا الطبقة الرقيقة. فصعوبة إيجاد الكواشف المناسبة سواءً أكانت كواشف لونية أو غير لونية لإظهار الحزم, يضاف إلى ذلك أن رش الكروماتوغرام بالكواشف الكيماوية يؤثر في الطبيعة الكيماوية لمواد الحزم, وكذلك صعوبة اختيار كواشف حساسة وانتقائية أو نوعية دفع إلى استخدام النظائر المشعة في هذا المجال وإن تحليل الحزم يتم بطريقتين:

1) المسح الإشعاعي: وذلك بإمرار الكروماتوغرام تحت عداد مناسب متصل بمسجل بياني وعبر تحليل المخطط البياني المحصول عليه يمكن تحديد مواقع الحزم على الكروماتوغرام ومن ثم استخلاص وتحليل مواد الحزم بالوسائل التقليدية.

2) التصوير الإشعاعي الذاتي: حيث يتم إظهار الحزم بوضع الكروماتوغرام على لوحة تصوير حساسة في مكان مظلم ولمدة معينة حيث تظهر صور البقع على اللوحة على شكل بقع داكنة بفعل الإشعاعات الصادرة ويتم تحديد مواقع الحزم على الكروماتوغرام بدلالة مواقع البقع الداكنة. وأحياناً يتم إظهار البقع لبعض الفلزات بتعريض الكروماتوغرام بعد اكتمال عملية الفصل عليه إلى غاز مشع مثال ذلك غاز H_2S الموسوم بالكبريت - 35 المشع. حيث يتفاعل هذا النظير مع الفلزات الموجودة مشكلاً الكبريتيدات الموافقة, بعد ذلك تتم عملية المسح الإشعاعي للكروماتوغرام تحت عداد مناسب وتحدد مواقع الحزم ويقدر فيها تركيز الفلزات من مقدار النشاط الإشعاعي الصادر عن الكبريت – 35.

5) التحليل الكيماوي بواسطة النشاط الإشعاعي الطبيعي:

تستخدم هذه الطريقة لحساب وتقدير العناصر في الخامات الطبيعية مثل البوتاسيوم والثوريوم واليورانيوم وغيرها. حيث يُعدُّ النشاط الإشعاعي مقياساً لكمية النظير المشع المطلوب تعيينه.

فمن المعروف مثلاً أن عنصر البوتاسيوم الطبيعي يتألف من عدد من النظائر المستقرة ومن نظير مشع هو K^{40} الذي يعطى أشعة بيتا بالإضافة إلى أشعة γ والأشعة السينية والبوزترونات. وعندما يتم تحليل عينة من خام

البوتاسيوم يؤخذ الخام وتستخلص منه أملاح البوتاسيوم الذوابة في الماء ومن ثم تؤخذ عينة من المحلول ويقاس النشاط الإشعاعي لأشعة β بواسطة عداد مناسب ويحسب تركيز البوتاسيوم بواسطة المعادلة.

$$\text{Log } A = b - ap + \text{Log } C$$

A : النشاط الإشعاعي (نبضة / دقيقة)

P : كثافة المحلول

C : تركيز البوتاسيوم (غرام ذري / ليتر)

a : ثابت يمثل مقدار الامتصاص الذاتي لأشعة β

b : ثابت يمثل الترتيب الهندسي للعينة والعداد وكفاءة العداد

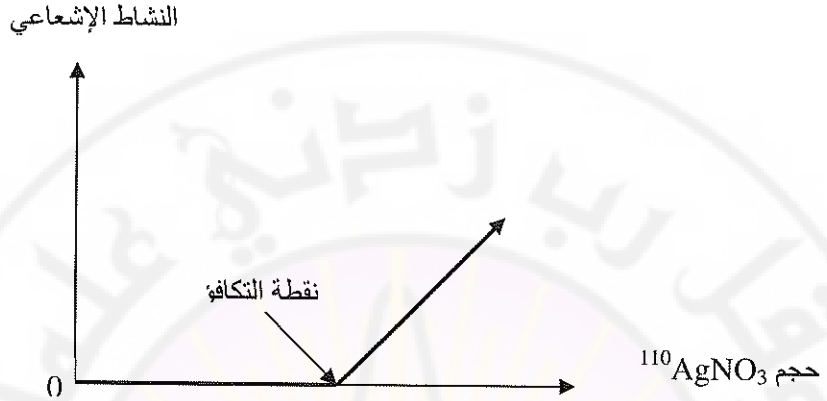
وقد حُسبت الثوابت a , b باستخدام عينات قياسية من البوتاسيوم النقي ووجد أن $a = 0,234$ و $b = 2,853$ في بعض التجارب.

فعند تثبيت هذه المقادير في المعادلة يمكن تحليل خامات البوتاسيوم بسرعة وسهولة بزمن يتراوح بين 10 دقائق وساعتين. يمكن استخدام هذه الطريقة في حساب كمية البوتاسيوم المشع الموجودة في جسم الإنسان عن طريق قياس أشعة γ التي يبعثها النظير واستخدام العداد الجسدي.

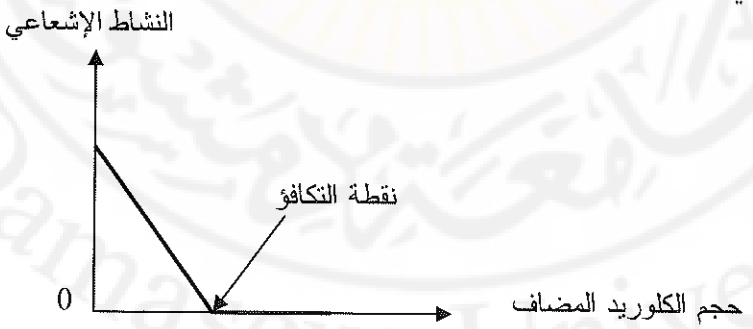
6) التحليل الحجمي الإشعاعي:

تمَّ استخدام الآثار القليلة للنظائر المشعة في هذه الطريقة كمشعرات لتعيين نقطة التكافؤ بدلاً من المشعرات الكيماوية. فمثلاً يمكن معايرة الهاليدات بواسطة محلول قياسي من نترات الفضة- 110 المشعة, حيث تسلك نترات الفضة كمحلول للمعايرة وكمشعر في الوقت نفسه. حيث يترسب أثناء المعايرة هاليد الفضة وبعد كل إضافة من نترات الفضة تؤخذ قطرة من

محلول المعايرة الرائق ويقاس نشاطها الإشعاعي ويُستدل على نقطة انتهاء التفاعل بظهور آثار النشاط الإشعاعي في المحلول الرائق.



مثل هذه المعايرة يفضل استخدامها في معايرة المحاليل الملونة والمعتمة حيث يتعذر استخدام المشعرات الاعتيادية. وكذلك تستخدم في معايرة المحاليل الساخنة أو المحتوية على مواد قد تتلف الأقطاب في التحليل الكهروكيماوي. كما تستخدم هذه الطريقة في معايرة بعض الفلزات بواسطة الهاليدات مثل الفضة والزئبق والرصاص وغيرها حيث يستخدم نظير الفضة-110 والمضاف إلى محلول الفضة كمشعر, حيث يختفي النشاط الإشعاعي من المحلول الرائق عند نقطة التكافؤ.



وكذلك معايرة الكالسيوم بـــ EDTA بوجود مشعر مشع هو يـــودات الفضة – 110 حيث إنّ ثابت استقرار المعقد الناشئ مع الكالسيوم هو $10^{10,6}$ بينما ثابت استقراره مع الفضة $10^{7,3}$ و بالتالي عند إضافة محلـــول EDTA إلى الكالسيوم بوجود بضع بلُّورات من يودات الفضة المشعة والتي هي قليلة الذوبان في الماء يرتبط الكالسيوم أولاً مع EDTA وبعد انتهاء الكالسيوم من المحلول يبدأ ارتباط الفضة بـــ EDTA حيث تنطلق الفـــضة المـــشعة إلـــى المحلول الرائق مشيراً بذلك على نهاية المعايرة كما في الشكل.



7) التحليل بتحرير النشاط الإشعاعي:

تعتمد هذه الطريقة على تفاعلات الاستبدال والإزاحة. فمـــثلاً يمكـــن تقدير نسبة الماء في المذيبات العضوية باستخدام مركب ربـــاعي تريتيـــوم الألمنيوم والليثيوم

$$LiAlT_4^* + 4H_2O \rightarrow LiOH + Al(OH)_3 + 4HT^*\uparrow$$

حيث يتحرر مركب الهدروجين التريتيومي المشع ويقـــاس النـــشاط الإشعاعي وتقدر نسبة الماء الموجودة.

كذلك تقدير تركيز البزموت عن طريق إزاحة عنصر الزنك المشع من المركب $EDTA - Zn^{*}$.

$$Bi^{+3} + EDTA - Zn^{*} \rightarrow Bi - EDTA + (Zn^{+2})^{*}$$

حيث يستخدم مبادل أيوني لفصل الزنك المشع عن الـ EDTA.

8) تقدير ذوبانية المواد بالنشاط الإشعاعي:

تُعدُّ هذه الطريقة فريدة من نوعها في تقدير ذوبانية المواد بدقة عالية جداً وعلى الأخص المركبات القليلة الانحلال. فمثلاً يتم إيجاد ذوبانية كبريتات الباريوم الشحيحة الذوبان في الماء عن طريق أخذ كمية معلومة من $BaSO_4$ وزنها W وموسومة بالباريوم Ba^{139} المشع ويقاس نشاطها الإشعاعي وليكن A_0, تمزج العينة وتُرجُّ بشكل جيد مع حجم معلوم من الماء قدره V حتى الحصول على محلول مشبع نشاطه يساوي A عندئذٍ يمكن حساب الذوبانية بالعلاقة :

$$S = \frac{W}{A_0} \times \frac{A}{V}$$

بواسطة هذه الطريقة تم تحديد ذوبانيات أقل من 10^{-10} غرام / ليتر.

2.1.16- التطبيقات في الكيمياء الفيزيائية والبنيوية:

1) استخدام النشاط الإشعاعي في دراسة حركية التفاعلات:

إنَّ حركية التفاعلات الكيماوية تهتم بدراسة مجموعة العوامل المؤثرة في سرعة اتجاه التفاعلات, وإن انتشار استخدام النظائر المشعة في هذا المضمار سهّل الطريق أمام العاملين في هذا الحقل في تقدير ثابت سرعة أعقد التفاعلات وحساب مرتبتها ودراسة الحالات الوسطية لها وكذلك تأثير المذيبات عليها وتقدير طاقة تنشيطها. فلقد استخدم مثلاً الزرنيخ -76 المشع كأثر (Tracer) في تعيين تركيز الزرنيخات (+5) والزرنيخات (+3) خلال مراحل التفاعل .

$$H_3As^*O_3 + {}^-I_3 + H_2O \underset{K_2}{\overset{K_1}{\rightleftharpoons}} H_3As^*O_4 + 3I^- + 2H^+$$

وقد حسب معدّل التفاعل R في حالة التوازن بالعلاقة.

$$R = \frac{-1}{t} \frac{[As(III)] \cdot [As(V)]}{[As(III)] + [As(V)]} \ln (1-f)$$

حيث يمثل f الجزء المتبادل و t الفترة الزمنية للتفاعل.

كما استخدمت آثار النظائر المشعة في دراسة التبادل النظيري. فمنذ زمن بعيد لاحظ Hevesy ظاهرة تبادل نظائر العنصر الواحد في مركباته المختلفة ففي التفاعل التالي يحصل تبادل نظيري بين رصاص النترات ورصاص الكلوريد كما يلي.

$$Pb^* (NO_3)_2 + PbCl_2 \rightarrow Pb (NO_3)_2 + Pb^*Cl_2$$

كذلك الأمر بالنسبة لنظائر اليود

$$C_2H_5I + {}^*I^- \longrightarrow C_2H_5I^* + I^-$$

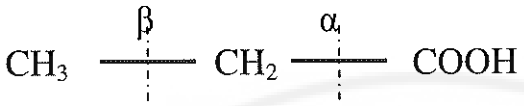
2) استخدام النشاط الإشعاعي في دراسة ظاهرة السطوح:

وفق هذه الطريقة يتم استخدام آثار النظائر المشعة في قياس الكميات الضئيلة جداً المدمصة على السطوح بدقة عالية. وتتم العملية بغمر المادة الصلبة في محلول يحوي على نظير مشع مناسب وبعد تركها فترة من الزمن يجري إخراجها وقياس نشاطها الإشعاعي ومنه يحسب عدد الجزيئات الغرامية المدمصة على السطح. فعند غمس صفيحة من المنغنيز في محلول كبريتات المنغنيز المشع ذي التركيز نصف جزيئي وجد تجريبياً أن الصفيحة قد ادمصت على سطحها 22 طبقة ذرية وذلك بعد مرور ثلاثين ثانية و 626 طبقة ذرية بعد مرور ساعة واحدة. فلقد ساعد استخدام الآثار المشعة على فهم آلية الادمصاص التي لها أهمية تطبيقية كبيرة منها دراسة ادمصاص العناصر السامة أو المشعة على سطوح العبوات الزجاجية أو المعدنية أو البلاستيكية ودراسة تجانس انتشار المواد على سطوح الفلزات والخامات والسبائك.

3) استخدام النشاط الإشعاعي في دراسة آلية التفاعلات الكيماوية:

لقد أثبت استخدام الآثار المشعة نجاحه الكبير في دراسة آلية التفاعلات وبيان مسار التفاعل الكيماوي. فقديماً كانت الدراسة في هذا المضمار لا تخلو من الصعوبات إن لم تكن أحيانا متعذرة. فمن المعلوم أن التفاعل يمر بمراحل وسطية Intermediate يمكن أن تكون قابلة للفصل والتشخيص ولكن هنالك حالات لا يمكن معرفة ما يجري فيها أثناء التفاعل. ولقد أدّت تقنية استخدام الآثار المشعة دوراً بارزاً في كشف حقيقة ما يحدث في مثل هذه الحالات. فمن المشكلات الرئيسية التي تم تذليلها باستخدام

النظائر المشعة هي تحديد الروابط الكيماوية التي تنشطر أثنـــاء التفـــاعلات الكيماوية مثال ذلك انشطار روابط الحمض البروبيوني أثناء أكسدته.



ولتوضيح هذه المشكلة استخدم نظير الكربون C^{14} المشع في وســـم الزمرة الكربوكسيلية للحمض. بعد ذلك تمت أكسدة هذا الحمـــض الموســـوم بثاني كرومات البوتاسيوم فنتج حمض الخل وغاز CO_2.

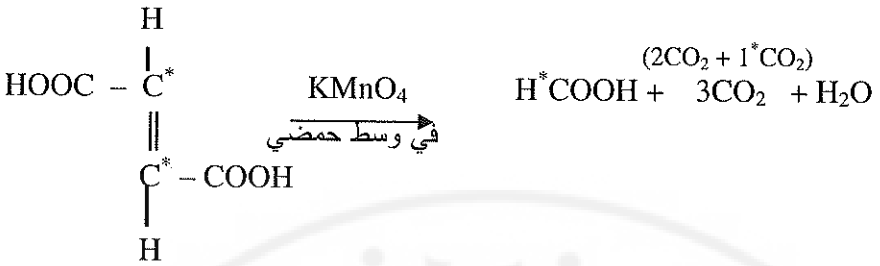
$$CH_3CH_2{}^*COOH \xrightarrow{K_2Cr_2O_7} CH_3COOH + {}^*CO_2$$

فمن قياس النشاط الإشعاعي تبين أن غاز ${}^*CO_2$ هو الـــذي يحمـــل النشاط الإشعاعي ومنه استنتج أن انشطار الرابطة تم في الموقع α.

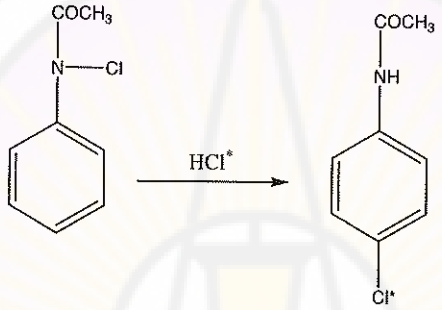
وفي تجربة ثانية استعمل فيها برمنغنات البوتاسيوم كمؤكسد في وسط قلوي فكان الناتج أوكزالات حاملة للنشاط الإشعاعي بنسبة 90% وكربونـــات حاملة للنشاط الإشعاعي بنسبة 10% مما يدل على أن الانشطار تـــم بنـــسبة 90% في الموقع β وبنسبة 10% في الموقع α.

$$CH_3CH_2{}^*COOH \xrightarrow{KMnO_4/KOH} KOOC - {}^*COOK + K_2{}^*CO_3$$

وكذلك الأمر عند دراسة آلية أكسدة حمض Fumaric Acid الـــذي وسمت فيه ذرتا الكربـــون الثانويـــة بـــالكربون C^{14} بواســـطة البرمنغنـــات المحمّضة. فقد بين قياس النشاط الإشعاعي لنواتج هذا التفاعل أنه قد تـــشكل جزيء واحد من حمض النمل انحدر من ذرة كربون ثانوية وتـــشكل ثـــلاث جزيئات من CO_2 انحدرت من ذرتي كربون كربوكسيلية غير مـــشعة وذرة كربون ثانوية مشعة.



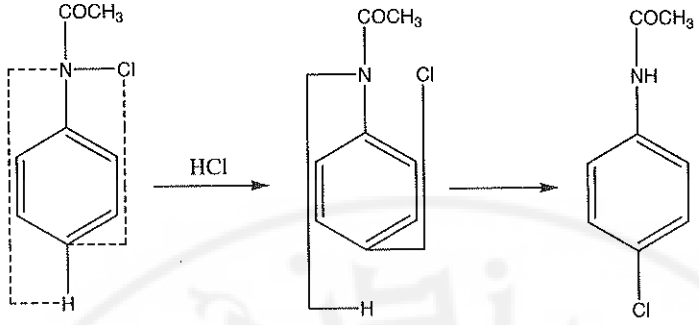
وكمثال على استخدام الآثار المشعة في دراسة البنية الجزيئية للمركبات وتبدلها هو تحول استيل كلورأمينو البنزن إلى بارا – كلور اسيت انيليد باستخدام حمض HCl الذي وسمت فيه ذرة الكلور كمحفز للتفاعل.



وقد اختلف العلماء في تفسير آلية هذا التفاعل فمنهم من قال إنَّ ذرة الكلور المرتبطة بذرة الآزوت في المركب تتحلل مائياً وتكون حمض الهيبوكلوريت الذي يتفاعل مع حمض HCl المستخدم كمحفز ليحرر الكلور الفعّال في المحلول حيث يهاجم هذا الكلور حلقة البنزن في موقع البارا.

$$HOCl + HCl^{38} \rightarrow \underset{(Cl\text{-}Cl^{38})}{Cl_2} + H_2O$$

وقسم آخر من العلماء تبنى تفسير آخر لآلية التفاعل حيث قالوا إنَّ رابطة ضعيفة هيدروجينية تنشأ بين ذرة الآزوت وذرة الهدروجين في موقع البارا من المركب وكذلك رابطة ضعيفة أخرى تنشأ أيضاً بين الكلور والكربون في الموقع نفسه, وبعد تنشيط التفاعل بـ HCl تتحول هذه الروابط إلى روابط متينة ليتشكل الجزيئ النهائي وفق.



ولكن استخدام حمض HCl الموسوم بـــالكلور- 38 كـــان الوســيلة الوحيدة في تقرير صحة أحد التفسيرين. فقد ظهر النشاط الإشعاعي فـــي ذرة الكلور مما أكد صحة التفسير الأول.

وقد استخدمت النظائر المشعة في مجال الكيمياء غير العضوية فقد تم البرهان مثلاً على أن ذرتي الكبريت في أيون الثيوكبريتات ليستا متكـــافئتين وذلك باستخدام الكبريت المشع-35 وفق.

$$\left[O - \overset{\overset{O}{\|}}{S} - O \right]^{-2} + S^* \rightarrow \left[O - \overset{\overset{O}{\|}}{\underset{\underset{S^*}{\|}}{S}} - O \right]^{-2}$$

وللتأكد من ذلك تم تفكيك الثيوكبريتات وفق التفاعلات .

$$S^*SO_3^{-2} + 2Ag^+ \rightarrow Ag_2S^*SO_3$$

$$Ag_2S^*SO_3 + H_2O \rightarrow Ag_2S^* + H_2SO_4$$

أوعن طريق تسخين الثيوكبريتات مع حمض مناسب وفق

$$S^*SO_3^{-2} + 2H^+ \rightarrow S^* + SO_2 + H_2O$$

فلو كانت الذرتان متكافئتين ومتماثلتين لظهر النشاط الإشعاعي فيهما معاً.

3.1.16- التطبيقات في الكيمياء الحيوية:

إنَّ استخدام النظائر المشعة في الكيمياء الحيوية يتطلب توفر عدد من الشروط للوصول إلى أفضل النتائج نذكر منها:

1) أن يكون تركيز النظير المشع (الأثر) والمراد حقنه في الكائن الحي كافياً حتى لا يتخفف تركيزه خلال العمليات الاستقلابية.

2) يفضل بشكل عام استخدام النظائر الباعثة لأشعة غاما أو الباعثة لأشعة بيتا بطاقة عالية نسبياً وذلك لتقليل تأثير الامتصاص الذاتي.

3) يجب أن يلتصق النظير المشع بموضع محدد وثابت في الجزيئة التي هي قيد الدراسة وتجنب احتمال التبادل النظيري, مثال ذلك تجنب الجذور الكيماوية الموسومة بالهدروجين المشع OH^*- أو NH^*_2- وذلك نظراً لسرعة التبادل النظيري بين الهدروجين المستقر والمشع خلال العمليات الاستقلابية.

4) عدم استخدام المركبات ذات النشاط الإشعاعي العالي خوفاً من تحطيم المركب وتغير مسار التفاعل ونواتجه المتوقعة.

5) استخدام النظائرالمشعة ذات عمر النصف الطويل نسبياً بحيث يكفي لإتمام التجربة وذلك حتى لا ينخفض النشاط الإشعاعي ويصبح من الصعب قياسه بدقة.

1) دراسة آلية التفاعلات الكيماوية الحيوية باستخدام النشاط الإشعاعي:

من المعروف أن سكر العنب يتخمَّر ويتحول بشكل كامل إلى حمض الخلِّ بواسطة الخميرة وفق التفاعل.

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_3COOH \quad (1)$$

وقد تبين نتيجة الدراسة باستخدام النظائر المشعة أن هذا التفاعل يتم على مرحلتين هما:

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 8H \quad (2)$$
$$8H + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O \quad (3)$$

ولقد أُجريت دراسة آلية هذا التفاعل باستخدام C^{14} , حيث تركت الخميرة لتنمو في وسط قياسي يحتوي على كربونات موسومة. وقد وجد عند تحليل الناتج أن حوالي 90% من C^{14} ظهر في حمض الخل وبالتحديد في مجموعتي الميثيل والكربوكسيل مما يؤكد أن حمض الخل قد تشكل من ثنائي أكسيد الكربون وفق المعادلة (3). ومنه يظهر أنه بدون استخدام C^{14} لكان من الصعب الوصول إلى فهم كامل لآلية التفاعل.

2) استخدام التخفيف النظيري في الكيمياء الحيوية:

سبق وأن شرحنا أسس هذه الطريقة وأهميتها في حل الكثير من المشكلات العلمية وكمثال على استخدام مبدأ هذه الطريقة في الكيمياء الحيوية سنستعرض كيفية تقدير الحموض الأمينية بواسطة طريقة المشتق. هذه الطريقة تتلخص بتحويل المزيج المجهول من الحموض الأمينية إلى مشتقات متميزة ومعلومة التركيب باستخدام كواشف موسومة ومن ثم تضاف هذه المشتقات إلى مشتقات غير موسومة في المزيج وبعد ذلك تؤخذ عينات من المشتقات النقية وتحسب درجة التخفيف (أي تخفيف المشتق المشع بواسطة المشتق غير المشع).

وتتلخص التجربة بالخطوات التالية:

1) تحويل الحموض الأمينية المجهولة بواسطة البيسيل الموسوم باليود I^{131} إلى مشتقاتها (البيسيل هو بارا يود فنيل كلوريد السلفونيل).

2) يضاف إلى المزيج أو الحمض الأميني المراد تقدير كميته مقادير موزونة من مشتقات البيسيل الموسوم بالكبريت-35.

3) يزال البيسيل الفائض بالاستخلاص.

4) تركيز مشتقات البيسيل في العينة إلى حجم صغير.

5) تحضير الكروماتوغرام بالطرائق الاعتيادية.

6) مسح الكروماتوغرام بعداد مناسب أو تصويره ذاتياً لتحديد مواقع الحزم.

7) قطع الحزم وقياس النسبة I^{131}/S^{35}.

ويحسب عدد الأوزان الجزيئية (عدد المولات) للحمض الأميني المفصول بالعلاقة.

$$m=XS/YC$$

X: النشاط الإشعاعي لمشتق البيسيل الموسوم باليود I^{131}.

S: النشاط الإشعاعي الكلي لمشتق البيسيل الموسوم بالكبريت-35 والمضاف إلى العينة.

Y: النشاط الإشعاعي للكبريت-35.

C: النشاط الإشعاعي الجزيئي (نبضة / دقيقة . جزيء) لكاشف البيسيل الموسوم باليود-131.

لقد تم استخدام هذه الطريقة على نطاق واسع لتقدير الحموض الأمينية مثل حمض الأسبارتيك والغلوتاميك والتريونين والغالين والآلانين في الزلاليات بعد استخلاصها بالكلوروفورم و HCl الممدد.

لقد برهنت هذه الطريقة على جدارتها في تقدير كميات أقل من 10µg من هذه الحموض بخطأ لا يتجاوز 1%.

2.16- استخدام النظائر المشعة في العلوم الجيولوجية والآثار:

1) قياس عمر الأرض والخامات وعمر الكون:

بعد اكتشاف النشاط الإشعاعي في الطبيعة ودراسة صفات النظائر المشعة وخصائصها الفيزيائية والكيماوية وطرائق فصلها ودراسة قوانين التفكك وأعمار النصف ومتوسط أعمارها أصبح في متناول علماء الأرض والكون وسائل جديدة للبحث في أصل عمر الأرض والكون وكذلك الخامات الموجودة في الأرض. ولقد أطلق العلماء اسم الساعات الطبيعية على النظائر الطبيعية المشعة. ولقد كان رذرفورد أول من قام بتقدير أعمار الخامات الطبيعية حيث أوضح في بعض أبحاثه أن خامات اليورانيوم تطلق دقائق ألفا أثناء تفككها وهذه الدقائق تتحول بدورها إلى غاز الهيليوم وبقياس كميته استطاع رذرفورد تقدير عمر الخام.

في الوقت الحاضر تتوفر عدة طرائق لتأريخ الخامات منها:

أ) قياس نسبة اليورانيوم إلى الهليوم .

ب) قياس نسبة اليورانيوم إلى الرصاص ونسبة الثوريوم إلى الرصاص .

ج) قياس نسبة البوتاسيوم-40 إلى الأرغون-40 .

د) قياس نسبة الروبيديوم-87 إلى السترونسيوم-87.

2) تقدير عمر الأرض:

يُحسب عمر الأرض باستخدام العلاقة التالية التي تعتمد على معرفة نسب وفرة نظائر الرصاص في الأرض بين فترتين زمنيتين هما صفر و t, وكذلك معرفة نسبة اليورانيوم إلى الرصاص في عصرنا الحاضر.

$$(pb^{206}/pb^{204})_t = (pb^{206}/pb^{204})_0 + (U^{238}/U)_t \ /(pb^{204}/pb)_t \ x \ (U/pb)_t.(e^{\lambda_{238}.t}-1)$$

$$(pb^{207}/pb^{204})_t = (pb^{207}/pb^{204})_0 + (U^{235}/U)_t \ /(pb^{204}/pb)_t \ x \ (U/pb)_t.(e^{\lambda_{235}.t}-1)$$

وقد وجد أن النسب تساوي

$(pb^{204}/pb)_t=0.0148$, $(U^{238}/U)_t=0.9927$, $(U^{235}/U)_t=0.00720$

وأن النسب التالية في الوقت الحاضر تساوي

$(pb^{206}/pb^{204})=16,0$, $(pb^{207}/pb^{204})=15.3$

وأما النسب $(pb^{206}/pb^{204})_0$, $(pb^{207}/pb^{204})_0$ في بداية عصر التكوين فهي بطبيعة الحال غير معروفة بالدقة المطلوبة إلا أنه يمكن تقديرها من وفرة الرصاص في النيازك التي لا تحتوي على كميات محسوسة من اليورانيوم وتقدر بحوالي 9.4 و 10.3 على التوالي.

وبما أن ثوابت التفكك λ_{235} و λ_{238} معلومة فيبقى في المعادلتين مجهولين فقط هما t و $(U/pb)_t$ حيث يمكن حسابهما من المعادلتين ومن ثم معرفة قيمة t التي تمثل عمر الأرض الذي قدّر وفقاً لهذه الطريقة بحوالي $4.55x10^9$ سنة.

3) التأريخ بالكربون-14 المشع:

لقد كان العالم ويلارد لبي (Libby) أول من وضع أساس هذه الطريقة في تقدير الأعمار. وهذه الطريقة تعتمد على أن نسبة الكربون-14 في الكربون المستقر الموجود في جسم الكائن الحي تبقى ثابتة طالما بقي هذا الكائن على قيد الحياة وفي اللحظة التي تنتهي فيها حياته تبدأ هذه النسبة بالاختلال حيث تبدأ النسبة C^{14}/C^{12} بالانخفاض بمرور الزمن وذلك لتفكك C^{14} الذي عمر النصف له يبلغ 5568 سنة وعدم تعويضه, وإن C^{14} ينشأ في طبقات الجو بتأثير الأشعة الكونية وفقاً للتفاعل:

$$_7N^{14} + _0n^1 \rightarrow _6C^{14} + _1P^1$$

وبالتالي فإن مقدار ما يتفكك من الكربون يعوض عن طريق هذا التفاعل وبالتالي بقيت وستبقى النسبة C^{14}/C^{12} ثابتة حتى نهاية هذا الكون. ولما كانت الأحياء وبخاصة النباتات تتغذى بـ CO_2, فإنَّ النسبة السابقة ستبقى ثابتة في الأنسجة الحية أيضاً. وبالتالي يمكن حساب الزمن الذي مضى على موت الكائن الحي من العلاقة

$$I = 15,3 \times e^{-0.693t/5568}$$

حيث تمثل I النشاط الإشعاعي النوعي لنسيج الكائن الميت (نبضة/دقيقة.غرام كربون) و t الزمن الذي مضى على موت الكائن الحي مقدراً بالسنة. و 15.3 ثابت يدعى المعامل الحيوي القياسي وهو يمثل النشاط الإشعاعي النوعي لنسيج الكائن الحي (نبضة/دقيقة.غرام كربون).

3.16- استخدام النظائر المشعة في علوم المياه والترسبات:

تؤدي النظائر المشعة دوراً هاماً في دراسة علوم المياه من تحركات وانتشار للمياه في الغلاف المائي للأرض وكذلك في دراسة الترسبات. فلقد تمت دراسة جريان المياه في الأنهار والشلالات الجبلية باستخدام الأثر المشع. كما حظيت دراسة تحركات الطمي والرمل في مصبات الأنهار ومنعطفاتها وترسب تلك المواد في قاع النهر وعلى جوانبه باهتمام بالغ من قبل المختصين. كما استخدمت النظائر المشعة في التحري عن المياه الجوفية, حيث تقدم هذه الدراسة معلوماتٍ وافيةً عن مصادر المياه وخصائصها الكيماوية والفيزيائية وسرعتها واتجاه حركتها بالإضافة إلى تحديد مواقع وامتداد وأشكال وكثافة ومسامية مستودعات المياه الجوفية وغيرها من المعلومات. وإن مبدأ هذه الطريقة كثيراً ما يستخدم في التنقيب عن النفط

وذلك من خلال تقدير مسامية الطبقات القريبة من جهاز القياس. وإنَّ طريقة التنقيب غالباً ما تسمى بطريقة الجس (غاما – غاما) أو طريقة جس الكثافة. وهي تتلخص بأن يؤخذ مصدر لأشعة غاما كالكوبالت–60 مثلاً بنشاط يتراوح بين mci(35-5) ومحاط بدرع من معدن ثقيل كالرصاص, فعندما يوضع المصدر المشع في ثقب الفحص أو البئر التجريبي فإن أشعة غاما تخترق المواد المحيطة بها فبعضها يمتص من قبل المواد بينما يتشتت بعضها الآخر ويرتد نحو عداد الوميض المرافق للمصدر المشع وذلك حسب كثافة وطبيعة تلك المواد سواء كانت مياهاً أم صخوراً أم أملاحاً.

4.16- استخدام النظائر المشعة في الطب وعلم وظائف الأعضاء:

يوماً بعد يوم تتعاظم استعمالات النظائر المشعة في ميدان الطب فقد استخدمت آثار النظائر المشعة في تعيين زمن الدورة الدموية وكفاءة نقل الدم خلال الشعيرات الدموية وكذلك تشخيص الأعراض المرضية المتصلة بها كتضيق الأوردة والشرايين وذلك عن طريق حقن الجسم بمحلول ملح الطعام الموسوم بـ Na^{24} وبنشاط يقدر بـ $100\mu c_i$ عن طريق أحد أوردة الأطراف الأمامية وتسجيل الزمن الذي يظهر فيه النشاط الإشعاعي في القدمين والسرعة التي يصل فيها إلى حالة الاتزان وتدقيق شكل المنحنى البياني لتراكم الإشعاع في مركز الفحص.

إنَّ وجود أي تضيق في الأوعية الدموية أو أحد أطرافها يبعد المنحني البياني عن شكله القياسي. كما استُحدث أسلوبٌ جديدٌ في دراسة كفاءة عضلة القلب وقد صمم جهاز لذلك أطلق عليه مسجل القلب الإشعاعي. كما استخدم اليود في تشخيص وعلاج أمراض الغدة الدرقية كما استخدم الفوسفور– 32 في

تشخيص وعلاج أمراض الدم والأمراض الخبيثة ومرض تكاثر الكريات الحمراء وسرطان الدم والسرطان اللمفاوي وغيرها حيث يتميز الفوسفور بصفات فريدة منها :

أ) قدرته الفائقة على التمركز في الأعضاء كالعظام والأنسجة المتكاثرة الأخرى.

ب) من اليسير حقنه بجرعات علاجية (1-2) ميلي كوري مع محلول فوسفات الصوديوم دون أن تظهر على المريض أعراض مرض الإشعاع.

ج) عمره النصفي مناسب (14 يوماً) لاتمام الدراسة دون أن يتلف الخلايا.

د) أظهر كفاءة عالية في علاج مرض تكاثر الكريات الحمراء وغيرها من الأمراض الخبيثة.

5.16- استخدام النظائر المشعة في الصناعة:

تؤدي النظائر المشعة دوراً هاماً في صناعة أجهزة المراقبة والسيطرة كأجهزة قياس السمك والكثافة وتدفق السوائل والغازات أو مراقبة جودة المنتجات الصناعية وفحصها. وهذا الاستخدام الصناعي للنظائر المشعة يعتمد على نقطتين أساسيتين هما:

أ) الاستفادة من خصائص الإشعاعات كالامتصاص أو التشتت أو التفاعل النووي.

ب) الاستفادة من النظائر المشعة كآثار وسم لمتابعة مراحل العمليات الصناعية فقد استخدمت الخصائص الإشعاعية في :

1) تصميم مقاييس ومعايير مراقبة إشعاعية كمعيار السمك والتدفق.

2) التصوير بالأشعة الذي انتشر في كافة قطاعات الصناعة ولم يعد مقتصراً على حقل الطب حيث يجري تصوير السبائك والمعدات المعدنية والهياكل وقطع الخرسانة لاكتشاف الشقوق والخروق وفقاعات الهواء والتأكد من جودة صنعها ومتانتها وتجانسها.

3) كما تستخدم النظائر المشعة في تشخيص مواقع تسرب السوائل والغازات الخطرة.

مثال: استخدام غاز الكربتون-85 المشع في تحديد موقع تسرب غاز الوقود في شبكة أنابيب معقدة.

4) كما استخدمت النظائر المشعة في دراسة تآكل واستهلاك المواد والعدد الصناعية وذلك بتشعيع هذه العدد بالنترونات ووضعها قيد الاستعمال لفترة وجيزة حيث تؤخذ فما بعد البرادة أو الشظايا ويقاس نشاطها الإشعاعي ومنه يمكن حساب مقدار التآكل.

5) تستخدم النظائر المشعة كذلك في الحفاظ على السلامة الصناعية فمثلاً كثيراً ما يطلب من العاملين وضع أحزمة أو أساور تحمل نظيراً مشعاً مناسباً ويوضع بالقرب من الآلات القاطعة عداد غايغر متصل بصفارة للتنبيه أو بجهاز لإيقاف الآلة وذلك لتجنب حوادث قطع الأيدي أو الأرجل.

كما أنَّ كثيراً من الصناعات الكيماوية تفرز في أجواء المعمل بعض الأبخرة والغازات السامة التي يمكن الكشف عنها باستعمال النظائر المشعة. والمبدأ يعتمد على انتخاب مادة كيماوية صلبة وموسومة بنظير مشع مناسب توضع في أسفل أنبوب مفتوح الطرفين ويوضع في أعلاه عداد غايغر فعند مرور الغاز أو البخار السام على المادة الكيماوية المشعة يتفاعل معها محرراً غازاً مشعاً بنسبة تركيز البخار السام وعند مرور الغاز المشع على العداد

تنطلق أجهزة التنبيه. كما تستخدم النظائر المشعة بنجاح في الكشف عن أصابع الديناميت الحية المدفونة في ركام المقالع الحجرية وذلك بوضع نظير مشع باعث لأشعة غاما في عبوات الديناميت فيمكن بواسطة عداد الوميض تشخيص مواقعها والتقاطها.

6) كما تستخدم النظائر المشعة في إزالة الشحنات الكهربائية الساكنة ففي عدد من الصناعات يشكل تجمع الشحنات الكهربائية الساكنة خطراً أكيداً في حدوث الانفجارات والحرائق كما تعيق الانتاج في صناعة الورق والطباعة والنسيج ففي صناعة النسيج مثلاً تعمل الشحنات المتجمعة على الخيوط على انفصالها عن بعضها وعدم ثباتها. وقد استخدمت النظائر المشعة لإزالة الشحنات وزاد الانتاج بمقدار ثلاثة أضعاف حيث تقوم الإشعاعات الصادرة بتأيين الهواء بين الخيوط مما يؤدي إلى انفراغ الشحنات وإزالة تأثيرها.

7) كما تستخدم النظائر المشعة في فحص كفاءة عمليات الخلط والمزج والطحن حيث يُعدُّ عامل التجانس عاملاً أساسياً في جودة المنتج الصناعي فمثلاً في مصانع الزجاج التي تستلزم خلطاً متجانساً عالياً تضاف كمية مناسبة من نظير مشع إلى مواد الخلاط أو الطاحونة أو فرن الصهر, ويتم وضع عداد في نهاية أو عند مخرج الخلاط مثلاً لمتابعة النشاط الإشعاعي الذي يبدو متذبذباً في بداية عملية الخلط ومستقراً في نهاية العملية.

8) وتستخدم النظائر المشعة أيضاً في دراسة الترسبات العالقة في السوائل فمثلاً في محطات تصفية المياه تبرز أهمية المقاييس والتقنيات الإشعاعية في تقديم معلومات مستمرة عن المدة الصغرى للتخلص من الطمي والرمل.


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

مسائل عامة

1- تتناقص كتلة البروتون والنترون بعد اتحادهما, احسب بالـ (Mev):

أ- طاقة الارتباط للنكلون الواحد في نواة ذرة الهليوم.

ب- طاقة الارتباط للنكلون الواحد في نواة ذرة الديتريوم.

علماً أن : $m_p = 1.0078$ u.m.a , $m_n = 1.0086$ u.m.a

$m_{he} = 4.0039$ u.m.a , $m_d = 2.0147$ u.m.a

2- احسب وسطي طاقة الارتباط للنكلون الواحد في ذرة الأكسجين (O^{16}) علماً أن النقص في الكتلة هو $\Delta m = 0.1372$ u.m.a.

3- أوجد كتلة نواة ذرة نظير الأكسجين (O^{16}) بواحدات الكتل الذرية وكذلك بالغرام وذلك بالاعتماد على كتلة ذرته.

4- ماهو عدد نوى نظير اليورانيوم-235 الموجودة في أربعة غرامات من اليورانيوم الطبيعي.

5- احسب عتبة التفاعل: $_3Li^7(p,n)_4Be^7$

6- أوجد طاقة عتبة التفاعل N^{14} $(\alpha,p)O^{17}$ حيث إن هذا التفاعل ماص للحرارة وقيمة Q هي: $Q = -1.2$ Mev

7- أوجد الشدة الإشعاعية لغرام واحد من الراديوم-226 حيث في اللحظة t=0 كان الراديوم معزولاً. ثم احسب الزمن اللازم كي تنقص هذه الشدة بمقدار 90% من قيمتها التي وجدتها.

9- ماهي كتلة نظير الكوبالت -60 التي شدتها الإشعاعية (1KCi) وماذا تصبح قيمتها بعد سنة.

10- ينبعث الرادون-222 من الراديوم-226 والموجود معه في حالة توازن إشعاعي. ماهو الزمن اللازم حتى تتم 1% من هذه الحادثة, بفرض أنه في الزمن t=0 كان الراديوم معزولاً. ثم احسب كتلة الرادون-222 الموجودة في حالة توازن مع كيلو غرام واحد من الراديوم-226.

11- تُرجم نواة ذرة الليثيوم-7 بالبروتون فنحصل على التفاعل النووي التالي :

$$ {}_3Li^7 + {}_1H^1 \longrightarrow 2\ {}_2He^4 $$

1- احسب تغير كتلة المواد الداخلة في التفاعل.

2- احسب الطاقة المتحررة من كل ذرة غرامية من الليثيوم.

3- ماذا تصبح هذه الطاقة.

4- إذا علمت أن الذرة الغرامية من الفحم تطلق باحتراقها 10^5 حريرة , فاحسب كتلة الفحم التي تحرر بالاحتراق الطاقة نفسها التي تحررها ذرة غرامية من الليثيوم وفي نفس الشروط.

حيث $m_p = 1.007$ u.m.a , $m_{he} = 4.004$ u.m.a

$m_{Li} = 7.018$ u.m.a , $m_C = 12$ u.m.a

12- دُرس النشاط الإشعاعي لعينة من اليود-131 بواسطة عداد غايغر.
فوجد أنه يحصل في اليوم الأول على (600) تفكك في الدقيقة , وبعد ثمانية أيام وجد أنه يحصل على (297) تفكك في الدقيقة. والمطلوب

آ- احسب ثابت التفكك.

ب- احسب دور العنصر المشع.

ج- احسب كتلة اليود-131 التي شدتها الإشعاعية ميلي كوري واحد.

د- احسب عدد التفككات في الثانية ولكل غرام.

13- احسب الشدة الإشعاعية لثلاث كيلو غرامات من اليورانيوم-238 ,الذي دوره ($T=4,5.10^9a$).

14- احسب الزمن اللازم الذي ينقضي حتى تتناقص الشدة الإشعاعية لمنبع من الـ Ra_d شدته الإشعاعية (1Curie) إلى شدة إشعاعية قدرها $1\mu ci$ علماً أنَّ دور هذا النظير هو (22) سنة.

15- إن للفوسفور نظيران هما $_{15}p^{32}$, $_{15}p^{30}$, يصدر أحدهما البوزيترون β^+ ويصدر الآخر الإلكترون β^- اكتب معادلات التفكك.

16- من المعلوم أن البلوتونيوم عنصر مشع ينتج في المفاعلات بدءاً من اليورانيوم - 238 فإذا أسر هذا الأخير نتروناً فإنه يتعرض لعمليتي تفكك اصدار β^- .

اكتب التفاعلات النووية الموافقة ومما تتألف النواة الناتجة.

17- يستخدم منبع من الكوبالت -60 في المعالجة الطبية . ويعـزل المنبـع بحاجز من الرصاص بهدف حماية العاملين في مركز المعالجة.

ما هو ثخن هذا الحاجز اللازم لتقليل جرعة التعرض حتى 000 10 مرة ,بفرض أن ثوابت مادة الرصاص هي (μ=0,06 cm^2/g ρ=11,3 g/Cm^3).

18- تعرض جسم إنسان لحادثة إشعاعية شدتها (50) رونتجن.

آ- ما هي بالتقريب الجرعة الإشعاعية التي امتصها جسم هذا الإنسان.

ب- وإذا أضيف إلى التعرض الإشعاعي السابق الذكر حادثـة إشـعاعية إضافية بسبب تدفق نتروني ,فكانت الجرعة الجديدة الممتصة هـي (20rad) وكان ثابت التأثير البيولوجي (WRE=20أي RBE=20) احسب فـي هـذه الحال الجرعة الكلية التي امتصها الجسم.

19- كم من الزمن يستغرق التحلل الإشعاعي لملح الراديوم الـذي يحـوي Ra^{226} بنسبة 10% علماً أن عمر النصف له 1600 سنة.

20- إن نشاط عينة مشعة هو 100Ci فكم يبلغ هذا النشاط بعد انقضاء ثلاثة أعمار نصف.

21- يفقد $_{90}Th^{232}$ في سلسلته ست دقائق α وأربع β^- في عشرة مراحل, فما هو النظير الذي ينتهي إليه الثوريوم.

22- ما هو نمط التفكك الإشعاعي لكل من النظائر الآتية:

$_{37}Rb^{81}$, $_{84}Po^{218}$, $_{7}N^{17}$, $_{15}P^{29}$

23- يبلغ نصف عمر الراديوم-226 1600 سنة, ماهي النسبة المئوية المتبقية من الراديوم-226 النقي بعد مرور 50 سنة منذ تحضيره.

24- ماهو عمر صخر يحتوي 1g من اليورانيوم-238 لكل غرام من الرصاص-206, علماً أن عمر النصف لليورانيوم-238 هو $4.5x10^9$ سنة.

25- يتحلل النظير $_{84}Po^{210}$ إلى $_{82}Pb^{206}$ بعمر نصف قدره 140 يوماً, فبعد مضي كم من الزمن يتحول 85% من $_{84}Po^{210}$ إلى $_{82}Pb^{206}$.

26- يخضع غرام واحد من الألمنيوم إلى تشعيع بواسطة تيار نتروني كثافته $10^{13}\ cm^{-2}.s^{-1}$, فما هو النشاط الإشعاعي الأعظمي المحصول عليه مقدراً بالكوري. علماً أن

$$\sigma_{Al\text{-}127}= 0.230\ b\ ,\ M_{Al}= 26.98154\ g.mol^{-1}$$

27- يحتوي مفاعل مهدأ بالماء الثقيل على 10^{30} ذرة من الديتريوم, فما هي قيمة النشاط الإشعاعي للتريتيوم الناشئ بعد تشغيل المفاعل مدة عام كامل علماً أن كثافة التدفق النتروني هي $\Phi=10^{13}\ cm^{-2}.s^{-1}$ والمقطع العرضي الفعال للديتريوم هو $\sigma_d=0.00053\ b$ وعمر النصف للديتريوم هو 12.323 سنة.

28- يحتوي مفاعل على 2.10^{29} ذرة من اليورانيوم-238. كم يبلغ عدد النوى الذرية لـ U^{239} و Np^{239} التي يحتويها المفاعل بعد تشغيله مدة طويلة بتدفق نتروني كثافته $10^{13}\ cm^{-2}.s^{-1}$.

29- ماهو وزن كلوريد السيزيوم $^{137}CsCl$ النقي اللازم لإعطاء نشاط إشعاعي بمقدار 1000 Ci علماً أن $t_{½}$=30 a.

30- احسب عدد جسيمات β^- الصادرة في السنة من 10 غرام ماء يحوي ^3H_2O بنسبة 5% ومعادلة التفكك الإشعاعي هي:

$$_1H^3 \longrightarrow {}_2He^3 + {}_{-1}e^0$$ حيث $t_{½}(H^3)$=12.26 a ,

31- مزج $0.1cm^3$ من غاز الرادون Rn^{222} مع ليتر واحد من الأستيلين (يقاس الحجم في الشروط النظامية من الحرارة والضغط). احسب عدد جسيمات α الصادرة ومن ثم الطاقة الممتصة بالأستيلين في اليوم, على افتراض أن الأستيلين يمتص جميع جسيمات α.

$$_{86}Rn^{222} \longrightarrow {}_{84}Po^{218} + {}_2He^4$$

$t_{½}(Rn^{222})$= 3.83 d , $t_{½}(Po^{218})$= 3.05 min , E_α = 5.49 Mev

32- ماهو الرمز المفقود في كل من التفاعلات التالية:

$$^4_2He + {}^{27}_{13}Al \rightarrow {}^1_0n + ____$$

$$^{239}_{94}Pu + {}^1_0n \rightarrow ____ + {}^{91}_{38}Sr + 3{}^1_0n$$

$$^6_3Li + {}^1_0n \rightarrow ____ + {}^4_2He$$

$$^{24}_{12}Mg + {}^4_2He \rightarrow {}^1_0n____.$$

$$^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{87}_{35}Br + 3{}^1_0n + ____.$$

33- احسب الطاقة المتحررة عند التحلل الإشعاعي لواحد مول من البولونيوم-214 وفقاً للمعادلة:

$$^{214}_{84}Po \rightarrow {}^{210}_{82}Pb + {}^4_2He.$$

علماً أن الكتل الذرية هي:

[Pb-210=209.98284 amu, Po-214=213.99519amu,He-4=4.00260 amu]

34- حدد مقدار الطاقة المتحررة عند تحلل الثوريوم-230 وفقاً للتفاعل:

$$^{230}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{226}\mathrm{Ra}.$$

علماً أن الكتل الذرية هي:

[Th-230=230.033127amu;He-4=4.002603amu;Ra-226=226.025403]

35- حدد X في التفاعلات النووية التالية:

$$^{252}_{98}\mathrm{Cf}\,(^{10}\mathrm{B},\ 5\mathrm{n})\mathrm{X}$$

$$^{10}_{5}\mathrm{B}\,(\mathrm{X},\ \alpha)^{7}_{3}\mathrm{Li}$$

$$^{238}_{92}\mathrm{U}\,(15\mathrm{n},\ \mathrm{X})^{253}_{99}\mathrm{Es}$$

Damascus University

وقل رب زدني علما
Damascus University

ملحق

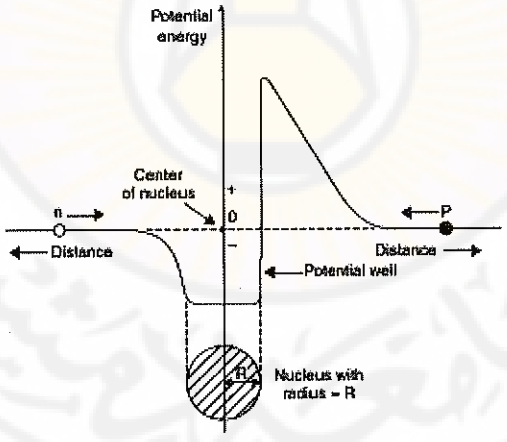
جدول توضيحي بخصائص التحلل الإشعاعي

Decay Type	Emitted Particle	ΔZ	ΔN	ΔA	Typical Energy of Emitted Particle	Example	Occurrence
α	$^4He^{2+}$	−2	−2	−4	$4 \le E_\alpha \le 10$ MeV	$^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + \alpha$	$Z > 83$
β^-	Energetic $e^-, \bar{\nu}_e$	+1	−1	0	$0 \le E_{\beta^-} \le 2$ MeV	$^{14}C \rightarrow {}^{14}N + \beta^- + \bar{\nu}_e$	$N/Z > (N/Z)_{stable}$
β^+	Energetic e^+, ν_e	−1	+1	0	$0 \le E_{\beta^+} \le 2$ MeV	$^{22}Na \rightarrow {}^{22}Ne + \beta^+ + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{stable}$, light nuclei
EC	ν_e	−1	+1	0	$0 \le E_\nu \le 2$ MeV	$e^- + {}^{207}Bi \rightarrow {}^{207}Pb + \nu_e$	$(N/Z) < (N/Z)_{stable}$, heavy nuclei
γ	Photon	0	0	0	$0.1 \le E_\gamma \le 2$ MeV	$^{60}Ni^* \rightarrow {}^{60}Ni + \gamma$	Any excited nucleus
IC	Electron	0	0	0	$0.1 < E_e < 2$ MeV	$^{125}Sb^m \rightarrow {}^{125}Sb + e^-$	Cases where γ-ray emission is inhibited

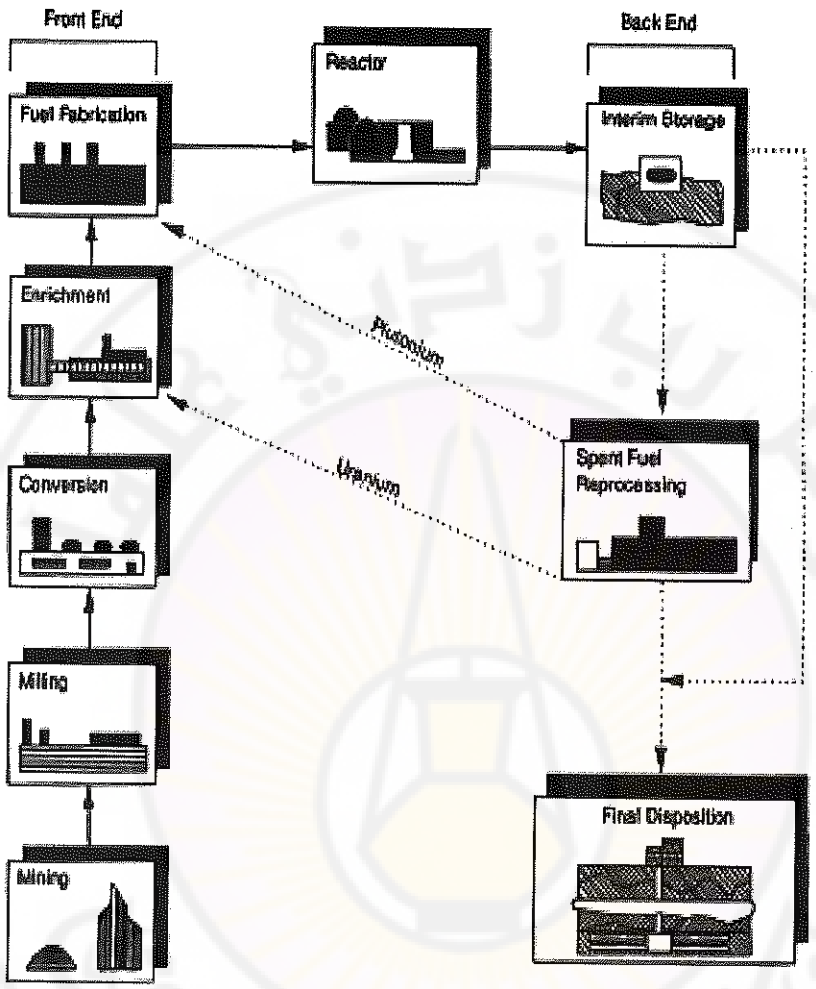
$$ {}^A_ZM > {}^A_{Z+1}M \qquad \text{possible } \beta^- \text{ decay} \qquad Z \rightarrow Z+1 $$

$$ {}^A_ZM < {}^A_{Z+1}M + E_b \qquad \text{possible orbital electron capture} \qquad Z+1 \rightarrow Z $$

$$ {}^A_ZM + 2m_0c^2 > {}^A_{Z+1}M \qquad \text{possible } \beta^+ \text{ decay} \qquad Z+1 \rightarrow Z $$

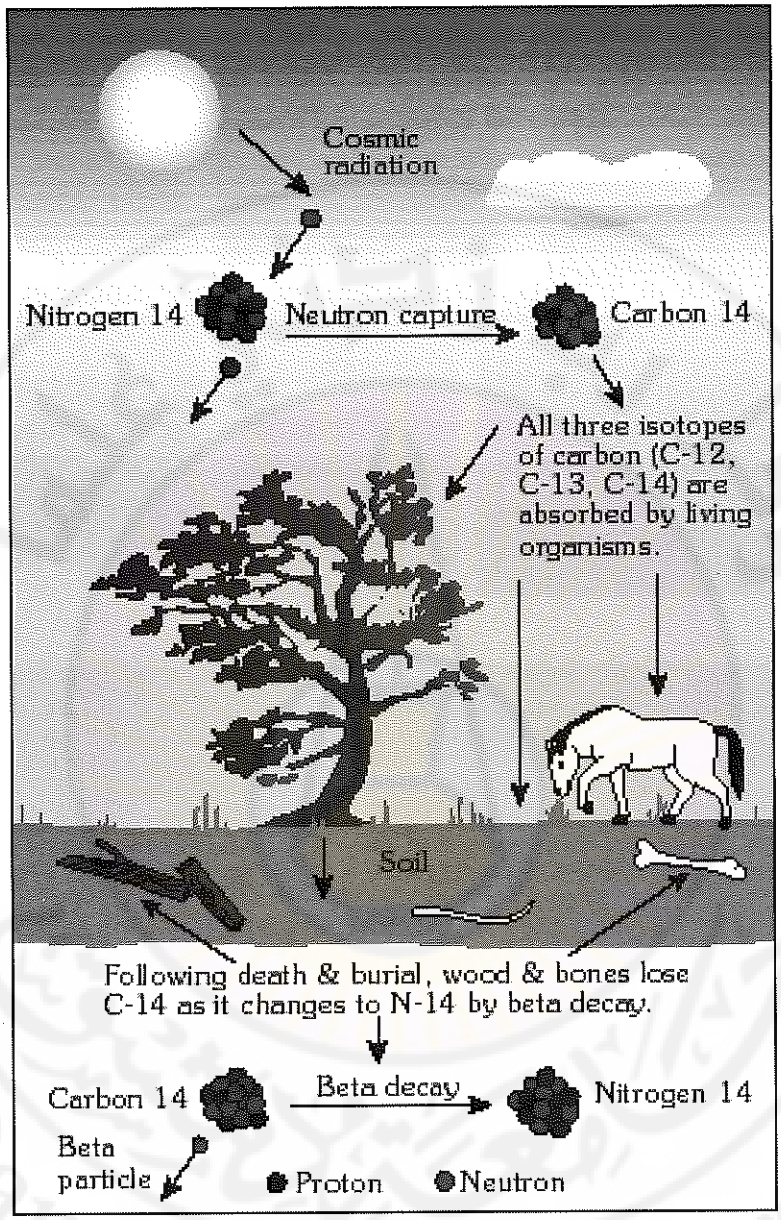


شكل توضيحي لفكرة البئر والحاجز الكموني النووبين بالنسبة للنترونات والبروتونات

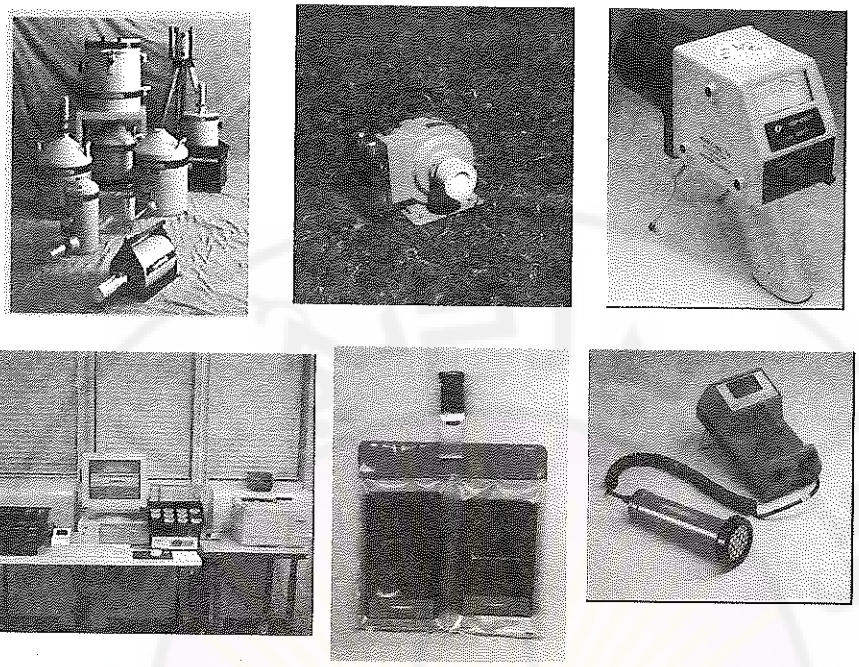


Schematic diagram of the nuclear fuel cycle.

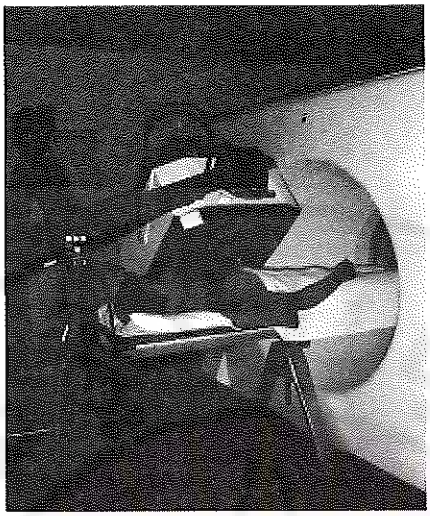
مخطط توضيحي لدورة الوقود النووي

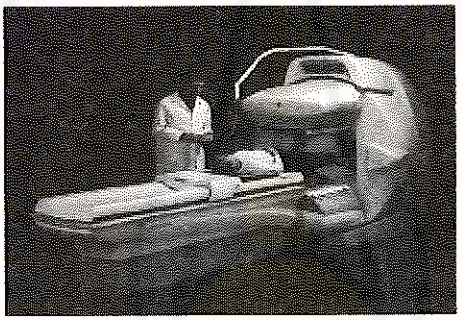


الدورة الطبيعية لتحول الآزوت-14 إلى كربون-14 وبالعكس



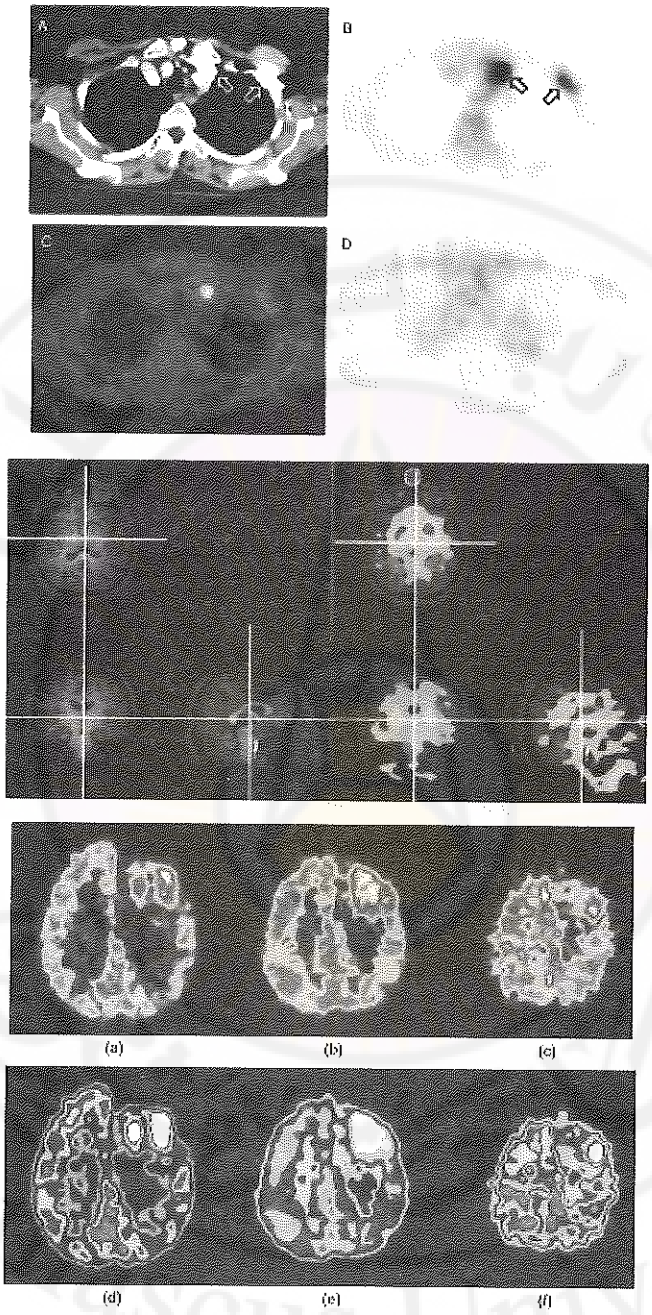
نماذج مختلفة من أجهزة قياس النشاط الإشعاعي





آلات التشخيص الإشعاعي الضخمة لالتقاط النشاط الإشعاعي الصادر من أجزاء محددة من الجسد أو من كامل الجسم

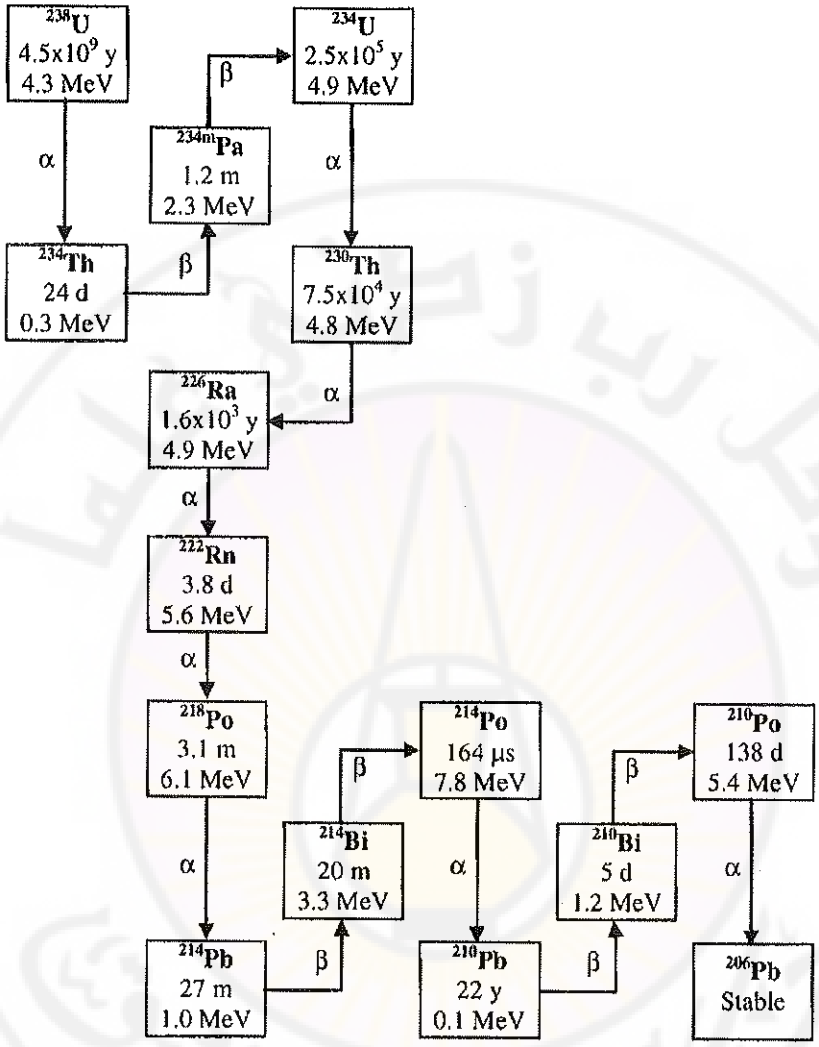
Damascus University



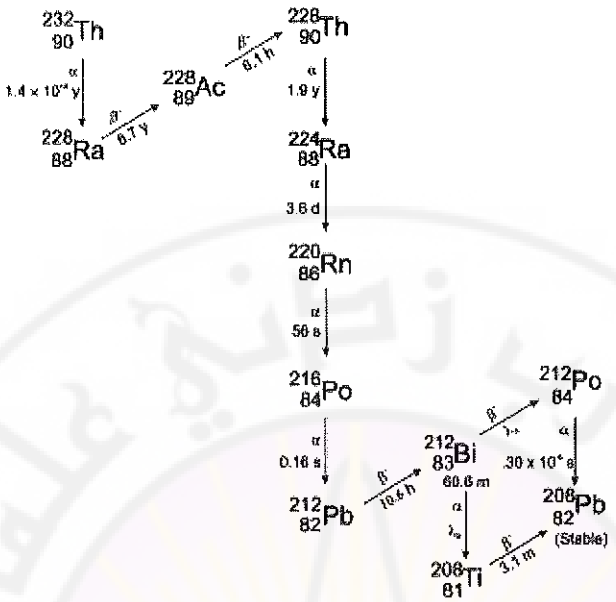
صور تشخيصية مختلفة تظهر توضع النظائر المشعة في الدماغ



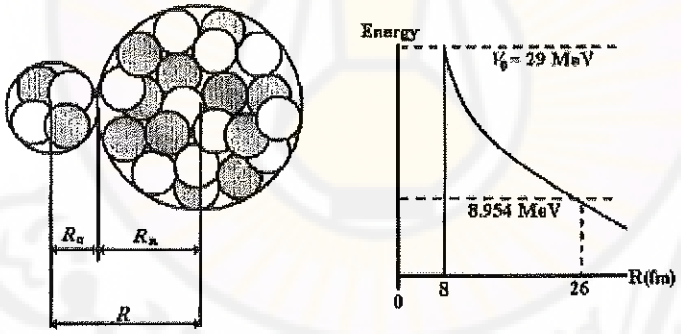
صورة تظهر التشخيص الكامل للهيكل العظمي باستخدام النظير المشع Tc^{99m} (مشفى مارسدن الملكي–لندن)



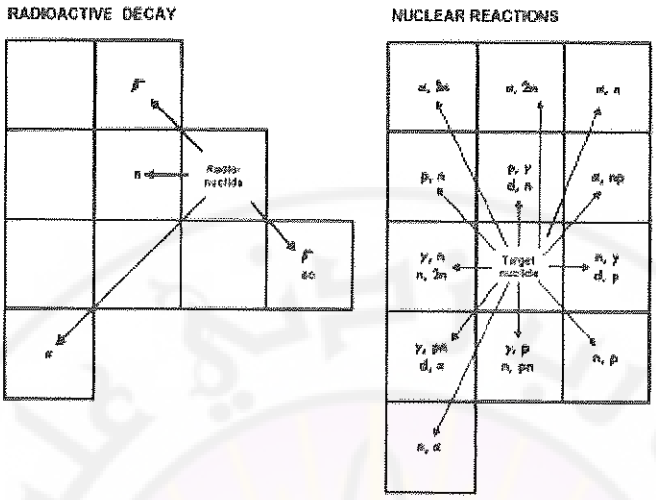
سلسلة التحلل الإشعاعي لنظير اليورانيوم U^{238}



مخطط التحلل الإشعاعي للنظير Th^{232} الطبيعي

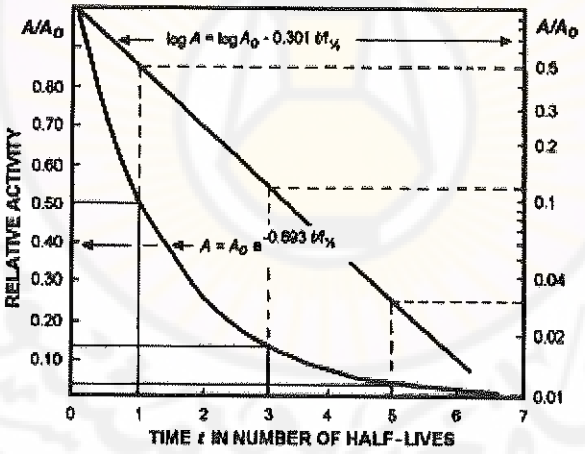


الحاجز الكموني الكولوني في التفكك من النمط α للنظير Po^{212}

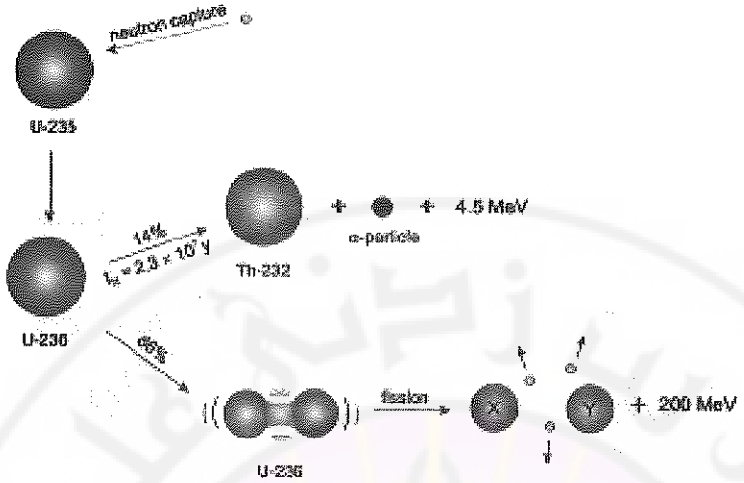


جدول يوضح النكليد الناتج عبر التفاعلات النووية (إلى اليمين)

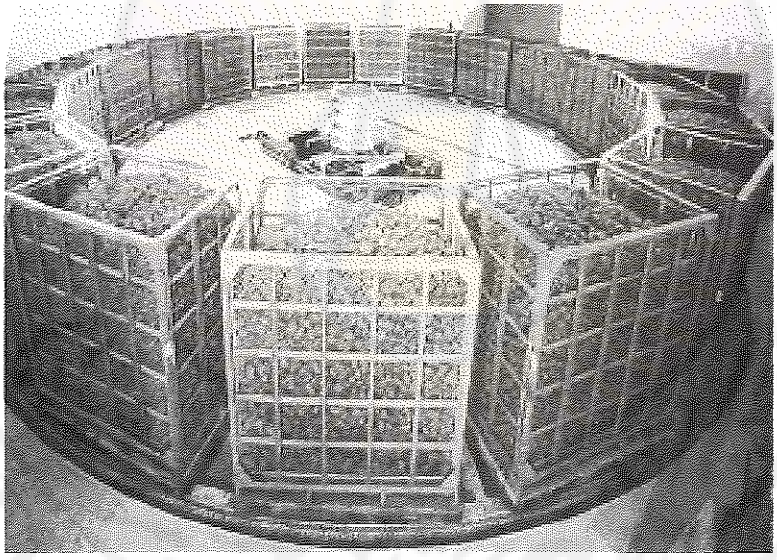
جدول يوضح النكليد الناتج عن التحلل الإشعاعي (إلى اليسار)



تمثيل بياني خطي ولوغارتمي لعملية تحلل إشعاعي بسيط

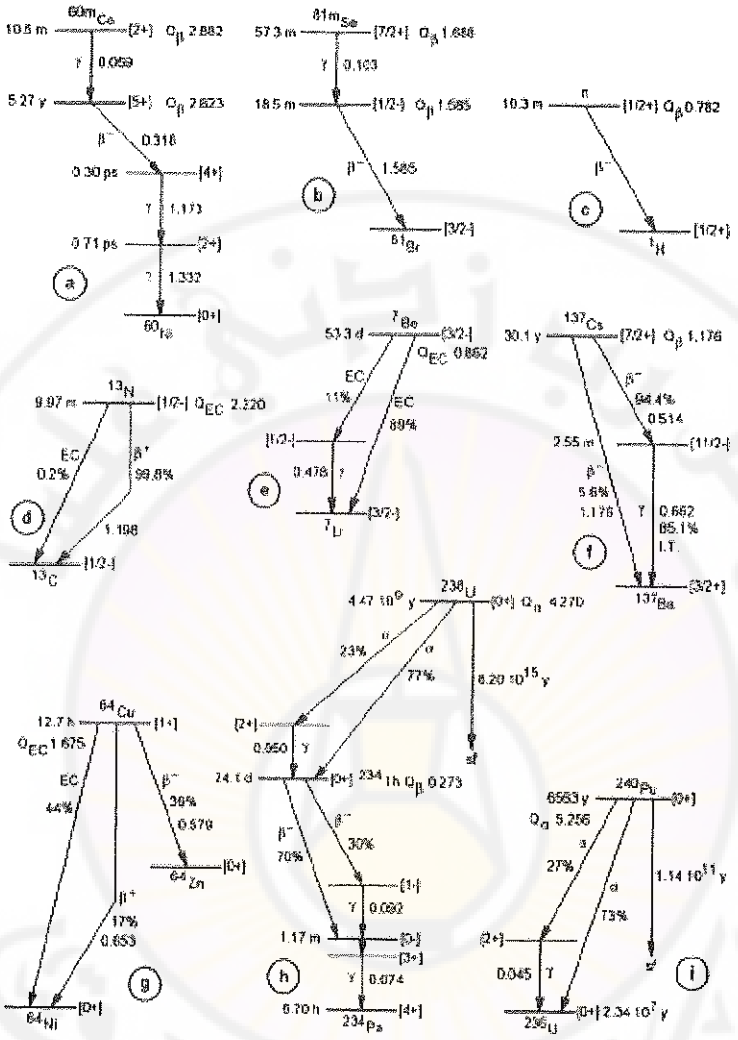


مخطط آلية تحلل النظير U^{236}



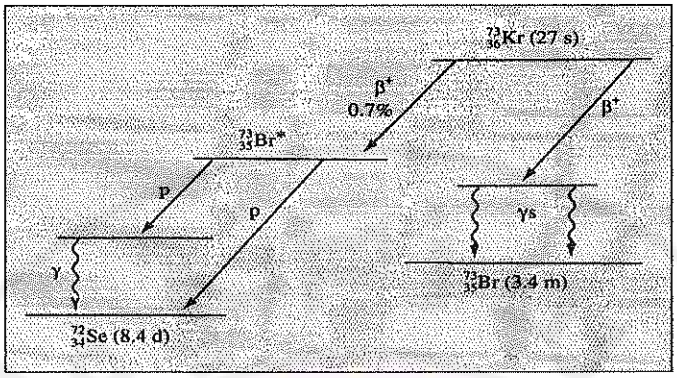
صورة تُظهر عملية تعريض ثمار البطاطا لأشعة غاما لمنع فسادها

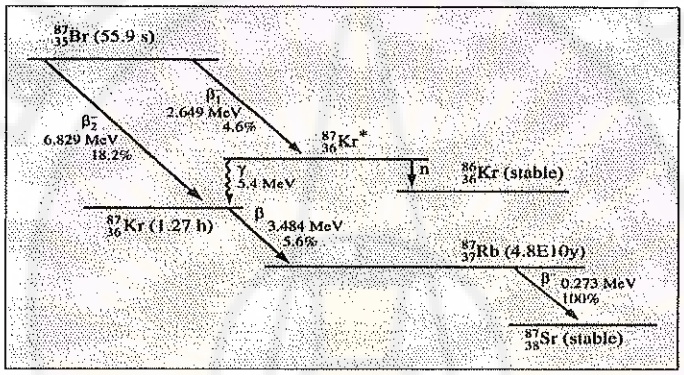
Damascus University

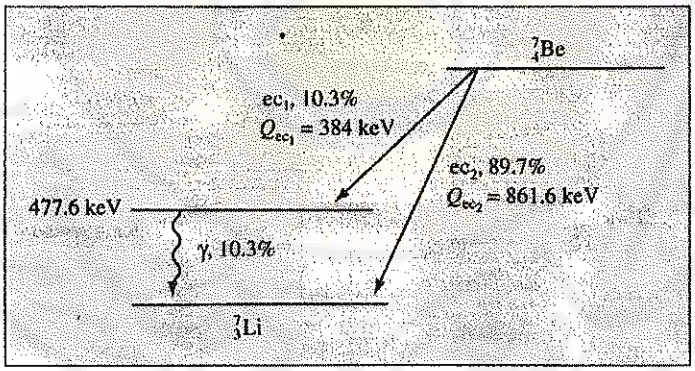


أمثلة مختلفة لتفكك بعض النظائر المشعة (الطاقة معبر عنها بواحدة MeV)

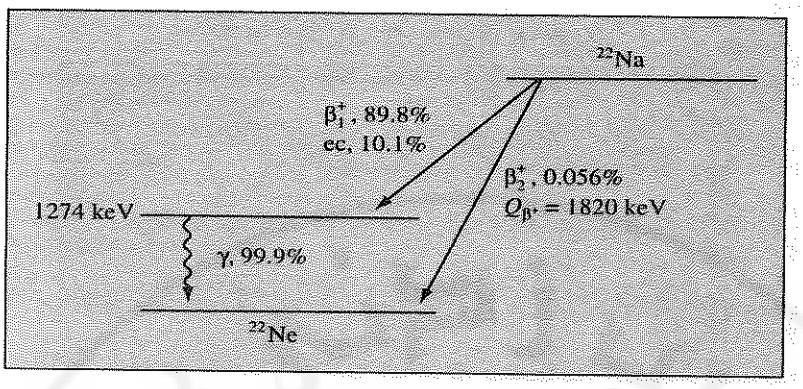
نماذج مختلفة لأنماط التفكك الإشعاعي

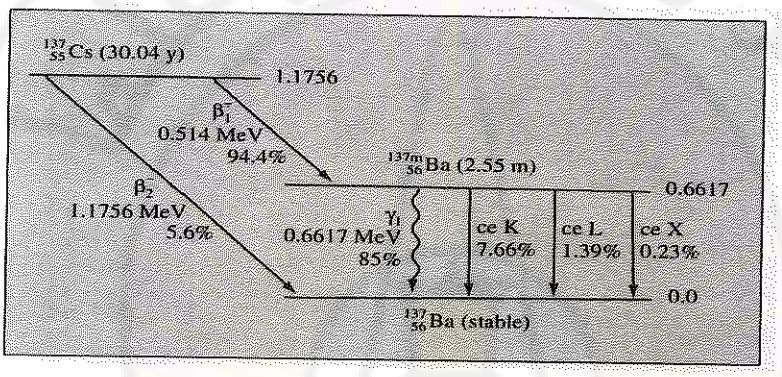


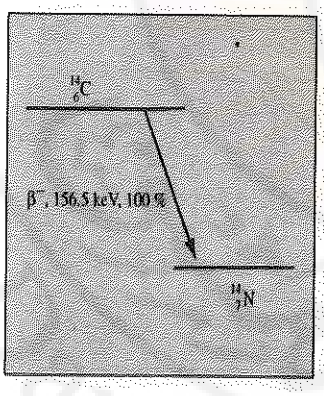


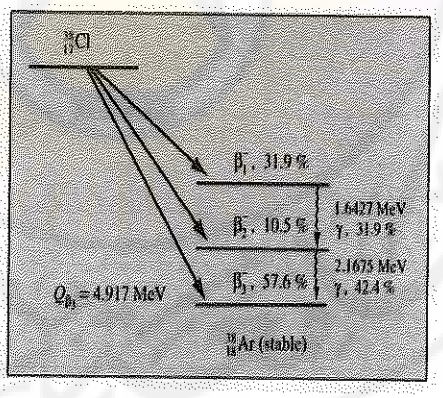


Damascus University

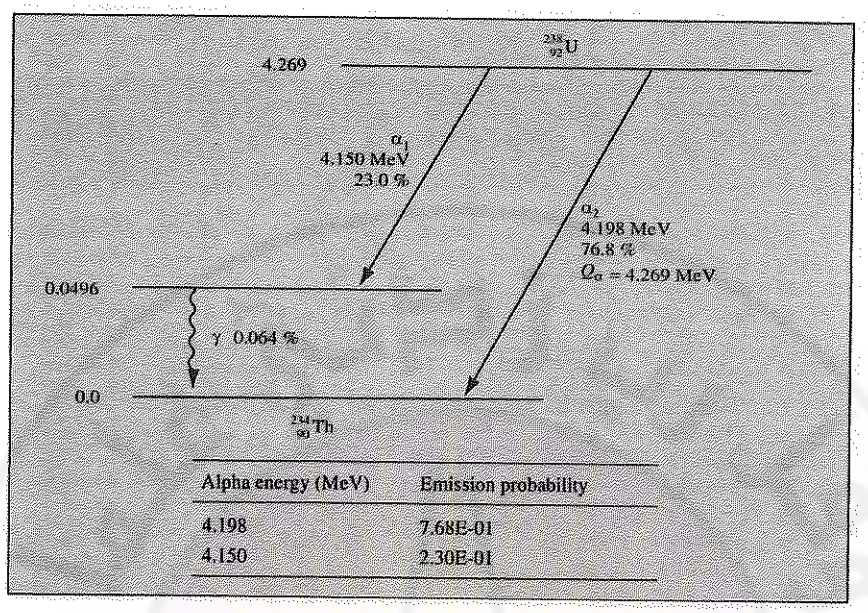








Damascus University



Alpha energy (MeV)	Emission probability
4.198	7.68E-01
4.150	2.30E-01

Damascus University

خصائص عناصر الجدول الدوري

Z	El	Element	Density ($g\ cm^{-3}$)	Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Critical point (°C)	Ionisation potential (eV)
1	H	Hydrogen	0.0708	−259.34	−252.87	−240.18	13.598
2	He	Helium	0.124901	−272.2	−268.93	−267.96	24.587
3	Li	Lithium	0.534	180.5	1342		5.392
4	Be	Beryllium	1.85	1287	2471		9.323
5	B	Boron	2.37	2075	4000		8.298
6	C	Carbon	2.267 15°	4492 t	3842 s		11.26
7	N	Nitrogen	0.807	−210	−195.79	−146.94	14.534
8	O	Oxygen	1.141	−218.79	−182.95	−118.56	13.618
9	F	Fluorine	1.5	−219.62	−188.12	−129.02	17.423
10	Ne	Neon	1.204	−248.59	−246.08	−228.7	21.565
11	Na	Sodium	0.97	97.8	883		5.139
12	Mg	Magnesium	1.74	650	1090		7.646
13	Al	Aluminum	2.7	660.32	2519		5.986
14	Si	Silicon	2.3296	1414	3265		8.152
15	P	Phosphorus	1.82	44.15	280.5	721	10.487
16	S	Sulfur	2.067	115.21	444.6	1041	10.36
17	Cl	Chlorine	1.56	−101.5	−34.04	143.8	12.968
18	Ar	Argon	1.396	−189.35	−185.85	−122.28	15.76
19	K	Potassium	0.89	63.38	759		4.341
20	Ca	Calcium	1.54	842	1484		6.113
21	Sc	Scandium	2.99	1541	2836		6.561
22	Ti	Titanium	4.5	1668	3287		6.828
23	V	Vanadium	6	1910	3407		6.746
24	Cr	Chromium	7.15	1907	2671		6.767
25	Mn	Manganese	7.3	1246	2061		7.434
26	Fe	Iron	7.875	1538	2861		7.902
27	Co	Cobalt	8.86	1495	2927		7.881
28	Ni	Nickel	8.912	1455	2913		7.64
29	Cu	Copper	8.933	1084.62	2562		7.726
30	Zn	Zinc	7.134	419.53	907		9.394
31	Ga	Gallium	5.91	29.76	2204		5.999
32	Ge	Germanium	5.323	938.25	2833		7.9
33	As	Arsenic	5.776 26°	817 t	614 s	1400	9.815

Damascus University

Z	El	Element	Density ($g\ cm^{-3}$)		Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Critical point (°C)	Ionization potential (eV)
34	Se	Selenium	4.809	26°	221	685	1493	9.752
35	Br	Bromine	3.11		−7.2	58.8	315	11.814
36	Kr	Krypton	2.418		−157.36	−153.22	−63.74	14
37	Rb	Rubidium	1.53		39.31	688		4.177
38	Sr	Strontium	2.64		777	1382		5.695
39	Y	Yttrium	4.47		1522	3345		6.217
40	Zr	Zirconium	6.52		1855	4409		6.634
41	Nb	Niobium	8.57		2477	4744		6.759
42	Mo	Molybdenum	10.2		2623	4639		7.092
43	Tc	Technetium	11		2157	4265		7.28
44	Ru	Ruthenium	12.1		2334	4150		7.361
45	Rh	Rhodium	12.4		1964	3695		7.459
46	Pd	Palladium	12		1554.9	2963		8.337
47	Ag	Silver	10.501		961.78	2162		7.576
48	Cd	Cadmium	8.69		321.07	767		8.994
49	In	Indium	7.31		156.6	2072		5.786
50	Sn	Tin	7.287	26°	231.93	2602		7.344
51	Sb	Antimony	6.685	26°	630.63	1587		8.64
52	Te	Tellurium	6.232		449.51	988		9.01
53	I	Iodine	4.93	20°	113.7	184	546	10.451
54	Xe	Xenon	2.953		−111.75	−108.04	16.58	12.13
55	Cs	Cesium	1.93		28.44	671		3.894
56	Ba	Barium	3.62		727	1897		5.212
57	La	Lanthanum	6.15		918	3464		5.577
58	Ce	Cerium	8.16		798	3443		5.539
59	Pr	Praseodymium	6.77		931	3520		5.464
60	Nd	Neodymium	7.01		1021	3074		5.525
61	Pm	Promethium	7.26		1042	3000		5.55
62	Sm	Samarium	7.52		1074	1794		5.644
63	Eu	Europium	5.24		822	1596		5.67
64	Gd	Gadolinium	7.9		1313	3273		6.15
65	Tb	Terbium	8.23		1356	3230		5.864
66	Dy	Dysprosium	8.55		1412	2567		5.939
67	Ho	Holmium	8.8		1474	2700		6.022
68	Er	Erbium	9.07		1529	2868		6.108
69	Tm	Thulium	9.32		1545	1950		6.184
70	Yb	Ytterbium	6.9		819	1196		6.254
71	Lu	Lutetium	9.84		1663	3402		5.426
72	Hf	Hafnium	13.3		2233	4603		6.825
73	Ta	Tantalum	16.4		3017	5458		7.89
74	W	Tungsten	19.3		3422	5555		7.98
75	Re	Rhenium	20.8		3186	5596		7.88
76	Os	Osmium	22.5		3033	5012		8.7
77	Ir	Iridium	22.5		2446	4428		9.1

Z	El	Element	Density ($g\ cm^{-3}$)		Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Critical point (°C)	Ionisation potential (eV)
78	Pt	Platinum	21.46		1768.4	3825		9
79	Au	Gold	19.282		1064.18	2856		9.226
80	Hg	Mercury	13.5336		−38.83	356.73	1477	10.434
81	Tl	Thallium	11.8		304	1473		6.108
82	Pb	Lead	11.342		327.46	1749		7.417
83	Bi	Bismuth	9.807		271.4	1564		7.289
84	Po	Polonium	9.32		254	962		8.417
85	At	Astatine			302			
86	Rn	Radon	4.4		−71	−61.7	104	10.749
87	Fr	Francium			27			
88	Ra	Radium	5		700			
89	Ac	Actinium	10.07	a	1051	3198		
90	Th	Thorium	11.72		1750	4788		
91	Pa	Protactinium	15.37	a	1572			
92	U	Uranium	18.95		1135	4131		
93	Np	Neptunium	20.25	20°	644			
94	Pu	Plutonium	19.84		640	3228		6.06
95	Am	Americium	13.69	20°	1176	2011		5.993
96	Cm	Curium	13.51	a	1345			6.02
97	Bk	Berkelium	14	b	1050			6.23
98	Cf	Californium			900			6.3
99	Es	Einsteinium			860			6.42
100	Fm	Fermium			1527			6.5
101	Md	Mendelevium			827			6.58
102	No	Nobelium			827			6.65
103	Lr	Lawrencium			1627			
104	Rf	Rutherfordium						
105	Ha	Hahnium						
106	Sg	Seaborgium						
107	Ns	Nielsbohrium						
108	Hs	Hassium						
109	Mt	Meitnerium						
110	Ds	Darmstadtium						
111		Element-111						

(a: حسابياً, b: تقديرياً, t: درجة الحرارة الحدية, k: درجة حرارة التصعد)

جدول لبعض النظائر التي غالباً ماتستخدم كمصدرات لأشعة غاما

Isotope	Half-life	$E_{max} > 5\%$ (MeV)
^{24}Na	14.9590 h	2.75
^{72}Ga	14.10 h	2.20
^{140}La	1.6781 d	2.52
^{110m}Ag	249.79 d	1.52
$^{152,154}Eu$	13.537 years, 8.593 years	1.40
^{60}Co	1925.1 d	1.33
^{187}W	23.72 h	0.78

جدول لبعض النظائر التي غالبا ماتستخدم كمصدرات لأشعة رونتجن

Isotope	Half-life	E(K-shell) (keV)
^{55}Fe	2.73 years	6.404
^{65}Zn	244.26 d	8.639
^{75}Se	119.79 d	11.222
^{170}Tm	128.6 d	50.741
^{204}Tl	3.78 years	72.872

قائمة بالثوابت الأساسية الفيزيائية

Quantity	Symbol (Expression)	Value	SI Units	cgs Units
Speed of light in vacuum	c	2.99792458	10^{8} m s^{-1}	10^{10} cm s^{-1}
Elementary charge	e	4.8032068		10^{-10} esu
		1.60217733	10^{-19} C	10^{-20} emu
Planck constant	h	6.6260755	10^{-34} J s	10^{-27} ergs
(reduced)	h	1.05457266	10^{-34} J s	10^{-27} ergs
Boltzmann constant	k	1.380658	10^{-23} J K^{-1}	10^{-16} erg K^{-1}
Avogadro's number	N_A	6.0221367	10^{23} mol^{-1}	10^{23} mol^{-1}
Molar gas constant	R	8.314510	J mol^{-1} K^{-1}	10^{7} erg $mol^{-1}K^{-1}$
Rydberg constant	$R_\infty = m_e c\,\alpha^2/2h$	1.0973731534	10^{7} m^{-1}	10^{5} cm^{-1}

Quantity	Symbol (Expression)	Value	SI Units	cgs Units
Bohr magneton	$\mu_B = eh[c]/2m_e c$	9.2740154	10^{-24} J T^{-1}	10^{-21} erg G^{-1}
Nuclear magneton	$\mu_N = eh[c]/2m_p c$	5.0507866	10^{-27} J T^{-1}	10^{-24} erg G^{-1}
Fine structure constant	$\alpha = [4\pi\varepsilon_0]^{-1}\, e^2/hc$	7.29735308		
	α^{-1}	137.0359895		
Permittivity, free space	ε_0	8.854187817	10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}	
Atomic mass unit	u	1.6605402	10^{-27} kg	10^{-24} g
Electron rest mass	m_e	9.10938974	10^{-31} kg	10^{-28} g
Proton rest mass	m_p	1.6726231	10^{-27} kg	10^{-24} g
Neutron rest mass	m_n	1.674929	10^{-27} kg	10^{-24} g
Muon rest mass	m_μ	1.8835327	10^{-28} kg	10^{-25} g
Pion rest mass	$m_\pi^\pm$	2.4880187	10^{-28} kg	10^{-25} g
	m_π^0	2.406120	10^{-28} kg	10^{-25} g
Bohr radius	$a_0 = r_e/\alpha^2$	5.29177249	10^{-11} m	10^{-9} cm
Compton wavelength				
Electron	$\lambda_{c,e} = h/m_e c$	2.42031058	10^{-12} m	10^{-10} cm
Proton	$\lambda_{c,p} = h/m_p c$	1.32141002	10^{-15} m	10^{-13} cm
Neutron	$\lambda_{c,n} = h/m_n c$	1.31959110	10^{-15} m	10^{-13} cm
Classical electron radius	$r_e = \alpha h/m_e c$	2.81794092	10^{-15} m	10^{-13} cm
Magnetic dipole moment				
Electron	μ_e	1.001159652193	μ_B	
Proton	μ_p	2.792847386	μ_N	
Neutron	μ_n	−1.91304275	μ_N	
Proton gyromagnetic ratio	γ_p	2.67522128	10^8 s^{-1} T^{-1}	10^4 s^{-1} G^{-1}

قائمة ببعض عوامل التحويل

Quantity	Symbol	Value
Atomic mass unit	u	931.494 MeV
Electron mass	m_e	0.510999 MeV
Proton mass	m_p	938.272 MeV
Neutron mass	m_n	939.566 MeV
Electron volt	1 eV	1.602177×10^{-19} J
Electron volt/particle	1 eV/k	11604.45 K
Planck constant	h	6.582122×10^{-22} MeV · s
	hc	197.327053 MeV · fm
	$(hc)^2$	0.389380 GeV^2 · mb
Rydberg constant	$R_\infty hc$	13.605698 eV
Gas constant	R	1.987216 cal/mol
1 degree	°	1.7453×10^{-2} rad
1 calorie	cal	4.184 J
1 British thermal unit	Btu	1054.4 J
1 erg		10^{-7} J
1 ton (equivalent of TNT)		4.184×10^9 J
1 electron radius	r_e	2.8179×10^{-15} m
1 fermi		10^{-15} m
1 light year	ly	9.4605×10^{15} m
1 parsec	pc	3.0857×10^{16} m
1 atmosphere	atm	101325 Pa
1 torr (mm Hg, 0°C)		133.32 Pa
1 day	d	86400 s
1 year (365.25636 d)	y	3.1558150×10^7 s
1 Curie (Ci)		3.700×10^{10} Bq
1 rad		1.000×10^{-2} Gy
1 rem		1.000×10^{-2} Sv
1 Roentgen (R)		2.580×10^{-4} C/kg

Damascus University

جدول بواحدات جرعة الإشعاع وعوامل التحويل

Dose	Symbol	Unit	Abbreviation SI unit	SI unit
Absorbed dose	D	gray (formerly rad)	Gy (rd)	1 Gy = 1 J kg^{-1} (1 rd = 0.01 Gy)
Equivalent dose	H	sievert (formerly rem)	Sv (rem)	1 Sv ≙ 1 J kg^{-1} (1 rem ≙ 0.01 Sv)
Absorbed dose rate	dD/dt	Gy/s (Gy/h) (rd/s)		1 Gy/s = 1 J kg^{-1} s^{-1} (1 rd/s = 0.01 Gy/s)
Equivalent dose rate	dH/dt	Sv/s (Sv/h) (rem/s)		1 Sv/s = 1 J kg^{-1} s^{-1} (1 rem/s = 0.01 Gy/s)

قائمة ببعض البادئات

Prefix	Unit	Factor	Prefix	Unit	Factor	Prefix	Unit	Factor
yotta	Y	10^{24}	kilo	k	10^{3}	nano	n	10^{-9}
zetta	Z	10^{21}	hecto	h	10^{2}	pico	p	10^{-12}
exa	E	10^{18}	deka	da	10^{1}	femto	f	10^{-15}
peta	P	10^{15}	deci	d	10^{-1}	atto	a	10^{-18}
tera	T	10^{12}	centi	c	10^{-2}	zepto	z	10^{-21}
giga	G	10^{9}	milli	m	10^{-3}	yocto	y	10^{-24}
mega	M	10^{6}	micro	μ	10^{-6}			

قائمة بالأحرف الإغريقية

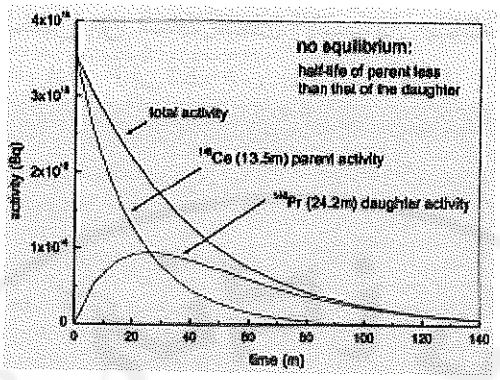
A, α	alpha	I, ι	iota	P, ρ	rho
B, β	beta	K, κ	kappa	Σ, σ	sigma
Γ, γ	gamma	Λ, λ	lambda	T, τ	tau
Δ, δ	delta	M, μ	mu	Y, υ	upsilon
E, ε	epsilon	N, ν	nu	Φ, φ	phi
Z, ζ	zeta	Ξ, ξ	xi	X, χ	chi
H, η	eta	O, ο	omicron	Ψ, ψ	psi
Θ, θ	theta	Π, π	pi	Ω, ω	omega

Damascus University

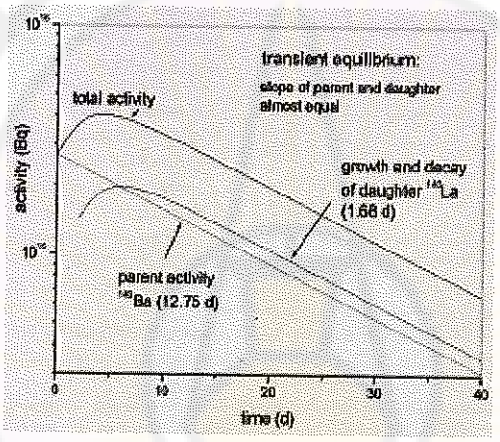
ملخص عن أنماط التحلل الإشعاعي المختلفة

(ترمز P إلى النكليد الأم و D إلى النكليد البنت)

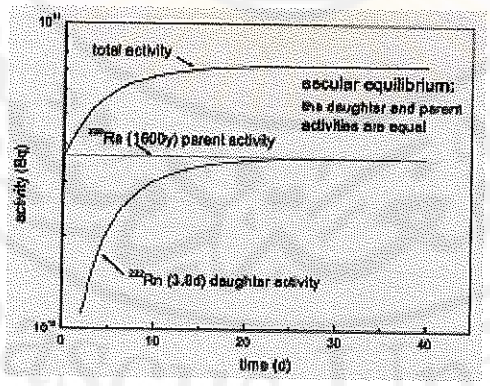
Decay type	Reaction	Description
Alpha (α)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}D + \alpha$	In proton rich nuclides, an alpha particle (${}^{4}_{2}He$) can be emitted – the daughter nucleus contains two protons and two neutrons less than the parent.
Beta-minus (β^-)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z+1}D + \beta^- + \bar{\nu}$	In neutron rich nuclides, a neutron in the nucleus can decay to a proton – thereby an electron (β^-) is emitted together with an anti-neutrino ($\bar{\nu}$).
Beta-plus (β^+)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D + \beta^+ + \nu$	In proton rich nuclides, a proton in the nucleus changes to a neutron – thereby a positron (β^+) is emitted together with a neutrino (ν).
Electron capture (ε or ec)	${}^{A}_{Z}P + e^- \rightarrow {}^{A}_{Z-1}D^* + \nu$	An orbital electron is "captured" by the nucleus and results in a proton being converted to a neutron and a neutrino (ν). The daughter nucleus is usually left in an excited state.
Gamma (γ)	${}^{A}_{Z}P^* \rightarrow {}^{A}_{Z}P + \gamma$	An atom in an excited state decays through the emission of a photon.
Isomeric transition (IT)	${}^{Am}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z}P + \gamma$	Isomeric transition occurs in long-lived metastable states (isomers) of parent nuclei.
Internal conversion (IC)	${}^{A}_{Z}P^* \rightarrow \left[{}^{A}_{Z}P\right]^+ + e^-$	A nucleus in an excited state ejects an orbital (usually a *K*-shell) electron.
Proton (p)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1}D + p$	A proton is ejected from the nucleus.
Neutron (n)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A-1}_{Z}D + n$	A neutron is ejected from the nucleus.
Spontaneous fission (SF)	${}^{A}_{Z}P \rightarrow D_H + D_L + \upsilon n$	In this process, the parent nucleus splits into heavy and light fragment daughter nuclei (D_H, D_L) with mass and charge roughly half that of the parent, and several neutrons υn.
Special beta-decay processes $\beta^- n$, $\beta^+ \alpha$, $\beta^+ p$	${}^{A}_{Z}P \rightarrow {}^{A}_{Z+1}D^* + \beta^- + \bar{\nu}$ ${}^{A}_{Z+1}D^* \rightarrow {}^{A-1}_{Z+1}D + n$	Particle (neutron, alpha, proton) emission immediately follows beta decay.
Heavy-ion radioactivity	${}^{A}_{Z}P \rightarrow D_H + D_L$	A heavy parent decays by the emission of a light ion.



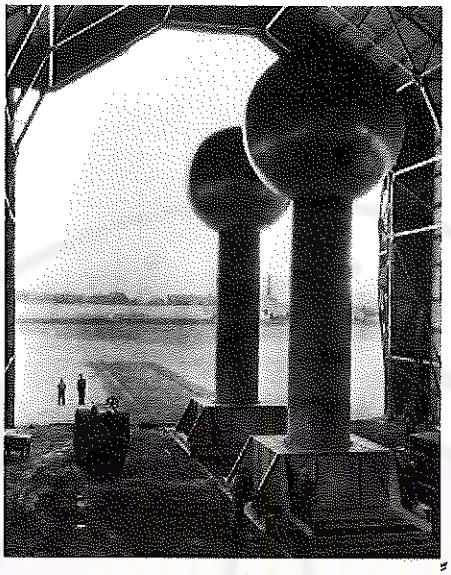
رسم بياني يظهر حالة عدم التوازن الإشعاعي



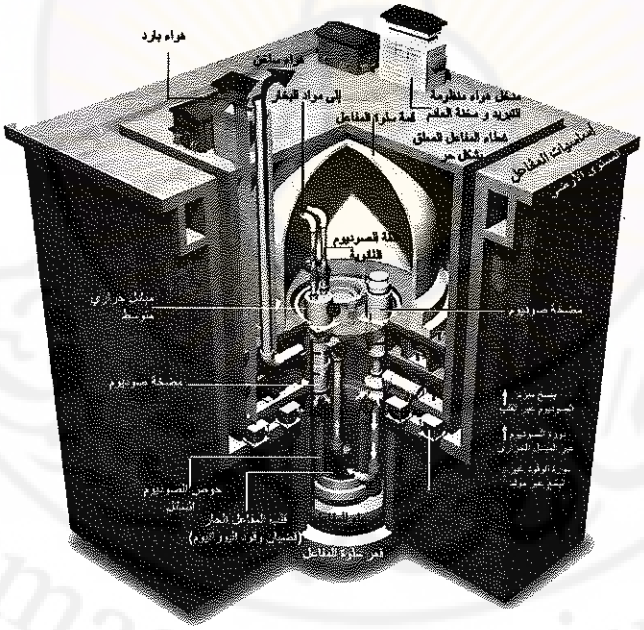
رسم بياني يظهر حالة التوازن الإشعاعي الانتقالي



رسم بياني يظهر حالة التوازن الإشعاعي الدائم

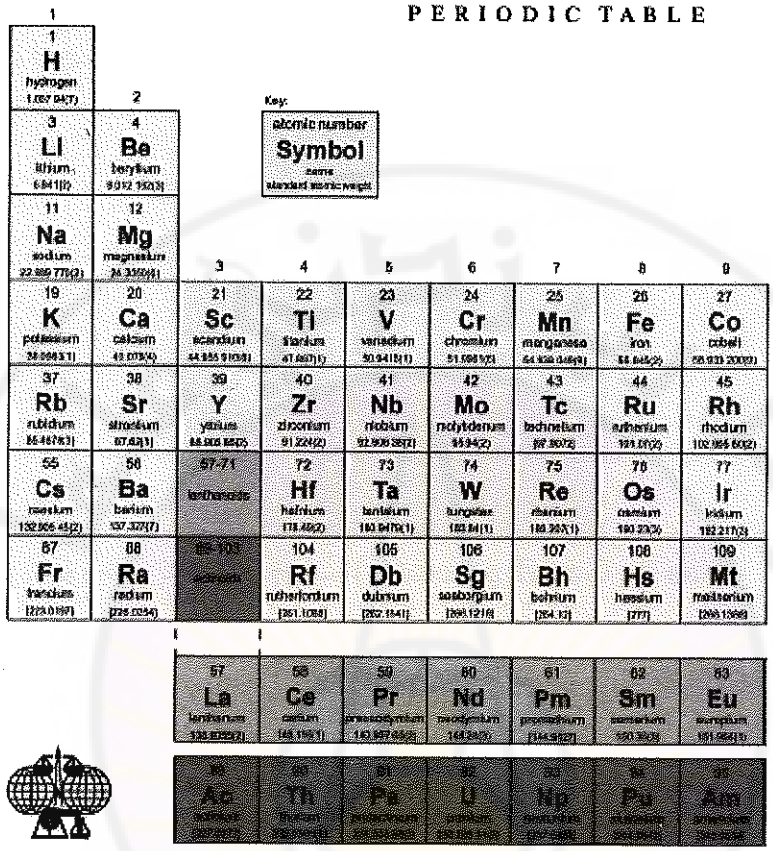


صورة لمُولِّد فان ديجراف (Van de Graaff generator)



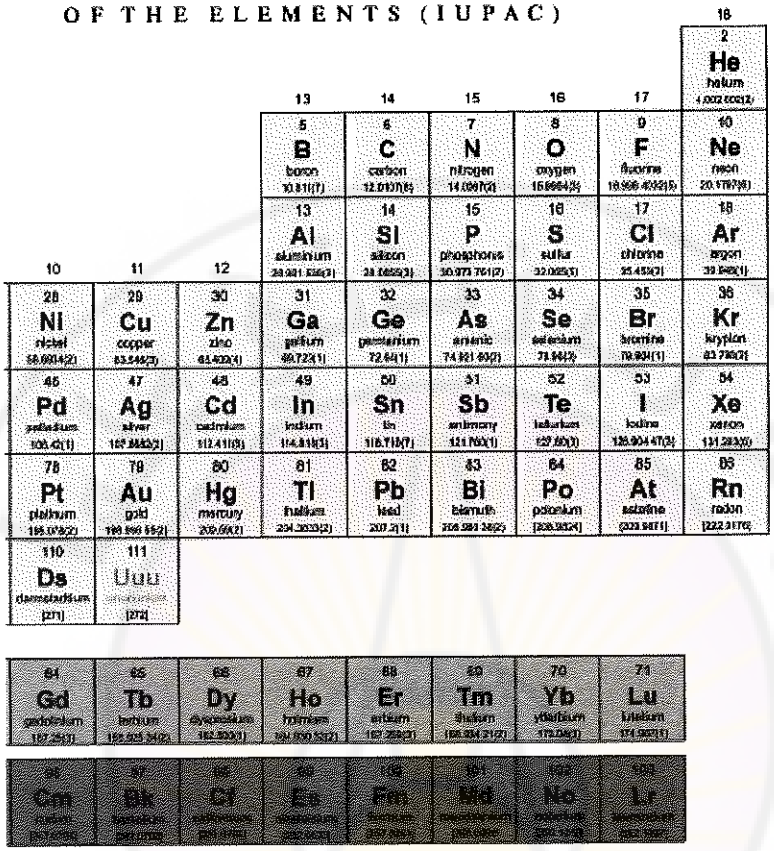
رسم تخطيطي لمفاعل ولود يعمل بدارة تبريد من الصوديوم

PERIODIC TABLE



Damascus University

OF THE ELEMENTS (IUPAC)



Damascus University


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

معجم مصطلحات الكيمياء الإشعاعية والنووية

A

Abundance	وفرة
Absorbtion	امتصاص
Accelerater	معجّل (مسرّع)
Accelerating Tube	أنبوبة تعجيل
Actinide Series	سلالة أكتينية
Actinomete	أكتينوميتر(مقياس أكتيني)
Activation	تنشيط
Activation Analysis	التحليل بالتنشيط
Adsorbtion	ادمصاص(امتزاز)
Alpha Decay	انحلال بدقيقة ألفا
Alpha Particle	دقيقة ألفا
Amplifier	مكبر
Angular Momentum	عزم زاوى
Annihilation	إبادة
Antineutrino	النيترينو المضاد
Artificial Element	عنصر اصطناعي
Artificial Radioactivity	نشاط إشعاعي اصطناعي
Atomic Concept	مفهوم ذرى
Atomic Mass	كتلة ذرية
Atomic Nuclei	نوى ذرية

Atomic Number	عدد ذرى
Atomic Structure	بناء أو بنية ذرية
Auger Effect	فعل أو تأثير أوجير
Autoradiography	تصوير إشعاعي ذاتي
Avalanche	تفريغ (انهيار)
Avarage Life	متوسط العمر
Avarage Value	متوسط القيمة
Avogadro number	عدد أفوغادرو

B

Background	خلفية
Back-scattering	تشتت ارتدادي
Barn	بارن
Barrier	حاجز
Barrier Penetrability	خروقية الحاجز
Beam	شعاع
Beta Counting	عد بيتا
Beta Decay	انحلال ببيتا
Beta Particle	دقيقة (أو جسيمة) بيتا
Beta Ray	أشعة بيتا
Betatron	معجل بيتا
Binding Energy	طاقة الارتباط (أو الطاقة الرابطة)
Breeder Reactor	مفاعل ولود

Breit-Winger Formula	علاقة برايت وفنكر
Bremsstrollong	البريمر شترالونغ(أشعة كبح)

C

Canal Ray	أشعة قنالية
Capacitor	مكثف
Carrier	حمال
Carrier-Free	خال من الحمال
Cathode rays	أشعة مهبطة (كاثودية)
Chain Reaction	تفاعل متسلسل
Could Chamber	غرفة سحاب
Coincidence	تزامن
Compound nucleus	نواة مركبة
Compton Effect	تأثير (ظاهرة) كومبتون
Compton Edge	حافة كومبتون
Compton Wavelength	الطول الموجي لكومبتون
Contamination (Pollution)	تلوث
Control	سيطرة
Control Rod	قضيب التحكم
Convession Electrons	إلكترونات متحولة
Converter	قلاب
Coprecipitation	ترسب مشترك
Core	قلب

Corona Discharge	تفريغ هالي
Cosmic Ray	أشعة كونية
Coulomb Barrier	حاجز كولمب
Counter	معداد
Counting	عد
Counting Rate	معدل العد
Critical Absorption	امتصاص حرج
Critical Mass	كتلة حرجة
Critical Volume	حجم حرج
Cross Section	مقطع عرضي
Crystal Counter	معداد بلّوري
Current	تيار
Curie	كيوري
Cyclotron	معجل رحوي (دوار)

D

Dead time	زمن ضائع
Decay Constant	ثابت الانحلال
Decay Curve	منحنى الانحلال
Decay Energy	طاقة الانحلال
Decay Law	قانون الانحلال
Decay Scheme	مخطط الانحلال

Delta Ray	أشعة دلتا
Destructive	اتلاقي
Detection Cefficient	معامل الكشف
Deutron	ديوترون
Diffusion Chamber	غرفة التنافذ
Direct interaction	تعامل (تفاعل) مباشر
Disintegration	انحلال (تفتت)
Disintegration constant	ثابت الانحلال
Disintegration Rate	معدل الانحلال
Dose	جرعة
Dosimetry	قياس الجرعة
Dosimeter	مجراع

E

Effective Half-life	عمر نصفي فعال (مؤثر)
Elastic Scattering	تشتتت مرن
Elastic Collision	ارتطام مرن
Electrodeposition	طباق كهربائي (كهربي)
Electron Capture	انحلال باسر الإلكترون
Electron Scattering	تشتت الإلكترون
Emery paper	ورق الصقل صنفرة
Enriched	مخصب
Entrain	يحتضن

Epithermal	فوق حراري
Equivalence point	نقطة التكافؤ
Even-Even Nuclei	نوى زوجية _زوجية
Excited state	حالة مهيّجة
Exoergic	باعث للطاقة
Exponential Law	قانون أسي
Exposure	التعرّض
Exposure dose	جرعة التعرّض

F

Fermi Unit	وحدة فيرمي
Field	حقل
Fission	انشطار
Fission Fragments	شظايا (كسر) الانشطار
Fission Products	منتوجات انشطار
Fission Yield	عائد الانشطار
Flow meter	مقياس التدفق
Fluorescence	فلورة
Fluorescent	فلور سي
Flux	سيل, تدفق
Four-π Counting	عد بأربعة_π
Four-factor formula	عبارة المعاملات الأربعة
Fuel Elements	عناصر وقود

Fundamental partial	دقيقة أساسية
Fusion	اندماج

G

G-value	قيمة_ج
Gamma Counting	عد غاما
Gamma Decay	انحلال بغاما
Gamma Ray	شعاع غاما
Gamma transitions	تحولات غاما
Gaussian distribution	توزيع غاوس
Glowing discharge	تفريغ كهربائي متألق
Gross Counting	عد كلي
Growth of Radioactive daughter	نمو الوليدة المشعة
Growth of Stable daughter	نمو الوليدة المستقرة
Growth Curve	منحني النمو

H

Half-Life	عمر نصفي (نصف)
Half-thickness	سمك النصف
Heavy water	ماء ثقيل
Hot Atom Chemistry	كيمياء الذرة الساخنة

I

Interference	تداخل
Internal Conversion	تحول داخلي
Ionization	تأين
Ionization Chamber	غرفة تأين
Isobar	ايزوبار
Isomer	ايزومير
Isomeric transition	تحول ايزوميري
Isomerism	ايزوميرية
Isotone	ايزوتون
Isotope	نظير
Isotopic Abundance	وفرة نظيرية
Isotope Dilution	تخفيف نظيرى
Isotope Exchange	تبادل نظيرى
Isotopic Number	عدد نظيرى

K

K-Electron Capture	أسر إلكترونات_K
Kurie Plot	منحني كيورى

L

Labeled Compound	مركب موسوم
Level width	عرض المستوي
Limeted proportionality	تناسب محدود

Linear accelerator	مسرّع خطي
Linear pulse amplifier	مكبر النبضات الخطية
Liquid-drop model	نموذج قطرة السائل

M

Magic number	عدد سحري
Magnetic moment	عزم مغناطيسي
Mass Defect	نقص الكتلة
Mass number	عدد الكتلة
Mass spectrometer	مطياف الكتلة
Mass Unit	وحدة كتلة
Mean Free path	مسار حر متوسط
Mean Life	متوسط العمر
Meson	ميزون
Metabolism	أيض
Meteorites	نيازك
Microcurie	ميكروكيوري
Millicurie	ميلي كيوري
Moderator	مهدئ
Mossbauer Effect	تأثير (ظاهرة) موسباور
Multichannel Analyzer	الكاشف ذي القنوات العديدة
Multiplilation factor	عامل التكاثر
Multiple Spectra	أطياف مجزأة

N

Negatron	نيغاترون
Neutrino	نيترينو
Neutron	نيترون
Neutron Activation	التنشيط بالنيترون
Neutron Capture	أسر النيترون
Neutron Gross Section	المقطع العرضي للنيترون
Neutron Excess	فيض نيتروني
Neutron Resonance	امتصاص (رنيني) للنيترون
Nuclear Density	كثافة نووية
Nuclear Force	قوة نوية
Nuclear Potential well	بئر كمون نووي
Nuclear Reaction	تفاعل نووي
Nuclear Reactor	مفاعل نووي
Nuclear Species	أصناف نووية
Nuclear Stopping	كبح نووي
Nucleon	نوية
Nuclide	نويدة
Nuclidic mass	كتلة نويدية

O

Odd-Odd Nuclei	نوى فردية_فردية
Odd-even Nuclei	نوى فردية_زوجية

Optical Model	نموذج بصرى

P

Packing Fraction	ازدواج
Pair Production	انتاج الزوجين
Partial Cross Section	مقطع عرضي جزئي
Permeability	النفيذية
Photodisintegration	انحلال فوتوني
Photoelectric Effect	تأثير (ظاهرة) كهروضوئي
Photomultiplier tube	أنبوبة التكثير
Photon	فوتون
Plateau	هضبة
Positron	بوزيترون
Preamplifier	مكبر قبلي
Primary Fuel	وقود أساس
Probability	احتمال
Prompt	آني
Proportional Counter	معداد تناسبي
Proton	بروتون
Pulse height	ارتفاع النبضة

Q

Q-Value	قيمة Q
Quenching	اخماد

Quench gas	غاز مخمد
Quality factor	عامل النوعية

R

Rad	راد
Radiation	إشعاع
Radiation Chemistry	كيمياء الإشعاع
Radiator	مشعاع
Radioactive Capture	أسرمشع
Radioactive Decay	انحلال إشعاعي
Radioactive Equilibrium	توازن إشعاعي
Radioactive Tracers	آثار مشعة
Radioactive Wastes	فضلات مشعة
Radioactivity	نشاط إشعاعي
Radioactivity Release	تحرير النشاط الإشعاعي
Radiocarbon Dating	التأريخ بالكاربون المشع
Radiography	تصوير بالأشعة
Radioisotope	نظير مشع
Radiolysis	تحلل إشعاعي
Radionuclide	نويده مشعة
Radiotherapy	علاج طبي بالأشعة
Random	عشوائي
Range	مدى

Relative Biological Effectiveness	التأثير الحيوي النسبي
Recoil Atoms	ذرات مرتده
Rejection	رفض
Rem Unit	وحدة ريم
Residual ….	فضلة (فضل) الشيء
Resolving time	زمن تبيين
Rest-mass	كتلة ساكنة

S

Scanning	مسح
Saturation	إشباع
Scaler	مسجلة عددية (عدادة)
Scattering	تشتت
Scavenger	كاسح
Scintillation counter	معداد وميضي
Scintillator	مادة وامضة
Seclar Equilibrium	توازن كوني
Self-Radiation	إشعاع ذاتي
Self-Shielding	تدريع ذاتي
Self-Quenching	إخماد ذاتي
Semicircular	نصف دائري
Semiconductor	شبه موصل

Shadow	ظل
Shadowing	استظلال
Shell model	نموذج قشري
Shield	درع
Short Range	مدى قصير
Single Channel Analyzer	محللة قناة واحدة (منفردة)
Skin	غلاف
Spallation Reaction	تفاعل تشظية
Specific Activity	نشاط نوعي
Specific Ionization	تأين نوعي
Spin	برم
Spinthariscope	منظار وميضي
Spontaneous Fisson	انشطار ذاتي
Subcritical	تحت الحرج
Substoichiometry	تحت المكافئ
Supercritical	فوق الحرج
Survey meter	مقياس مسح
Symmetry	تماثل

T

Target	هدف
Thermal Excitation	هياج حراري
Thermal Neutron	نيترون حراري

Thermonuclear Reaction	تفاعل نووى حراري
Tracer	أثر
Trace Level	مستوى الأثر
Transient Equilibrium	توازن عابر
Transmution	تناسخ

U

Uncertainity Prineiple	مبدأ الشك

V

Voltage Pulse	نبضة جهدية

W

Wavelength	طول موجي
Wave function	دالة الموجة

Y

Yield	عائد
Yeast	خميرة

X

X-Ray	أشعة اكس (السينية)


وقل رب زدني علما
Damascus University

المراجع العربية

1- الكيمياء الإشعاعية , د. مجيد محمد علي القيسي, جامعة بغداد 1978.

2- الفيزياء النووية , د. مكي الحسني , جامعة دمشق 1982.

3- الفيزياء النووية التجريبية , د. جان رومانوس , جامعة دمشق 1985.

4- المواد النووية , Nuculear Materials, By Dr. D. Sood
(Published By IANCAS), ترجمة د. عقلا الحريص و د. عمر الدايل,
مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية, الرياض 2005.

المراجع الأجنبية

1- Radiochemistry and Nuclear Chemistry,Third Edition; Gregory R. Choppin, Jan-olov Liljenzin and Jan Rydberg; Butterworth-Heinemann 2002.

2- Nuclear and Particle Physics; B. R. Martin; Department of Physics and Astronomy, University College London; John Wiley & Sons, Ltd. 2006.

3- Modern Nuclear Chemistry; Walter d. Loveland, David J. Morrissey and Glenn T. Seaborg; JohnWiley&Sons, Inc. 2006.

4- Atoms, Radiation and Radiation Protection; James E. Turner; Third Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & KGa A 2007.

5- Direct Nuclear Reactions; Norman K Glendenning; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2004.

6- Fundamentals of Radiation Chemistry; A. Mozumder; University of Notre Dame, Indiana; Academic Press 1999.

7- Einführung in die Kernchemie; Karl Heinrich Lieser, TH Darmstadt; Verlag Chemie GmbH 1969.

8- Praktikum der Radioaktivität und der Radiochemie; Lieselott Herforth, Hartwig Koch and Klaus Hübner; VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1986.
9- Nuclear Fission and Cluster Radioactivity; M.A. Hooshyar, I. Reichstein and F.B.Malik; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2005.
10- Nuclear and Radiochemistry, Fundamentals and Applications; Second, Revised Edition; Karl Heinrich Lieser; WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany) 2001.
11- Radioactivity, Introduction and History; Michael F. L'Annunziata; Elsevier 2007.
12- Nuclear Medicine Therapy; Janet F. Eary and Winfried Brenner; Informa Healthcare, New york , London 2007.
13- Nuclear Principles in Engineering; Tatjana Jevremovi; Springer 2005.
14- Nuclear Energy Principles, Practices and Prospects; David Bodansky;Second Edition, Springer 2004.
15- Radioactivity·Radionuclides ·Radiation; Joseph Magill and Jean Galy; Springer 2005.

Damascus University

اللجنة العلمية:

أ. د. محمد علي المنجد

أ. د. عبد المجيد البلخي

أ. د. ملك الجبة

المدقق اللغوي:

د. برهان أبو عسلي

حقوق الطبع والترجمة محفوظة في مديرية الكتب والمطبوعات


وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University