

كلية التربية للعلوم الصرفة / ابن الهيثم

قسم الفيزياء

اسم المادة / الفيزياء النووية

المرحلة / الرابعة

اعداد / أ.م.د. احمد فاضل مخبير

اسماء التدريسيين المشاركين في تدريس هذه المادة

أ.د. بشائر محمد سعيد / أ.م.د. ناز طلب جار الله

الفيزياء النووية

الفصل الاول

اولا : المقدمة : ان دراسة الفيزياء النووية تتركز حول مشكلتين رئيسيتين هما :

١-محاولة فهم خواص القوة التي تربط اجزاء النواة ببعضها ، حيث تتكون النواة من عدد من البروتينات وعدد آخر من النيوترونات ويطلق اسم (نيوكليون) على كل من البروتون والنيوترون .

٢-محاولة فهم تصرف المجموعات متعددة الاجزاء .

ثانيا: الخواص النووية الاساسية :

تقسم الخواص النووية من حيث اعتمادها على الزمن الى قسمين :

١-الخواص الثابتة (غير المعتمدة على الزمن) مثل الكتلة والحجم والشحنة والزخم الزاوي الذاتي والذي يسمى غالبا بالبرم النووي.

٢-الخواص المتحركة (المعتمدة على الزمن) مثل الانحلال الاشعاعي والتفاعلات النووية.

وفي هذا الفصل سوف نتطرق الى الخواص الثابتة فقط ، اما الخواص الحركية فسوف نناقشها في فصول لاحقة ، وقبل التطرق الى الخواص الثابتة من المفيد البدء ببعض التعاريف والمصطلحات التمهيديّة والتي سيتكرر ذكرها خلال الفصول القادمة، وكذلك بعض الوحدات المستخدمة في الفيزياء النووية.

١-العدد الذري Z (Atomic number): عدد البروتينات الموجودة داخل النواة والذي يساوي عدد الالكترونات خارجها ، لذا فان الذرة متعادلة كهربائيا .

٢- العدد الكتلي (mass number) A : هو اقرب عدد صحيح من الوزن الذري الدقيق لاي نواة ، فمثلا بالنسبة لنظير الهيدروجين ^1H يكون $A=1$ ، في حين يكون الوزن الذري الدقيق لهذا النظير مساويا $1,0078254$ من وحدات الكتلة الذرية (a.m.u) وكذلك بالنسبة الى نواة اليورانيوم $^{238}_{92}\text{U}$ حيث $A=238$ في حين يكون الوزن الذري $238,050941$ من وحدات الكتل الذرية (a.m.u) وهكذا .

٣- العدد النيوتروني (Neutron number) N : هو عدد النيوترونات الموجودة في اية نواة ، وهي جسيمات عديمة الشحنة .

ملاحظة : ان مجموع العدد الذري (Z) والعدد النيوتروني (N) يكون مساويا للعدد الكتلي (A) اي ان :

$$A=Z+N$$

.....(1)

وهكذا عندما نريد ان نشير الى نواة معينة ، فاننا نستخدم الصيغة الاتية بصورة $^A_Z\text{X}_N$ ، حيث X يمثل الرمز الكيميائي للعنصر و Z العدد الذري و N العدد النيوتروني ، وفي بعض الاحيان لا يكون من الضروري ذكر عدد النيوترونات الذي يمكن ايجاده من العلاقة (١) .

٤- النيوكليون (nucleon) : يقصد بالنيوكليون اما بروتون او نيوترون .

٥- النيوترون (neutron) : هو احد مكونات النواة متعادل الشحنة ($Z=0$) وعدده الكتلي ($A=1$) ، وذو كتلة تساوي تقريبا كتلة البروتون واكبر من كتلة الالكترون.

٦- البروتون (Proton) : لا يختلف عن النيوترون ، بصورة عامة ، سوى ان له شحنة تساوي شحنة الالكترون ($+1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

٧-الالكترون (Electron) : جسيمة مشحونة بشحنة سالبة تساوي (C 1.6×10^{-19}) بالكولوم. الالكترون ذو كتلة صغيرة جدا بالمقارنة مع كتلة البروتون حيث ($m_p=1836 m_e$) لذا يمكن اهما لكتلة الالكترون عند الحديث عن كتلة الذرة بصورة عامة (عدا الحالات التي تتطلب ادخال كتلة الالكترون في الحساب) .

٨-البوزترون (Positron) : هو الكترون مشحون بشحنة موجبة وله نفس كتلة الالكترون السالب.

٩-الفوتون (Photon) : هو وحدة (كم) الاشعة او الطاقة الكهرومغناطيسية التي تكون على شكل ضوء او اشعة سينية او اشعة كاما ويسير بسرعة الضوء ويحمل طاقة تعطى بالعلاقة : $E=h\nu$

١٠-النويذة (nuclide) : عينة نووية ذات عدد ذري معين Z وعدد نيوتروني معين N، والرمز الاكثر شيوعا لتمثيل النويذة هو :



حيث X: يمثل الرمز الكيميائي للعنصر

A : العدد الكتلي

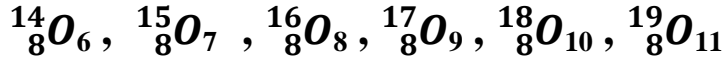
Z : العدد الذري او البروتوني

N: العدد النيوتروني

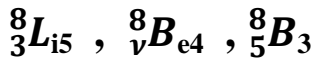
وقد تهمل كتابة N باعتباره معروفا ويساوي الفرق بين A , Z اي ان ($N=A-Z$) ، كما وقد تهمل كتابة Z باعتبار ان رمز العنصر X يدل على العدد الذري.

مثال -عنصر الليثيوم / ${}^7_3\text{Li}_4$, ${}^7_3\text{Li}_i$, ${}^7\text{Li}_i$, Li_i-7

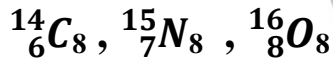
١١- النظائر (Isotopes) : هي نويدات لها نفس العدد الذري Z ، لذا فهي تمثل نفس العنصر ، لكنها تختلف عن بعضها بالعدد النيوتروني N ، وتبعاً لذلك تختلف عن بعضها بالعدد الكتلي (A) . ومثال على ذلك نظائر ذر الاوكسجين :



١٢- الايزوبارات (Isobars) : نويدات تختلف عن بعضها البعض بالعدد الذري Z وتبعاً لذلك فهي تمثل عناصر مختلفة ، كما وتختلف أيضاً بالعدد النيوتروني N ، لكن لها نفس العدد الكتلي A .



١٣- الايزوتونات (Isotones) : نويدات عناصر مختلفة لها نفس العدد النيوتروني N ، وبالطبع تختلف بالعدد الذري Z وتبعاً لذلك فهي تختلف عن بعضها بالعدد الكتلي A .



١٤- الايزوميرات (Isomers) : نويدات عنصر معين وفي حالة متهيجة ولها عمر نصف معين وطويل نسبياً ويشار لها بالرمز :



١٥- الميزونات (Mesons) : جسيمات متوسطة الكتلة ، اي جسيمات كتلة كل منها اكبر من كتلة الالكتران و اقل من كتلة البروتون . لقد تم الافتراض على وجود الميزونات باعتبارها المسؤولة عن التجاذب النووي بين البروتون والبروتون او بين البروتون والنيوترون او بين النيوترون والنيوترون . ولقد تم الكشف عن العديد منها في المختبرات ومنها :

أ. البايونات (π^+ , π^- , π^0) (Pions)

ب. الكيونات (K^+ , K^- , K^0) (Kaons) وغيرها الكثير .

جدول يضم قائمة بكتل بعض الانوية والجسيمات الشائعة

الجسيم	الرمز	الكتلة (u)	الشحنة
بروتون	$P, {}^1_1H$	1.007276	+e
نيوترون	$n, {}^1_0n$	1.008665	0
الالكترون	$e^-, \beta^-, {}^0_{-1}e$	0.0005486	-e
بوزترون	$e^+, \beta^+, {}^0_{+1}e$	0.0005486	+e
جسيم الفا	$\alpha, {}^4_2He$	4.0015	+ze

بعض الوحدات المستعملة في الفيزياء النووية :

١- فيرمي (Fermi) : وهي تعادل (10^{-15} m) فمثلا ان الابعاد النووية تتراوح بين

$7fm \leftarrow 1fm$ ، وان مدى القوى النووية يكون بحدود 1-2Fm .

٢- بارن (barn) : وتستخدم عادة للتعبير عن المقاطع العرضية للتفاعلات النووية

بصورة عامة والبارن يعادل (10^{-28} m²) .

٣- وحدة الكتل الذرية (atomic mass unit) : ويرمز لها بالرمز (amu) او (u) .

تستخدم في قياس الكتل الذرية والنوية وهي تعادل 1.66×10^{-27} kg .

٤- مليون الكترون فولت (MeV) : غالبا ما يكون ملائما للتعبير عن وحدة الكتلة

الذرية بدلالة مكافئ طاقة سكونها ، فبالنسبة لوحدة كتلة ذرية واحدة ، ومن تطبيق

معادلة تكافؤ الكتلة والطاقة لاينشتين :

$$E=m_0c^2 = (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E=1.49 \times 10^{-10} \text{ J}$$

وبما ان $1=1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ فان

$$E \cong 931.5 \text{ MeV}$$

وغالبا ما يعبر عن الكتلة في الفيزياء النووية بدلالة وحدة MeV/c^2 اذ ان :

$$\therefore 1u=931.5 \text{ MeV}/c^2$$

مثال / احسب طاقة كتلة السكون للالكترون بوحدة MeV مع العلم ان كتلة الالكترون تعادل $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ؟

Sol/

$$E_e=m_0c^2=9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E_e= 8.18 \times 10^{-14} \text{ J} = 0.511 \text{ MeV}$$

ملاحظة : الالكترون فولت (eV) هي الطاقة التي تكتسبها وحدة الشحنة بالكولوم عند تعجيلها خلال فرق جهد مقداره فولت واحد وعليه فان:

$$1\text{eV}=1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1\text{V}=1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

الفصل الاول

الخواص الثابتة للنواة :

١- شحنة النواة (Q_N Nuclear charge) : تعزى شحنة النواة الى شحنة بروتوناتها ، حيث ان النيوترونات عديمة الشحنة ، لذا فشحنة النواة تساوي العدد الذري Z مضروباً بشحنة البروتون $q_p = +1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ حيث :

$$Q_N = Z * q_p = +1.6 \times 10^{-19} Z \quad \dots\dots\dots(2)$$

٢- كتلة النواة (M_N Nuclear mass) : ان كتلة النواة هي بالحقيقة اقل قليلا من مجموع كتل بروتوناتها ونيوتروناتها ، اي ان :

$$M_N < (Zm_p + Nm_n)$$

حيث m_p كتلة البروتون ، m_n كتلة النيوترون ، وبالحقيقة ان الفرق بين مجموع كتلة البروتونات والنيوترونات وكتلة النواة قد تحول الى طاقة لربط النيوكليونات مع بعضها داخل النواة .

٣- حجم النواة (nuclear size) : ان اول محاولة لتحديد حجم النواة ، او نصف قطر النواة ، كانت قد تمت من قبل رادرفورد والذي افترض تصادماً رأسياً وهماً بين جسيمة الفا والنواة فبأقتراب الجسيمة من النواة فانها ستتباطأ نتيجة التنافر الكولومي بينهما الى ان تصل (جسيمة الفا) الى نقطة تكون فيها أقرب ما يمكن من النواة وعنها تتوقف عن الحركة وتتحول طاقتها الحركية (T_α) الى طاقة كامنة كهربائية (E_p) بشرط اعتبار النواة ساكنة خلال هذا التصادم. حيث :

$$T_\alpha = E_p = \frac{K.Ze.2e}{R} = \frac{K2e^2Z}{R}$$
$$\therefore R = \frac{K.2e^2Z}{T_\alpha} \dots\dots\dots(3)$$

حيث R : مسافة اقصر اقتراب من النواة وهي تمثل الحد الاعلى لنصف قطر النواة

Z_e : شحنة النواة

$2e$: شحنة جسيمة الفا

ان استعمال الالكترونات وبعض الدقائق النووية الاخرى بدلا من جسيمات الفا في اجراء تجارب الاستطارة يعطي دقة اكثر ، وقد ظهر ان نصف القطر الذي تبرز عنده التأثيرات النووية يمكن ان يكتب تقريبا كما يلي:

$$R = R_0 A^{1/3}$$

حيث ان R_0 هو ثابت نصف القطر ويأخذ القيم :

$$R_0 = \begin{cases} 1.4 \text{ Fm} & \text{للجسيمات النووية} \\ 1.2 \text{ Fm} & \text{للالكترونات} \end{cases}$$

٤- الكثافة (Density) (ρ) :

نفرض ان النواة كروية الشكل تقريبا لذلك فان حجمها يعطى بالعلاقة :

$$V_N = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

$$\rho = \frac{M_N}{V_N} = \frac{ZM_p + NM_N}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A}$$

$$\text{But } M_p \cong M_N \rightarrow M_N = (Z+N)M_N = AM_N$$

$$\therefore \rho = \frac{AM_N}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A} = \frac{1.0087 \text{ amu}}{\frac{4}{3} \times \pi \times (1.4 \text{ F})^3} \cong 0.09 \text{ amu/Fm}^3 \quad \text{وهي مقدار ثابت .}$$

٥- توزيع الشحنة داخل النواة Charge distribution in the nucleus :

ان كثافة الشحنة الكهربائية داخل النواة (الثقيلة) ثابتة تقريبا حتى تصل الى الصفر عند سطحها ، ويمكن ان نعبر عنها بقانون التوزيع لفيرمي .

الفردية - الفردية فيكون لها J عدد صحيح ، اما النوى الزوجية - الفردية وكذلك النوى الفردية - الزوجية فان لها مضاعفات النصف لقيمة J .

امثلة : ١- نواة $^{16}_8O_8$: يكون البرم الكلي لهذه النواة يساوي صفر .

٢- نواة $^{17}_8O_9$: يكون البرم الكلي للنواة يساوي $\frac{1}{2}$.

٣- نواة $^{14}_7N_7$: يكون البرم الكلي لها عدد صحيح مثل ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ .



: Dynamic Properties of Nuclei الخواص الحركية للنوى

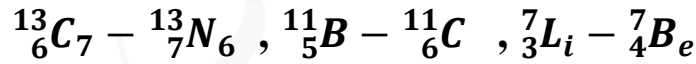
كما في حالة الفيزياء الذرية ، فان النوى تتجهج الى حالات محددة من الطاقة ، ان الانتقال بين حالات الطاقة يتم عن طريق انبعاث اشعة نووية (اشعة كاما مثلا) ، الفرق بين فواصل الطاقة للحالات في الفيزياء الذرية هو بحدود الالكترن فولت ، بينما في الحالات النووية تكون الفوارق في حدود اكثر من $10^4 - 16^6 \text{ eV}$. ان دراسة حالات الطاقة وطيف اشعة كاما في النواة قد ادى الى تحديد مستويات الطاقة النووية والتي ادت بدورها الى ظهور النماذج النووية .

*ويمكن ان تتحول النوى من نوع الى آخر . تحدث بعض هذه التحولات تلقائيا بينما يتم احداث التحولات الاخرى عن طريق القصف النووي وفي جميع الحالات يبقى العدد الكلي للنيوكلونات ثابتا ، وكذلك فان قوانين حفظ الطاقة والكتلة وقوانين حفظ الزخم الخطي والزواوي يجب ان تتحقق أيضاً .

: Mirror nuclei النوى المرآتية

عندما يكون عدد النيوكلونات متساويا لنواتين ويكون عدد البروتونات في احدهما مساويا لعدد النيوترونات في الاخرى فان النواتين تكونان ما يسمى بزواج النوى المرآة.

ومن الامثلة على ذلك :



الفصل الثاني

اولا : طاقة الربط النووية Nuclear Binding Energy :

هي الطاقة التي تتحرر عندما تتجمع النيوكليونات لتكوين النواة ، او هي الطاقة اللازمة لفصل جميع نيوكليونات النواة بعضها عن البعض الاخر .

*وتعزى طاقة الربط النووية هذه الى ان مجموع كتل النيوكليونات وهي منفصلة عن بعضها اكبر من كتلة النواة الناتجة من تجمعها ، وفرق الكتلة هذا قد تحول الى طاقة مبعثرة مما سبب تماسك النيوكليونات مع بعضها ، وعليه فطاقة الربط النووية $B(A,Z)$ لنواة عددها الكتلي A وعددها الذري Z هي :

$$B(A,Z)=[Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)]C^2 \dots\dots\dots (1)$$

حيث m_p كتلة البروتون ، m_n كتلة النيوترون ، N العدد النيوتروني ، M_N كتلة النواة ، c سرعة الضوء .

فان كانت الكتل مقدرة بـ kg فان الطاقة ستقدر بالجول ، ولكن هذه الوحدات غير ملائمة لذلك تستعمل وحدة الكتل الذرية ، فعليه ان كانت الكتل مقدرة بوحدة u ، وبما ان :

$$1 u = 931.5 \frac{MeV}{c^2}$$

لذلك امكن اعادة كتابة المعادلة (1) لتصبح كالآتي :

$$B(A,Z)= [Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)].C^2 \times \frac{931.5}{c^2} MeV$$

$$\therefore B(A,Z)=931.5[Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)] \dots\dots\dots (2)$$

طاقة الربط بدلالة الكتل النووية ، وبوحدات وحدة الكتل الذرية .

ولقد جرت العادة على استعمال الكتل الذرية بدلا من الكتل النووية فلدينا :

$$M(A,Z)=M_N+Zm_e-B_e \dots\dots\dots(3)$$

حيث $M(A,Z)$: كتلة الذرة ، M_N = كتلة النواة ، B_e = هي طاقة ترابط الإلكترونات بالذرة وتكون قيمتها صغيرة جدا يمكن اهمالها .

نعوض المعادلة (٣) في معادلة (٢) فنحصل على :

$$B(A,Z)=931.5[Zm_p+Nm_n-M(A,Z)+Zme]$$

$$\therefore B(A,Z)=931.5[Zm_H+Nm_n-M(A,Z)] \quad \dots\dots\dots (4)$$

***معدل طاقة الربط :**

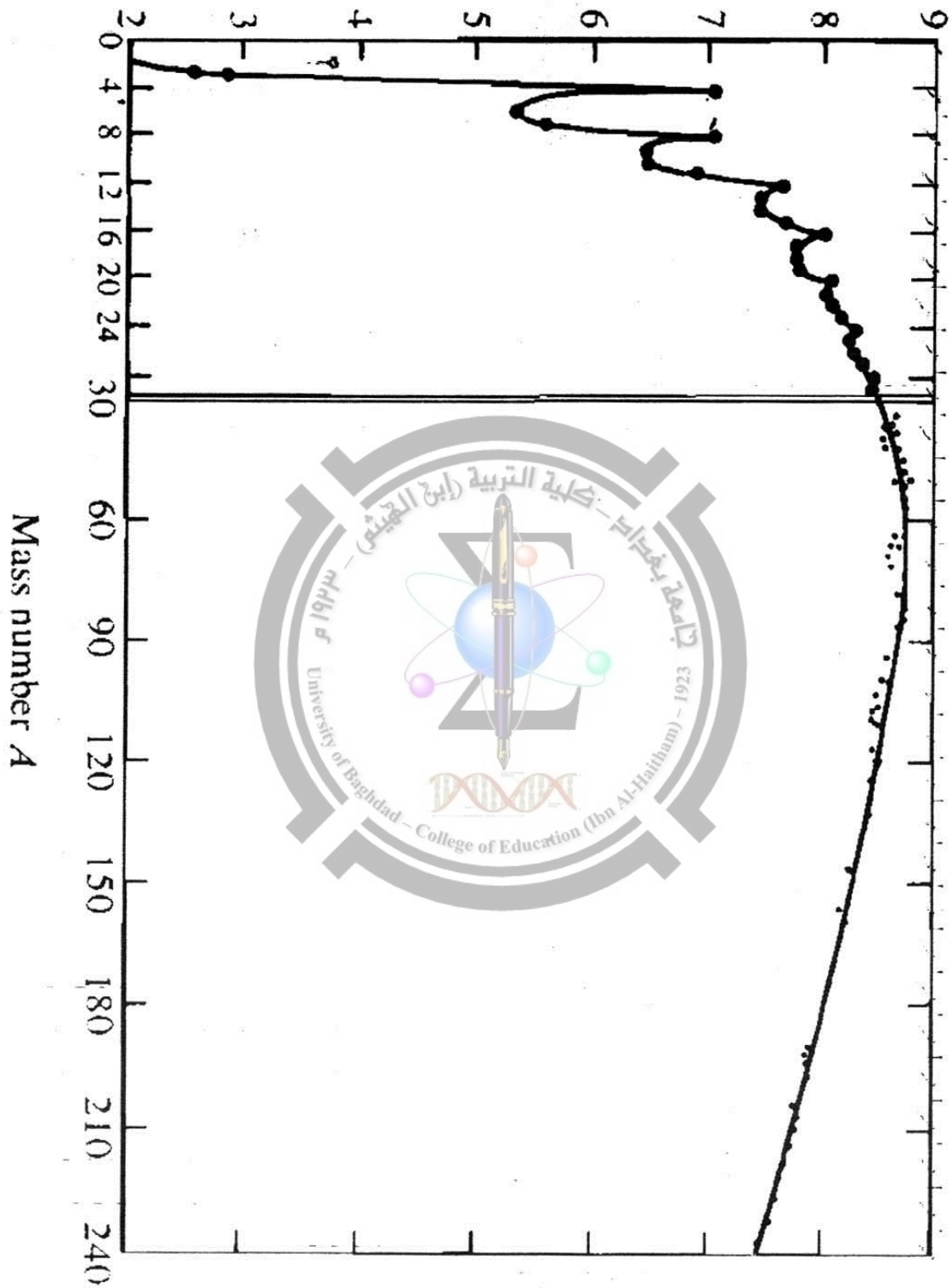
بقسمة طاقة الربط النووية $B(A,Z)$ على العدد الكتلي (A) نحصل على معدل طاقة الربط النووية B_{ave} ، اي معدل ربط اي من النيوكليونات داخل النواة (p) او (n).

$$B_{ave}(A,Z)=\frac{B(A,Z)}{A} \quad \dots\dots\dots (5)$$

والشكل (١) يمثل العلاقة بين معدل طاقة الربط والعدد الكتلي (A) ، ويمكن ملاحظة ما يلي:

- ١- يكون المنحنى ثابت نسبيا باستثناء النوى الخفيفة مثل نواة الديوترون 2_1H .
- ٢- ان النوى المتوسطة تمتلك اكبر القيم الى معدل طاقة الربط النووية مثل نواة الحديد ($^{56}_{26}Fe$) وبذلك تكون النوى المتوسطة عادة هي الاكثر استقرارا وتبلغ قيمة $\left(\frac{B}{A}\right)$ بحدود ٨,٨ مليون الكترون فولت .
- ٣- النوى الخفيفة والنوى الثقيلة تستطيع ان تصبح اكثر استقرارا إذا وجد تفاعلا نوويا معيناً يستطيع ان ينقلها الى منطقة النوى المتوسطة.
- ٤- النواة التي لها عدد كتلي يزيد او ينقص كثيرا عن (٦٠) اقل ترابطا اما التي لها عدد كتلي قريب من (٦٠) فهي العناصر الاكثر استقرار .

Average binding energy per nucleon B_{ave} , Mev



٥- بعد قيمة العدد الكلي (٦٠) تبدأ قيمة $(\frac{B}{A})$ بالنقصان التدريجي ويمكن تفسير هذا النقصان الى كونه ناتج عن التنافر الكولومي بين البروتونات الذي يزداد تأثيره بزيادة Z الناتجة عن زيادة A.

٦- ظهور قمم على المنحني عند A=4,8,12,16

مثال /جد طاقة الربط النووية لنواة النيتروجين ($^{14}_7N$) بوحدة MeV ، إذا علمت ان كتلة ذرة $^{14}_7N$ تساوي 14.003074 u ، وكتلة ذرة الهيدروجين تساوي 1.007825 u ، وكتلة النيوترون تساوي 1.008665 u ، وجد أيضاً معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون ؟

/ الحل

$$B(14,7)=931.5[Zm_H + Nm_n - M(14,7)]$$

$$B(14,7)=931.5[7 \times 1.007825 - 7 \times 1.008665 - 14.003074]$$

$$B(14,7)=104.603 \text{ MeV}$$

$$B_{ave} = \frac{B(14,7)}{A} = \frac{104.603}{14} = 7.472 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{nucleon}} \right)$$

زيادة (نقصان) الكتلة (Mass Excess (defect) :

ان الكتل الذرية بوحدات الكتل الذرية عادة لا تختلف كثيرا عن عدد النيوكليونات A . لهذا السبب يكون من المناسب التعبير عن الكتل النووية بدلالة زيادة الكتلة mass excess $\Delta(Z,N)$ والتي تسمى احيانا بنقصان الكتلة mass defect ، التي تتحدد بوحدات الكتلة الذرية (u) على وفق المعادلة التالية :

$$\Delta(Z,N) = \frac{A}{2} M_N - A$$

وتسمى النسبة بين زيادة الكتلة $\Delta(Z,N)$ والعدد الكتلي A بنسبة الربط : packing fraction

$$P = \frac{\Delta(Z,N)}{A} = \frac{M_N - A}{A}$$

مثال / احسب كتلة الديتريوم 2_1H بوحدة الكتل الذرية u إذا علمت ان زيادة الكتلة تساوي 13135.82 Kev ؟

/الحل

$$\Delta = 13135.82 \text{ Kev} = 13135.82 \times 10^{-3} \text{ MeV}$$

$$\Delta = 13.13582 \text{ MeV}$$

$$1u = 931.5 \text{ MeV} \text{ لكن}$$

$$\Delta = \frac{13.13582}{931.5} = 0.015176 u$$

$$\therefore M = \Delta + A = 0.015176 + 2 = 2.015176 u$$

طاقة فصل الجسيمة النووية :

هي الطاقة اللازمة لتحرير الجسيمة النووية ، أو انها الطاقة التي تتحرر عند تأسير الجسيمة من قبل النواة فعليه فان طاقة فصل النيوترون S_n تعني الطاقة اللازمة لتحرير او فصل النيوترون عن النواة او انها الطاقة التي تتحرر عند تأسير النيوترون من قبل النواة وبالمثل طاقة فصل البروتون S_p وطاقة فصل جسيمة الفا S_α .

يمكن التعبير عن طاقة الفصل النووية اما بدلالة الكتل او بدلالة طاقات الربط . فبدلالة الكتل يعبر عن طاقة فصل النيوترون S_n بالصيغة :

$$S_n = 931.5 [M(A-1, Z) + m_n - M(A, Z)] \quad \dots\dots(6)$$

$$S_n = B(A, Z) - B(A-1, Z) \quad \text{وبدلالة طاقات الربط فان} \quad \dots\dots(7)$$

وبالمثل فان طاقة فصل البروتون S_p بدلالة الكتل :

$$S_p(A,Z)=931.5[M(A-1,Z-1)+m_H-M(A,Z)] \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$S_p(A,Z)=B(A,Z)-B(A-1,Z-1) \quad \text{بدلالة طاقات الربط} \quad \dots\dots\dots(9)$$

وكذا الحال بالنسبة لطاقة فصل جسيمة الفا ، فبدلالة الكتل :

$$S_\alpha(A,Z)=931.5[M(A-4,Z-2,N-2)+m_\alpha-M(A,Z)] \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$S_\alpha(A,Z)=B(A,Z)-B(A-4,Z-2)-B(4,2) \quad \dots\dots\dots(11)$$

وان كل زوج من هذه المعادلات يمثل معادلتين متكافئتين ولاثبات ذلك نأخذ المثال الاتي :

$$\begin{aligned} S_n &= B(A,Z)-B(A-1,Z) \\ &= 931.5[Zm_H+Nm_n-M(A,Z)-Zm_H-(N-1)m_n+M(A-1,Z)] \\ &= 931.5[Nm_n-M(A,Z)-Nm_n+m_n+M(A-1,Z)] \\ &= 931.5[M(A-1,Z)+m_n-M(A,Z)] \end{aligned}$$

وهي نفس معادلة فصل النيوترون بدلالة الكتل الذرية .

مثال / ما مقدار الطاقة اللازمة لازالة نيوترون من نواة ${}^{41}_{19}K$ التي كتلتها الذرية تساوي (40.974856 u) ، إذا علمت ان كتلة ${}^{40}_{19}K$ الذرية تساوي (39.976709 u) ، وان كتلة النيوترون هي (1.008665 u)؟

/ الحل

$$\begin{aligned} S_n &= 931.5[M(A-1,Z)+m_n-M(A,Z)] \\ &= 931.5 [39.976709 + 1.008665 - 40.974856] \\ &= 931.5 [0.010518] = 9.797366 \text{ MeV} \end{aligned}$$

التأثير المزدوج واثره على طاقة الفصل النووية :

ان اعتماد القوة النووية على الزخم البرمي يسمى بالتأثير المزدوج pairing effect او تأثير الازدواج ، اي ان كل زوج من النيوكليونات المتشابهة n,n , p,p يتجاذبان بقوة كبيرة عندما يكون زخم كل منهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس في الاتجاه للاخر. وتأثير الازدواج هو السبب في كون النوى الزوجية - الزوجية اكثر استقرارا ووفرة من النوى الزوجية - الفردية او النوى الفردية - الزوجية وهذه اكثر استقرارا ووفرة من النوى الفردية - الفردية .

اما كيف يؤثر تأثير الازدواج على طاقة فصل الجسيمة النووية ، فلقد وجد عمليا انه لقيمة معينة للعدد الذري (Z) ، فان طاقة فصل النيوترون S_n تكون اكبر عندما يكون عدد النيوترونات زوجيا عما هي عليها لو كان عددها فرديا فمثلا :

$$S_n(^{202}_{82}\text{Pb}_{120}) > S_n(^{201}_{82}\text{Pb}_{119})$$

كذلك وجد انه لقيمة معينة لـ (N) فان S_n تكون اكبر عندما يكون عدد البروتونات Z زوجيا عما هي عليها لو كان Z فرديا

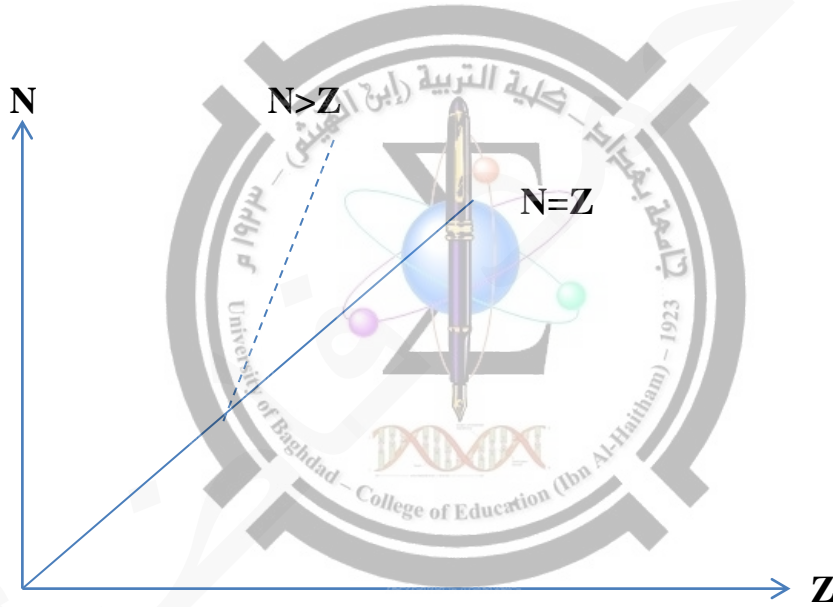
$$S_n(^{12}_6\text{C}_6) > S_n(^{11}_5\text{B}_6)$$

ويسمى الفرق $S_n(A,Z,N_{\text{even}}) - S_n(A-1,Z,N_{\text{odd}})$ بـ طاقة ازدواج النيوترون ، ففي حالة الرصاص ^{82}Pb وعند رسم طاقة الفصل S_n كدالة لـ N نجد ان S_n تكون اكبر للنظائر التي تحتوي على عدد زوجي من النيوترونات . كما في الشكل .

حيث يكون هناك ارتباط اضافي بين كل زوج من النيوكليونات المتشابهة الموجودة في الحالة نفسها والتي تكون لها زخوم زاوية كلية تعمل باتجاهين متعاكسين ، وان طاقة الازدواج تعمل على زيادة طاقة الارتباط للنويات وبالتالي زيادة استقرارية هذه النوى.

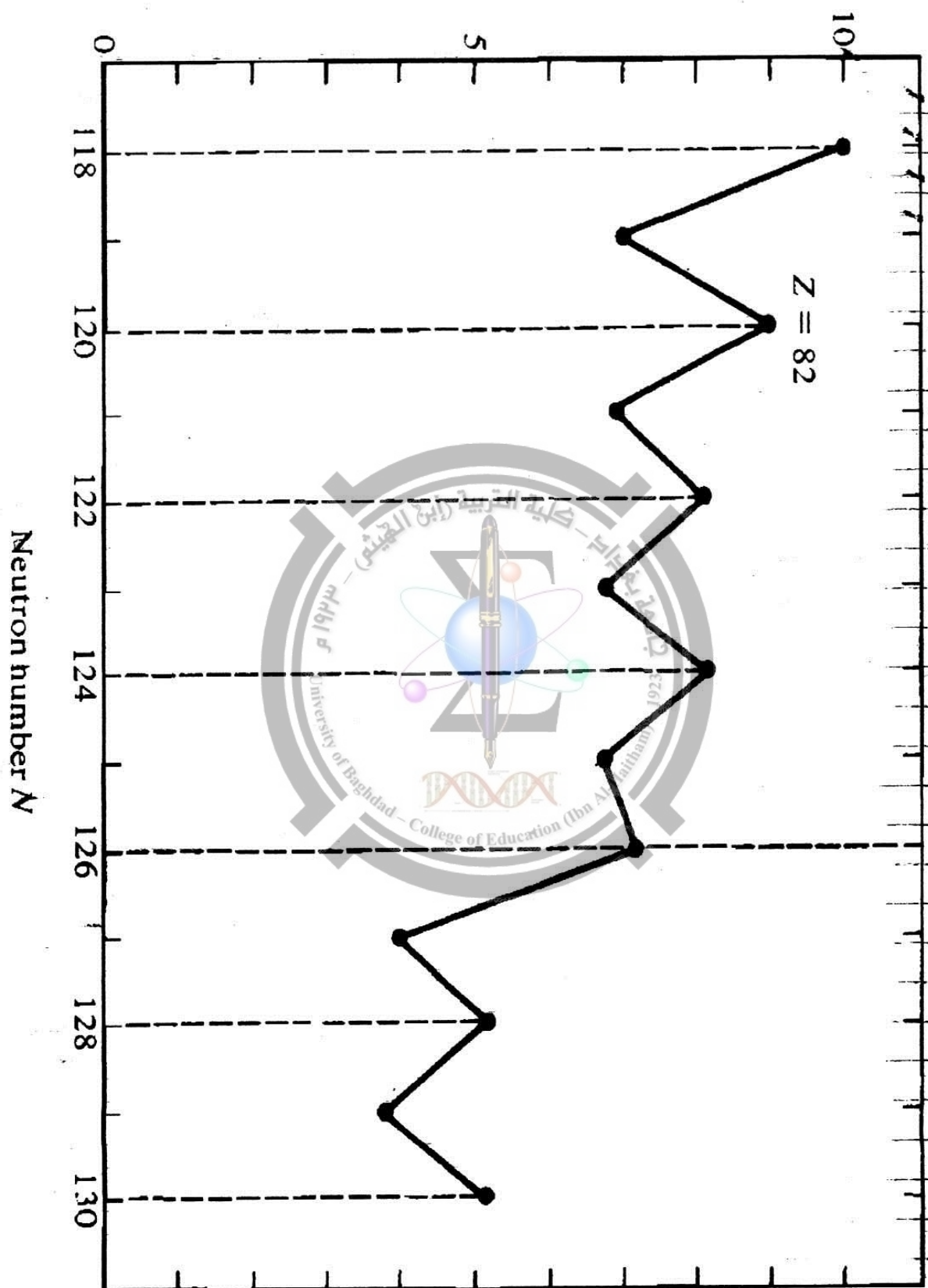
الوفرة الطبيعية للنوى المستقرة : Abundance of stable nuclei

النوى الموجودة والمعروفة اما تكون مستقرة stable او ذات نشاط اشعاعي radioactive ، فاذا تم رسم عدد النيوترونات N للنوى كدالة لعدد البروتونات Z ، فسنحصل على منحنى الاستقرار المبين بالشكل :



ومن هذا الشكل فان منطقة الاستقرار ستتمركز حول خط الاستقرار (N=Z) بالنسبة للنوى الخفيفة ، اما بالنسبة للنوى الثقيلة ، فان نقطة الاستقرار ستتحرف عن هذا الخط مقتربة من محور (N) وذلك لان النوى الثقيلة تحتوي على نيوترونات اكثر من البروتونات . (بسبب زيادة اهمية قوة كولوم) .

Neutron separation energy S_n , Mev



ان النوى غير المستقرة والواقعة على يمين منطقة الاستقرار تتحلل غالبا عن طريق تحلل B^+ او تأسير الالكترن وذلك لان فيها فائض من البروتونات ، على نقيض النوى غير المستقرة الواقعة على يسار منطقة الاستقرار التي تحتوي على فائض من النيوترونات فنراها تتحلل عن طريق تحلل $\alpha, n, \bar{\beta}$

ويمكن تلخيص النتائج لوفرة تواجد النوى المستقرة بالجدول الاتي :

N	Even	Odd	Even	Odd
Z	Even	Even	Odd	Odd
Number of nuclides	160	53	49	4

حيث يظهر ان النوى الزوجية - الزوجية تظهر متواجدة بوفرة اكبر .

ملاحظة / الاستقرار والوفرة تزداد في حالة النوى التي لها N او Z مساوية للاعداد (2,8,20,28,50,82,126) حيث تسمى هذه الاعداد بالاعداد السحرية حيث تجعل طاقة الربط كبيرة جدا ، كما هو الحال في نواة الهيليوم 4_2He ونواة الاوكسجين ${}^{16}_8O$ الاكثر وفرة واستقرارا من بقية نظائرها .

القوة النووية Nuclear Force :

هي القوة التي تربط مكونات النواة الى بعضها البعض وهي اقوى من القوى التنافرية الكهربائية بين البروتونات ولذا فبفعل القوة النووية تبقى البروتونات مجتمعة مع النيوترونات داخل النواة . وهناك اربع قوى في الطبيعة وهي مرتبة كالاتي من الاقوى الى الاضعف:

٢- القوة الكهرومغناطيسية

١- القوة النووية

٤- قوة الجاذبية

٣- القوة الضعيفة

خصائص القوة النووية :

١- القوة النووية هي قوى تبادلية : على غرار تبادل الفوتونات ما بين الشحنات الكهربائية افترض العالم الياباني يوكاوا تبادل جسيمات متوسطة الكتلة اسمها الميزونات ما بين النيوكليونات . بعبارة اخرى مثلما تعزى القوة الكهرومغناطيسية الى تبادل الفوتونات فان القوى النووية تعزى الى تبادل الميزونات .

٢- القوة النووية لا تعتمد على الشحنة : ان التنافر الكولومي بين البروتونات اصغر بكثير جدا من التجاذب النووي فيما بينها . ورغم زيادة تأثير التنافر الكولومي بزيادة العدد الكتلي للنوى الا ان تأثيره يبقى اضعف نسبيا ، فعليه يمكن القول ان القوة النووية بين بروتون وبروتون تساوي تقريبا القوة النووية بين البروتون والنيوترون وتساوي تقريبا القوة النووية بين النيوترون والنيوترون اي ان :

$$F_{pp} \cong F_{pn} \cong F_{nn}$$

ويمكن دعم هذا الاستنتاج من ان مستويات الطاقة ، وطاقت التهيح وطاقات الفصل والزخم الزاوي للنوى المرآتية تكون متقاربة .

٣- القوى النووية قصيرة المدى : اي ان النيوكليون (n or p) يتجاذب فقط مع النيوكليونات القريبة منه ولا يتجاذب مع تلك التي تبعد عنه باكثر من 2 fm اي ان :

$$F_{nuclear} = 0 \quad \text{for } r > 2fm$$

لقد تم افتراض هذه الخاصية لتفسير ثبوتية B_{ave} ، وعدم اعتمادها على العدد الكتلي A فتم افتراض ان مدى القوى النووية هي بحدود 2 fm .

٤- القوى النووية قوى قابلة للاشباع : اي ان النيوكليون يمكن ان يرتبط بعدد معين من النيوكليونات وهذا يعني ان طاقة ربط النيوكليون مع بقية النواة ستبلغ حدا اعلى لا تتجاوزه بعد تجمع عدد معين من النيوكليونات حوله .

٥- القوى النووية قوى تنافرية : بعد تشبع القوة النووية فانها ستعمل على ابعاد النيوكليونات بعضها عن البعض الاخر ، بان تتحول الى قوة تنافرية عندما تقل المسافة بين نيوكليونين عن $(\frac{1}{2} f_m)$ اي ان :

$$2f_m > r > \frac{1}{2} f_m \quad \text{قوى تجاذبية نووية}$$

$$r < \frac{1}{2} f_m \quad \text{قوى تنافرية نووية}$$

٦- القوى النووية قوى تعتمد على الزخم البرمي : ان القوة النووية بين نيوكليونين متشابهين p,p , n,n تكون اعظم ما يمكن عندما يكون الزخم الزاوي الكلي لاحدهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس بالاتجاه للزخم الزاوي الكلي للاخر . بحيث يكون الزخم الزاوي للاثنين يساوي صفر . يسمى هذا التأثير ، اي ظاهرة اعتماد القوى النووية على الزخم البرمي بتأثير الازدواج ، اي ان كل زوج من النيوكليونات المتشابهة p,p , n,n يتجاذبان بقوة كبيرة عندما يكون زخم كل منهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس بالاتجاه للاخر .

النماذج النووية Nuclear Models :

كما هي الحالة بالنسبة للنماذج الذرية التي اقترحت لتصوير التركيب الذري ، فانه وفي حالة النواة فان هناك نظريات او نماذج نووية تقترح لوصف تركيب او حركة النواة . وتبنى هذه النماذج على أسس معينة . وتستخدم النماذج النووية لوصف او تفسير النتائج العملية المختلفة ويقاس مدى نجاح النموذج ورسوخه كنظرية بدرجة كبيرة بقدرته

على تفسير النتائج العملية المعينة ، ولحد الان لا توجد نظرية او نموذج نووي واحد شامل ومتكامل لوصف التركيب النووي او القوة النووية .

وسنتطرق هنا بالتفصيل الى نموذجين هما نموذج قطرة السائل ونموذج القشرة ونشير باختصار الى بعض النماذج النووية الاخرى .

اولا: نموذج قطرة السائل liquid drop model :

اقترح العالم بور هذا النموذج عام ١٩٣٧ لتفسير بعض الظواهر الفيزيائية النووية كالانبعاث النووي Radioactivity ، والانشطار النووي Nuclear fission ، واشتقاق معادلة طاقة الربط النووية ، الا انه لا يصف حركة النيوكليونات داخل النواة ولا كيفية تفاعلها مع بعضها ، ومن تسمية النموذج يتضح ان النواة قد شبهت بقطرة السائل ، وقد تكون مبررات التسمية واسباب اقتراح النموذج واحدة وهي :

١- مثلما تكبر حجما قطرة السائل بزيادة عدد جزيئات السائل ، نلاحظ ان النواة تكبر حجما كلما زاد عدد نيوكليوناتها ، اي كلما زاد العدد الكتلي A ، وهذا مستنتج تجريبيا ومن المعادلة :

$$R=R_0A^{1/3} \rightarrow V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A$$

٢- تبخر السائل ، حيث يقابل ظاهرة النشاط الاشعاعي او الانبعاث النووي فهروب

قسم من جزيئات السائل من القطرة يقابل انبعاث جسيمات α ، β من النواة.

٣- انقسام قطرة السائل الكبيرة الى قطرتين صغيرتين يقابل ظاهرة الانشطار النووي

(وهي ظاهرة انقسام نواة ثقيلة غير مستقرة بقصفها نيوترون مثلا ، الى نواتين

متقاربتين بالكتلة) .

الفرضيات الاساسية لنموذج قطرة السائل:

ليتمكن هذا النموذج من تفسير ظاهرة النشاط الاشعاعي والانشطار النووي واشتقاق طاقة الربط النووية ، تم فرض الفرضيات الاتية :

١- ان المادة النووية غير قابلة للانضغاط ، كما تدل على ذلك المعادلة التجريبية $R=R_0A^{1/3}$ حيث يزداد حجم النواة بزيادة عددها الكتلي بعبارة اخرى ان كثافة المادة النووية لا تعتمد على حجم النواة ، كما هو الحال بالنسبة لقطرة السائل التي لا تعتمد كثافتها على حجمها :

٢- ان القوى النووية لا تعتمد على الشحنة $F_{pp} \cong F_{pn} \cong F_{nn}$

٣- ان القوى النووية قابلة للاشباع .

* ان منجزات هذا النموذج هو اشتقاق معادلة تجريبية لطاقة الترابط النووية ، او معادلة الكتلة شبه التجريبية او معادلة وايزر وعبر عنها بدلالة مجموع عدد من الحدود او التأثيرات التي نصلها كما يلي :

$$B(A,Z)=T_v+T_s+T_c+T_a+T_p+T_{sh}$$

١- حد الحجم (Volume term) T_v : تأثير الحجم :

استنادا الى الفرضيات الاساسية للنموذج فمن المتوقع ان زيادة عدد النيوكليونات اي زيادة العدد الكتلي A ، وبالتالي زيادة حجم النواة $V=\frac{4}{3}\pi R_0^3A$ ، تسبب زيادة طاقة الربط الكلية للنواة اي ان :

$$T_v \propto A \rightarrow T_v=a_vA$$

وتجريبيا وجد ان $a_v=14 \text{ Mev/nucleon}$ فعليه ان :

$$T_v=14 A$$

ملاحظة : ان تأثير الحجم على طاقة الربط النووية يقابل تأثير الكتلة m على حرارة تبخر القطرة Q ، فكلما زادت كتلة القطرة كلما زادت الحرارة اللازمة لتبخيرها $Q=Lm$ ، حيث L الحرارة الكامنة للتبخر .

٢- حد السطح (T_s) Surface term (تأثير السطح) :

من المعلوم ان قطرة السائل تظهر شداً سطحياً ، فمحصلة القوى على جزيئة داخل القطرة تساوي صفر بينما محصلة القوى على جزيئة واقعة على سطح القطرة لا يساوي صفر وتكون متجهه نحو المركز . وبالمقارنة نجد انه بالنسبة للنواة فان القوى النووية التي تربط اي نيوكليون داخل النواة مع بقية النيوكليونات تكون مشبعة وبالطبع طاقة ربط هذا النيوكليون كبيرة نسبياً .

اما بالنسبة لنيوكليون واقع على سطح النواة فان القوى النووية عليه تكون غير مشبعة وتبعاً لذلك تكون طاقة ربطه اقل .

من هذا يمكن القول انه كلما زادت مساحة سطح النواة كلما قلت طاقة ربط النواة وحيث ان مساحة سطح الكرة ($4\pi R^2$) فان :

$$T_s \propto 4\pi R^2 \propto 4\pi R^2 \cdot A^{2/3}$$

$$T_s = a_s A^{2/3}$$

وعملياً وجد ان $a_s = -13 \text{ MeV}$ فعليه :

فان $T_s = -13 A^{2/3}$ واشارة السالب تعني ان زيادة سطح النواة تسبب نقصان في طاقة ربطها .

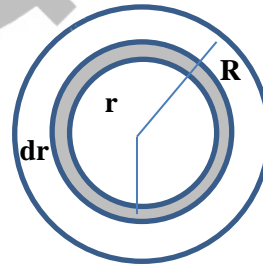
٣- الحد الكولومي (Coulomb term) تأثير التنافر الكولومي :

ان التنافر الكولومي بين الشحنات المتشابهة ، وكذلك التجاذب بين الشحنات المختلفة انما يمثل قوة بعيدة المدى وغير قابلة للاشباع والمقصود بالقوة بعيدة المدى هي ان البروتون مثلا ينفر من البروتون الاخر سواء اكان قريبا او بعيدا عنه وهما يتنافران بقوة كبيرة ان كانا متقاربين ويتنافران بقوة صغيرة ان كانا بعيدين عن بعضهما.

اما المقصود بكون القوة الكولومية قوة غير قابلة للاشباع فهذا يعني ان البروتون يمكن ان يتنافر مع اي عدد من البروتونات . فعليه فان اي بروتون في النواة يتنافر مع كل البروتونات الاخرى الموجودة في النواة ، مما يعني ان زيادة عدد البروتونات داخل النواة ، اي زيادة العدد الذري Z ، ستعمل على تقليل طاقة الربط النووية للنواة .

ولاشتقاق الحد الكولومي او تأثير التنافر الكولومي على طاقة ربط النواة التي عددها الذري Z ، وشحنتها $Q=+Ze$ ، وعدد الكتلي A ، ونصف قطرها R ، والكثافة الحجمية لشحنة النواة ρ ، ولنفرض انه في لحظة ما ونحن نجمّع النيوكليونات لتكوين النواة ، اصبحت لدينا كرة نصف قطرها (r) كما في الشكل ادناه فان شحنتها تعطى بالعلاقة :

$$q_r = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$$



فاذا اضيفت طبقة اخرى من الشحنة سمكها (dr) فشحنة هذا الجزء ستكون :

$$dq = 4\pi r^2 dr \rho$$

وبحساب الجهد الكهربائي للنواة وكالاتي :

$$T_c = \int_0^R \frac{kq_r dq}{r} = \int_0^R \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \cdot 4\pi r^2 dr \rho \cdot \frac{1}{r}$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{16\pi^2}{3} \rho^2 \int_0^R \frac{r^5}{r} dr$$

$$= \frac{4\pi^2 \rho^2}{3\epsilon_0} \left[\frac{r^5}{5} \right]_0^R = \frac{4\pi^2 \rho^2}{15\epsilon_0} R^5$$

$$\text{but } \rho = \frac{Q}{V} = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

$$\therefore T_c = \frac{4\pi \times 9 \times Z^2 e^2 R^5}{15\epsilon_0 \times 16\pi^2 R^6} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3}{5} \frac{Ze^2}{R}$$

ولكن البروتون لا يمكن ان يتنافر مع نفسه انما يتنافر مع بقية البروتونات فقط ، اي انه يتنافر مع (Z-1) بروتون ، لذلك وجب طرح الحد $\frac{3Ke^2Z}{5R}$ من المعادلة الاخيرة :

$$T_c = \frac{3KZ^2e^2}{5R} - \frac{3Ke^2}{5R} Z$$

$$\therefore T_c = \frac{3Ke^2Z(Z-1)}{5R}$$

$$\text{But } R=R_0A^{1/3} \rightarrow T_c = -a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

$$a_c = \frac{3ke^2}{5R_0}$$

قد تم ادخال الاشارة السالبة للاشارة الى ان التنافر الكولومي يسبب نقصان طاقة الربط النووية الكلية .

٤- حد عدم التناظر (Asymmetry term (T_a) (تأثير عدم التناظر) :

يقصد بالتناظر هو مدى تناظر عدد البروتونات والنيوترونات ، فمن خلال منحني الاستقرار يتضح ان النظائر الخفيفة يتساوى فيها عدد البروتونات والنيوترونات (ابتداء من الهيدروجين حتى الكالسيوم $^{40}_{20}\text{Ca}$) ، ابتداءً من الكالسيوم يتزايد عدد النيوترونات

عن عدد البروتونات حتى تتكافئ القوة النووية قصيرة المدى مع قوة التنافر بين البروتونات (طويلة المدى) .

لذلك فانه في العناصر الخفيفة فان (N-Z=0) ، وبالتالي فان هذا الحد لا يشارك في اضعاف القوة النووية (طاقة الترابط النووية الكلية) ، ولكن مع زيادة النسبة بين النيوترونات الى البروتونات اصبح هذا الحد ذو تأثير وتأثيره هو انه يعمل على انقاص طاقة الترابط النووية الكلية ومن ثم زيادة قيمة هذا الحد عن الصفر يؤثر سلبا على تماسك النواة وميلها الى الاستقرار ، ولهذا توضع اشارة سالبة لهذا الحد . يعطى هذا الحد بالمعادلة الاتية :

$$T_a = -a_a \frac{(N-Z)^2}{A}$$

٥- حد الازدواج (Pairing term) (تأثير الازدواج) :

لقد وجد عمليا ان الترابط بين نيوكلينيين من النوع نفسه (n,n , p,p) يكون اعظم ما يمكن عندما يكون الزخم الزاوي لكل منهما اعظم ما يمكن ويساوي بالمقدار ويعاكس بالاتجاه للاخر . وهذا التأثير يجعل النوى الزوجية - زوجية اكثر وفرة واستقرارا من النوى الزوجية - الفردية او النوى الفردية - الزوجية وهذه اكثر وفرة واستقرارا من النوى الفردية - الفردية .

فالذا رمزنا لحد الازدواج بالرمز δ فيكون :

للنوى زوجية - زوجية $+\delta$

للنوى زوجية - فردية او فردية - زوجية 0

للنوى فردية - فردية $-\delta$

٦- حد القشرة , T_{sh} Shell term (تأثير امتلاء القشرة) :-

لقد وجد عملياً ان النوى التي فيها $N=Z$ ويساوي عدد سحري حيث (الاعداد السحرية 2,8,20,28,50,82,126) تكون مستقرة وذات طاقة ربط عالية وبشكل ملحوظ ، كما تكون وفرة النوى التي فيها Z or/and N يساوي عدد سحري ملحوظة بسبب استقرارها ، فعليه يمكن القول ان اقتراب Z او N او كليهما من اعداد سحرية يسبب زيادة طاقة الربط النووية وتمثل هذه الخاصية بحد في معادلة الترابط النووية ويرمز له بالرمز (η) ، وقد وجد عمليات ان $T_{sh}=1 \rightarrow 3\text{MeV}$.

Ex./ $T_{sh}=3\text{ MeV}$ for ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$

$T_{sh}=2\text{ MeV}$ for ${}^{15}_8\text{O}_7$, ${}^{15}_7\text{N}_8$

$T_{sh}=1\text{ MeV}$ for ${}^{18}_8\text{O}_{10}$

فعليه فطاقة الربط النووية وفقاً لنموذج قطرة السائل ستمثل بالمعادلة الآتية :

$$B(A,Z) = T_v + T_s + T_c + T_a + T_p + T_{sh}$$

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} - \delta + \eta(1-3)\text{MeV}$$

ملاحظة : ان الثوابت في المعادلة الاخيرة يمكن ايجادها بالمقارنة مع النتائج العملية المتوفرة ، وهناك اختلاف معين بين مجاميع الثوابت التي يمكن ايجادها ونعطي هنا قيما لمجموعتين من الثوابت :-

a_v	a_s	a_c	a_a	δ
14	13	0.6	19	$34/A^{3/4}$
16	18	0.72	23.5	$11/A^{1/2}$

قطع مكافئ الكتلة mass parabola :-

بسبب العلاقة $A=Z+N$ يمكن كتابة طاقة الربط النووية ، وفق نموذج قطرة السائل ، بدلالة متغيرين Z, A مثلا او بدلالة N, A او بدلالة Z, N وليس بدلالة ثلاثة متغيرات N, Z, A ، فعليه وبالتعبير عن B بدلالة Z, A فانها ستصبح كالآتي :

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} - \delta + \eta \dots (1)$$

ومن صيغة طاقة الربط النووية بدلالة الكتل يمكن التعبير عن الكتلة النووية كالآتي:-

$$M_N(A,Z) = Zm_p + Nm_n - \frac{B(A,Z)}{c^2}$$

وبالتعويض عن $B(A,Z)$ في المعادلة السابقة يمكن التعبير عن M_N بدلالة Z, A :

$$M_N(A,Z) = Zm_p + Nm_n - \left[a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta + \eta \right] / c^2 \dots (2)$$

وهذه المعادلة تسمى المعادلة شبه التجريبية للكتلة Semi empirical mass formula او معادلة وايزكر Weizcher formula .

من الواضح انه لقيمة معينة لـ (A) فان كل من المعادلتين 1 ، 2 سيصبح بشكل قطع مكافئ parabola أي $f(z)=a+bz+cz^2$ حيث f تمثل M او B ، حيث c, b, a ثوابت تعتمد قيمها على A .

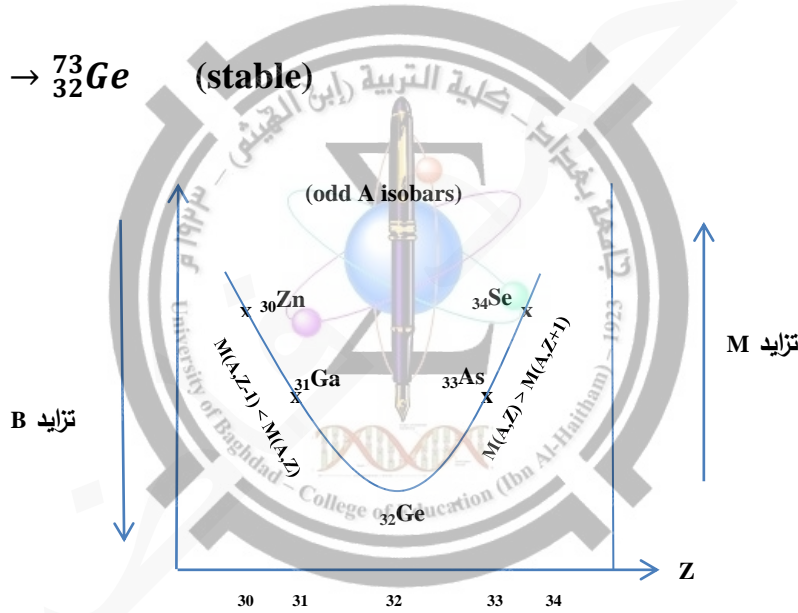
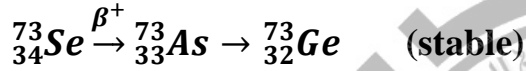
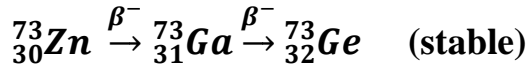
بعبارة اخرى ، عند رسم كتل او طاقات ربط الأيزوبارات التي اعدادها الكتلية A ، كدالة لـ Z سنحصل على منحنى بشكل قطع مكافئ . وستكون هناك حالتين :

١- عندما يكون A فرديا ، سيكون هناك قطع مكافئ واحد ، وستكون للمنحنى نهاية صغرى عند قيمة صحيحة لـ Z (integer) ، والتي تمثل العدد الذري للأيزوبار المستقر والاكثر ارتباطا والاقل كتلة .

بينما الايزوباترات الاخرى تتحلل عن طريق تحلل β^- , β^+ او الاسر الالكتروني لتنتهي بذلك الى الايزوبار المستقر.

فمثلا هناك خمسة آيزوباترات ذات العدد الكتلي الفردي $A=73$ هي :

الزنك $^{73}_{30}\text{Zn}$ ، والكاليوم $^{73}_{31}\text{Ga}$ (وهما يتحللان ببعث β^-) ، والسيلينيوم $^{73}_{34}\text{Se}$ (ويتحلل ببعث β^+) ، والآرسينك $^{73}_{33}\text{As}$ (ويتحلل بتأسير الكترون) ، والايزوبار المستقر هو الجرمانيوم $^{73}_{32}\text{Ge}$ ، وهذا موضح بالشكل الاتي ، والمعادلات الآتية :



ولتأكيد دقة تعبير وصياغة طاقة الربط ، وفق نموذج قطرة السائل ، يمكن استخراج القيمة النظرية للعدد الذري للآيزوبار الاكثر استقرار وذلك بأخذ مشتقة B بالنسبة لـ Z ومساواتها بالصفر ، ومن ثم حساب وتحديد قيمة Z وكالاتي:

$$B(A,Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta + \eta$$

$$\frac{\partial B}{\partial Z} = 0 - 0 - \frac{2a_c Z}{A^{1/3}} + \frac{a_c}{A^{1/3}} + 4a_a \frac{A}{A} - 8a_a \frac{Z}{A} = 0$$

$$Z = \frac{4a_a}{2a_c A^{-1/3} + 8a_a A^{-1}} \times \frac{A}{8a_a}$$

$$\therefore Z_A = \frac{\frac{A}{2}}{1 + \frac{a_c}{4a_a} A^{2/3}}$$

$$Z_A = \frac{\frac{A}{2}}{1 + \frac{a_c}{4a_a} A^{2/3}} = \frac{\frac{73}{2}}{1 + \frac{0.6}{4 \times 19} (73)^{2/3}}$$

$$Z_A = 32.2077 \cong 32$$

٢- عندما يكون A لللايزوبارات زوجيا ، سيكون هناك ايزوبارات فردية - فردية وَايزوبارات زوجية - زوجية وبالطبع فان تأثير الازدواج سيجعل الايزوبارات الزوجية - الزوجية اكثر استقرارا بزيادة طاقة ربطها بمقدار $+\frac{33}{A^{3/4}}$ ، بينما تكون الايزوبارات الفردية - الفردية اقل استقرارا وقلقة حيث طاقات ربطها قلت بمقدار $-\frac{33}{A^{3/4}}$ ، وعلى هذا الاساس فهناك قطعان مكافئان :

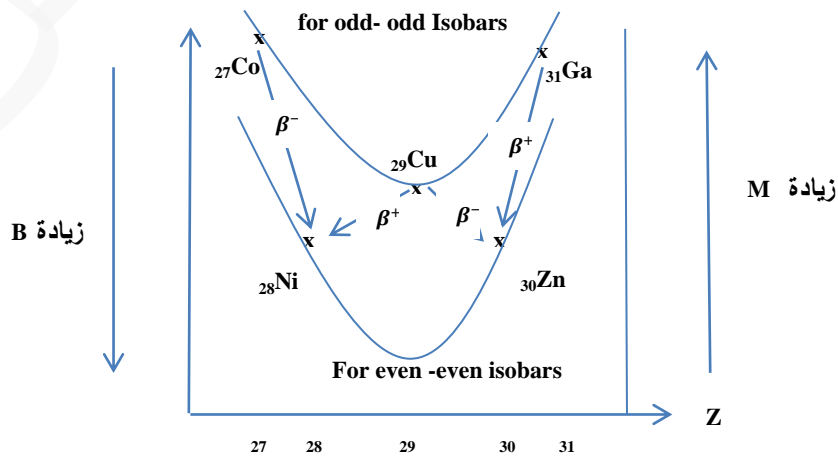
الاول للآيزوبارات الزوجية - الزوجية

والثاني للآيزوبارات الفردية - الفردية

فمثلا للعدد الكتلي $A=64$ هناك آيزوباران زوجية - زوجية هما الزنك ${}_{30}^{64}\text{Zn}$ والنيكل ${}_{28}^{64}\text{Ni}$

وثلثة ايزوبارات فردية - فردية هي الكالسيوم ${}_{20}^{64}\text{Ca}$ والكوبلت ${}_{27}^{64}\text{Co}$ والنحاس ${}_{29}^{64}\text{Cu}$

وكما موضح بالشكل ادناه :



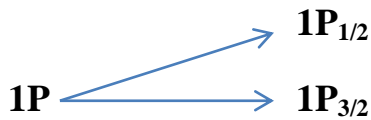
نموذج القشرة النووي Shell Model :

١- ان نموذج القشرة النووي هو احد اهم النماذج في التركيب النووي وقد اظهرت التجارب بان النوى التي لها عدد بروتونات (Z) او عدد نيوترونات (N) يساوي احد الاعداد السحرية فانها تكون مستقرة والاعداد السحرية هي : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 .

وتشكل الاعداد السحرية للبروتونات والنيوترونات قشرات مغلقة (Closed Shell) شبيهة بالقشرات الالكترونية للذرات وتكون قشرات النيوترونات وقشرات البروتونات مستقلة عن بعضها البعض .

٢- اوضح هذا النموذج بان المجال المركزي للنيوكليونات في النواة هو التأثير المتبادل بين الحركة البرمية والحركة المدارية لها ، وكذلك تأثير الازدواج النيوكليوني (وفق مبدأ الانفرد لباولي) بالاضافة الى التأثير الكولومي .
ان تأثيرات الحركة البرمية نتيجة دوران كل نيوكليون حول نفسه يولد عزما مغناطيسيا مقداره (S) ويساوي $(\pm \frac{1}{2} \hbar)$ ، واما تأثير الحركة الدورانية الناتج من دوران النيوكليون حول مركز النواة يولد عزما مقداره ℓ ويساوي الزخم الزاوي المداري .

٣- يفترض هذا النموذج وجود تفاعل قوي بين الزخم الزاوي المداري وبين الزخم الذاتي لكل نيوكليون ، فوجود هذا التفاعل فان مستويات الطاقة ذات القيمة الاكبر للزخم الزاوي الكلي J تقع دائما تحت المستويات التي تكون لها القيمة الاصغر . فمثلا في حالة المستوى $1P$ يكون الانقسام كالآتي :



هناك رموز معينة تحدد كل مستوى من مستويات الطاقة النووية وهذه الرموز هي :

(١) n : العدد الكمي التوافقي ويأخذ القيم ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤

(٢) l : العدد الكمي المداري حيث يقابل كل رقم رمز معين وحسب الجدول الاتي :

l	0	1	2	3	4	5	6
الرمز	s	p	D	f	G	h	I

(٣) J : الزخم الزاوي للمستوي النووي حيث : $J = l \pm S = l \pm \frac{1}{2}$

(٤) عدد الاحتواء للمستوي الثانوي $(2J+1)$

(٥) عدد الاحتواء في المستوى الرئيسي $2(2l+1)$

(٦) التماثل النووي (π) parity :

وهو اما ان يكون موجبا (زوجيا) او فرديا (سالبا)

ملاحظة : تتجمع مستويات الطاقة بشكل مجاميع وبفواصل كبيرة بين المجموعة والاخرى، وتسمى مستويات الطاقة لكل مجموعة والمتقاربة مع بعضها بالقشرة Shell ، وعندما تغلق القشرة فانها تغلق بعدد سحري من النيوكليونات . والمخطط الاتي يوضح كيفية توزيع مستويات الطاقة .

نقص صفحة ١٠

ملاحظة : نستطيع ان نحدد قيم البرم النووي والتماثل النووي لاي نواة في المستوى الارضي لها (ground state) بالاعتماد على القواعد الاتية :

١- في حالة النوى (زوجية - زوجية) فان الزخم الزاوي الكلي لها يكون مساويا للصفر ($J=0$) والتماثل موجبا $\pi=+$ اي ان $J^\pi=0^+$.

٢- في حالة النوى (زوجية - فردية) او (فردية - زوجية) ، فان الزخم الزاوي الكلي يعتمد على زخم آخر نيوكليون ، اما التماثل فيحسب من المعادلة $\pi = (-1)^{\ell}$ ، حيث ℓ يمثل العدد الكمي المداري لآخر نيوكليون منفرد موجود في النواة.

٣- في حالة النوى (فردية - فردية) فان الزخم الزاوي الكلي للنواة يحسب من زخم آخر نيوترون وبروتون منفرد وله قيمة محصورة بين :

$$J_{\text{total}} = |J_p - J_n| \rightarrow |J_p + J_n|$$

$$\pi = (-1)^{\ell_p + \ell_n}$$

اما التماثل فيمكن حسابه من المعادلة

مثال : أوجد $(J)^\pi$ لنواة $^{11}_6\text{C}$ ؟

$$J_{\text{total}} = \frac{3}{2}$$

$$\pi = (-1)^1 = (-1)^1 = -$$

$$J^\pi = \left(\frac{3}{2}\right)^-$$



ملاحظة : هناك حالات شاذة يحصل فيها عدم تطابق مع النتائج العملية وذلك يعود الى حالة الازدواج النووي والذي يحصل عند تحقق الشرطين التاليين :

١- ان المستوى الذي له قيمة (ℓ) اكبر فانه يميل الى الازدواج قبل المستوى الذي (ℓ) صغير.

٢- ان المستويين متقاربين (لا يحدث انتقال من قشرة مغلقة بعدد سحري) فعند توفر الشرطين فيحصل انتقال نيوكليوني الى المستوى الذي له (ℓ) كبيرة .

خصائص النوى السحرية :

- ١- انغلاق كامل القشرة (إمتلاء القشرة النووية) .
- ٢- عدد الايزوتونات والايزوتوبات والايزوبارات عالية جدا .
- ٣- طاقة فصل النيوترونات فيها عالية جدا .
- ٤- بسبب طاقة الارتباط العالية فانها تحتاج الى طاقات كبيرة من اجل تهيجها .
- ٥- احتمالية حدوث تفاعل نووي لهذه النوى قليل جدا لان الفواصل بين مستويات الطاقة كبيرة .
- ٦- تكون هذه النوى ذات استقرارية عالية ووفرة كبيرة جدا .

مثال ١ / جد الزخم الزاوي الكلي للنواة $^{14}_7N_7$

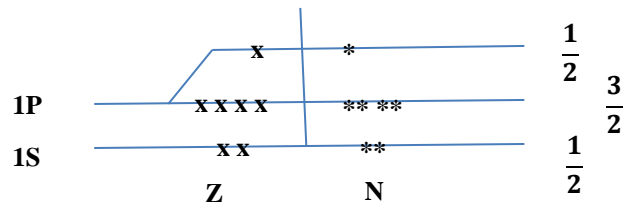
الحل / النواة لها $N=7, P=7$ فيكون توزيعها كالآتي :

$$J_p = \frac{1}{2}, J_N = \frac{1}{2}$$

$$J_{total} = \left| \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right| \rightarrow \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

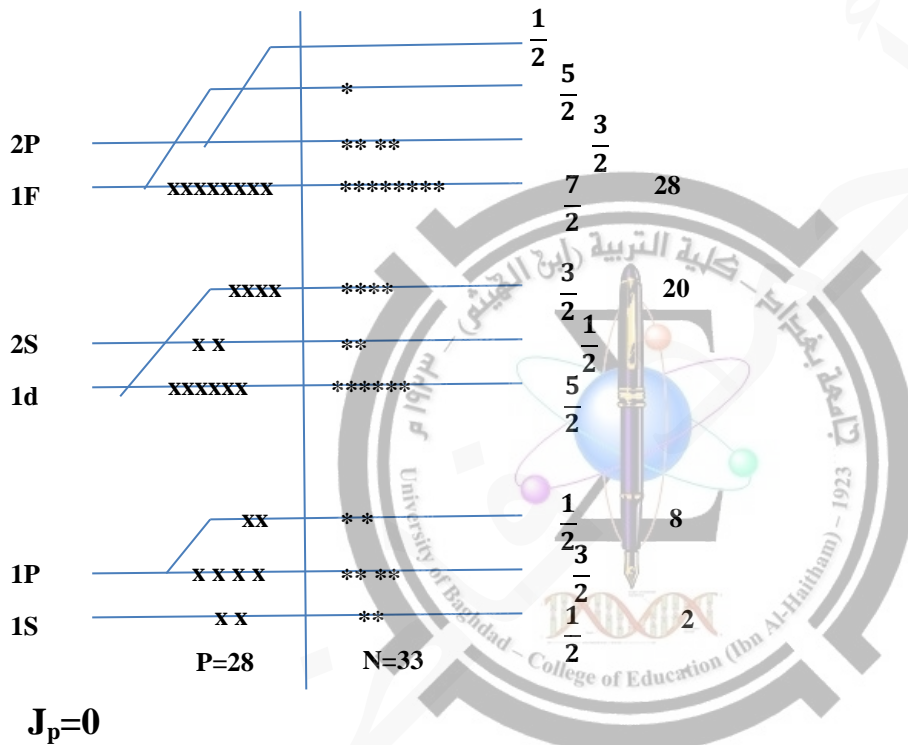
$$J_{total} = 0 \rightarrow 1$$

$$J_{total} = 0, 1$$



مثال ٢/ جد قيمة $(J)^\pi$ للنواة ${}_{28}^{61}\text{Ni}$ ؟

الحل/ نواة النيكل لها $P=28, N=33$



$$J_p=0$$

في هذا المثال يحدث انتقال نيوترون من المستوى $2P_{3/2}$ الى المستوى $1F_{5/2}$ وذلك لان قيمة (l) للمستوى $(1F)$ اكبر من قيمة (l) للمستوى $2P$ وأيضاً ان المستويين متقاربين ، فيحصل ازدواج نووي فيبقى هنا النيوترون المنفرد في المستوى $2P_{3/2}$.

$$J_N = \frac{3}{2} \rightarrow J_{\text{total}} = \frac{3}{2} \rightarrow (J)^\pi = \left(\frac{3}{2}\right)^-$$

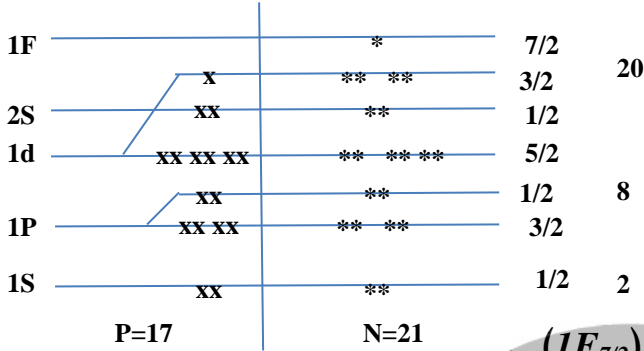
مثال ٣/ على اساس نموذج القشرة ذات النيوكليون الواحد وباعتبار شد البرم بالمدار ، ما

هي التسمية الطيفية لنواة ${}_{17}^{38}\text{Cl}$ ؟

الحل/

For $^{38}_{17}\text{Cl}$: P=17 , N=21

فتكون التسمية الطيفية كالآتي :



آخر نيوترون له $J_N = \frac{7}{2}$ ويقع في المستوى $(1F_{7/2})$.

اما آخر بروتون منفرد فيكون في المستوى $1d_{3/2}$ الذي قيمة (ℓ) له اعلى من قيمة (ℓ) للمستوى $2S_{1/2}$ فيحصل انتقال من $2s$ الى $1d$ لتحقيق شرط الازدواج بين المستويين المتقاربين.

اذن آخر بروتون منفرد يقع في المستوى $2S_{1/2}$

$$J_{tot} = \left| \frac{1}{2} - \frac{7}{2} \right| \rightarrow \frac{1}{2} + \frac{7}{2}$$

$$= |-3| \rightarrow 4 \rightarrow J_{tot} = 3, 4$$

تنبؤات نموذج القشرة :

١- ان تنبؤات نموذج القشرة للزخم الزاوي الكلي للنوى تتفق بشكل جيد جدا مع النتائج العملية ، حيث ان الزخم الزاوي لنيوكليونين يساوي صفرا ولقشرة مغلقة يساوي صفرا أيضاً . الزخم الزاوي الكلي للنواة سيساوي الزخم الزاوي الكلي للنيوكليونات خارج القشرات المغلقة .

٢- يتنبأ نموذج القشرة بوجود حالات شبه مستقرة في النوى التي فيها قشرات غير ممتلئة ، اي النوى ذات Z, N او كلاهما قريباً من عدد سحري .

٣- يتوقع نموذج القشرة ان يكون عزم رباعي الاقطاب (عزم رباعي الاقطاب هو مقياس لانحراف النواة عن الشكل الكروي) صفرًا او قريباً من الصفر للاعداد السحرية.

نماذج نووية اخرى :

١- نموذج الحركة الجماعية **Collective motion model** :

ان النوى التي تكون بعيدة عن الاعداد السحرية هي ليست كروية ولكن تبدي لان تكون متطاولة باتجاه القطبين (رأسياً) او متطاولة باتجاه الاستواء (أفقياً) . في هذه النوى المشوهة فان المحور الرئيسي يدور في الفضاء وينتج عن ذلك حركة جماعية والتي يشارك فيها كل النيوكليونات :

٢- النموذج الاحصائي **Statistical Model** :

يفترض هذا النموذج ان هناك ترابطاً نووياً قوياً بين النيوكليونات بحيث لا يمكن دراستها انفرادياً وانما يمكن معاملتها احصائياً . هذا النموذج يعطي معدلات للكميات الفيزيائية لكل نيوكليون . ان النتيجة الجيدة لهذا النموذج هي تفسيره لطاقة الترابط النووية.

٣- النموذج العنقودي **Cluster Model** :

ويسمى نموذج جسيم α . يفترض ان جسيم α هو وحدة بناء النواة ، اي ان النوى تتكون من عدد صحيح من العدد الكتلي لجسيم α (اي مضاعفات ٤) . يطبق هذا النموذج في النوى ذات $(A=4n)$ مثل :

$${}^{12}_6C \cong 3 \alpha , {}^{16}_8O = 4 \alpha$$

الفصل الثالث

ظاهرة النشاط الإشعاعي

ظاهرة النشاط الإشعاعي Radioactivity :

هي ظاهرة انبعاث جسيمات نووية (α و β و γ مثلا) من بعض النوى المتهيجة .
وتصف ظاهرة النشاط الإشعاعي بأنها عشوائية وذاتية ، فهي عشوائية لان عدد النوى المتحللة في وحدة الزمن ليس ثابتا، وذاتية لانه لا يمكن التأثير عليها بأي مؤثر خارجي كدرجة الحرارة او الضغط او الرطوبة ، ولا بحالة المادة صلبة او سائلة او غازية ، نقية او مركبة ، حتى ان تحلل نواة ما ليس له علاقة بتحلل النوى المجاورة كما ان نمط تحللها (في حالة تحلل تلك النوى بنمطين : مثلا نمط تحلل α ونمط تحلل كاما) لا يعتمد على نمط تحلل جاريتها.

الفعالية Activity :

هي المعدل الزمني لانبعاث الجسيمات من عينة مشعة من النوى ، ويتناسب عدد النوى المتحللة (اي عدد الجسيمات المنبعثة) dN مع عدد النوى المشعة N ، وعلى طول الفترة الزمنية للتحلل dt ، اي ان :

$$dN \propto N dt \rightarrow dN = -\lambda N dt \quad \dots\dots(1)$$

حيث λ : ثابت التحلل والذي يعني او يمثل العدد الجزئي للنوى المتحللة (نسبة الى عدد كل النوى المتوفرة) ولكل وحدة زمن ، ولذا فوحدة قياس (λ) هي مقلوب وحدة الزمن اي $\frac{1}{s}$ ، ويتكامل المعادلة (1) :

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt$$

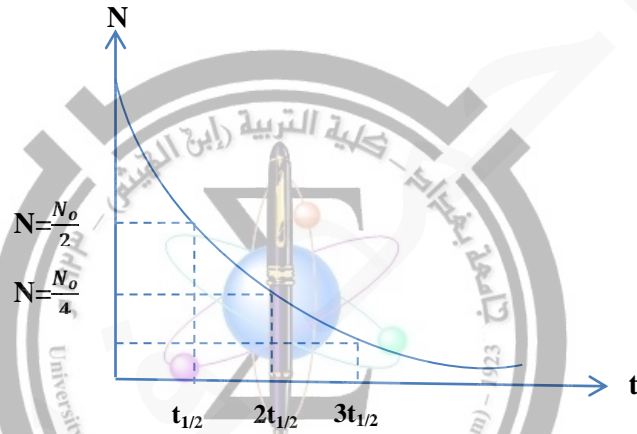
$$\therefore \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \dots\dots\dots(2) \text{ قانون الانحلال الإشعاعي}$$

حيث N : عدد النوى المتبقية بعد مرور الفترة الزمنية t على لحظة صنع المصدر .

$N=N_0$: عدد النوى المشعة لحظة خلق او صنع المصدر اي عند $t=0$

من الواضح ان عدد النوى المشعة المتبقية N يتناسب تناسبا أسيا تناقصيا مع الزمن .
وتسمى الفترة الزمنية التي خلالها ينقص عدد النوى المشعة الى نصف قيمتها الاصلية
عمر النصف ($t_{1/2}$) half-life time

فبجعل $N=\frac{N_0}{2}$ في معادلة (2) واخذ (\ln) لطرفي معادلة (2) نحصل على :



$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t_{1/2} \rightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda t_{1/2}$$

$$\therefore 0 - 0.693 = -\lambda t_{1/2}$$

$$\therefore t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

ومن ناحية اخرى فان فعالية المصدر تساوي القيمة المطلقة للمعدل الزمني لتغير عدد النوى. فبأخذ المشتقة الزمنية لمعادلة (٢) نجد ان :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} = -\lambda N \rightarrow \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

$$\therefore A = A_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(3)$$

حيث A_0 : فعالية المصدر في لحظة انتاجه عندما $t=0$

A : فعاليته بعد مضي الفترة t .

من معادلة (3) ومن تعريف الفعالية يتضح ان وحدة الفعالية هي (تحلل/ثا) ($\frac{dis}{s}$) الا ان هذه الوحدة صغيرة جدا ، لذا ولأجل الاغراض العملية والعلمية تستعمل وحدة الكيوري (*curie*) تخليدا لمدام كوري التي كانت من رواد دارسي ظاهرة النشاط الاشعاعي ، حيث :

$$1 \text{ curie} = ci = 3.7 \times 10^{10} \frac{dis}{s}, \text{ mci} = 3.7 \times 10^7 \frac{dis}{s}, \mu ci = 3.7 \times 10^4 \frac{dis}{s}$$

وهناك وحدة البيكرل (*Bequerel*) وهو انحلال واحد في الثانية الواحدة.

وحيث ان نمط تحلل ما لا يعتمد على نمط التحلل الاخر للعينة المشعة (التي تتحلل بنمطين ، نمط تحلل α ونمط تحلل γ مثلا) ، فعليه فان نقصان عدد النوى المشعة في الفترة dt سينتج عن نمطي التحلل كليهما ، اي ان :

$$-dN = dN_\alpha + dN_\gamma = \lambda_\alpha N dt + \lambda_\gamma N dt$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t (\lambda_\alpha + \lambda_\gamma) dt$$

$$\therefore N = N_0 e^{-(\lambda_\alpha + \lambda_\gamma)t} = N_0 e^{-\lambda_{tot}.t} \dots\dots\dots(4)$$

حيث λ_{tot} هو ثابت التحلل الكلي وهو يساوي $(\lambda_\alpha + \lambda_\gamma)$ وبضرب طرفي هذه المعادلة بعدد النوى المشعة المتبقية N يمكن ان نستدل على ان :

$$A_{tot} = A_\alpha + A_\gamma \dots\dots\dots(5)$$

اي ان الفعالية الكلية لمصدر يتحلل بنمطين تساوي مجموع فعاليتي النمطين كل على انفراد وتسمى النسبة :

$$\frac{A_{\alpha}}{A_{tot}} = \frac{\lambda_{\gamma}}{\lambda_{tot}} \quad \text{(Branching ratio) نسبة التفرع}$$

والقيمة العملية لعمر النصف للنواة تساوي $\frac{0.693}{\lambda_{tot}}$

$$\frac{A_{\gamma}}{A_{tot}} = \frac{\lambda_{\gamma}}{\lambda_{tot}}$$

معدل العمر (τ) average time

هو معدل الزمن الذي تبقى خلاله النوى بدون تحلل اشعاعي حيث :

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$\therefore \tau = \frac{1}{\frac{0.693}{t_{1/2}}} = 1.44 t_{1/2}$$

$$\text{or } t_{1/2} = 0.693 \tau$$

العدد الكلي للنوى المشعة (No)

لمعرفة عدد النوى المشعة الاصلية N_0 ، نطبق العلاقة الاتية :

$$N_0 = \frac{w(gm) \times N_A}{A}$$

حيث w = وزن النظير النقي (او نسبة وزنه إذا كان على شكل مركب) بالغرامات

$$N_A = \text{عدد افوكادرو ويعادل } 6.025 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$$

$$A = \text{العدد الكتلي}$$

Not:

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$$

حيث n : عدد المولات ، N : عدد الذرات ، N_A : عدد افوكادرو

m : الوزن ، M : الكتلة الذرية بوحدة gm/mol

$$\therefore N = \frac{mN_A}{M}$$

$$\therefore N = \frac{gm \times \frac{atom}{mole}}{\frac{gm}{mole}} = atom .$$

ان العمر النصفى للنوى الام والاعمار النصفية الجزئية لكل تفرع هي :

$$t_{tot} = \frac{0.693}{\lambda_{tot}}, \quad t_{\alpha} = \frac{0.693}{\lambda_{\alpha}}, \quad t_{\gamma} = \frac{0.693}{\lambda_{\gamma}}$$

وان عدد النوى الام والنوى الوليدة للفرعين الفا وكاما يمكن الحصول عليها من المعادلات الاتية :

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_{tot} t}$$

$$N_{2\alpha} = \left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_{tot}} \right) N_0 (1 - e^{-\lambda_{tot} t})$$

$$N_{2\gamma} = \left(\frac{\lambda_{\gamma}}{\lambda_{tot}} \right) N_0 (1 - e^{-\lambda_{tot} t})$$

س/احسب ثابت التحلل اليورانيوم ^{235}U (عمر النصف = 7.1×10^8 y) ، وما هو عدد التحللات في الثانية الواحدة لـ (0.2 gm) من ^{235}U بوحدة الكوري ؟

الحل :

$$1) \lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{7.1 \times 10^8 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60}$$

$$\lambda = 3.095 \times 10^{-17} \text{ sec}^{-1}$$

$$2) A = \lambda N$$

$$N = \frac{mN_A}{A} = \frac{0.2 \times 6.025 \times 10^{23}}{235} = 5.1277 \times 10^{20} \text{ atom}$$

$$\therefore A = \lambda N = 3.095 \times 10^{-17} \times 5.1277 \times 10^{20} = 1.587 \times 10^4 \text{ dis/sec}$$

$$\therefore A = 4.3 \times 10^{-7} \text{ ci} \quad \text{ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dis/sec}$$

س/إذا علمت ان عمر النصف لعنصر مشع يساوي 20 يوم جد :

(١)الزمن اللازم لانحلال $\frac{3}{4}$ ذراته الاصلية .

(٢)الزمن اللازم لبقاء $\frac{1}{8}$ ذراته الاصلية دون انحلال

(٣) معدل عمر ذلك النظير ؟

الحل /

$$1)N=N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N=N_0 - \frac{3}{4} N_0 = \frac{1}{4} N_0 \rightarrow \frac{1}{4} N_0 = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$2^{-2} = e^{-\lambda t} \rightarrow -2 \ln 2 = -\lambda t \rightarrow t = \frac{2 \ln 2}{\lambda} = 2 \cdot \frac{0.693}{\lambda}$$

$$\therefore t=2 \cdot t_{1/2} = 2 \times 20 = 40 \text{ days.}$$

$$2) \frac{1}{8} N_0 = N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow 2^{-3} = e^{-\lambda t} \rightarrow -3 \ln 2 = -\lambda t$$

$$\therefore t=3 \frac{0.693}{\lambda} = 3 t_{1/2} = 3 \times 20 = 60 \text{ days}$$

$$3) \tau_2 = \frac{1}{\lambda} = \frac{20 \times 24 \times 60 \times 60}{0.693} = 2.4 \times 10^6 \text{ sec} = 27.7 \text{ days}$$

طرق انتاج النظائر المشعة :

١- انتاج نظير مشع بالقصف النووي :

لنفرض ان عينة من مادة غير مشعة قد قصفت بالنيوترونات وان نظيراً مشعاً قد تم

انتاجه بمعدل ثابت (Q) ، وبنفس الوقت يتحلل النظير المشع بمعدل $(-\lambda N)$ ، حيث N

عدد النوى المشعة الموجودة في تلك اللحظة ، λ ثابت تحلل النظير ، فعليه فان محصلة

معدل تغير N مع الزمن يعطى بالعلاقة الاتية :

$$\frac{dN}{dt} = Q - \lambda N \rightarrow \frac{dN}{Q - \lambda N} = dt \quad \times \frac{-\lambda}{-\lambda}$$

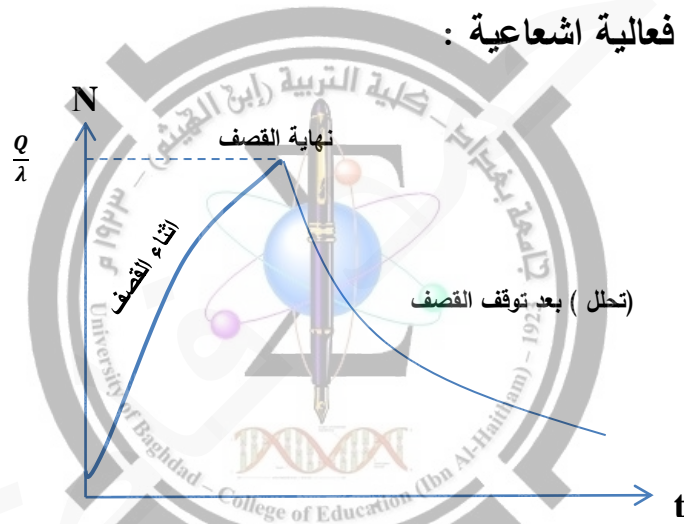
$$\therefore \int_0^N -\frac{\lambda dN}{Q - \lambda N} = \int_0^t -\lambda dt \rightarrow \ln(Q - \lambda N) \Big|_0^N = -\lambda t$$

$$\ln \frac{Q - \lambda N}{Q} = -\lambda t \rightarrow \frac{Q - \lambda N}{Q} = e^{-\lambda t}$$

$$\therefore Q - \lambda N = Qe^{-\lambda t} \rightarrow \lambda N = Q - Qe^{-\lambda t}$$

$$\therefore N = \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

وبرسم N كدالة للزمن سنحصل على الشكل ادناه ، ويتوقف القصف بعد $t = \infty$ ، حيث نحصل على اعلى فعالية اشعاعية :



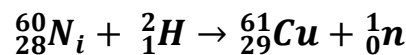
مثال / عند قصف النيكل ^{60}Ni بذرات الهيدروجين الثقيل (ديوترونات) يتكون النحاس

^{61}Cu والذي له عمر نصف يساوي 3.3 hr ، بمقدار $5 \times 10^8 \text{ atom/sec}$ جد :

(1) عدد ذرات النحاس ^{61}Cu في حالة الاشباع ؟

(2) ما هو مقدار الوزن المتكون للنحاس ^{61}Cu ؟

الحل :



$$1) N = \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

في حالة الاشباع فان $t = \infty$ ،

$$N(t=\infty) = \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) = \frac{Q}{\lambda}$$

$$N = \frac{5 \times 10^8}{\frac{0.693}{3.3 \times 60 \times 60}} = 8.57 \times 10^{12} \text{ atoms}$$

$$2) N = \frac{m N_A}{A} \rightarrow m = \frac{N \cdot A}{N_A} = \frac{8.571 \times 10^{12} \times 61}{6.023 \times 10^{23}} = 8.678 \times 10^{-10} \text{ gm}$$

مثال/ ما مقدار النشاط الإشعاعي لصفحة من الذهب متكونة من عملية تشعيع لفترة خمس ساعات في مفاعل علما ان سرعة التكوين هي 10^9 atom/sec ، وان عمر النصف هو 2.69 day ؟

/الحل

$$N = \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

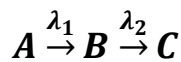
$$N\lambda = Q(1 - e^{-\lambda t}) = 10^9 [1 - \exp(-0.693 \times 5 / 2.69 \times 24)]$$

$$N\lambda = 5.22 \times 10^7 \frac{\text{dis}}{\text{sec}} = 1.4 \times 10^{-3} \text{ Ci} = 1.4 \text{ mci}$$

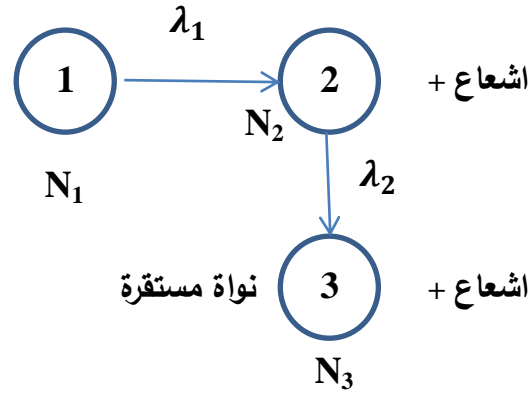
انتاج نظير مشع بتحلل نواة ام مشعة (الانحلال المتعاقب):

في العديد من الحالات التي يمكن مواجهتها في عملية انحلال النشاط الإشعاعي ان النواة الام parent nucleus تتحلل الى نواة وليدة daughter nucleus والتي تكون بدورها ذات نشاط اشعاعي أيضاً وتتحلل الى نواة حفيذة grand daughter وهكذا يكون من الممكن الحصول على سلسلة من الانحلالات ذات النشاط الإشعاعي $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow \dots$

ولنفرض انه يوجد لدينا من البداية (N_0) من نوى الام عند بداية الزمن ($t=0$) وانه لا يوجد نوى لنتائج الانحلال decay products اصلا ، وان كل نواة منحللة تنتج نواة وليدة واحدة ، ولتسهيل دراسة الموضوع سنفرض ان النواة الوليدة (3) هي مستقرة :



$$N_0 \quad 0 \quad 0 \quad t=0$$



بعد فترة زمنية t N_1 N_2 N_3

وبعد مرور فترة زمنية معينة (t) تبدأ النواة الام بالانحلال ويقل عددها حسب قانون الانحلال:

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

اما النوى الوليدة فيزداد عددها نتيجة لانحلال النوى الام ويقل نتيجة لانحلالها هي أيضاً ، وعليه فان :

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

اما النوى الحفيدة فيزداد عددها باستمرار لانها نوى مستقرة وغير مشعة:

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

فبالنسبة للمعادلة (1) يمكن الحصول على عدد نوى الام N_1 من التكامل المباشر لها :

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad \dots\dots\dots(4)$$

اما المعادلة (2) فيتم حلها كالآتي :

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

نعوض عن N_1 من معادلة (4) :

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

وبالضرب ($e^{\lambda_2 t}$) :

$$e^{\lambda_2 t} dN_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} e^{\lambda_2 t} dt - \lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t} dt$$

$$e^{\lambda_2 t} dN_2 + \lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t} dt = \lambda_1 N_0 e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} dt$$

$$\int_0^{N_2} d(N_2 e^{\lambda_2 t}) = \int_0^t \lambda_1 N_0 e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} dt$$

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1]$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_2 t} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - e^{-\lambda_2 t}]$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \dots\dots\dots(5) \text{ حفظ}$$

اما المعادلة (3) فيمكن حلها كالآتي :

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}]$$

$$\int_0^{N_3} dN_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^t [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] dt$$

$$N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\frac{e^{-\lambda_2 t}}{-\lambda_1} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{-\lambda_2} \right] t$$

$$N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\frac{e^{-\lambda_2 t}}{-\lambda_1} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{-\lambda_2} \right] - \left[\frac{1}{-\lambda_1} - \frac{1}{-\lambda_2} \right]$$

$$N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} \left\{ \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 \lambda_1} \right\}$$

$$\therefore N_3 = N_0 \left\{ 1 - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right\} \dots\dots\dots(6) \text{ حفظ}$$

التوازن الاشعاعي :

يقصد بالتوازن الاشعاعي عدم تغير نسب الانوية المشعة في العينة الواحدة بمرور الزمن ، وهناك حالتين يحدث فيهما التوازن الاشعاعي :

١- التوازن الانتقالي :

يحدث هذا التوازن بين نوى العناصر المشعة الام والنظائر الوليدة إذا كان عمر النصف للنواة الام كبير نسبياً مقارنة بعمر النصف للنواة الوليدة:

$$(T_{1/2})_1 > (T_{1/2})_2 \rightarrow \lambda_1 < \lambda_2$$

ومن خلال معادلة (5) :

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}]$$

فان معدل الانهيار في قيمة $(e^{-\lambda_2 t})$ يكون اسرع مما يحدث في قيمة $(e^{-\lambda_1 t})$ ، وخاصة عند زيادة الزمن t ، وهكذا نجد انه يمكن اهمال $(e^{-\lambda_2 t})$ مقارنة بـ $(e^{-\lambda_1 t})$ بعد زمن مناسب يتوقف على $(T_{1/2})_1$, $(T_{1/2})_2$ ، وبالتالي فان عدد انوية النظير الوليد هو :

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \rightarrow \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \lambda_1 N_1$$

$$\therefore \frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

حيث A_2 , A_1 هما كفاءة النشاط الاشعاعي للنوى الام والوليدة على الترتيب ، وهكذا يمكن توقع ان الشدة الاشعاعية للنوى الوليدة تصبح اعلى من الشدة الاشعاعية للنوى الام عند حدوث توازن مرحلي (انتقالي) .

٢- التوازن الاشعاعي الابدي:

يحدث هذا النوع من التوازن عندما يكون عمر النصف للنواة الام كبير جدا مقارنة بعمر النصف للنواة الوليدة :

$$(T_{1/2})_1 \gg (T_{1/2})_2 \rightarrow \lambda_1 \ll \lambda_2$$

وبالتالي قد تقترب λ_1 من الصفر اي ان $e^{-\lambda_1 t} \cong 1$

$$\therefore N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_0 (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\therefore \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \rightarrow \text{عندما تكون } t \text{ صغيرة}$$

ولكن عندما تزداد الفترة الزمنية المنقضية ، نجد ان قيمة $(e^{-\lambda_2 t})$ تقارب الصفر

$$\therefore \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1 \rightarrow A_2 = A_1$$

وهكذا نجد ان من صفات التوازن الابدي ان الشدة الاشعاعية للنوى الوليدة تكافئ تماما الشدة الاشعاعية للنوى الام .

زمن اعظم فعالية لنوى وليدة منتجة :

ان عدد النوى الوليدة N_2 ، حسب المعادلة (5) يساوي صفراً في بداية الزمن $t=0$ ، $t=\infty$ حيث تكون جميع النوى الام والنوى الوليدة قد انحلت . لذا نجد في فترة زمنية وسطية t_{max} ، حيث ان النوى الوليدة وبالتالي فعاليتها تمر بقيمتها العظمى اي عند الزمن t_{max} فان :

$$\frac{dN_2}{dt} = 0$$

وباجرا التفاضل على المعادلة (5) بالنسبة للزمن يمكن الحصول على الزمن الاعظم t_{max} الذي يكون فيه تركيز N_2 اقصى ما يمكن وكالاتي:

$$N_2 = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = 0$$

وبما ان الحد $(N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1})$ لا يمكن ان يساوي صفراً ، فاذن المقادير الموجودة داخل القوسين يجب ان تساوي صفراً ، اذن :

$$-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_{max}} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_{max}} = 0 \rightarrow \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_{max}} = \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_{max}}$$

$$\ln \lambda_2 - \lambda_2 t_{max} = \ln \lambda_1 - \lambda_1 t_{max}$$

$$\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1 = \lambda_2 t_{max} - \lambda_1 t_{max} \rightarrow t_{max} = \frac{\ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)}{\lambda_2 - \lambda_1} \dots \dots \dots (12)$$

ولغرض حساب الفعالية العظمى للنوى الوليدة يجب ان تحسب اولا الزمن الذي تصل به الفاعلية قيمتها العظمى من معادلة (12) ثم نطبق :

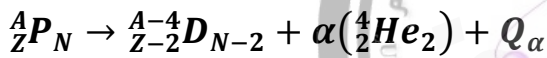
$$A_{max} = N_0 \lambda_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t_{max}} - e^{-\lambda_2 t_{max}}) \dots \dots \dots (13)$$

أنماط الانحلال :

أولاً / انحلال الفا : α - decay

يحدث انحلال الفا لانوية العناصر الثقيلة (الاثقل من الرصاص) بشرط ان تكون غير مستقرة ، وتتميز انوية تلك العناصر بانخفاض مقدار طاقة الربط النووية ولذلك يحدث لها اضمحلال ذاتي بدون مؤثرات خارجية . ومن امثلة باعثات الفا اليورانيوم ^{238}U ، الراديوم ^{226}Ra ، الرادون ^{222}Rn ... الخ .

جسيمة الفا جسيمة نووية تتكون من بروتونين ونيوترونين ، لذا فهي تشبه في تركيبها نواة الهيليوم (^4_2He) . نقول تشبه ولا نقول هي لأن تكوينها وانبعاثها يحدث آتيا لحظة انبعاثها، فهي لم تكن موجودة ككيان قائم داخل النواة قبل انبعاثها .
يمثل تحلل الفا بالمعادلة الآتية :



حيث $^A_Z P_N$ النواة الام parent nucleus

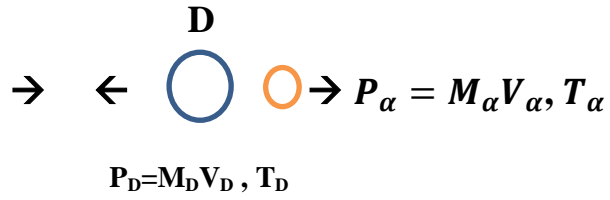
$^{A-4}_{Z-2} D_{N-2}$ النواة البنت Daughter nucleus

Q_α : طاقة تحلل الفا .

ومن الواضح ان تحلل الفا يسبب نقصان العدد الكتلي للنواة الام بمقدار (4) ويسبب نقصان عددها الذري بمقدار (2) ، وكذلك عددها النيوتروني.

يمكن ان تنبعث جسيمة الفا (α) من بعض النوى الثقيلة المتهيجة التي يكون فيها ($A > 150$) عادة . فاذا كانت كتلة النواة الام في انحلال الفا هي M_p ، وكتلة النواة البنت هي M_D وكتلة جسيمة الفا هي M_α ، نفرض ان النواة الام قد تحللت وهي بحالة سكون اي ان زخمها الخطي قبل التحلل يساوي صفر ، ولكي يبقى الزخم الخطي محفوظا فيجب ان يكون زخم الفا يساوي بالمقدار ويعاكس بالاتجاه لزخم النواة البنت ، اي ان :

$$P=0$$



$$\therefore P_{\alpha} = P_D \rightarrow M_{\alpha} V_{\alpha} = M_D V_D$$

$$\text{But } T = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{m^2 V^2}{2m} = \frac{P^2}{2m} \Rightarrow T_D = \frac{P_D^2}{2M_D} \dots\dots\dots(1)$$

$$T_{\alpha} = \frac{P_{\alpha}^2}{2M_{\alpha}} \dots\dots\dots (2)$$

ويقسمة (1) على (2) نحصل على

$$\frac{T_D}{T_{\alpha}} = \frac{M_{\alpha}}{M_D} \dots\dots\dots (3)$$

$$\therefore T_D = \frac{M_{\alpha}}{M_D} T_{\alpha} \text{ or } T_{\alpha} = \frac{M_D}{M_{\alpha}} T_D$$

ان المقدار Q_{α} يسمى طاقة تحلل (α) وهي تمثل مجموع الطاقة الحركية لجسيمة α ، والطاقة الحركية للنواة البنت T_D ، اي ان :

$$Q_{\alpha} = T_{\alpha} + T_D \dots\dots\dots (4)$$

نعوض عن قيمة T_D من معادلة (3) في (4) فينتج :

$$Q_{\alpha o} = T_{\alpha} + \frac{M_{\alpha}}{M_D} T_{\alpha} = \frac{M_D + M_{\alpha}}{M_D} T_{\alpha} \dots\dots\dots (5)$$

وبتقريب الكتل واعتبارها مساوية عدديا للعدد الكتلي فيمكن كتابة المعادلة (5) كالآتي:

$$Q_{\alpha o} = \frac{A}{A-4} T_{\alpha} \dots\dots\dots (6) \quad T_{\alpha} = \frac{A-4}{A} Q_{\alpha o}$$

ان منشأ (Q_{α}) هو فرق الكتل بين النواة الام والنواة البنت وجسيمة الفا ، اي ان :

$$Q_{\alpha} = [M_P - (M_D + M_{\alpha})] C^2$$

$$\therefore Q_{\alpha} = 931.5 \{M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - M_{\alpha}\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\therefore Q_{\alpha} = -S_{\alpha}$$

*واجب / اشتق العلاقة التي تربط الطاقة الحركية للنواة الوليدة T_D مع طاقة انحلال الفا $Q_{\alpha 0}$ ؟

ملاحظة : إذا كانت $Q_{\alpha 0}$ موجبة فان النواة الام تعتبر من النوى الباعثة لجسيمات α تلقائيا ، وإذا كانت سالبة فان النواة الام لا يمكنها ان تبعث α تلقائيا .

مخطط الانحلال :

يتم التعبير عن العمليات الانحلالية وخصائص النظائر المشعة باستعمال مخططات توضيحية تسمى مخططات الانحلال وتتكون هذه المخططات من الاجزاء التالية :

- ١- خط افقي تدون عليه المعلومات وهي :
 - أ. الرمز الكيميائي للنوية المنحلة .
 - ب. عدد الكتلة للنوية المنحلة .
 - ت. عمر النصف للنوية المنحلة .
- ٢- سهم ينطلق باتجاه الاسفل بوضع مائل نحو اليسار او اليمين او يكون عموديا بصورة متموجة وعلى النحو الاتي :
 - أ. عندما يكون الانحلال باشعة بيتا الموجبة (البوزترون B^+) او اشعة الفا او الانحلال بالاسر الالكتروني فان السهم يتجه بصورة مائلة نحو اليسار .
 - ب. عندما يكون الانحلال باشعة بيتا السالبة فان السهم يتجه بصورة مائلة نحو اليمين .
 - ت. عندما يكون الانحلال باشعة كاما فان السهم يتجه عموديا نحو الاسفل وبصورة متموجة .وفي جميع هذه الحالات ينتهي السهم عند خط افقي اخر يمثل مستوى طاقة النويدة الوليدة .

٣-توضع معلومات طاقة الانحلال ونوع الانحلال فضلا عن نسبة الانحلال والنويرات المنحلة والمتكونة على الخط الافقي والاسهم .

مثال/إذا كانت كتلة الراديوم $^{224}_{88}Ra$ تساوي 224.020217 u وكتلة الرادون $^{220}_{86}Rn$ تساوي 220.011401 u ، وكتلة جسيمة الفا (4_2He) تساوي 4.002603 u ، احسب T_D, T_α ؟

الحل /نحسب اولاً $Q_{\alpha 0}$

$$Q_{\alpha 0} = 931.5 [M(^{224}_{88}Ra) - M(^{220}_{86}Rn) - M(^4_2He)]$$

$$\begin{aligned} \therefore Q_{\alpha 0} (^{224}_{88}Ra) &= 931.5 (224.020218 - 220.0114 - 4.002603) \\ &= 5.788\text{ MeV} \end{aligned}$$

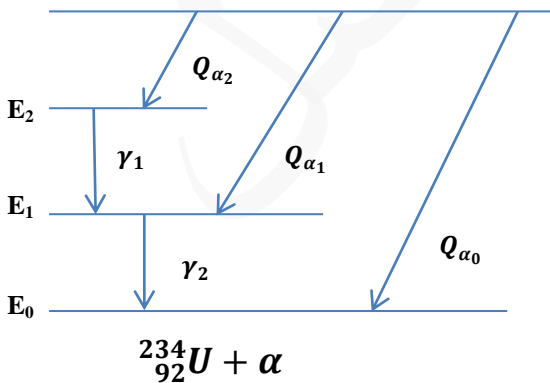
$$\therefore T_\alpha = \frac{A-4}{A} Q_{\alpha 0} = \frac{220}{224} \times 5.788 = 5.685\text{ MeV}$$

$$T_D + T_\alpha = Q_{\alpha 0} \rightarrow T_D = 5.788 - 5.685 = 0.103\text{ MeV}$$

$$T_D = \frac{4}{A} Q_{\alpha 0} = \frac{4}{224} \times 5.788 = 0.103\text{ MeV}$$

*مخطط انحلال α :

بلوتونيوم $^{238}_{94}Pu, t_{1/2} = 77Y$



عند دراسة طيف الطاقة لجسيمات α نلاحظ ان هذا الطيف هو طيف خطي لانه ناتج عن تحول نواة متهيجة من مستو معين الى مستو آخر وتكون النواة الناتجة من الانحلال متهيجة تعود الى الحالة الارضية ببعث اشعة كما .

$$E_n = Q_0 - Q_n \quad n=1,2,3,4, \dots$$

الطيف الطاقي لجسيم الفا :

ان طيف الطاقة energy spectrum لجسيمات (α) هو طيف خطي لانه ناتج عن تحول نواة متهيجة من مستو معين الى مستو آخر ، وكذلك الحال لعمليات من هذا النوع كما في تحلل كاما .

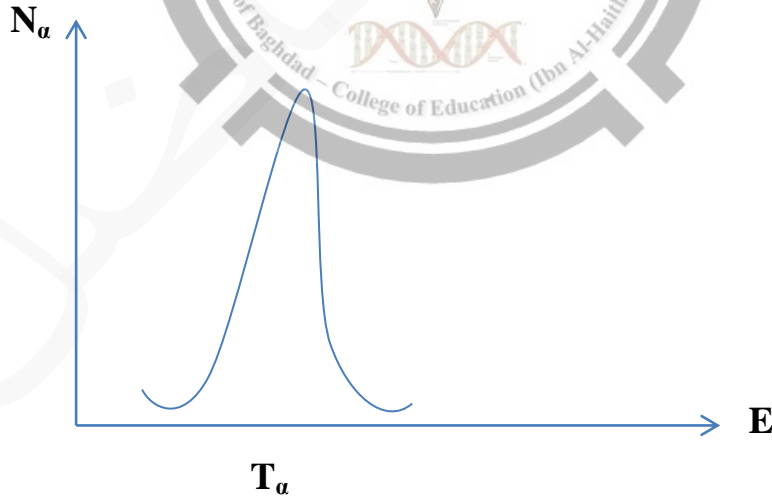
وإذا رجعنا الى المعادلة التي تربط طاقة انحلال (α) بطاقتها الحركية :

$$T_{\alpha} = \frac{A-4}{A} Q_{\alpha}$$

وبما ان قيم A للنواة الام تكون كبيرة ، لذلك فان نسبة $\frac{A-4}{A}$ تكون مساوية تقريبا الى الواحد اي ان :

$$\frac{A-4}{A} = 1$$

اي ان معظم طاقة الانحلال تكون كطاقة حركية لجسيمة (α)، لذلك فانه بانبعث جسيمين من نواة غير مستقرة ساكنة ابتداءً فان جسيمة (α) تنبعث بطاقة محددة ويقال عنها بانها احادية الطاقة لذلك فان الطيف الطاقي لها يكون طيفا خطيا . وكما موضح بالشكل:

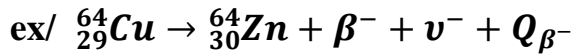


تحلل بيتا Beta – Decay :

هناك ثلاثة انواع من تحلل بيتا هي :

١- تحلل بيتا السالبة β^- -decay : وينتج هذا التحلل عن تحول نيوترون (n) الى بروتون (p) مصحوبا بانبعث الكترون $e^- (\beta^-)$. حيث :

$$n \rightarrow p + \beta^- + \nu^-$$

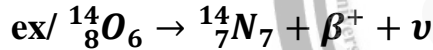


$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z+1} Y_{N-1} + \beta^- + \nu^-$$

وبشكل عام فان

٢- تحلل بيتا الموجبة β^+ -decay : وينتج عن تحول بروتون (p) داخل النواة الى نيوترون (n) وانبعث β^+ (بوزيرون e^+):

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu + Q_{\beta^+}$$

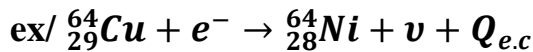


$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1} + \beta^+ + \nu$$

وبشكل عام فان

٣- أسر الالكترن (e.c) electron capture : وهو اقتناص احد الالكترونات الداخلية (من القشرة k = المدار الاول) من قبل النواة المتهيجة ليتحد مع احد بروتوناتها ليكون n ، اي ان :

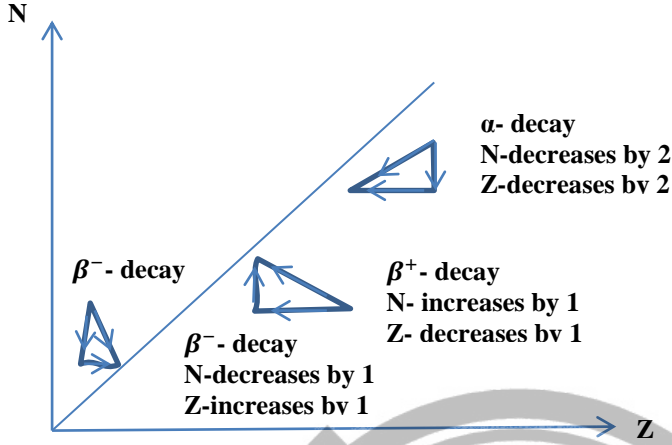
$$p + e^- \rightarrow n + \nu$$



$${}^A_Z X_N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1} + \nu$$

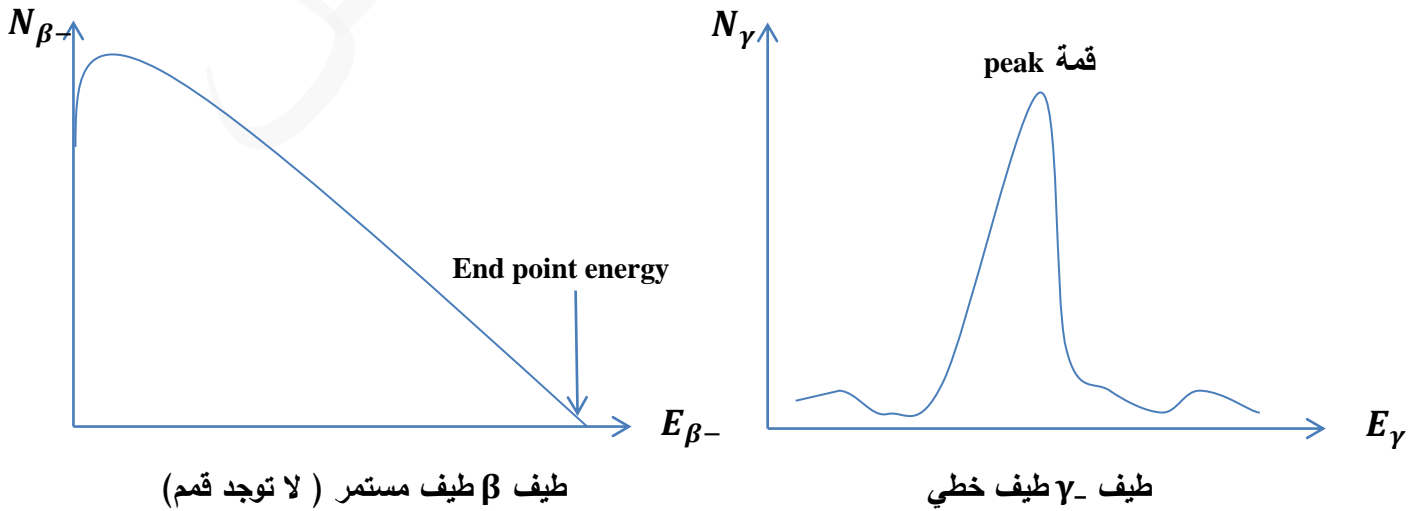
فرضية النيوتريانو :

ان الاضمحلال بانبعث بيتا β هو احد اكثر الاضمحلات شيوعا حيث ان بعض النوى المتهيجة التي تقع يمين او يسار خط الاستقرار للنوى تضمحل بانبعث بيتا .



ان اولى المشاهدات العملية لاضمحلال بيتا (β) قد بينت ان هذه العملية تبدو انها لا تتفق مع قوانين حفظ الطاقة والزخم الخطي والزخم الزاوي وكما يلي:

١- ان اضمحلال (β) كان يفهم انه عملية تتضمن كتلتين (النواة الام والنواة الوليدة) لذلك فمن المتوقع ان كون طيف جسيمات β طيفا خطيا كما هي الحالة في اضمحلال - α ، γ . لكن في الواقع ان طيف β الملاحظ هو طيف مستمر كما في الشكل ادناه :

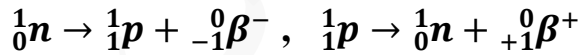


ووجود الطيف المستمر يدل أن على جسيمة بيتا لم تنتج في عملية تؤدي الى جسيمين
انما في عملية ادت الى ثلاث جسيمات تنقسم الطاقة المتوفرة لها بأية نسبة كانت للحفاظ
على تطبيق قانون حفظ الطاقة.

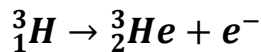
٢- وجد ان الزخم الخطي غير محفظ في هذا الاضمحلال ، فقد صورت نواتج تحلل ${}^6_2\text{He}_4$
الساكنة الى ${}^6_3\text{Li}_3^+$ و β^- وكانت الصورة كالمبينة ادناه :

ومن الواضح ان محصلة الزخم الخطي للجسيمين ${}^6_3\text{Li}_3^+$ و β^- لا تساوي صفر ، في حين
يجب ان تساوي صفر لان ${}^6_2\text{He}_4$ قد تحللت وهي ساكنة مما يعني ان زخمها الخطي كان
صفرًا ، ولإزالة هذا التناقض اقترح باولي ان هناك جسيمة اخرى غير مشحونة كتلتها
صغيرة جدا وبرمها يساوي $\frac{1}{2}$ ، تنبعث مع جسيمة β اثناء الاضمحلال سميت نيوترينو
neutrino ، وفي هذه الحالة يأخذ النيوترينو جزءا من الزخم ليتعادل بذلك الزخم الخطي .

٣- من المعلوم ان $S_e=S_p=S_n=\frac{1}{2}$ ، فعليه فان الزخم الزاوي في المعادلتين :



سيكون غير محفوظ . فعليه فبوجود النيوترينو او ضديدها والتي افترض ان زخمها الزاوي
يساوي $\frac{1}{2}$ ، يمكن حفظ الزخم الزاوي لعملية تحلل β . فمثلا لو اخذنا التفاعل الاتي:



فانه لا يتفق مع قانون حفظ الزخم الزاوي بالنسبة للنواة الام ونواتج الاضمحلال .

خواص النيوترينو :

- ١- جسيم عديم الشحنة .
- ٢- صغير الكتلة السكونية $m_\nu \cong 0$.
- ٣- يسير بسرعة مقاربة لسرعة الضوء .
- ٤- العزم المغناطيسي له يساوي صفر .
- ٥- ضعيف التفاعل مع المادة لانه متعادل كهربائيا ولا يحمل مجالا مغناطيسيا .
- ٦- لديه القابلية العالية على اختراق المواد .
- ٧- وجد ان هناك نوعان من النيوترينو هما النيوترينو ν وضديد النيوترينو $\bar{\nu}$ anti neutrino

طاقة تحلل بيتا Q_β :

هي الطاقة التي تتحرر عند حدوث تحلل بيتا ، وهي تمثل مجموع الطاقات الحركية للنواة البنت T_D والتي تهمل عادة ، ولجسيمة بيتا ، T_β ، وللنيوترينو T_ν .

١- بيتا السالبة β^- :

$$Q_{\beta^-} = T_{\beta^-} + T_{\nu^-} + T_D \cong T_{\beta^-} + T_{\nu^-} \dots\dots\dots(1)$$

ومصدر Q_β هو تحول فرق الكتلة الى طاقة فبدلالة كتل النوى :

$$M_N(A,Z) \rightarrow M_N(A,Z+1) + \beta^- + \nu^- + Q_{\beta^-}$$

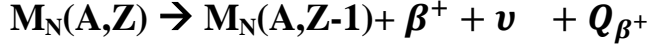
وبإضافة Zm_e للتعبير عن الكتل بدلالة الكتل الذرية فنحصل على :

$$M_N(A,Z) + Zm_e \rightarrow M_N(A,Z+1) + Zm_e + m_e + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}$$

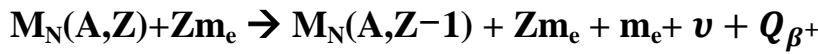
$$\therefore Q_{\beta_0^-} = 931.5 [M(A, Z) - M(A, Z + 1)] = T_{\beta^-} + T_{\nu^-}$$

ملاحظة / إذا كانت $Q_{\beta_0^-}(A, Z)$ موجبة فإن النواة تضمحل بانبعث β^- تلقائياً . وإذا كانت $Q_{\beta_0^-}(A, Z)$ سالبة فإن النواة الام لا يمكنها ان تضمحل بانبعث β^- تلقائياً .

٢- بيتا الموجبة β^+ :



وبإضافة Zm_e للطرفين للتعبير عن Q_{β^+} بدلالة كتل الذرات نحصل على :



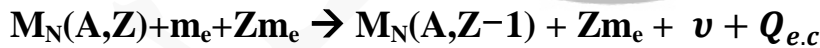
$$\therefore Q_{\beta_0^+} = 931.5 [M_A(A, Z) - M_A(A, Z-1) - 2me] = T_{\beta^+} + T_\nu$$

إذا كانت $Q_{\beta_0^+}$ موجبة فإن النواة الام تضمحل بانبعث β^+ تلقائياً . وإذا كانت $Q_{\beta_0^+}$ سالبة فإن النواة الام لا تضمحل بانبعث β^+ تلقائياً .

٣- الاسر الالكتروني e.c.:



وبإضافة Zm_e للطرفين للتعبير عن $Q_{e.c}$ بدلالة كتل الذرات نحصل على :



$$\therefore Q_{e.c} = 931.5 [M_A(A, Z) - M_A(A, Z-1)] = T_D + T_\nu \cong T_\nu$$

إذا كانت $Q_{e.c}(A, Z)$ موجبة فإن النواة الام يمكنها ان تضمحل بأسر الكترون وإذا كانت سالبة لا يمكن ذلك .

ملاحظة /

$$Q_{e.c}(A, Z) - Q_{\beta^+}(A, Z) = 931.5 \times 2me = 1.022 \text{ MeV}$$

$$\therefore Q_{e.c} = Q_{\beta^+}(A, Z) + 1.022 \text{ MeV}$$

هذا يعني انه إذا كان انبعاث β^+ ممكناً فإن الاسر الالكتروني ممكن أيضاً ولكن العكس غير صحيح الا إذا كانت :

$$Q_{e.c}(A,Z) > 1.022 \text{ MeV}$$

انماط الاضمحلال بانبعث بيتا :

١- بالنسبة للشحنة : تحلل بيتا السالبة $\beta^- - \text{decay}$ وتحلل بيتا الموجبة β^+

٢- بالنسبة لمحصلة $\vec{S}_\beta, \vec{S}_\nu$ فإذا كان :

أ. $\vec{S}_\nu + \vec{S}_\beta = 0$ اي ان اتجاه الزخم البرمي لجسيمة بيتا معاكس لاتجاه الزخم

البرمي للنيوترينو فمحصلتهما تساوي صفر ، ويسمى التحلل في هذه الحالة بتحلل

فيرمي (Fermi decay) .

ب. اذا كان $\vec{S}_\nu + \vec{S}_\beta = 1$ اي ان اتجاه الزخم البرمي لجسيمة بيتا بنفس اتجاه

الزخم البرمي للنيوترينو ، فيسمى التحلل في هذه الحالة بتحلل كامو- تلو

(Gamow - Teller) G.T .

٣- بالنسبة لقيمة \vec{L}_β الزخم الزاوي المداري لجسيم بيتا والنيوترينو فتحدد الانتقالات

كما يلي :

أ. إذا كان $L_\beta = 0$ فالتحلل يسمى بالتحلل المسموح allowed .

ب. إذا كان $L_\beta = 1$ فالتحلل يسمى بالتحلل غير المسموح الاول 1^{st} forbidden .

ت. إذا كان $L_\beta = 2$ فالتحلل يسمى بالتحلل غير المسموح الثاني 2^{nd} forbidden .

كما ان الزخم الكلي يساوي $\vec{J}_\beta = \vec{L}_\beta + \vec{S}_\beta$

ومن قانون حفظ الزخم الزاوي فان $\vec{J}_p = \vec{J}_D + \vec{J}_\beta \leftarrow$

كذلك فانه ومن حفظ التماثل فان $\leftarrow \pi_\beta = (-)^{L_\beta} \pi_p \cdot \pi_D$

كيفية حل مسائل تصنيف تحلل بيتا :

١- نحدد قيمة L_β بضرب تناظر النواة الام وتناظر النواة البنت :

$$\pi_p \cdot \pi_D = (-)^{L_\beta} \rightarrow L_\beta = \dots$$

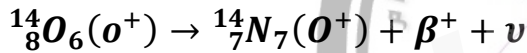
$$\text{Ex/ } \begin{matrix} 7^- \\ 1^+ \end{matrix} \dots \dots \dots \rightarrow \pi_p \cdot \pi_D = -. += -= (-1)^{L_\beta} \rightarrow L_\beta = 1, 3, 5, \dots$$

$$\begin{matrix} 1^- \\ 2^+ \\ 1^- \\ 2^+ \end{matrix} \dots \dots \dots \rightarrow \pi_p \cdot \pi_D = +. += += (-1)^{L_\beta} \rightarrow L_\beta = 0, 2, 4, \dots$$

٢- نجد قيمة J من المعادلة $|J_p - J_D| \leq J \leq J_p + J_D$

٣- نحدد قيمة \vec{S}_β فاذا كانت تساوي صفر (فهو تحلل فيرمي) او انها تساوي ١ (فهو تحلل G.T)

مثال / صنف تحلل بيتا للتحلل الاتي :



$$\pi_p \cdot \pi_D = +. += += (-)^{L_\beta} \rightarrow L_\beta = 0, 2$$

$$|J_p - J_D| \leq J \leq (J_p + J_D)$$

$$|0-0| \leq J_p \leq (0+0) \rightarrow J_p=0$$

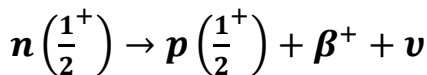
الاکثر احتمالا

$$J_\beta = L_\beta + S_\beta \rightarrow 0 = 0 + \delta_\beta \rightarrow \delta_\beta = 0$$

$$J_\beta = 2 + S_\beta \rightarrow S_\beta = -2 \quad \text{غير ممكن}$$

اذن التحلل من نوع Fermi ، allowed

مثال/



$$\pi_p \cdot \pi_D = (+) \cdot (+) = + = (-1)^{L_\beta} \Rightarrow L_\beta = 0, 2$$

$$\left| \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right| \leq J_\beta \leq \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) \rightarrow J_\beta = 0, 1$$

$$J_\beta = L_\beta + S_\beta \rightarrow 0 = 0 + \delta_\beta \rightarrow \delta_\beta = 0$$

$$0 = 2 + S_\beta \rightarrow S_\beta = -2 \quad \text{غير ممكن}$$

$$1 = 0 + S_\beta \rightarrow S_\beta = 1 \quad \text{ممكن}$$

$$1 = 2 + S_\beta \rightarrow S_\beta = -1 \quad \text{غير ممكن}$$

allowed Fermi + allowed G.T (mixed)

اذن الانحلال الاكثر احتمالا

مثالا /

$\pi_p \cdot \pi_D = + \cdot + = + = (-1)^{L_\beta} \rightarrow L_\beta = 0, 2$

$\left| \frac{3}{2} - \frac{3}{2} \right| \leq J_\beta \leq \left(\frac{3}{2} + \frac{3}{2} \right) \rightarrow J_\beta = 0, 1, 2, 3$

$J_\beta = L_\beta + S_\beta \rightarrow S_\beta = J_\beta + L_\beta = 0 - 0 = 0$

$= 0 - 2 = -2 \quad \text{غير ممكن}$

$= 1 - 0 = 1 \quad \text{ممكن allowed G.T}$

$= 1 - 2 = -1 \quad \text{غير ممكن}$

$= 2 - 0 = 2 \quad \text{غير ممكن}$

$= 2 - 2 = 0 \quad \text{ممكن } 2^{\text{nd}} \text{ forbidden -F}$

$= 3 - 0 = 3 \quad \text{غير ممكن}$

$= 3 - 2 = 1 \quad \text{ممكن } 2^{\text{nd}} \text{ forbidden - G.T}$

$^{35}_{16}\text{S} \xrightarrow{\beta^-} ^{35}_{17}\text{Cl}$

$3^+ \xrightarrow{\beta^-} \frac{3^+}{2}$

ممكن allowed -F

التحلل بانبعث اشعة كاما : Gamma Decay

ان التحلل بانبعث اشعة كاما هو عملية انبعث اشعة كهرومغناطيسية من النواة عند انتقالها من حالة متهيجة الى حالة اخرى اقل تهيجا او الى الحالة الارضية .

فاذا افترضنا ان نواة متهيجة كتلتها السكونية M_0^* تبعث اشعة كاما وتتحوّل الى المستوى الارضي لتكون النواة الوليدة والتي كتلتها M_0 كما في الشكل المجاور:



وبتطبيق قانون حفظ الزخم الخطي نجد ان :

$$0 = \vec{P}_\gamma + \vec{P}_D \rightarrow \vec{P}_\gamma = -\vec{P}_D \dots\dots\dots(1)$$

حيث :

\vec{P}_γ : زخم فوتون اشعة كاما

\vec{P}_D : زخم النواة الوليدة (المرتردة) في حالتها النهائية وتساوي $M_0 V_D$

حيث \vec{V}_D : سرعة النواة المرتردة .

ومن قانون حفظ الطاقة نجد ان :

$$931.5 \text{ Mo}^* = 931.5 \text{ Mo} + E_\gamma + T_D \dots\dots\dots(2)$$

حيث :

E_γ : طاقة اشعة كاما المنبعثة .

T_D : الطاقة الحركية للنواة المرتردة في حالتها النهائية وتساوي $\frac{1}{2} M_0 V_D^2$

ويعبر عن طاقة اضمحلال γ بالمقدار (Q_γ) على انها تساوي :

$$Q_\gamma = E_\gamma + T_D \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_\gamma = 931.5(M_o^* - M_o) \dots\dots\dots(4)$$

وحيث ان :

$$P_\gamma = P_D \quad , T_D = \frac{P_D^2}{2M_o}$$

$$\therefore T_D = \frac{P_D^2}{2M_o} = \frac{P_\gamma^2 C^2}{2M_o C^2} = \frac{E_\gamma^2}{2M_o C^2} \dots\dots\dots (5) \quad \text{اذن}$$

ملاحظة / اعتبرنا هنا ان $E_\gamma = P_\gamma C$ لان الكتلة السكونية لفوتونات اشعة كما تساوي صفراً ، وبذلك نحصل على العلاقة الاتية :

$$E^2 = P^2 C^2 + m_\gamma^2 c^4 \rightarrow E = Pc$$

ملاحظة/ يمكن اهمال T_D من المعادلة (3) لصغر قيمتها وكما موضح في المثال الاتي:

نفرض ان $E_\gamma = 2\text{MeV}$ و $M_o = 50 \text{ amu}$ ، فانه يمكن حساب طاقة الارتداد للنواة T_D من العلاقة (5) وكالاتي :

$$T_D = \frac{E_\gamma^2}{2 \times 50 \times 931.5} = 43 \text{ e.v}$$

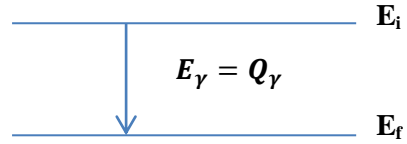
وهي كمية قليلة تهمل عادة للاغراض العملية وعند قيم طاقات كما الواطنة اما لقيم عالية لطاقة اشعة كما فيؤخذ الارتداد بنظر الاعتبار . لذلك ومن المعادلات (3) ، (4) نحصل على :

$$Q_\gamma = E_\gamma = 931.5(M_o^* - M_o) \dots\dots\dots(6)$$

وحيث ان $931.5 M_o^*$ تمثل طاقة المستوى الابتدائي E_i

$931.5 M_o$ تمثل طاقة المستوى النهائية E_f

$$\therefore Q_{\gamma} = E_{\gamma} = E_i - E_f$$



عزوم متعددة الاقطاب النووية Nuclear multipole moments :

تمتلك النواة بسبب شحنتها الموجبة وعدم كرويتها وترتيبها بكيفيات معينة عزوم كهربائية متعددة الاقطاب Electric multiple moments وتتوقف مرتبة العزم الكهربائي على قيمة الزخم الزاوي المداري L ، وتساوي 2^L (اي عدد الاقطاب) فاذا كان :

$$L=1 \rightarrow 2^L=2^1=2 \rightarrow 2 \text{ poles} \rightarrow \text{electric dipole moment (E1)}$$

$$L=2 \rightarrow 2^L=2^2=4 \rightarrow 4 \text{ poles} \rightarrow \text{electric quadrapole moment (E2)}$$

$$L=3 \rightarrow 2^L=2^3=8 \rightarrow 8 \text{ poles} \rightarrow \text{electric octapole moment (E3)}$$

وبسبب اهتزاز الشحنات تنبعث اشعة كهرومغناطيسية تسمى اشعة متعدد الاقطاب الكهربائية.

كما وقد يحدث ان تدور الشحنات في مسارات مغلقة loops ، وينتج عن ذلك عزوم متعددة الاقطاب المغناطيسية magnetic multiple moments وتتوقف مرتبة هذه العزوم أيضاً على قيمة L ، فاذا كان :

$$L=1 \rightarrow 2^L=2^1=2 \rightarrow 2 \text{ poles} \rightarrow \text{magnetic dipole moment =(M1)}$$

$$L=2 \rightarrow 2^L=2^2=4 \rightarrow 4 \text{ poles} \rightarrow \text{magnetic quadrapole moment =(M2)}$$

$$L=3 \rightarrow 2^L=2^3=8 \rightarrow 8 \text{ poles} \rightarrow \text{magnetic octapole moment =(M3)}$$

والاشعة الناتجة عن ذلك تسمى اشعة متعدد الاقطاب المغناطيسية .

ملاحظة مهمة: ان احتمالية انبعاث اشعة متعدد الاقطاب الكهربائية تكون اكبر من احتمالية انبعاث اشعة متعدد الاقطاب المغناطيسية ولنفس القيمة لـ (L) . اي ان :

$$E1 > M1 , E2 > M2 , E3 > M3$$

وأيضاً :

$$\text{شدة } E1 < \text{شدة } E2 < \text{شدة } E3 , \quad \text{شدة } M1 < \text{شدة } M2 < \text{شدة } M3$$

ملاحظة/ بالنسبة لاحتمالات كما (γ) يؤخذ بنظر الاعتبار فقط تلك الانتقالات التي لها قيم (L) واطئة .

قد يكون الانتقال مزيجاً من $E2 , M1$ او $E3 , M2$ اما في حالة $E1 , M2$ فان الانتقال يكون في الاغلب $E1$ مع نسبة صغيرة جداً من $M2$ وذلك لان :

$$E1 > E2$$

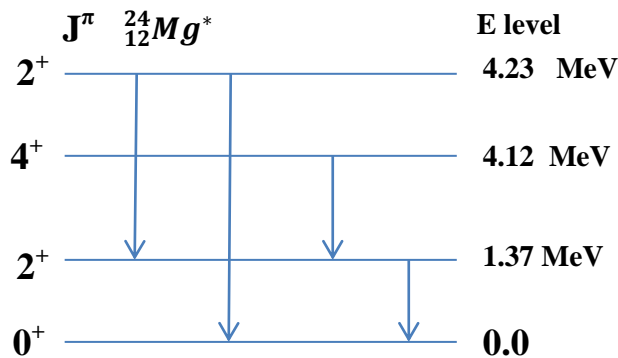
$$E2 > M2 \rightarrow E1 \gg M2$$

النواة المثيجة Excited nucleus ، ومستويات الطاقة energy level والحالات المثيجة excited states :
نفرض ان A_ZX نواة في المستوى الارضي ground state

${}^A_ZX^*$ نواة مثيجة (اي انها نواة في مستوى طاقة أعلى من المستوى الارضي) .

ان مستويات الطاقة لنواة معينة هي الحالات المثيجة للنواة (ولكل نواة مستويات طاقة خاصة بها) ولكل مستوى من مستويات الطاقة له طاقة معينة وزخم زاوي معين J ،

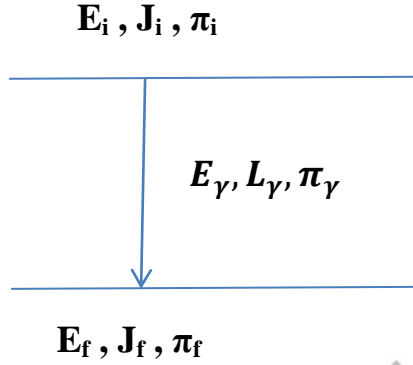
وتمثل محدد π ، والشكل ادناه يوضح بعض مستويات الطاقة للنواة (${}^{24}_{12}Mg$) .



قواعد الانتقاء (الاختيار) لانبعاث اشعة كاما γ - decay selection rules :

هي الشروط الواجب تحققها لكي تنبعث اشعة كاما وهي تشمل :

١- قانون حفظ الطاقة :



لانبعاث اشعة كاما يجب ان تنتقل النواة من مستوى عالي الطاقة الى مستوى واطى الطاقة ، وطاقة اشعة كاما E_γ تساوي تقريبا الفرق بين طاقتي المستويين لان الطاقة الحركية للنواة البنت قليلة وتهمل عادة مقارنة بـ (E_γ) .

$$Q_\gamma = E_i - E_f = 931.5(M^* - M) = E_\gamma + T_M = E_\gamma$$

٢- قانون حفظ الزخم الزاوي :

إذا كان الزخم الزاوي للنواة الام هو J_i ، وللنواة البنت هو J_f والزخم الزاوي المداري للفوتون L_γ ، فان :

$$\vec{J}_i = \vec{J}_f + \vec{L}_\gamma$$

حيث ان L_γ تأخذ القيم :

$$|J_i - J_f| \leq L_\gamma \leq J_i + J_f$$

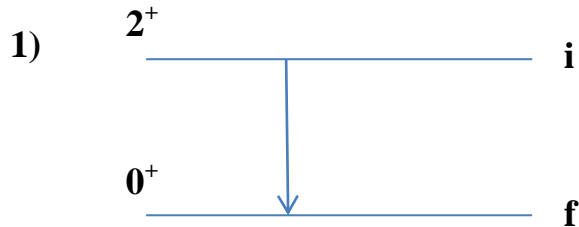
٣- قانون حفظ التماثل (parity):

1) $\pi_i \cdot \pi_f = (-1)^L$ for electric radiation (EL)

2) $\pi_i \cdot \pi_f = (-1)^{L+1}$ for magnetic radiation (ML)

امثلة /

مثال ١ / حدد الانتقالات الاكثر احتمالا لانبعث اشعة كما لانبعثات الاتية :



الحل /

$$J_i=2, \pi_i=+$$

$$J_f=0, \pi_f=+$$

$$|2-0| \leq L_\gamma \leq (2+0) \rightarrow L_\gamma=2$$

$$\pi_\gamma = \pi_i + \pi_f = (-1)^L$$

$$= +. + = (-1)^L \rightarrow L=2 \rightarrow \text{E2 transition}$$

2)

$$J_i=2, \pi_i=+$$

$$J_f=2, \pi_f=+$$

$$|J_i - J_f| \leq L \leq (J_i + J_f) \rightarrow |2-2| \leq L \leq (2+2) \rightarrow L = 0, 1, 2, 3, 4$$

$$\pi_\gamma = \pi_i + \pi_f = (-1)^L \rightarrow L=2,4 \text{ بالنسبة للاشعاع الكهربائي}$$

$$\text{E2, E4} \rightarrow \text{E2}$$

$$\pi_\gamma = \pi_i + \pi_f = (-1)^{L+1} \rightarrow L=1,3 \text{ بالنسبة للاشعاع المغناطيسي}$$

$$\text{M1, M3} \rightarrow \text{M1}$$

اذن الانتقال هو مزيج من E2+M1

التحول الداخلي Internal Conversion :

كما اوضحنا سابقا فان النواة المثارة تفقد طاقتها ببعث اشعة كاما ، لكن في بعض الحالات يكون فقدان هذه الطاقة بطريقة غير انبعاث اشعة كاما ، ولكن باعطاء جزء من هذه الطاقة الى احد الالكترونات في المدار الذري الخارجي (K مثلا او L أو M) ، ليسبب بعدها انبعاث الالكترون من مداره وتتحول النواة نفسها الى مستوى طاقة ادنى ويسمى الالكترون المقذوف بالكترون التحول (Conversion electron) كما وتسمى العملية بالتحول الداخلي Internal conversion وتحسب الطاقة الحركية للالكترون المتحرر من المعادلة التالية :

$$T_e = E_\gamma - B_e = E_i - E_f - B_e$$

حيث E_γ : طاقة اشعة كاما الخارجة من النواة

B_e : طاقة ترابط الالكترونات

ان انطلاق هذه الالكترونات يترك فراغا في المدار الذي كان فيه ، فاذا انطلق الالكترون من المدار k مثلا ، فهناك الكترون من المدار L سوف يهبط الى المدار K ليملا الفراغ مؤديا لانبعاث اشعة سينية طاقتها تساوي الفرق بين طاقتي الالكترون في المدار L , K

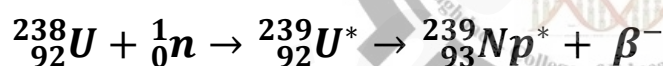
المتسلسلات النشطة اشعاعياً :

وهي نوى ثقيلة تنحل الى نوى وليدة هي بدورها نوى مشعة تنحل الى نوى اخرى نشطة اشعاعيا ، حيث تستمر هذه العملية لعدة اجيال حتى تستقر في النهاية الى نواة مستقرة ، حيث تنحل هذه النوى بانبعاث جسيمات ألفا وبيتا وكاما ، ففي انحلال الفا يتغير A بربع وحدات ويتغير Z بوحدين ، وفي انحلال بيتا لا يتغير A على الاطلاق اما Z فيتغير بزيادة او نقصان وحدة واحدة حسب نوع الانحلال لبيتا. اما انحلال كاما فلا يتغير A, Z.

ان جميع العناصر المشعة الثقيلة يمكن ان تتوزع على اربع سلاسل انحلال مستقلة بعضها عن بعض وتكون ذات اعداد كتلية هي $4n+3$, $4n+2$, $4n+1$, $4n$ ، حيث n عدد صحيح ويبين الجدول ادناه بعض مميزات سلاسل انحلال العناصر الثقيلة .

السلسلة	رمزها	العنصر الاطول عمرا	عمر النص (سنة)	النواة النهائية (المستقرة)
الثوريوم	$4n$	$^{232}_{90}Th$	$14.1 \times 10^9 Y$	الرصاص $^{208}_{82}Pb$
البنطونيوم	$4n+1$	$^{239}_{93}Np$	$2.14 \times 10^6 Y$	البزموت $^{209}_{83}Bi$
اليورانيوم	$4n+2$	$^{238}_{92}U$	$4.47 \times 10^9 Y$	الرصاص $^{206}_{82}Pb$
الاكتينيوم	$4n+3$	$^{235}_{92}U$	$7.04 \times 10^8 Y$	الرصاص $^{207}_{82}Pb$

ملاحظة/ ان سلسلة النيتونيوم $(4n+1)$ لا يمكن ان تكون موجودة في الطبيعة ، وذلك لان العمر النصفى للعنصر الاطول عمرا فيها هو فقط 2.14×10^6 سنة . ومن الممكن انتاج هذه السلسلة صناعيا بتشعيع $^{238}_{92}U$ بواسطة النيوترونات البطيئة حسب التفاعل الاتي :



الفصل الرابع

تفاعل الاشعة النووية مع المادة

Interaction of nuclear radiation with matter

ان دراسة تفاعل الاشعة النووية مع المادة تكون ضرورية لمعرفة قياسات الاشعاع المؤين ، لان كشف الاشعاع المؤين مبني على اساس تفاعله ومقدار الطاقة المفقودة داخل المادة التي يتفاعل معها ، كما ان بناء الكواشف النووية وتفسير نتائج القياسات وكذلك حسابات التدريع للمواد تتطلب المعرفة والالمام بكيفية تفاعل الاشعة النووية مع المادة .

ان الاشعة النووية بانواعها تتميز بصفتين اساسيتين هما الكتلة والشحنة وبذلك يقسم الاشعاع النووي الى نوعين رئيسيين :

اولا: الجسيمات المشحونة وتتضمن :

١- الجسيمات الثقيلة مثل (جسيم الفا ، البروتونات ، الديوترونات) .

٢- الجسيمات الخفيفة مثل (الالكترونات) .

ثانيا : الجسيمات غير المشحونة وتتضمن :

١- النيوترونات .

٢- الاشعة الكهرومغناطيسية (كاما والاشعة السينية) .

١- تفاعل الجسيمات المشحونة الثقيلة :

عند مرور جسيمة مشحونة خلال وسط ما فانها تتفاعل بشكل رئيس مع الكترونات ذلك الوسط نتيجة لقوة كولوم التي تؤثر بين الجسيمة المشحونة والالكترونات ، وبسبب صغر

حجم النواة نسبة الى حجم الذرة فان احتمالية تصادم الجسيمة المشحونة مع الالكترونات هي اكبر بكثير من احتمالية التصادم مع النواة ولهذا فان الآلية المهيمنة على فقدان طاقة الجسيمات المشحونة هي الاستطارة الكولومية بواسطة الكترونات الذرات مما يؤدي الى تأيينها او اثارها .

وقبل مناقشة طريقة حساب فقدان الطاقة من قبل جسيمة مشحونة ، هناك بعض النقاط الاساسية التي تؤخذ بنظر الاعتبار عند دراسة الموضوع وهي :

١- قبل فقدان الجسيمة المشحونة لجميع طاقتها يمكن ان تقوم بعدة الاف من التصادمات الرأسية وغير الرأسية .

٢- تسير الجسيمة المشحونة الثقيلة بخط مستقيم تقريبا داخل المادة .

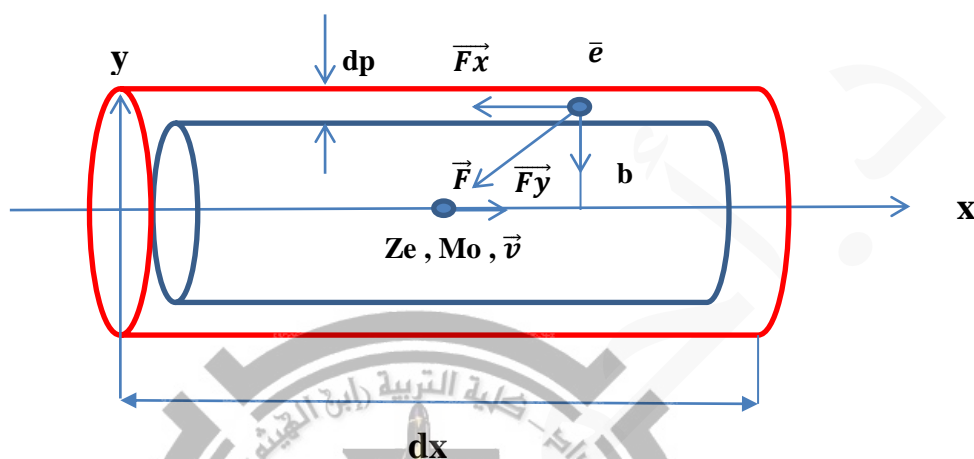
٣- بما ان لقوة كولوم مدى غير نهائي ، فان الجسيمة تتفاعل في الوقت نفسه مع عدد من الالكترونات وبهذا تفقد طاقتها بالتدرج ولكن يكون ذلك باستمرار على طول مسارها حتى تتوقف عن الحركة وتسمى المسافة المقطوعة بالمدى Range.

٤- الطاقة اللازمة لتأيين الذرة قليلة نسبيا، واذا لم يعطى الالكترون الطاقة الكافية للتأيين ، فان الذرة ستنقل الى مستوى الاثارة ، الذي تعود منه بسرعة الى المستوى الارضي . ان الالكترون المتحرر من عملية التأين يمكن ان يقوم أيضاً بتأيين ذرة اخرى وتسمى الالكترونات السريعة الناتجة من التصادمات المؤينة باشعة دلتا Delta - Rays .

قدرة الايقاف Stopping Power :

تعرف قدرة المادة لايفاف الجسيمة المشحونة بانها الطاقة التي تفقدها الجسيمة لكل وحدة مسار في المادة .

ولاشتقاق معادلة قدرة الايقاف للجسيم المشحون داخل المادة نفرض ان الجسيمة المشحونة الثقيلة تقترب من الالكترون في مسار على شكل خط مستقيم وعلى بعد b ، وان الالكترون حر ، كما في الشكل ادناه :



ان مقدار فقدان الطاقة من قبل الجسيمة المشحونة يساوي مقدار ربح الطاقة من قبل الالكترون ، ومن الممكن حساب هذا الربح وحسب الاتي : ان قوة كولوم \vec{F} التي تؤثر فيها الجسيمة المشحونة على الالكترون يمكن تحليلها الى مركبة أفقية \vec{F}_x ومركبة شاقولية \vec{F}_y حيث $\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$. ان المركبة الافقية لا تعمل على اخراج الالكترون من قشرته ، في حين ان المركبة الشاقولية هي التي تعمل على اخراج الالكترون من قشرته وتكسبه زخما مقداره P_e وعلى هذا فان :

$$\int F_x dt \approx 0 = P_x \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\int F_y dt = P_e \quad \dots\dots\dots(2)$$

ان من الممكن حساب الزخم المكتسب من قبل الالكترون بتطبيق قانون كاوس Gauss law وكالاتي :

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

حيث E : تمثل شدة المجال الكهربائي عند السطح الذي يحيط بالفراغ الذي تقع داخله الشحنة q

ds : عنصر المساحة للسطح المحيط بالشحنة الكهربائية .

وعلى ضوء الشكل السابق فان تفاعل الجسيمة المشحونة مع الالكترونات سيكون على شكل اسطوانة نصف قطرها يساوي (b) وان ارتفاعها الجانبي سيكون مساويا لمسافة dx ، وعلى هذا فان $ds=2\pi bdx$ وحيث ان $E = \frac{F_y}{e}$ ، وان $q=Ze$ فان :

$$\int E \cdot ds = \int \frac{F_y}{e} \times 2\pi bdx = \frac{Ze}{\epsilon_0}$$

وحيث ان $dx = Vdt$ وهي المسافة التي يسيرها الجسيم الثقيل خلال فترة زمنية dt ، فان :

$$\int F_y dt = \frac{Ze^2}{2\pi b\epsilon_0 V} = P_e \dots\dots\dots (3)$$

ان الطاقة الحركية التي فقدها الجسيم الثقيل واكتسبها الالكترون تساوي :

$$T = \frac{P_e^2}{2m_e} = \frac{Z^2 e^4}{8\pi^2 b^2 m_e \epsilon_0^2 V^2} \dots\dots\dots (4)$$

فاذا فرضنا ان (n) هو عدد الذرات في وحدة الحجم ، وان Z هو عدد الالكترونات الموجودة في كل ذرة ، فان nZ سيمثل عدد الالكترونات في وحدة الحجم ، وعلى هذا فان عدد الالكترونات الكلي الموجود في اسطوانة مساحة قاعدتها $2\pi bdb$ وعلى مسار طوله dx هي :

$$nZ \cdot 2\pi bdb \cdot dx$$

وبما ان كل الكترون سيكتسب طاقة مقدارها T ، حسب المعادلة (4) ، فهذا يعني ان الجسيمة المشحونة ستفقد طاقة كلية في وحدة المسافة مساوية الى :

$$-\frac{dE}{dx} = \int_{b_{min}}^{b_{max}} nZ \cdot 2\pi b \cdot \frac{z^2 e^4}{8m_e(\pi b V \epsilon_0)^2} db$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Z n}{4m_e \pi V^2 \epsilon_0^2} \cdot \text{Ln} \frac{b_{max}}{b_{min}} \dots\dots\dots (5)$$

والان يجب تحديد قيم b_{min} ، b_{max} . ان زمن التصادم Δt يجب ان لا يكون اطول من مدة دوران الالكترون في مداره اثناء انتقال الطاقة الى الالكترون فان :

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{v} \approx \frac{b_{max}}{V} \rightarrow b_{max} = \frac{V}{v} \dots\dots\dots (6)$$

اما b_{min} فتحدد من مبدأ انعدام الدقة لان الالكترون لا يجب ان يوجد بالنسبة للجسيمة الثقيلة على مسافة اقل من طول موجة دي برولي الخاصة به .

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{\hbar}{2}$$

$$\therefore b_{min} = \frac{\hbar}{2p} = \frac{\hbar}{2m_e v} \dots\dots\dots (7)$$

لذلك فان المعادلة (5) تصبح :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Z n}{4m_e \pi V^2 \epsilon_0^2} \cdot \text{Ln} \frac{2m_e V^2}{\hbar v} \dots\dots\dots (8)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Z n}{4m_e \pi V^2 \epsilon_0^2} \cdot \text{Ln} \frac{2m_e V^2}{I_{av}} \dots\dots\dots (9)$$

حيث $\hbar v$ يمثل معدل جهد التهيج او التاين I_{ave} للذرات في المادة .

نلاحظ من المعادلة (9) ان قدرة الايقاف :-

١- لا تعتمد على كتلة الجسيم المشحون .

٢- تتناسب مع z^2 للجسيم المشحون .

٣- تعتمد على سرعة الجسيم المشحون .

٤- تتناسب مع كثافة المادة التي تسير خلالها الجسيمة المشحونة.

ان المعادلة (9) تستخدم عندما تكون سرعة الجسيمة المشحونة الثقيلة غير نسبية ، وعندما تسير الجسيمات بسرعات نسبية يجب ادخال التصحيحات المتعلقة بالسرعة النسبية.

ملاحظة : إذا كان هناك جسيمان مشحونان لهما الاعداد الذرية z_1 , z_2 ويسيران بنفس السرعة v وبنفس المادة ، فان :-

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_1}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_2} = \frac{z_1^2}{z_2^2} \dots\dots\dots (10)$$

فاذا رمزنا لقدرة الايقاف لجسيم α بـ SP_α ولبروتون SP_p فان :

$$\frac{SP_\alpha}{SP_p} = \frac{(2)^2}{(1)^2} = 4 \rightarrow Sp_\alpha = 4SP_p$$

*ان حساب الفقدان في الطاقة عمليا يتم بواسطة قياس عدد الازواج الايونية المتولدة خلال مسار الجسيم ، فاذا كان مقدار الطاقة التي يفقدها الجسيم عند توليد زوج أيوني واحد تساوي (w) ، فان عدد الازواج الايونية لكل وحدة طول من مسار الجسيمة يعطى بالعلاقة :

$$-\frac{dE}{dx} = w_i \dots\dots\dots (11)$$

حيث i عدد الازواج الايونية .

مثال/ احسب عدد الايونات الناتجة عن فقدان جسيمات ألفا جميع طاقتها التي تساوي 5.3 MeV في حجرة التآين المملوءة بالهواء ؟ وما مقدار الشحنة الكلية الناتجة للالكترونات ؟ مع العلم ان مقدار الطاقة التي يفقدها جسيم الفا لتوليد زوج ايوني في الهواء هو (35.2 ev) ؟

$$1) - \frac{dE}{dx} = w_i$$

/الحل

$$5.3 \times 10^6 = 35.2 \times i \rightarrow i = \frac{5.3 \times 10^6}{35.2} \cong 1.5 \times 10^5 \text{ ions}$$

$$2) Q_e = 1.5 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.4 \times 10^{-14} \text{ C الشحنة الكلية}$$

المدى : The Range

هو معدل المسافة المقطوعة من قبل الجسيمة المشحونة قبل فقدانها لجميع طاقتها الحركية (قبل ان تقف) ويمكن حسابه كالآتي :-

$$R = \int_0^R dx = \int_{T_0}^0 \frac{dx}{dt} \cdot dT = \int_{T_0}^0 \frac{dt}{\frac{dT}{dx}} = \int_0^{T_0} \frac{dT}{\left(\frac{-dT}{dx}\right)}$$

ان الطاقة التي يفقدها الجسيم المشحون (ألفا مثلا) في وحدة الطول من مساره تكون اكبر بالقرب من نهاية مداها وذلك لان حركتها تكون بطيئة بالقرب من النهاية وبذلك لديها الوقت الكافي للتفاعل مع الذرات التي تمر بقربها ، فاذا فرضنا ان :-

$$- \frac{dT_\alpha}{dx} \propto \frac{1}{V_\alpha}$$

$$\therefore - \frac{dT_\alpha}{dx} = \frac{K}{V_\alpha} \rightarrow R = \int_0^{T_0} \frac{dT}{\left(\frac{K}{V_\alpha}\right)}$$

$$\text{But } T_\alpha = \frac{1}{2} m V_\alpha^2 \rightarrow dT = m_\alpha V_\alpha dV_\alpha$$

$$\therefore R = \int_0^{V_{\alpha 0}} \frac{m_\alpha V_\alpha dV_\alpha}{\frac{k}{V_\alpha}} = \int_0^{V_{\alpha 0}} \frac{m_\alpha V_\alpha^2}{k} dV_\alpha$$

$$\therefore R = \frac{m_\alpha}{3k} V_{\alpha 0}^3$$

حيث $V_{\alpha 0}$ السرعة الابتدائية لجسيم ألفا.

$$\therefore R_\alpha = b_1 V_{\alpha 0}^3$$

مدى جسيم ألفا بدلالة سرعتها ويسمى بقانون كاير التجريبي

ولايجاد علاقة المدى بالطاقة الحركية :-

$$T_{\alpha_0} = \frac{1}{2} m_{\alpha} V_{\alpha_0}^2 \rightarrow V_{\alpha_0}^3 = \left(\frac{2T_{\alpha_0}}{m} \right)^{\frac{3}{2}}$$

نعوض عن $V_{\alpha_0}^3$ بقانون كايكر فنحصل على :-

$$R_{\alpha} = b_2 (T_{\alpha_0})^{\frac{3}{2}}$$

$$\therefore R_{\alpha} = 0.318 (T_{\alpha_0})^{\frac{3}{2}}$$

مدى جسيم ألفا بدلالة طاقتها الحركية

حيث R_{α} تقاس بـ cm

T_{α_0} تقاس بـ MeV

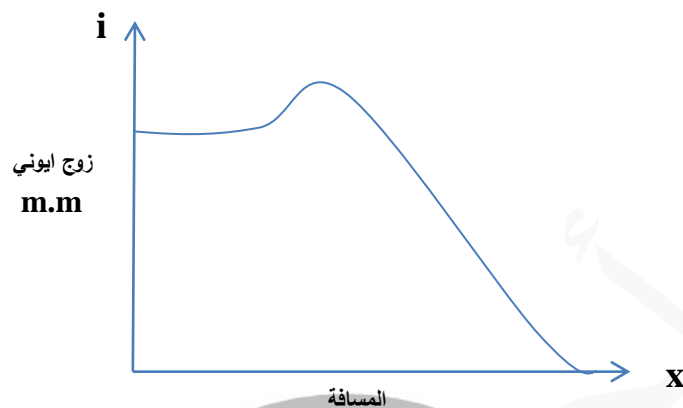
: Absorption of α -particles امتصاص جسيمات ألفا

تمتص جسيمات ألفا بسهولة من قبل المواد فجسيمات الفا المنبعثة من المصادر المشعة يمكن ان تمتص من قبل ورقة او صفيحة من الالمنيوم سمكها (4 mm) او بضع سنتمترات من الهواء .

ان الطريقة الرئيسية التي تفقد بواسطتها الجسيمات المشحونة شحنتها هي تفاعلها مع الكترولونات المادة عن طريق قوى كولوم مسببة التهيج والتأين لذرات المادة، لذلك تستطيع جسيمة ألفا انتاج ازواج ايونية بهذه العملية ، ويعبر عن شدة التأين الذي تسببه جسيمات ألفا بالتأين النوعي *Specific ionization* . ويعرف التأين النوعي بانه عدد ازواج الايونات لكل وحدة مسار . والشكل ادناه يمثل التأين النوعي كدالة للمسافة التي تقطعها الجسيمة داخل المادة.

ان ما تفقده الجسيمة من طاقة لكل وحدة مسار في بداية دخولها المادة يكون قليلا والتأين النوعي الذي تسببه يكون ثابت المقدار تقريبا ، بينما في نهاية المسار حيث تصبح سرعة الجسيمة قليلة ستزداد احتمالية التصادم فيزداد التأين النوعي عن قيمته

الثابتة ، لكنه سرعان ما ينخفض وبشكل سريع للصفر بعد فقدان جسيمة ألفا لكل طاقتها.



٢- تفاعل الجسيمات المشحونة الخفيفة (الالكترونات) مع المادة :-

ان فقدان الطاقة بالنسبة للالكترونات خلال مرورها بالمواد تسببها نفس العمليات التي تؤثر على الجسيمات الثقيلة ، كما ان معادلة فقدان الطاقة مطابقة للمعادلة (٩)، ولكن بما ان هناك اختلاف كبير في الكتل فان عددا من الفروق المهمة يمكن ملاحظتها وكما يلي:-

١-الالكترونات ، وخاصة تلك التي تنبعث من انحلال بيتا ، تسير بسرور عالية بسبب صغر كتلتها.

٢- عند التصادم مع الكترونات الذرات فان الالكترونات الساقطة تعاني من انحرافات كبيرة ولهذا فانها ستسير بمسار متعرج وليس بخط مستقيم كما هو الحال بالنسبة للجسيمات الثقيلة .

٣- في التصادم الرأسي بين احد الالكترونات والكترون اخر ، يتم انتقال جزء كبير من الطاقة الابتدائية الى الالكترون المقصوف .

٤- اثناء مرور الالكترون بالقرب من النوى داخل المادة يمكن ان يتعرض الى تعجيلات سريعة ومفاجئة مما يؤدي الى احداث تغيرات في اتجاهه وسرعته وبسبب ذلك يتوجب على الالكترون التخلص من الطاقة المكتسبة على شكل اشعاعات كهرومغناطيسية تسمى باشعة الكبح (*Bremsstrahlung*).

اشعة الكبح (*Bremsstrahlung*) :-

هي اشعة كهرومغناطيسية تنبعث عندما تمر جسيمة مشحونة بالقرب من نواة ذات شحنة كبيرة ، فتخضع لتعجيل كبير مما يؤدي الى تغيير سريع ومفاجئ في اتجاه وسرعة الجسيمة المشحونة ، وبما ان كل جسيمة مشحونة معجلة يجب ان تشع طاقة كهرومغناطيسية فان الجسيمات المشحونة تتخلص من طاقتها المكتسبة باعطاء موجات كهرومغناطيسية تسمى بأشعة الكبح .

تفاعل جسيمات بيتا مع المادة :-

عند سقوط حزمة من جسيمات بيتا على مادة ما فان عدد الجسيمات النافذة (N) سيتناقص أسياً مع سمك المادة (x) وفقاً للمعادلة :-

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

حيث N_0 يمثل العدد الاصلي لجسيمات بيتا

μ معامل الامتصاص

X سمك المادة

وتعرف قدرة المادة لايقاف جسيمات بيتا بانها الطاقة التي تفقدها جسيمة بيتا لكل وحدة طول من مسارها في المادة وتعطى بالعلاقة الاتية :-

$$\left(-\frac{dE_{\beta}}{dx}\right)_T = \left(-\frac{dE_{\beta}}{dx}\right)_C + \left(-\frac{dE_{\beta}}{dx}\right)_{rad}$$

$$\text{حيث } \left(-\frac{dE_{\beta}}{dx}\right)_C = \text{الطاقة المفقودة بواسطة الاستطارة الكولومية}$$

$$\left(-\frac{dE_{\beta}}{dx}\right)_{rad} = \text{الطاقة المفقودة بالإشعاع}$$

وتعتمد مساهمة كل حد على طاقة الجسيمة وعلى طبيعة المادة. ويصبح فقدان الطاقة بالإشعاع مهما كلما زادت طاقة بيتا (E_{β}) ، وكلما زاد العدد الذري للمادة .

اما بالنسبة لمدى جسيمات بيتا فليس هناك معادلة نظرية تربط بين المدى والطاقة انما هناك عدة معادلات تجريبية تعتمد على طاقة الجسيمات . فمثلا :

$$R_{\beta} \left(\frac{mg}{cm^2}\right) = 412 T_{\beta}^{(1.265-0.095 \ln T_{\beta})} \quad \text{for } T_{\beta} < 2.5 \text{ MeV}$$

$$R_{\beta} \left(\frac{mg}{cm^2}\right) = 530 T_{\beta} - 106 \quad \text{for } T_{\beta} > 2.5 \text{ MeV}$$

ملاحظة / ان مدى جسيمات بيتا في مادة ما يمثل معدل طول المسافة المستقيمة من نقطة دخولها في المادة الى نقطة توقفها وذلك لعشوائية تصادمها وعشوائية ما تفقده في كل تصادم ، اضافة لكون مسارها بشكل خط متعرج وذلك بسبب كتلتها القليلة ، فهي التي تستجيب فتتحرف عند تناورها مع الكترونات المادة او تجاذبها مع نوى المادة.

تفاعل النيوترونات مع المادة :-

ان النيوترون متعادل الشحنة لذا فهو لا يتفاعل مع الكثرونات الذرات ، اي انها لا تهيج ولا تؤين الذرات . فعليه فتفاعل النيوترونات مع المادة يكون مقتصرًا على تفاعلها مع نوى الذرات . ويمكن تقسيم تفاعلات النيوترون مع النواة الى قسمين رئيسيين :

١-الاستطارة (Scattering) حيث يتفاعل النيوترون مع النواة ويظهر كلا الجسمين

(النيوترون والنواة) بعد التفاعل ، ويمكن ان تكون الاستطارة مرنة او غير مرنة .

أ. الاستطارة المرنة (elastic scattering) : حيث تكون فيها الطاقة الحركية

وكذلك الزخم الخطي للجسمين المتصادمين محفوظة (Conserved).

ب. الاستطارة غير المرنة (Inelastic scattering): حيث لا يحفظ قانون الطاقة

الحركية وذلك لان جزءا من الطاقة الحركية يعطى الى النواة بشكل طاقة تهيج

، وبعد التصادم يمكن ان تنحل النواة المثيجة باعطاء اشعة كما مثلا.

ملاحظة / ان تفاعلات الاستطارة النيوترونية هي المسؤولة عادة عن تبثنة النيوترونات في المفاعلات النووية .

٢-الامتصاص (Absorption): وهنا يختفي النيوترون المتفاعل مع النواة نتيجة

امتصاصه من قبل النواة ، ويمكن ان يظهر واحد او اكثر من الجسيمات بعد ان

يتم التفاعل .

تفاعل اشعة كما مع المادة :-

ان اشعة كما هي الاسم الذي يطلق عادة على الاشعاع الكهرومغناطيسي الذي يكون

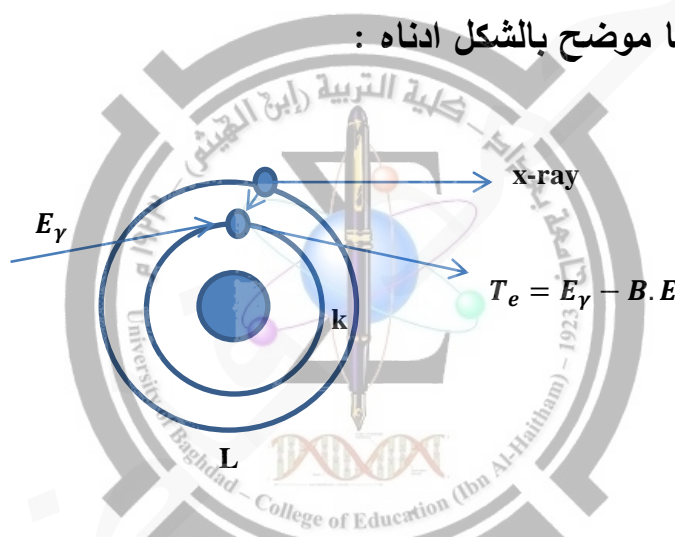
اصله من النواة. ان هذا الاشعاع عادة هو ذات طول موجي اقل من (10^5 F) او بمعنى

اخر تكون طاقة فوتوناته اكبر من (0.1 MeV).

وعلى الرغم من تعدد آليات تفاعل فوتون اشعة كاما مع المادة ، فإن الآليات الرئيسية الثلاث التي تستقطب الاهتمام تتمثل بالظاهرة الكهروضوئية واستطارة كومبتون ونتاج الزوج وذلك بسبب احتمالية حدوثها العالية مقارنة بالتفاعلات الأخرى للفوتونات . وفيما يأتي شرح مختصر لاساسيات هذه العمليات الثلاث :-

١-التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect):-

في هذه الظاهرة تمتص طاقة الفوتون (اشعة كاما) الساقط كلياً من قبل الكترن مرتبط بالمدارات الداخلية للذرة ، وبهذا سوف يختفي الفوتون وينفصل الكترن عن الذرة تاركاً ايها ايوناً موجباً وكما موضح بالشكل ادناه :



ان الطاقة الحركية التي سينطلق بها الكترن المتحرر هي :-

$$T_e = E_\gamma - B.E$$

حيث T_e = الطاقة الحركية للكترن المتحرر

$$E_\gamma = \text{طاقة الفوتون الساقط}$$

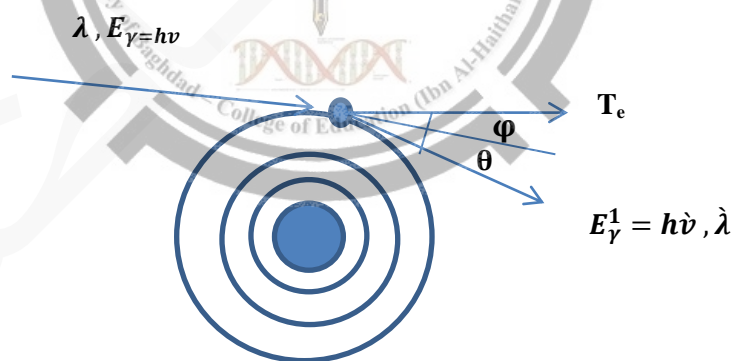
$B.E$ = طاقة ارتباط الكترن بالذرة وتسمى أيضاً بدالة الشغل

وعادة تخلق فجوة في القشرة الذرية (k) نتيجة لذلك . ان الكترونات من القشرة الاعلى ستشغل هذه الفجوة باعثة اشعة سينية مميزة ، وان هذه الاشعة السينية بدورها يمكن ان

تمتص من الالكترونات الخارجية وتسمى الالكترونات المزاحة نتيجة لذلك ، اي عن طريق امتصاصها الاشعة السينية بالكترونات أوكر Auger Electrons .
ان احتمالية التفاعل بهذه الظاهرة تتناسب عكسيا مع طاقة الفوتون الساقط وطرديا مع العدد الذري للمادة الماصة حيث ان هذه الظاهرة تسود ضمن طاقات الفوتون الواطنة وللمواد ذي الاعداد الذرية الكبيرة. (التناسب يكون مع Zn حيث $n=3-5$).

٢- استطارة كومبتون Compton scattering :-

وهي استطارة تحدث بين الفوتون الساقط والكترونات المدارات الخارجية للذرات اذ تكون تلك الالكترونات ضعيفة الارتباط بالنواة مما يسبب فقدان جزء من طاقة الفوتون حيث تعطى الى الالكترون مسببا انبعائه خارج حيز الذرة بزاوية ϕ وبطاقة حركية T_e ، حيث يحافظ فيه كل من الفتون المستطار بزاوية θ والالكترون المتحرر على قانون حفظ الطاقة والزخم وكما موضح بالشكل ادناه :-



وان الطاقة الحركية للالكترون المتحرر توضح بالعلاقة الاتية :

$$T_e = hv - h\nu^1 = E_\gamma - E_\gamma^1 \dots\dots\dots(1)$$

ولايجاد العلاقة بين الطول الموجي للفوتون الساقط والمستطار نتبع ما يلي.

بتطبيق قانون حفظ الزخم وكالاتي :

$$P_\gamma = \dot{P}_\gamma \cos \theta + P_e \cos \phi$$

$$\therefore P_e^2 \cos^2 \phi = (P_\gamma - \dot{P}_\gamma \cos \theta)^2 \dots\dots\dots (2)$$

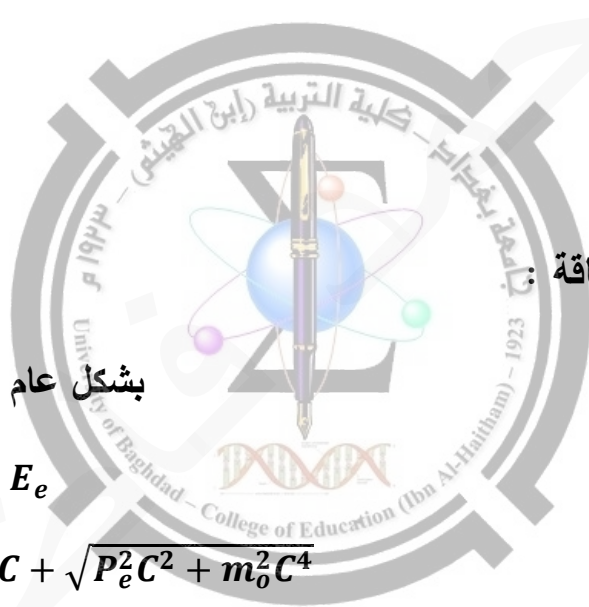
$$0 = \dot{P}_\gamma \sin \theta - P_e \sin \phi$$

$$\therefore P_e^2 \sin^2 \phi = \dot{P}_\gamma^2 \sin^2 \theta \dots\dots\dots (3)$$

بجمع (2) ، (3) ينتج :

$$P_e^2 = P_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta + \dot{P}_\gamma^2 \cos^2 \theta + \dot{P}_\gamma^2 \sin^2 \theta$$

$$\therefore P_e^2 = P_\gamma^2 + \dot{P}_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta \dots\dots\dots (4)$$



بتطبيق قانون حفظ الطاقة :

$$E^2 = P^2 C^2 + m_0^2 C^4 \quad \text{بشكل عام}$$

$$\therefore E_\gamma + E_{e_0} = \dot{E}_\gamma + E_e$$

$$P_\gamma C + m_0 C^2 = \dot{P}_\gamma C + \sqrt{P_e^2 C^2 + m_0^2 C^4}$$

$$\sqrt{P_e^2 C^2 + m_0^2 C^4} = P_\gamma C - \dot{P}_\gamma C + m_0 C^2 = C(P_\gamma - \dot{P}_\gamma) + m_0 C^2$$

$$P_e^2 C^2 + m_0^2 C^4 = C^2 (P_\gamma - \dot{P}_\gamma)^2 + 2m_0 C^3 (P_\gamma - \dot{P}_\gamma) + m_0^2 C^4$$

$$\therefore P_e^2 = P_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma + \dot{P}_\gamma^2 + 2m_0 C (P_\gamma - \dot{P}_\gamma) = P_\gamma^2 + \dot{P}_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta$$

$$m_0 C (P_\gamma - \dot{P}_\gamma) = P_\gamma \dot{P}_\gamma - P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta \quad (\div m_0 C)$$

$$P_\gamma - \dot{P}_\gamma = \frac{1}{m_0 C} P_\gamma \dot{P}_\gamma (1 - \cos \theta)$$

$$\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} = \frac{1}{m_0 C} \left(\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \right) (1 - \cos \theta).$$

$$\frac{h(\lambda-\lambda)}{\lambda\lambda} = \frac{h^2}{m_0c(\lambda\lambda)} (1 - \cos\theta)$$

$$\therefore \lambda - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \dots\dots\dots(5) \text{ حفظ}$$

اما لاشتقاق طاقة الفوتون المستطار بزواية θ فمن معادلة (5) لدينا :-

$$\frac{c}{\dot{v}} - \frac{c}{v} = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta) \quad \div ch$$

$$\frac{1}{h\dot{v}} - \frac{1}{hv} = \frac{1}{m_0c^2} \cdot (1 - \cos\theta)$$

$$\therefore \frac{1}{\dot{E}_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_0c^2} \cdot (1 - \cos\theta)$$

$$\frac{E_\gamma - \dot{E}_\gamma}{\dot{E}_\gamma E_\gamma} = \frac{1}{m_0c^2} \cdot (1 - \cos\theta)$$

ومنها نستنتج :

$$\dot{E}_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \dots\dots\dots(6) \text{ تحفظ}$$

وباستخدام المعادلتين (1) ، (6) يمكن استنتاج معادلة الطاقة الحركية للإلكترون المرتد:

$$T_e = E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \dots\dots\dots(7) \text{ تحفظ}$$

ملاحظة/ ان اقل طاقة للفوتون المستطار تحصل عندما تكون $(\theta = \pi)$ وهي تقابل اكبر طاقة للإلكترون المرتد ، حيث نحصل من معادلة (6) على علاقة اقل طاقة للفوتون:

$$\dot{E}_{\gamma \min} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{2E_\gamma}{m_0c^2}} = \frac{E_\gamma}{1 + 4E_\gamma} \dots\dots\dots(8) \text{ تحفظ قيمة الاستطارة الخلفية}$$

ومن معادلة (7) نحصل على علاقة اكبر طاقة للإلكترون المرتد :

$$T_{e_{max}} = E_{\gamma} - \frac{E}{1+4E_{\gamma}} = \frac{4E_{\gamma}^2}{1+4E_{\gamma}} \dots\dots\dots (9) \text{ تحفظ حافة كومبتن}$$

اما أعلى طاقة للفوتون المستطار فتحصل عند $\theta=0^{\circ}$ اي ان :

$$\vec{E}_{\gamma_{max}} = E_{\gamma}$$

$$T_{e_{min}} = 0$$

ان احتمالية التفاعل بهذه الظاهرة تتناسب مع العدد الذري Z ، حيث تسود هذه الظاهرة ضمن طاقات الفوتون المتوسطة وللمواد ذي الاعداد الذرية القليلة .

٣- انتاج الزوج (pair production):

يمكن للفوتون ان يتحول الى مادة على شكل زوج الكترون - بوزترون . ان مثل هذا التفاعل يحدث بجوار المجال الكولومي للنواة وذلك لكي يكون الزخم الخطي محفوظا بمساعدة النواة التي تأخذ جزءا من زخم الفوتون في عملية التحويل . ان الطاقة السكونية m_0c^2 لكل من الالكترون والبوزترون تساوي 0.511 MeV ، لذلك فان انتاج زوج الكترون - بوزترون يتطلب في الاقل فوتونا طاقته تساوي $2 \times 0.511 = 1.022 \text{ MeV}$. واي زيادة في طاقة الفوتون عن هذا المقدار تظهر بشكل طاقة حركية للالكترون والبوزترون حيث :-

$$T_{\bar{e}} + T_{e^+} = E_{\gamma} - 1.022 \text{ MeV}$$

ان احتمالية التفاعل بهذه الظاهرة تتناسب مع مربع العدد الذري Z^2 ، حيث تسود هذه الظاهرة ضمن طاقات الفوتون العالية وللمواد ذي الاعداد الذرية الكبيرة .

ويمكن لمعكوس هذه الظاهرة ان يحدث أيضاً ، فعند اتحاد الكترون وبوزوترون تخرج اشعة كاما في عملية معاكسة لعملية انتاج الزوج والتي تسمى بعملية الفناء (annihilation process) ، حيث ان البوزوترون هو جسيمة مشحونة بشحنة موجبة

وكتلتها بقدر كتلة الالكترون فهو يفقد طاقته عن طريق التأين وكذلك عن طريق اشعة الكبح ، وبعد ان يقوم البوزترون بالعديد من التصادمات مع الكترونات الذرات تصبح طاقته قليلة جدا وقريبة من الصفر ، عندها يتحد مع الالكترونات التي تكون عمليا ساكنة أيضاً حيث يختفي البوزترون والالكترون ويخرج بدلا منهما فوتونان باتجاهين متعاكسين ($\theta=180^\circ$) وذلك لتحقيق قانون حفظ الزخم الخطي ، وكل فوتون يملك طاقة مقدارها 0.511 MeV، اي بقدر طاقة سكون البوزوترون او الالكترون .

توهين اشعة كاما (Attenuation of gamma rays):

ان عملية توهين حزمة من اشعة كاما خلال مرورها في وسط معترض تختلف اختلافا جوهريا عما يجري بالنسبة لحزمة من الجسيمات الثقيلة المشحونة ، فاذا مرت اشعة كاما خلال المادة فان كل فوتون في الاشعة سوف يكون امامه اما الا يتفاعل على الاطلاق او انه سوف يتم حذفه كليا من الحزمة بواسطة الامتصاص او الاستطارة وهذا يؤدي الى توهين (تضعيف) اسي بزيادة سمك الوسط الممتص.

لو فرضنا ان كمية من الاشعة مقدارها I_0 لكل وحدة زمن قد سقطت على وسط بصورة عمودية ، فعلى فرض ان سمك الوسط هو (x) ، فان نقصان الشدة بمقدار dI بسبب نفوذها مسافة (dx) في المادة يتناسب تناسبا طرديا مع الشد I ومع السمك dx : (شكل رقم 1)

$$dI \propto I dx$$

$$dI = -\mu I dx \dots\dots\dots(1)$$

لقد ادخلت علامة السالب للدلالة على النقصان في الشدة (او النقصان بعدد الفوتونات).

μ : ثابت التناسب ويسمى معامل التوهين الخطي ويمكن تعريفه بانه النقصان النسبي

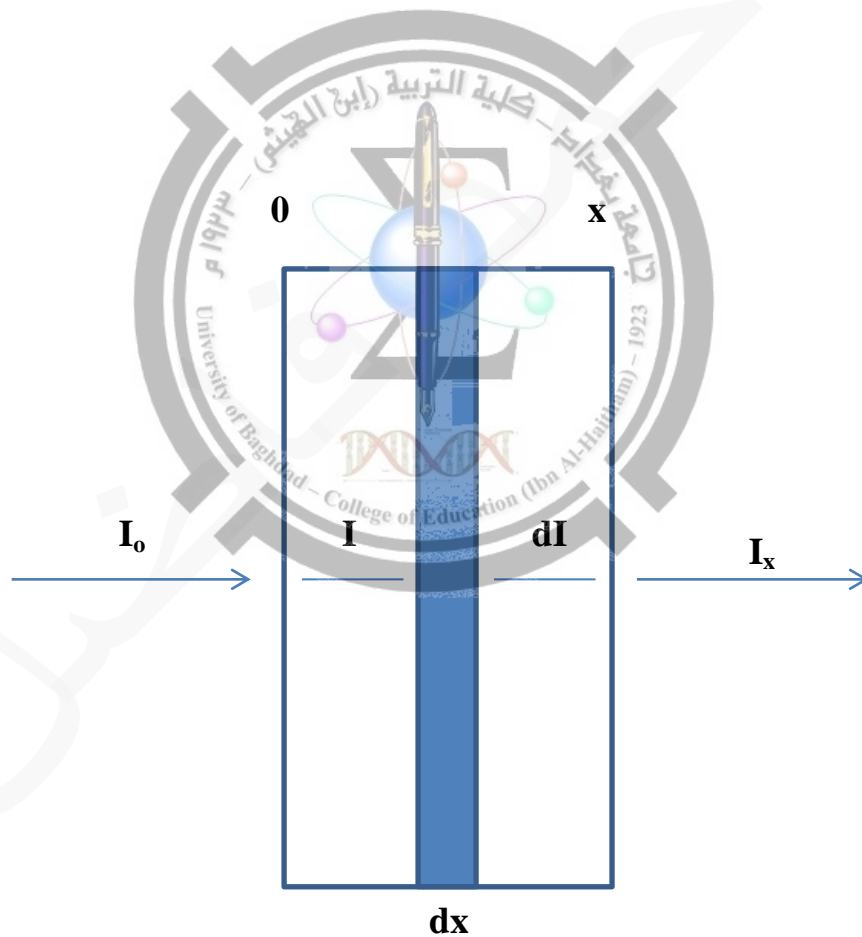
لعدد الفوتونات لكل وحدة مسافة . وحدة قياسه (1/cm)

وبتكامل المعادلة (1) وكالاتي :

$$\int_{I_0}^{I_x} \frac{dI}{I} = \int_0^x -\mu dx$$

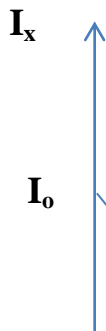
$$\ln \left(\frac{I_x}{I_0} \right) = -\mu x \rightarrow \frac{I_x}{I_0} = e^{-\mu x} \rightarrow I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

حيث I_x تمثل شدة الجزء غير المتأثر من الحزمة. (شكل رقم 2)



شكل (١) شدة الاشعة عند نقاط مختلفة في الوسط

شدة الفوتونات





ملاحظة / ان السمك اللازم لتوهين الحزمة الى نصف شدتها الاصلية يسمى بسمك نصف القيمة **half- value thickness** حيث نعوض في المعادلة اعلاه :

$$\frac{I_o}{2} = I_o e^{-\mu x_{1/2}} \rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\mu x_{1/2}$$

$$0-0.693 = -\mu x_{1/2} \rightarrow x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$$

وبما ان فوتونات اشعة كاما تتفاعل مع المادة باحدى ثلاث طرق والتي هي الظاهرة الكهروضوئية واستطارة كومبتن ونتاج الزوج فيمكن كتابة :

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_{pair}$$

حيث μ : معامل التوهين الخطي الكلي

μ_{ph} : معامل التوهين الخطي بفعل الظاهرة الكهروضوئية

μ_c : معامل التوهين الخطي بفعل استطارة كومبتن

μ_{pair} : معامل التوهين الخطي بفعل انتاج الزوج

وبالحقيقة ان قيم μ تتفاوت كثيرا من مادة الى اخرى ، كما ان μ تتناسب طرديا مع عدد الذرات في وحدة الحجم من المادة ، ولهذا فانه من المفيد ان تعرف ما يسمى بمعامل التوهين الكتلي **mass attenuation coefficient** ويرمز له بالرمز μ_m حيث :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{cm^2}{mg} \right)$$

حيث ρ تمثل كثافة الوسط .

ولغرض ابقاء معادلة التوهين صحيحة يجب ضرب السمك (x) بكثافة المادة

$$\therefore I_x = I_o e^{-\mu_m \rho x}$$

س١/ ما هو سمك الرصاص المطلوب لتخفيض شدة اشعة كاما المنبعثة من عنصر الثوريوم الى 0.01 من قيمتها الاصلية علما ان قيمة معامل التوهين الخطي $\mu = 0.45 \text{ cm}^{-1}$ ؟

الحل/

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

$$0.01 = e^{-\mu x} \rightarrow \ln(0.01) = -0.45 x$$

$$-4.605 = -0.45 x \rightarrow x = \frac{4.605}{0.45} = 10.23 \text{ cm}$$

س٢/ ما هو سمك الالمنيوم المطلوب لتخفيض اشعة كاما طاقتها 200 KeV الى (10%) من قيمتها الاصلية ؟ علما ان سمك نصف القيمة عند الطاقة 200keV في الالمنيوم هو (2.14 cm) ؟

$$\mu = \frac{0.693}{x_{1/2}} = \frac{0.693}{2.14} = 0.324 \text{ cm}^{-1}$$

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \rightarrow 0.1 I_0 = I_0 e^{-0.324 x}$$

$$\ln(0.1) = -0.324 x \rightarrow x = \frac{2.3}{0.324} = 7.1 \text{ cm}$$

الفصل الخامس

التفاعلات النووية Nuclear Reactions

التفاعل النووي : هو عملية يحدث فيها تغيير في تركيب النواة الهدف وطاقتها او في احدهما فقط او كليهما بعد قصف النواة الهدف بجسيمات مشحونة او غير مشحونة او اشعة كما . ويعبر عن التفاعل النووي بالمعادلة :



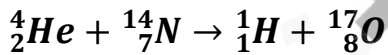
حيث a : تمثل الجسيم الساقط incident particle

x : النواة الهدف target nucleus

y : النواة الناتجة product nucleus

b : الجسيم الخارج outgoing particle

ملاحظة / ان اول تفاعل نووي اجري مختبريا ذلك الذي اعلنه رذرفورد عام ١٩١١ :



نظرية التفاعل والنواة المركبة :-

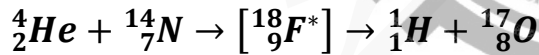
حسب آلية التفاعل فانه يمكن تقسيم تفاعلات التحول النووية الى تفاعلات مباشرة وتفاعلات النواة المركبة . ان آلية التفاعلات المباشرة تختلف تماما عن آلية النواة المركبة ، فالتفاعلات المباشرة هي عمليات آنية سريعة جدا تحدث بزمن بحدود 10^{-22} sec ، في حين تستغرق النواة المركبة فترة زمنية اطول من ذلك بكثير 10^{-16} - 10^{-8} sec . كما ان التفاعلات المباشرة تحدث بدرجة كبيرة عند سطح النواة الهدف بمشاركة نيوكليون واحد او عدد قليل من النيوكليونات المكافئة الواقعة قرب سطح النواة الهدف ، في حين

تبقى النيوكليونات الاخرى في الهدف بدون مشاركة ويخرج نتيجة لذلك نيوكليون منفرد من احد المستويات مما يؤدي الى تفكيك التركيب القشري للنوى ، وكلما زادت طاقة الجسيمات الساقطة (اكثر من 20 MeV) ازدادت احتمالية حدوث التفاعلات المباشرة . ويمكن ان تحدث التفاعلات المباشرة بعدة طرق مثل تفاعل الانتزاع ، وتفاعل الالتقاط وتفاعل الاخراج .

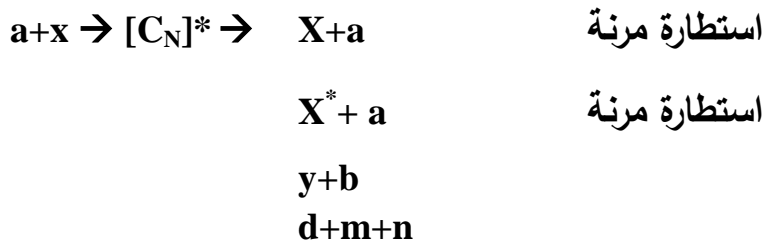
اما في آلية النواة المركبة فيندمج الجسيم الساقط مع النواة الهدف لفترة قصيرة وتتقاسم الطاقة فيما بينها بشكل كامل قبل ان يقذف نيوكليون او مجموعة نيوكليونات خارج النواة المركبة .

وإذا لم تكن الطاقة الحركية للجسيم الساقط عالية فانه يمكن تفسير حدوث التفاعل النووي على اساس انه يتم بمرحلتين :-

١- الجسيم الساقط ونواة الهدف يكونان نواة جديدة تسمى النواة المركبة compound nucleus . ان طاقة الجسيم الساقط توزع بين النيوكليونات في النواة المركبة والتي تكون بحالة متهيجة جدا ، فمثلا في حالة تفاعل جسيمات الفا مع نوى النيتروجين تكون النواة المركبة $[^{18}_9F^*]$ وعلامة النجمة تدل على حالة التهيج .

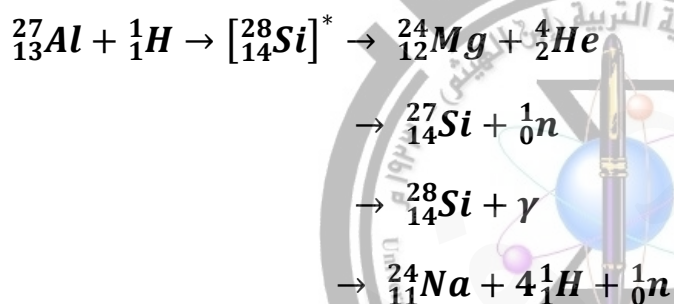


٢- تنحل النواة المركبة بطريقة او اكثر معتمدة على طاقة تهيجها الى جسيمة او عدة جسيمات خارجة ونواة متبقية ، ان كل طريقة للتحلل تدعى بنمط او قناة Channal وكالاتي :-



نلاحظ ان الجسيمتين الناتجتين من التصادم في الحالة الاولى والثانية من التفاعل اعلاه هما نفسهما الجسيمتان المتصادمتان فعليه يقال عن كل من هاتين القناتين استطارة ، وحيث ان النواة المتبقية في الحالة الاولى هي في الحالة الارضية وغير متهيجة لذا يقال عن الاستطارة بانها استطارة مرنة حيث تكون الطاقة الحركية محفوظة في هكذا استطارة . اما في التفاعل الثاني او القناة الثانية وحيث ان النواة المتبقية قد تركت متهيجة فيقال عن الاستطارة بانها غير مرنة .

وقد تكون نواتج التفاعل عبارة عن نواة متبقية يصاحبها انبعاث فوتون واحد او اكثر من اشعة كاما وكمثال على الحالات المذكورة نأخذ التفاعل الاتي:-

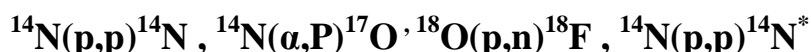


اصناف التفاعلات النووية :-

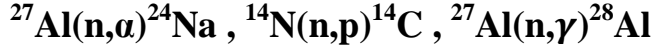
يمكن تصنيف التفاعلات النووية اعتمادا على طبيعة الجسيم الساقط وطاقة التصادم وطبيعة الهدف ونواتج التفاعل وكالاتي :-

اولا : طبيعة الجسيم الساقط : وتصنف الى :-

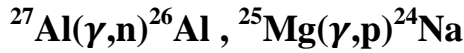
أ-تفاعلات الجسيمات المشحونة : حيث يتم التفاعل بقذف النواة الهدف بجسيمة مشحونة مثل البروتون P ، والديوترون $({}_1^2\text{H}^+)$ وجسيمة الفا ${}^4_2\text{He}^{++}$ ومن امثلة هذه التفاعلات هي :-



ب-تفاعلات النيوترون : تمتاز النيوترونات بكونها عديمة الشحنة لذا فقد امتازت النيوترونات بانها لا تعاني من التناثر الكولومي عند اقترابها من النواة مما يعني نفوذها في النواة اسهل من نفوذ الجسيمات المشحونة. ومن تفاعلات النيوترونات:-



ج-التفاعلات النووية الضوئية : (تفاعل اشعة كاما مع النواة) مثل :



ويمكن الحصول على طاقات عالية لاشعة كاما من التفاعلات النووية باستخدام المعجلات، ومن الامثلة على تفاعلات كاما ذلك الذي يتم به تجزئة الديوترون :



ثانيا : طاقة التصادم : اي الطاقة الحركية للقذيفة ، حيث تصنف التفاعلات النووية الى:

١-تفاعلات حرارية (thermal) $E=0.025 \text{ eV}$

٢-تفاعلات فوق الحرارية (Epithermal) $E=1 \text{ eV}$

٣-تفاعلات نيوترونات بطيئة (Slow- neutron) $E \sim 1 \text{ KeV}$

٤-تفاعلات نيوترونات سريعة (Fast- neutron) $E \sim 0.1 - 10 \text{ MeV}$

٥-تفاعلات الجسيمات المشحونة البطيئة (low-energy charged) $E \sim 0.1 - 10 \text{ MeV}$

٦-تفاعلات ذات طاقة عالية (high – energy reactions) $E > 10 \text{ MeV}$

ثالثا: الهدف target : تصنف النواة الهدف الى :

أ-نوى خفيفة إذا كان $A \leq 40$

ب-نوى متوسطة $40 < A < 150$

ج- نوى ثقيلة $A > 150$

رابعا : الجسيمات الناتجة (نواتج التفاعل) :-

$X(p,p) X$, elastic scattering

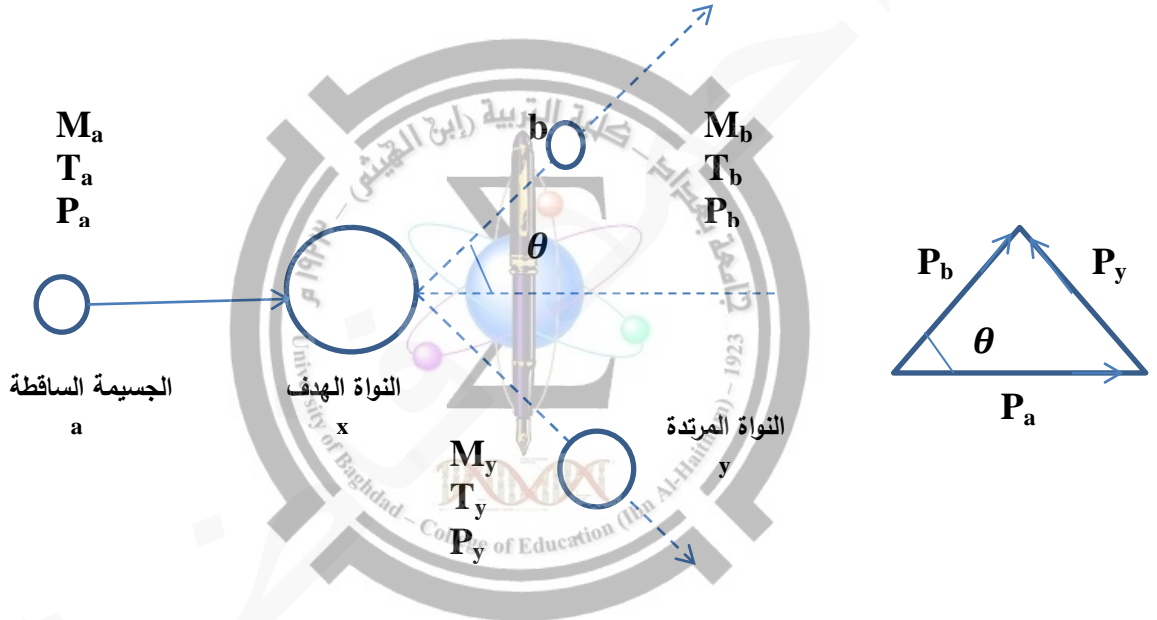
$X(p,p) X^*$, inelastic scattering

$^{14}N(p,\gamma) ^{15}O$, capture reaction

$^{235}_{92}U(n, ^{92}_{36}K + 3n) ^{141}_{56}Ba$ nuclear fission , spallation reaction

حساب الطاقة في التفاعلات النووية :-

الشكل ادناه يمثل تفاعلا نوويا اعتياديا



نلاحظ ان (a) تمثل الجسيمة الساقطة او الجسيمة المقذوفة ، وان P_a, T_a, M_a هي على التوالي الكتلة والطاقة الحركية والزخم للجسيمة الساقطة التي تتفاعل مع نواة الهدف (X) والتي تكون مستقرة تقريبا ($T_x=0$) وذات كتلة M_x ، وبعد التفاعل تنبعث الجسيمة (b) ، بكتلة M_b وبطاقة حركية T_b وبزخم P_b ، والنواة المرتدة بكتلة M_y وطاقة حركية T_y ، وباستخدام قانون حفظ الطاقة يكون لدينا :-

$$M_a C^2 + T_a + M_x C^2 + T_x = M_b C^2 + T_b + M_y C^2 + T_y \dots\dots (2)$$

ولكن $T_x=0$ فيكون لدينا :

$$(M_a + M_x)C^2 - (M_b + M_y) C^2 = T_b + T_y - T_a \dots\dots\dots(3)$$

ان طاقة التفاعل (Q) تعرف بانها الفرق بين الطاقات الحركية النهائية والابتدائية ولهذا فان:

$$Q = T_{\text{final}} - T_{\text{in}} = (T_b + T_y) - (T_a + T_x)$$

وحيث ان $T_x=0$ فان :

$$Q = T_b + T_y - T_a \dots\dots\dots(4)$$

وبالتعويض عن قيمة Q في المعادلة (3) نحصل على :

$$Q = (M_a + M_x)C^2 - (M_b + M_y) C^2 \dots\dots\dots(5)$$

تستخدم العلاقة (5) لحساب طاقة التفاعل إذا كانت كتل الجسيمات الداخلة والنتيجة في التفاعل معروفة بدقة عالية .
 وبتطبيق قانون حفظ الزخم نحصل على :-

$$P_a = P_b + P_y \dots\dots\dots(6)$$

وبتطبيق قانون الجيب تمام على المثلث في الشكل السابق :

$$P_y^2 = P_a^2 + P_b^2 - 2P_a P_b \cos\theta \dots\dots\dots(7)$$

وبما ان $P = \sqrt{2MT}$ ، $P^2 = 2MT$ وبالتعويض عن قيم الزخوم في معادلة (7) :

$$2M_y T_y = 2M_a T_a + 2M_b T_b - 4\sqrt{M_a T_a M_b T_b} \cos\theta$$

$$\therefore T_y = \frac{M_a}{M_y} T_a + \frac{M_b}{M_y} T_b - 2\frac{\sqrt{M_a T_a M_b T_b}}{M_y} \cos\theta \dots\dots\dots(8)$$

وبتعويض معادلة (8) في (4) نحصل على :-

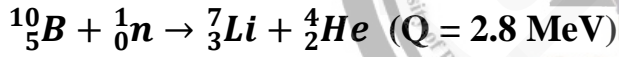
$$Q = \left(1 + \frac{M_b}{M_y}\right) T_b - \left(1 - \frac{M_a}{M_y}\right) T_a - 2\frac{\sqrt{M_a T_a M_b T_b}}{M_y} \cos\theta \dots\dots\dots(9)$$

ملاحظة / ان الكتل في المعادلة (9) يمكن التعويض عنها بالاعداد الكتلية .

ان قيمة (Q) في المعادلة (9) يمكن ان تكون موجبة او سالبة او تساوي صفراً ، وعلى هذا الاساس يمكن تقسيم التفاعلات النووية الى قسمين تفاعلات باعثة للطاقة وتفاعلات ماصة للطاقة وكالاتي:-

التفاعلات الباعثة للطاقة Exoergic reactions (Q>0):

تسمى التفاعلات النووية بالباعثة للطاقة عندما تكون طاقة التفاعل كمية موجبة $Q>0$ ، وهذا يعني ان الكتل الابتدائية اكبر من الكتل النهائية او ان الطاقات الحركية النهائية اكبر من الطاقات الحركية الابتدائية ، وهكذا فان تفاعلات من هذا النوع يمكن ان تحدث حتى عندما تكون طاقة الجسيمة الساقطة قريبة من الصفر ($T_a \approx 0$) ، ان ابرز نوع من هذه التفاعلات واهمها هي تفاعلات النيوترونات الحرارية (التي تكون طاقتها مساوية الى 0.025 eV تقريبا وذلك كما في التفاعل الاتي :



فاذا كانت طاقة الجسيمة الساقطة تساوي صفراً تقريبا $T_a \approx 0$ ، يمكن ايجاد T_b من المعادلة (9) بدلالة طاقة التفاعل Q وفق المعادلة الاتية :-

$$T_b = \frac{M_y}{M_y + M_b} Q \quad \dots\dots\dots (10)$$

من علاقة (10) نلاحظ ان الطاقة الحركية للجسيمات المنبعثة لا تعتمد على الزاوية θ وبهذا تكون T_b متساوية في جميع الاتجاهات .

التفاعلات الماصة للطاقة Endoergic reactions (Q<0):

تسمى التفاعلات ماصة للطاقة عندما تكون $Q<0$ ، فعندما تكون Q كمية سالبة وان $T_a=0$ فان طاقة الجسيمة المنبعثة في معادلة (9) تكون كمية سالبة ، وهذا يعني ان

تفاعلات من هذا النوع لا يمكن ان تحدث بطاقات $T_a=0$ ، اي تفاعلات ذات عتبة
 . Threshold reactions

طاقة العتبة (T_{th}) (Threshold Energy) :-

ان اقل قيمة لطاقة الجسيمة الساقطة $T_{a(min)}$ التي يمكن ان تحدث تفاعلا نوويا تسمى
 بطاقة العتبة (T_{th}) حيث :

$$T_{a(min)} = T_{threshold} = -Q \frac{M_y + M_b}{M_y + M_b - M_a} \dots\dots\dots(11)$$

ان العلاقة العامة التي تربط بين Q وكتل السكون هي :-

$$M_a + M_x = M_b + M_y + Q/C^2$$

وبما ان $M_x \gg Q/C^2$ فان :

$$M_y = M_a + M_x - M_b \dots\dots\dots(12)$$

نعوض (١٢) في (١١) فنحصل على طاقة العتبة :

$$T_{th} = -Q \frac{M_a + M_x}{M_x} \dots\dots\dots(13)$$

وبدلالة الاعداد الكتلية تصبح المعادلة (١٣)

$$T_{th} = -Q \left[\frac{A_a + A_x}{A_x} \right] = -Q \left[1 + \frac{A_a}{A_x} \right] \dots\dots\dots(14)$$

تفاعلات الاستطارة المرنة :-

بالنسبة الى الاستطارة المرنة ، حيث لا يكون هناك ربح او خسارة في الطاقة قبل
 الاستطارة وبعدها فان $(Q=0)$ وان $M_a=M_b$ ، $M_x=M_y$.

ملاحظة / ان التفاعلات النووية يجب ان تتحقق بها قوانين الحفظ وهي :

١- قانون حفظ الطاقة والكتلة .

٢- قانون حفظ الزخم الخطي .

٣- قانون حفظ الزخم الزاوي .

٤- قانون حفظ الشحنة الكهربائي (قانون حفظ العدد الذري) .

٥- قانون حفظ عدد النيوكلونات (قانون حفظ العدد الكتلي) .

مثال/ إذا كانت قيمة Q للتفاعل التالي $^{26}\text{Mg} (p, \alpha)^{22}\text{Na}$ هي (-0.7 MeV) ، احسب الزاوية التي تضعها جسيمات الفا الناتجة من التفاعل مع اتجاه البروتونات الساقطة علما ان الطاقة الحركية لجسيمات الفا هي (2 MeV) وان طاقة البروتونات الحركية هي (3 MeV) ؟

الحل /

$$Q = \left(1 + \frac{M_b}{M_y}\right) T_b - \left(1 - \frac{M_a}{M_x}\right) T_a - \frac{2}{M_y} \sqrt{M_a T_a M_b T_b} \cos \theta$$

$$-0.7 = \left(1 + \frac{4}{22}\right) * 2 - \left(1 - \frac{1}{22}\right) * 3 - \frac{2}{22} \sqrt{1 \times 3 \times 4 \times 2} \cos \theta$$

$$-0.7 = 2.363 - 2.863 - 0.445 \cos \theta$$

$$0.445 \cos \theta = 0.2 \rightarrow \cos \theta = \frac{0.2}{0.445} = 0.449$$

$$\theta \cong 1.1^\circ$$

ملاحظة / في حالة الاستطارة غير المرنة ، حيث ان النواة المقصوفة تنتقل الى مستوى اثاره (او تهيج) بعد التصادم نتيجة لاكتسابها جزءا من طاقة الجسيمة الساقطة ، لذا فان معادلة طاقة التفاعل يجب ان تضم طاقة مستوى الاثاره حيث ان :

$$Q_{ex} = 931.5 (M_a + M_x - M_y^* - M_b)$$

$$Q_0 = 931.5 (M_a + M_x - M_y - M_b)$$

$$Q_0 - Q_{ex} = 931.5 (M_y^* - M_y) = E_{ex}$$

$$E_n = Q_0 - Q_n$$

مثال / إذا كانت قيمة Q_0 للتفاعل ${}_{13}^{27}Al(p, \alpha){}_{12}^{24}Mg$ هي 1.594 MeV جد طاقة العتبة للتفاعل ${}_{12}^{24}Mg(\alpha, p){}_{13}^{27}Al$ عندما تكون نواة ${}_{13}^{27}Al$ متهيجة في مستوى طاقة 0.842 MeV ؟

الحل / عندما يعكس التفاعل فان قيمة طاقة التفاعل (Q_0) للتفاعل الاصلي سوف تكون سالبة.

$$Q_0 = -1.594 \text{ MeV} \text{ تكون } {}_{12}^{24}Mg(\alpha, p){}_{13}^{27}Al \text{ للتفاعل } Q_0 \text{ اذن قيمة}$$

$$Q_n = Q_0 - E_n \rightarrow Q_n = -1.594 - 0.842 = -2.436 \text{ MeV}$$

$$E_{th} = -Q_n \left[1 + \frac{A_a}{A_x} \right] = -(-2.436) * \frac{28}{24}$$

$$E_{th} = 2.842 \text{ MeV}$$

مثال / أ / في الاستطارة الكولومية لبروتونات بطاقة 7.5 MeV بواسطة هدف من 7_3Li ، ما هي طاقة البروتونات المستطارة استطارة مرنة بزاوية 90° ؟

ب/ احسب طاقة البروتونات المستطارة بزاوية 90° باستطارة غير مرنة عندما ترتفع نواة 7_3Li الى مستوى الاثارة الاولى ذي طاقة 0.477 MeV ؟

الحل / أ- في الاستطارة المرنة فان $Q=0$ ، $M_a = M_b$ ، $M_x = M_y$ ،

$$Q = \left(1 + \frac{M_b}{M_y} \right) T_b - \left(1 - \frac{M_a}{M_y} \right) T_a - 2 \frac{\sqrt{M_a T_a M_b T_b}}{M_y} \cos \theta$$

$$0 = \left(1 + \frac{1}{7} \right) T_b - \left(1 - \frac{1}{7} \right) \times 7.5$$

$$0 = \frac{8}{7} T_b - \frac{6}{7} \times 7.5 \rightarrow T_b = 5.625 \text{ MeV}$$

ب- في الاستطارة غير المرنة $Q_{ex} = -E_{ex}$ وتساوي $Q = -0.477 \text{ MeV}$

$$-0.477 = \left(1 + \frac{1}{7}\right)T_b - \left(1 - \frac{1}{7}\right) \times 7.5$$

$$T_b = 5.2 \text{ MeV}$$

مساحة مقطع التفاعل (Reaction cross section) :-

إذا تصورنا حزمة من الجسيمات الساقطة على هدف فان جزءا قليلا منها قد يحدث تفاعلا نوويا والجزء الاخر يمر بدون تفاعل . كذلك لا يمكننا ان نتساءل عن اي الجسيمات تحدث التفاعل ، فنحن نتكلم عن احتمالية حدوث حدث . ويطلق على هذه الاحتمالية بالمقطع العرضي او المقطع العرضي النووي (σ) (Nuclear cross section) . فلو كان لدينا حزمة من الجسيمات ذات طاقة ثابتة شدتها I تسقط على هدف رقيق سمكه dx ومساحته A ، فهناك مع كل نواة من النوى مساحة حساسة مقدارها (σ) ، بحيث ان الجسيم الساقط يصطدم بالنواة من خلال هذه المساحة ويولد تفاعلا نوويا ينتج عنه (N) من الجسيمات الخفيفة . فاذا كان الهدف يحوي على n نواة في وحدة الحجم ، فان عدد النوى في وحدة المساحة يكون ndx ، والعدد الكلي من النوى في المساحة A يكون $ndx A$. وبما ان هناك مساحة حساسة مع كل نواة σ فان المساحة الحساسة الكلية تكون $\sigma ndx A$.

ان احتمال تصادم الجسيم الساقط مع نوى الهدف يساوي $\frac{N}{I}$ وتعطى بالعلاقة :

$$\frac{N}{I} = \frac{\text{المساحة الحساسة الكلية}}{\text{المساحة الكلية}} = \frac{ndx A \sigma}{A}$$

$$\therefore \sigma = \frac{N}{\left(\frac{I}{A}\right)(n A dx)} \quad \text{Or} \quad \sigma = \frac{N}{I n dx}$$

ووحدة مساحة المقطع هي البارن (b) حيث $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$

ومن الممكن أيضاً كتابة النسبة $(\frac{N}{I})$ مساوية الى التغير الحاصل بشدة الحزمة وذلك عند مرورها في الهدف :

$$\frac{N}{I} = -\frac{dI}{I} = n\sigma dx$$

حيث dI تمثل التغير الحاصل بالشدة ، اما الاشارة السالبة فتدل على ان هناك نقصانا بقيمة I كلما زادت قيمة x . وبتطبيق الشرط $I=I_0$ عندما $x=0$ فان :

$$I=I_0 e^{-nx\sigma}$$

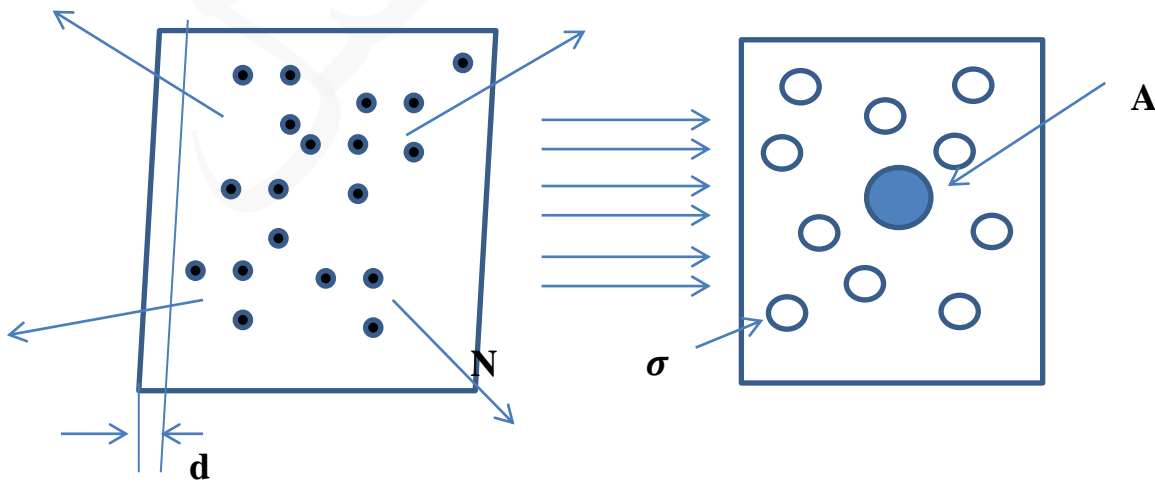
حيث $n\sigma$ تمثل معامل امتصاص الجسيمات في المادة . وبصورة عامة فان التفاعل الحاصل بين الجسيم الساقط ونواة مادة الهدف قد يسلك عددا من الطرق لانتاج الجسيمات الخفيفة المتعددة : $N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$ في وحدة الزمن ، فاذا افترضنا ان $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_i$ عبارة عن المقاطع العرضية لكل تفاعل نووي فان المقطع العرضي الكلي σ_{total} يمكن ان يعرف كحاصل جمع المقاطع العرضية المفردة:-

$$\sigma_{total} = \sum \sigma_i = \frac{N_1+N_2+N_3+\dots}{\left(\frac{I}{A}\right)(nAdx)}$$

اما مساحة المقطع العرضي التفاضلية differential cross section والتي يرمز لها بالرمز $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ فتعطى بالعلاقة :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\frac{dN}{d\Omega}}{\left(\frac{I}{A}\right)(nAdx)}$$

حيث تمثل dN عدد النواتج الخفيفة لوحدة الزمن بزاوية مجسمة $d\Omega$ عند زاوية θ بالنسبة لاتجاه الحزمة .



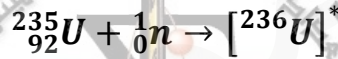
الانشطار النووي Nuclear Fission :

يسمى التفاعل النووي $x(a,b)y$ بالانشطار إذا كانت كتلتا b,y متقاربتين . يمكن ان يحدث الانشطار تلقائيا او بواسطة اقتناص نيوترون او بواسطة القصف بجسيمات d ,p او اشعة كما . تسمى الكتلتان الرئيسيتان الناتجتان من الانشطار بشظايا الانشطار fission fragment . ان الشظايا تكون غنية بالنيوترونات لذلك فان هناك افضلية لانبعث النيوترونات منهما . تستمر انحلالات β و γ لتؤدي في النهاية الى تقريب الشظايا من خط الاستقرار .

تفاصيل عملية الانشطار :-

لنأخذ انشطار نواة $^{235}_{92}U$ بالنيوترون البطيء كمثال على عملية الانشطار :

١- تبدأ عملية الانشطار النووي باقتناص نيوترون حراري من قبل نواة $^{235}_{92}U$ لتتكون النواة المركبة $^{236}U^*$ ويحدث تشويه لشكل النواة لتصبح بشكل كرتين .



٢- بسبب طاقة ترابط هذا النيوترون مع النواة المركبة تحدث اهتزازات عنيفة داخل النواة المركبة تؤدي الى تشوه شكل النواة وتخصرها وبالتالي انشطارها الى شظيتين كبيرتين (لهما زحمان متساويان ومتعاكسان بالاتجاه تقريبا) مع انبعث عدد من النيوترونات الفورية prompt neutron بفترة قصيرة جدا $t < 10^{-15} \text{ sec}$.

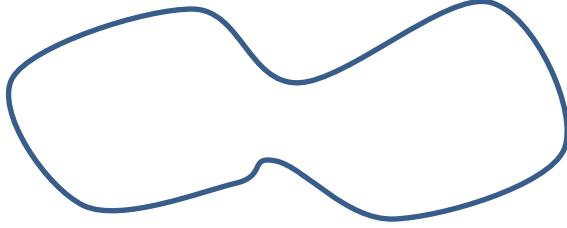
٣- ان معادلة التفاعل النووي للانشطار للنظير ^{235}U هي :



٤- ان النيوترونات الناتجة من الانشطار إذا امكن لها ان تنتج انشطارات جديدة فيسمى هذا التفاعل بالتفاعل المتسلسل المتشعب الذي يكون غير مسيطر عليه كما في الاسلحة النووية ، اما إذا امكن لنيوترون واحد انتاج وادامة الانشطار بينما بقية النيوترونات تختفي فيسمى هذا بالتفاعل المتسلسل المستقر كما في المفاعلات النووية .

- Thermal neutron
- ^{235}U nucleus
- $^{236}\text{U}^*$

تشوه شكل النواة $^{236}\text{U}^*$ وتخصرها بسبب الاهتزازات العنيفة



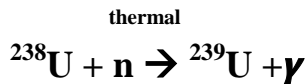
انشطار النواة المركبة وانبعث نيوترونات فورية $t < 10^{-15}$ sec وانبعثت كما فورية



س/هل يمكن لنواة ^{238}U ان تنشط بالنيوترونات البطيئة ؟

ج/ ان النواة ^{238}U لا تنشط الا بنيوترونات سريعة وذلك لاختلاف طاقات الترابط مع النواة ^{235}U . حيث ان ^{235}U هي نواة زوجية - فردية بينما نواة ^{238}U هي زوجية - زوجية اي ان طاقة ترابطها اكبر من طاقة ترابط ^{235}U ، وتبعاً لذلك فالطاقة اللازمة لتهيجها وانشطارها ستكون اكبر اي ان النيوترون الحراري لا يكفي لتهيجها انما نيوترونات سريعة بحيث يكون مجموع طاقة ترابط النيوترون بالنواة مضافاً لها طاقته الحركية قبل دخوله النواة كافياً لتهيج النواة وانشطارها .

ولذلك عند قصف ^{238}U بالنيوترونات الحرارية لا يحدث انشطار وانما يحدث تفاعل أسر كما في المعادلة التالية :



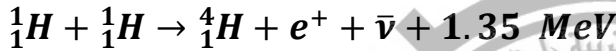
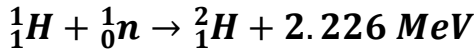
غير ان عملية الانشطار يمكن ان تحدث في ^{238}U باستخدام نيوترونات سريعة :



-: Nuclear fusion الاندماج النووي

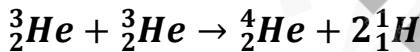
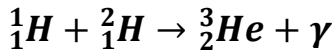
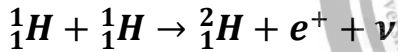
هو اتحاد نواتين متصادمتين لتكوين نواة كبيرة وتحرير طاقة ، حيث يمكن عند اتحاد جسيمتين نوويتين ان تحرر طاقة لان كتل النوى الناتجة اقل من كتل الجسيمات المتفاعلة. ان قوى التنافر الكهروستاتيكية تكون قوية بين النوى المشحونة لذلك يستلزم اعطاؤها طاقة كافية للتغلب على هذا التنافر بحيث تقترب الجسيمتان او النواتان من بعضهما للدرجة التي تتغلب فيها القوى النووية التجاذبية على قوى التنافر الكهروستاتيكية . اي ان الاندماج بعيد الاحتمال للعناصر الثقيلة ويتركز العمل على اندماج النوى الخفيفة .

ان ابسط تفاعل اندماجي هو اقتناص النيوترون من قبل البروتون .

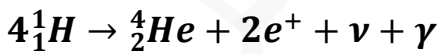


لقد فسر علماء الفضاء انتاج الطاقة الحرارية والضوء في النجوم والشمس بانه نتيجة للاندماج النووي عن طريق :

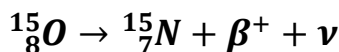
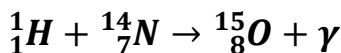
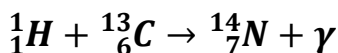
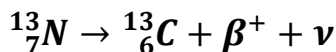
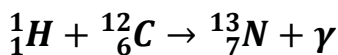
١-دورة بروتون – بروتون proton – proton cycle

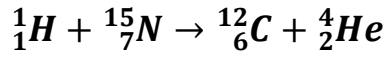


٢- وملخص الدورة (مجموع المعادلات الثلاثة) هو :-

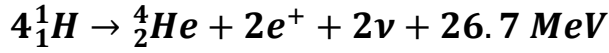


٣-دورة كاربون نيتروجين carbon – Nitrogen cycle وكالتالي :-

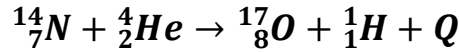




وبإضافة كل التفاعلات السابقة وحذف الحدود المشتركة نحصل على :-



س/احسب قيمة Q للتفاعل :



حيث ان :

$$M_N = 14.0075 \text{ amu} , M_\alpha = 4.0039 \text{ amu}$$

$$M_O = 17.0045 \text{ amu} , M_p = 1.0081 \text{ amu}$$

وكم هي طاقة العتبة لهذا التفاعل ؟ ثم ما مجموع الطاقة الحركية للنواة المتبقية والجسيم الخارج ؟

$$Q = 931.5 \{ M_a + M_x - M_b - M_y \}$$

$$Q = 931.5 \{ 4.0039 + 14.0075 - 1.0081 - 17.0045 \}$$

$$Q = -1.118 \text{ MeV}$$

ان ($Q < 0$) وهذا يعني ان هذا التفاعل ماص او مستهلك للطاقة لان قيمة Q سالبة ، لذلك يستلزم اعطاء جسيمات الفا بالاقل طاقة عتبة مقدارها (T_{th}) لحدوث التفاعل :

$$T_{th} = -Q \left(\frac{M_x + M_a}{M_x} \right) = -(-1.118) \left(\frac{4.0039 + 14.0075}{14.0075} \right)$$

$$T_{th} = 1.4375 \text{ MeV}$$

$$Q = T_b + T_y - T_a$$

$$-1.118 = T_b + T_y - 1.4375$$

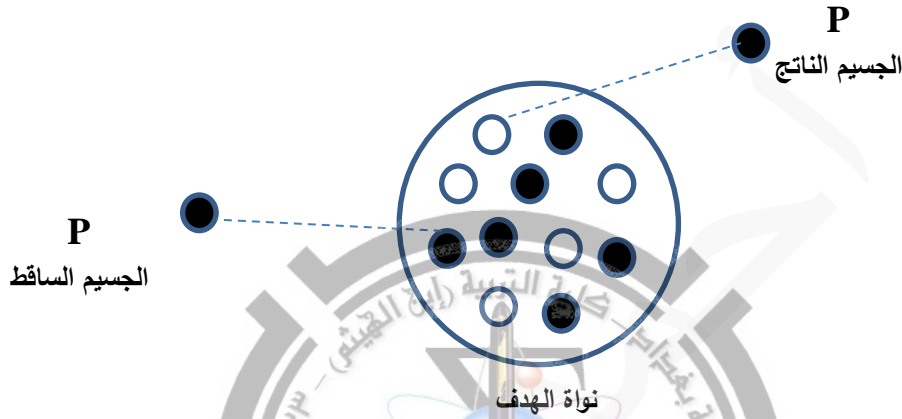
$$T_b + T_y = 0.3195 \text{ MeV}$$

التفاعلات النووية المباشرة :-

هناك عدة انواع من التفاعلات النووية المباشرة وسوف نلخصها بما يلي:-

١- تفاعلات التشتت غير المرنة (n,n) ، (p,p) :

يحدث هذا النوع من التفاعلات إذا كانت القذيفة نيوكلين (بروتون ، نيوترون) ذو طاقة عالية جدا وعند اصطدامه بأحد مكونات النواة يفقد جزء من طاقته وينطلق بالجزء المتبقي .

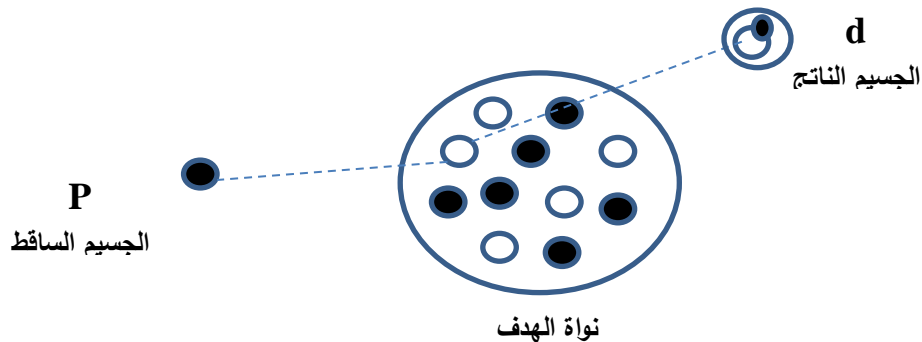


٢- تفاعلات (التطير) تبادل الشحنات (n,p) – (p,n) :

في هذا النوع من التفاعلات لا يخرج الجسيم الساقط ولكن بدلا من ذلك يخرج جسيم آخر من النواة . فإذا سقط نيوترون خرج بروتون وإذا سقط بروتون نتج نيوترون وكأن النيوكليون الساقط قد تبادل احد الميزونات مع النواة وخارج بخصائص جديدة.

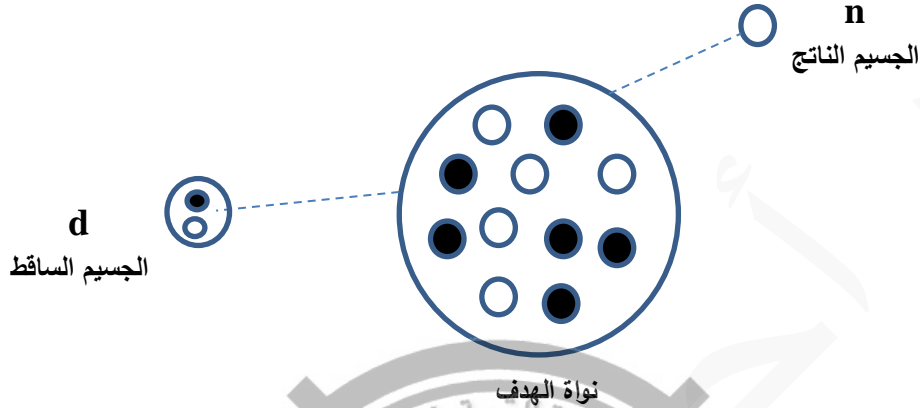
٣- تفاعلات الالتقاط (p,d) – (n,d) :

في هذا النوع من التفاعلات يلتقط النيوكليون الساقط على النواة نيوكلين مغاير له من سطح النواة ويخرج معا كنواة ديوترون . تحدث عملية الالتقاط غالبا على سطح النواة .



٤- تفاعلات الانخلاع (d,n) – (d,p) :

على النقيض من تفاعلات الالتقاط فان الجسيم الساقط يكون ديوترون (بروتون+ نيوترون) وحيث ان طاقة الترابط النووي له ضعيفة فان اصطدام الديوترون بنواة الهدف يجعله يفقد احد مكوناته بينما يستمر النيوكليون الاخر في طريقه كنتاج للتفاعل.



٥- تفاعلات تذبذب ودوران النواة الهدف :-

في هذا النوع من التفاعلات لا يخترق الجسيم الساقط النواة بل يقترب منها فقط ونتيجة لذلك يحدث رد فعل في نواة الهدف كلها مثل حدوث دوران او تذبذبة.

الفصل السادس

Nuclear Reactors المفاعلات النووية

تعريف المفاعل : المفاعلات النووية عبارة عن منشآت ضخمة يتم فيها السيطرة على عملية الانشطار النووي المتسلسل والناج عن وضع كمية من الوقود النووي ثم تعريضها الى مصدر نيوتروني . فعند تعرض ذرة الوقود (عادة يكون الوقود U^{235}) الى نيوترونات فانها قد تمتص احد هذه النيوترونات المصدمة بها ، ونتيجة لذلك فاننا نحصل على نيوترون او اكثر عند انشطار U^{235} . وكما مر سابقا ، فان عملية الانشطار المتسلسل تنشأ من اصطدام احد النيوترونات الناتجة عن الانشطار بذرة وقود اخرى وبذلك نحصل على انشطار جديد وعدد آخر من النيوترونات . فالمفاعل يسيطر على هذه التفاعلات وينظمها بشكل يمنع من ان تصبح الطاقات المتولدة من الانشطار عالية جدا قد تصهر المفاعل وتعرضه للخطر .

مكونات المفاعل النووي :

يتكون اي مفاعل نووي من الاجزاء التالية :-

١- القلب Core : هو عبارة عن مكعب ضخم يوضع في داخله الوقود والمهدئ

والمبرد حيث يحدث التفاعل المتسلسل وتولد الطاقة .

٢- الوقود النووي Nuclear Fuel : يتكون من قضبان من المواد الانشطارية مثل

اليورانيوم او اية مادة اخرى وتكون مغلقة بغلاف جيد من التآكل والتأكسد .

٣- المهدئي Moderator : الغرض منه هو ابطاء سرعة النيوترونات العالية الطاقة

حتى تصبح السرعة ملائمة لحدوث التفاعل المتسلسل ، واهم المواد التي تصلح

لهذا الغرض هي الكرافيت النقي والماء الثقيل (الماء الذي يحتوي على الديتريوم

بدلا من الهيدروجين وتركيبه الكيميائي D_2O) .

٤- قضبان السيطرة Control rods : والغاية منها السيطرة على عملية التفاعل المتسلسل فهي تتكون من مواد لها قابلية كبيرة على امتصاص النيوترونات مثل البورون والكادميوم ، حيث تنزل هذه القضبان في ثقب مخصصة لها داخل قلب المفاعل ، ويمكن لهذه القضبان التحرك آليا صعودا ونزولا للحفاظ على سرعة التفاعل وابقائها بالمعدل المطلوب او ايقاف التفاعل تماما عند الضرورة.

٥-المبرد Coolant : وهو المادة التي تستعمل في تبريد قلب المفاعل وتخليصه من الحرارة كي لا ينصهر ويحدث التلوث وينفس الوقت يستفاد من هذه الحرارة لتحويلها الى طاقة كهربائية . وتجري عملية التبريد بواسطة الغازات مثل غاز ثاني اوكسيد الكاربون المضغوط او الماء الاعتيادي او الصوديوم السائل .

كيف يعمل المفاعل :-

يبدأ تشغيل المفاعل بواسطة مصدر نيوتروني يوضع في داخل المفاعل يعطي النيوترونات الاولى لحدوث التفاعل ثم تسحب قضبان السيطرة تدريجيا وبصورة بطيئة عندها يجهز المفاعل نفسه بنفسه من النيوترونات التي يحتاجها نتيجة انشطار ذرات U^{235} . فالنيوترونات المتولدة من هذا الانشطار تتحرك بحرية داخل قلب المفاعل وتزداد اعدادها عندما يشطر جزء منها U^{238} . فتحرر نيوترونات سريعة اخرى وفي هذه الاثناء تبدأ النيوترونات بفقد طاقتها العالية بسبب تصادمها مع نوى المهدئ فتتوقف انشطارات نوى U^{238} . وتستمر طاقات النيوترونات بالانخفاض حتى تصل الى طاقات واطئة جدا تصل الى طاقات النيوترونات الحرارية وفي هذه المرحلة يبدأ U^{238} بامتصاص النيوترونات ، اما النيوترونات التي تنجو من هذا الامتصاص تقوم بشطر نوى U^{235} وتعاد دورة الانشطار المتسلسل مرة اخرى وهكذا . وخلال عمل المفاعل يتسرب جزء من النيوترونات خارجا عنه وترتفع نتيجة للانشطارات النووية درجة حرارة القلب فيقوم تيار التبريد بتبريده

بعد ان يمر في التجاويف الحلقية لقضبان السيطرة والوقود فينقل الحرارة المتولدة الى الخارج.

ويسيطر على تسرب النيوترونات باستخدام عاكس يغلف قلب المفاعل ويقوم هذا العاكس بارجاع النيوترونات التي تحاول ترك قلب المفاعل عندما تصطدم به فتستطار وتعود مرة اخرى اليه وهكذا يحافظ قلب المفاعل على اكبر عدد ممكن من نيوتروناته . ويمكن السيطرة على المفاعل بتحريك قضبان السيطرة الى داخل وخارج قلب المفاعل . وللوصول والمحافظة على قدرة ثابتة في مفاعل ما يجب توليد عدد النيوترونات نفسه في وحدات زمنية متعاقبة وبعبارة اخرى يجب ان يبقى عدد النيوترونات في اجيال التفاعل المتسلسل المتعاقبة ثابتا.

ملاحظة : تسمى النسبة بين عدد الانشطارات للجيل الواحد الى عدد الانشطارات للجيل الذي سبقه مباشرة بعامل التكاثر او المضاعفة Multiplication Factor . ويرمز لهذه النسبة بالرمز K . ولها حالات :

١- عندما تكون $K > 1$ يستمر المفاعل في انتاج النيوترونات اكثر مما يستهلك وعندئذ يقال ان المنظومة في حالة فوق الحرجة ، فيزداد عدد النيوترونات مع الزمن ويحصل الانفجار.

٢- عندما تكون $K < 1$ يكون عدد النيوترونات المنتجة اقل من المستهلكة ، وفي هذه الحالة يقال عن المنظومة بانها تحت الحرجة ، فيقل عدد النيوترونات مع الزمن ويتوقف التفاعل المتسلسل.

٣- عندما تكون $K = 1$ يكون معدل النيوترونات الناتجة يعادل تماما معدل النيوترونات المستهلكة وفي هذا الحالة تسمى المنظومة بالحرجة . لذلك فان التفاعل المتسلسل يستمر ذاتياً.

تصنيف المفاعلات النووية :-

لقد تم بناء انواع مختلفة من المفاعلات النووية لدراسة الانشطار النووي المتسلسل والتحكم فيه والمحافظة على استمراريته والظواهر التي تصاحبه ولاستغلال الطاقة التي تتحرر منه . وتصنف المفاعلات النووية وفقا للمواصفات البارزة التالية :-

١-طاقة النيوترونات : حيث تصنف المفاعلات الى مفاعلات حرارية ومتوسطة وسريعة ، فالمفاعلات الحرارية هي تلك المفاعلات التي تتم عملية الانشطار فيها بواسطة نيوترونات حرارية ، اما المفاعلات السريعة فتساهم فيها النيوترونات السريعة .

٢-المهدئات المستخدمة : حيث تصنف المفاعلات تبعاً لنوع المهدئات التي تستعملها لتخفيض طاقة النيوترون السريع وتحويله الى نيوترون حراري فهناك مفاعلات الكرافيت او مفاعلات الماء الثقيل او مفاعلات الماء الاعتيادي .

٣-ترتيب الوقود والمهدئ : تصنف المفاعلات كونها متجانسة او غير متجانسة ويعتمد ذلك على ترتيب الوقود والمهدئ ، ففي حالة المفاعل المتجانس يخلط المهدئ مع الوقود بصورة منتظمة ويكون اما على شكل خليط صلب او محلول سائل ، اما في حالة المفاعل غير المتجانس فوقوده يكون مركز في صفائح او قضبان او اسطوانات مجوفة توزع بصورة منتظمة وفق نموذج هندسي معين في المهدئ .

٤-الغرض من المفاعلات : وتصنف الى مفاعلات القدرة ومفاعلات البحوث ومفاعلات انتاج الوقود.

٥-التبريد : وتصنف المفاعلات حسب الناقل الحراري الذي ينقل الحرارة المتولدة بسبب الانشطار النووي الى خارج المفاعل ثم التخلص منها او الاستفادة منها

لاغراض مختلفة فمثلا هناك مفاعلات تستخدم الماء الخفيف او الثقيل تحت ضغط ملائم ، وفي البعض الاخر تستخدم بعض الغازات مثل CO_2 , He بتدويرها تحت ضغط عالي لتقوم بعملية التبريد .

فكرة عامة عن بعض انواع المفاعلات :

١-مفاعلات البحوث : ان الغاية الاساسية من عمل مثل هذه المفاعلات هو للدراسة والبحث العلمي ، حيث تنقل على سبيل المثال النيوترونات الحرارية المتولدة في قلب المفاعل من خلال قنوات خاصة الى خارج قلب المفاعل لدراسة الخواص الفيزيائية للمواد بطريقة الاسر النووي حسب تفاعل (n, γ) ، وكذلك يستخدم النيوترونات الحرارية بالقرب من قلب المفاعل في حقل الفيزياء الاشعاعية لتوليد النظائر المشعة المستخدمة في الطب والصناعة والجوانب الاخرى بطريقة التنشيط النيوتروني (Neutron Activation) . وتمتاز هذه المفاعلات بانها صغيرة الحجم وسهلة الاستخدام.

٢-مفاعلات انتاج البلوتونيوم (المفاعلات السريعة) : تستخدم بشكل خاص لانتاج البلوتونيوم وتعتمد على انشطارات النيوترونات السريعة ، يحث يتولد عنصر البلوتونيوم (Pu^{239}) نتيجة امتصاص U^{238} للنيوترونات . تستخدم هذه المفاعلات اليورانيوم الطبيعي الحاوي على U^{235} ، U^{238} كوقود لانتاج عنصر البلوتونيوم . تستخدم هذه المفاعلات لاغراض عسكرية و انتاج الاسلحة النووية .

٣-مفاعلات انتاج الطاقة : يستخدم هذا النوع من المفاعلات للاغراض السلمية ولانتاج الطاقة ، حيث تعتمد بصورة مباشرة على اسلوب انشطار المادة النووية فيها. ان الغاية الاساسية من عمل هذه المفاعلات هي تحويل الطاقة الناتجة عن الانشطار النووي الذي يحدث في قلب المفاعل الى قدرة مفيدة.

الفصل السابع

المعجلات

المعجل : هو جهاز يقوم بتعجيل الجسيمات المشحونة ويكسبها طاقة عالية ، وتكون عملية التعجيل بواسطة استخدام فرق جهد كهربائي .

هناك نوعان اساسيان من المعجلات هما المعجلات الخطية وتعجل فيها الجسيمات بشكل خط مستقيم ، والمعجلات الدائرية وفيها تكون عملية التعجيل من خلال دوران الجسم عدة دورات ، ويستخدم فيها مجال مغناطيسي من اجل ان يسلك الجسيم مساراً دائرياً .

هناك بضعة انواع من المعجلات الدائرية ، منها ما يستخدم مجالاً مغناطيسياً ثابتاً مثل السايكلوترون وفيها ما يستخدم مجالاً مغناطيسياً متغيراً مثل البيتاترون ونوع اخر يستخدم مجالات مغناطيسياً متغيراً وفولتية متناوبة ذات تردد متغير أيضاً مثل السينكروترون .

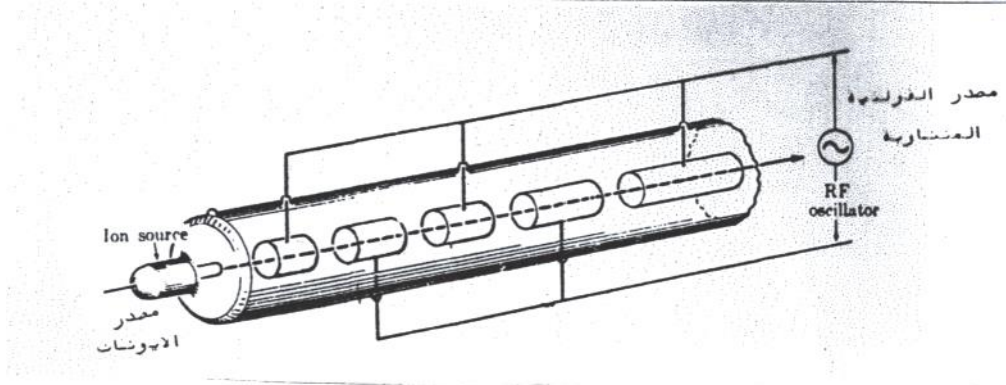
المعجلات الخطية :-

يتم تعجيل الجسيمات المشحونة بشكل خط مستقيم ، وتحتاج الى مصدر للفولتية المتناوبة يربط الى سلسلة من الاقطاب والتي تكون على شكل اسطوانات تمر الجسيمات المعجلة بداخلها ، وعادة تتدرج هذه الاسطوانات بطولها ، فالثانية اطول من الاولى والثالثة اطول من الثانية وهكذا .

اما ميكانيكية التعجيل فتكون بواسطة ربط جميع الاسطوانات الفردية بأحد اقطاب الفولتية ، وربط الاسطوانات الزوجية بالقطب للفولتية .

فالجسيم المشحون المراد تعجيله يمر داخل الاسطوانة الاولى باتجاه الاسطوانة الثانية ، والتعجيل يتم خلال المسافة بين الاسطوانتين فقط ، ولا يكتسب الجسيم اي تعجيل خلال

مساره داخل الاسطوانة ، لان فرق الجهد ثابت في الاسطوانة الواحدة . والشكل ادناه يوضح كيفية ربط اقطاب التعجيل بالفولتية المتناوبة .



شكل يوضح كيفية ربط اقطاب التعجيل بالفولتية المتناوبة

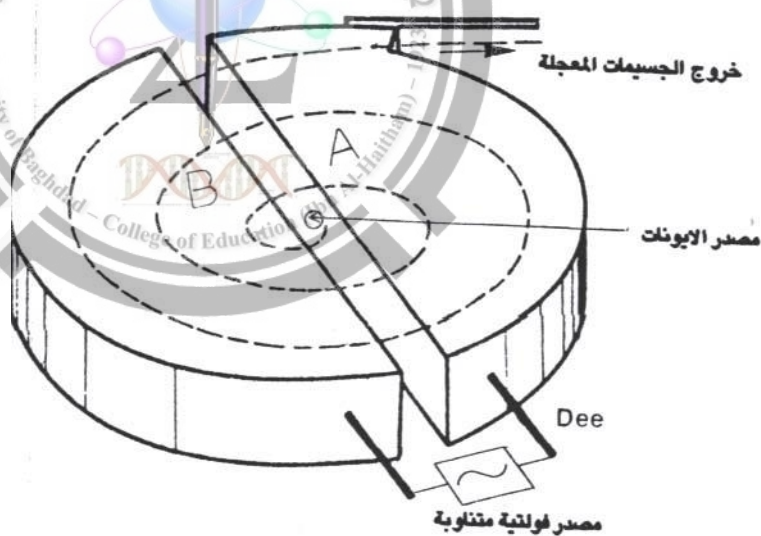
المعجلات الدائرية :

تستخدم جميع المعجلات الدائرية مجالاً مغناطيسياً للتأثير على مسار الجسيم وجعله يسير بمدارات دائرية معينة ، وفيما يلي ملخص لانواع المعجلات الدائرية :

١- السايكلوترون Cyclotron : هو معجل دائري تبدأ الجسيمات مدارها فيه من المركز ثم تدور بشكل حلزوني متجهة نحو الخارج ، ويستخدم فيه مجال مغناطيسي ثابت الشدة . ويتكون من زوج من اقطاب التعجيل يتكون كل منهما من نصف اسطوانة قصيرة مجوفة موضوعة واحدة امام الاخرى وهما مربوطتان الى مصدر للفولتية المتناوبة .

اما مصدر الايونات فيوضع عادة في المركز اي في الفجوة التي بين نصفي الاسطوانة . ان هذه المجموعة كلها توضع بين قطبي مغناطيس كهربائي كبير . والشكل ادناه يوضح كيفية عمل السايكلوترون .

فإذا رمزنا لاحد نصفي الاسطوانة بالرمز A والآخر B ، فعندما تكون A موجبة تتعجل الجسيمات الموجبة الشحنة خلال الفجوة نحو B ، وفي داخل B تسير الجسيمات بمسار دائري بسبب تأثير المجال المغناطيسي ، وبعد ان تنتهي من قطع نصف دورة داخل B ، تكون اقطاب الفولتية قد انعكست فتصبح B موجبة و A سالبة عندها سيكتسب الجسيم تعجيلا اضافيا عبر الفجوة بين B , A ثم يتحرك بمسار دائري اخر داخل A ولكن بنصف قطر اكبر من السابق وهكذا يستمر الجسيم بالتحرك في انصاف اقطار تتزايد في كل مرة وذلك نتيجة للزيادة في طاقة التعجيل التي يحصل عليها من خلال مروره بالفجوة بين B,A الى ان يقترب المسار من المحيط الخارجي للاسطوانة عندها يستعمل مجال كهربائي مساعد لكي يحرفها عن طريقها الدائري فتخرج من نافذة صغيرة حيث يكون بانتظارها المادة المراد قصفها.

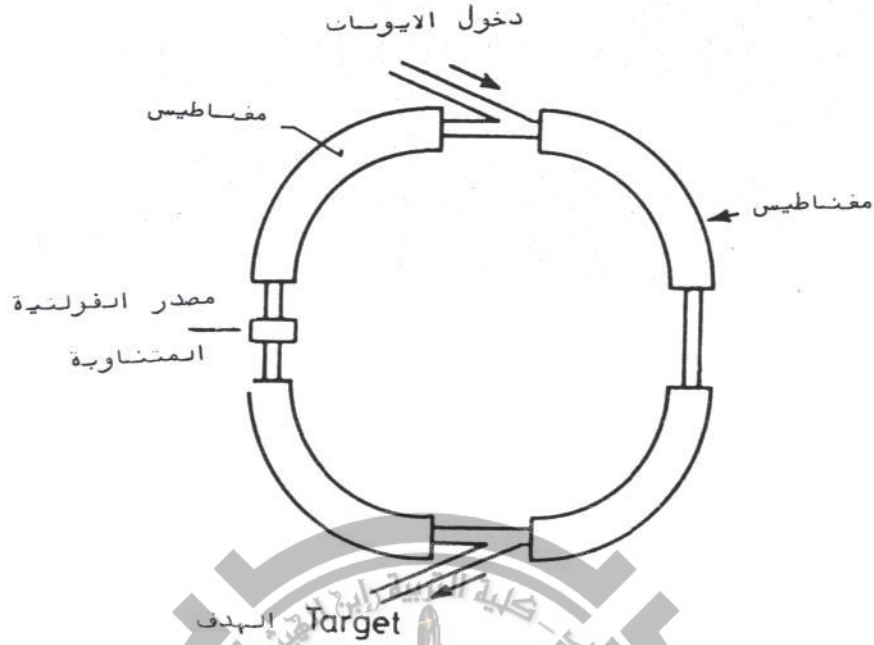


٢- البيتاترون Betatron : وهو معجل يستخدم لتعجيل الالكترونات حيث لا يمكن استخدام السايكلوترون الاعتيادي لتعجيل الالكترونات بسبب تزايد كتلة الالكترون مع زيادة سرعته بشكل سريع ، حسب مبدأ النسبية لاينشتاين . لذلك يستخدم البيتاترون لتعجيل الالكترونات حيث تدور الالكترونات بنصف قطر ثابت تحت تأثير مجال

مغناطيسي متغير . يتكون البيئاترون من انبوبة دائرية مجوفة ومفرغة من الهواء اشبه بالحلقة ، تدور الالكترونات داخلها ، وهذه الحلقة موضوعة بين قطبي مغناطيس كهربائي كبير . يعتمد مبدأ عمل البيئاترون على توليد مجال كهربائي محتث من خلال التغيير في شدة الفيض المغناطيسي المؤثر على المسار الدائري للالكترونات ، حيث يستفاد من هذا المجال الكهربائي المحتث في عملية التعجيل.

٣-السينكروترون Synchrotron : يعتبر السينكروترون اكثر المعجلات المارة الذكر تطورا ، وفيه تدور الجسيمات بنصف قطر ثابت ، فكلما زادت طاقة الجسيم ازداد الفيض المغناطيسي بشكل منتظم لكي يبقي الجسيمات محافظة على نصف قطر مسارها ، كذلك فان التردد يتغير أيضاً خلال فترة التعجيل . والشكل ادناه يمثل مخططا لفكرة السينكروترون ، حيث تتألف انبوبة التعجيل من اجزاء مستقيمة متصلة باجزاء دائرية وتحيط بهذه الاجزاء الدائرية مغناط كهربائية على شكل حرف C لغرض تنظيم دوران الجسيمات ، ثم هناك مصدر للفولتية المتناوية لغرض تعجيل الجسيمات ، وعادة يحتاج السينكروترون الى معجل ابتدائي اضافي لاعطاء الجسيمات طاقة اولية قبل ادخالها له.

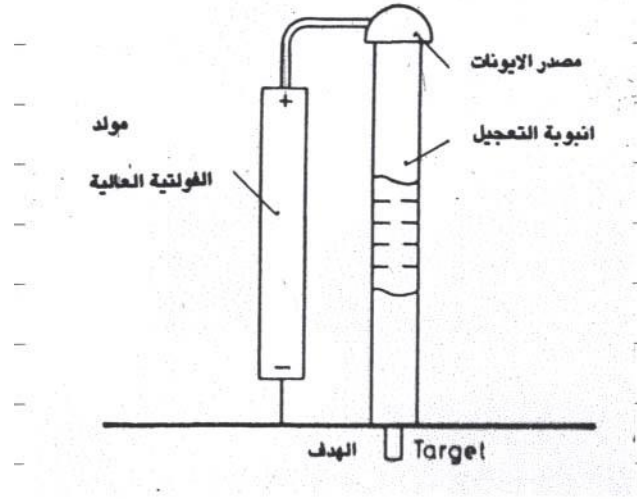
وهناك نوعان من معجلات السينكروترون يعملان بنفس المبدأ هما البروتون سينكروترون (Proton Synchrotron) ، والالكترون سينكروترون (Electron Synchrotron) وكل منهما يدل على نوع الجسيمات التي يعجلها.



معجلات الجهد المباشر: حيث يعجل الايون بفرق جهد كهربائي ثابت ، ويكون على نوعين:

١- معجل فان دي كراف (Van De Graaft Accelerator) :

توصل (فان دي كراف) لصنع معجل قادر على احداث فرق جهد يبلغ ملايين الفولتات . والشكل ادناه يوضح مخططا لفكرة هذا النوع من المعجلات . وفكرة عمل هذا النوع من المعجلات بسيطة جدا ، حيث تتعجل الايونات بمساعدة الفولتية العالية من اعلى انبوبة التعجيل الى اسفلها ، وبعد ان تخرج الايونات المعجلة تصطدم بمادة الهدف المراد قصفه بالايونات لاجراء التفاعلات النووية .



٢- معجل تاندام Tandem Accelerator :

معجل تاندام هو اشبه بمعجل (فان دي كراف) ، ولكنه أكثر تطوراً ، ويتم التعجيل فيه خلال مرحلتين أو أكثر ، لأنه يستخدم نفس فرق الجهد العالي لأكثر من مرة في تعجيل الجسيمات ، فهو عبارة عن معجلين ملتصقين أحدهما بالآخر لذلك فهو يوفر طاقة أكبر .

الجرع الإشعاعية الناتجة من التعرض للإشعاعات

من الممكن تقدير ومقارنة جرعة التعرض الى المصادر المشعة الطبيعية والمصنوعة من قبل البشر. وان بعض هذه المصادر منتشرة عالميا كما هو الحال لمعظم النويدات المشعة الطبيعية وهناك مصادر اخر تكون ذات مواقع ثابتة مثل مايطرح من المنشآت النووية ، كما ان بعض المصادر مثل اجهزة الاشعة السينية تعطي تعرضا خارجيا فقط ولا تسبب اي تلوث للبيئة وهناك مصادر اخر تؤدي الى توزيع النويدات المشعة بصورة واسعة في اي او كل قواطع البيئة مثل الهواء والتربة والماء . والتعرض ربما يكون تعرض خارجي او تعرض داخلي او اندماج كليهما.

مصادر التعرض للأشعة والتلوث

- ١- تعرض خارجي (External Exposure) أشعة ناتجة عن أسطح ملوثة
- ٢- تعرض داخلي (Internal Exposure) وينتج عن: إستنشاق (عن طريق القناة التنفسية) تلوث الجلد (الثقوب او الجروح) بلع مباشر (عن طريق القناة الهضمية) بلع عن مصادر ثانوية مثل الماء الحليب والغذاء

انواع الجرعة الاشعاعية

١- الجرعة الممتصة (Absorbed dose):

تعرف الجرعة الممتصة بأنها مقدار الطاقة الممتصة بالجول لوحدة الكتلة من المادة بالكيلو غرام ويمكن كتابتها رياضيا كما يلي :

$$D = E/m \text{ (J/Kg)}$$

تقاس الجرعة الممتصة بوحدة تسمى الغراي (Gray) وتعرف على انها امتصاص طاقة من الاشعاعات مقدارها 1 جول في كل 1 كيلو غرام من المادة ويرمز لها عادة بالرمز Gy ، ومازالت الوحدة التقليدية للجرعة الممتصة وهي "الراد" "rad" مستعملة في بعض المراجع والأجهزة . ان الراد الواحد هو امتصاص طاقة مقدارها (100 erg) في كل غرام واحد من المادة , والعلاقة بين ال rad و ال Gy هي

$$(1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad})$$

٢- الجرعة المكافئة (H) The Equivalent Dose

تعرف الجرعة المكافئة (H_{Ti}) بانها حاصل ضرب الجرعة الممتصة D_{ti} في معامل النوعية او معامل الاشعاع المرجح ، اي ان:

$$H_{Ti} = D_{Ti} \times W_R$$

تقاس الجرعة المكافئة في النظام المعياري العالمي بوحدة السيفرت Seivert ورمزها Sv وذلك عندما تكون الجرعة الممتصة معبرا عنها بوحدة الغراي . وعند التعبير عن الجرعة الممتصة بوحدة الراد القديمة تستعمل وحدة اخرى قديمة للجرعة المكافئة هي الريم rem ومن العلاقة بين الغراي والراد يتبين ان السيفرت والريم يرتبطان معا بنفس العلاقة وهي:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

الجدول
عامل (1)
الإشعاع
المرجح ()
Radiation
Weighting
Factor W_R

عامل الإشعاع المرجح	طاقاتها	نوع الإشعاعات
1	جميع الطاقات	فوتونات .
1	جميع الطاقات	إلكترونات وميونات .
5	أقل من 10 keV	نيوترونات .
10	10 → 100 KeV	
20	100 keV → 2 MeV	
10	2 → 20 MeV	
5	أكبر من 20 MeV	
5	أكبر من 20 MeV	بروتونات .
20		جسيمات ألفا ونوى خفيفة

مثال / نسيج كتلته 4kg يمتص 2mJ عن طريق التشعيع بالنيوترونات البطيئة. احسب الجرعة المكافئة لهذا النسيج؟

$$D = E/m = 2 \times 10^{-3} / 4 = 0.5 \times 10^{-3} \text{ J/kg} = 5 \times 10^{-4} \text{ Gy. /الحل}$$

$$H = D \times W_R = 5 \times 10^{-4} \times 5 = 25 \times 10^{-4} \text{ Sv.}$$

مثال/ في احدى السنوات تعرضت رنتا أحد العاملين في مختبر نووي للجرعات التالية :

احسب الجرعة المكافئة في رئتي هذا العامل؟
 من النيوترونات الحرارية و 0.05Gy من النيوترونات السريعة و 0.8Gy من اشعة كاما.

/الحل/

$$H = \sum W_R H_{TR}$$

$$H = 5 \times 0.02 + 10 \times 0.05 + 1 \times 0.8$$

$$= 0.1 + 0.5 + 0.8$$

$$= 1.4 \quad (\text{Sv})$$

٣- الجرعة الفعالة: (E) The Effective Dose

الجرعة الفعالة E لكامل الجسم هي مجموع الجرعات المكافئة الموزونة بعامل الإشعاع المرجح ، مضروبة بالعامل المرجح للنسيج أو العضو ، أي أنها مجموع الجرعات المكافئة الموزونة بالعوامل المرجحة لكل عضو أو نسيج ، وتحدد وفقاً للعلاقة :

$$E = \sum W_{Ti} \cdot H_{Ti}$$

ان الجرعة الفعالة E في الجسم تعد بمثابة مقياس لاحتمال اصابة الجسم بالامراض العشوائية كالسرطان القاتل نتيجة التعرض للإشعاع ، وتقاس الجرعة الفعالة بنفس وحدات قياس الجرعة المكافئة ، اي بالسيفرت Sv في النظام المعياري الدولي والريم في النظام القديم .

الجدول (2) العوامل المرجحة للأعضاء البشرية.

W _{Ti} عامل النسيج المرجح	العضو
0.02	الغدة التناسلية
0.12	النخاع العظمي الأحمر ، القولون ، الرئتان ، المعدة .
0.05	المثانة ، الصدر ، الكبد ، الإثنا عشر ، الغدة الدرقية .
0.01	الجلد ، سطح العظام .
0.05	باقي الأعضاء .
1	كامل الجسم .

مثال / تعرضت أنسجة وأعضاء أحد فنيي المختبرات الطبية التي يتم فيها تداول المواد المشعة ، الى الجرعات التالية:

1.5mSv للرتنين ، 5mSv للمعدة ، 1mSv للثلاثي عشر ، 2.5mSv للقولون ، 0.5mSv للغدد التناسلية. احسب الجرعة الفعالة التي حصل عليها هذا الفني ؟

/الحل

$$E = \sum_T W_T H_T$$

$$= 0.12 \times 150 + 0.12 \times 5 + 0.05 \times 1 + 0.12 \times 2.5 + 0.20 \times 0.5$$

$$= 0.18 + 0.60 + 0.05 + 0.30 + 0.10$$

$$= 1.23 \text{ mSv}$$

أي أن الجرعة الفعالة للجسم كله هي 1.23 ميلي سيفرت.

معدل الجرعة \dot{D} : The Dose rate

تعبر وحدات الغراي والسيفرت عن مقدار الجرعة الممتصة والجرعة المكافئة او الفعالة التي حصل عليها عضو او شخص ما خلال مدة زمنية معينة (t) . ولتقدير قيمة الجرعة التي يتعرض اليها الشخص خلال زمن معين فانه يجب معرفة ما يسمى بمعدل الجرعة (\dot{D}) ، والذي يعرف على انه قيمة الجرعة التي يحصل عليها العضو او الانسان في وحدة الزمن عند وجوده في هذا المكان، اي ان :

$$D = \dot{D} \times t$$

مثال/ اذا كانت الجرعة الفعالة المسموح بها في الاسبوع هي 0.4mSv . احسب الزمن الذي يسمح خلاله لشخص ما بالوجود داخل مختبر في الاسبوع اذا كان معدل الجرعة الفعالة داخل هذا المختبر هو 100µSv/hr ؟

/الحل:

$$D = \dot{D} \times t$$

$$t = 0.4 \times 10^{-3} / 100 \times 10^{-6} = 4 \text{ hours.}$$

