التفاعلات النووية Nuclear Reactions

التفاعل النووي: هي عملية يحدث فيها تغير في تركيب النواة الهدف وطاقتها أو في احداها فقط بعد قصف النواة الهدف بجسيمات مشحونة أو غير مشحونة أو أشعة كاما.

ويعبر عن التفاعل النووي بالمعادلة التالية:

$$a + X \longrightarrow Y + b \quad \text{or} \quad X(a,b)Y \qquad \text{---} (1)$$

حيث: a تمثل الجسم الساقط.
X النواة الهدف (المقصوفة).
Y النواة الناتجة.
b الجسم الخارج.

إن أول تفاعل نووي أجري مختبرياً ذلك الذي اعلنه العالم رذرفورد عام ١٩١١:

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \longrightarrow ^{1}_{1}H + ^{17}_{8}O$$

or $$\left[\alpha + ^{14}_{7}N \longrightarrow p^{+} + ^{17}_{8}O\right]$$

وإن أول معجل جسيمات قادر على اجراء تفاعلات نووية بني من قبل (كوكروفت - والتن) اللذين لاحظا التفاعل الآتي عام ١٩٣٠:

$$p + ^{7}_{3}Li \longrightarrow ^{4}_{2}He + \alpha$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

نظرية التفاعل والنواة المركبة:

بناءاً على آلية التفاعل يمكن تقسيم تفاعلات النوى الذرية الى:

1. تفاعلات نووية مباشرة:
2. تفاعلات النواة المركبة:

إن آلية التفاعلات المباشرة تختلف تماماً عن آلية تفاعلات النواة المركبة، فالتفاعلات المباشرة هي عمليات آنية سريعة جداً تحدث في زمن بحدود (10^{-22} sec)، في حين تستغرق النواة المركبة فترة زمنية أطول من ذلك بكثير وبحدود (10^{-8}-10^{-16} sec).

كما أن التفاعلات المباشرة تحدث بدرجة كبيرة عند سطح النواة الهدف بمشاركة نيوكليون واحد أو عدد قليل من النيوكليونات الواقعة قرب سطح النواة الهدف، في حين تبقى النيوكليونات الاخرى في الهدف بدون مشاركة ويخرج نتيجة لذلك نيوكليون منفرد من أحد المستويات مما يؤدي الى تفكيك التركيب القشري للنواة، وكلما زادت طاقة الجسيمات الساقطة أكثر من (20 MeV) ازدادت احتمالية التفاعلات المباشرة.

أما في آلية تفاعلات النواة المركبة فيندمج الجسيم الساقط مع نواة الهدف لفترة قصيرة وتتقاسم الطاقة فيما بينها بشكل كامل قبل أن يقذف نيوكليون أو مجموعة من النيوكليونات خارج النواة المركبة. ففي هذه الحالة ان الجسيم الساقط ونواة الهدف يكونان نواة جديدة تسمى النواة المركبة (Compound nucleus)، حيث تتوزع طاقة الجسيم الساقط بين النيوكليونات في النواة المركبة والتي تكون بحالة متهيجة جداً، كما في المثال التالي:

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \longrightarrow \left[^{18}_{9}F^{*}\right] \longrightarrow ^{1}_{1}H + ^{17}_{8}O$$

حيث علامة النجمة (*) تدل على حالة التهيج.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

انواع التفاعلات النووية:

يمكن تصنيف التفاعلات النووية على وفق الآتي:

$a + X \longrightarrow a + X \Rightarrow$ Elastic scattering
(الاستطارة المرنة).

$a + X \longrightarrow a + X^* \Rightarrow$ Inelastic scattering
(الاستطارة غير المرنة).

$$\left.\begin{array}{l} a + X \longrightarrow b + Y \\ a + X \longrightarrow \gamma + Z \end{array}\right] \Rightarrow \text{Transmutation reactions}$$
(تفاعلات التحول).

1. تفاعلات الاستطارة المرنة $(a+X \rightarrow a+X)$:
في تفاعلات الاستطارة المرنة، تكون الجسيمات الساقطة والخارجة هي نفس الجسيمات وبالتالي تبقى النواة الهدف نفسها أيضاً. تمضي هذه الحالة تبقى الطاقة الحركية الكلية للنظام (الجسيمة الساقطة + النواة الهدف) قبل التصادم وبعده.

2. تفاعلات الاستطارة غير المرنة $(a+X \rightarrow a+X^*)$:
في هذا النوع من التفاعلات تنتقل النواة الهدف الى مستوى إثارة ثم (X^*) والذي يعبر عنها بعلامة النجمة (excited state) تحل النواة المثارة بسرعة بانبعاث اشعة γ.

3. تفاعلات التحول النووي $(a+X \rightarrow \gamma+Z)$ or $(a+X \rightarrow b+Y)$
في هذا التفاعل ينتقل واحد أو اثنين من البيوكليونات بين الجسيمة الساقطة والنواة الهدف التي ستتحول الى نواة اخرى. وبصورة عامة فأن عدد البروتونات Z وعدد النيوترونات N وبالتالي العدد الكتلي A تكون جميعها محفوظة في التفاعلات النووية. كما في المثال الآتي:

$$^4_2He_2 + ^{14}_7N_7 \longrightarrow ^{17}_8O_9 + ^1_1P_0$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

مثال: في التفاعل النووي الآتي $^{9}_{4}Be(\gamma,n)$ ؟ جد ناتج التفاعل.

الحل: يمكن كتابة التفاعل بالشكل التالي:

$$\gamma + {}^{9}_{4}Be_{5} \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{A}_{Z}Y_{N}$$

حيث ${}^{A}_{Z}Y_{N}$ تمثل النواة الناتجة،

بما أن أشعة غاما هي أشعة كهرومغناطيسية لذا فإنها تكون بدون شحنة وبدون كتلة أي أن $Z=0$ وكذلك كل من N و A يساوي صفراً وهكذا فإن:

العدد الكلي يساوي 9 في الطرفين، أي أن $A=8$

العدد الذري يساوي 4 في كل طرف، أي أن $Z=4$

العدد النيوتروني يساوي 5 في كل طرف، أي أن $N=4$

$$\therefore \gamma + {}^{9}_{4}Be_{5} \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{8}_{4}Be_{4}$$

حيث النواة الناتجة هي النظير ${}^{8}_{4}Be_{4}$ والتي تكافئ جسيمتي ألفا ويمكن كتابته كالآتي

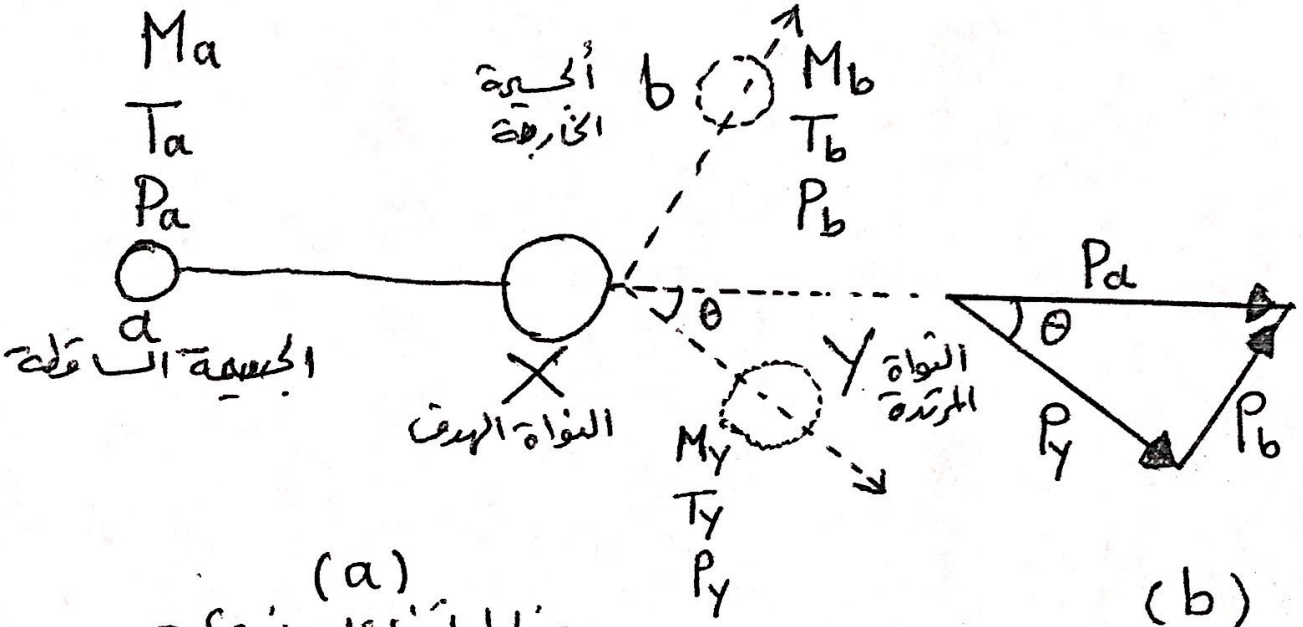
$$\gamma + {}^{9}_{4}Be_{5} \longrightarrow 2\,{}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

ويستخدم هذا التفاعل كمصدر لإنتاج النيوترونات.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

حسابات الطاقة في التفاعلات النووية:

من المهم في التجارب النووية وبحوث التفاعلات النووية هو قياس الطاقة المتحررة في التفاعل النووي وخاصة تفاعلات الانشطار النووي، أي حساب قيمة Q (Q-Value). ومن الممكن تمثيل تفاعل نووي على وفق الآتي:



(a)
مخطط لتفاعل نووي

(b)
مثلث الزخوم

$$a + X \rightarrow b + Y$$

الشكل اعلاه يمثل تفاعل نووي اعتيادي حيث a هي الجسيمة الساقطة (Incident particle) وأن Ma و Ta و Pa هي الكتلة والطاقة الحركية وزخم الجسيمة الساقطة على التوالي. وأن X هي النواة الهدف والتي تكون ساكنة تقريباً ($T_X = 0$) وذات كتلة M_X. وبعد التفاعل تنبعث الجسيمة b ذات كتلة M_b وطاقة حركية T_b، والنواة المرتدة (recoil nucleus) بكتلة M_y وطاقة حركية T_y. وبما أن الطاقة الحركية T لكل جسم تكون قليلة عند مقارنتها مع طاقة السكون (Mc^2)، لذا يعلن استخدام العلاقات غير النسبية لقوانين حفظ الطاقة والزخم على وفق الآتي:

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

من قانون حفظ الطاقة نحصل على:

$$M_a c^2 + T_a + M_x c^2 + T_x = M_b c^2 + T_b + M_y c^2 + T_y$$

وبما أن $T_x = 0$ فإن:

$$M_a c^2 + T_a + M_x c^2 = M_b c^2 + T_b + M_y c^2 + T_y$$

$$(M_a + M_x)c^2 - (M_b + M_y)c^2 = T_b + T_y - T_a \quad \text{---- (2)}$$

ان طاقة التفاعل Q تعرف بأنها الفرق بين الطاقة الحركية النهائية والابتدائية، ولهذا فإن:

$$Q = T_{final} - T_{initial} = (T_b + T_y) - (T_a + T_x)$$

وحيث أن $T_x = 0$ فإن طاقة التفاعل تساوي:

$$Q = T_b + T_y - T_a \quad \text{---------- (3)}$$

وبالتعويض في معادلة رقم (2) نحصل على:

$$Q = (M_a + M_x)c^2 - (M_b + M_y)c^2 \quad \text{---- (4)}$$

ومن قانون حفظ الزخم نحصل على:

$$P_a + P_x = P_b + P_y$$

وبما أن الجسيم الهدف تعتبر ساكنة فإن:

$$P_x = M_x V_x = M_x(0) = 0$$

$$\therefore P_a = P_b + P_y$$

$$P_y = P_a - P_b$$

وبتطبيق قانون الجيب تمام على مثلث الزخوم نحصل على:

$$P_y^2 = P_a^2 + P_b^2 - 2P_aP_b\cos\theta \quad \text{------ (5)}$$

$$T = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p^2 = 2mT \Rightarrow p = \sqrt{2mT}$$ وبما أن:

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

وبالتعويض في المعادلة رقم (5) نحصل على:

$$2M_yT_y = 2M_aT_a + 2M_bT_b - 2\sqrt{M_aT_aM_bT_b}\cos\theta$$

ومنها:

$$T_y = \frac{M_a}{M_y}T_a + \frac{M_b}{M_y}T_b - 2\frac{\sqrt{M_aT_aM_bT_b}}{M_y}\cos\theta$$

وبالتعويض عن T_y في المعادلة (3) نحصل على

$$Q = T_b + \frac{M_a}{M_y}T_a + \frac{M_b}{M_y}T_b - 2\frac{\sqrt{M_aT_aM_bT_b}}{M_y}\cos\theta - T_a$$

$$\therefore Q = \left(1+\frac{M_b}{M_y}\right)T_b - \left(1-\frac{M_a}{M_y}\right)T_a - 2\frac{\sqrt{M_aT_aM_bT_b}}{M_y}\cos\theta \quad (6)$$

يمكن من هذه العلاقة (6) حساب طاقة التفاعل Q حيث T_a و θ تعطى عادة" و T_b تقاس عمليا" أما الكتل فيمكن التعويض عنها بالاعداد الكتلية ($M = A$).

ان قيم Q يمكن أن تكون موجبة أو سالبة أو صفرا". ولهذا يمكن تقسيم التفاعلات النووية الى تفاعلات باعثة للطاقة وتفاعلات ماصة للطاقة:

1. التفاعلات الباعثة للطاقة ($Q > 0$):

تسمى التفاعلات النووية الباعثة للطاقة عندما تكون طاقة التفاعل حركية موجبة ($Q > 0$)، وهذا يعني ان الكتل الابتدائية اكبر من الكتل النهائية أو أن الطاقة الحركية النهائية اكبر من الطاقات الحركية الابتدائية. ان ابرز نوع من هذه التفاعلات وأهمها هي تفاعلات النيوترونات الحرارية (التي تكون طاقتها عادية اي $0.025\,eV$ تقريبا") كما في التفاعل التالي:

$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He + Q\,(Q = 2.8\,MeV)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

فأذا كانت طاقة الجسيم الساقطة تساوي صفر تقريباً ($T_a \approx 0$)
يمكن إيجاد T_b من المعادلة (6) بدلالة طاقة التفاعل Q
وشكل المعادلة التالية:

$$T_b = \frac{M_y}{M_y + M_b} Q \quad \text{---------- (7)}$$

ومن العلاقة (7) نلاحظ ان الطاقة الحركية للجسيمات لا تعتمد على الزاوية θ وبهذا تكون T_b متساوية في جميع الاتجاهات.

٢. التفاعلات الماصة للطاقة ($Q<0$):

تسمى التفاعلات ماصة للطاقة عندما $Q<0$، فعندما تكون Q سالبة وان $T_a = 0$ فأن طاقة الجسيم المتبعثة تكون سالبة وهذا يعني تفاعلات في المعادلة (6) تكون كمية سالبة، وهذا يعني تفاعلات من هذا النوع لا يمكن ان تحدث، كما في المثال التالي:

$$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{10}_{5}B + ^{4}_{2}He + Q \quad , (Q = -4.0\ MeV)$$

فعندما تكون Q كمية سالبة وان $T_a = 0$ فأن طاقة الجسيم المتبعثة T_b تكون كمية سالبة وهذا يعني أن تفاعلات من هذا النوع لا يمكن أن تحدث عندما $T_a = 0$، أي تفاعلات ذات عتبة (Threashold reactions).

٣. طاقة العتبة: (T_{th} Threashold Energy):

تعرف طاقة العتبة على انها أقل طاقة للجسيم الساقطة $T_{a(min)}$ التي يمكن أن تحدث تفاعلاً نووياً، أي أن

$$T_{a(min)} = T_{threashold} = -Q \frac{M_y + M_b}{M_y + M_b - M_a} \quad \text{------ (8)}$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ان العلاقة العامة التي تربط بين Q وكتل السكون هي :-

$$M_a + M_x = M_b + M_y + Q/C^2$$

وبما أن $M_x \gg Q/C^2$ فأن:

$$M_y = M_a + M_x - M_b \quad \text{---------- (9)}$$

وبتعويض المعادلة (9) في (8) فنحصل على طاقة العتبة :-

$$T_{th} = -Q\,\frac{M_a + M_x}{M_x} \quad \text{---------- (10)}$$

وبدلالة الاعداد الكتلية تصبح المعادلة (10) :

$$T_{th} = -Q\left[\frac{A_a + A_x}{A_x}\right] = -Q\left[1 + \frac{A_a}{A_x}\right] \quad \text{---- (11)}$$

٤. تفاعلات الاستطارة المرنة :-

وفي هذه التفاعلات لا يكون هناك ربح أو خسارة في الطاقة قبل الاستطارة وبعدها أي أن ($Q=0$) وأن $M_a = M_b$ و $M_x = M_y$.

مثال: في التفاعل التالي :

$$P + {}^4He \longrightarrow {}^2H + {}^3He$$

أ- احسب قيمة طاقة التفاعل Q ؟

ب- ما هي أقل طاقة يجب أن يمتلكها البروتون لكي يحدث التفاعل ؟ علماً أن :

$M_a = 1.007825$

$M_{^4He} = 4.002603$, $M_{^2H} = 2.014102$, $M_{^3He} = 3.016029$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الحل :-

أ- يمكن إيجاد قيمة طاقة التفاعل Q من العلاقة (4) الخاصة بالكتل (عادة توجد في المصادر بدلالة وحدات الكتل الذرية) :

$$Q = (M_a + M_x)c^2 - (M_b + M_y)c^2$$

$$= (1.007825 + 4.002603) - (2.014102 + 3.016029)$$

$$\therefore Q = 5.010428 - 5.030131 = -0.019703 \text{ amu}$$

ثم نحول وحدات الكتلة الذرية الى وحدات الطاقة حيث

$$1 \text{amu} = 931.5 \text{ MeV}$$

$$\therefore Q = -0.019703 \times 931.5 = -18.35 \text{ MeV}$$

إن الاشارة السالبة تدل على أن التفاعل ماص للطاقة، أي انه تفاعل عتبة.

ب- إن اقل طاقة يجب أن يمتلكها البروتون لكي يحدث التفاعل هي طاقة العتبة والتي يمكن حسابها من المعادلة (10) وكما يلي :

$$T_{threshold} = -Q \frac{M_a + M_x}{M_x}$$

$$= -(-18.35)\left(\frac{5.010428}{4.002603}\right)$$

$$\therefore T_{th} = 22.97 \text{ MeV}$$

كما يمكن استخدام الاعداد الكتلية A بدلاً من الكتل الذرية وكما يلي :

$$T_{th} = -(-18.35)\left(\frac{1+4}{4}\right)$$

$$= 22.93 \text{ MeV}$$

مع وجود نسبة خطأ قليلة جداً

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

المعجلات

المعجل : هو جهاز يقوم بتعجيل الجسيمات المشحونة ويكسبها طاقة عالية باستخدام مزيج جهد كهربائي عالي .
وهناك نوعان من المعجلات هما :

١. المعجلات الخطية وفيها تعجل الجسيمات المشحونة بشكل خطي .
٢. المعجلات الدائرية وفيها تعجل الجسيمات المشحونة بشكل دائري ويستخدم في هذا النوع مجال مغناطيسي من أجل يسلك الجسيم مساراً دائرياً . وقد يستخدم مجال مغناطيسي ثابت كما في السايكلترون ، وهناك ما يستخدم فيها مجال مغناطيسي متغير وفولتية متناوبة مثل السينكروترون ، وهناك ما يستخدم مجال مغناطيسي متغير مثل البيتاترون . وفيما يلي شرح مبسط لبعض المعجلات الدائرية :

أ - السايكلوترون (Cyclotron) :
هو معجل دائري تبدأ الجسيمات مدارها قريبة من المركز ثم تدور بشكل حلزوني متجهة نحو الخارج ، ويستخدم فيه مجال مغناطيسي ثابت الشدة .

ب - البيتاترون (Betatron) :
هو معجل يستخدم لتعجيل الالكترونات حيث لا يمكن استخدام السايكلوترون الاعتيادي لتعجيل الالكترونات بسبب تزايد كتلة الالكترون مع زيادة سرعته وفقاً لميكانيكا النسبية لأينشتاين ، حيث يمكن السيطرة على نصف قطر دورانها من خلال المجال المغناطيسي المتغير .

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ج- السينكروترون (Synchrotron):

يعتبر السينكروترون من أكثر المعجلات تطوراً، وفيه تدور الجسيمات بنصف قطر ثابت، فكلما زادت طاقة الجسيم ازداد الضغط المغناطيسي بشكل منتظم لكي تبقى الجسيمات محافظة على نصف قطر مسارها. وهناك نوعان من معجلات السينكروترون يعملان بنفس المبدأ هما:

بروتونة سينكروترونة (Proton Synchrotron).

الكترونة سينكروترونة (Electron Synchrotron).

المفاعلات النووية Nuclear Reactors

تعريف المفاعل: المفاعلات النووية عبارة عن منشآت ضخمة يتم فيها السيطرة على عملية الانشطار النووي المتسلسل والتابع عن وضع كمية من الوقود النووي ثم تعريضها الى مصدر نيوتروني.

عندما تتعرض ذرة (نواة) الوقود النووي (عادة يكون الوقود هو U^{235}) الى نيوترونات فإنها قد تمتص أحد هذه النيوترونات المصطدمة معها وبنتيجة لذلك تنشطر نواة اليورانيوم U^{235} مطلقة شظايا انشطار مع كمية كبيرة من الحرارة وعدد من النيوترونات والتي بدورها تمتص من قبل نوايات أخرى من الوقود متسببة بانشطار عدد أكبر منه الأول وبذلك يبدأ التفاعل المتسلسل. فالمفاعل يسيطر على هذه التفاعلات وينظمها بشكل يمنع من أن تصبح الطاقات المتولدة من الانشطار عالية جداً قد تضر المفاعل وتعرضه للخطر.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

مكونات المفاعل النووي :

يتكون المفاعل النووي من الاجزاء التالية:

١. القلب (Core) : وهو عبارة عن صندوق مكعب ضخم يوضع في داخله الوقود النووي والمهدئ والمبرد حيث يحدث التفاعل المتسلسل وتتولد الطاقة .

٢. الوقود النووي (Nuclear Fuel) : ويتكون من قضبان من المعادن الاضطرارية مثل اليورانيوم أو أي مادة أخرى مغلفة بغلاف جيد للوقاية من التآكل والتأكسد.

٣. المهدئ (Moderator) : الغرض منه هو إبطاء سرعة النيوترونات العالية الطاقة حتى تصبح سرعتها ملائمة لحدوث التفاعل المتسلسل ، وأهم المواد التي تصلح لهذا الغرض هي الكرافيت النقي والماء الثقيل (الماء الذي يحتوي على الديتريوم بدلاً من الهيدروجين وتركيبه الكيميائي D_2O) .

٤. قضبان السيطرة (Control Rods) : والغاية منها السيطرة على عملية التفاعل المتسلسل فهي تتكون من مواد لها القابلية الكبيرة على امتصاص النيوترونات مثل البورون والكادميوم ، حيث تنزل هذه القضبان في ثقوب مخصصة لها داخل قلب المفاعل ، ويمكن لهذه القضبان التحرك آلياً صعوداً ونزولاً للحفاظ على سرعة التفاعل وابقائها بالمعدل المطلوب أو ايقاف التفاعل تماماً عند الضرورة .

٥. المبرد (Coolant) : وهو المادة التي تعمل في تبريد قلب المفاعل وتخليصه من الحرارة كي لا ينصهر ويحدث التلوث وبنفس الوقت يستفاد من هذه الحرارة لتحويلها الى طاقة كهربائية . وتجري عملية التبريد بواسطة الغازات مثل ثاني أوكسيد الكاربون او الماء المضغوط

كيف يعمل المفاعل:

يبدأ تشغيل المفاعل بواسطة مصدر نيوتروني يوضع داخل المفاعل يغطي النيوترونات الأولى لحدوث التفاعل ثم تسحب قضبان السيطرة تدريجياً وبصورة بطيئة عندها يجهز المفاعل نفسه بنفسه من النيوترونات التي يحتاجها نتيجة انشطار ذرات اليورانيوم - ٢٣٥ (U^{235}). فالنيوترونات المتولدة من هذا الانشطار تتحرك بحرية داخل قلب المفاعل وتزداد اعدادها عندما يشطر جزء منها نواة U^{238} فتتحرر نيوترونات سريعة اخرى وفي هذه الاثناء تبدأ النيوترونات بفقد طاقتها العالية بسبب تصادمها مع ذرات الهيدروجين وتتحول الى نيوترونات بطيئة (سرعتها بطيئة) وعندها تتوقف انشطارات ذرات U^{238} والنيوترونات الحرارية تمتص من قبل U^{235} وبالتالي يشطر U^{235} وتعاد دورة الانشطار المتسلسلة مرة أخرى، وخلال هذه العملية داخل المفاعل فإن جزءاً من النيوترونات خارجاً عنه وترتفع نتيجة للانشطارات النووية درجة حرارة قلب المفاعل فيقوم تيار التبريد بتبريد القلب بعد أن يمر في التجاويف الحلقية لقضبان السيطرة والوقود فينقل الحرارة المتولدة الى الخارج.

وللسيطرة على النيوترونات المتسربة (الهاربة) خارج القلب يستخدم عاكس يغلف قلب المفاعل حيث يقوم هذا العاكس باعادة النيوترونات التي تحاول ترك قلب المفاعل الى داخل القلب وهكذا يحافظ قلب المفاعل على اكبر عدد ممكن من نيوتروناته.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ويمكن السيطرة على المفاعل بتحريك قضبان السيطرة الى داخل وخارج قلب المفاعل. وللوصول الى قدرة ثابتة في مفاعل ما والمحافظة عليها يجب توليد عدد النيوترونات نفسه في وحدات زمنية متعاقبة، وبعبارة اخرى يجب أن يبقى عدد النيوترونات في أجيال التفاعل المتسلسل المتعاقبة ثابتاً.

ملاحظة: تسمى النسبة بين عدد الاشطارات للجيل الواحد الى عدد الاشطارات للجيل الذي سبقه مباشرة" بعامل التكاثر أو المضاعفة (K) وهي حالات:

1. عندما تكون $K>1$ يستمر المفاعل في انتاج النيوترونات اكثر مما يستهلك وعندئذ يقال أن المنظومة في حالة فوق الحرجة، فيزداد عدد النيوترونات مع الزمن ويحصل الانفجار.
2. عندما $K<1$ يكون عدد النيوترونات المنتجة أقل من المستهلكة، وفي هذه الحالة يقال عن المنظومة بأنها تحت الحرجة، فيقل عدد النيوترونات مع الزمن ويتوقف التفاعل المتسلسل.
3. عندما تكون $K=1$ يكون معدل النيوترونات المنتجة يعادل تماماً معدل النيوترونات المستهلكة وفي هذه الحالة تسمى المنظومة بالحرجة. لذلك فان التفاعل المتسلسل يستمر ذاتياً.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

تصنيف المفاعلات النووية :-

تتم في المفاعلات النووية دراسة الانشطار النووي لتسلسل والتحكم فيه والمحافظة على استمراريته والظواهر التي تصاحبه واستغلال الطاقة التي تتحرر منه. وتصنف المفاعلات النووية وفقا للمواصفات البارزة التالية :-

١. طاقة النيوترونات :

تصنف المفاعلات الى مفاعلات حرارية وسوسطه وسريعة، فالمفاعلات الحرارية هي التي تتم عملية الانشطار فيها بواسطة نيوترونات حرارية، أما المفاعلات السريعة فتتم عملية الانشطار فيها بواسطة النيوترونات السريعة.

٢. المهدئات :

كما تصنف المفاعلات تبعاً لنوع المهدئ الذي تستعمله لتخفيض طاقة النيوترون وبالتالي سرعته وتحويله الى نيوترون حراري ومن امثلة المهدئات الكراهيت والماء الثقيل والماء الاعتيادي.

٣. ترتيب الوقود والمهدئ :

تصنف المفاعلات من حيث كونها متجانسة أو غير متجانسة ويعتمد ذلك على ترتيب الوقود والمهدئ. ففي حالة المفاعل المتجانس يخلط المهدئ مع الوقود بصورة منتظمة، أما في حالة المفاعل غير المتجانس فوقوده يكون مركز في قضبان توزع بصورة منتظمة وفق نموذج هندسي معين في المهدئ.

٤. التبريد :

وقد تصنف المفاعلات حسب العامل الحراري الذي ينقل

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الحرارة المتولدة بسبب الانشطار النووي الى خارج المفاعل ثم التخلص منها أو الاستفادة منها لأغراض مختلفة. ومن امثلة المبرد هناك مفاعلات تستخدم الماء الخفيف أو الثقيل تحت ضغط مناسب أو قد تستخدم بعض الغازات مثل He و CO_2 تحت ضغط عالي لتقوم بعملية التبريد.

تصنيف المفاعلات من حيث الهدف:-

أحيانا" تصنف المفاعلات من حيث الهدف من بنائها:

١. مفاعلات البحوث:-

ان الغاية الاساسية من عمل هذه المفاعلات هو للدراسة والبحث العلمي. وتمتاز هذه المفاعلات بأنها صغيرة الحجم وسهلة الاستخدام.

٢. مفاعلات انتاج البلوتونيوم (المفاعلات الحرارية):-

تستخدم هذه المفاعلات بشكل خاص لانتاج البلوتونيوم وتعتمد على النيوترونات الحرارية في عملية الانشطار، حيث يتولد عنصر البلوتونيوم (Pu^{239}) نتيجة امتصاص (U^{238}) للنيوترونات. تستخدم هذه المفاعلات اليورانيوم الحاوي على U^{235} و U^{238} كوقود لانتاج عنصر البلوتونيوم وتستخدم هذه المفاعلات لاغراض عسكرية وانتاج الاسلحة النووية.

٣. مفاعلات انتاج الطاقة:

يستخدم هذا النوع من المفاعلات للاغراض السلمية ولانتاج الطاقة، حيث يتم تحويل الطاقة الناتجة من الانشطار النووي الذي يحدث في قلب المفاعل الى قدرة مفيدة.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الفصل الخامس

النماذج النووية

النظريات الأساسية حول طبيعة النواة:

نظراً لعدم توفر معلومات تفصيلية وحقيقة عن طبيعة وتركيب النواة، فقد طرحت عدة نماذج (نظريات) لتفسير الظواهر النووية والتركيب النووي والقوة النووية. ومن أهم هذه النماذج:

١. نموذج قطرة السائل (Liquid-drop model)؛
٢. نموذج القشرة (الأغلفة)، (Shell model)؛
٣. النموذج البصري Optical model
٤. النموذج التجميعي Collective model

وهناك نماذج أخرى أقل أهمية وكل من هذه النماذج نجاحاً في بعض الجوانب وإخفاقاً في جوانب أخرى. وسنتطرق إلى النموذجين الأولين بصورة أوسع لأنهما أكثر النماذج نجاحاً في تفسير الكثير من الخواص النووية.

١. نموذج قطرة السائل:

اقترح بور (Bohr) هذا النموذج عام ١٩٣٧ لتفسير بعض الظواهر الفيزيائية النووية كالانبعاث النووي والانشطار النووي واستنتج معادلة طاقة الربط النووية إلا أنه لا يصف حركة النيوكليونات داخل النواة ولا كيفية تفاعلها مع بعضها.

ومن تسمية النموذج يتضح أن النواة قد شبهت بقطرة السائل ومن اسباب ومبررات التسمية هي:

١. مثلما يكبر حجم قطرة السائل بزيادة عدد جزيئات السائل نلاحظ ان حجم النواة يكبر أيضاً كلما زاد عدد نيكليوناتها أي كلما زاد العدد الكتلي (A) وتحقه المعادلة التالية:

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

٢. تبخر السائل يقابل ظاهرة النشاط الأشعاعي أو الانبعاث النووي فهروب قسم من جزيئات السائل يقابله انبعاث جسيمات β أو α من النواة.

٣. انقسام قطرة سائل كبيرة الى قطرتين صغيرتين يقابل ظاهرة الانشطار النووي (وهي انقسام نواة ثقيلة غير مستقرة الى نواتين متقاربتين بالكتلة بعد قصفها بالنيوترون).

أما الصيغة شبه النهائية التي اقترحها بور لهذه النظرية فقد اعتمدت على الفرضيات التالية:-

١. النواة تتكون من مادة غير قابلة للانضغاط ونصف قطرها R يتناسب مع $A^{1/3}$ أي أن:- $R \propto A^{1/3}$

٢. القوة النووية التي تربط بين نواتين لا تعتمد على شحنتها أي انها متساوية بجميع البيوكليونات، (أي أن القوة بين $p-p$، $n-p$، $n-n$) متساوية.

٣. القوة النووية ذات مدى قصير جداً ومشبعة أي انها تتأثر فقط بالبيوكليونات المحيطة بها، (أي أن كل نيوكليون يتأثر بالبيوكليونات المجاورة له فقط).

وحسب نموذج قطرة السائل الذي اقترحه بور فقد تم اشتقاق معادلة تجريبية لطاقة الربط النووية وتسمى ايضاً معادلة الكتلة شبه التجريبية وعبر عنها بدلالة مجموع عدد من الحدود أو التأثيرات التي تفصلها وكالتالي:

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

1. حد الحجم (T_v) Volume Term: تأثير الحجم:
ان زيادة عدد النيوكليونات (زيادة العدد الكتلي A) يسبب زيادة في حجم النواة ($V = \frac{4}{3}\pi R_0^3 A$) وان هذا يسبب زيادة في طاقة الربط الكلية للنواة أي أن:

$$T_v \propto A \Rightarrow T_v = a_v A$$

وتجريبياً وجد أن: $a_v = 14\ MeV/nucleon$ مقاسة:

$$T_v = 14A$$

2. حد السطح (T_s) Surface Term: تأثير السطح:
ان القوة النووية التي ترتبط أي نيوكليون داخل النواة مع بقية النيوكليونات تكون متشبعة وتكون طاقة ربطه كبيرة أما بالنسبة لنيوكليون واقع على سطح النواة فأن القوى النووية عليه تكون غير متشبعة وبذلك تكون طاقة ربطه أقل. ومن هذا نستنتج انه كلما زادت مساحة سطح النواة كلما قلت طاقة ربط النواة. وحيث أن مساحة سطح الكرة هو ($4\pi R^2$) فأن:

$$T_s \propto 4\pi R^2 \propto 4\pi R_0^2 A^{2/3} = a_s A^{2/3}$$

وعملياً وجد أن $a_s = 13\ MeV$ وعليه فأن:

$$T_s = -13 A^{2/3}$$

والاشارة السالبة تعني أن زيادة ربط النواة تسبب نقصان في طاقة ربطها.

٣. الحد الكولومي Coulomb Term (T_c): تأثير التنافر الكولومي:
ان البروتون والذي يحمل شحنة موجبة يتنافر مع كل البروتونات الاخرى الموجودة في النواة وهذا يعني ان زيادة عدد البروتونات (أي زيادة العدد الذري Z) ستعمل على تقليل طاقة الربط النووية للنواة.

$$\therefore T_c = \frac{3}{5}\frac{e^2}{R} Z(Z-1) \quad , \quad R = R_0 A^{1/3}$$

$$\therefore T_c = \frac{3}{5}\frac{e^2}{R_0}\cdot\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} = -a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

وقد وجد عملياً أن: $a_c = 0.72\ MeV$

ان الاشارة السالبة تدل الى أن التنافر الكولومي يسبب نقصان طاقة الربط النووية الكلية.

٤. حد عدم التناظر Asymmetry term (T_s): تأثير عدم التناظر:
يقصد بالتناظر هو مدى تناظر عدد البروتونات والنيوترونات، فأن زيادة النسبة بين النيوترونات الى البروتونات يعمل على انقاص طاقة الربط النووية الكلية. ويعطى هذا الحد بالعلاقة:

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

٥. حد الازدواج: Pairing Term (T_p): تأثير الازدواج:

لقد وجد عملياً ان الترابط بين نيوكليونين من النوع نفسه ($p-p$, $n-n$) يكون اكثر ما يمكن عندما يكون الزخم

الزاوي لكل منها العظم ما يمكن وبساوية بالمقدار ويعاكسه بالاتجاه δ وهذا التأثير يجعل النوى الزوجية - الزوجية أكثر استقراراً من النوى الزوجية - الفردية أو النوى الفردية - الزوجية وهذه بدورها أكثر استقراراً من النوى الفردي - الفردي. فإذا رمزنا لهذا الاضطراب بالرمز δ فيكون:

للنوى الزوجية - الزوجية $+\delta$

للنوى الزوجية - الفردية أو الفردية - الزوجية 0

للنوى الفردية - الفردية $-\delta$

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

لقد وجد عملياً ان النوى التي فيها $N=Z$ وبساوي عدد سحري هي الاعداد السحرية (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) تكون مستقرة وذات طاقة ربط عالية، وقد لوحظ أن النوى التي يكون فيها عدد البروتونات Z أو عدد النيوترونات N قريب من الاعداد السحرية تكون لها طاقة ربط عالية وقد تم تمثيل هذه الخاصية كحد من حدود المعادلة التجريبية ويرمز له بالرمز (η). وقد وجد عملياً ان:

$$\eta = T_{sh} = 1 \rightarrow 3 \text{ MeV}.$$

وعليه فطاقة الربط النووية وفقاً لنموذج قطرة السائل تتمثل بما يلي:

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

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

يمكن كتابة طاقة الربط النووية وصفة عموذج قطرة السائل
بدلالة متغيرين A و Z بدلاً من ثلاث متغيرات
A و Z و N وكما يلي :

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

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

$$M(A,Z) = Z m_p + N m_n - \frac{B(A,Z)}{C^2}$$

$$\therefore \boxed{M(A,Z) = Z m_p + N m_n - \left[a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(A-2Z)^2}{A} \mp \delta + \eta\right]/C^2}$$

وهذه المعادلة تسمى المعادلة شبه التجريبية للكتلة
Semi empirical mass formula
أو تسمى أيضاً معادلة وايزكر (Weizcher formula)

٣. نموذج القشرة النووي: Shell Model

ان نموذج القشرة النووي هو أحد أهم النماذج في التركيب النووي ويتميز بالفرضيات التالية:-

١. اظهرت التجارب ان النوى التي عدد بروتوناتها (Z) أو عدد نيوتروناتها (N) يساوي أحد الاعداد السحرية فانها تكون مستقرة، والاعداد السحرية هي (2، 8، 20، 28، 50، 82، 126)، وتمثل الاعداد السحرية للبروتونات والنيوترونات قشرات مغلقة (Closed shell) وتكون قشرات البروتونات وقشرات النيوترونات مستقلة عن بعضها البعض.

٢. أوضح هذا النموذج المركزي للنيوكليونات في النواة هو التأثير المتبادل بين الحركة البرمية والحركة المدارية لها. ان تأثير الحركة البرمية نتيجة دوران كل نيوكليون حول نفسه يولد عزم مغناطيسي مقداره ($S = \pm \frac{1}{2}\hbar$) واما الحركة الدورانية للنيوكليون حول مركز النواة فيولد عزماً مقداره (l) ويساوي الزخم الزاوي المداري.

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

$$1P \begin{cases} 1P_{1/2} \\ 1P_{3/2} \end{cases}$$

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

١) n : العدد الكمي الاساسي (الرئيسي) ويأخذ القيم ١، ٢، ٣، ٤، ٥، ٦، ...

٢) l : العدد الكمي المداري ويأخذ القيم ٠، ١، ٢، ٣، ٤، ٥، ٦، ...

وكل رقم من الارقام يقابل رمز معين وحسب الجدول الآتي :

l	0	1	2	3	4	5	6
الرمز	S	P	d	f	g	h	I

٣) J : يمثل الزخم الزاوي للمستوى النووي حيث :

$$J = l \mp S = l \mp \frac{1}{2}$$

٤) عدد الاحتواء الثانوي ($2J + 1$) .

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

٦) التماثل النووي (π) parity : وهو أما أن يكون زوجياً (موجباً) أو فردياً (سالباً) .

ملاحظة (1) :

تتجمع مستويات الطاقة بشكل مجاميع وتفواصل كبيرة بين المجموعة والاخرى ، وتسمى مستويات الطاقة لكل مجموعة والمتقاربة مع بعضها بالقشرة (Shell) ، وعندما تغلق القشرة فأنها تغلق بعدد سحري من النيوكليونات .

ملاحظة (2) : نستطيع ان نحدد قيم الزخم النووي والتماثل النووي لأي نواة في المستوى الارضي بالاعتماد على القواعد الآتية :

١. في حالة النوى (الزوجية - الزوجية) فأن الزخم الزاوي الكلي لها يكون صفراً للصف ($J = 0$) والتماثل موجب ($\pi = +$) أي $J^{\pi} = 0^{+}$

٢. في حالة النوى (الفردية - الفردية) فأن الزخم الزاوي الكلي للنواة يحسب من زخم آخر نيوترون أو بروتون منفرد وله قيمة محصورة بين :

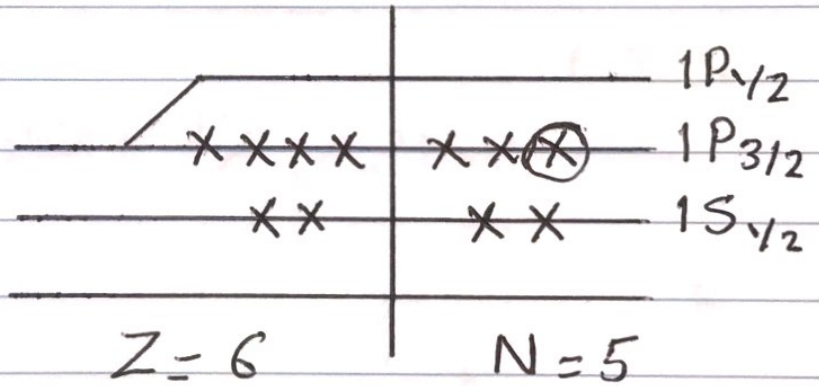
$$J_{total} = |J_p - J_n| \longrightarrow |J_p + J_n|$$

أما التماثل فيمكن حسابه من المعادلة: $\pi = (-1)^{l_p + l_n}$

٢ - في حالة النوى (الزوجية - الفردية) أو (الفردية - الزوجية) فإن الزخم الزاوي الكلي يعتمد على زخم أخر نيوكليون، أما التماثل فيحسب من المعادلة $\pi = (-1)^{l}$ حيث l عدد الكم المداري لآخر نيوكليون ينقصه وجود في النواة.

مثال (١):

أوجد التماثل (J^π) لنواة الكربون $^{11}_{6}C$ ؟



الحل: الزخم الزاوي الكلي (J_{total}) يعتمد على زخم أخر نيوكليون:

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

أما التماثل فيحسب من المعادلة $\pi = (-1)^{l}$

$\therefore \pi = (-1)^{l} = (-1)^{1} = -$

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

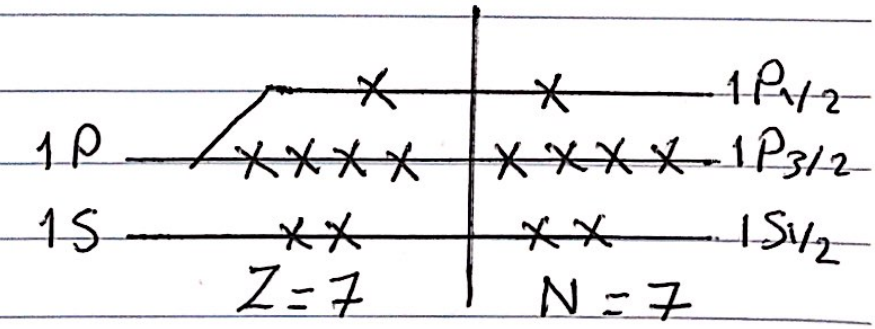
خصائص النوى المستقرة:

١. انخلاق كامل القشرة (امتلاء القشرة النووية).
٢. عدد الإلكترونات والإلكترونات والإلكترونات عالية جداً.
٣. طاقة فصل النيوترونات غير عالية جداً.
٤. بسبب طاقة الارتباط العالية خاصتها تحتاج الى طاقات كبيرة من أجل تهييجها.
٥. احتمالية حدوث تفاعل نووي لهذه النوى قليلة جداً لأن الفواصل بين مستويات الطاقة كبيرة.
٦. كتلة هذه النوى استقرارية عالية ووفرة كبيرة جداً.

مثال (٢):

جد الزخم الزاوي الكلي للنواة $^{14}_{7}N_{7}$

الحل:



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

$J_n = \frac{1}{2}$

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

$J_{total} = 0 \rightarrow 1$

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

النشاط الاشعاعي: (Radioactivity)

ان ظاهرة النشاط الاشعاعي للعناصر هي انحلال تلقائي يحدث للنوى مع انبعاث اشعة (الفا أو بيتا أو گاما ... الخ) وتكون هذه الظاهرة تكون على نوعين :

١. النشاط الاشعاعي الطبيعي (Natural radioactivity) .

٢. النشاط الاشعاعي الصناعي (Artifical radioactivity) .

ان معظم العناصر الثقيلة ($Z > 82$) الموجودة في الطبيعة والتي تحتوي على اليورانيوم والثوريوم لها خاصية النشاط الاشعاعي الطبيعي (باستثناء البوتاسيوم K^{40} ($t_{1/2} = 1.28 \times 10^9 y$) والكاربون C^{14} ($5730 y$) اللذين يعدان من العناصر الخفيفة . أما النشاط الاشعاعي الاصطناعي فيحدث في المختبرات من خلال التفاعلات النووية .

قانون انحلال النشاط الاشعاعي (Radioactive Decay Law)

لنفرض أن N من النوى المشعة موجودة في عينة ما في الزمن t والتي لم تتحلل بعد، لذا فأن العدد المتحلل dN خلال فترة زمنية dt (أي من t الى $t+dt$) يجب أن يتناسب مع N و dt أي أن :

$$-dN \propto N dt \quad \text{---------- (1)}$$

ان الاشارة السالبة تعني أن هناك نقصاً في عدد النوى المشعة . وعند تحويل التناسب الى معادلة :

$$-dN = \lambda N dt \quad \text{---------- (2)}$$

حيث λ هي كمية ثابتة تسمى ثابت الانحلال

ومن المعادلة رقم (2) يمكن كتابتها كالآتي:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \text{——— (3)}$$

وبإجراء عملية التكامل مع المعادلة (3):

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

$$\ln N = -\lambda t + C \quad \text{——— (4)}$$

حيث C ثابت التكامل ويمكن تحديد قيمته من الشروط الابتدائية حيث $N = N_0$ عند الزمن (t_0) أي $t = 0$.

$$\therefore \ln N_0 = 0 + C$$

$$C = \ln N_0$$

∴ قيمة الثابت C هي:

ويتعويضها في المعادلة رقم (4):-

$$\therefore \ln N = -\lambda t + \ln N_0$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

وبأخذ لوغاريتم الطرفين:-

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

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{——— (5)}$$

وهو يمثل القانون الأسي للانحلال الاشعاعي.

ويمكن كتابة هذا القانون بدلالة الفاعلية الاشعاعية A والتي تعرف بأنها معدل الانحلال للنشاط الاشعاعي.

$$\text{activity}(A) = -\frac{dN}{dt}$$

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$ ومن معادلة رقم (3)

$$\therefore A = \lambda N \quad \text{——} (6)$$

وبضرب طرفي المعادلة (5) بـ λ نحصل على:

$$\lambda N = \lambda N_0 \bar{e}^{\lambda t}$$

$$\therefore A = A_0 \bar{e}^{\lambda t} \quad \text{——} (7)$$

عمر النصف (Half Life) :

المقصود بعمر النصف للنظير هو الزمن اللازم لأن تقل نصف النوى المشعة، أو الزمن اللازم لكي تصبح الفاعلية الاشعاعية للنظير المشع نصف قيمتها الابتدائية $(A_0/2)$، وهذا يعني أن $N=\frac{N_0}{2}$ أو $A=\frac{A_0}{2}$ بعد مرور فترة زمنية t مساوية لعمر النصف أي $(t=t_{1/2})$.

وبعد مرور ضعف عمر النصف $2t_{1/2}$ فإن $N=\frac{N_0}{4}$ ، $A=\frac{A_0}{4}$ وهكذا. ويمكن ايجاد علاقة رياضية تربط بين عمر النصف وثابت الانحلال λ وذلك باستخدام المعادلة رقم (5):

$$N = N_0 \bar{e}^{\lambda t}$$

بعد مرور فترة زمنية $t=t_{1/2}$ فإن $N=\frac{N_0}{2}$ وبتعويضها في المعادلة رقم (5) نحصل على

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

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

وبأخذ اللوغاريتم الطبيعي للطرفين:

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

$$\ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

$$\therefore t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \text{——— (8)}$$

$$\text{or} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{t_{1/2}} \quad \text{——— (9)}$$

ان نصف العمر $(t_{1/2})$ وثابت الانحلال (λ) هما من الخصائص الثابتة للعنصر المشع.

ثابت الانحلال (Decay constant λ)

يمكن ايجاد قيمة ثابت الانحلال وذلك بتحويل المعادلة رقم (7) من معادلة اسية الى معادلة خطية وذلك بأخذ لوغاريتم الطرفين

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

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

$$\ln \frac{A}{A_0} = \ln\left(e^{-\lambda t}\right)$$

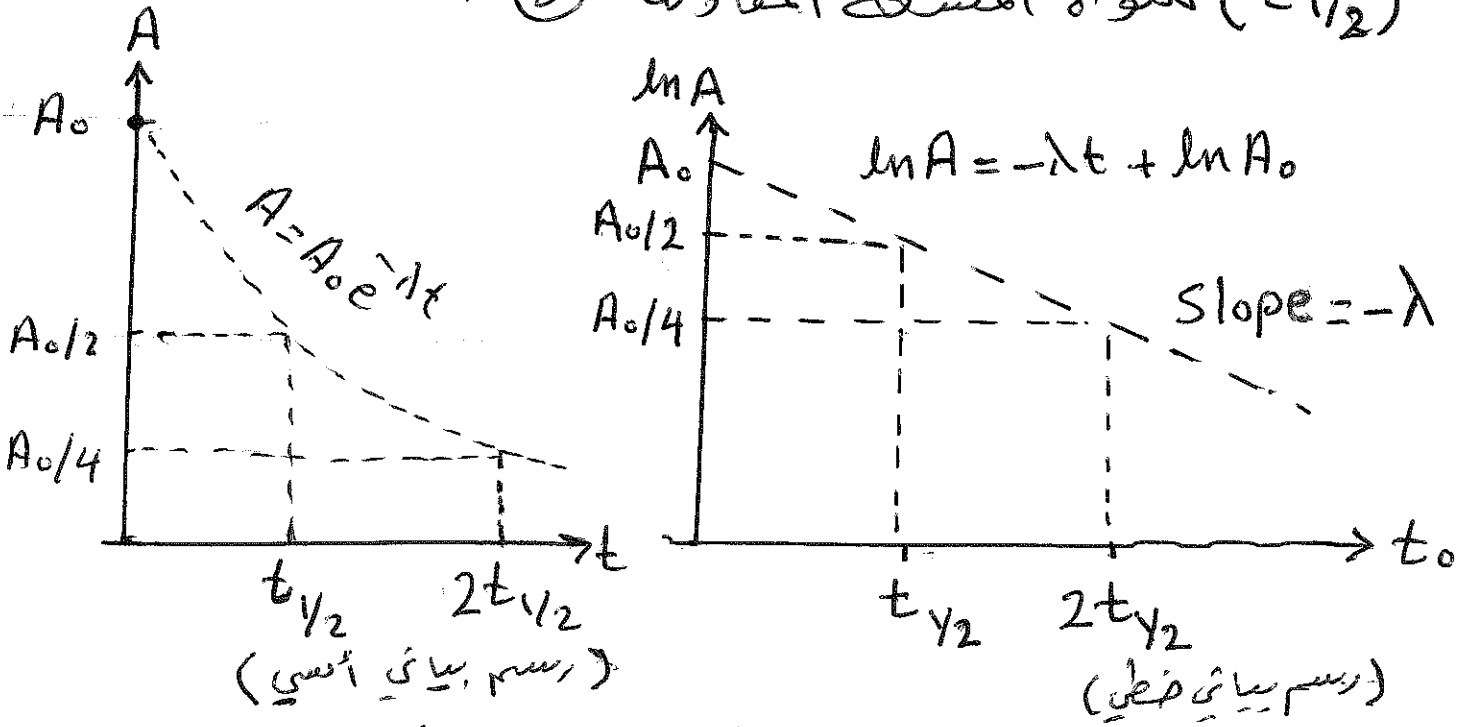
$$\ln A - \ln A_0 = -\lambda t$$

$$\text{or} \quad \ln A = \ln A_0 - \lambda t \quad \text{——— (10)}$$

من المعادلة رقم (١٥) نلاحظ أن ($\ln A_0$) هو ثابت
ويمثل المقطع الصادي ويمكن كتابتها كما يلي

$$\ln A = -\lambda t + \ln A_0$$

وعند رسم هذه العلاقة على ورق بياني نصف لوغاريتمي (Semilog) بين $\ln A$ على المحور الصادي و الزمن t على المحور السيني يحصل على خط مستقيم ميله يساوي ($-\lambda$) ومن معرفة ثابت الانحلال (λ) يمكن حساب العمر النصفي ($t_{1/2}$) للنواة المشعة المعادلة (٩) :



معدل العمر (Mean Life τ)

وأحياناً يسمى متوسط العمر (τ أو T) وهو الزمن الذي تبقى فيه النواة قبل انحلالها ، أو معدل الزمن اللازم لانحلال كل نواة على انفراد وعلى هذا فإن معدل العمر يساوي العمر الكلي لجميع النوى مقسوماً على عدد النوى التي كانت موجودة عند البداية (N_0) :

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \qquad (١١)$$

من المعادلة رقم (11) يتضح بأن معدل العمر هو مقلوب ثابت الأنحلال. ومنه الممكن إيجاد علاقة بين عمر النصف ومعدل العمر كالآتي

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\frac{0.693}{t_{1/2}}} = \frac{1}{0.693} \cdot t_{1/2} = 1.44\, t_{1/2}$$

$$\therefore \tau = 1.44\, t_{1/2} \quad \text{——— (12)}$$

أو

$$t_{1/2} = 0.693\, \tau \quad \text{——— (13)}$$

ومن الممكن حساب عدد النوى المشعة المتبقية (أو النشاط الإشعاعي المتبقي) بعد مرور زمن يعادل معدل العمر، أي عندما $t = \tau$

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

$$N = N_0 e^{-\lambda \tau}$$

وبما أن $\tau = \frac{1}{\lambda}$

$$\therefore N = N_0 e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} = N_0 e^{-1}$$

$$N = \frac{N_0}{e} = N_0 \cdot \frac{1}{e} = 0.368\, N_0$$

وكذلك الفاعلية تصبح

$$A = \frac{A_0}{e} = 0.368 A_0$$

وهذا يعني أن كل من عدد النوى والفاعلية يقل بمقدار ($\frac{1}{e} = 0.368$) من قيمتها الأصلية بعد مرور فترة زمنية تقدر بمعدل العمر ($t = \tau$).

مثال: احسب ثابت التحلل للبورانيوم ^{235}U (عمره النصفي يساوي 7.1×10^8 year)، وما هو عدد التحللات في الثانية الواحدة لـ (0.2 gm) من ^{235}U بوحدة الكوري؟

الحل:

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

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

2) $$A = \lambda N$$

$$N = \frac{m \times Na}{A}$$

حيث $m = w$ = كتلة المادة

Na عدد افوجادرو

A العدد الكتلي

$$\therefore N = \frac{0.2 \times 6.023 \times 10^{23}}{235} = 5.1277 \times 10^{20} \ atom$$

$$\therefore A = \lambda N = 3.095 \times 10^{-17} \times 5.1277 \times 10^{20}$$

$$= 1.587 \times 10^4 \ dis/sec$$

$$\therefore A = \frac{1.587 \times 10^4}{3.7 \times 10^{10}} = 4.3 \times 10^{-7} \ Curie$$

where $1 Ci = 3.7 \times 10^{10}$

مثال: اذا علمت أن عمر النصف لعنصر مشع يساوي (20 يوم) جد ؟

١. الزمن اللازم لأنحلال $\frac{3}{4}$ ذراته الأصلية ؟

٢. الزمن اللازم لبقاء $\frac{1}{8}$ ذراته الاصلية دون انحلال ؟

٣. معدل عمر ذلك النظير ؟

الحل:

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

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

$2^{-2} = e^{-\lambda t}$

$\ln 2^{-2} = -\lambda t$

$-2 \ln 2 = -\lambda t$

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

$\therefore t = 2 \times 20 = 40$ days.

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

$-3 \ln 2 = -\lambda t$

$t = 3 \times \frac{\ln 2}{\lambda} = 3 \times t_{1/2} = 3 \times 20$

$t = 60$ days

3) $\tau = \frac{1}{\lambda}$, $\lambda = \frac{0.693}{t_{y_2}} \Longrightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{20 \times 24 \times 60 \times 60}{0.693}$

$\tau = \frac{1}{\lambda} = 2.4 \times 10^{6}$ sec $= 27.7$ days.

وحدات النشاط الإشعاعي (Units of Radioactivity)

١. الكيوري : Curie (Ci)

يعرف الكيوري على انه فعالية غرام واحد من نظير الراديوم Ra^{226} (عمره النصفي $t_{1/2}=1620$ y) . ويمكن حساب الكيوري بعدد الانحلالات/ثانية كما يلي :

$$Activity(A) = \left(-\frac{dN}{dt}\right) = \lambda N$$

$$\lambda = \frac{0.693}{1620} = 1.36 \times 10^{-11}\ sec^{-1}$$

$$N = \frac{W(g) \times Na}{A} = \frac{1 \times 6.022 \times 10^{23}}{226}$$

$$\therefore N = 0.0266 \times 10^{23}\ atom/mole$$

$$\therefore A = \lambda N = 1.36 \times 10^{-11} \times 0.0266 \times 10^{23}$$

$$A = 3.7 \times 10^{10}\ dis/sec$$

$$\therefore 1\ Ci = 3.7 \times 10^{10}\ dis/sec$$

وقد اعتمدت وحدة دولية تدعى البيكرل (نسبة الى العالم بيكريل) على أنها تمثل انحلال واحد في الثانية (dis/sec).

$$i.e\quad 1\ Bq = 1\ dis/sec$$

$$\therefore 1\ Ci = 3.7 \times 10^{10}\ Bq$$

$$1\ Ci = 10^{6}\ \mu Ci$$

$$1\ \mu Ci = 3.7 \times 10^{4}\ dis/sec$$

$$or\quad 1\ \mu Ci = 3.7 \times 10^{4}\ Bq$$

مثال: تم الحصول على النظير المشع ^{24}Na (نظير الصوديوم عمره النصفي $t_{1/2}=15\,h$) تم الحصول على 5 ميكروغرام من هذا النظير من خلال تشعيع الصوديوم المستقر ^{23}Na بقصفه بالنيوترونات. كم سيبقى من النظير المشع بعد مرور 24 ساعة؟

الحل: نستخدم قانون الانحلال الإشعاعي:

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

$$= 5 \times e^{-\frac{0.693}{15} \times 24} = 5 \times 0.33$$

$$\therefore N = 1.65\ \mu gm.$$

ملاحظة: عادة العمر النصفي والزمن المنقضي قبل اجراء القياس هما بالساعات لذا فليس هناك ضرورة لتحويلها الى ثواني.

مثال: يوجد في جسم الانسان الاعتيادي 140 غم من البوتاسيوم (K)، وان نسبة النظير المشع (K^{40}) والذي عمره النصفي ($t_{1/2}=1.26\times10^9\ y$) في البوتاسيوم (K) هي 1.18×10^{-3}. ما عدد الانحلالات التي تحدث في الجسم في كل ثانية وما مقدار الفاعلية الإشعاعية بواحدات الكيوري التي يولدها النظير المشع؟

الحل: عدد الانحلالات في الثانية يمثل الفاعلية الإشعاعية للنظير المشع فقط K^{40}، أي أن:

$$A = \lambda N$$

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{1.26\times10^9} = \frac{0.693}{1.26\times10^9 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60}$$

$$\lambda = 0.174 \times 10^{-16} \ sec^{-1}$$

أما N فيمكن حسابها بعد إيجاد وزن النظير المشع K^{40} الموجود بنسبة 1.18×10^{-3} في البوتاسيوم الطبيعي K^{40}. وكما يلي:

$$m(K^{40}) = 140 \times 1.18 \times 10^{-3} = 165.2 \times 10^{-3} \ gm$$

ثم نجد عدد النوى المشعة:

$$N = \frac{W(gm) \times Na}{A} = \frac{165.2 \times 10^{-3} \times 6.023 \times 10^{23}}{40}$$

$$\therefore N = 25 \times 10^{20} \ atom/mole.$$

$$\therefore A = \lambda N = 0.174 \times 10^{-16} \times 25 \times 10^{20}$$

$$A = 4.35 \times 10^{4} \ dis/sec \ (Bq)$$

وللتحويل من انحلال/ثانية (dis/sec) الى وحدات الكيوري (Ci) يجب التقسيم على معامل التحويل Ci فنحصل على:

$$1 \ dis/sec = \frac{1}{3.7 \times 10^{10}} \ Ci$$

$$A = \frac{4.35 \times 10^{4}}{3.7 \times 10^{10}} = 1.17 \times 10^{-6} \ Ci = 1.17 \ \mu Ci$$

Total Number of Radioactive Nuclei

العدد الكلي للنوى المشعة

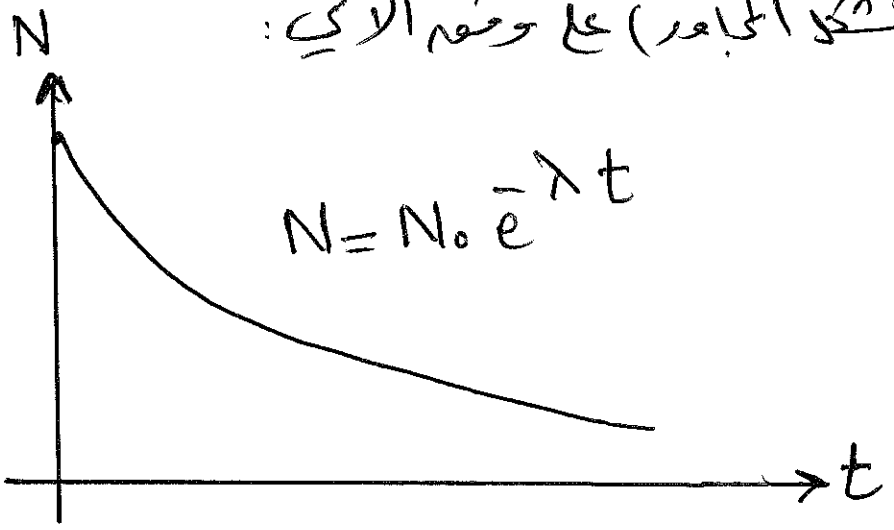
ان تناقص الانحلال $N = N_0 e^{-\lambda t}$ يسمح لنا بتقدير عدد النوى غير المتحللة بعد فترة زمنية t، غير انه يتطلب معرفة عدد النوى الاصلية المشعة N_0 وهذه الكمية يمكن حسابها بطريقتين

الطريقة الاولى: تتم بوزن كمية من النظير المشع مهما كانت صغيرة وذلك باستخدام ميزان دقيق جداً. واذا لم يكن النظير نقياً فمن الضروري معرفة تركيبه الكيميائي بدقة. ومن العلاقة:

$$N = \frac{W(gm) \times N_a}{A}$$

حيث $W(gm)$ هي وزن النظير المشع النقي (أو نسبة وزنه 131 كامنا على شكل مركب) بالغرامات و N_a عدد اڤوكادرو و A العدد الكتلي. حيث يمكن إيجاد عدد النوى الكلي.

الطريقة الثانية: هي من حساب المساحة المحصورة تحت منحني الاضمحلال (الشكل المجاور) على وفق الآتي:



$$Area = \int_0^\infty (N\lambda)\,dt = \int_0^\infty (N_0\lambda)\, e^{-\lambda t}$$

$$= N_0\lambda \left[-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right]_0^\infty$$

$$= -N_0 \left[\frac{1}{e^{\lambda t}} \right]_0^\infty$$

$$= -N_0 \left[\frac{1}{\infty} - \frac{1}{1} \right] = N_0$$

$$\therefore Area = N_0$$

وهذا يعني ان المساحة تحت المنحني تساوي العدد الكلي للنوى الموجودة منذ البداية.

الفعالية النوعية: Specific Activity

تعرف الفعالية النوعية على انها العلاقة بين فعالية المادة المشعة وكتلتها . اي ان :

$$S.A = \text{Specific Activity} = \frac{\text{Activity}}{\text{Weight}} = \frac{A}{W}$$

الفعالية ← A

$$\therefore S.A = \frac{A}{W} = \frac{N\lambda}{W} \quad \text{و} \quad W = \frac{N \times A}{Na} \leftarrow \text{العدد الكتلي}$$

وبالتعويض عن قيمة W نحصل على :

$$S.A = \frac{N\lambda}{W} = \frac{N\lambda}{N \times A} \cdot Na = \frac{\lambda}{A} \cdot Na$$

$$S.A = 6.023 \times 10^{23} \cdot \frac{\lambda}{A} \quad (dis/sec/gm)$$

$$S.A = \frac{6.023 \times 10^{23}}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \frac{\lambda}{A} = 1.63 \times 10^{13} \ \frac{Curie}{gm}$$

$$S.A = 1.63 \times 10^{13} \times \frac{0.693 \times t_{1/2}}{A} = \frac{1.13 \times 10^{13}}{A\, t_{1/2}} \ \frac{Ci}{gm}$$

الرونتكن (R): (Rontegen)

هي وحدة جرعة التعرض للاشعاع وتعرف على انها كمية الاشعاع الذي يمر في $1\,cm^3$ من الهواء الجاف (يقابل كتلة مقدارها 0.001293 غم) عند درجة حرارة $0^\circ C$ وضغط جوي 760 ملم زئبقي ويؤدي الى انتاج شحنة مقدارها (1 esu) اي واحد شحنة كهروستاتيكية .

حيث أن :

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ coulomn} = 4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}$$

وكثافة الهواء هي : 0.001293 gm/cm^3

أي أن كتلة 1 cm^3 من الهواء هي 0.001293 gm

$$\therefore 1 \text{ Rontgen} = 1R = \frac{1 \text{ esu}}{0.001293 \text{ gm}}$$

$$1 \text{ esu} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{4.8 \times 10^{-10}}$$

$$\therefore 1R = \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{4.8 \times 10^{-10} \times 0.001293 \text{ kg}}$$

$$\therefore \boxed{1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}}$$

Radiation absorbed dose (Rad) : جرعة الامتصاص

وحدة الراد هي وحدة جرعة الاشعاع الممتص وهي وحدة مهمة لقياس الطاقة الممتصة منه قبل وحدة الكتلة من النسيج وليس الهواء .

$$1 \text{ Rad} = 100 \text{ erg/gm} = 10^{-2} \text{ Joule/kg}$$

$$1R = 10^6 \text{ dis/sec}$$ أما بالانكليزية بالثانية فيساوي

$$1R = \frac{1}{0.88} R \quad (R = \text{Rontgen})$$

∴ الجرعة الممتصة (Rad) = $\frac{\text{الطاقة الممتصة في النسيج الحي}}{\text{كتلة النسيج}}$

أما مقدار جرعة الامتصاص (Rad) بالوحدات الدولية (SI) فتسمى الكري (Gray (Gy)) وهي تساوي امتصاص طاقة مقدارها جول واحد (1 J) من مثل كيلوغرام واحد من المادة المعنية (1 J/kg). لذا:

$$1\ Gy = 100\ rad$$

تحديد التاريخ: يمكن استخدام الفيزياء النووية في تحديد تاريخ وعمر تكوين المعادن في الأرض أو في النيازك وكذلك تقدير عمر الحضارات القديمة. وبما أنه من الصعب تحديد عدد النوى N_0 التي كانت موجودة عند الزمن t_0 والتي قد تكون خارج الكتلة البيولوجية (10^9 y) والطريقة البديلة هي حساب النسبة بين عدد النوى الأم $N_p(t_1)$ في الوقت الحاضر الى النوى الوليدة $N_D(t_1)$ والتي يمكن قياسها الآن أي في الوقت الحاضر (t_1). فلو فرضنا أن النوى الوليدة $N_D(t_0)$ في بداية الزمن t_0 غير موجودة على الإطلاق فإن عدد النوى الكلي في الوقت الحاضر (الأم والوليدة) يساوي عدد نوى الأم عند بداية الزمن $N_p(t_0)$

وعليه:

$$N_D(t_1) + N_p(t_1) = N_p(t_0) \quad \text{——— ①}$$

وحسب قانون النشاط الإشعاعي بالنسبة للنوى الأم:

$$N_p(t_1) = N_p(t_0)\, e^{-\lambda(t_1 - t_0)}$$

$$\therefore N_p(t_1) = N_p(t_0)\, e^{-\lambda \cdot \Delta t} \quad \text{——— ②}$$

حيث Δt هو عمر العينة ويمكن إيجاده كما يلي:

بأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة ② نحصل على:

$$\ln N_p(t_1) = \ln \left[N_p(t_0)\, e^{-\lambda \Delta t} \right]$$

$$\therefore \ln N_p(t_1) = \ln N_p(t_0) - \lambda \Delta t$$

$$\lambda \Delta t = \ln N_p(t_0) - \ln N_p(t_1)$$

$$\lambda \Delta t = \ln \frac{N_p(t_0)}{N_p(t_1)}$$

$$\therefore \Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_p(t_0)}{N_p(t_1)} \qquad \text{——— (3)}$$

من المعادلة رقم (1) وبقسمة جميع الحدود على $N_p(t_1)$ نحصل على:

$$\frac{N_D(t_1)}{N_p(t_1)} + 1 = \frac{N_p(t_0)}{N_p(t_1)} \qquad \text{——— (4)}$$

وبالتعويض في معادلة رقم (3) نحصل على:

$$\Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_D(t_1)}{N_p(t_1)} \right) \qquad \text{——— (5)}$$

من المعادلة رقم (5) نلاحظ أنه عدم الحاجة الى معرفة عدد ذرات الأم في بداية الزمن ($t_0 = 0$) فإذا علمنا ثابت الانحلال λ (الذي يمكن قياسه مختبرياً كما مر سابقاً) وكذلك النسبة الحالية $[N_D(t_1) / N_p(t_1)]$ والتي يمكن معرفتها بالطرق الكيميائية فإن عمر العينة يمكن معرفته بدقة معقولة (تعتمد على دقة λ والنسبة بين ذرات البنت الى ذرات الأم).

ان أحدث تقدير لعمر الأرض تم الحصول عليه بهذه الطريقة هو (4.5×10^9 year)

أما تحديد تاريخ عينات من مادة عضوية حديثة العهد نسبياً فيتم ذلك بطريقة استخدام نظير الكاربون المشع (C^{14}).

ان ثاني اوكسيد الكاربون CO_2 الذي يمتص من قبل المواد العضوية (النباتات مثلاً) يتكون من:

CO_2 — C^{12} 98.89 % } نظائر مستقرة
C^{13} 1.11 % }
C^{14} →

يتكون من قصف النيتروجين الجوي بالاشعة الكونية.

يمتص النبات CO_2 ثم يترسب C^{14} في النباتات وينتقل الى الكائنات الحية. عندما تكون الكائنة الحي ما فأنه يخرج من حالة التوازن ويتوقف عن امتصاص CO_2 وبالتالي عن امتصاص C^{14} بعدها يبدأ C^{14} بالانحلال الاشعاعي. ومن قانون الانحلال الاشعاعي يمكن حساب عمر العينة علماً انه عمر النصف للكاربون المشع (C^{14}) هو ($t_{1/2} = 5730$ year).

مثال:

2 gm من الكاربون في قطعة خشبية وجدت في معبد قديم واعطت الفعالية التالية (20 dis/min) للكاربون C^{14}. ما عمر العينة الخشبية اذا علمت أن الفعالية النوعية للنظير المشع C^{14} في الكاربون شابة وتساوي (15 dis/min/gm) علماً ان عمر النصف لنظير الكاربون C^{14} هو ($t_{1/2} = 5730$ year).

الحل:

$$S.A = \frac{A}{m} = \frac{20 \text{ dis/min}}{2} = 10 \text{ dis/min/gm}$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow 10 = 15\, e^{-\frac{0.693}{5730} t}$$

$$\therefore t = 3353 \text{ year}.$$

Gamma Decay اضمحلال كاما

إن أشعة كاما هي الاسم الذي يطلق عادة على الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يكون أصله من النواة.
وهي عبارة عن سيل من الفوتونات تسير بسرعة الضوء ولها طاقة وزخم معينان:

$$E = h\nu \qquad \text{(الطاقة)}$$

حيث:
h ثابت بلانك $(6.626075\times10^{-34}\ J.S)$.
ν التردد الموجة.

$$E = h\nu \quad , \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\therefore \boxed{E = h\frac{c}{\lambda}}$$

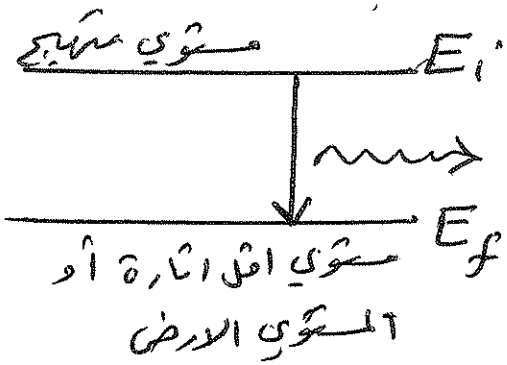
حيث c سرعة الضوء $(3\times10^{8}\ m/sec)$.
λ الطول الموجي لفوتون اشعة كاما (وعادة يقاس بالفيرمي Fm).

علاقة الكتلة والطاقة والزخم هي: -

$$\boxed{E = mc^2 = pc}$$ $p \rightarrow$ زخم الفوتون

تتراوح طاقة اشعة كاما [0.1 - 10 MeV]
وتقابل اطوال موجية [100 - 10^4 Fm]

ان منشأ اشعة كاما هو النواة المتهيجة ، فعندما تنتقل النواة المتهيجة من المستوي المتهيج الى المستوى الأرضي أو اى مستوي اقل اثارة فأن تنبعث طاقة على شكل فوتونات لأشعة كاما .



حيث E_i هو المستوي الاصلي . (Initial level)

E_f هو المستوي النهائي . (Final level)

ان أشعة كاما هي اشعة كهرومغناطيسية لها مجالان كهربائي ومغناطيسي متعامدان على بعضهما .

ان الشحنات الموجبة داخل النواة (البروتونات) تدور داخل النواة وتدور حول نفسها (البرم الذاتي) فتولد تيار كهربائي وهذا بدوره يولد مجال مغناطيسي فيكون لكاما خطيت كهربائية ومغناطيسية .

تعتمد اشعة كاما على :-

① الفرق في الطاقة بين المستوي المتهيج والارضي او الاقل تهيجاً .
② الزخم الزاوي المداري (L) .
③ التماثل للمستويين (π) .

ولربط طاقة فوتون كما بطول موجته يتقدم:

$$E(eV) = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E(eV) = \frac{(6.626075\times10^{-34}\ J\cdot sec)(3\times10^{8}\ m/sec)}{\lambda}$$

وان: $1\ eV = 1.6\times10^{-19}\ J \Rightarrow 1\ J = \frac{1}{1.6\times10^{-19}}\ eV$

$1\ m = 10^{10}\ A^\circ \Rightarrow 1\ A^\circ = 10^{-10}\ m = 10^{5}\ Fm$

وبتحويل الوحدات المطلوبة من الجول الى الالكترون فولت وفي طول الموجة الى الانكستروم تكون الطاقة كما يلي:

$$E(eV) = \frac{(6.626\times10^{-34}/1.6\times10^{-19})\ eV\cdot sec\ (3\times10^{8}\times10^{10})\ A^\circ/sec}{\lambda}$$

$$\therefore E(eV) = \frac{12.4\times10^{3}\ eV\cdot A^\circ}{\lambda}$$

وبالتعويض عن $(1A^\circ = 10^{5}\ Fm)$ و $(1\ eV = 10^{-6}\ MeV)$

نحصل على الطاقة بوحدات (MeV) اذا علمنا الطول الموجي بدلالة الفيرمي (Fm)

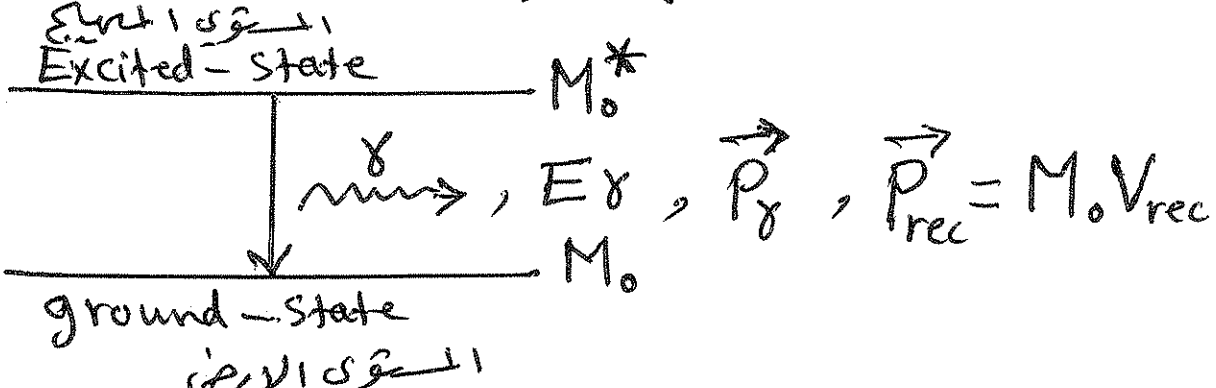
$$\therefore E(MeV) = \frac{12.4\times10^{3}\times10^{-6}\times10^{5}}{\lambda(Fm)} = \frac{12.4\times10^{2}}{\lambda(Fm)}$$

$$\therefore E(MeV) = \frac{1.24\times10^{3}}{\lambda(Fm)}$$

حساب الطاقة في انحلال كاما:

ان التحلل باشعاع اشعة كاما هو عملية اشعاع أشعة كهرومغناطيسية من النواة عند انتقالها من حالة متهيجة الى حالة اخرى اقل تهيجاً أو الى الحالة الارضية؛

فاذا فرضنا ان نواة متهيجة كتلتها الكونية (M_o^*) تشعت اشعة كاما وتتحول الى المستوي الارضي لتكون النواة النهائية التي كتلتها الكونية (M_o) كما في الملاحظ أدناه



حيث E_γ طاقة اشعة كاما.

$\vec{P}_\gamma$ الزخم الخطي لفوتون اشعة كاما.

$\vec{P}_{rec}$ زخم النواة المرتدة (recoil) في حالتها النهائية.

$\vec{V}_{rec}$ سرعة النواة المرتدة.

وبتطبيق قانون حفظ الزخم الخطي وقانون حفظ الطاقة نجد أن:

$$0 = \vec{P}_\gamma + \vec{P}_{rec}$$

$$\therefore P_\gamma = P_{rec} \quad \text{——} \quad (1)$$

أي أن النواة ترتد بزخم يساوي زخم الفوتون المنبعث ولكن يعاكسه في الاتجاه.

$$E_i = E_f + E_\gamma + T_{rec} \quad \text{——— (2)}$$

حيث E_i طاقة النواة المتهيجة قبل انبعاث اشعة كاما.

E_f طاقة النواة بعد انبعاث اشعة كاما.

E_γ طاقة فوتون اشعة كاما المنبعث.

T_{rec} الطاقة الحركية للنواة المرتدة (recoil nucleus)، وتساوي ($T_{rec} = \frac{1}{2} M_o V_{rec}^2$).

ومن المعادلة رقم (2):

$$E_i - E_f = E_\gamma + T_{rec}$$

ويعبر عن طاقة انحلال كاما (Q_γ) على انها تساوي:-

$$Q_\gamma = E_\gamma + T_{rec} \quad \text{——— (3)}$$

$$\therefore Q_\gamma = E_i - E_f \quad \text{——— (4)}$$

ومن المعادلة رقم (3) نحصل على E_γ كما يلي:

$$E_\gamma = Q_\gamma - T_{rec} \quad \text{——— (5)}$$

ولحساب الطاقة الحركية للنواة المرتدة نستخدم العلاقات التالية:-

$$T_{rec} = \frac{1}{2} M_o V_{rec}^2 \times \frac{M_o}{M_o}$$

$$\therefore T_{rec} = \frac{M_o^2 V_{rec}^2}{2M_o} = \frac{P_{rec}^2}{2M_o}$$

وصد المعادلة رقم ① نجد أن:

$$P_\gamma = P_{rec}$$

$$\therefore T_{rec} = \frac{P_\gamma^2}{2M_0} \times \frac{c^2}{c^2}$$

$$\therefore \boxed{T_{rec}} = \frac{P_\gamma^2 c^2}{2M_0 c^2} = \boxed{\frac{E_\gamma^2}{2M_0 c^2}} \quad \text{---} \quad (6)$$

ملاحظة ①: اعتبرنا هنا أن ($E_\gamma = P_\gamma c$) لأن الكتلة السكونية لفوتونات كاما تساوي صفر وبذلك نحصل على العلاقة التالية:

$$E_\gamma^2 = P_\gamma^2 c^2 + M_\gamma^2 c^4 = P_\gamma^2 c^2$$

وبالتعويض عن قيمة T_{rec} في المعادلة رقم (5).

$$\boxed{E_\gamma = Q_\gamma - \frac{E_\gamma^2}{2M_0 c^2}} \quad \text{---} \quad (7)$$

ملاحظة ②: يمكن اهمال (T_{rec}) في المعادلة (7) لصغر قيمتها.

مثال: لنفرض ان طاقة كاما المنبعثة هي ($E_\gamma = 2\ MeV$) وان الكتلة السكونية لنواة ($M_0 = 50\ amu$). فيمكن حساب طاقة الارتداد من المعادلة ⑥ كما يلي

$$T_{rec} = \frac{E_\gamma^2}{2M_0 c^2} = \frac{4}{2 \times 50 \times 931.5} = 43\ eV$$

التحول الداخلي (Internal Conversion):

في هذه الحالة، النواة المثارة (المتهيجة) لا تفقد طاقتها ببعث اشعة گاما وانما بإعطاء جزء منه هذه الطاقة الى أحد الالكترونات في المدار الذري الخارجي (K مثلاً أو L أو M) ليسبب ذلك انبعاث الالكترون من مداره وتنتقل النواة الى مستوى طاقة ادنى ويسمى الالكترون المقذوف بالكترون التحول (Conversion electron) وتسمى هذه 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 گاما الخارجة من النواة.

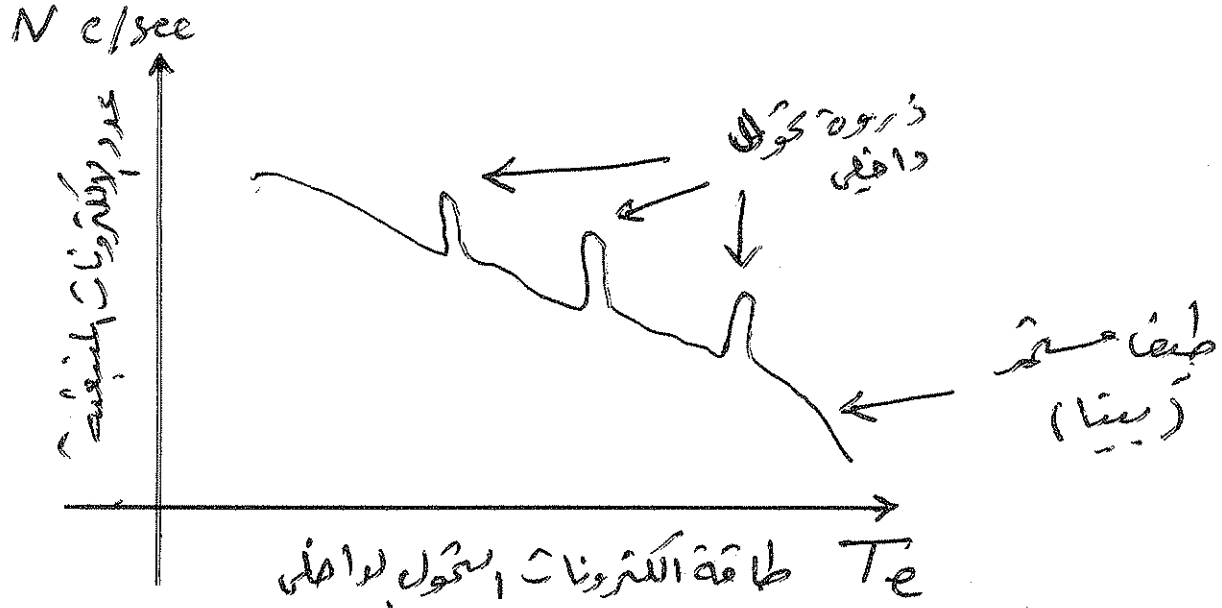
B_e طاقة ربط الالكترون.

E_i طاقة المستوى المتهيج للنواة

E_f طاقة المستوى النهائي للنواة.

ان انطلاق هذه الالكترونات يترك فراغاً في المدار الذي كان فيه، فاذا انطلق الالكترون من المدار K مثلاً فان هناك الكترون من المدار L سوف يهبط الى المدار K ليملأ الفراغ مؤدياً الى انبعاث أشعة سينية (X-ray) طاقتها تساوي الفرق بين طاقتي الالكترون في K و L.

وبما ان طاقة ارتباط الالكترون تتغير بتغير المدار الذري لذلك يكون طيف الكترونات التحول الداخلي خطياً. واذا ما جمعت هذه الأطياف مع طيف بيتا المستمر فان ذروتها ستطفو فوق الطيف المستمر لبيتا كما في الشكل التالي

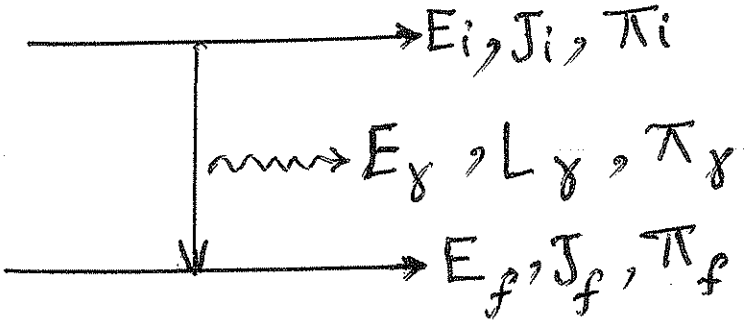


قواعد الاختيار لأشعة كاما:

Selection rules for γ-decay:

وهي الشروط الواجب تحققها لكي تنبعث أشعة كاما وتشمل:

١. قانون حفظ الطاقة



لانبعاث اشعة كاما يجب ان تنتقل النواة من مستوى عالي الطاقة الى مستوى واطيء الطاقة، وطاقة اشعة كاما (E_γ) تساوي تقريباً الفرق بين طاقتي المستويين على اعتبار أن الطاقة الحركية للنواة الوليدة (البنت) قليلة وتهمل عادة مقارنة بـ (E_γ)، أي أن

$$Q_\gamma = E_i - E_f = E_\gamma + T_D \cong E_\gamma$$

حيث T_D الطاقة الحركية للنواة البنت وتساوي صفر تقريباً.

٤. قانون حفظ الزخم الزاوي:

اذا كان الزخم الزاوي للنواة الأم 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 أن الزخم الزاوي المداري L_γ يأخذ القيم:

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

٥. قانون حفظ التماثل (parity):

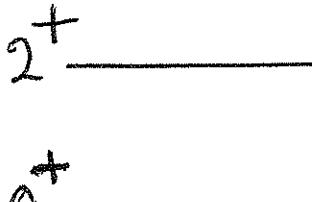
ان التماثل أو (التناظر) π للانتقالين الكهربائي والمغناطيسي يخضعان للقواعد التالية:

للانتقال الكهربائي $\pi_\gamma(E) = (-1)^L$

للانتقال المغناطيسي $\pi_\gamma(M) = (-1)^{L+1}$

التماثل الكلي يساوي $\pi_\gamma = \pi_i * \pi_f$

مثال (١): حدد الانتقالات الاكثر احتمالاً لأشعة گاما للأشعاعات الآتية:



الحل:

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

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

$$|2-0| \leq L_\gamma \leq |2+0| \Rightarrow 2 \leq L_\gamma \leq 2 \Rightarrow L_\gamma = 2$$

$$\pi_\gamma = \pi_i * \pi_f = + * + = (+)$$

$$\pi(E) = (-1)^{L} = (-1)^{2} = + \Rightarrow L = 2,$$

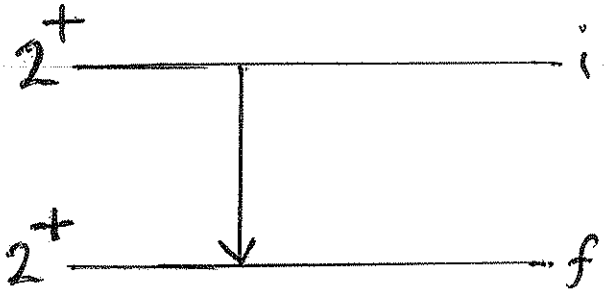
E_2 transition — انتقال كهربائي

هو الأكثر احتمالاً.

$$\pi(M) = (-1)^{L+1} = -$$

لا يوجد انتقال مغناطيسي.

مثال (٢): حدد الانتقالات الأكثر احتمالاً لإشعاع أشعة γ للإشعاعات التالية:



الحل:

$J_i = 2, \pi_i = +$

$J_f = 2, \pi_f = +$

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

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

$$|2-2| \leq L_\gamma \leq |2+2| \Rightarrow L = 0, 1, 2, 3, 4$$

بالنسبة للإشعاع الكهربائي:

$$\pi(E) = (-1)^{L} \Rightarrow L = 2, 4$$

$$\therefore E_2, E_4 \rightarrow E_2$$

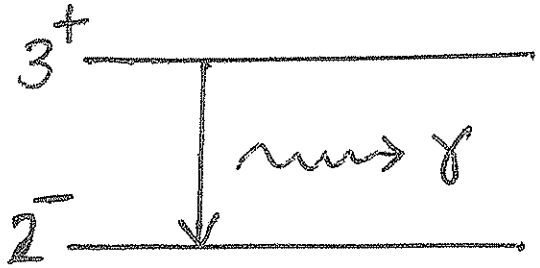
بالنسبة للإشعاع المغناطيسي:

$$\pi(M) = (-1)^{L+1}$$

$$\therefore L = 1, 3 \Rightarrow M_1, M_3 \rightarrow M_1$$

أول الانتقال هو مزيج كهربائي ومغناطيسي $(E_2 + M_1)$.

مثال (٣): جد الزخم الزاوي المداري والتماثل الكلي واحتمالات الانتقالات الكهربائية والمغناطيسية لمستويات التبديل التالية:



الحل:

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

$$|3-2| \leq L_\gamma \leq 3+2$$

$$1 \leq L_\gamma \leq 5$$

$$\therefore L_\gamma = 1, 2, 3, 4, 5$$

$$\pi_\gamma = \pi_i * \pi_f = + * - = \boxed{-}$$

$$\therefore \pi(E_1) = (-1)^1 = (-) \checkmark \qquad \pi(M_1) = (-1)^{L+1} = (-1)^{1+1} = +$$

$$\pi(E_2) = (-1)^2 = + \qquad \pi(M_2) = (-1)^{1+2} = (-) \checkmark$$

$$\pi(E_3) = (-1)^3 = (-) \checkmark \qquad \pi(M_3) = (-1)^{1+3} = +$$

$$\pi(E_4) = (-1)^4 = + \qquad \pi(M_4) = (-1)^{1+4} = (-) \checkmark$$

$$\pi(E_5) = (-1)^5 = (-) \checkmark \qquad \pi(M_5) = (-1)^{1+5} = +$$

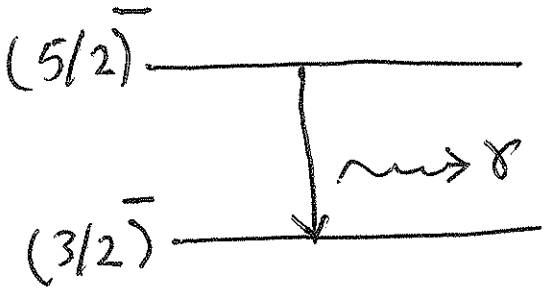
الانتقال الكهربائي عادة أكثر احتمالاً" واقوى من الانتقال المغناطيسي والانتقال الذي زخمه الزاوي أقل يكون أكثر احتمالاً"، أي أن

$$E_1 \;,\; M_2 \;,\; E_3 \;,\; M_4 \;,\; E_5$$

والاقوى احتمالاً" هو

$$E_1$$

مثال (٤):



$$|J_i - J_f| \leq L \leq |J_i + J_f|$$

$$5/2 - 3/2 \leq L \leq \frac{5}{2} + \frac{3}{2}$$

$$1 \leq L \leq 4$$

$$L = 1, 2, 3, 4$$

$$\pi_\gamma = \pi_i * \pi_f = - * - = \boxed{+}$$

$$E_1 = (-1)^1 = - \qquad M_1 = (-1)^{1+1} = (+)$$

$$E_2 = (-1)^2 = (+) \qquad M_2 = (-1)^{2+1} = -$$

$$E_3 = (-1)^3 = - \qquad M_3 = (-1)^{3+1} = (+)$$

$$E_4 = (-1)^4 = (+) \qquad M_4 = (-1)^{4+1} = -$$

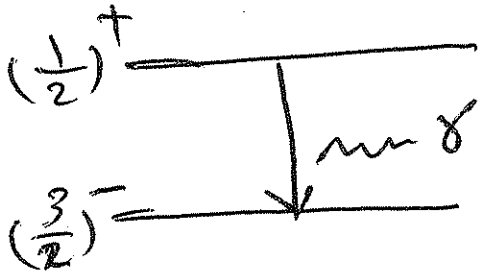
$$E_2 \, , E_4 \, , M_1 \, , M_3$$

الأكثر احتمالاً مرجع من الانتقال الكهربائي والمغناطيسي

والأكثر احتمالاً هو:

$$E_2, M_1$$

واجب المحاضرة:



حدد الاحتمال الأقوى من بين الانتقالات الكهربائية والمغناطيسية للحالات التالية؟

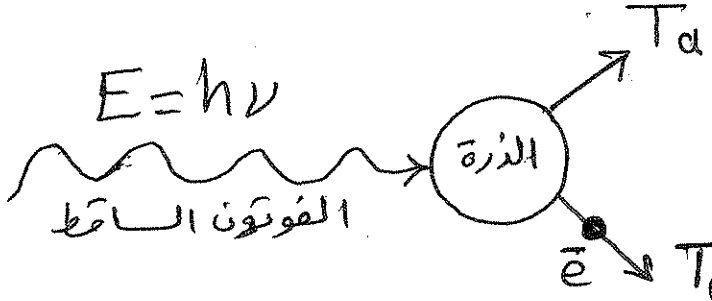
تفاعل أشعة كاما مع المادة:

Interaction of gamma-ray with matter

على الرغم من تعدد آليات تفاعل فوتون اشعة كاما مع المادة الا أن العمليات الرئيسة الثلاث التي تستقطب الاهتمام تتمثل بالظاهرة الكهروضوئية واستطارة كومبتن وانتاج الزوج وذلك بسبب احتمالية حدوثها العالية مقارنة بالتفاعلات الأخرى للفوتونات. وفيمايلي شرح مختصر لأساسيات هذه العمليات الرئيسية الثلاث:

1. التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect)

في هذه الظاهرة تمتص طاقة الفوتون (أشعة كاما) الساقط كلياً من قبل الكترون مرتبط بالمدارات الداخلية للذرة وبهذا سوف يختفي الفوتون وينفصل الالكترون عن الذرة تاركاً اياها أيوناً موجباً كما موضح بالشكل ادناه:



ان الطاقة الحركية Te التي سيأخذها الالكترون المنزوع هي:

$$Te = h\nu - B_e - Ta$$

حيث: $h\nu$ طاقة اشعة كاما الساقطة

Be طاقة ارتباط الالكترون بالمدار الذري (دالة الشغل).

Ta طاقة ارتداد الذرة (صغيرة جداً يمكن اهمالها)

$$\therefore \boxed{Te = h\nu - Be}$$

وقد وجد أن الالكترونات التي تكون اكثر ارتباطاً داخل الذرة (أي الالكترونات الموجودة في المدار K) تمتص الفوتونات الساقطة بأحتمالية اكبر بكثير من احتمالية امتصاصها من قبل الالكترونات الموجودة في القشرات الذرية L و M و... وان 80% من الظاهرة الكهروضوئية تحدث في القشرة K. ويمكن التعبير عن معامل الامتصاص بالعلاقة التقريبية التالية، حيث Z يمثل العدد الذري:

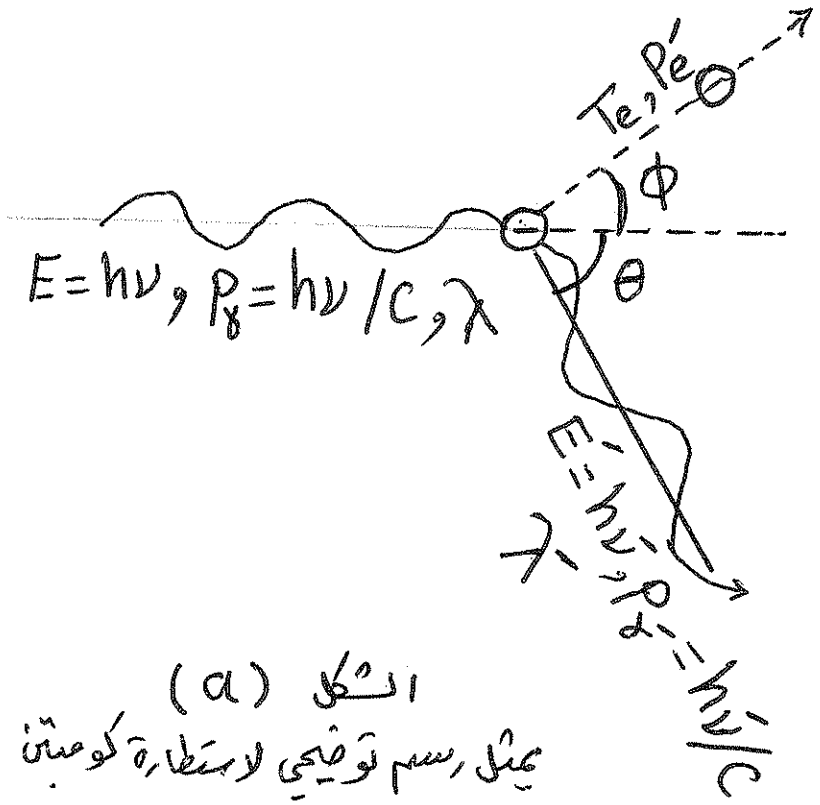
$$\mu_{P_e} = \text{const.} \frac{Z^2}{(h\nu)^{7/2}}$$

حيث يظهر من العلاقة اعلاه ان معامل الامتصاص (μ_{P_e}) في الظاهرة الكهروضوئية يتناسب طردياً مع زيادة العدد الذري مع طاقة الفوتون الساقط

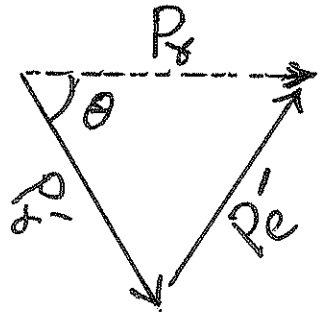
ان امتصاصية الفوتونات في المواد لها أهمية كبيرة على الظواهر البايولوجية وعند تصميم الدروع الواقية من الاشعاع.

٢. استطارة كومبتن (Compton scattering)

في ظاهرة كومبتن أو استطارة كومبتن نجد أن الفوتون الساقط بطاقة $E_\gamma = h\nu$ وزخم $P_\gamma = h\nu/c$ وطول موجة λ يصدم الكتروناً ذا كتلة m_e في المدارات الخارجية للذرة (اي طاقة ربطه قليلة لذا يعتبر حر). أما الفوتون المستطير فانه يخرج بزاوية θ وبطاقة $h\nu'$ وزخم $h\nu'/c$ وطول موجة λ' ويخرج الالكترون (وعادة يسمى الكترون كومبتن) بزاوية ϕ ويكتسب طاقة حركية T_e وزخم P_e كما في الشكل التالي:



الشكل (a)
يمثل رسم توضيحي لاستطارة كومبتن



الشكل (ط)
يمثل مثلث الزخوم الخطية .

من قانون حفظ الطاقة :

$$E_\gamma + E_e = E_{\gamma'} + E_{e'} \qquad \text{——— (1)}$$

i.e $P_\gamma + P_e = P_{\gamma'} + P_{e'}$ وتطبيقه قانون حفظ الزخم :

وعلى فرض ان الالكترون في حالة سكون عند الاصطدام
(أي ان $V=0$ و $p=mv=0$) نحصل على :

$$P_\gamma + 0 = P_{\gamma'} + P_{e'}$$

$$\therefore P_\gamma = P_{\gamma'} + P_{e'} \qquad \text{——— (2)}$$

قبل عملية التشتت يعامل الالكترون على انه ساكن وبالتالي فأن الطاقة الكلية للالكترون تتألف من طاقته الحاصلة لكتلته السكونية (m_e) اي أن :-

$$E_e = m_e c^2$$

وان طاقة الفوتون الساقط والمتشتت هما :

$$E_\gamma = h\nu \quad , \quad E_{\gamma'} = h\nu'$$

في بعض الحالات يمكن ان يتسبب التصادم الى تسريع الالكترون الى ما يقارب سرعة الضوء، وفي هذه الحالة يجب تطبيق معادلة اينشتاين في النسبية لتفسير الطاقة والزخم بصورة صحيحة. اي انه يجب تمثيل طاقة الالكترون الكلية باستخدام العلاقة النسبية للطاقة والزخم:

$$E_{e'}^2 = P_{e'}^2 C^2 + m_e^2 C^4 \qquad \text{——— (3)}$$

وبالتعويض عن طاقة الالكترون المرتد في المعادلة رقم (1) نحصل على:

$$E_\gamma + E_e = E_{\gamma'} + E_{e'}$$

$$\therefore h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \sqrt{[P_{e'}^2 C^2 + m_e^2 C^4]}$$

$$(h\nu - h\nu' + m_e c^2)^2 = P_{e'}^2 C^2 + m_e^2 C^4$$

$$\therefore (P_{e'} C)^2 = (h\nu - h\nu' + m_e c^2)^2 - m_e^2 C^4 \qquad \text{——— (4)}$$

من المعادلة رقم (2) نحصل على:

$$P_{e'} = P_\gamma - P_{\gamma'}$$

ومن خلال الضرب النقطي (أو من خلال مثلث الزخوم)

$$P_{e'}^2 = P_{e'} \cdot P_{e'}$$

$$= (P_\gamma - P_{\gamma'}) \cdot (P_\gamma - P_{\gamma'})$$

$$\therefore P_{e'}^2 = P_\gamma^2 + P_{\gamma'}^2 - 2 P_\gamma P_{\gamma'} \cos\theta$$

وبضرب جميع الحدود بـ c^2 والتعويض عن Pc بـ $h\nu$ نحصل على

$$P_{e'}^2 C^2 = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2(h\nu)(h\nu')\cos\theta \qquad \text{——— (5)}$$

ومن المعادلتين (4) و (5) وبالتعويض عن $P_{e'}^2 C^2$ نحصل على:

$$(h\nu - h\nu' + m_e c^2)^2 - m_e^2 c^4 = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2(h\nu)(h\nu')\cos\theta$$

وبعد فتح الأقواس وجمع الحدود المتشابهة وقسمة طرفي المعادلة على $(2h\nu\nu' m_e c)$ نحصل على:

$$\frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

وبما أن $\lambda = \frac{c}{\nu}$ و $\lambda' = \frac{c}{\nu'}$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) \quad \text{——— (6)}$$

المعادلة رقم (6) تسمى زحزحة كومبتن وهي الفرق بين طول موجة الفوتون المستطير وطول موجة الفوتون الساقط. حيث أن الكمية $(h/m_e c)$ تسمى طول موجة كومبتن وتساوي:

$$\frac{h}{m_e c} = 0.024\ A^\circ = 0.024 \times 10^5\ Fm$$

ومن المعادلة (6) يمكن الحصول على علاقة تربط بين زخم الفوتون الساقط وزخم الفوتون المستطير وزاوية الاستطارة θ كما يلي:

حيث $p = \frac{h}{\lambda}$ و $p' = \frac{h}{\lambda'}$ وبالتعويض في المعادلة (6)

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{m_e c}(1 - \cos\theta) \quad \text{——— (7)}$$

من المعادلة رقم (6) نستنتج العلاقة بين طاقة الفوتون الساقط والمستطير

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)}$$

$$T = E_\gamma - E_{\gamma'} = \frac{(1 - \cos\theta) E_\gamma / m_e c^2}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)} E_\gamma$$

والطاقة الحركية للإلكترون المتبعث تكون

مسألة: اذا كانت طاقة ترابط الالكترون في معدن الصوديوم هي (2.3 eV)، سقط عليه ضوء احادي اللون طول موجته (5×10^{-7} m). احسب كل مما يأتي:

١. طاقة الفوتون الساقط على سطح المعدن؟

٢. تردد العتبة؟

٣. هل الفوتون قادر على انتزاع الالكترون؟

٤. احسب الطاقة الحركية للالكترون المنبعث؟

٥. ما هي اقصى سرعة للالكترون المتحرر؟

الجواب:

١. $E = h\nu \quad , \nu = \frac{c}{\lambda}$

$$E = h\frac{c}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.sec)(3 \times 10^{8}\ m/sec)}{5 \times 10^{-7}\ m}$$

$$= 3.96 \times 10^{-19}\ J$$

$$\therefore E = \frac{3.96 \times 10^{-19}\ J}{1.6 \times 10^{-19}\ J/eV} = 2.475\ eV$$

٢. $B_e = h\nu_o \quad , \nu_o = \frac{B_e}{h}$

$$\therefore \nu_o = \frac{2.3\ eV}{6.626 \times 10^{-34}\ J.sec} = \frac{(2.3)(1.6 \times 10^{-19}\ J)}{6.626 \times 10^{-34}\ J.sec}$$

$$\therefore \nu_o = 5.57 \times 10^{14}\ sec^{-1} = 5.57 \times 10^{14}\ Hz$$

٣. $B_e = 2.3 \times 1.6 \times 10^{-19}\ J = 3.68 \times 10^{-19}\ J$

$$E = 3.96 \times 10^{-19}\ J$$

بما ان طاقة الفوتون الساقط اكبر من طاقة الترابط فانه قادر على انتزاع الالكترون.

٤. الطاقة الحركية للإلكترون:

$$E_\gamma = T_e + B_e$$

$$T_e = E_\gamma - B_e$$

$$= 3.96 \times 10^{-19} - 3.68 \times 10^{-19}$$

$$= 2.8 \times 10^{-20} \text{ J} = \frac{2.8 \times 10^{-20} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}}$$

$$\therefore T_e = 1.75 \text{ eV}$$

٥. السرعة القصوى للإلكترون المتحرر:

$$T_{e_{max}} = K.E_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2$$

$$\therefore v_{max}^2 = \frac{2 \times T_{e_{max}}}{m_e} = \frac{2 \times 2.8 \times 10^{-20} \text{ J}}{9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}} = 6.14 \times 10^{10}$$

$$\therefore v = 2.48 \times 10^5 \text{ m/sec}$$

٣. انتاج الزوج: Pair Production

في عملية انتاج الزوج يمكن لفوتون ان يتحول الى مادة على شكل زوج الكترون - بوزترون. يتم هذا قرب نواة الذرة لكي يكون الزخم الخطي محفوظاً بمساعدة النواة التي تأخذ جزءاً 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 فوتوناً طاقته تساوي ($2\times0.511 = 1.022$ MeV). وأي زيادة في طاقة الفوتون تظهر بشكل طاقة حركية للالكترون والبوزترون. أي أن:

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_\gamma - (mc^2)_{e^-} - (mc^2)_{e^+}$$
$$= E_\gamma - 1.022 \text{ MeV}$$

ويمكن ملاحظة هذه العملية ان يحدث ايضاً عندما يلتقي الالكترون مع بوزترون فيفني احدهما الآخر مكونين زوجاً من الفوتونات. يكون الفوتونان الناتجان باتجاهين متعاكسين للحفاظ على قانوني حفظ الطاقة والزخم، وليس هناك حاجة لنواة أو جسم في عملية الفناء هذه. ان احتمالية انتاج الزوج تتناسب مع Z^2 للمادة وان طاقة العتبة لهذه العملية هي ($E = 1.022$ MeV).

ذرة البوزترونيوم: يمكن للالكترون والبوزترون ان يكونا نوعاً من الذرات التي يتحرك فيها كل منهما (الالكترون والبوزترون) حول مركز ثقلهما المشترك. وتسمى هذه الذرة الناتجة بذرة البوزترونيوم (positronium) وتكون قصيرة العمر جداً ($10^{-7} - 10^{-10}$ sec) ثم بعدها يفني كل منهما الآخر.

الفصل الثالث

الانحلال النووي :- Radioactive decay

ان انحلال النواة يتمثل باعطاء النواة المنحلة جسيمات مثل الفا او بيتا بنوعيها السالبة والموجب (β^- و β^+) وهو ما يسمى بالنشاط الاشعاعي.
ويقسم النشاط الاشعاعي الى نوعين :

١. النشاط الاشعاعي الطبيعي (التلقائي).
٢. النشاط الاشعاعي الاصطناعي .

تنحلل النوى الثقيلة ببعث جسيمات الفا والتي تمثل نواة ذرة الهليوم (^4_2He) . وفي هذه الحالة تفقد النواة الأم بروتونين ونيترونين وبذلك يقل العدد الكتلي A بمقدار أربع وحدات . كما يلي :

$$^{A}_{Z}X_{N} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X_{N-2} + \alpha\,(^4_2He_2)$$

حيث $^{A}_{Z}X_{N}$ تمثل النواة الأم (Parent nucleus).

$^{A-4}_{Z-2}X_{N-2}$ تمثل النواة الوليدة (daughter nucleus).

تحدث عملية انحلال الفا بسبب التنافر الكولومي داخل النواة والذي يكون ذا أهمية كبيرة في النوى الثقيلة ($A>150$) لأن الاضطرابات الكولومية تزداد مع Z^2 وهذه تكون اكبر من قوة الربط النووي التي تزداد مع A .
تتوزع العناصر المشعة الثقيلة على اربع سلاسل هي :

السلسلة	رمزها	العنصر الاطولعمراً	عمر النصف	النواة النهائية
الثوريوم	$4n$	Th^{232}	14.1×10^9 Y	Pb^{208}
البنتونيوم	$4n+1$	Np^{237}	2.1×10^6 Y	Bi^{209}
اليورانيوم	$4n+2$	U^{238}	4.5×10^9 Y	Pb^{206}
الأكتينيوم	$4n+3$	U^{235}	7×10^8 Y	Pb^{207}

يمكن الحصول على الثوريوم منه اضمحلال البلوتونيوم كما يلي:

$$Pu^{240} \longrightarrow U^{236} + {}^{4}_{2}He$$

$$U^{236} \longrightarrow Th^{232} + {}^{4}_{2}He$$

ان السلسلة الوحيدة غير الموجودة حاليا هي سلسلة النبتونيوم ويمكن الحصول عليها صناعيا منه خلال تشعيع اليورانيوم U^{238} وذلك بتشعيعها بالنيوترونات البطيئة وكما يلي:

$$_{92}U^{238} + {}^{1}_{0}n_{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} \xrightarrow[(23min)]{} {}_{93}Np^{239} + \beta^{-} + \bar{\nu}$$

وسبب عدم وجود هذه السلسلة حاليا لأن عمرها أقل من نصف عمر الأرض.

ان اليورانيوم الطبيعي الموجود حاليا هو خليط من النظيرين (U^{238} و U^{235}) وان نسبة اليورانيوم U^{238} تبلغ 99.28% ونسبة اليورانيوم U^{235} تبلغ 0.72%.

ان سلسلة اليورانيوم U^{238} الموجودة في الطبيعة حاليا تنحل بانبعاث جسيمات الفا وتنتهي بالرصاص Pb^{206}.

أخيرا سلسلة الاكتينيوم فيمكن انتاجه صناعيا في المفاعلات النووية وذلك بتشعيع نظير الراديوم Ra^{226} على صورته الأيونية

$$_{88}Ra^{226} + {}^{1}_{0}n_{1} \longrightarrow {}_{88}Ra^{227} + \gamma \longrightarrow {}_{89}Ac^{227} + \beta^{-} + \bar{\nu}$$

ان سلسلة الاكتينيوم هي السلسلة الوحيدة الموجودة في الطبيعة والتي تنشطر بواسطة النيوترونات البطيئة.

انحلال ألفا (α): Alpha decay

يحدث انحلال ألفا لأنوية العناصر الثقيلة (الأثقل من الرصاص) بشرط أن تكون غير مستقرة. تتميز نواة تلك العناصر بانخفاض طاقة الربط النووية ولذلك يحدث لها انحلال ذاتي وبدون مؤثرات خارجية. ومن أمثلة ما يعاني ألفا اليورانيوم ^{238}U والراديوم ^{226}Ra والرادون ^{222}Rn. تتكون جسيمة ألفا من نيوترونين وبروتونين لذا فهي تشبه في تركيبها نواة ذرة الهليوم ($^{4}_{2}He$).

يمثل تحلل ألفا بالمعادلة التالية:

$$^{A}_{Z}P_{N} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}D_{N-2} + (^{4}_{2}He_{2}) + Q_{\alpha}$$

حيث $^{A}_{Z}P_{N}$ هي النواة الأم (Parent nucleus).

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

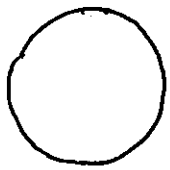
Q_{α} طاقة تحلل ألفا وتعادل الطاقة الحركية لجسيم ألفا والطاقة الحركية للنواة الوليدة (البنت)

$$i.e \quad Q_{\alpha} = T_{\alpha} + T_{D}$$

من الواضح أن تحلل ألفا يؤدي الى نقصان العدد الكتلي بمقدار 4 والعدد الذري بمقدار 2 والعدد النيوتروني بـ 2 أيضاً.

وعادة يحدث تحلل ألفا للنوى الثقيلة المتهيجة التي يكون فيها العدد الكتلي ($A > 150$). اذا كانت النواة الأم في تحلل ألفا هي M_p والنواة البنت هي M_D وجسيم ألفا M_{α} وان النواة الأم تحللت وهي بحالة السكون أي أن زخمها يساوي صفر قبل التحلل

يساوي صفر ما ولكي يبقى الزخم الخطي محفوظاً يجب ان يكون زخم الفا يساوي بالمقدار ويعاكس بالاتجاه زخم النواة البنت. أي أن



النواة الأم الثقيلة المشعة الساكنة

$P = 0$

النواة البنت

$\rightleftharpoons \alpha$

جسيمة الفا

$P_D = M_D V_D , T_D$

$P_\alpha = M_\alpha V_\alpha , T_\alpha$

وبما أن زخم الفا يساوي بالمقدار ويعاكس بالاتجاه زخم النواة البنت:

$$P_\alpha = P_D$$

$$M_\alpha V_\alpha = M_D V_D$$

But $T = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{m^2 V^2}{2m} = \frac{P^2}{2m}$

$$\therefore T_D = \frac{P_D^2}{2M_D} \quad \text{——— (1)}$$

$$T_\alpha = \frac{P_\alpha^2}{2M_\alpha} \quad \text{——— (2)}$$

وبقسمة المعادلة (2) على المعادلة (1)

$$\frac{T_D}{T_\alpha} = \frac{M_\alpha}{M_D} \quad \text{——— (3)}$$

حيث $P_\alpha = P_D$

$$\therefore T_D = \frac{M_\alpha}{M_D} \cdot T_\alpha \text{ , and } T_\alpha = \frac{M_D}{M_\alpha} \cdot T_D$$

وأن:

$$Q_\alpha = T_\alpha + T_D \quad \text{——— (4)}$$

نعوض عن قيمة T_D في المعادلة (3) في المعادلة رقم (4):

$$Q_\alpha = T_\alpha + \frac{M_\alpha}{M_D} \cdot T_\alpha$$

$$\therefore Q_\alpha = \frac{M_D + M_\alpha}{M_D} \cdot T_\alpha \quad \text{——— (5)}$$

وبتقريب الكتل واعتبارها مساوية للعدد الكتلي فيمكن كتابة المعادلة رقم (5) كما يلي:

$$Q_\alpha = \frac{A}{A-4} \cdot T_\alpha \quad \text{——— (6)}$$

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

ان منشأ طاقة التحلل (Q_α) هو فرق الكتل بين النواة الأم والنواة البنت وجسيم الفا. أي أن:

$$Q_\alpha = \left[M_p - (M_D + M_\alpha) \right] C^2$$

$$Q_\alpha = 931.5 \left(M_{(A,Z)} - M_{(A-4,N-2)} - M_{(4,2)} \right) \quad \text{——— (7)}$$

وسمي المتفقعة في المعادلة رقم (7) بالطاقة أو ما تسمى طاقة الفصل لجسيم الفا، أي أن

$$Q_\alpha = -S_\alpha$$

سؤال: اشتقه العلاقة التي تربط الطاقة الحركية للنواة الوليدة T_D مع طاقة انحلال الفا (Q_α) ؟

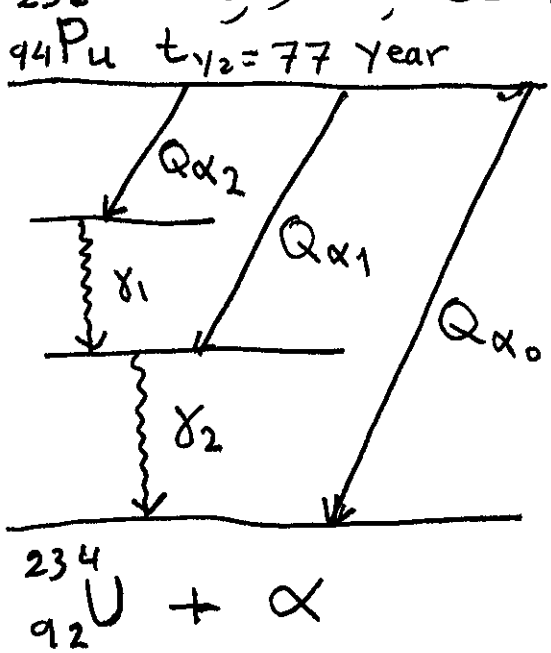
(يترك للطالب اشتقاق العلاقة)

ملاحظة: اذا كانت Q_α موجبة فأن النواة الأم تعتبر من النوى الباعثة لجسيمات الفا تلقائياً. واذا كانت Q_α سالبة فأن النواة الأم لا يمكنها ان تبعث جسيمة الفا تلقائياً".

مخططات الانحلال: Decay Schemes

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

١. خط افقي تدون عليه المعلومات التالية وهي:



أ. الرمز الكيميائي للنويدة المشعة.
ب. العدد الكتلي للنويدة المشعة.
ت. عمر النصف للنويدة المشعة.

٢. سهم ينطلق باتجاه الأسفل يتميز بما يلي:
أ. اذا كان متجه بصورة مائلة نحو اليسار فهذا يعني ان الانحلال يكون بأشعة بيتا الموجبة β^+ (البوزترون) أو بأشعة الفا (α).
ب. اذا كان السهم متجه بصورة مائلة نحو اليمين فيكون الانحلال بأشعاع جسيمات بيتا السالبة (β^-).

$$E_n = Q_0 - Q_n$$

$n = 1, 2, 3, \ldots$

ج. اما اذا كان السهم عمودياً نحو الاسفل وبصورة متحولة فان الانتقال يكون بأشعة اشعة كاما. وفي جميع هذه الحالات فان السهم ينتهي عند خط أفقي آخر يمثل مستوى طاقة النواة الوليدة.

مثال: اذا كانت كتلة الراديوم $^{224}_{88}Ra$ تساوي (224.020217 u) وكتلة الرادون $^{220}_{86}Rn$ تساوي (220.011401 u) وكتلة جسيم الفا $^{4}_{2}He$ تساوي (4.002603 u) احسب T_α و T_D ؟

الحل: نحسب أولاً Q_α:

$$Q_\alpha = 931.5\left[M(^{224}_{88}Ra) - M(^{220}_{86}Rn) - M(^{4}_{2}He)\right]$$

$$= 931.5\left[224.020217 - 220.011401 - 4.002603\right]$$

$$= 5.788 \text{ MeV}$$

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

وبما أن: $Q_\alpha = T_\alpha + T_D \Rightarrow T_D = Q_\alpha - T_\alpha$

$$\therefore T_D = 5.788 - 5.685 = 0.103 \text{ MeV}$$

أو يمكن الحصول على T_D كما يلي

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

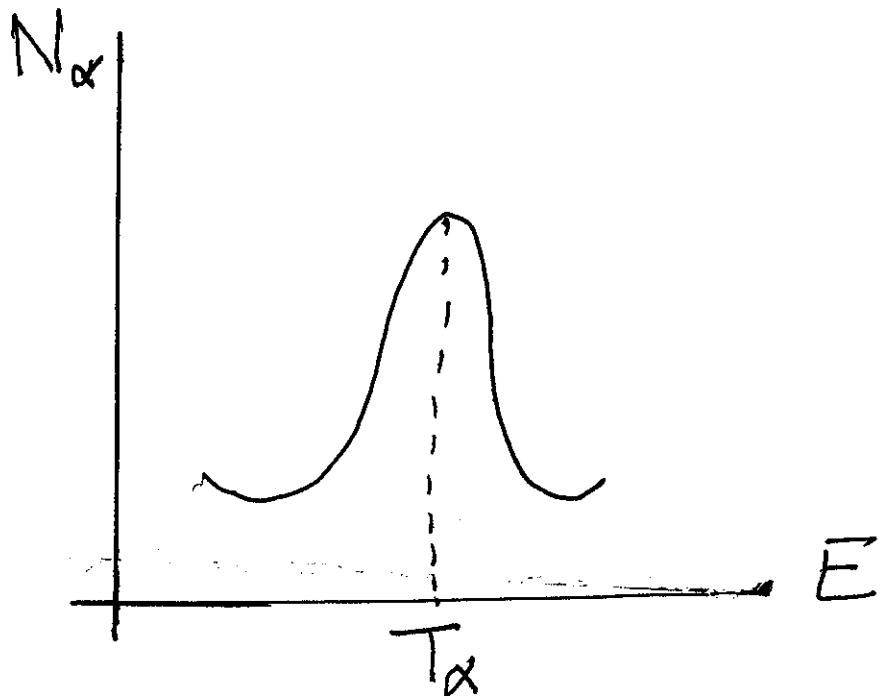
الطيف الطاقي لجسيمة ألفا

ان طيف الطاقة (Energy spectrum) لجسيمات الفا (α) هو طيف خطي لأنه ناتج عن تحول نواة مشعة من مستوي طاقة الى مستوي طاقة آخر. وكذلك الحال لعمليات من هذا النوع كما في تحلل كاما.

* من ملاحظة المعادلة التي تربط طاقة انحلال الفا بطاقة الحركية: $T_\alpha = \frac{A-4}{A} Q_\alpha$ ، وبما أن قيم العدد الكتلي A للنواة الأم كبيرة لذلك فأن النسبة $\frac{A-4}{A}$ تكون مساوية للواحد تقريباً، أي أن:

$$T_\alpha \simeq Q_\alpha$$

وهذا يعني ان معظم طاقة الانحلال تكون طاقة حركية لجسيمات ألفا وبذلك يكون الطيف الطاقي خطياً، وأبسط دناه يوضح ذلك.



علاقة المدى بالطاقة لجسيمة ألفا: Range-Energy Relatioship

وُجد تجريبياً انه يمكن حساب معدل مدى جسيمات ألفا في الهواء حسب العلاقات التجريبية التالية مع احتمال وجود خطأ بنسبة 10%.

$$R(cm) = 0.56\, E_\alpha(MeV), \quad For\ E_\alpha < 4\ MeV \qquad \text{---------} (1)$$

$$R(cm) = 1.24\, E_\alpha(MeV) - 2.62, \quad 4 < E_\alpha < 8\ MeV \qquad \text{---------} (2)$$

أما بالنسبة لجميع طاقات ألفا فمن الممكن ايجاد معدل المدى بصورة عامة من العلاقة الآتية:

$$R(cm) = 0.318\, E^{3/2} \qquad \text{---------} (3)$$

أما في أوساط أخرى غير الهواء فيمكن حساب معدل مدى جسيمات ألفا بوحدات (mg/cm^2) من العلاقة التالية:

$$R_m(mg/cm^2) = 0.56\, A^{1/3} \cdot R_\alpha(cm.air) \qquad \text{---} (4)$$

حيث A العدد الكتلي للوسط، R_α مدى جسيمات ألفا في الهواء بوحدات السنتيمترات.

مثال:

احسب مدى جسيمات ألفا ذات الطاقة 3MeV ثم قارنها مع النتيجة التي تحصل عليها باستخدام العلاقات المختلفة التي يمكن تطبيقها للطاقة المذكورة.

الحل: بما أن طاقة جسيمة ألفا هي 3MeV لذا يمكن استخدام العلاقتين (1) و (3):

$$R = 0.56 \times 3 = 1.68\ cm$$

$$\text{or}\quad R = 0.318 \times 3^{3/2} = 0.318 \times 5.196 = 1.65\ cm$$

ومن النتيجة نلاحظ أن الفرق بينهما هو 0.03 سم.

انحلال بيتا : Beta Decay

ان انحلال أو تحلل بيتا هو نشاط اشعاعي لعناصر كثيرة تطلقه فيه تلك العناصر أشعة بيتا حيث اكتشفا أن اشعة بيتا ماهي الا الكترونات تطلقه من الذرة وهي مؤنثة. ولما كان العنصر الذي يطلق تلك الالكترونات يتحول اثناء وتلك العملية الى عنصر آخر يتلوه مباشرة في الجدول الدوري توصلوا الى حقيقة مصدر تلك الجسيمات فهي تصدر من انوية تلك العناصر المشعة. وزيادة الأبحاث اتضح أنه يوجد نوعان من الجسيمات لهذه الانحلالات:

١. النوع الاول يحدث لبعض العناصر غير المستقرة (ذات النشاط الإشعاعي) ويصدر منها الالكترونات e^- (β^-).

٢. النوع الثاني فهي العناصر التي تطلق الكترونات ذات شحنة موجبة يسمى البوزترون وهو نقيض الالكترون بالشحنة (وكلمة بوزترون تأتي من كلمتي Positive electron) أي الالكترون ذو الاشارة الموجبة.

وفي كلتا الحالتين اعلاه يمثل العنصر المصدر لتلك الجسيمات أما الى عنصر آخر يأتي بعده في الجدول الدوري في حالة اصداره الكترونا أو الى عنصر يأتي قبله في الجدول الدوري اذا اطلق بوزترونا.

هناك ثلاثة أنواع من انحلال بيتا هي:

١. انحلال بيتا السالبة β^- decay :

ينتج هذا التحلل من تحول نيوترون (n) الى بروتون (P) مصحوباً بانبعاث الكترون e^- (β^-) وضديد النيوترينو:

$$_0^1n \longrightarrow {}_1^1P^+ + \beta^- + \bar{\nu}$$

Ex: $$_{29}^{64}Cu \longrightarrow {}_{30}^{64}Zn + \beta^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}$$

وبشكل عام فإن:

$$^{A}_{Z}X_{N} \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + \beta^{-} + \bar{\nu}$$

٢. انحلال بيتا الموجبة β^{+} decay:

وينتج عن تحول بروتون (P) داخل النواة الى نيوترون (n) وانبعاث β^{+} (بوزترون e^{+}) ونيوترينو كما يلي:-

$$^{1}_{1}P^{+} \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}_{+1}\beta^{+} + \nu + Q_{\beta^{+}}$$

Ex: $^{14}_{8}O_{6} \longrightarrow {}^{14}_{7}N_{7} + \beta^{+} + \nu$

وبشكل عام فإن:

$$^{A}_{Z}X_{N} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \beta^{+} + \nu$$

٣. أسر الالكترون (e.C) electron capture:

وهي عملية اقتناص أحد الالكترونات الداخلية (من القشرة K = المدار الأول) من قبل النواة المشحونة ليتحد مع أحد بروتوناتها ليكون n ما أي أن:

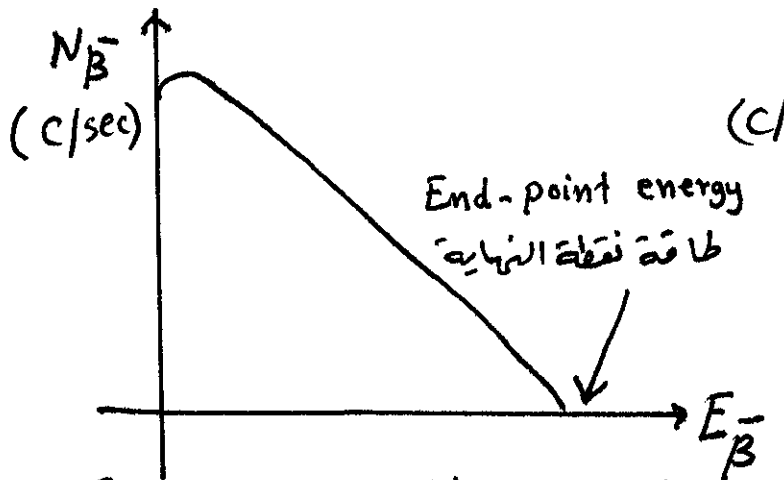
$$^{1}_{1}P^{+} + \bar{e} \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \nu$$

Ex: $^{64}_{29}Cu + \bar{e} \longrightarrow {}^{64}_{28}Ni + \nu + Q_{e.c}$

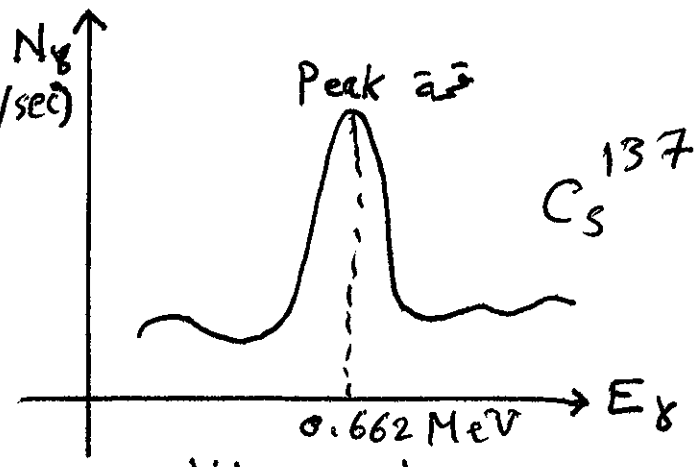
وبصورة عامة:

$$^{A}_{Z}X_{N} + \bar{e} \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + \nu$$

كان من المتوقع أن يكون طيف جسيمات β طيفاً خطياً كما هي الحال في انحلال ألفا وكاما (α و γ)، ولكن في الواقع لوحظ أن طيف بيتا (β) هو طيف مستمر كما في الشكل أدناه.



شكل رقم (2) طيف β مستمر (لا توجد قمم)



شكل رقم (1) طيف γ الخطي

كما وجد أن الزخم الخطي في عملية انحلال بيتا غير محفوظ. ولإزالة أو تفسير هذا اللغز فقد اقترح العالم (باولي) بأن هناك جسيمة أخرى غير مرئية كتلتها صغيرة جداً وبرمها يساوي $\frac{1}{2}$ تنبعث مع جسيمة بيتا أثناء الانحلال سميت نيوترينو (neutrino). وفي هذه الحالة يأخذ النيوترينو جزءاً من الزخم ليتعادل بذلك الزخم الخطي. إن سبب الطيف المستمر لجسيمات بيتا هو أنها تتقاسم الطاقة مع النيوترينو.

خواص النيوترينو:

١. جسيم عديم الشحنة. ٢. الكتلة السكونية صغيرة جداً $m_\nu \approx 0$
٣. يسير بسرعة مقاربة لسرعة الضوء. ٤. العزم المغناطيسي له يساوي صفر.
٥. ضعيف التفاعل مع المادة. ٦. له مقابلية عالية على اختراق المواد.
٧. وجد أن هناك نوعان منه هما:
النيوترينو (ν) وضديد النيوترينو ($\bar{\nu}$) (anti-neutrino).

طاقة تحلل بيتا Q_β :-

1. طاقة تحلل بيتا السالبة β^- :

في هذه الحالة :

$$^1_0n \longrightarrow {}^1_1p^+ + \beta^- + \bar{\nu}$$

ومثال على ذلك

$$^3_1H_2 \longrightarrow {}^3_2He_1 + \beta^- + \bar{\nu}$$

وفي هذا الانحلال يزداد عدد البروتونات وينقص عدد النيوترونات بمقدار وحدة واحدة . ان طاقة الانحلال تمثل مجموع الطاقات الحركية للجسيمات المنبعثة :

$$Q_{\beta^-} = T_{\beta^-} + T_{\bar{\nu}}$$

حيث T_{β^-} هي الطاقة الحركية لجسيمات بيتا المنبعثة .

$T_{\bar{\nu}}$ هي الطاقة الحركية لضديد النيوترينو المنبعث .

وفي الحقيقة ان مصدر Q_β هو عبارة تحول فرق الكتل الى طاقة .

$$M_N(A,Z) \longrightarrow M_N(A,Z+1) + \beta^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}/c^2$$

ولتحويل الكتل النووية الى كتل ذرية نضيف Zm_e للطرفين :

$M_N(A,Z) + Zm_e = M_A(A,Z)$
كتلة نووية $+ Zm_e =$ كتلة ذرية

$$M_N(A,Z) + Zm_e = M_N(A,Z+1) + Zm_e + m_e + Q_{\beta^-}/c^2$$

$$M_A(A,Z) = M_N(A,Z+1) + (Z+1)m_e + Q_{\beta^-}/c^2$$

$$M_A(A,Z) = M_A(A,Z+1) + Q_{\beta^-}/c^2$$

$$\therefore Q_{\beta^-} = [M_A(A,Z) - M_A(A,Z+1)]c^2$$

or $$Q_{\beta^-} = [M_p - M_D]c^2 = T_{\beta^-} + T_{\bar{\nu}}$$

ملاحظة مهمة : اذا كانت Q_β موجبة فان النواة تحل ببعث β^- تلقائياً واذا كانت Q_{β^-} سالبة فان النواة لا يمكنها الانحلال تلقائياً .

٢. طاقة تحلل بيتا الموجبة β^+ :

كما ذكرنا سابقاً ان الانحلال الموجب لجسيمات β^+ يكون كما يلي :

$$ {}^{1}_{1}p^{+} \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^{+} + \nu + Q_{\beta^+} $$

مثال على ذلك :

$$ {}^{11}_{6}C \longrightarrow {}^{11}_{5}B + \beta^{+} + \nu + Q_{\beta^+} $$

حيث في هذه الحالة كتلة النواة الوليدة (البنت) اقل من كتلة النواة الأم بوحدة واحدة.

ان مصدر Q_{β^+} هو ايضاً عبارة عن تحول فرق الكتلة الى طاقة. عندلالة كتل النوى :

$$ M_N(A,Z) \longrightarrow M_N(A,Z-1) + \beta^{+} + \nu + Q_{\beta^+}/c^2 $$

ولتحويل الكتل النووية الى كتل ذرية، نضيف Zm_e الى الطرف الأيسر ونضيف المقدار $(Zm_e + m_e - m_e)$ الى الطرف الأيمن

$$ \underbrace{M_N(A,Z) + Zm_e} = \underbrace{M_N(A,Z-1) + Zm_e - m_e + m_e + m_e} + Q_{\beta^+}/c^2 $$

$$ M_A(A,Z) = M_A(A,Z-1) + 2m_e + Q_{\beta^+}/c^2 $$

or

$$ M_p = M_D + 2m_e + Q_{\beta^+}/c^2 $$

$$ \therefore \boxed{Q_{\beta^+} = \left[M_p - M_D - 2m_e \right] c^2} = T_{\beta^+} + T_\nu $$

$$ = T_{\beta^+(max)} = T_{\nu(max)} $$

ملاحظة مهمة:

بما ان الطاقة السكونية للالكترون هي:

$$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

$$\therefore 2 m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$

عند دراسة طاقة الاضمحلال Q_{β^+} فان الاضمحلال:

① يحدث اذا كانت:

$$[M_p - M_D] c^2 > 1.022 \text{ MeV}$$

② لا يحدث الاضمحلال اذا كانت:

$$[M_p - M_D] c^2 < 1.022 \text{ MeV}$$

مثال: إحسب الطاقة الناتجة من اضمحلال النيترون (عمره النصفي 10 min) اذا علمت أن:

$$m_n = 1.008665 \text{ u}$$

$$m_p = 1.007276 \text{ u}$$

$$m_e = 0.000549 \text{ u}$$

الحل: النيوترون يضمحل كما يلي:

$${}_0^1 n \longrightarrow {}_1^1 p^+ + {}_{-1}^{\ \ 0}\beta^- + \nu$$

$$Q_{\beta^-} = [m_n - m_p - m_e] c^2 \qquad , m_\nu \cong 0$$

$$= [1.008665 - 1.007276 - 0.000549] c^2$$

$$\therefore Q_{\beta^-} = [0.00084] \times 931.5$$

$$Q_{\beta^-} = 0.782 \text{ MeV}$$

١.٢ الأسر الالكتروني: Electron Capture (EC)

في عملية الاسر (القنص) الالكتروني تقوم النواة بأسر الكترون من احد المدارات الالكترونية واحتمالية الاسر في المدار K تكون أكبر من المدارات الأخرى $L_1, M_1, N_1 \cdots$.

وفي عملية الاسر الالكتروني تقوم النواة بأسر أحد الالكترونات القريبة من النواة ويتحد الالكترون مع احد البروتونات ليكونا نيوترونا وتتحرر طاقة نتيجة هذه العملية.

$$_{1}^{1}p^{+} + \bar{e} \longrightarrow n + \nu$$

$$_{4}^{7}Be_{3} + \bar{e} \longrightarrow {}_{3}^{7}Li_{4} + \nu$$

وفي هذه الحالة ايضاً وكما في انحلال بيتا الموجب يقل العدد الذري بمقدار وحدة واحدة.

$$M_N(A,Z) + m_e \longrightarrow M_N(A,Z-1) + Q_{e.c}/c^2$$

ولتحويل الكتل النووية الى كتل ذرية نضيف Zm_e الى الطرفين وتنقل m_e الى الطرف الايمن كما يلي:

$$\underbrace{M_N(A,Z) + Zm_e}_{M_A(A,Z)} \longrightarrow \underbrace{M_N(A,Z-1) + Zm_e - m_e}_{M_A(A,Z-1)} + Q_{e.c}/c^2$$

$$M_A(A,Z) = M_A(A,Z-1) + (Z-1)m_e + Q_{e.c}/c^2$$

$$\therefore M_p(A,Z) = M_D(A,Z-1) + Q_{e.c}/c^2$$

$$\text{or } Q_{e.c} = [M_p - M_D]c^2$$

ولكي تكون هذه العلاقة اكثر دقة يجب طرح طاقة ربط الالكترون

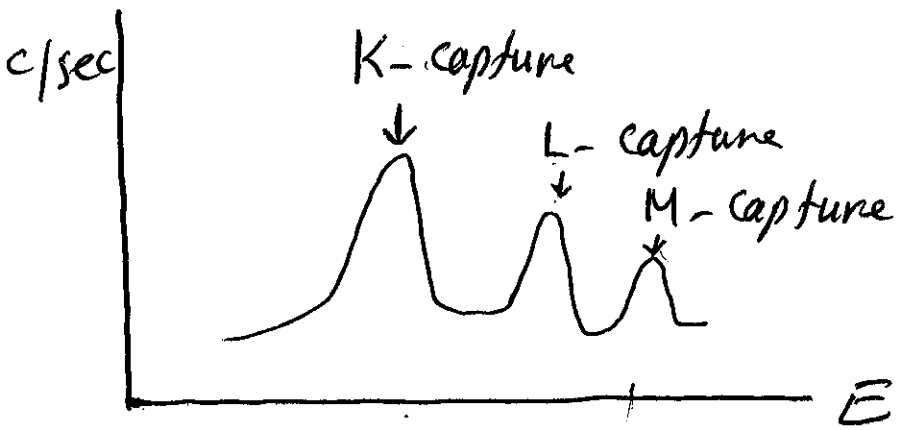
$$Q_{e.c} = [M_p - M_D]c^2 - B_e = T_D + T_\nu \cong T_\nu$$

وبسبب ان الالكترونات مربوطة في المدارات الذرية لذا يجب طرح طاقة الربط B_e من قيمة $Q_{e.c}$

وبما أنه لايتم انبعاث الكترون او بوزترون في هذه العملية فان طيف الاسر الالكتروني يكون غير مستمر (مميز) حيث ان طاقة الانحلال ستكون طاقة حركية للنيوترينو ، أي أن

$$Q_{e.c} = T_\nu$$

والسبب يكون طيف الاسر الالكتروني يكون خطي (مميز) هو أن الالكترون الأسير سيترك فجوة وهذه الفجوة سوف تملأ من قبل الالكترون أعلى من قشرة اعلى وستخرج اشعة سينية (X-ray) ذات طاقة تساوي طاقة ربط الالكترون ، كما في الشكل ادناه



ان انبعاث أشعة سينية في هذه العملية هو دليل على حدوث عملية الأسر الالكتروني

ملاحظة ① اذا كانت $Q_{e.c}$ موجبة فان النواة الأم يمكنها أن تتحلل بأسر الالكترون واذا كانت $Q_{e.c}$ سالبة فان عملية الانحلال لاتتم.

② اذا طرحنا المعادلة الخاصة بـ Q_{β^+} من المعادلة الخاصة بـ $Q_{e.c}$ نحصل

$$Q_{e.c} - Q_{\beta^+} = 931.5 \times 2m_e = 931.5 \times 2(0.511) = 1.022\ MeV$$

$$\therefore i.e\ Q_{e.c} = Q_{\beta^+} + 1.022\ MeV$$

سؤال: نواة الذهب $^{196}_{79}Au$ يمكن ان تتحل بواسطة انحلال بيتا السالب (β^-) أو بواسطة انحلال بيتا الموجب (β^+) أو بواسطة الأسر الالكتروني E.C. احسب قيمة Q (الطاقة المتحررة) للانحلالات الثلاث، اكتب المعادلات الناتجة؟

الحل: كما هو معروف فإن انحلال النواة الأم (M_P) بواسطة انحلال بيتا السالب فإن العدد الذري للنواة الوليدة (البنت M_D) يزداد بمقدار وحدة واحدة في حين يقل العدد الذري بمقدار وحدة واحدة في عمليتي الانحلال بواسطة بيتا الموجب والأسر الالكتروني.

$$^{196}_{78}Pt_{118} \longleftarrow {}^{196}_{79}Au_{117} \longrightarrow {}^{196}_{80}Hg_{116}$$

① في حالة انحلال بيتا السالب β^-

$$^{196}_{79}Au \rightarrow {}^{196}_{80}Hg + \beta^- + \nu$$

$$Q_{\beta^-} = [M_P - M_D]c^2 = [M^{196}_{79}Au_{117} - {}^{196}_{80}Hg_{116}]c^2$$

$$= [(Zm_p + Nm_n)_P - (Zm_p + Nm_n)_D] \times 931.5$$

$$= [(79 \times 1.007276 + 117 \times 1.008665) - (80 \times 1.007276 + 116 \times 1.008665)] \times 931.5$$

$$= [79.574804 + 118.013805) - (80.58208 + 117.00514)] \times 931.5$$

$$= [197.588609 - 197.58722] \times 931.5$$

$$= [0.001389] \times 931.5$$

$$\therefore Q_{\beta^-} = 1.2938 \text{ MeV}$$

⑤ في حالة انبعاث بيتا الموجب β^+ :

$$^{196}_{79}Au_{117} \longrightarrow {}^{196}_{78}Pt_{118} + \beta^+ + \bar{\nu}$$

$$Q_{\beta^+} = [M(A,Z)_p - M(A,Z-1)_D - 2m_e]\,c^2$$

$$\text{i.e } Q_{\beta^+} = [M_p - M_D - 2m_e]\,c^2$$

$$= [(Zm_p + Nm_n)_p - (Zm_p + Nm_n)_D - 2m_e]\,c^2$$

$$= [(79\times 1.007276 + 117\times 1.008665) -$$
$$(78\times 1.007276 + 118\times 1.008665) - 2\times 0.000549]\,931.5$$

$$= [(79.574804 + 118.013805) -$$
$$(78.567528 + 119.02247) - (0.001098)]\times 931.5$$

$$= [197.58861 - 197.589998) - 0.001098]\,931.5$$

$$= -2.3167 \text{ MeV}$$

وبما أن طاقة ما بعد لا يتم انحلال بواسطة Q_{β^+} أي أن

$$[M_p - M_D]\,c^2 < 1.022 \text{ MeV}$$

لذلك لا تتم عملية الانحلال.

٣. في حالة الاسر الالكتروني (e.c):

$$ {}^{1}_{1}p^{+} + \bar{e} \longrightarrow {}^{0}_{1}n + \nu $$

$$ \therefore \; {}^{196}_{79}Au_{117} + \bar{e} \longrightarrow {}^{196}_{78}Pt_{118} + \nu $$

$$ \text{i.e} \quad M_N(A,Z) + m_e \longrightarrow M_N(A,Z-1) + Q_{e.c}/c^2 $$

$$ \text{i.e} \quad M_p = M_D + Q_{e.c}/c^2 $$

$$ \therefore Q_{e.c} = [M_p - M_D]c^2 - B_e $$

$$ = [(Zm_p + Nm_n)_p - (Zm_p + Nm_n)_D]c^2 - B_e $$

$$ = [(79 \times 1.007276 + 117 \times 1.008665) - (78 \times 1.007276 + 118 \times 1.008665)] \times 931.5 - B_e $$

$$ = -1.29385 - B_e = - $$

وبما أن طاقة الاسر الالكتروني سالبة فإن عملية الانحلال لا تتم.