الفصل الاول

تعامل الاشعاعات النووية مع المادة

Interaction of nuclear radiation with matter

يتناول هذا الفصل اهم الطرق العملية التي تستخدم لدراسة الخواص الحركية كالانحلال الاشعاعي والتفاعلات النووية وهذه الطرق تتطلب الكشف عن الجسيمات والاشعاعات الكهرومغناطيسية والتي يطلق عليها **بالاشعاعات النووية** والتي هي عبارة عن عدد الحوادث المسجلة في وحدة الزمن وكذلك الطاقة الحركية للاشعاعات , ان قياس شدة الاشعاع تعتمد على قياس مقدار التأين الحاصل عند مرور الاشعاع خلال المادة , اما قياس الطاقة فيعتمد على التأين او التهيجات الذرية او على انحراف الجسيمات المشحونة خلال مرورها في مجالات كهربائية ومغناطيسية .

تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة:

ان الجسيم المشحون اثناء دخوله في وسط مادي معين فانه اما ان يتفاعل مع الالكترونات الذرية او مع نواة الذرة من خلال تأثر الجسيم بقوة كولوم ومع ان كل الكترون يعترض الجسيم يؤدي الى خسارة في طاقة الجسيم الحركية بمقدار لايتجاوز بضعة ev فأن التأين وتهيج الذرات يسبب اكبر مقدار للخسارة في الطاقة لكل وحدة طول من مسار الجسيم . ان الخسارة في الطاقة الحركية من جراء اعتراض نوى الذرات للجسيم تكون اكبر بكثير من اعتراض الذرات نفسها ولكن احتمال تصادم الجسيم بنوى الذرات هو قليل جدا بالمقارنة مع احتمال تصادمه بالذرات لان الذرة اكبر10^8مرة من نواة الذرة **ان احتمالية التصادم (التفاعل) يتناسب طرديا مع المساحة** وتبعا لذلك فأن :

$$10^8 = \frac{(10^{-8})^2}{(10^{-12})^2} = \frac{\pi r_{atom}^2}{\pi r_{nuc.}^2} = \frac{\text{مساحة الذرة}}{\text{مساحة النواة}} = \frac{\text{احتمالية حدوث تفاعل مع الذرة}}{\text{احتمالية حدوث تفاعل مع النواة}}$$

أي ان التفاعل مع النواة يحدث مره واحده لكل 100 مليون تفاعل مع الذرة لذلك يعتبر هذا التفاعل مهملا كوسيلة من وسائل فقد الطاقة لذا ستتركز دراستنا لتفاعلات الجسيم المشحون على التصادمات مع الالكترونات الذرية فقط. ولكن عند زيادة الطاقة الحركية للجسيمة تزداد احتمالية تفاعلها مع النواة محدثة احد التفاعلات الاتية:

(α,p) او (α,n) بالنسبة لجسيمة الفا و(p,n) او (p,d^+) او (p,γ) او (p, α) بالنسبة للبروتونات و(d^+,α) او (d+,p) او (d^+,n) بالنسبة للديترونات

قدرة الايقاف (Stopping power) :

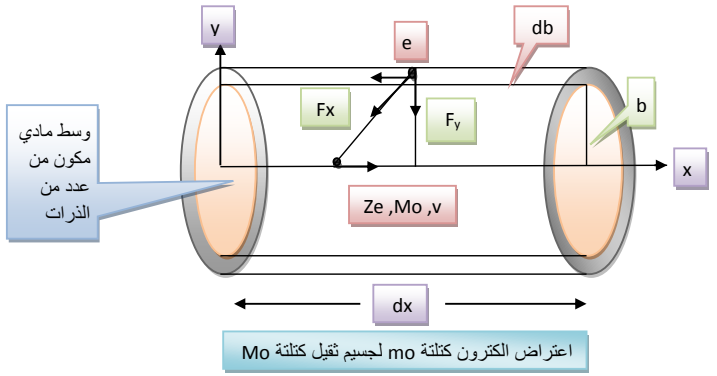
سنشتق فيما يلي معادلة قدرة الايقاف للجسيم المشحون داخل المادة

نفرض ان جسيما مشحونا ذو كتلة عالية M_0 يتصادم تصادما مباشرا مع احد الالكترونات الحرة كما مبين في الشكل ادناه فان مقدار الخسارة في الطاقة الحركية للجسيم من جراء التصادم بعملية التهيج او التأين يكون مساويا لمقدار الزيادة في الطاقة الحركية للالكترون.اي ان الطاقة الحركية التي فقدها الجسيم الثقيل واكتسبها الالكترون الحر يمكن حسابها من معرفة مقدار الدفع الذي يعطى للالكترون. ان القوة ما بين الجسيم المشحون والالكترون هي قوة كولوم:

$$\int \vec{F}.dt \approx 0 \text{ ---------- (1)}$$

$$\int F_x dt \approx 0 = P_x$$

$$\int F_y\, dt = p_e \text{ -------- (2)}$$



حيث dx يمثل طول الاسطوانة, db يمثل سمك الاسطوانة وP_e هو الزخم الخطي للالكترون وان مركبة الزخم باتجاة محور y لا تساوي صفر ,ان الفترة الزمنية التي يستغرقها التصادم يعطى بالعلاقة :

$$\Delta t = \frac{b}{v} \text{ --------- (3)}$$

حيث b هو بعد التصادم (impact parameter) ما بين الجسيم المشحون والالكترون ويمثل نصف القطر وv سرعة الجسيم الثقيل . ان معدل قوة كولوم خلال هذه الفترة هو :

$(F_y)_{ave} = \frac{ze^2}{b^2}$ ---------(4)

حيث ze هي شحنة الجسيم الثقيل, نعوض المعادلة (3,4) في (2) نحصل على

$P_e \approx \frac{ze^2}{bV}$ ---------- (5)

ان هذه العلاقة تقريبية . ان دقة اكثر لزخم الالكترون يمكن الحصول عليها من تطبيق قانون كاوس في الكهروستاتيكية

$\int \vec{E} \cdot \overrightarrow{ds} = 4\pi q$ ---------- (6)

وباستخدام احداثيات يكون فيها الجسيم الثقيل ساكنا فأن تطبيق قانون كاوس على السطح الاسطواني الذي نصف قطره b يعطى بالعلاقة:

$\int \frac{F_y}{e} 2\pi b dx = 4\pi ze$

$\int F_y\, dx = \frac{2ze^2}{b}$ ---------- (7)

ان الالكترون يسير مسافة مقدارها dx= vdt على سطح الاسطوانة

$\int Fydt = \frac{2ze^2}{bV} = p_e$ -------- (8)

وبهذا تكون الطاقة الحركية التي فقدها الجسيم الثقيل واكتسبها الالكترون هي

$T = \frac{1}{2} m_o v^2 = \frac{m_0^2 V^2}{2m_0} = \frac{p_e^2}{2m_0}$

$T = \frac{2z^2e^4}{m_0 b^2 V^2}$ --------- (9)

واذا كان عدد الذرات في وحدة الحجم n وكل ذرة تحتوي على Z من الالكترونات فأن المسار الذي طوله dx يحتوي على: nZ .2πbdx.db من الالكترونات ما بين b+db, b.من مسار الجسيم اي ان عدد الالكترونات داخل السطح الاسطواني= nZ 2πbdx.db وان مقدار الخسارة في الطاقة لكل وحدة طول من المسار تدعى بقدرة الايقاف وتساوي:

$\frac{-dT}{dx} = \int_{b\,min}^{b\,max} \frac{nZ2\pi bdb\ 2z^2e^4}{m_0 b^2 V^2} = \int_{b\,min}^{b\,max} \frac{nZ4\pi db\ z^2e^4}{m_0 b V^2}$

$\frac{-dT}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 nZ}{m_0 V^2} \int_{b\,min}^{b\,max} \frac{db}{b}$

معادلة بور-بلوخ $\frac{-dT}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 nZ}{m_0 v^2} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}}$ -------- (10)

ان هذه العلاقة تقريبية لان التصادم افترضناه مباشرا وهذا الافتراض غير دقيق وان الالكترونات الموجودة داخل المادة المعترضة هي ليست حرة وانما مرتبطة بالذرات ولكي يحصل انتقال للطاقة من الجسيم المشحون الى الالكترون الذي يقوم بتهييج الذرات الى حالة التهيج الاولي يجب ان يكون زمن التصادم (المعادلة3) وفق المبادئ الكلاسيكية اقل من الفترة الزمنية لدوران الالكترون حول الذرة اي :

$\Delta t_{max} = \frac{1}{\nu_e}$ -------- (11)

حيث υ_e هي تردد الحركة الدورانية للالكترون او تردد الالكترون وباستخدام المعادلة (3) نحصل على :

$\Delta t = \frac{b_{max}}{V} \Rightarrow \frac{b_{max}}{V} = \frac{1}{\nu_e}$

$b_{max} = \frac{V}{\nu_e}$ ---------- (12)

ان اقل قيمة لعامل التصادم b_{min} يمكن حسابها بواسطة قاعدة اللاتحديد لان موقع الالكترون لايمكن تحديده بالنسبة للجسيم الثقيل الى دقة تقل عن طول موجة دي برولي للجسيم اي ان :

$b_{min} \approx \frac{\hbar}{m_0 v}$ --------(13)

الصيغة الكلاسيكية لقدرة الايقاف (صيغة بور) (14)-- $S(E) = \frac{-dT}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 nZ}{m_0 V^2} \ln \frac{m_0 V^2}{\hbar \nu_e}$

$S(E) = \frac{-dT}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 nZ}{m_0 v^2} \ln \left[\frac{2m_0 V^2}{I_{ave}} - \beta^2 \right]$-------(15)

Where $\beta^2 = \frac{V^2}{c^2}$, I exc +I ion $= \frac{I_{ave}}{2} = \frac{h\nu_e}{2}$ or $I_{ave} = \hbar \nu_e$

حيث تم استبدال $\hbar\upsilon$ بمعدل جهد التهيج والتأين I_{ave} للذرات **ويعرف بانه اقل كمية من الطاقة التي يجب اعطاءها الى الكترون مرتبط بذرته تكفي لنقله من مداره.**

وتم ضرب المقدار داخل اللوغارتم بالرقم 2 لتصبح النتيجة مطابقة للنتائج المحسوبة وفق ميكانيك الكم وان z = العدد الذري للجسيم الساقط وZ =العدد الذري للمعدن وze =شحنة الجسيم الثقيل وm_o كتلة الالكترون السكونية وv =سرعة الجسيم الثقيل وnZ =عدد الالكترونات في وحدة حجوم المادة المعترضة .

اذا فرضنا ان عدد الذرات لكل وحدة حجم هو n يعتمد على كثافة المادة ρ وعدد افوكادرو N_A والوزن االجزيئي $\mathcal{A}$ فان :

$$n = \frac{N_A \rho}{\mathcal{A}} \quad \text{--------- (16)}$$

نعوض المعادلة 16 بالمعادلة 15 نحصل على :

$$\frac{-dT}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2 N_A \rho Z}{m_0 V^2 \mathcal{A}} \ln\left[\frac{2m_0V^2}{I_{ave}} - \beta^2\right] \quad \text{--------- (17)}$$

من ملاحظة المعادلة اعلاه نجد ان قدرة الايقاف :

1- لا تعتمد على كتلة الجسيم المشحون 2- تتناسب مع (z^2) 3- تعتمد على سرعة الجسيم 4- تتناسب مع كثافة المادة التي تسير خلالها.

علمنا فيما سبق ان الجسيم المشحون عندما يدخل في مادة فانه يفقد طاقة وهذه الطاقة تمتص من قبل ذرات المادة المعترضة لذلك فانها تتاين الى ايونات موجبة وايونات سالبة . وان قياس الفقدان في الطاقة عمليا يتم بواسطة قياس عدد الازواج الايونية الموجبة والسالبة لكل وحدة طول(-$\frac{di}{dx}$) من العلاقة :

$$\frac{di}{dx}- = \frac{\frac{dE}{dx}}{w} \quad \text{-------- (18)}$$

$$or \ \frac{dE}{dx} = wi$$

حيث ان :w تمثل الطاقة اللازمة لتوليد زوج ايوني واحد وتعتمد على عمليات معقدة هي : 1- التهيج الذري اضافة الى التأين 2- الكترونات ايكار الناتجة من عملية التأين الثانوي حيث ان الالكترونات الناتجة من التأين الاول قد تمتلك طاقة كافية لاحداث تأينات ثانوية.

مدى الجسيمات المشحونة الثقيلة داخل المادة:

ان المسافة الكلية التي يسير بها الجسيم المشحون لحين توقفه تسمى طول المسار**(s)**(path lenght). اما سمك المادة التي عندها يتوقف الجسيم المشحون يسمى بمعدل **المدى** ($\overline{R}$) (mean range) والذي يمثل معدل طول المسار الذي يسير به الجسيم في اتجاه معين قبل ان يفقد طاقته الحركية T_o بصورة كاملة اي ان:

$$\overline{R} = {}_0\int^{R} dx = {}_{To}\int^{0} \frac{dx}{dT}\, dT$$

$$\overline{R} = {}_0\int^{To} \left(-\frac{dT}{dX}\right)^{-1} dT \quad \text{---------- (19)}$$

ان المدى للجسيم المشحون قد يكون اكثر او اقل بقليل مما تعطيه العلاقة اعلاه وذلك لانه توجد دائما تقييمات احصائية في كمية الطاقة التي يفقدها الجسيم لكل وحدة طول من مساره وسبب هذا التفاوت البسيط في مديات الجسيمة يعزى الى سببين :

1- ان عدد التصادمات التي تعملها الجسيمة (أي عدد الازواج الايونية التي تنتجها) ليس ثابتا
2- ما تفقده الجسيمة من طاقة في التصادم الواحد ليس ثابتا ايضا وهذا ما **يسمى بالترنح** (struggling)

مدى جسيمة الفا في مادة ما(R_α):

تعرف بانها المسافة التي تقطعها جسيمة الفا في تلك المادة ولحين فقدانها لكل طاقتها.

اما معدل المدى (R_α) فيعرف بانه المسافة التي نصف جسيمات الفا تقطع مسافات اطول منها لحين وقوفها ونصفها الاخر يقطع مسافات اقصر لحين وقوفها

ويمكن التعبير عن مدى جسيمات الفا R_α بدلالة قدرة الايقاف:

$$R_\alpha = \int_{T_{\alpha 0}}^{0} \frac{dT_\alpha}{\frac{dT_\alpha}{dx}} \quad \text{---------- (a)}$$

$$\frac{dT_\alpha}{dx} \propto \frac{1}{v}$$

$$\frac{dT_\alpha}{dx} = -\frac{k}{v} \quad \text{---------- (b)}$$

حيث k ثابت التناسب

$$T = \frac{1}{2}mv^2 \quad \Longrightarrow \quad dT = mvdv$$

$$dT_\alpha = m_\alpha v_\alpha dv_\alpha \quad \ldots\ldots\ldots (c)$$.

$$v_\alpha = 0 \qquad when \ T_\alpha = 0$$.

$$v_\alpha = v_{\alpha 0} \quad \text{when} \ T_\alpha = T_{\alpha 0}$$

نعوض b و c في a نحصل على:

$$R_\alpha = -\int_{v_{\alpha 0}}^{0} \frac{m_\alpha}{k} v_\alpha^2 dv_\alpha = \frac{m_\alpha}{3k}(v_{\alpha 0})^3 = bT_\alpha^{3/2}$$.

تسمى هذه المعادلة بمعادلة كايكر

لقد وضع كايكر المعادلة التجريبية للربط بين مدى جسيمة الفا Rα في الهواء مقدرة ب cm تحت ضغط 76cm Hg ودرجة حرارة الغرفة وطاقتها في الهواء مقدرة ب MeV):

$$R_\alpha \ (\text{cm}) = 0.318 \ T_\alpha^{3/2} \ (\text{MeV}) \ \ldots\ldots\ldots (d)$$

وفي الاغراض العملية يفضل اتخاذ قيمة فيزيائية اخرى تعرف بقدرة الايقاف النسبية (Relative stopping power)(RSP)والتي تعرف: بانها النسبة بين مدى الجسيمات في الهواء الى مداها في المادة .

وقدرة الايقاف النسبية لجسيمة الفا = مدى جسيمة الفا في الهواء / مدى جسيمة الفا في االمادة

اما اذا كان هناك جسمان مشحونان لهما العددان الذريان Z_1 و Z_2 ويسيران بنفس السرعة v وبنفس المادة فان:

$$\frac{(\frac{dT}{dx})_1}{(\frac{dT}{dx})_2} = \frac{Z_1^2}{Z_2^2}$$

فاذا رمزنا لقدرة الايقاف لجسيم الفا ب SP_α وللبروتون ب SP_p فان:

$$\frac{SP_\alpha}{SP_p} = \frac{(2)^2}{(1)^2} = 4 \quad \Longrightarrow \quad SP_\alpha = 4SP_p$$.

اشعة دلتا (δ) (Delltа – ray):

عند تصادم الجسيم المشحون مع الالكترونات الذرية في المادة فأن الطاقة تنتقل من الجسيم المشحون بفعل التصادمات غير المرنة الى الكترونات ذرات المادة التي تمر خلالها الجسيمات وينتج عن هذه التصادمات حدوث تأين(ionization) او تهيج (excitation) لحالة الالكترون .

ففي حالة التأين (اي انفصال الكترون عن ذرته تماما) يمكن ان يتحرر الالكترون بطاقة حركية $(KE)_e$ وان الالكترون المتحرر هذا يمكن ان يقوم ايضا بتأيين ذرة اخرى. وتسمى الالكترونات السريعة الناتجة من التصادمات المؤينة الثانوية **باشعة دلتا (δ) (Delltа – rays)** وتعرف (بأنها عبارة عن سيل من الالكترونات السريعة الناتجة عن تصادم جسيم مشحون مع الذرة مما يؤدي الى اقتلاع الالكترون واكتسابه طاقة حركية) , **اما التهيج** (اي انتقال احد الكترونات الذرة من مدار الى اخر ذي طاقة اعلى) فيحدث عندما يكتسب الالكترون طاقة كافية ليتحرك الى حالة خالية empty state بمدار اخر وبطاقة اعلى ويمكن ان تعود الذرة الى حالة اكثر استقرارا عن طريق بعث فوتون اشعة سينية .

ان سلوك الالكترونات عندما تسقط على المادة يختلف اختلافا كبيرا عن سلوك الجسيمات الثقيلة فعندما يكون الجسيم المشحون المتفاعل هو الكترون او بوزترون فيمكن ان يفقد كل طاقته بالتصادم مع الكترون ذري في المادة عن طريق التصادم المفرد (single collision فقط ويمكن ان تستطار الالكترونات او البوزترونات بزوايا كبيرة لذلك يكون مسارها بشكل متعرج(zig-zag) اما الجسيمات الثقيلة المشحونة فانها بالمعدل تفقد طاقة اقل لكل تصادم ومن الصعوبة حرفها بواسطة الالكترونات الذرية لذلك يكون مسارها بشكل مستقيم تقريبا.

نلاحظ مما سبق ان **الجسيمات المشحونة الثقيلة** (+ion ,p,∝) تفقد طاقتها عن **طريق التصادم** فقط ومن جراء التصادم يحصل تأين او تهيج للذرة التي يسقط عليها الجسيم الثقيل وهنا تطبق معادلة بور– بلوخ , **اما الجسيمات الخفيفة** (الالكترونات) والتي سنتكلم عنها لاحقا فأنها تفقد طاقتها عن **طريق التصادم او الاشعاع** المسمى (الكبح النووي) .

ان الفرق بين فقدان الطاقة بالتصادم بالنسبة للجسيمات الخفيفة (لالكترونات) خلال مرورها بالمواد وبين تصادم الاجسام الثقيلة هو:

1- لايمكن التمييز بين الالكترون الساقط والالكترون الموجود داخل المادة لان لهما نفس الكتلة والشحنة لكن استطارة الالكترون الساقط اكبر من استطارة الالكترون

الموجود داخل المادة وطول المسار خلال المادة يكون اكبر بكثير من الخط المستقيم ومداه اكبر .

2- ان الشحنة Z للجسيم الساقط لاتتغير اطلاقا ولهذا فأن فقدان الطاقة بواسطة التأين يكون كبيرا جدا حتى بالنسبة للطاقات التي تصل في حدودev .

3- ان الالكترونات ذات طاقة حركية معينة تكون سرعتها اكبر من سرع الجسيمات الثقيلة ذات نفس الطاقة ولهذا فأن فقدان طاقة الالكترونات بواسطة انبعاث الاشعاعات الكهرومغناطيسية يبقى مهما عند طاقات اقل بكثير من تلك التي تكون للبروتونات.

الصيغة الكلاسيكية لقدرة الايقاف عند السرع العالية :

نلاحظ من المعادلة(14) التي وجدها بور عام 1913 ان جميع القيم فيها ثابتة عدا السرعة v والشحنة ze فكلما زادت السرعة فأن احتمالية التفاعل dT/dx تقل وكذلك فان الطاقة المفقودة تتناسب طرديا مع الشحنة (ze) وعكسيا مع السرعة v اي ان :

$$\frac{dT}{dX} \propto \frac{z^2e^4}{v^2}$$

أي انه عند السرع القليلة فان احتمالية التصادم تكون كبيرة فيكون فقدان الطاقة بالتصادم (تاين او تهيج). اما عند السرع العالية تقل احتمالية التصادم لذلك يكون فقدان الطاقة بالاشعاع وان فقدان الطاقة بالاشعاع اما ان يحصل بواسطة اشعة x او باشعة سرنكوف .

ان المعادلة (14) تصح لحساب الطاقة المفقودة للجسيمات المشحونة الخفيفة مثل (e^-) والاجسام الثقيلة المشحونة كالبروتونات للسرع غير النسبية non-relative إي انها تصح عندما تكون سرعة الايون الساقط اكبر من السرعة المدارية للالكترون اي ان $v>v_o$ واقل من $2zv_o$.

اما عند السرع العالية ($v>>2zv_o$) فان معادلة بور تفشل لانه عند هذه السرع لايمكن تحديد b_{max} (المسافة التي يتم فيها التفاعل) واحتمالية التصادم تقل كما ان الالكترونات ليست حرة وانما مرتبطة بالذرة وان الالكترون ليس مستقرا.

بعد ذلك تمكن Bethe – Bloch عام 1933 بادخال ميكانيك الكم واجراء تعديلات على نظرية بور وتمكن من صياغتها بالشكل التالي :

$$\frac{-dT}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2 \beta^2} - N\left[\ln\frac{2m_0C^2\beta^2}{I} - \ln(1-\beta^2\ ) - \beta^2\right] \quad \text{Where } I = \hbar\omega$$

تفاعل الجسيمات الخفيفة المشحونة مع المادة :

Interaction of light charged Particle (Electron) with matter:

ان الالكترونات السريعة تفقد طاقتها بطريقة مشابهة لتصادم الاجسام الثقيلة كما قلنا سابقا الا ان الالكترونات تفقد طاقتها اما بالتصادمات غير المرنة عن طريق التاين او باشعاع التباطؤ المسمى باشعاع الكبح النووي (Bremsstrahlung) وخصوصا عندما تكون الطاقة الحركية للجسيم الساقط بقدر طاقة كتلتها السكونية او اكثر($T \geq m_0c^2$) فانه يتفاعل مع المجال الكهرومغناطيسي للنواة فيتوقف الجسيم بشكل مفاجئ ويفقد طاقته على شكل اشعة كهرومغناطيسية تسمى **باشعة التوقف** لان الالكترون عند سقوطه على الذرة تظهر قوة التجاذب الكولومي بين الالكترون والنواة مما يسبب زيادة في تعجيل الالكترون وعليه سيبعث اشعاع بسعة تتناسب مع مقدار التعجيل (a) اي ان الجسيمات المشحونة التي كتلتها (M)وشحنتها Ze سوف تنحرف (defleeted) او تتغير سرعتها بسبب قوة التجاذب الكولومي وان التعجيل a يتناسب طرديا مع Zze^2/M وان شدة انبعاث الاشعاع الكهرومغناطيسي I يتناسب مع مربع (Zze^2/M) اي ان: $I \propto (Zze^2/M)^2$

وهذا يؤدي الى توليد اشعة الكبح النووي نتيجة تباطؤ الالكترون في نواة الهدف (target nucleus) وهذه هي اصل طيف الاشعة السينية .**وتعرف اشعة التباطؤ** (Breaking Radiation) بانها اشعة كهرومغناطيسية تشعها الجسيمة المشحونة المعجلة بمعدل

$$R = \frac{2kq^2a^2}{3c^3} \ \text{J/S}$$

حيث a تعجيل (او تباطؤ) الجسيمة و $k = 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{c^2}$ ثابت كولوم

لقد وجد Bethe – Heither عام (1954) ان معدل الطاقة المفقودة لوحدة المسار تعطى بالعلاقة:

$$-1/\rho\,(dE/dl)_{rad} = 3.44\times 10^{-4}\,(E+m_oC^2)\frac{Z^2}{M}\left[4\ln\left(\frac{2(E+m_0c^2)}{m_0c^2}\right) - \frac{4}{3}\right]$$

اي ان الطاقة المفقودة بالاشعاع تتناسب تقريبا مع طاقة الالكترون الساقط ومربع شحنة النواة (Ze^2) لذرات وسط الايقاف (stopping medium) . ان العلاقة اعلاه تبين ان كمية الطاقة التي يفقدها الجسم المشحون على شكل اشعاع $(dE/dl)_{rad}$ تتناسب عكسيا مع الكتلة M لذا فأن جسيم $\propto$ والبروتون اللذان لهما

نفس الطاقة ينتجان 0.000001 من الاشعة التي ينتجها جسيم β له نفس الطاقة بسبب الاعتماد على السرعة لذا تهمل الاشعة التباطؤية لجميع الجسيمات المشحونة ضمن الطاقات الاعتيادية عدا جسيم β حيث ان عند مروره بالقرب من النواة فأن قوة الجذب الكولومية العالية تسبب انحرافه بسبب التعجيل المداري.

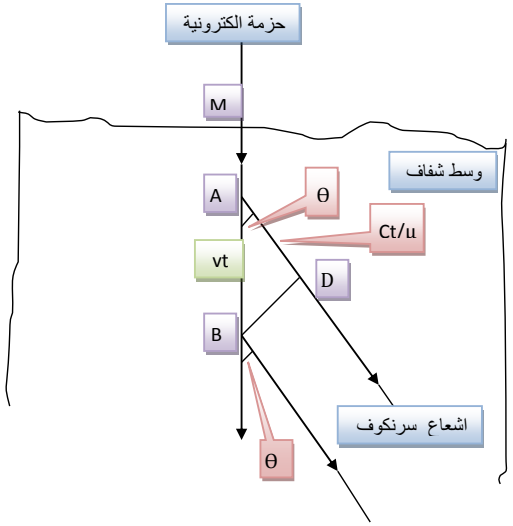
اشعة سرنكوف:

عندما تنطلق طائرة بسرعة اكبر من سرعة الصوت فاننا نسمع صوت فرقعة عالية جدا ويعود السبب الى ان حركة الطائرة تسبب نشوء موجة تصادمية لجزيئات الغلاف الجوي هذه الموجة تنتقل بسرعة اسرع من الصوت لذلك تسمع هذه الفرقعة. في سنة 1934 اكتشف سركوف طريقة جديدة لاحداث الاشعة المنظورة visible radiation . وقد لاحظ انه متى انتقلت حزمة من الالكترونات السريعة داخل وسط شفاف dielectric سببت اشعة منظورة على شرط ان تكون سرعة الالكترونات اكبر من سرعة الضوء في الوسط نفسه.

ان الالكترون الذي ينتقل داخل المادة يفقد القسم الاعظم من طاقته في تاين الذرات وتهيجها ومن جراء هذه العمليات يكتسب الالكترون تعجيلات صغيرة (من حين الى اخر) فيشع مقدار من الطاقة على هيئة تموجات كهرومغناطيسية ولما كانت هذه الموجات تتولد في نقط مختلفة واقعة على مسار الالكترون فأن الطاقة الشعاعية تبصر اذا كانت الموجات المنبعثة من النقاط المختلفة يقوي بعضها البعض , ويتيسر اشتقاق الشرط في حصول هذه التقوية بالنظر الى الشكل ادناه فأن حزمة الالكترونات تدخل الوسط الشفاف في النقطة M وتستمر في التحرك على المسار MAB ويشع الالكترون الطاقة في جميع الجهات من النقط الواقعة على مساره . وباستعمال طريقة هويكنز نحصل على جبهة الموجة BD حيث تكون المسافة AD مساوية الى ct/μ والمسافة $vt=AB$ حيث t هو الزمن اللازم لوصول الالكترون من A الى B وμ هو معامل انكسار الضوء وv سرعة الالكترونات في الوسط . وينتج من الشكل ان الاشعة تنتقل في اتجاه تصبح فيه المعادلة :

$$\text{Cos }\theta=\frac{AD}{AB}=\frac{ct/\mu}{vt}=c/\mu v$$

وقد درس اشعة سرنكوف كل من كولنس وريلنك عام 1938 مستعملين حزمة من الالكترونات طاقتها 1.9 Mev تسقط على حزمة من الاوراق الرقيقة من مواد شفافة مختلفة مثل الزجاج والماء والميكا والسيلوفين واخذ صورا فوتوغرافية للاشعة المنبعثة فوجدا ان الاشعة تبلغ نهايتها القصوى في الاتجاه الذي يحقق المعادلة , كما انهما فحصا الضوء المنبعث باستعمال طرق سبكتروسكوبية ووجدا:



- ان طيف اشعة سرنكوف هو طيف متصل وانه يمتد من نهاية طول الموجة للجهاز التي هي اكبر من 5000A الى نهاية امتصاص الاشعة فوق البنفسجية للوسط الذي تتولد فيه. وقد طور فايكوف وهندرسن 1943 اعمال كولنس وريلنك بحيث شملت دراستهما الالكترونات البطيئة التي تتراوح طاقتها 240 kev و815 kev وباستعمال الميكا كوسط شفاف وحصلا على نتائج متفقة مع نظرية فرانك وتام فيما يتعلق باتجاه انبعاث اشعة سرنكوف.
- اخذت اشعة سرنكوف تزداد فائدة لاستعمالها للكشف عن الدقائق المشحونة ذات الطاقات العالية والشرط الوحيد اللازم توفره في هذه الدقائق ان تكون سرعتها اكبر من سرعة الضوء في الوسط الذي تمر فيه وفي كل وسط معلوم تتعين زاوية الانبعاث θ بسرعة الدقيقة وحدها لذلك كان الكشف عن اشعة سرنكوف مناسبة لتعيين سرعة الدقائق ذات الطاقات العالية . ان الطاقة الكلية لاشعة سرنكوف $(dT/dx)_{cer}$ تعطى بالعلاقة التالية:

$$\left(\frac{-dT}{dx}\right)_{cer}=\frac{4\pi^2z^2e^2}{c^2}\int\left(1-\frac{1}{\beta^2\mu^2}\right)\upsilon d\upsilon \text{ erg/cm} \quad .$$

حيث ze شحنة الجسيمات المتحركة وυ تردد الاشعة المنبعثة

ان الطاقة المفقودة لاشعة سرنكوف هي بحدود 10^3 ev/cm للزجاج وتهمل عادة بالمقارنة مع الطاقة المفقودة بالتأين . ان المعادلة اعلاه تبين ان اشعة سرنكوف لاتعتمد على كتلة الجسيمات المتحركة وتعتمد فقط على شحنة وسرعة الجسيمات

من المعلوم ان سرعة الضوء تقل لتصل نحو 70% من قيمتها في الغلاف الجوي وذلك نتيجة تصادم وتفاعل فوتونات الضوء مع ذرات الوسط وفي حالة الاشعة الكونية فان الجسيمات الشبحية المتكونة ومنها الالكترونات تتحرك في وسط الغلاف الجوي بسرعة الضوء اي انها تتحرك اسرع من الضوء نفسه في الوسط ولهذا ينشأ من ذلك موجة بلون ازرق ذات طول موجي خاص تعرف هذه الموجة باسم اشعاع سرنكوف وسرنكوف هو عالم روسي وهو اول من عرف هذه الظاهرة فقد كان معروف ان الماء الثقيل المستخدم في المعجلات النووية يكتسب طيف ازرق ولم يكن معروف السبب ولكن سرنكوف عزى ذلك الى ان سرعة الجسيمات المتكونة في الوسط (الماء الثقيل) اسرع من سرعة مرور الضوء في الماء لذا تنشأ هذه الموجة الشاذة وفي يومنا هذا يرصد العلماء بواسطة التلسكوبات الارضية اشعة سرنكوف بوضوح في طبقات الغلاف الجوي ولذا فهي دليل قوي على تفاعلات الاشعة الكونية.

تفاعل النيوترونات مع المادة:

تعتبر دراسة تفاعل النيوترونات مع المادة مهمة في عمل المفاعلات النووية وتتضمن هذه الدراسة كيفية فقدان طاقة النيوترونات خلال التصادمات المرنة .

ان النيوترونات هي متعادلة كهربائيا وعليه فانها لا تستطيع فقدان طاقتها بواسطة عمليات التاين خلال الوسط الذي تمر فيه .ان الاعتراضات النووية رغم كونها نادرة الحدوث الا انها تعتبر الطريق الوحيد لفقدان الطاقة والتي لا يمكن اهمالها على عكس الجسيمات المشحونة التي تم اهمالها.

تصنيف النيوترونات: تقسم النيوترونات الى المجموعات التالية وفقا لطاقتها الحركية وهي:

1- النيوترونات الحرارية :وتشمل هذه المجموعة النيوترونات التي تقل طاقتها عن 0.5ev

2- النيوترونات متوسطة الطاقة : تشمل هذه المجموعة النيوترونات التي تزيد طاقتها 0.5ev وتقل عن 10kev وتؤثر هذه النيوترونات على الجلد البشري من خلال اشعة كاما التي تتحرر من التفاعلات .

3- النيوترونات السريعة : وتشمل النيوترونات التي تزيد طاقتها على 10 kev .

4- النيوترونات السريعة جدا: 10Mev< E<50 Mev

5- النيوترونات فوق السريعة : E> 50Mev

مصادر النيوترونات: The neutron sources

لا توجد في الطبيعة نظائر طبيعية مشعة للنيوترونات ولكن امكن في السنوات الاخيرة انتاج نظير الكاليفورنيوم252(^{252}Cf) الذي يعتبر لحد الان النظير الصناعي الوحيد للنيوترونات كما تعتبر التفاعلات النووية وتفاعلات الانشطار والاندماج النووي هي المصادر الوحيدة للنيوترونات ولنستعرض بعض هذه المصادر:

1- **مصدر الكاليفورنيوم:** يعتبر عنصر الكاليفورنيوم ^{252}Cf العنصر الوحيد الذي يطلق النيوترونات بشكل تلقائي ويتمتع بعمر نصفي طويل يجعله مناسبا لان يستخدم كمصدر للنيوترونات وفق التفاعل:

$$^{252}_{98}\mathrm{Cf} \rightarrow {}^{251}_{98}\mathrm{Cf} + {}^{1}_{0}n$$

2- **مصدر الراديوم- بريليوم:** يعتبر هذا المصدر من ارخص مصادر النيوترونات وتنتج النيوترونات في هذا المصدر عند قذف البريليوم 9 بجسيم الفا فينطلق نيوترون طبقا للتفاعل التالي(Be(∝,n

$$^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n + 5.7\ \mathrm{Mev}$$

ويستخدم نظير الراديوم226(^{226}Ra.)كمصدر لجسيمات الفا واحيانا يستخدم البولينيوم او الرادون بدلا منه. ويحضر المصدر بخلط كمية من الراديوم مع عدة غرامات من مسحوق البريليوم يمكن الحصول على مصدر نيوتروني يبلغ مردوده 10^{6}نيوترون في الثانية. ويجب وضع الخليط داخل كبسولة محكمة الاغلاق وغير قابلة للكسر حتى لا يحدث تلوث بمصادر جسيمات الفا.

3- مصدر البولونيوم بريليوم او الاميريشيوم بريليوم:

بستخدم في الوقت الحالي نظير البولونيوم210 الذي يبلغ عمره النصفي 138 يوم ويعتبر مصدرا لجسيمات الفا بدلا من الراديوم226 لتحضير مصادر النيوترونات مع البريليوم الا انه نظرا للعمر النصفي القصير نسبيا لنظير البولونيوم210 فقد حل مصدر الاميريشيوم241 محل الراديوم226 والبولونيوم210 وباتت الان مصادر الاميريشيوم241 بريليوم هي المصادر المتداولة في معظم التطبيقات الصناعية.

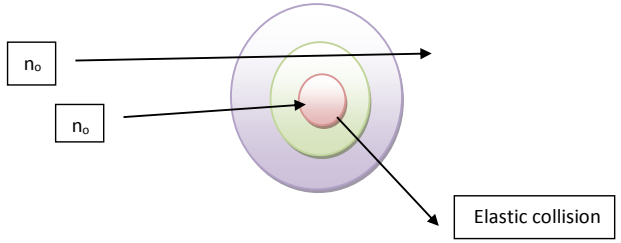
وهنالك مصادر اخرى للنيوترونات تعتمد على التفاعل (γ,n) حيث يجري امتصاص اشعة كاما من قبل النوى الخفيفة يلي ذلك تحرير النيوترونات احادية الطاقة من امثلتها (^{2}H (γ,n) ^{1}H , ^{9}Be (γ,n) ^{8}Be) وتسمى النيوترونات التي

تعطيها هذه التفاعلات بالنيوترونات الضوئية photo neutrons كما يمكن انتاج النيوترونات عن طريق قصف النوى الخفيفة بجسيمات مشحونة معجلة الى سرعة عالية مثال ذلك قصف الديتريوم المخلوط مع البارافين بالديترونات السريعة حيث يعطي سيلا من النيوترونات وفقا للتفاعل $^{2}H(d,n)^{3}He$. اما المصادر الاخرى هي المفاعلات الانشطارية التي تعتبر اكثر شيوعا .

خواص النيوترون:

أ- جسيم متعادل الشحنة له القابلية على اختراق حاجز الجهد النووي حتى اذا كانت سرعته بطيئة وله خاصية عدم الاستقرار . $n \rightarrow p+\beta^{-}+\upsilon^{-}$

ب- النيوترون عدده الذري 0 والكتلي 1 وزخمه الزاوي الذاتي $1/2\hbar$ اذ يعتبر جسيم مشع ذو عمر مقداره 12 min تقريبا ويعتبر النيوترون جسيمة ثاقبة حيث ان قوة كولوم لايمكن ان تؤثر عليها اثناء اختراقها للمادة ولكي يتم ايقاف النيوترون او ابطاء حركته لابد ان يصطدم مباشرة بنواة او بجسيم أخر له كتلة مقاربة لكتلته ولذلك تستخدم مواد مثل الماء او البلاستك لايقاف النيوترونات .



اذا قصف نيوترون فأنه يمر من دون اي تفاعل ولكن اذا مر بالقرب من النواة وهو التفاعل الوحيد الذي يحصل (تصادم مرن.)

ج- الطول الموجي للموجة المرافقة له حسب دي – برولي هي :

$$\lambda=h/p=h/(2ME)^{1/2}$$

تفاعل النيوترونات مع المادة:

يختلف تفاعل النيوترونات مع المادة عن تفاعل الجسيمات المشحونة الخفيفة منها والثقيلة واشعة كاما وذلك لان النيوترونات عديمة الشحنة فلا يمكن تعجيلها لذا فهي لاتتفاعل مع الكترونات الذرات اي انها لاتأين ولا تهيج ذرات المادة ولا يحدث عنه ابة تفاعلات كهروستاتيكية مع النواة اوالالكترونات اي ان لها القابلية على اختراق

الغيمة الالكترونية والتفاعل مع النواة حتى عند السرع القليلة وتعتمد على كل من طاقة النيوترون وطبيعة وتركيب النواة التي تمر بها ويكون هذا التفاعل على نوعين:

أولا: تفاعل الاستطارة :ويقسم الى نوعين:

1- تفاعل استطارة مرنة: فيها يهب النيوترون النواة بعض طاقته اي يحدث تفاعل مباشر مع الجهد النووي او تكوين نواة مركبة نتيجة انبعاث نيوترون مستطير مثل تفاعل (n,n) وتكون الطاقة محفوظة قبل وبعد التفاعل حيث يصطدم النيوترون بالنواة ثم يتشتت بطاقة حركية اقل من طاقته الاصلية تاركا النواة بنفس طاقتها الداخلية اي لايحدث تغيير في طاقة النوى وتركيبها .

$$T_1+T_2= T^1_1+T^1_2 \quad ; \quad P_1+P_2 =P^1_1+P^1_2 \quad ; \quad E_i =E_f$$

2- تفاعل استطارة غير مرنة: هنا يقوم النيوترون بتهييج النواة واعطائها بعض طاقته الحركية وفيها تعاني النواة تغيرا في طاقتها الداخلية ويفقد النيوترون القاصف جزء من طاقته الاصلية حيث يكون مجموع الطاقة الحركية للنيوترون والنواة بعد التفاعل غير مساوية لما هو عليه قبل التفاعل وتكون النواة في هذه الحالة متهيجة نوعا ما بعد خروج النيوترون وتتبع هذه العملية انبعاث فوتون او اكثر قبل تفاعل (n,n^{-}) :

$$^{143}_{45}Rh\ (n,n^{-})\ ^{143}_{45}R\ ,^{143}_{45}Rh-\gamma\ ,^{143}_{45}Rh$$

يمكن ان تحدث بعض التصادمات غير المرنة بين النيوترونات ونوى الذرات في المادة وفي هذه الحالة فأن هذه النوى سوف تحصل على بعض الطاقة فتتهيج ثم تتخلص من طاقة التهيج باطلاق فوتونات اشعة كاما . ويكون المقطع العرضي للاستطارة غير المرنة صغير جدا مقارنة مع المقطع العرضي للاستطارة المرنة .

ثانيا- تفاعلات الامتصاص : وتشمل نوعين من التفاعلات:

1- تفاعلات الانشطار : تنشطر النواة المركبة نتيجة اقتناصها للنيوترون الى شظيتين غير متساوييتين بالكتلة وتتحلل الشظايا بانبعاث جسيمة β بسبب زيادة نسبة النيوترونات الى البروتونات قبل تفاعل (n,p) ويحدث عند العناصر الثقيلة $(z\geq 90)$

2- تفاعلات التنشيط النيوتروني : Neutron activation يسبب امتصاص النيوترونات من قبل بعض المواد ما يسمى بالتنشيط النيوتروني لهذه المواد وتستخدم هذه الطريقة لانتاج النظائر المشعة وتشمل هذه التفاعلات على:

ا - تفاعل الاسر النيوتروني : مثل تفاعل (n,γ) وهي التفاعل السائد في عملية التشعيع بالنيوترونات الحرارية فعند دخول النيوترون الى النواة تتهيج ولكن عندما

تفقد تهيجها بانبعاث اشعة كاما لتعود الى الحالة الارضية او الى مستوى تهيج اعلى من المستوى الارضي ويتوقف ذلك على اعلى مستوى تهيج تصل اليه النواة المركبة ولما كانت النواة المتبقية تمتلك نيوترونا اضافيا فهي تكون نظير للنواة الاصلية كما في التفاعلات التالية:

$^{37}Cl(n,\gamma)\,^{38}Cl$, $^{23}Na(n,\gamma)\,^{24}Na$

ب- تفاعل انتاج الجسيمات: وهي التفاعلات الاكثر احتمالية من التفاعلات الاخرى وتشمل انتاج الجسيمات المشحونة مثل تفاعلات (n,p), (n,∝), (n,γ) وتحدث في العناصر الخفيفة ويتطلب حدوثها التغلب على حاجز كولوم قبل التحرر من النواة وقد تكون التفاعلات فاقده للطاقة مثل تفاعل $^{16}O(n,p)^{16}N$ او تفاعلات باعثة للطاقة مثل تفاعل $^{10}_{5}B(n,\alpha)^{7}_{3}Li$ او انتاج جسيمات متعادلة كما في تفاعل (n,2n) و(n,3n) حيث تكون طاقة النيوترون القاصف اعلى من طاقة ربط اخر نيوترون في أعلى مستوي للطاقة في نواة الهدف فاذا تخلفت نواة متهيجة نتيجة لاستطارة النيوترون القاصف بطاقة تهيج اعلى من طاقة ربط النيوترون فان النيوترون يستطيع التحرر من النواة بالاضافة الى النيوترون المستطار الاصلي .

تستخدم طريقة التنشيط النيوتروني في التحليل النوعي والكمي للتعرف على العناصر ونظائرها في المركبات المجهولة التركيب ويتم ذلك بتشعيع نموذج من المادة في سيل من النيوترونات فتتحول العناصر من حالتها الطبيعية المستقرة الى حالة متهيجة فمثلا عند تشعيع كلوريد الصوديوم NaCl بالنيوترونات يتحول الصوديوم والكلوريد الى عناصر مشعة كما في المعادلات :

$^{23}Na + {}^{1}n \rightarrow {}^{24}Na \rightarrow {}^{24}Mg + \beta^{-} + 2\gamma$

$^{37}Cl + {}^{1}n \rightarrow {}^{38}Cl \rightarrow {}^{38}Ar + \beta + 2\gamma$

الصوديوم تحول الى نظير ^{24}Na المتهيج وهو ينحل اشعاعيا بعمر نصفي قدره 15ساعة الى نظير المغنيسيوم ^{24}Mg المستقر باطلاق جسيم بيتا السالب وفوتونين من اشعة كاما طاقتهما 1.368 MeV او 2.754 MeV .

تفاعل اشعة كاما مع المادة:

ان اشعة كاما هي الاسم الذي يطلق عادة على الاشعاع الكهرومغناطيسي الذي ينبعث عادة من النوى المتهيجة بطاقة E_γ=0.12 MeV والذي يكون اصله من النواة ,

لايمكن تفسير تفاعلات كاما مع المادة باعتبارها موجات انما يجب اعتبارها مكونة من فوتونات او حزم من الطاقة او كجسيمات لها كتلة و زخم .

ان العمليات التي تجري عند مرور اشعة كاما خلال مادة هي عمليات معقدة وان اشعة كاما تتفاعل مع المادة بثلاث طرق وان تفاعلها يعتمد على طاقاتها وهي :

1- الظاهرة الكهروضوئية : photoelectric effect

في هذه الحالة عندما يسقط فوتون اشعة كاما على احد الالكترونات المدارية في الذرة فان هذا الالكترون سوف ينطلق خارج الذرة بطاقة حركية T_e اما النواة فيحصل لها ارتداد بطاقة (Ta) اي ان:

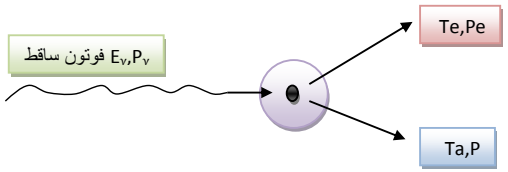
$E_\gamma = Te + Ta + B.E_{electron}$ ---------(1) Conservation of energy

حيث E_γ طاقة الفوتون الساقط و B.E طاقة ارتباط الالكترون المداري في الذرة ,

$\vec{P_\gamma} = \vec{P_e} + \vec{P_a}$--------- -(2) (conservation of momentum)

وهذا الالكترون عندما ينطلق خارج الذرة يترك مكانه فارغا (فجوة) فيحل محله الكترون اخر من احدى المدارات وبذلك يؤدي الى توليد فوتون الاشعة السينية وتحدث هذه الظاهرة عندما تكون طاقة الفوتون الساقط اكبر من طاقة ارتباط الالكترون بذرته وتكون هذه الطاقة 0.5 MeV – 0.01 ولطاقات اشعة كاما التي تزيد عن 0.5 MeV فأن الالكترونات الكهروضوئية يتم انبعاثها من قشرة k للذرة عادة وان احتمال حدوث الانبعاث الكهروضوئي يزداد كلما اقتربت hυ من B.E او υ من υ_e حيث υ_e= B.E /h وتمثل تردد حافة الامتصاص absorption edge .

ان التأثير الكهروضوئي يكون عادة مصحوبا بعمليات ثانوية اخرى وهي ان الذرة سوف لاتبقى في حالة تهيج ذات طاقة E_B لذا فانها اما ان تعطي اشعة X او ان الالكترونات سوف تتحرر من المستويات الخارجية للذرة حاملة طاقة التهيج الموجودة وان هذه الالكترونات تسمى **بالكترونات أيكار** . وفي اي وسط كثيف فان الاشعاعات الثانوية سوف تمتص بدورها باحتمالية عالية وهذا ما يحدث في معظم الكشافات المستعملة في الكشف عن اشعة كاما .



عندما يحدث ارتداد (recoil) للذرة فأن الالكترون يخرج بزخم (mv) ويكون للذرة زخم يساويه (MV)

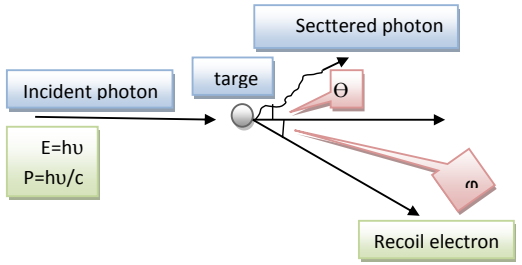
$\frac{1}{2}$ mv = MV $\rightarrow$ $m^2v^2 = M^2V^2$ $\rightarrow$ $\frac{1}{2} m^2v^2 = \frac{1}{2} M^2V^2$

mTe= MTa

$\therefore$ Ta =(m/M) Te $\leftrightarrow$(m/M) = 10^{-4}

2- تأثير كومبتن : (Compton effect)

ان قوانين حفظ الزخم والطاقة لايمكن ان تتحقق في حالة الامتصاص الكامل للفوتون من قبل الكترون طليق ساكن ولهذا فانه عند سقوط فوتون اشعة كاما ذو طاقة hυ على الكترون ساكن ضعيف الارتباط بالنواة فانه سوف يعطي قسما من طاقته الى هذا الالكترون وبذلك سوف يستطار الالكترون بزاوية مقدارها φ مع اتجاه الفوتون الساقط بينما يستطار (يرتد) الفوتون بزاوية مقدارها θ مع اتجاه الفوتون الساقط وبطاقة مقدارها hυ′ كما في الشكل :



لقد لاحظ كومبتن اثناء دراسته للاشعة المستطارة بان طول الموجة المستطارة λ′ هي اكبر من طول الموجة الساقطة λ وقد فسر الاختلاف في الطول الموجي Δλ باستخدامه النظرية الكمية للضوء فافترض ان الفوتون يصطدم بالكترون في حالة سكون m_o وبتطبيق قوانين الحفظ نحصل على:

$E_\gamma = E'_\gamma + T_e$ ---------- (1)

$h\upsilon = h\upsilon' + \frac{1}{2} m_o v^2$ ----------(2)

وبتطبيق قانون حفظ الزخم :

$P_\gamma = P'_\gamma \cos\theta + P_e \cos\varphi$ -------- (3)

$P_e \cos\varphi = P_\gamma - P'_\gamma \cos\theta$ -------- (4)

$0 = P'_\gamma \sin\theta - P_e \sin\varphi$ -------- (5)

$P'_\gamma \sin\theta = P_e \sin\varphi$ ---------- (6)

بتربيع المعادلتين 6,4 وجمعهما نحصل على:

$p_e^2 \cos^2\varphi = (P_\gamma - P`_\gamma \cos\theta)^2$

$p_e^2 \sin^2\varphi = p_\gamma^2 \sin^2\theta$

$p_e^2 (\sin^2\varphi + \cos^2\varphi) = P`_\gamma{}^2 \sin^2\theta + (P_\gamma - P`_\gamma \cos\theta)^2$

$p_e^2 = P`_\gamma{}^2 + P_\gamma{}^2 - 2\, P`_\gamma\, P_\gamma \cos\theta$

$m_0^2v^2 = p_e^2 = P`_\gamma{}^2 + p_\gamma^2 - 2\, P`_\gamma\, P_\gamma \cos\theta$

If $P`_\gamma \simeq P_\gamma$

$m_o{}^2v^2 = p_e^2 = 2p_\gamma^2 (1 - \cos\theta)$ --------(7)

From equ. (2) we get

$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda`} + Te$

$\frac{\lambda` - \lambda}{\lambda\lambda`} hc = Te$

$\lambda` - \lambda = \frac{\lambda\lambda`}{hc} Te$

$\lambda` - \lambda = \frac{\lambda\lambda`}{m_o hc} \frac{1}{2} m_0^2 v^2$ ---------(8)

بتعويض (7) في (8) نحصل على:

$\lambda` - \lambda = \frac{h}{m_o c} \frac{\lambda}{h} \frac{\lambda`}{h} (\frac{1}{2})(2p_\gamma^2 (1 - \cos\theta)$

$\Delta\lambda = \lambda` - \lambda = \frac{h}{m_o c} \frac{1}{P\gamma} \frac{1}{P\grave{\gamma}} (p_\gamma^2 (1 - \cos\theta)$

$P`_\gamma = P_\gamma$

$\Delta\lambda = \lambda` - \lambda = \frac{h}{m_o c} \frac{1}{p_\gamma^2} p_\gamma^2 (1 - \cos\theta)$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta) \text{ ---------(9)}$$

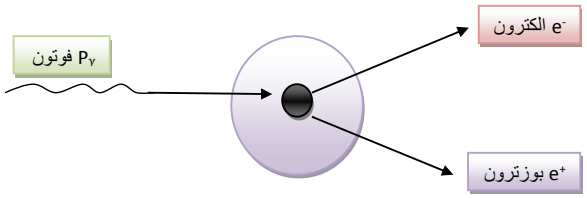
$$\lambda' - \lambda = 0.0243\,(1-\cos\theta)\ A^\circ$$

إذن مقدار التغير في الطول الموجي للفوتون لا يعتمد على طاقة كاما (γ) وانما يعتمد على زاوية تشتت الفوتون (θ) .

. اذا لم يكن الالكترون طليقا بل كان مرتبطا بالذرة وكانت الطاقة التي يكتسبها اثناء التصادم غير كافية لتحريره من الذرة فأن الذرة باجمعها سوف ترتد وليس الالكترون فحسب ففي هذه الحالة تمثل الكتلة m في المعادلات الى كتلة الذرة بدلا من كتلة الالكترون وبما ان كتلة الذرة هي اكبر من كتلة الالكترون بالاف المرات فان ذلك يؤدي الى حدوث تغير ضئيل جدا في تردد الشعاع المرتد بحيث تبقى طول موجته مقدارا ثابتا تقريبا . نلاحظ من معادلة كومبتن ان التشتت الخلفي لفوتون اشعة كاما يحدث عندما تكون زاوية التشتت $\theta=180^\circ$ وتحصل هذه الظاهرة عندما تكون طاقة الفوتون الساقط محصورة بين MeV(10- 0.1) وهذه الظاهرة هي احدى الادلة الساطعة لصحة النظرية الكمية للاشعاعات .

2- ظاهرة انتاج الزوج الالكتروني:Pair production

عندما يقترب فوتون يحمل طاقة عالية تقدر باكبر اومساوية ل 1.02 MeV بالقرب من المجال الكولومي للنواة فان هذا الفوتون سيختفي وتتحول الطاقة في هذه العملية الى مادة وهذه تتفق تماما مع نظرية انشتاين الخاصة بتكافؤ الكتلة والطاقة وبوجود النواة وكما مبين في الشكل ادناه يختفي فوتون اشعة كاما وتتكون بدله جسيمتان هما الالكترون والبوزترون وحيث ان شحنتي الجسيمتين متساويتين بالمقدار ومتعاكستان بالاشارة فليس هنالك صاف في الشحنة بعد التفاعل تماما كما هو الحال قبل التفاعل حيث لاتمتلك اشعة كاما شحنة وبهذا فان قانون حفظ الشحنة مطبق والكتلة الكلية الجديدة الناتجة تساوي ضعف كتلة الالكترون المكافئة لطاقته 2(0.51)=1.02 MeV وهذا يعني ان التفاعل يمكن ان يحدث فقط عندما تكون اشعة كاما مساوية لهذا المقدار على الاقل : electron

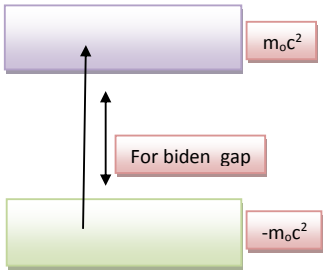


ولتفسير هذه الحقيقة لم تستطع الفيزياء الكلاسيكية من تفسيرها وكذلك معادلة شرودنكر ونموذج بور للذرة عجز ايضا عن ايجاد الحلول لها ولكن تمكن ديراك من تفسيرها على النحو التالي :

افترض ديراك ان الالكترون يتواجد في مستويين للطاقة احدهما طاقته موجبة (اضافة الى طاقته السكونية m_oc^2) والاخر طاقته سالبة استنادا الى معادلة ديراك الكمية والمكافئة للمعادلة النسبية غير الكمية :

$$E = \mp(P^2c^2 + mo^2c^4)^{1/2}$$

اي ان قيم طاقة الالكترون تتحدد بين $E \geq m_oc^2$ وبين $E \leq -m_oc^2$ ولاتوجد اي طاقة بينهما وبذلك تسمى هذه المنطقة بالفجوة المحرمة



في حالة منح اي الكترون في مستويات الطاقة السالبة طاقة مساوية الى 1.02Mev فان الالكترون سوف يرتفع من مستوي الطاقة السالبة الى مستوي الطاقة الموجبة وبذلك سيترك فجوة فارغة في مستوي الطاقة السالب تسمى (empty hole) وهذا يعني ظهور البوزترون ويتميز البوزترون بان له جميع خصائص الالكترون ماعدا شحنته ويعتبر ضديد الالكترون والبوزترون تم اكتشافه عمليا من قبل اندرسن عام 1932 وهو يتولد في عدة عمليات نووية .

عندما يتم خلق فجوة فأن الالكترون سوف يظهر ايضا في حالة الطاقة الموجبة وبطاقة حركية مقدارها Te' وبتطبيق قانون حفظ الطاقة :

$$h\upsilon = m_{e'}c^2 + m_e{}^+c^2 + T_{e'} + T_e{}^+ + k_r$$

حيث T_e ,$T_{e'}$ تمثل الطاقة الحركية لكل من البوزترون والالكترون وk_r تمثل طاقة ارتداد النواة وتهمل لانها صغيرة . وبما ان $m_{e+}c^2 = m_{e'}c^2$ تصبح العلاقة اعلاه كالتالي :

$$h\upsilon = 2m_oc^2 + T_{e'} + T_e{}^+$$

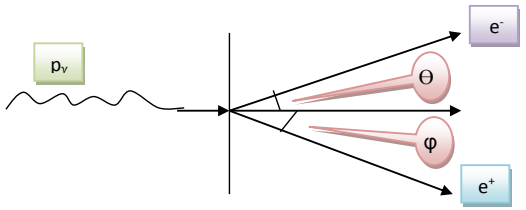
ان اقل طاقة لازمة لتوليد الزوج هي عندما يكون المقدار $T_{e'} + T_{e^+}$ = صفر وبهذا تكون :

$$h\upsilon = 0.51 + 0.51 = 1.02 \text{ Mev}$$

وتسمى هذه العملية بعملية خلق المادة.

اي عندما يمر فوتون بالقرب من النواة بتاثير المجال الكهرومغناطيسي للنواة يختفي الفوتون ويخرج بدله الكترون سالب والكترون موجب

إذن هي عملية تحويل طاقة الى مادة.



وباستعمال قوانين الزخم :-

$$P_\gamma = Pe^- \cos\Theta + Pe^+ \cos\varphi \text{ -------(1)}$$

$$Pe^- \sin\Theta \neq Pe^+ \sin\varphi \text{ ---------(2)}$$

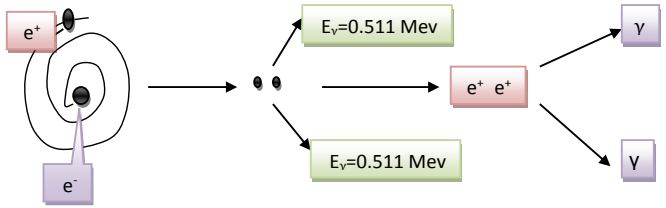
حيث فرق الطاقة المتبقية من انشطار الفوتون ترتد على شكل الكترون :-

$$Pe^+ \sin\varphi - Pe^- \sin\Theta = Pa$$

وزخم ارتداد الذرة :- $h\upsilon = 2m_oc^2 + Te$

<u>تفاعل البوزترون مع المادة:</u>

بعد عملية خلق البوزترون بعملية الخلق فأن البوزترون تقل سرعته ويتباطأ نتيجة التصادم مع الذرات وتقل طاقته بسرعة بسبب صغر كتلته مشعا بذلك اشعة التباطؤ بمعدل $R=2Ka^2q^2/3c^3$ فيؤدي ان يكون مساره متعرجا في المادة حيث يكون



الإلكترون بمثابة النواة ويدور البوزترون حوله فاقدا طاقته بالاشعاع الى ان تصبح طاقته صفر فأنه يزدوج مع إلكترون مكونا نوعا من الذرات التي يتحرك فيها كل منهما حول مركز ثقليهما المشترك وهذا التركيب يسمى **البوزترونيوم** وهي ذرة غير مستقرة تنحل خلال فترة زمنية بحدود 10^{-7}s الى فوتونا اشعة كاما بعملية تسمى **عملية الفناء** وبطاقة كلية تساوي على الاقل 1.02 Mev وهذا الاشعاع يسمى **اشعاع الفناء** annihilation radiation .

أن إنبعاث فوتونين من فناء e^-, e^+ ضروري لتحقيق قانون حفظ الزخم ففي لحظة فناء e^-, e^+ يكونان تقريبا في حالة سكون اي ان زخمهما قبل الفناء يساوي صفر فان انبعث فوتون واحد له زخم h/λ فهذا يعني ان الزخم بعد الفناء لا يساوي صفر انما يساوي زخم هذا الفوتون مما يعني ان الزخم الخطي لم يحفظ في هذه العملية . بينما في حالة انبعاث فوتونين بزخمين متساويين بالمقدار ومتعاكسين بالاتجاة سيجعل محصلة زخميهما تساوي صفر مما يعني اخيرا ان :

الزخم بعد الفناء = صفر = الزخم قبل الفناء

$P_i = P_f$ قانون حفظ الزخم

$$Pe^- + Pe^+ = 0 \Rightarrow P_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} = 0 \Rightarrow P_{\gamma 1} = -P_{\gamma 2}$$

أما قانون حفظ الطاقة فيتطلب :

$$E_i = E_f \Rightarrow m_oc^2 + m_oc^2 = 2\,m_oc^2 = 2E_\gamma$$

$$E_\gamma = m_oc^2 = 9.1 * 10^{-31} * 9 * 10^{18} = 0.511\text{Mev}$$

وتسمى الاشعة المنبعثة **أشعة الفناء** وتمثل في الطيف التفاضلي لاشعة كاما بقمة تسمى قمة الفناء وموقعها يمثل طاقة الفوتون 0.511Mev وإرتفاعها يمثل عدد عمليات الفناء التي حدثت .

اما في حالة كون الالكترون مرتبط بذرته فأن الاتحاد مع البوزترون يمكن ان يتم بأنبعاث فوتون واحد وذلك لان الذرة ستأخذ الزخم اللازم ولكن هذه العملية تعتبر نادرة الحدوث .

<u>توهين اشعة كاما:</u>

ان الفارق الرئيسي بين تفاعلات كاما مع المادة وتفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة هو ان فوتون كاما عندما يتفاعل مع المادة فانه يفقد ماهيته ويختفي معطيا كل طاقته للالكترون اي ان الفوتون يتفاعل مرة واحدة فقط مع الكترون واحد فقط

ويختفي بعد تفاعلة بعكس الجسيمة المشحونة التي قد تتفاعل مرات عديدة جدا مع الكترونات ذرات المادة لذا يتناقص عدد فوتونات كاما تناقصا اسيا خلال مرورها بالمادة وفقا للمعادلة $N=N_oe^{-\mu x}$ حيث N_o عدد الفوتونات الساقطة و N عدد الفوتونات النافذة من المادة التي سمكها x و μ معامل الامتصاص الخطي للمادة او معامل التوهين الخطي وكشدة فأن :

$I=I_oe^{-\mu x}$---------(1)

حيث I_o الشدة الساقطة وI الشدة النافذة وبالحقيقة ان نقصان الشدة بمقدار dI بسبب نفوذها مسافة dx يتناسب طرديا مع الشدة I ومع السمك dx اي :

$dI \propto Idx \rightarrow -dI = \mu Idx \rightarrow \mu = (-dI/I).1/dx$

حيث μ يمثل معامل التوهين الخطي ويعرف ((بانه النقصان النسبي لعدد الفوتونات لكل وحدة سمك ويقاس ب cm^{-1})).

السمك النصفي: *(Half thickness)*

هو السمك المطلوب لتقليل شدة الاشعة الساقطة الى النصف من قيمتها الاصلية وعليه تصبح المعادلة (1) كالالتي:

$1/2I_o = I_o e^{-\mu x_{1/2}} \rightarrow t_{1/2}(0.693/x_{1/2})$

$I=I_oe^{-\mu t\rho/\rho} = I_oe^{-(\mu/\rho)}.e^{(t\rho)}$

حيث (μ/ρ) معامل الامتصاص الكتلي ويقاس بوحدات cm^2/gm وكما يلي:

$\rho t = (gm/cm^3).cm = gm/cm^2$

مسائل الفصل الاول:ا

س1/- اذا كانت قدرة الايقاف (فقدان الطاقة) للبروتونات بطاقة 10Mev خلال الهواء هي 50kev/cm , ماهي قدرة الايقاف لجسيمات $\propto$ ذات طاقة 40 Mev ؟

$E_\propto/E_p = 40/10 = 4$

$m_\propto/m_p = 4/1 = 4 \rightarrow \upsilon_\propto = \upsilon_p$

$(dE/dx)_\propto/(dE/dx)_p = Z_\propto/Z_p = 2^2/1^2 = 4$

$(dE/dx)_\propto = 4(dE/dx)_p = 4*50 = 200kev/cm$

س2/- افترض ان معادلة قدرة الايقاف للالكترونات غير النسبية وللبروتونات هي متطابقة , فما هي الطاقة التي تكون فيها قدرة الايقاف للالكترونات مساوية لتلك التي لبروتون طاقته 10 Mev .

$(dE/dx)_p/(dE/dx)_e \rightarrow \upsilon_p = \upsilon_e$

$E_p/E_e = m_p/m_e = 931.48/0.511$

$10/E_e = 931.48/0.511, E_e = 10*0.511/931.48 = 0.00584Mev$

س3/- فوتون طاقته 350kev يعاني استطارة كومبتون من قبل الكترون حر . فاذا كانت الطاقة الحركية للالكترون المرتد هي 200kev , فما هو الطول الموجي للفوتون المستطار.

ان طاقة الفوتون الساقط تساوي ---------- $E = h\upsilon = hc/\lambda$

وطاقة الفوتون المستطارتساوي ---------- $E^- = h\upsilon^- = hc/\lambda$

$E^- = 350 - 200 = 150$ kev

$hc/\lambda^- = 150 \rightarrow \lambda^- = (6.62*10^{-34}*3*10^8)/(0.150*1.6*10^{-13}) = 0.0827A^\circ$

س4/- ماهو سمك الرصاص المطلوب لتخفيف شدة اشعة كاما المنبعثة من عنصر الثوريوم الى 0.01 من قيمتها الاصلية . اعتبر ان $\mu = 0.45\ cm^{-1}$.

$I/I_o = e^{-\mu t}$

$Ln(I/I_o) = e^{-\mu t}$

$Ln(1/100) = -0.45t$

$-4.6 = -0.45t$

$T = -4.6/-0.45 = 10.22$ cm

س5/ قارن بين الظاهرة الكهروضوئية وتشتت كومبتن:

س6/ ما الفرق بين الظاهرة الكهروضوئية والاشعة السينية ؟

الفصل الثاني

النشاط الاشعاعي (Radioactivity)

تتعرض النويات الى قوتين متنافستين هما **قوة التجاذب النووية** بين جميع النويات **وقوة كولوم التنافرية** بين البروتونات واذا كانت النواة تضم عددا اكبر من اللازم من البروتونات بالنسبة لعدد النيوترونات فأن النواة ستتعرض لقوة تفجيرية كبيرة نتيجة التنافر الكولومي . اي انها لن تكون قادرة على التواجد كنواة مستقرة ولن تكون النوى الكبيرة مستقرة الا اذا كانت تحتوي على نيوترونات اكثر من البروتونات اي ان فائض النيوترونات ضروري من أجل تخفيف الشحنة الموجبة للبروتونات ومن ثم خفض التأثير التنافري لقوى كولوم وعلى الرغم من ان معظم النوى مستقرة تماما الا ان النوى التي يزيد فيها (Z) عن (83) ستكون غير مستقرة نوعا ما.

تستطيع النوى غير المستقرة ان تعاني تلقائيا من تغير داخلي نحو حالة ذات طاقة أقل وأكثر استقرارا ويتم التخلص من الطاقة الزائدة عن طريق طرد جسيمات وأشعاع كهرومغناطيسي أثناء عملية يطلق عليها (**النشاط الاشعاعي**) وقد اكتشف الباحثون الاوائل منهم بكريل (Becquerel)بطريق الصدفة النشاط الاشعاعي الطبيعي عام 1896 أي بعد مضي اقل من أربعة شهور من اكتشاف الاشعة السينية حيث وجد ان الاشعاعات المنبعثة من أملاح اليورانيوم المتهيجة بالضوء تترك ظلا لبلورات مركبات اليورانيوم انطبعت على الواح فوتوغرافية كانت مغطاة بورقة سوداء ووجد ايضا ان هذه الاشعاعات تنبعث من هذه الاملاح سواء تعرضت للضوء ام لم تتعرض . وقد وجد بكريل ان شدة النشاط الاشعاعي تتناسب طرديا مع كمية عنصر اليورانيوم ولاتتغير بتغير درجة الحرارة ولا المجال الكهربائي او المغناطيسي او الضغط او التركيب الكيمياوي وقد استنتج **بان النشاط الاشعاعي هو ظاهرة نووية** .

لقد تمكن الباحثون كل من بيكرل ومدام كوري ورذرفورد وأخرون بأستخدام المجالات المغناطيسية من اثبات **وجود ثلاث أنواع من الطاقة** ذات الشحنة الموجبة وذات الشحنة السالبة والمتعادلة كهربائيا, اما فيما عدا ذلك فقد كان الباحثون عاجزين عن تحديد هوية الاشعاعات لذا اطلقوا عليها اشعة الفا (α) وبيتا (β) وكاما (γ) وقد بدأت تعرف حاليا بأن جسيمات α هي نوى (^4He) وان جسيمات β هي الكترونات اما اشعة كاما γ فهي موجات كهرومغناطيسية ذات طول موجي صغير جدا او (فوتونات).

وتعرف ظاهرة النشاط الاشعاعي Radioactivity : بأنها ظاهرة انبعاث جسيمات نووية (γ,β,α) من بعض النوى المتهيجة وتتصف هذه الظاهرة بانها عشوائية وذاتية . عشوائية لان عدد النوى المنحلة في وحدة الزمن ليس ثابتا وذاتية لانه لايمكن التأثير عليها بأي مؤثر خارجي كدرجة الحرارة والضغط والرطوبة ولا بحالة المادة صلبة او سائلة او غازية نقية او مركبة حتى ان تحلل نواة ما ليس له علاقة بتحلل النوى المجاورة . ان دراسة الاضمحلال الاشعاعي (Radioactive decay) والتفاعلات النووية (Nuclear reactions) هي دراسة لحركيات (Dynamics) النواة اي الخواص التي تتغير مع الزمن .يمكن ان تكون عمليات التحول تلقائية الحدوث (الاضمحلال الاشعاعي) او اصطناعية (التفاعلات النووية) وهنالك تشابه كبير بين العمليتين من الناحية النظرية.

س7/ أثبت ان الفوتون الذي طاقته تزيد على $2m_oc^2$ لايمكن ان يتحول الى زوج الكترون بوزترون في الفراغ؟

Supose that the pair production accure in the space then according to the conservation law of energy and momentum:

$$E_\gamma = \frac{Me^-c^2}{\sqrt{LB^2e^-}} + \frac{Me^+c2}{\sqrt{LB^2e^+}} \quad \text{-------(1)}$$

$$P_\gamma = P_{e^-} + P_{e^+} \text{ ----------(2)}$$

$$\text{Now } P_\gamma = \frac{E_\gamma}{C} = \frac{Me^-c^2}{\sqrt{1-B^2e^-}} + \frac{Me^+c2}{\sqrt{1-B^2e^+}}$$

$$\frac{Me^-CBe^-}{\sqrt{1-B^2e^-}} + \frac{Me^+CBe^+}{\sqrt{1-B^2e^+}} = P_\gamma$$

$$|P_\gamma| > |P_{e^-}| + |P_{e^+}| \text{ --------(3)}$$

وهذا مستحيل حسب المعادلة (2) ولهذا فأن زوج الكترون – بوزترون لا يمكن ان يتولد الا بجوار جسم ثالث يمكن ان يكتسب بعض الزخم واذا كان هذا الجسم الثالث هو النواة فأنها ستكتسب مقدارا قليلا من الطاقة .

شرط حدوث عملية p.p هو $E_\gamma > 1.022Mev$

ان النواة التي لها القابلية على بعث اي نوع من الاشعاعات تسمى عادة النواة الام (Parent nucleus) وتسمى النواة الكبيرة التي تبقى بعد الاشعاع بالنواة الوليدة (Daughter nucleus) , ان ابسط حالات الانحلال تكون في حالة كون النواة الوليدة مستقرة اما اذا لم تكن هذه النواة مستقرة فانه سوف يتكون لدينا ما يسمى **بسلسلة الانحلال الاشعاعي** (Radioactive decay chain) والتي سندرسها لاحقا.

قانون التحلل (الاضمحلال):

الاضمحلال او التحلل هو تحول العنصر المشع الى عنصر اخر ابسط او اكثر استقرارا. واذا فرضنا ان عينة مشعة (منحلة) تحتوي على عدد (N) من النوى فأن معدل تحللها خلال فترة زمنية معينة (t) يتناسب مع عدد تلك النوى , اي ان معدل النوى المنحلة لعنصر مشع (dN) والذي يحدث في فترة زمنية (dt) يتناسب طرديا مع عدد النوى الموجودة في المادة الاصلية اي ان:

$\frac{-dN}{dt}$ α N

dN α –Ndt

dN= –λ Ndt

حيث ان λ ثابت التناسب ويسمى بثابت الانحلال (decay constant) وهوثابت لكل نواة لكنه يعتمد على نوع المادة ونوع التحلل والاشارة السالبة تعني ان كل انحلال يؤدي الى تقليل N , فاذا كان عدد النوى الاصلية قبل التحلل هو N_o فان:

$$\int_{No}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{0}^{t} dt \longrightarrow \ln\frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$\boxed{N = N_o\, e^{-\lambda t}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

وهذا هو قانون التحلل حيث No هو العدد الاصلي للنوى وN هو عدد النوى غير المنحلة .

س/ كيف تثبت ان كتلة المصدر المشع تقل اسيا مع الزمن ؟

وعند ضرب طرفي المعادلة (1) ب λ نحصل على:

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

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

حيث A هي نشاطية (فاعلية Activity) النظير المشع وهي عملية الانحلال النووي الحادثة في وحدة الزمن او هي عدد الجسيمات المنبعثة في وحدة الزمن او (هي المعدل الزمني لانبعاث الجسيمات من عينة مشعة من النوى) وان عدد الجسيمات المنبعثة هي:

$dN_\tau = -dN = -\lambda N dt$

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

الانحلال بعدة طرق:

اذا كانت النواة يمكنها ان تنحل باكثر من طريقة فان احتمالية الانحلال ستزداد لان احتمالية الانحلال ستكون مجموع احتمالات الانحلال للطرق المختلفة حيث لاتأثير لاحدهما على الاخرى فلو كانت النواة تنحل بعمليتين (β, α) وكان هناك عدد N من النوى فان ما ينحل منها خلال فترة dt في كلا الطريقتين هو حاصل جمع نمطي التحلل كليهما لان اي نمط تحلل لا يعتمد على نمط التحلل الاخر اي ان :

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

$$-\int_{No}^{N} \frac{dN}{N} = \lambda_\alpha \int_{0}^{t} dt + \lambda_\beta \int_{0}^{t} dt$$

$$\ln N \Big|_{N_o}^{N} = -(\lambda_\alpha t + \lambda_\beta t) = -(\lambda_\alpha + \lambda_\beta)t$$

$N = N_o e^{-(\lambda_\alpha+\lambda_\beta)t}$

$N = N_o e^{-\lambda_{tot} t}$

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

$A_{tot} = A_\alpha + A_\beta$

اي ان الفعالية الكلية لمصدر يتحلل بنمطين تساوي مجموع فعاليتي النمطين كل على انفراد وتسمى النسبة $((A_\alpha/A_{tot})=(\lambda_\alpha/\lambda_{tot}))$ بنسبة التفرع (Branching Ratio) اما القيمة العملية لعمر النصف $t_{1/2}$ فهي : $t_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda_{tot}}$

عمر النصف ($t_{1/2}$) (half life) :

هو الفترة الزمنية اللازمة لكي تفقد العينة المشعة نصف نشاطها الاصلي او هو:

الزمن اللازم ليصبح عدد النوى غير المنحلة نصف عددها الاصلي وهو من القياسات الشائعة والمعروفة في تهدم العناصر . ويمكن حساب عمر النصف $t_{1/2}$ لعينة نشطة اشعاعيا , فاذا كانت $N=N_o/2$ و $t=t_{1/2}$ فأن المعادلة (1) يمكن وضعها بالصيغة التالية:

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

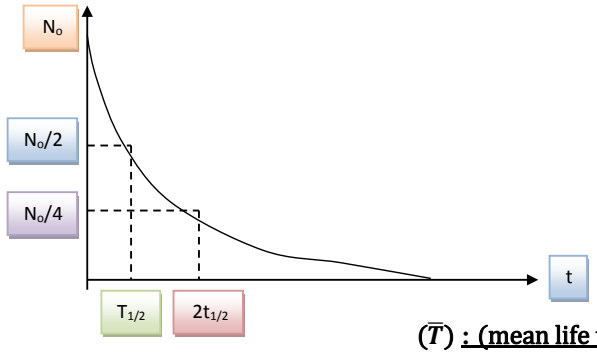
$\ln\frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \longrightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda t_{1/2}$

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

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

حيث ان λ ثابت الانحلال ويقاس بوحدات s^{-1} **وهو احتمالية انحلال نواة معينة في وحدة الزمن** ويعتمد على المادة ونوع الانحلال . اما النوى التي تنحل باكثر من طريقة فان قيمة λ تساوي مجموع ثوابت الانحلال الجزئية لطرق التهدم المختلفة اي ان:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + ...$$



معدل العمر (mean life time) : ($\overline{T}$)

هو مقلوب احتمالية انحلال نواة معينة في وحدة الزمن او هو معدل العمر(الزمن) الذي تبقى خلاله النوى بدون انحلال اشعاعي ويمكن حسابه كما يلي :

عدد النوى التي تنحل خلال الفترة بين (t , t+dt) هو : $dN=\lambda N dt$

وعدد النوى المتبقية بعد الزمن t هو : $N=N_o e^{-\lambda t}$

او ان عدد النوى المنحلة خلال الفترة بين (t , t+dt) هو : $-dN=\lambda N_o e^{-\lambda t} dt$

بعد ضرب طرفي المعادلة اعلاه ب t

∴ مجموع أعمار تلك النوى هو:

$$-dNt=\lambda N_o t e^{-\lambda t} dt$$

حيث ان عمر كل منهما هو t , ولما كانت عملية الانحلال عملية احصائية ويمكن لآية نواة ان يكون عمرها بين (0⟶∞) اذن فأن $\overline{T}$ هو :

$$\overline{T}=\frac{-\int_{N_0}^{N} t dN}{\int dN}=\frac{\int_0^{\infty} t N_o e^{-\lambda t}\cdot \lambda dt}{N_0}$$

$$\overline{T}=\frac{1}{\lambda} \quad \text{(profe that?)}$$

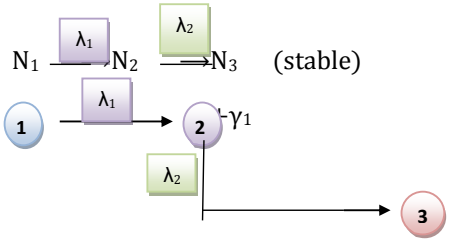
$$\overline{T}=\frac{t_{½}}{0.693}$$

Or $t_{1/2} = 0.693\,\overline{T}$

توليد نظير مشع من انحلال النواة الام: (نمو واضمحلال النشاط الاشعاعي)

(Radioisotope production by decaying parent)

نفرض ان النواة الام 1 تنحل اشعاعيا بثابت انحلال مقداره λ_1 وينتج عن ذلك نواة وليدة 2 نشطة اشعاعيا واشعاع γ_1 ولنفرض ان النواة الوليدة تنحل بدورها بثابت انحلال λ_2 وتعطي نواة وليدة مستقرة 3 واشعاع γ_2 اي ان:



حيث (N_3 , N_2 , N_1) اعداد النوى على التوالي.

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

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

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

نفرض ان العدد الاصلي للنوى 1 هو N_{10} نوية

$$\therefore \boxed{N_1 = N_{10}\, e^{-\lambda_1 t}} \quad .....(4)$$

نعوض المعادلة (4) بالمعادلة (2) نحصل على:

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10}\, e^{-\lambda_1 t} \quad .....(5)$$

ان المعادلة (5) معادلة تفاضلية غير متجانسة حلها يتألف من حل عام + حل خاص فالحل العام هو جعل الطرف الايمن للمعادلة مساويا للصفر :

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = 0 .....(6)$$

وحلها العام هو:

$$N_2 = C e^{-\lambda_2 t} .....(7)$$

حيث C هو ثابت قيمته تعتمد على الشروط الاصلية.

- اما الحل الخاص للمعادلة (5) فيتحدد بالتخمين وهو من النوع :

$N_2 = Ke^{-\lambda_1 t}$ .....(8)

وبالتعويض بالمعادلة (5) ينتج:

$$-\lambda_1 K e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 K e^{-\lambda_1 t} = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t} \Rightarrow K = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

وبالتعويض عن قيمة K بالمعادلة (8) يكون الحل الكامل للمعادلة (5)هو مجموع الحل الخاص(معادلة8)+ الحل العام (معادلة 7):

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + Ce^{-\lambda_2 t} \quad \text{.....(9)}$$

فاذا لم تكن هنالك نوى N_2 عند $t=0$ اي ان $N_2=0$ عند $t=0$ فأنه يمكن ايجاد قيمة C في المعادلة (9) وهي:

$$C = -\frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

ويكون لدينا :

$$\boxed{N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})} \quad \text{.....(10)}$$

ويمكن ايجاد قيمة N_3 بتعويض قيمة N_2 من المعادلة (10) في المعادلة (3) وبنفس الطريقة نجد ان:

$$\boxed{N_3 = N_{10}\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(\frac{1-e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1} - \frac{1-e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2}\right)} \quad \text{.....(11)}$$

وتسمى المعادلات (11,10,4) بمعادلات باتمان (Bateman equation) .

وبقسمة المعادلة (10) على المعادلة (4)ينتج:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad \text{..... (12)}$$

واذا ضربنا طرفي المعادلة (12)ب$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ نحصل على:

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{activity\ of\ 2}{activity\ of\ 1} \quad \text{..... (13)}$$

وتسمى هذه الحالة بالتوازن الانتقالي transient equilibrium

واذا كان $\lambda_2 >> \lambda_1$ فان : $\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = 1 \rightarrow A_2 = A_1$:

اي تتساوى الفاعليتان وبذلك نحصل على توازن متاخر(Secular equilibrium) او الموازنة غير القانونية

النوى المشعة طبيعيا:

انحلال نواة معينة خلال فترة زمنية قصيرة dt لايعتمد على اي تأثير خارجي بما في ذلك انحلال نواة اخرى في نفس الوقت ، ان جميع النوى لمادة معينة لها نفس الاحتمالية بالانحلال (p(t)) خلال فترة زمنية اي: $P(t)=\lambda\, dt$

النوى المشعة اصطناعيا : (تكوين نظير مشع بالقصف النووي)

(Radioisotope production by nuclear bombarment)

لنفرض اننا قصفنا مادة غير مشعة بسيل من النيوترونات وتولد نتيجة هذاالقصف نظير مشع بنسبة ثابتة مع الزمن مقدارها (Q) فان النظير المشع المتولد سوف ينحل بسرعة مقدارها (λN) حيث N عدد النوى المشعة الموجودة في تلك اللحظة وλ ثابت تحلل النظير ان مقدار التغير الصافي في N هو:

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

$$\frac{dN}{Q-\lambda N} = dt \Rightarrow {}_0\int^N \frac{dN}{Q-\lambda N} = {}_0\int^t dt$$

$$-\frac{1}{\lambda}\ {}_0\int^N \frac{-\lambda dN}{Q-\lambda N} = t$$

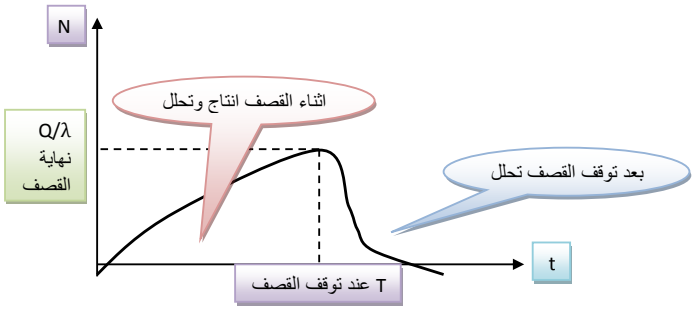
$$-\frac{1}{\lambda}\ln(Q-\lambda N)\Big| = t$$

$$Q-\lambda N = (Q-\lambda N)_{t=0}\, e^{-\lambda t}$$

نفرض ان N=0 في بداية انتاج النظير عند t=0 وبالطبع ان N=Q/λ≡No بعد فترة طويلة t=∞ وعليه اذا كان $N_{t=0}=0$ فأن :

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

ويرسم N كدالة للزمن ستحصل على الشكل التالي وعند توقف عملية القصف بعد t=∞ فان النظير المشع يبدا بالتحلل اي ان عدد النوى المشعة سوف يتغير مع الزمن وفق المعادلة $N=(Q/\lambda)(e^{-\lambda t})$ والمعدل الزمني لتغير N مع الزمن هو $\lambda N=(Qe^{-\lambda t})$ اثناء القصف (انتاج وتحلل) والمعدل الزمني لتغير N مع الزمن هو $-\lambda N=-Qe^{-\lambda t}$ بعد توقف عملية القصف فان النظير المشع يبدا بالتحلل اي ان عدد النوى المشعة سوف يتغير مع الزمن وفق المعادلة



وحدات قياس الاشعاع:

1- الكوري (Cutie) : ويرمز له بالرمز (C) ويعرف بانه وحدة لقياس قوة المصدر الذي يعطي $(3.7*10^{10}dis/s)$ انحلالا في الثانية , او هو كمية المادة المشعة التي تعطي $(3.7*10^{10}dis/s)$ انحلال في الثانية. او وحدة لقياس معدل الانحلال لمادة مشعة وتقابل نشاط

1gm من الراديوم $_{82}Ra^{225}$ واهم اجزاءه هو الملي كوري mci والمايكرو كوري µci والتي تعادل:

$1mci = 3.7*10^{7}$ dis/s (dis= disintegration)

$1\mu ci = 3.7*10^{4}$ dis/s

$1Bq = 2.7*10^{-11}ci$ (Bq = Becquerel)

وحدات قياس الجرعات الاشعاعية:

1- الرونتجن (Rontengin) : هو وحدة التعرض للاشعاع وهذه الوحدة تخص اشعاعات كاما واشعة x وتعرف بانها (عبارة عن كمية اشعة كاما او اشعة x التي تحرر $(8.38*10^{-6}J)$ من الطاقة لكل غرام واحد من الهواء بعملية التأين عند الظروف القياسية من ضغط ودرجة حرارة .

2- الراد (Rad) : هو كمية الاشعاع التي تحدث فقدان في الطاقة مقداره $(10^{-3}J)$ من الطاقة لكل غرام من المادة الممتصة وهو وحدةلقياس جرعة الامتصاص.

3- **الريم (Rem) :**هو عبارة عن تأثير راد واحد من اشعة x ذات طاقة مقدارها 250Mev .

4- **الرذرفورد (Rather ford) :** تستخدم هذه الوحدة لقياس الفاعلية وتعرف بانها فاعلية اي عنصر مشع ينحل بمعدل $(10^{6}dis/s)$ حيث ان :

$1R = 10^{6}$ dis/

سلاسل النشاط الاشعاعي:

في عام 1903 افترض رذر فورد – سودي بان طبيعة الذرة الوليدة يمكن استنتاجها من نوعية الام والجسيم المنطلق ومن هذه الفرضية يمكن موازنة معادلات التفاعل النووي في المصطلحات الحديثة وهما :

1- الشحنة الكلية الكهربائية (العدد الذري) اي ان المجموع الجبري للشحنات قبل التحلل يساوي الشحنة الكلية بعد التحلل .

2- مجموع الاعداد الكتلية للجسيمات الابتدائية يجب ان يساوي مجموع الاعداد الكتلية للجسيمات النهائية , مثلا لو ان اليورانيوم ذو العدد الذري 92 يقذف بجسيم الفا ذو العدد الذري 2 فيجب ان يكون العدد الذري للنواة الوليدة 90 وهذا العنصر هو الثوريوم وكذلك فأن العدد الكتلي لليورانيوم هو 238 والعدد الكتلي لجسيم الفا هو 4 فيجب ان يكون العدد الكتلي للثوريوم هو 234 ويمكن كتابة هذا التفاعل بالمعادلة:

$_{92}U^{238} \longrightarrow _{90}Th^{234} + _{2}He^{4}$

واذا كانت النواة الام باعثة بيتا فان العدد الذري للنواة الوليدة يجب ان يزداد بواحد لان جسيم بيتا هو الكترون سالب الشحنة وكذلك فان وزنه صغير جدا فان العدد الكتلي للنواة الوليدة والام لايتغير مثل Th^{234} وليدة U^{238} وهي ذات نشاط اشعاعي باعثة بيتا وعليه فان وليدة Th^{234} يجب ان يكون لها عدد ذري 91 بروتاكتنيوم (pa) وعدده الكتلي 234 كما في المعادلة:

$_{90}Th^{234} \longrightarrow _{91}Pa^{234} + _{-1}e^{0}$

ان النوى يمكن ان تكون موجودة بحالة مشعة بصورة طبيعية او يمكن ان تحث على الاشعاع اصطناعيا وعليه توجد اربع سلاسل للنشاط الاشعاعي الطبيعي هي سلاسل الثوريوم والتيتونيوم واليورانيوم والاكتينيوم . وان معظم العناصر المشعة الموجودة في الطبيعة تقع ضمن احدى هذه السلاسل وكل سلسلة نشاط اشعاعي تتكون من علاقات متوالية من نويدات والدة ووليدة وسبب وجود اربع سلاسل فقط هو ان نويدات هذه السلاسل تنحل بانبعاث جسيمات الفا اي ان كل انحلال يؤدي الى نقصان العدد الكتلي للنواة بمقدار 4 كما رأينا في التفاعل الاول لذا فالنويدات ذات العدد الكتلي (1) $A = 4n$ تستطيع ان تنحل الى نويدات ضمن هذه السلسلة بصورة متتالية وهذه السلسلة الثوريوم $_{90}Th^{232}$ وتدعى هذه السلسلة بسلسلة 4n .

ونويدات السلسلة 4n+1 لها اعداد كتلية (2) $A = 4n+1$

ونويدات السلسلة 4n+2 لها اعداد كتلية (3) $A = 4n+2$

ونويدات السلسلة 4n+3 لها اعداد كتلية (4) $A = 4n+3$

وسنأخذ بعضا من هذه السلاسل وهي:

1- متسلسلة الثوريوم (4n) :

2- متسلسلة اليورانيوم (4n+2) :

Series	Parent Lifetime	First Decay	End Product
Thorium	^{232}Th 1.40 x 10^{10}y	$^{232}Th \rightarrow ^{228}Ra + \alpha$	^{208}Pb
Neptunium	^{237}Np 2.14 x 10^{6}y	$^{237}Np \rightarrow ^{233}Pa + \alpha$	^{209}Bi
Uranium	^{238}U 4.17 x 10^{9}y	$^{238}U \rightarrow ^{234}Th + \alpha$	^{206}Pb
Actinium	^{235}U 7.04 x 10^{8}y	$^{235}U \rightarrow ^{231}Th + \alpha$	^{207}Pb

أنماط (عمليات) الانحلال النووي : (Nuclear decay Models)

1- انحلال كاما :(Gamma decay):

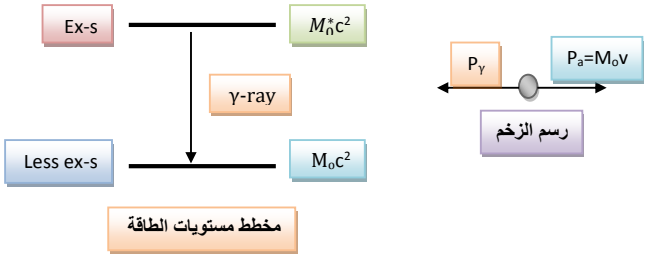
ان النواة المتهيجة (الايزومير) يمكنها دائما ان تنحل الى حالة اوطأ من الطاقة وذلك عن طريق انبعاث **اشعاع كهرومغناطيسي** او بواسطة **التحول الداخلي** (Internal conversion) او من **فناء الزوج** . ففي ابسط الحالات التي تكون فيها الحالات الابتدائية والنهائية هي مستويات طاقة البروتون فأن الانحلال عبارة عن انتقال البروتون من مستوى طاقة اعلى الى مستوى طاقة اوطأ وهذه العملية مشابهه لانتقال الكترون في ذرة متهيجة من مستوي عالي الى مستوي اوطأ والتي تكون مصحوبة ايضا بانبعاث اشعاع كهرومغناطيسي او انبعاث الكترون ثانوي ولكن يمكن القول بصورة عامة ان الحالات النووية ليست حالات جسيم واحد (single-particle states) لذلك فأنه يتوجب حصول اعادة لترتيب النيوكليونات في النواة عند حصول تحلل كاما.
وتعرف عملية انحلال كاما بأنها (عملية انبعاث اشعة كهرومغناطيسية من نواة متهيجة عند عودتها لحالة اقل تهيجا او الى الحالة الارضية),ان الفروق الموجودة في قيم البرم الزاوي واختلاف التناظرات بين الحالات النووية المشتركة في عملية الانحلال تلعب ادوارا اساسية ومهمة في حساب احتمال حدوث الانحلال.

حساب الطاقات في انحلال كاما:

لو فرضنا ان كتلة السكون للنواة الام هي M_o^* وكتلة النواة الوليدة هي M_o فأن تطبيق قوانين حفظ الطاقة والزخم تعطي :

$$M_0^* c^2 = M_o c^2 + E_\gamma + T_a$$

$$P_\gamma + P_a = 0$$



ويمكن اعتبار سرعة الارتداد للنواة قليلة بحيث يمكن استخدام المعادلات غير النسبية لحساب T_a :

$$T_a = \frac{P_a^2}{2M_0} = \frac{p_\gamma^2}{2M_0} = \frac{c^2 p_\gamma^2}{2M_0 c^2} = \frac{E_\gamma^2}{2M_0 c^2}$$

$$P_a = -P_\gamma \longrightarrow$$

وبما ان $E_\gamma = h\upsilon$ و $P_\gamma = h/\lambda$ حيث ان $E_\gamma = 2MeV$ لذلك فأن:

$$T_a = \frac{2^2}{2\times 50\times 930} Mev \simeq 40ev$$

ويمكن اعتبارها صغيرة فتهمل وبذلك تكون طاقة الفوتون هي :

$$E_\gamma \simeq (M_0^* - M_o)c^2$$

من الواضح ان تحلل كاما عملية تؤدي الى جسيمتين : **اشعة كاما** (فوتونات γ ذات الكتلة السكونية $m_{o\gamma}=0$ وطاقة $E_\gamma = pc$) **والنواة البنت** $M(A,Z)$, لذا فالطيف الطاقي لاشعة كاما هو طيف خطي (كما هو الحال في تحلل α راجع الاشتقاق والمعادلات التي تثبت ذلك). الااننا نجد عمليا ان طيفها يظهر بشكل قمة واحدة ليست رفيعة انما عريضة نسبيا اذا كانت الطاقة قليلة نسبيا بسبب فقدان اشعة كاما بعض طاقتها كحرارة داخل الكاشف وقبل دخولها فيه وبسبب عدم اسقاط كل الومضات الضوئية على الكاثود الضوئي وتشويش الجهاز الناتج عن تغير فولتيته وغيرها. اما اذا كانت E_γ كبيرة نسبيا بحيث يمكنها ان تتفاعل مع مادة الكاشف من خلال عدة عمليات (الظاهرة الكهروضوئية وتشتت كومبتن او انتاج الزوج وليست من عملية واحدة فعندها سيظهر طيفها الطاقي بشكل عدة قمم عريضة), **تسمى النسبة المئوية بين عرض القمة عند منتصف ارتفاعها (Γ) الى طاقة كاما بتمييز الطاقة (ميز الطاقة او تفريق الطاقة)**

$$R_E = (\Gamma/E_\gamma)\%$$ (Energy resolution)

ثابت انحلال كاما : (Decay constant for gamma decay)

ان انحلال كاما لاي نواة متهيجة يحتاج الى فترة زمنية معينة كما هو الحال بالنسبة للذرات المتهيجة وان انصاف اعمار الذرات المتهيجة يكون بحدود $10^{-8}s$ في حالات وجود فجوة متكونة عن انبعاث الكترون من احدى المستويات الداخلية للذرة,اما الحالات النووية المتهيجة يكون لها انصاف اعمار بالنسبة لعملية انبعاث فوتونات كاما يتراوح مابين $10^{-6}s$ الى مايزيد عن 100 سنة وان ثابت انحلال كاما يعطى بالعلاقة : $\lambda_\gamma \simeq \frac{e^2 R^2 E_\gamma^3}{3h^4 c^3}$

حيث R هو نصف قطر النواة.

تصنيف انحلال كاما : (Classification of γ- decay)

يطلق عادة على انتقال نواة معينة من مستوي طاقة متهيج E_i الى مستوي اوطأ E_f بانتقال γ او انحلال كاما ويحدث هذا الانتقال بين مستويات الطاقة النووية . اذا كانت هذه المستويات تحقق قواعد الاختيار (selection rule) وهي:

1) $\pi_i = -\pi_f$

اي ان التناظر π ل i,f تكون متعاكسة

2) $\Delta I = I_i - I_f = \mp 1 \text{ or } 0 \text{ and } I_f = I_i = 0$ forbidden

اي يجب ان تكون متجهات الزخم الزاوي I_i, I_f مختلفة عن بعضها اتجاهيا بمقدار وحدة اتجاهية للزخم الزاوي مقدرة بوحدات $\hbar$ ان اشتقاق هذه الشروط يعتمد على الاعتبار القائل بان الاشعاع الكهرومغناطيسي يتولد من نقطة مشحونة في حالة حركة وبما ان النواة في الحقيقة هي عبارة

عن توزيع متوسع للشحنة يجري داخله تيار يتولد عن الحركة المدارية والحركة البرمية للنيوكليونات ولهذا فأن المجالات الكهربائية والمغناطيسية المتولدة اثناء التحول هي تحويلات معقدة .

ان توزيع تيار الشحنات يمثل في حسابات الفيزياء الكلاسيكية بشكل حاصل جمع عزوم متعددات الاقطاب (Multipole moments) , ان كل متعدد اقطاب سوف يشع اثناء تذبذب الشحنة مجالا كهربائيا ومغناطيسيا خاصا (عدا العزم الذي يمثل $L=0$) ويمكن تصنيف المجالات التي يتم اشعاعها **اولا** بالاعتماد على مرتبة العزم **وثانيا** بالاعتماد على تأثير التناظر.

ان خاصية التناظر في نظريات الاشعاع الكلاسيكية ليس لها وجود او اهمية الا انه عند حدوث الاشعاع الكهرومغناطيسي عن متعدد قطب في حالة ابتدائية i الى حالة نهائية f فأنه ينتج عنه تغير في التناظر π_r وحسب قانون التناظر يكون:

$\pi_i=\pi_f.\pi_r$

لقد لوحظ عمليا عند دراسة الانحلالات الكهرومغناطيسية فأن هذه القاعدة تنطبق انطباقا تاما والى درجة عالية من الدقة كما وجد ايضا وبأستخدام ميكانيك الكم ان اي متعدد اقطاب رتبته I_r سوف يشع اشعاعا زخمه الزاوي هو $I_r\hbar$ وعند تطبيق قانون حفظ الزخم الزاوي ينتج :

$I_i=I_f+I_r \Rightarrow |I_i-I_f| \leq I_r \leq |I_i+I_f|$

ان تغير التناظر يعتمد مباشرة على I_r حيث:

لاشعاع متعدد القطب الكهربائي $\pi_r=\pi_i.\pi_f=(-1)^{Ir}$

لاشعاع متعدد القطب المغناطيسي $\pi_r=(-1)^{Ir+1}$

ويمكن تصنيف اشعاعات γ وفق الجدول التالي :

Name	Abbreviation	L_r	π_r
Electric dipole	E_1	1	-1
Magnetic dipole	M_1	1	+1
Electric quadrupole	E_2	2	+1
Magnetic quadrupole	M_2	2	-1
Electric octupole	E_3	3	-1

أمثلة على انحلال كاما:

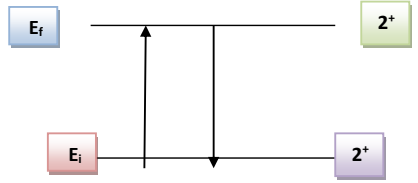
Initial state	Final state	Predominant decay mode
2^+	0^+	E2 Pure
1^+	0^+	M1 Pure
$\frac{1}{2}^+$	$\frac{1}{2}^-$	E1 Pure
2^+	2^+	M1,E2,M3,E4
$\frac{9}{2}^+$	$\frac{1}{2}^-$	M4,E5
0^+	0^+	No gamma decay

اي لايوجد هناك اشعاع فيه $L=0$ اي لايمكن ان ينتقل فوتون اشعة كاما بين مستويين لهما الزخم الزاوي $(I_i=I_f)$ 0 =.

ان الاشعاع الناتج عن متعددات الاقطاب المغناطيسية يكون اقل من نظيره الناتج عن متعددات الاقطاب الكهربائية ذات المرتبة نفسها وهذين النوعين من الانحلالات لايحدثان معا مطلقا وذلك بسبب اختلاف تناظرهما ولما كان الاشعاع ناتج عن تفاعل كهرومغناطيسي متبادل فمن الممكن ان يكون الانتقال على شكل اشعاع كهربائي او اشعاع مغناطيسي او خليط منهما .

مثال: بين انواع اشعة كاما للحالات التالية : $2^+ \longrightarrow 2^+$ ؟

$\pi=\pi_i.\pi_f=(+1)(+1)=+1$



$|I_i-I_f| \leq L_r \leq |I_i+I_f|$

$0 \leq L_r \leq 4 \Rightarrow L \neq 0$

$L_r=1,2,3,4$

$\pi=+1 \Rightarrow +1=(-1)^{Lr} \Rightarrow L_r=2,4$

حيث Lr تأخذ القيم الزوجية للانتقال الكهربائي (E2,E4) , وبتطبيق قانون التماثل للانتقال المغناطيسي :

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

$+1=(-1)^{Lr+1} \Rightarrow L_r=1,3$

اي ان هذه القاعدة تتحقق عندما L_r تأخذ قيم فردية .

اذن الانتقالات المغناطيسية هي M1,M3 وبما ان E4<E2 و M3<M1 , اذن

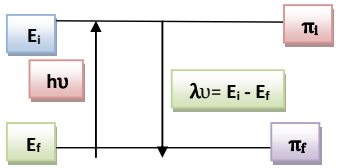
الاشعاع يكون انتقال كهربائي + انتقال مغناطيسي (E2+M1) .

مثال: جد الانتقالات الاكثر احتمالا لانبعاث اشعة كاما $0^+ \longrightarrow 2^+$.

التحول الداخلي: (Internal conversion)

علمنا ان اشعة كاما يمكن ان تنحل بثلاث طرق هي:

1- نتيجة انتقال النواة من مستوي طاقة متهيج E_i الى مستوى آخر اوطأ E_f او الى المستوي الارضي .



2- طريقة خلق الزوج

3- طريقة التحول الداخلي:

ان المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تتكون في النواة لفترات قصيرة جدا عندما يحاول احد النيوكليونات او اكثر اعادة تنظيم نفسه داخل النواة عند الانتقال من حالة ابتدائية الى حالة نهائية يمكن ان يؤدي الى عملية انتقال من نوع اخر تسمى **بالتحول الداخلي** ويعرف بأنه عملية تحرير الكترون داخلي (من القشرة k اوL) عند امتصاصه طاقة اشعة كاما المنبعثة من النواة .
ان الطاقة النووية (E_i-E_f) تنتقل في هذه العملية مباشرة الى احد الالكترونات الذرية والذي سوف يقذف بطاقة حركية مقدارها :

$T_e=E_i-E_f-E_B$ or $E_\gamma=E_i-E_f=E_B+T_e$

حيث E_B طاقة ارتباط الالكترون بمستوي الطاقة الذري الذي كان الالكترون يحتله قبل قذفه(باهمال طاقة ارتداد الذرة في المعادلة اعلاه) لاحظ الشكل. **هذه المعادلة مشابهة لمعادلة التأثير الكهروضوئي الخارجي الا ان التحول الداخلي لايمكن اعتباره عملية تأثير كهروضوئي داخلية بل هو عملية اضافية تستطيع النواة بواسطتها التخلص من طاقة التهيج الموجودة فيها الى جانب عملية انحلال كاما وذلك لان التحول الداخلي ينتج عن مجال كولوم** الذي يتغير مع الزمن داخل النواة والذي يكون اتجاهه باتجاه متجه نصف القطر بينما ينتج تحلل كاما عن مجالات كهربائية ومغناطيسية في الاتجاة المستعرض .
ان مركبات المجال مختلفة في الحالتين ولذلك فأن هاتين الظاهرتين تكونان غير معتمدتين على بعضهما ولذلك فان ثابت الانحلال الكلي للنواة هو :

$\lambda_{tot}=\lambda_\gamma+\lambda_e$

حيث λ_e هي احتمال التحلل عن طريق التحول الداخلي و λ_γ ثابت انحلال كاما
ان النسبة بين $\alpha=\lambda_e/\lambda_\gamma$ تسمى بمعامل التحول

ان فائدة التحول الداخلي بالنسبة لدراسات التركيب النووي تكمن في حقيقة انه ولفرق معين في الطاقة E_i-E_f ولعدد ذري معين Z فأن معامل التحول يعتمد بصورة حساسة جدا على نوع متعدد الاقطاب الذي ينتج عنه انحلال كاما لتلك النواة . ان هذا الاعتماد يكون تصاعديا بالنسبة لكل من Z,L_r وتنازليا بالنسبة الى E_i-E_f .

ان انحلال كاما يبين حالتين كليهما تحملان البرم والتناظر O^+ غير مسموح به اطلاقا الا ان التحول الداخلي في هذه الحالة يمكن ان يحدث . وان التحول من النوع $O^+\longrightarrow O^-$ يمكن ان يحصل بانبعاث فوتونين ولكنه لم يتم الكشف عمليا عن هذا النوع من الانحلال لحد الان.

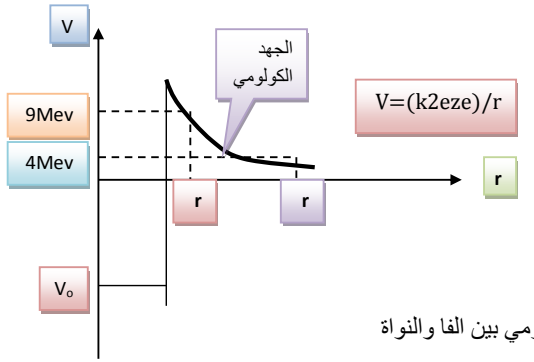
ان التحول الداخلي يكون دائما مصحوبا بعملية ثانوية اخرى وذلك لان الذرة تبقى في حالة تهيج ذات طاقة E_B وهذه الطاقة يمكن ان تبعث بشكل اشعة او الكترونات ايكار

ان الانتقال بطاقات $E_i-E_f\geq 2m_oc^2$ يمكن ان يحصل ايضا بخلق زوج الالكترون – بوزترون وكما هي الحال في التحول الداخلي فأن الزوج الداخلي الداخلي هو نوع اخر من التحلل يتكون من انتقال مباشر لطاقة الانحلال الى الكترونات ذات طاقة خيالية سالبة حسب نظرية ديراك ولكن احتمال حدوثها 10^{-3} مرة اقل من احتمال حدوث انحلال كاما .

2- انحلال الفا: (Alpha decay)

لم يستطع الميكانيك الكلاسيكي تفسير انبعاث جسيمة الفا وذلك من مشاهدة وتشخيص التناقض (وفقا للميكانيك الكلاسيكي فقد تم قصف اليورانيوم 238 بجسيمات الفا ذات طاقة 9MeV ولم

تستطع هذه الجسيمات النفوذ الى داخل النواة بفعل التنافر الكولومي بينهما ويبدو ان الجسيمة قد وصلت الى مسافة $3*10^{-14}m$ عن النواة مما يعني ان الطاقة الكامنة بينهما قد اصبحت 9MeV ($V=\frac{k\,2e\,ze}{r}$), في حين نجد ان طاقة جسيمة الفا المنبعثة من اليورانيوم 238 هي بحدود 4Mev والمفروض وفقا للميكانيك الكلاسيكي ان تجابه نفس التنافر الكولومي عند خروجها من داخل النواة الى الخارج فكيف تستطيع هذه الجسيمة التي طاقتها 4Mev ان تنفذ من عتبة الجهدpotential step او حاجز الجهد potential barrier او بئر الجهد potential well من داخل النواة الى الخارج لكنها لاتستطيع النفوذ منه من الخارج الى داخل النواة ؟ هذه الحقائق كانت بمثابة تناقض لم يستطع الميكانيك الكلاسيكي تفسيرها.



الجهد الكولومي بين الفا والنواة

ولم يفسر انبعاث جسيمة الفا والحقائق العملية المتعلقة بها الا بعد تطبيق مباديء الميكانيك الكمي وحل معادلة شرودنكر بالنسبة لعتبة الجهد من قبل كامو Gamow وبشكل مستقل من قبل كوندون و وكرني Condon&Garney عام 1918 حيث يرينا الحل ان بامكان الجسيمة التي طاقتها الكلية E اقل من عتبة الجهد V اي ($E_o<V$) باستطاعة الجسيمة عبور العتبة ان احتمالية هذا العبور قليلة الا انها لا تساوي صفر مطلقا وقد سمي هذا العبور او النفوذ بتأثير النفق.

حساب الطاقات في انحلال الفا: (Energy of alpha decay)

اذا كانت كتلة النواة الام parent في انحلال الفا هي M_p وكتلة النواة الوليدة Daugther هي M_D ويمكن كتابة التفاعل بالشكل:

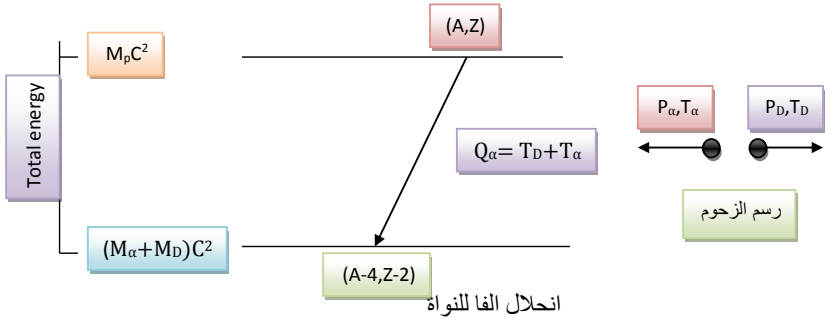
$$^A_zP \rightarrow ^{A-4}_{z-2}D + ^4_2He$$

فمن قوانين الطاقة والزخم نحصل على:

$M_p c^2= M_D c^2 +T_D + M\alpha c^2 +T_\alpha$ .....(1)

$0=P_D+P_\alpha$ .....(2)

حيث M_α كتلة جسيم الفا وP_α ,T_α =الزخم الزاوي والطاقة الحركية لجسيم الفا و T_D P_D =الزخم الزاوي والطاقة الحركية للنواة الوليدة المرتدة.



انحلال الفا للنواة

وباستعمال الكتل الذرية بدلا من الكتل النووية فيجب اضافة كتل الالكترونات الذرية مع طاقات ارتباطها الى طرفي المعادلة (1) فيكون كتل الالكترونات متوازنا في طرفي المعادلة كما ان مجموع طاقات الارتباط يكون متوازنا هو الاخر في حدود بضعة ev وعليه تصبح المعادلة (1) كالاتي:

$$M_pc^2=(M_D+M_\alpha)c^2+T_D+T_\alpha \quad \text{.....(3)}$$

ان طاقة الانحلال (Q_α) decay energy تعرف على انها تمثل حاصل جمع الطاقات الحركية لجسيمة α (T_α) والطاقة الحركية للنواة البنت T_D اي ان :

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

ومن المعادلة (3) يظهر ان Q_α تساوي الفرق في الكتل بين النواة الام والنواة البنت وجسيمة الفا اي ان:

$$Q_\alpha=[M_p - (M_D+M_\alpha)]c^2 \quad \text{.....(5)}$$

ان قيمة Q يمكن ايجادها اما بدراسة طيف الجسيمات اي بقياس طاقتها الحركية او بقياس طيف الكتل .

ان الطاقات الحركية T_D, T_α هي قليلة لذا يمكن استخدام المعادلات غير النسبية لحسابها .

$$T_\alpha=\frac{P_\alpha^2}{2M_\alpha} \ , \ T_D=\frac{P_D^2}{2M_D}$$

وبقسمة المعادلتين على بعضهما نحصل على:

$$\frac{T_D}{T_\alpha} = \frac{P_D^2}{2M_D}\cdot\frac{2M_\alpha}{P_\alpha^2} = \frac{M_\alpha}{M_D}$$

$$T_D=\frac{M_\alpha}{M_D}T_\alpha \quad \text{.....(6)}$$

ان النسبة بين طاقتي الجسيمتين كنسبة عكسية مع كتلتيهما $T_D/T_\alpha=M_\alpha/M_D$ اي ان الجسيمتين تقتسمان الطاقة المتوفرة لهما من التحلل بنسبة عكسية مع كتلتيهما.

ان طاقة ارتداد النواة لايمكن اهمالها في هذه الحالة كما هي الحال في انحلال كاما وبتعويض المعادلة (6) بالمعادلة (4) نحصل على:

$$Q_\alpha=\frac{M_\alpha}{M_D}T_\alpha+T_\alpha=\frac{M_D+M_\alpha}{M_D}T_\alpha \quad \text{.....(7)}$$

وبما ان $M_D=A-4, M_\alpha=4$ فالمعادلة (7) يمكن كتابتها بالصيغة التالية:

$$Q_\alpha=\frac{A}{A-4}T_\alpha \quad \text{.....(8)}$$

حيث A العدد الكتلي للنواة الام . ان T_α تكون دائما اقل من طاقة الانحلال Q_α وباستخدام تعريف طاقة الفصل لجسيم الفا S_α في الفصل الثاني وتعويضها بالمعادلة (5) نحصل على :

$$Q_\alpha=[M(A,Z)-M(A-4,Z-2)-M_\alpha]c^2$$

$$\therefore Q_\alpha=-S_\alpha \quad \text{.....(9)}$$

وباستخدام تعريف طاقة الربط بين Q_α وطاقات الارتباط الكلية للنواة نحصل على:

$$Q_\alpha=B_{tot(D)}(A-4,Z-2)+B_{tot(\alpha)}(4,2)-B_{tot(p)}(A,Z) \quad \text{.....(10)}$$

- ان الميكانيك الكلاسيكي لا يستطيع تفسير ظاهرة انبعاث جسيمات الفا لكن يمكن تفسير هذه الظاهرة بسهولة بواسطة ميكانيك الكم والحقيقة هي ان نجاح النظرية الكمية لانبعاث جسيمات الفا الموضوعة بصورة مستقلة من قبل كامر (Gamar) وكوري (Guray) وكوندن (Condon) عام 1918 قد اعتبر دليلا لصحة النظرية الكمية **وأسس هذه النظرية كما يلي:**

1- نفترض ان جسيمة توجد بصورة متميزة داخل النوى الثقيلة .
2- هذه الجسيمة في حالة حركة مستمرة وتكون محصورة داخل النواة بتأثير حاجز الجهد .
3- هنالك احتمالية صغيرة (محدودة) لجسيمة الفا ان تخترق الحاجز .

شروط انحلال الفا:

توصل الباحثين كوري ورذرفورد الى النتائج العملية التالية:

1- ان انحلال الفا لا يمكن ن يحدث الا اذا كانت قيمة Q_α موجبة اي ان A>150 .

2- للنوى المستقرة Q_α اكبر من الصفر (A>150) .

3- اذا كانت Q_α سالبة فلايمكن حدوث انحلال الفا (A<150) .

4- اما بالنسبة للعناصر الارضية النادرة يحدث انحلال الفا للنوى التي فيها N_D اكبر من 82 لانه في هذه الحالة سيظهر تأثير القشرة .

5- ان النوى المتهيجة يمكن ان تشع جسيمات الفا مهما كانت قيم A,Z وذلك لانه عندما تكون M_p عالية فان الطرف الايمن للمعادلة (5) يمكن ان يصبح موجبا.

مثال: اثبت ان جسيمات الفا لها نفس الطاقة الحركية عند انبعاثها؟

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 (P_α) يساوي بالمقدار ويعاكس بالاتجاة لزخم النواة البنت (P_D) اي ان:

$$P_\alpha = P_D$$

$M_\alpha V_\alpha = M_D V_D$

$T_\alpha = \frac{P_\alpha^2}{2M_\alpha}$, $T_D = \frac{P_D^2}{2M_D}$

وبقسمة المعادلتين على بعضهما نحصل على:

$$\frac{T_D}{T_\alpha} = \frac{P_D^2}{2M_D} \cdot \frac{2M_\alpha}{P_\alpha^2} = \frac{M_\alpha}{M_D}$$

$T_D = \frac{M_\alpha}{M_D} T_\alpha$.....(6)

وباضافة 1+ للنسبة نحصل على:

$\frac{T_D}{T_\alpha} + 1 = \frac{M_\alpha}{M_D} + 1 \Rightarrow (T_D + T_\alpha)/T_\alpha = (M_\alpha + M_D)/M_D$

$T_\alpha = (Q_\alpha - M_D)/(M_\alpha + M_D)$ Where $(Q_\alpha = T_D + T_\alpha)$

وحيث ان $(Q_\alpha, M_\alpha, M_D)$ ثوابت فهذا يعني ان T_α كمية ثابتة وان جميع جسيمات الفا المنبعثة من مصدر ما عن تحول النواة المتهيجة من مستوي معين الى اخر لها نفس الطاقة ولهذا فان الطيف الطاقي لجسيمة الفا هو طيف خطي وهكذا الحال لكل عملية تحلل تؤدي الى جسيمتين مثل تحلل كاما , حيث تكون لفوتونات كاما المنبعثة

مثال: اذا كانت كتلة الراديوم $^{224}_{88}Ra_{136}$ تساوي 224.02017u وكتلة الرادون $^{220}_{86}Rn_{134}$ تساوي 220.011401u وكتلة البولونيوم $^{216}_{84}Po_{132}$ تساوي 216.001927u وكتلة الرصاص $^{212}_{82}Pb_{130}$ تساوي 211.991903u وكتلة جسيمة الفا $^{4}_{2}He^{++}_{2}$ تساوي 4.002603u.

احسب T_N, T_α, Q_α عند انبعاث جسيمة الفا من كل من 1-الراديوم 2- الرادون 3-البولونيوم 4- ماتعليقك على النتائج؟

في الحقيقة ان النويدات المذكورة تمثل ثلاث عناصر من اصل سبعة عناصر تمثل سلسلة تحلل اشعاعي تبعث جسيمات الفا (الثوريوم , اليورانيوم , البلوتونيوم , كيوريوم).

انحلال بيتا: (Beta decay)

هو اكثر انواع الانحلالات شيوعا وذلك لان جميع النوى التي لا تقع في منخفض الاستقرار تكون معرضة لانحلال بيتا .

ان هذه العملية هي عبارة عن انبعاث الكترون من النواة ويمكن للالكترونات المنبعثة من النواة نفسها ان تكون سالبة (β^-) وموجبة (β^+) في بعض الاحيان.. لقد اثبت رذرفورد وسودي 1903 وباستعمال طرق كيماوية ان العدد الذري للمادة يزداد بمقدار وحدة واحدة عند حدوث انحلال بيتا السالبة كما اثبت بعد ذلك ان العدد الذري للمادة يقل بمقدار وحدة واحدة في حالة انبعاث البوزترون الذي اكتشف من قبل كوري وجوليو 1943 (Curie&Joliot) .

ان الدراسات الاولية لنشاط بيتا الاشعاعي لم تميز بين الالكترونات الناتجة عن التحول الداخلي وبين الالكترونات المنبعثة عن النواة في انحلال بيتا الا ان جادويك عام 1914 قد بين انه بينما تكون الاولى احادية الطاقة فانة في الثانية يكون طيفا مستمرا في الطاقة لكل نوع من النوى.

س) كيف تميز بين الالكترون المنبعث عن طريق التحول الداخلي والالكترون المنبعث من انحلال β^- ؟

ج) يمكن التمييز بينهما هو ان الالكترون المنبعث من التحول الداخلي يكون طيفه خطي بينما الثاني يكون طيف مستمر.

فرضية النيوترينو: (Neutrino hypothesis)

ان طيف الطاقة المستمر للالكترونات (او للبوزترونات) في انحلال بيتا قد اثبت كونه سؤالا محيرا على الرغم من ان الطاقة القصوى للطيف الالكتروني تقابل ماهو متوقع من حسابات فرق الكتلة بين النواة الام والنواة الوليدة باهمال طاقة الارتداد للنواة الوليدة فمثلا الطاقة الحركية العظمى للالكترون هي:

$T_{e(max)} = [M_p' - (M_D' + m_o)]C^2$

حيث ان الكتل المستخدمة تمثل الكتل النووية وm_o هي كتلة الالكترون الساكن . يوجد شذوذ ظاهري لقانون حفظ الطاقة لجميع الالكترونات عدا تلك التي تكون طاقتها الحركية مساوية للطاقة الحركية القصوى وهنالك شذوذا اخر في قانون حفظ الزخم الزاوي. نعلم انه في فرضية البروتون – نيوترون لتركيب النواة فأن كل النوى التي فيها A فردية فان قيمة عزم الزخم لها هي اعداد نصف صحيحة , واذا كانت هذه الحالة صحيحة فان الالكترون الذي برمه 1/2 سوف يغير الزخم الزاوي للنواة بنفس هذا المقدار ولهذا فان الانحلال من النوع :

$_1H^3 \longrightarrow {}_2He^3 + e^-$ .....(1)

يتطلب ان تكون قيمة الزخم الزاوي لنواة He^3 مساوية لعدد صحيح ولكن هذا مناقض للواقع التجريبي .

ان الدراسات اثبتت ان انحلال بيتا لا يحقق قانون حفظ الزخم الخطي وقد تم التغلب على هذه المشكلة **بواسطة النيوترينو υ** الذي وصفه **باولي** pauli في عام 1933 **والذي افترض وجود جسيم اخر الى جانب الالكترون او البوزترون ويتم انبعاثه في انحلال بيتا بصحبة الالكترون او البوزترون** وهو ذو كتلة سكونية قريبة جدا من الصفر وشحنته تساوي صفر وانها تتحرك بسرعة مقاربة لسرعة الضوء ويخضع الى قاعدة اليد اليسرى وبذلك فان زخمه الزاوي الذاتي $1/2\hbar$ وهو معاكس لاتجاه زخمه الخطي وبذلك يمكن كتابة المعادلة (1) بالشكل التالي:

$_1H^3 \longrightarrow {}_2He^3 + e^- + \upsilon^-$ .....(2)

ويسمى υ^- الانتي نيوترينو او النيوترينو المضاد Anti neutrino **ويعرف بانه جسيم يتصف بنفس الصفات التي يحملها النيوترينو ويتبع قاعدة اليد اليمنى اي زخمه الزاوي موازيا لزخمه الخطي** اما الانحلال المؤدي الى انبعاث البوزترون فيكون مثلا:

$${}_7N^{13} \longrightarrow {}_6C^{13}+e^{+} +\upsilon \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

ويطلق على الجسيم υ اسم النيوترينو . ان الطاقة الحركية للالكترون حسب هذه الفرضية هي:

$$T_e =[M_p'-(M_D' + m_o)]C^2-W_{(\upsilon)}$$

حيث $W_{(\upsilon)}$ تساوي $PC=T$ والتي ياخذها النيوترينو او الانتي نيوترينو ولهذا فان الفرق في الكتل هو ثابت دائما وان الالكترونات ستخرج بتوزيع مستمر للطاقة اي انه يحتوي على طاقات عديدة ومتقاربة وان الزخم الزاوي بالنسبة للانحلالات في المعادلتين (1,2) سيكون متوازنا ايضا من جهتي المعادلة . **ان النيوترينو قد افترض لاجل انقاذ قوانين الحفظ في الفيزياء** الا ان حقيقة وجوده هي الان خارج مجال اي شك .

ان النيوترينو لايحمل شحنة (وليس له عزم مغناطيسي) ولا يحدث عنه اي تأين ولهذا فانه لايمكن الكشف عنه مباشرة اضافة الى ذلك فانه لايحمل اية مجالات كهربائية او مغناطيسية كما هي الحال بالنسبة للفوتون ولا يؤثر باي قوى كهرومغناطيسية على الالكترون ولكن عند تفاعله مع النواة فانه سوف يؤدي الى حدوث تفاعل بيتا العكسي والذي سيتم الكلام عنه لاحقا.

* ان انحلال بيتا هو وسيلة تستطيع بواسطتها النواة ان تغير النسبة Z/n التابعة لها لكي تحصل على استقرارية اكبر وهناك ثلاث طرق تضمحل بها النواة فتبعث جسيمات بيتا هي:

1- انبعاث جسيمات بيتا السالبة B^- : تنتج من تحول نيوترون n الى بروتون p مصحوبا بانبعاث الكترون e^- (سمي تاريخيا عند اكتشاف ظاهرة النشاط الاشعاعي بجسيمة B^- .

$$n\longrightarrow p +e^- +\upsilon^- \quad ,ex.\longrightarrow {}^6_2He_4\longrightarrow {}^6_3Li_3^{+}+B^- + \upsilon^-$$

$${}^{64}_{29}Cu\longrightarrow {}^{64}_{30}Zn +B^- + \upsilon^-$$

وبشكل عام فان : $${}^A_ZX_N\longrightarrow {}^A_{Z+1}Y_{N-1}+ B^- + \upsilon^-$$

2- تحلل بيتا الموجبة (B^+-decay) (e^+) : وينتج عن تحول بروتون p داخل النواة الى نيوترون n وانبعاث بوزترون e^+ (ويرمز له عادة B^+) .

$$P\longrightarrow n +B^+ +\upsilon$$

$$Ex.;\ {}^{14}_8O_6\longrightarrow {}^{14}_7N_7 +B^+ +\upsilon$$

$${}^{64}_{29}Cu\longrightarrow {}^{64}_{28}Ni+B^+ +\upsilon$$

والمعادلة العامة للتحلل هي : $${}^A_ZX_N\longrightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1}+ B^+ + \upsilon$$

3- تأسير الالكترون :(electron capture) وهو اقتناص احد الالكترونات الداخلية (من القشرة k المدار الاول) من قبل النواة المتهيجة ليتحد مع احد بروتوناتها ليكون n .

$$P+ e^- \longrightarrow n+\upsilon$$

$$Ex.;\ {}^{64}_{29}Cu + e^- \longrightarrow {}^{64}_{28}Ni +\upsilon$$

والمعادلة العامة لتأسير الالكترون : $${}^A_ZX_N + e^-\longrightarrow {}^A_{Z-1}Y_{N+1} + \upsilon$$

حساب الطاقات في انحلال بيتا : (Energy of beta decay)

من قوانين حفظ الطاقة فان :

$$M_p C^2=M_D C^2 + T_D +m_oC^2 +T_e +W_{(\upsilon)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

ان جميع الكتل هي بوحدة الكتل الذرية . ومن قانون حفظ الزخم فان:

$$0=P_D +P_e +P_{(\upsilon)}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

لقد تم اخذ طاقة الارتداد للنواة الوليدة وزخمها بنظر الاعتبار , ويمكن اهمال T_D للاغراض العملية فالمعادلة (1) يمكن كتابتها بدلالة الكتل الذرية حسب نوع الانحلال . في الانحلال الالكتروني السالب β^- يكون العدد الذري في النواة الوليدة هو $Z\longrightarrow Z_p+1$ وفي الانحلال البوزتروني β^+ هو $Z\longrightarrow Z_p-1$ وعليه فالمعادلة (1) تصبح:

في حالة β^- $$M_pC^2=M_DC^2 +T_{\upsilon}^- +T_e^- \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

في حالة β^+ $$M_PC^2=M_DC^2 +2m_oC^2 +T_e+ T_{\upsilon} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

لقد تم افتراض ان كتلة النيوترينو = 0 في المعادلتين (3,4) وان طاقة ارتباط الالكترونات بالذرات صغير جدا ويهمل وبهذا فان طاقة الانحلال Q في كل حالة تصبح :

$$Q_{B^-}=T_{e^-} + T_{\upsilon^-} = T_{e^-(max)}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(5)$$

$$Q_{B^-}=(M_p-M_D)C^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(6)$$

$$Q_{B^+}=T_{e^+} + T_{\upsilon^+} = T_{e^+(max)}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(7)$$

$$Q_{B^+}=(M_p-M_D-2m_o)C^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(8)$$

حيث ان المعادلة الاولى في كل حالة تمثل تعريف Q والمعادلة الثانية تنتج من المعادلتين (3,4) ومن هنا يظهر بان:

1- انحلال β^- يحدث اذا كانت $M_{p(z)}$ اكبر من $M_{D(Z+1)}$.

2- انحلال β^+ يحدث اذا كانت $M_{p(z)}$ اكبر من $2m_o+ M_{D(Z-1)}$.

كما ان هناك عملية اخرى تسمى بالاقتناص الالكتروني (electron capture) يمكن ان تحدث اذا كانت $M_{p(z)}$ اكبر من $M_{D(Z-1)}$ وسيتم شرحه لاحقا.

ثابت انحلال بيتا :(Decay constant for beta decay)

ان قيم انصاف اعمار انحلال بيتا متباينة تتراوح مابين 10^3ثانية الى 10^{16} سنة ويمكن ان تصنف الانواع العديدة من خلال بيتا بالاعتماد على:

1- الزخوم الزاوية المدارية للالكترون وللنيوترينو .

2- تغير التناظر الذي ينشأ عن انحلال بيتا .

3- كذلك يمكن ان نميز الانحلالات التي يكون يها البرم الذاتي للالكترون والنيوترينو متوازيين (انحلالات كامو- تيلر Gamow – Teller decay) والانحلالات التي يكون فيها البرمان لا متوازيين (انحلالات فيرمي Fermi decay).

4- ان اغلب الانحلالات المسموحة لاصناف انحلالات بيتا (الزخم الزاوي الخارجي = 0) يكون فيها ثابت الانحلال متناسبا طرديا مع الاس الخامس لطاقة الانحلال اي: $\lambda_B=Q^5$

ان هذه التاثيرات تم تفسيرها في نظرية انحلال بيتا التي قام بتطويرها فيرمي عام (1934).

<u>قواعد الانتقال:</u>

1- قانون حفظ الزخم الزاوي $1) L_p=L_D+L_B+S_B$

2- قانون حفظ التناظر $2)\ \pi_p=(-1)^{LB}\ \pi_D$

حيث L_B الزخم الزاوي المداري الذي يحمله ازدواج الالكترون – نيوترينو(L_B-$\hbar$) و S_B البرم الذاتي الذي يحمله ازدواج الالكترون – نيوترينو.

ان الانحلالات التي تكون فيها $L_B= 0$ تسمى بالانحلالات المسموحة (Allowed) وعندما تكون $L_B=1$ فانها تسمى بالانحلالات الممنوعة الاولى (First forbidden) وعندما $L_B= 2$ فان الانحلالات تسمى الممنوعة الثانية (second forbidden) .....الخ

اما الانحلالات التي تكون فيها $S_B=0$ (انحلالات فيرمي) فتتميز عن الانحلالات التي تكون فيها $S_B=1$ (انحلالات كامو- تيلر) يتضح من هذا انه:

1- اذا كان برم Spin الالكترون والنيوترينو غير متوازيين (↑↓) فان $S_B=0$ والتي تدعى بانتقالات(انحلالات) فيرمي ويكون:

$L_P-L_D = L_B +0$

واذا كان $L_B=0$ (الانحلالات المسموحة) فان:

$L_P-L_D = 0 \Longrightarrow L_P=L_D$

2- اما اذا كان برم الالكترون والنيوترينو متوازيين (↑↑,↓↓) فان $S_B=1$ (وتدعى بانحلال كامو- تيلر) فيكون :

$L_P-L_D = L_B +1$

If $L_B=1 \Longrightarrow L_P-L_D = 2$ (First forbidden)

If $L_B=2 \Longrightarrow L_P-L_D = 3$ (second forbidden)

3- ان التغير في التناظر مرتبط بالعدد الكمي L_B وفق العلاقة $\Delta\pi=(-1)^L\beta$ لذلك :

اذا كانت L_β زوجية فلا يوجد تغير في التناظر.

وهنالك امثلة لانحلالات بيتا وفقا لقواعد الاختيار

Intial nucteus	Final nucteus	Predominant decay mode
$_2He^6(0^+)$	$_3Li^6(1^+)$	Allowed G.T
$_8O^{14}(O^+)$	$_7N^{11}*(O^+)$	Allowed F
$_0n^1(1/2^+)$	$_1H^1(1/2^+)$	Allowed G.T and F.mixed
$_{16}S^{35}(3/2^+)$	$_{17}Cl^{35}(3/2^+)$	Allowed G.T and F.mixed
$_{39}Y^{91}(1/2^-)$	$_{40}\ Sr^{91}(5/2^+)$	First forbidden G.T and F.mixed
$_{17}Cl^{38}(2^-)$	$_{18}A^{38}*(2^+)$	First forbidden G.T and F.mixed
$_4Be^{10}(3^+)$	$_5B^{10}(0^+)$	Second forbidden G.T

مثال: صنف انحلالات بيتا للانتقالات التالية:

1) $_2He^6(0^+) \longrightarrow {}_3Li^6(1^+)+\beta^- + \bar{\upsilon}$

بسبب زيادة z من 2 ← 3 يعني تحول $n \rightarrow p$ يعني انحلال β^-

1) $\Delta\pi=+1$ no parity change , $\Delta\pi=(-1)^{LB} = + \Longrightarrow L_B$ = even

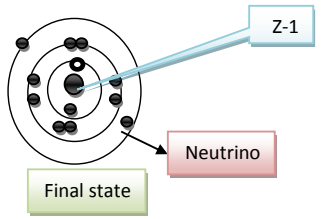
2) $\Delta L = L_p-L_D = L_B+S_B \Longrightarrow 1= L_B+S_B \Longrightarrow$

1) $S_B=1, L_B=0$ or $S_B=0, L_B=1$

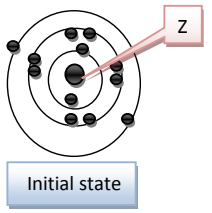
تهمل لان L_B زوجية.

<u>الانحلال باقتناص الكترون:</u> (Electron capture decay)

توجد عملية مشابهة لعملية الانحلال البوزتروني تم اكتشافها من قبل اليفارز Alvarez (1937) ان احد الالكترونات الذرية يمكن اقتناصه من قبل النواة تحت ظروف معينة . ان الاقتناص الاكثر احتمالا هو من مستوي k لان الالكترونات الموجودة فيه لها احتمالية كبيرة ان تكون داخل النواة كما ان عملية الاقتناص من مستويات اخرى ممكنة ايضا.



عملية اقتناص الالكترون من مستوي k



$p + e^- \longrightarrow n + \upsilon$

ان حسابات الطاقة في هذه العملية يمكن اجراؤها وفق الشكل اعلاه حيث تكون الحالة الابتدائية مكونة من الذرة الام والحالة النهائية مكونة من الذرة الوليدة والنيوترينو ونلاحظ ان شحنة النواة في الحالة النهائية متوازنة مع عدد الالكترونات الذرية فمن قانون حفظ الطاقة :

$$M_pC^2 = M_DC^2 + E_B + T_\upsilon \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

حيث E_B طاقة ارتباط الالكترون المفقود في النواة الوليدة . ان الكتل هنا هي للذرات في حالاتها الارضية وقد تم اهمال طاقة الارتداد للنواة الوليدة , ان قيمة Q لعملية اقتناص الالكترون تعرف على انها مساوية للطاقة الحركية للنيوترينو :

$$Q_{e.c.} = T_\upsilon = (M_p - M_D)C^2 - E_B \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

وبما ان طاقة ارتباط الالكترونات الخارجية $E_B \approx 0$ فان اقتناص الالكترون يحدث في الحالات التي تكون فيها $M_{p(z)} > M_{D(z-1)}$. ان عملية اقتناص الالكترون من المدارات الداخلية تليها دائما عمليات ثانوية اخرى كانبعاث اشعة x او انبعاث الكترونات ايكار Auger من الذرة الوليدة.

انحلال بيتا العكسي: (Inverse beta decay)

ان نظرية انحلال بيتا تتوقع ان يكون للنيوترينو احتمال صغير جدا ولكن محدد ايضا للتفاعل مع النوى .ان هذا الاحتمال هو في حدود 10^{-19} مرة اقل من احتمال التفاعلات النووية الاعتيادية .ان تفاعلا من هذا النوع تم اكتشافه من قبل رنيس وكوان Reines&Cowan عام 1953 حيث انهما بحثا عن التفاعل :

$$\upsilon^- + p \longrightarrow n + e^+ \quad \ldots\ldots(1)$$

وقد تم انتاج الانتي نيوترونات من انحلال بيتا التي تحصل في التفاعل النووي .ان هذا التفاعل يسمى بتفاعل بيتا العكسي .

$$n \longrightarrow p + e^- + \upsilon^-$$

وحسب نظرية ديراك فان خلق الكترون هو مكافئ لفناء بوزترون فان التفاعل يكون:

$$n + e^+ \longrightarrow p + \upsilon^-$$

مكافئا تماما لانحلال بيتا.

ان خلق النيوترون في التفاعل (1) قد تم الكشف عنه بواسطة الكشف عن اشعاع الفناء الناتج عن البوزترون والذي يليه بعد بضع μs من الزمن للكشف عن اشعاع كاما الناتج عن اقتناص النيوترون البطيء. ان احتمال حدوث التفاعل (1) قد تم التأكد منه بواسطة فتح وغلق المفاعل الذي ينتج جسيمات الانتي نيوترينو وقد اتضح ان هذا الاحتمال يتفق مع القيمة النظرية . لقد حاول ديفس (Davis) عام 1955 بواسطة تجربة مشابهة الكشف عن عملية اقتناص الالكترون.

$$_{18}A^{37} + e^- \longrightarrow {}_{17}Cl^{37} + \upsilon$$

$$Cl^{37} + \upsilon \longrightarrow A^{37} + e^-$$

ولكنه لم يفلح في الكشف عن وجود التفاعل بالقرب من المفاعل ,

مسائل الفصل الثالث

س1) تتم صناعة اليود 131 وهو نظير مشع في المفاعلات النووية لكي يستخدم في الطب اذ انه حين يتم تناوله داخل الجسم يتجه نحو الغدة الدرقية ليتركز فيها حيث يصبح مصدرا للاشعاع الذي يعالج مرض زيادة نشاط الغدة الدرقية وعمر النصف لهذا النظير هو 8 ايام , افرض ان احد المستشفيات قد طلب كمية مقدارها 20 mg من ^{131}I وقام بتخزينها لمدة 48 يوما كم يبقى من النظير ^{131}I الاصلي بعد هذه المدة؟

الحل:

الوقت (يوم) :	0	8	16	24	32	40	48
اليود (mg):	20	10	5	2.5	1.25	0.625	0.313

اي انه بعد 48 يوما لايبقى من 20 mg الاصلية سوى 0.313 mg .

س2) عمر النصف لليورانيوم 238 هو $4.5*10^9$ yr ويعتقد ان الكرة الارضية قد نشأت منذ نحو $4*10^9$ yr , ماهو كسر اليورانيوم الذي كان موجودا عند تكوين الارض وبقي دون اضمحلال الى الان؟

الحل:

$$\lambda = 0.693/T_{1/2} = 0.693/4.5*10^9 yr = 1.54*10^{-10}\ yr^{-1}$$

$$N/N_o = e^{-\lambda t} = e^{-(1.54*10-10)(4*109)} = 0.54$$

اي انه يوجد حاليا 54% من اليورانيوم 238 .

س3) احسب وزن المادة المشعة في مصدر ^{214}p نشاطهالاشعاعي 1ci وثابت انحلاله $4.31*10^{-4}\ S^{-1}$ ؟

الحل:

$$N = (W/A)Aa = (W/214)6.02*10^{23}$$

$$\Phi = \lambda N \Longrightarrow 3.7*10^{10} dis/s = 4.31*10^{-4} * (W/214)6.02*10^{23}$$

$$W = 3.1*10^{-8}\ gm$$

س4) مصدرين نشاطهما الاشعاعي φ_{01} يساوي 2mci وφ_{02} يساوي 1mci وثابت الانحلال لهما $\lambda_2 = 5*10^{-4} s^{-1}, \lambda_1 = 10^{-3}\ s^{-1}$ فما الزمن الذي يتساوى فيه النشاط الاشعاعي لهما ؟

الحل:

$\Phi_1=\varphi_{01}e^{-\lambda_1 t}=\varphi_{02}e^{-\lambda_2 t}$

$2*3.7*10^7*e^{-0.001t}=1*3.7*10^7e^{-0.0005t}$

$Ln2-0.001t = -0.0005t$

$t =1.39*10^3 s$