النشاط الإشعاعي

مقدمة: ظاهرة النشاط الإشعاعي هي ظاهرة ذرية تنتج التحلل التلقائي والمستمر لبعض العناصر الطبيعية أو الاصطناعية وهي لا تتأثر بالبيئة أو الظروف الخارجية الموجودة حول العنصر من ارتفاع أو انخفاض في درجة الحرارة أو الرطوبة أو الضغط أو وجود أو عدم وجود مجالات كهربية أو مغناطيسية، حيث أنه يحدث لزمن للتحلل ثابت لكل عنصر مشع. ويتبع هذا التحلل خروج أشعة مثل جسيمات ألفا أو بيتا أو موجات كهرومغناطيسية مثل أشعة جاما.

- وقد تم اكتشاف ظاهرة النشاط الإشعاعي لأول مرة بواسطة الفيزيائي الفرنسي أنتوني بيكريل عام ١٨٩٦م وتمت دراسة الظاهرة بالتفصيل بواسطة عالمتي ماريا سكلودوفسكا وبيير كوري، اللذان اكتشفا أيضاً العناصر المشعة الطبيعية أصيح وهي اليورانيوم والثوريوم والبولونيوم والراديوم.

- أسس الفيزيائيان الإنجليزيان رذرفورد وسودي طريقة أخرى بواسطتها أنه تختلف العناصر العادية فإن الأنوية الذرية للعناصر المشعة ذات تكوين غير مستقر ولهذا السبب فإنها دائماً ما تضمحل باعثة جسيمات ألفا أو بيتا (أنوية ذرات الهيليوم أو الإلكترونات) ومن ثم تتحول إلى عناصر جديدة أخف من الوزن.

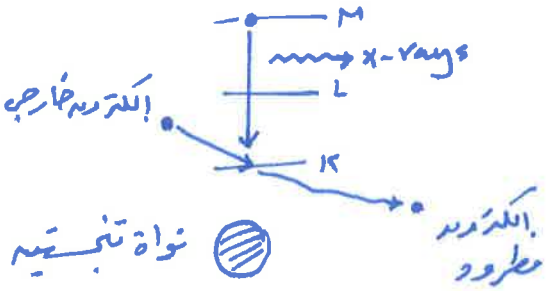
مثال: الراديوم - ٢٢٦ ($_{88}Ra^{226}$) عندما تقذف نواته جسيم ألفا ($_2He^4$) فإنها تفقد شحنة موجبة ونيوترونين وبالتالي تتحول إلى عنصر جديد هو الرادون - ٢٢٢ ($_{86}Rn^{222}$). أي أن نتيجة تحلل الراديوم هو تكوين عنصر جديد - الهيليوم والرادون ومع هذا فإن عملية التحلل ما زالت مستمرة وذلك للعنصر المشع الجديد وهو الرادون. وقد يرمز الرادون - ٢٢٢ على أنه غير مستقر إلى حد بعيد وتقذف نواته جسيم ألفا جديد مكونة حادة مشعة غير مستقرة هي البولونيوم - ٢١٨ ($_{84}Po^{218}$). هذه العملية من الاضمحلال لمتتابع وتكوين أجيال من المواد المشعة تنتهي فقط عندما تتحول كل الكمية الأولية من الراديوم نهائياً إلى الرصاص العادي (غير مشع - مستقر) وبالتحديد إلى نظير الرصاص الثابت - ٢٠٦ ($_{82}Pb^{206}$).

ملاحظة بالإضافة إلى العناصر المشعة الطبيعية أمكن إبتداءً من عام ١٩٢٤ تحويل العناصر المستقرة إلى أخرى غير مستقرة (مشعة) وذلك من خلال قذف أنويتها بالنيوترونات. ويتم إتمام ذلك الآن بواسطة المفاعلات النووية أو معجلات الجسيمات المشحونة.

الأشعة: عبارة عن سيل من الجسيمات النووية أو نبضات الموجات الكهرومغناطيسية تخرج (تنبعث) من الذرة أو نواة الذرة إلى البيئة المحيطة بك. تختلف الأشعة حسب المصدر وتوعي وطاقتي.

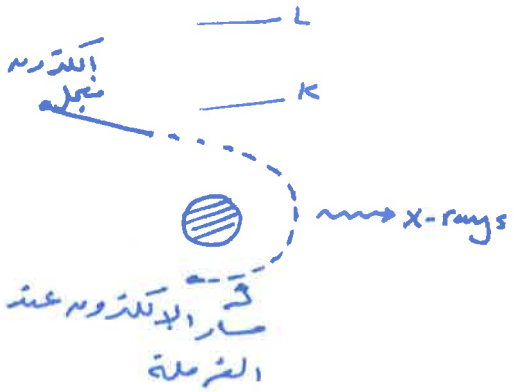
- أكثر الأشعة التي نعايشها هي الأشعة الضوئية وتنبعث نتيجة إثارة الكترونات الذرة إلى مستويات طاقة أعلى وعند عودتي إلى وضعي الأصلي ترسل نبضات كهرومغناطيسية من مدى الضوء المنظور.

- أشعة إكس، تنطلق من الذرات الثقيلة مثل التنجستين بعد طرد الكترون من مستوى الطاقة الأقرب للنواة (المستوى K) ومحاولة إلكترون من مستوى طاقة أعلى أن يشغل موضع الإلكترون المطرود.



طرد الإلكترون المستوى K يتم بواسطة الإلكترون آخر تعجل بأي وسيلة خارج الذرة وعند اصطدامه بالإلكترون من المستوى K يسبب إزاحته من المستوى كلياً.

كيفية الحصول على أشعة X من ظاهرة تعرف بالفرملة ولذلك تسمى الأشعة بالفرملة حيث وذلك عند اقتراب إلكترون معجل آت من خارج الذرة ليصطدم بالمجال الكهربي الكثيف حول النواة. عندئذ يتحرك بعجلة سالبة ويفقد معظم طاقته على شكل نبضات موجات كهرومغناطيسية.



- النوع المتحرر من الأشعة يكون مصدره نواة الذرة ولعلك أن تكون النواة غير مستقرة أي أنها في إضافة الأشعة - عدم استقرار النواة يأتي من احتوائها على طاقة إضافية زائدة عن مقدار الترابط النووي. طبقاً لمقدار الطاقة الزائدة وكتلة النواة والنسبة بين البروتونات والنيوترونات، يتحدد نوع الأشعة المنبعثة. أكثر أنواع الأشعة النووية شيوعاً هي: جسيمات ألفا (α-particles) - جسيمات بيتا (β-particles) وأشعة جاما (γ-rays) - علاوة على ذلك تحديد خروج جسيمات أخرى من أنوية الذرات المشعة مثل البروتونات أو النيوترونات ولا يحدث ذلك إلا من حالات خاصة ويشترط محددة عند إجراء التفاعلات النووية.

إضمحلال ألفا α-Decay

لقد حدث إضمحلال ألفا إلا لأنوية العناصر الأثقل من الرصاص بشرط أن تكون غير مستقرة وتتميز أنوية تلك العناصر بإنخفاض مقدار طاقة الترابط النووي ولذلك يحدث لها إضمحلال ذاتي بدون مؤثرات أو مثيرات خارجية. وتسمى تلك الأنوية بـ باعثات ألفا α-emitters من أمثلة ذلك أنوية ذرات اليورانيوم - ٢٣٨ ، الراديوم - ٢٢٦ ، الرادون - ٢٢٢ ..... الخ

مثال اليورانيوم - ٢٣٨ $\left({}_{92}U^{238}\right)$

تحتوي نواته على ٩٢ بروتون و ١٤٦ نيوترون. تضمحل هذه النواة بإنطلاق جسيم ألفا $\left({}_{2}He^{4}\right)$ وبالتالي تتحول النواة إلى نواة عنصر الثوريوم - ٢٣٤ $\left({}_{90}Th^{234}\right)$ أي تحتوي على ٩٠ بروتون و ١٤٤ نيوترون.

ملاحظات:

- إنطلاق جسيمات ألفا من نواة العنصر يعني أنه تمتلك طاقة حركة وإلا فلن تتحرك من موضعها. وتتميز باعثات ألفا بأنه كل منها له خصائصة وأن جسيم ألفا المنطلق من أنوية العنصر الواحد يمتلك تقريباً نفس طاقة الحركة.
- التحولات التي تحدث من النواة تسمى "تفاعلات نووية". كل التفاعلات النووية خاضعة لقانون حفظ الطاقة ولذلك عند حساب التفاعلات تؤخذ كل من طاقة الحركة للجسيمات المنطلقة وكذلك مكافئ الطاقة لكتل الجسيمات المتفاعلة ويجب من العلاقة $E = mc^2$ ولذلك فإن

مجموع الطاقات قبل التفاعل = مجموع الطاقات بعد التفاعل

وحيث أن أنوية ذرات اليورانيوم وذرات الثوريوم الناتجة لا تمتلك طاقة حركة تقريباً فإنه جزء من كتلة نواة اليورانيوم قد تحول إلى طاقة حركة لجسيم ألفا ومن ثم فإن شرط إنبعاث جسيمات ألفا هو

$$M_U c^2 > (M_{Th} + M_{He}) c^2$$

أو

$$(M_U - M_{Th} - M_{He}) c^2 = \text{Kinetic energy of } \alpha\text{-particles} + \text{" " " Th nucleus}$$

- من مثل هذه التفاعلات تسمى النواة الباعثة بالنواة الأم أو الأب parent ويرمز لها بالرمز P أما النواة الجديدة تسمى النواة الوليدة أو الإبنة daughter ويرمز لها بالرمز d وبالتالي يمكن إعادة كتابة شرط إنبعاث ألفا كالآتي

$$M_P > (M_d + M_\alpha)$$

- عزم الكتل والتحول إلى طاقة يتم تقسيمة بنسب عكسية بين كتلتي جسيم ألفا والنواة الوليدة وبالتالي فإن معظم هذه الطاقة يمتلكها جسيم ألفا المنطلق.

$$_{92}U^{238} \longrightarrow {}_{90}Th^{234} + {}_{2}He^{4} \begin{cases} \nearrow 4.196\ MeV \\ \searrow 4.149\ MeV \end{cases}$$

• إذا انطلقت جسيمات ألفا بالطاقة الأولى (4.196 MeV) تكون نواة الثوريوم - 234 مستقرة (لا تضيء) الحد وجود طاقة إضافية منك.

• إذا انطلقت جسيمات ألفا بالطاقة الثانية (4.149 MeV)، معنى ذلك أنه جزء من الطاقة ما زال مختزناً من نواة الثوريوم المولدة وهذا الجزء زائد عنه طاقة الترابط النووي لكي وصل تم تكوين النواة غير مستقرة أي مشعة ونوع الإشعاع الذي سيصدر عنك يتوقف على نسبة النيوترونات إلى البروتونات بكل سنرى عند دراسة الاضمحلال بيتا.

مثال: نظير البولونيوم - 218 المشع يصدر عنه جسيم ألفا موحد الطاقة وبالتالي فإن النواة المولدة لا تحتوي على طاقة إضافية عن طاقة الترابط النووي وعليه تم فإن النواة مستقرة (لا تضيء) ويمثل التفاعل النووي من هذه الحالة كالآتي:

$$_{84}Po^{218} \longrightarrow {}_{82}Pb^{214} + {}_{2}He^{4} \rightarrow \alpha\ energy = 5.305\ MeV$$

نواة مشعة ⟶ نواة مستقرة (لا تضيء لأنها لا تملك أن تكون مشعة بانبعاثات β) + جسيمات به تحتاج طاقة حركة تساوي فرق الكتل مضروباً من (سرعة الضوء)^2 ↓

$$K.E. \simeq (M_{Po} - M_{Pb} - M_{\alpha})\, c^2$$

β- decay إضمحلال بيتا

- جسيمات β نوعان كلاهما له نفس كتلة الإلكترون وكلاهما سالب الشحنة وبالتالي فإنه يحمل جميع خصائص الإلكترونات إلا أنه ينشأ داخل النواة الذرية ويتطلق منها مباشرة بمجرد تكوينه. أما النوع الآخر فموجب الشحنة وليس بوزيترون positron

- باعثات β هي أنوية غير مستقرة أي تحتوي على طاقة زائدة عن طاقة الترابط النووي علاوة على أن النسبة بين النيوترونات N والبروتونات Z داخل هذه الأنوية تكون بعيدة عن منطقة ثبات واستقرار الأنوية.

- على النقيض من باعثات ألفا التي يندر أن تكون أنوية ثقيلة غير مستقرة فإن باعثات بيتا قد تكون أنوية خفيفة أو ثقيلة غير مستقرة ولكنه الذي يتحكم في ذلك هو نسبة $\frac{N}{Z}$ ولذلك نجد أنه لبعض النظائر العنصر قد تكون مستقرة وعند زيادة عدد النيوترونات وبالتالي نسبة $\frac{N}{Z}$ فإن هذه النظائر تميل لأن تصبح باعثات β.

مثال

نظائر مستقرة ضد β

اسم النظير	N/Z
$_{6}C^{12}$	1
$_{55}Cs^{133}$	1.42

نظائر باعثات β

اسم النظير	N/Z
$_{6}C^{14}$	1.33
$_{55}Cs^{137}$	1.49

- يوجد منحنى (خريطة) للنظائر تمثل العلاقة بين N، Z. وانحراف أي نظير لعنصر تجاه زيادة النسبة $\frac{N}{Z}$ تدعم أنه يكون هذا النظير من باعثات β، وإما نقصانه النسبة $\frac{N}{Z}$ عن منحنى الثبات ضد β فإن هذا يعني أن النظير يميل إلى أن يكون من باعثات β الموجبة أو البوزيترونات. حل معنى ذلك أن β السالبة (إلكترونات) تنشأ من النيوترونات بينما β الموجبة (البوزيترونات) تنشأ من البروتونات؟

- يرمز لجسيمات β السالبة بالرمز β^-

- " " " الموجبة " β^+

- يتضح مما سبق أن النواة الغنية بالنيوترونات تكون باعثة β^- بينما النواة الغنية بالبروتونات (وبالتالي على حساب النيوترونات) فإنها تكون باعثة β^+. أي أن إنبعاث جسيمات β^- أو β^+ يحدث نتيجة تحلل أحد النيوترونات أو البروتونات وهذا ما تؤكده المعادلات التالية:-

● باعثات β^-

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

neutron ⟶ proton + electron + antineutrino

● باعثات β^+

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

proton ⟶ neutron + positron + neutrino

ملاحظة: النيوترينو والنيوترينو المضاد هي جسيمات متعادلة كهربائية تقترب كتلتكل من الصفر وسرعتكل تقترب من سرعة الضوء. عندما يصدر كل منها بالآخر فإنه ذلك يعني فنائها ويعقب ذلك بصدور شعاع كهرومغناطيسي طاقته تساوي حاصل ضرب كتلتيهما مضروبة في مربع سرعة الضوء.

هذه القاعدة لا تنطبق على هذين الجسيمين فقط وكذلك تنطبق على كل الجسيمات والجسيمات المضادة. فمثلاً يحدث ذلك عند تصادم الإلكترون β^- والبوزيترون β^+ فينتج شعاعان جاما الزاوية بينهما 180° وطاقة كل منها 0.511 MeV.

$$M_e C^2 = 9.1 \times 10^{-31}\,(Kg) \times (3\times10^8\ m/c)^2 / (1.6\times10^{-13}) = 0.511875\ MeV$$

0.511 MeV γ-ray

electron ⊖⊕ positron

γ-ray 0.511 MeV

ملاحظة هامة: ذكرنا سابقاً أن جميع التفاعلات النووية تكون خاضعة لمبدأ حفظ الطاقة.

عند تطبيق ذلك على باعثات β^- نجد أن

• الطاقة المكافئة لكتلة النيوترون E_n

$$E_n = 1.008665 \times 931 = 939.067\ MeV$$

• الطاقة المكافئة لكتلة البروتون E_p

$$E_p = 1.007277 \times 931 = 937.775$$

• الطاقة المكافئة لكتلة β^- تساوي E_{β^-} 0.511 MeV

$$\therefore E_n > E_p + E_{\beta^-}$$

فرق الطاقات يقدر بـ 0.781 MeV يشكل طاقة حركة لجسيم β^- المنطلق بالإضافة إلى مكافئ الطاقة لكتلة النيوترينو المضاد.

أما عند تطبيقه نفس المبدأ على باعثات β^+ نجد أنه

$$E_p < E_n + E_{\beta^+}$$

نفهل معنى ذلك أنه كتلة النيوترينو سالبة أو أنه مبدأ حفظ الطاقة ينهار في باعثات β^+

- طالما أنه كتلة النيوترينو المضاد موجبة فإنه كتلة النيوترينو موجبة وتساوي
- طالما أنه قانون حفظ الطاقة صحيح في جميع التفاعلات الفيزيائية وحتى التفاعلات النووية، فكيف نفسر المعادلة السابقة؟

ذكرنا سابقا أن باعثات β هي أنوية غير مستقرة ولها طاقة زائدة عن طاقة الترابط النووي. إذاً فلابد أنه تؤخذ طاقة حركة البروتون والطاقة الإضافية من الاعتبار علاوة على أننا يجب أن نأخذ كتل الذرة الأم والذرة الناتجة من الاعتبار ولا نقتصر حساباتنا على كتلة البروتون والنيوترون.

فما هي شروط انبعاث جسيمات β و β^+؟

- شرط انبعاث جسيم β

$$_{Z}M^{A} > (_{Z+1}M^{A} + m_e)$$

ذرة الأم — النواة الوليدة — كتلة الإلكترون

- شرط انبعاث جسيم β^+

$$_{Z}M^{A} > (_{Z-1}M^{A} + m_e)$$

كتلة النواة الأم — كتلة النواة الوليدة — كتلة الإلكترون

ولكن ماذا يحدث إذا كانت النواة غنية بالبروتونات على حساب النيوترونات ولكنها ليست مثارة بدرجة كافية (لا تحتوي على طاقة إضافية تكفي) لتحقيق شرط انبعاث جسيم β^+؟

- البروتونات والنيوترونات تمتلك طاقة حركة وهي داخل النواة ولغرض اعتمادنا على نموذج قطرة الماء لتفسير تكوين نواة الذرة، (نموذج يفسر بعض التفاعلات النووية كما لو كانت النواة قطرة سائل بحيث يسبح البروتونات والنيوترونات في الفراغ الذي تشغله النواة). في لحظة ما يتحرك أحد البروتونات على سطح النواة فيحدث تشويه للمجال الكهربي المحيط بالنواة ويجذب أحد إلكترونات المدار K على التحرك بسرعة تجاه النواة وتسمى هذه العملية بالأسر الإلكتروني electron Capture

ونتيجة ذلك تحول أحد البروتونات إلى نيوترون (نتيجة إندماج البروتون بالإلكترون السالب) ويمكن تمثيل هذا التفاعل كالآتي

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

والآن نتساءل: ما هو شرط تحقق الأسر الإلكتروني؟

يمكن توقع الإجابة إذا علمنا أن النواة الوليدة أقل من عدد البروتونات بمقدار ١ علاوة على أن النواة الأم قد أسرت (إقتنصت) إلكترون من مداره وأصبحت كتلة الإلكترون ضمن كتلة النواة الأم وهكذا نجد أن شرط تحقق الأسر الإلكتروني هو

- شرط أسر إلكترون

$$ \left({}_{Z}M^{A} + m_e \right) > {}_{Z-1}M^{A} $$

كتلة النواة الأم — كتلة الإلكترون — كتلة النواة الوليدة

ملاحظة: بالنظر إلى شرط تحقق انبعاث جسيم β^+، نجد أنه يحقق في ذات الوقت شرط إقتناص الإلكترون (أو الأسر الإلكتروني) ويمكن القول ليس صحيحاً ومن ثم فإنه

- في الأنوية النشطة كباعثات β^+ قد يحدث نسبة من هذه التحولات في النواة إلى أسر إلكتروني ويكون الأنوية النشطة للأسر الإلكتروني لا يحدث من تحولاتها أي إنبعاث جسيم β^+ ولو بنسبة ضئيلة للغاية.

كيف يمكن التعرف على أن النواة باعثة لـ β^+ أو يحدث بها أسر إلكتروني؟

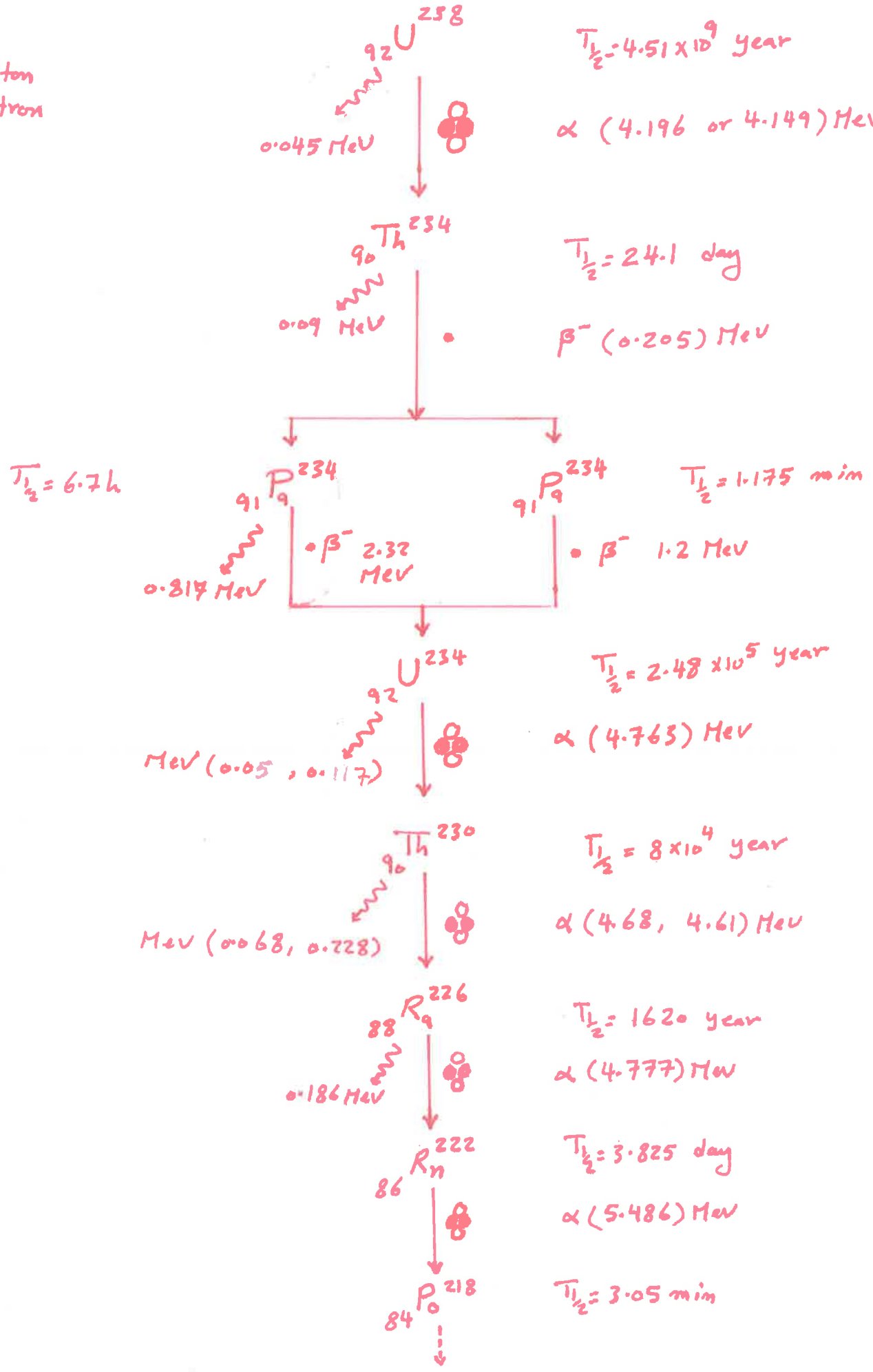
- في حالة الأنوية باعثات β^+ يتم رصد هذا الجسيم بواسطة أجهزة الرصد النووي المناسبة.
- " " " مقتنصة الإلكترون، يصبح موضع الإلكترون المأسور من المدار K خالياً ومن ثم يتهاوى أحد الإلكترونات من مدارات الطاقة الأعلى ليشغل هذا الفراغ فينبعث عن ذلك أشعة كهرومغناطيسية يمكن رصدها بالأجهزة المناسبة.
- أحياناً عند إنطلاق نبضة الأشعة الكهرومغناطيسية فإنها تصطدم بأحد الإلكترونات من المدارات الخارجية عن المدار K ومن ثم فبدلاً من رصد النبضة الكهرومغناطيسية يتم رصد إلكترونات وتسمى هذه الإلكترونات بـ "إلكترونات أوجيه"

- لقد تعرفنا على شروط إنبعاث جسيمات ألفا وجسيمات بيتا

هل الأنوية باعثات ألفا يمكن أن تكون باعثات بيتا؟

مثال :-

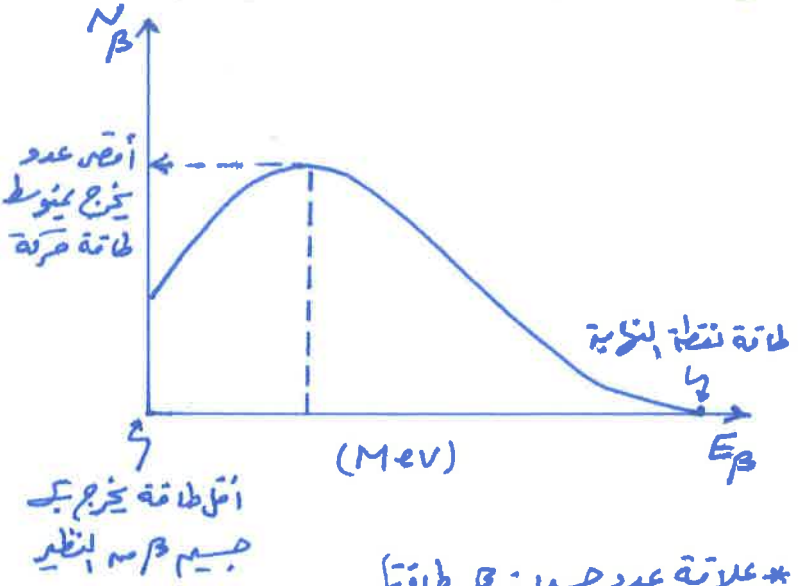
● proton
○ neutron



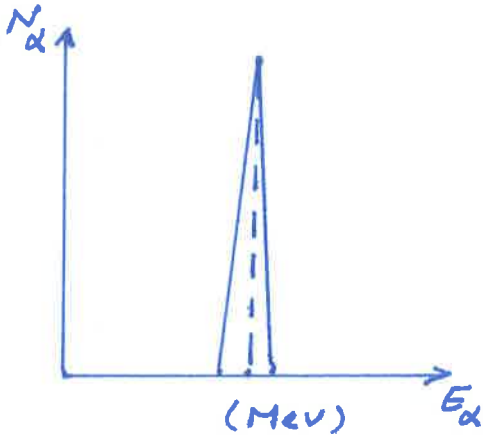
يتضح من سلسلة التحولات النووية أن الذرة المشعة كباعثات لجسيمات ألفا لا يمكن أن تكون باعثات بيتا والعكس صحيح أن باعثات بيتا لا يمكن أن تكون باعثات ألفا وكما يمكن أن تكون أي منها باعثات لأشعة جاما من نفس النواة. يوجد استثناءات لهذه القاعدة سنعرفك فيما بعد.

هل كل جسيمات β المنطلقة من نظير واحد تمتلك نفس طاقة الحركة ؟

على النقيض من جسيمات ألفا التي تنطلق من نظير واحد بطاقة حركة واحدة تقريباً فإن جسيمات β المنطلقة من نظير واحد تكون أي أنها تنطلق بأي مقدار من الطاقة طبقاً لنوع مصدرها وبالتالي فإنه هناك حد أقصى للطاقة التي تمتلكها جسيمات بيتا المنطلقة من أي مصدر. وحيث أنه طاقات مختلفة فلابد أنه يكون هناك توزيع بين عدد جسيمات β وطاقة الحركة التي تمتلكها، كما هو واضح من الشكل التالي



* علاقة عدد جسيمات β وطاقتها مدى التغير من الطاقة واسع جداً.



* العلاقة بين عدد جسيمات α وطاقتها مدى التغير من الطاقة صغير جداً

سؤال: إذا كانت الطاقة الناتجة من تحلل أو اضمحلال β من أي نظير هي كمية ثابتة وكيف حسابها من العلاقات التالية

- β^- emission $\quad E = \left({}^{A}_{Z}M - {}^{A}_{Z+1}M - m_e \right) c^2$
- β^+ emission $\quad E = \left({}^{A}_{Z}M - {}^{A}_{Z-1}M - m_e \right) c^2$
- electron Capture $\quad E = \left({}^{A}_{Z}M - {}^{A}_{Z-1}M \right) c^2$

فأين تذهب باقي كمية الطاقة إذا كانت جسيمات β من النظير الواحد تخرج بطاقات مختلفة ؟

- يرجع السبب في ذلك إلى جسيمات النيوترينو أو النيوترينو المضاد. حيث أن هذه الجسيمات تخرج وتنطلق في لحظة انطلاق جسيمات β وتحمل معها فرق طاقات التحول النووي.
- إذا كانت كتلة النيوترينو تقترب من الصفر وتتحرك بسرعة تقارب سرعة الضوء فإن عدد النيوترونات التي تنطلق مع β قد يختلف من نواة مشعة لأخرى.

إضمحلال جاما gamma decay

- أشعة جاما (γ-rays) عبارة عن نبضات من الموجات الكهرومغناطيسية.
- إذا كانت الطاقة الإضافية من النواة المثارة (النواة المشعة) لا تكفي لإجراء تحول داخلي كبير في ثلوناتك كما هو الحال في حالة إنبعاث جسيمات ألفا أو بيتا وهذا يعتمد على تكوين الداخلي للنواة ونسبة البروتونات والنيوترونات، فإن النواة المثارة تتخلص من الطاقة الزائدة بقذف نبضات كهرومغناطيسية إما دفعة واحدة أو على مراحل حتى تصل إلى مستوى طاقة الترابط النووي الذي يضمن لها الاستقرار وهذه الحالة تسمى الحالة الأرضية للنواة (ground state).

- نبضات أشعة جاما التي تخرج من النظير الواحد تحتمل طاقات محددة وبنسب معروفة لكل منها كما سيتضح من الأمثلة التي سنتناولها فيما بعد.

- حيث أحيانا عند إضمحلال أشعة جاما من النواة أنه تصطدم بأحد الإلكترونات فيتطاير هذا الإلكترون تاركاً الذرة، ويتم رصد الإلكترون بدلاً من رصد شعاع جاما. ولذلك تسمى هذه العملية بـ "التحول الداخلي" Internal Conversion بالإضافة لحدوث التحول الداخلي مع كل شعاع يخرج من النواة وتكون نسب محددة تعتمد على النظير المشع.

- إضمحلال أشعة جاما من النواة المشعة لا ينتج لنا عنصراً جديداً أو نظيراً جديداً وإنما فقط يسبب إستقرار النظير المشع في معظم الحالات إلا لم تكن أشعة جاما مصاحبة لإضمحلال جسيمات ألفا أو بيتا كما إتضح من طريقة التحولات النووية صفحة ١٦.

سؤال: كيف يمكن التمييز بين جسيمات ألفا والإلكترونات الناتجة من عملية التحول الداخلي؟

- جسيمات ألفا المنطلقة من نواة نظير مشع واحد تحتمل مجالاً واسعاً من طاقة الحركة حيث أن
  - الطاقة المصاحبة لأشعة جاما في النظير الواحد تكون محددة
  - مستويات طاقة الإلكترون معروفة للعناصر المختلفة والطاقة اللازمة لطرد الإلكترون من مداره إلى خارج الذرة هي كمية معروفة ومحددة وتعتمد على المدار الذي يخرج منه الإلكترون في كل عنصر.

∴ طاقة حركة الإلكترون الناتج من عملية التحول الداخلي هي كمية محددة تعتمد على النظير المشع.

مثال : نظير الصوديوم-22 ($_{11}Na^{22}$) صواعد باعثات β^+ وعمره تم حيث بنسبة محددة للنواة إقتناص (أسر) الكترون وتتحول بالتالي إلى نظير النيون-22 ($_{10}Ne^{22}$)، وفي كلتا الحالتين تكون نواة النيون الوليدة في حالة إثارة ولذلك يوضع عليك علامة "*" في معادلات التحولات النووية كالآتي

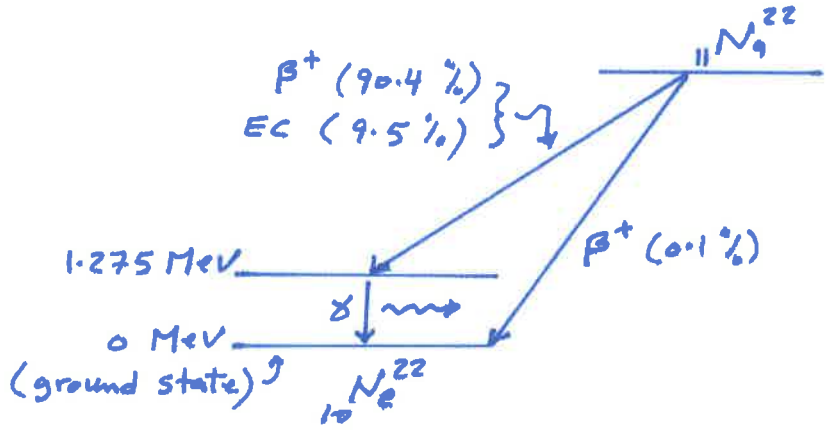
$$_{11}Na^{22} \longrightarrow {}_{10}Ne^{22*} + \beta^+$$

- β^+ emission 90.4 %

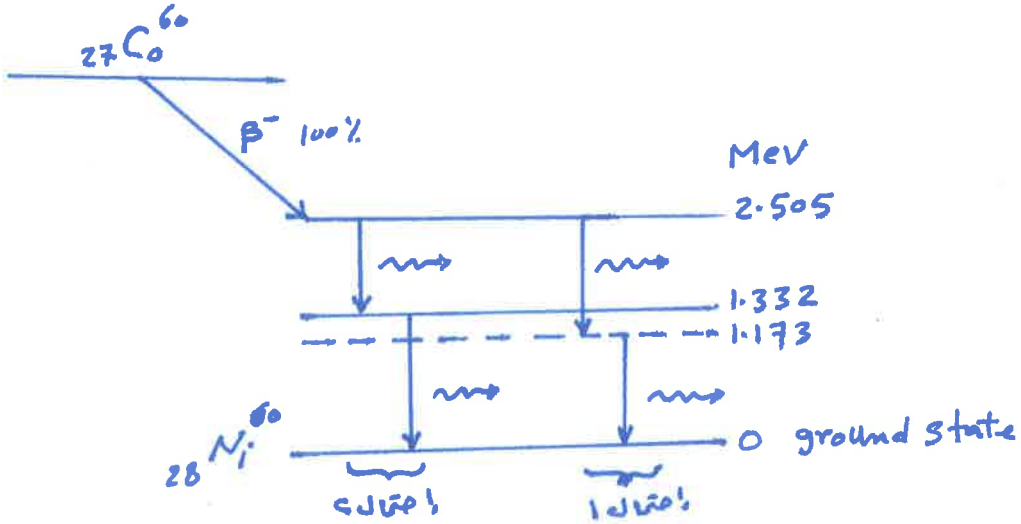
$$e^- + {}_{11}Na^{22} \longrightarrow {}_{10}Ne^{22*}$$

- electron Capture 9.5 %

- كيف تمثيل عملية التحول داخل نواة نظير الصوديوم-22 لمخطط لمستوى الطاقة كما يلي



مثال : نظير بكوبلت-60 ($_{27}Co^{60}$) المشع يتحول إلى نظير لنيكل المثار $_{28}Ni^{60}$ وانطلاق جسيمات بيتا، تبلغ طاقة الإثارة 2.505 MeV وتتخلص نواة النيكل على مرحلتين كما يتضح من الرسم التالي



ملاحظة- انتقال إنتقال نواة النيكل المثارة عند طاقة 2.505 MeV إلى كل من مستوي طاقة الإثارة 1.332 MeV و 1.173 MeV متساوي ولذلك نجد أن عدد الفوتونات المنتشرة إلى كل خط تساوي عدد الفوتونات في خط الطيف إلتقاء تماماً.

Radioactive decay law. قانون إضمحلال النشاط الإشعاعي

- أي مادة تتمتع بالنشاط الإشعاعي سواء كان طبيعياً أو بسبب تدخل الإنسان فإنها تضمحل (تتحلل - تتفكك) ذاتياً وتتحول إلى
  - عنصر جديد (بانطلاق جسيمات ألفا، β^-، β^+، بروتونات .... أو
  - نظير جديد للعنصر المشع بانطلاق نيوترونات أو
  - نفس نظير العنصر وكلاهما في حالة إستقرار بانطلاق أشعة جاما.

وبفرض أنه لدينا عدد من الأنوية المشعة لنفس نظير العنصر (عينة نقية) مقداره N_0 وحيث أننا لا نستطيع من خلال القوانين الإشعاعية أو غيرها المتاحة حالياً توقع أي من الأنوية سيضمحل ومتى يحدث ذلك بالتحديد القاطع، فإننا نلجأ بالنظرية إلى قوانين الإحتمالات ومنها نجد إحتمال تفكك نواة معينة من الثانية الواحدة يأخذ قيمة محددة تختلف باختلاف النظير المشع ونرمز لها غالباً بالرمز λ.

- حيث أن عدد الأنوية المشعة في أي عينة يكون كبيراً جداً مهما كانت وزن العينة، فإن احتمال تفكك أي منها في الثانية الواحدة (وحدة الزمن) يكون صغيراً جداً، وهذا يعني أن $\lambda \ll 1$ ، $\lambda < 0.1$. فإن إحتمال إضمحلال نواة معينة من زمن قدره t أو dt (فترة زمنية صغيرة) لحد أنه يساوي λt أو λdt
- إذا كان عدد الأنوية المشعة في أي زمن هو N فإن إحتمال الإضمحلال لهذا العدد خلال فترة زمنية مقدارها dt هو $N\lambda\, dt$، ومنها فإن عدد النويات التي يمكن أن تضمحل خلال فترة زمنية dt يساوي dN حيث

$$dN = -N\lambda\, dt$$

وضعت الإشارة السالبة للدلالة على أن عدد النويات المتبقي عند أي لحظة دون إضمحلال هو دائماً في تناقص مستمر. وهكذا نجد أن

- معدل التغير الزمني لإضمحلال الأنوية المشعة $\left(\frac{dN}{dt}\right)$ يتناسب طردياً مع عدد الأنوية عند نفس اللحظة $N(t)$.

- بفرض أنه لدينا عدد من الأنوية المشعة مقداره N_0 عند بداية متابعتنا للظاهرة $t=0$ فإمكاننا معرفة عدد الأنوية التي مازالت مشعة عند أي زمن t كالآتي

$$\therefore \frac{dN}{dt} = -\lambda N \rightarrow \therefore \frac{dN}{N} = -\lambda\, dt$$

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

c)

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

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

وحيث أن N_0 ، λ قيم ثابتة خاصة بالعينة تحت الدراسة فإن العدد N هو دالة في الزمن t ولذلك يرمز له بالرمز $N(t)$.

- كفاءة أي عينة إشعاعياً تسمى أيضاً كفاءة العينة أو نشاط العينة أو الشدة الإشعاعية للعينة ويرمز لكل بالرمز $A(t)$ لأنها تعتمد على الفترة الزمنية المنقضية منذ مقابلة تحلل العينة وهي تساوي عدد الأنوية المشعة التي تتحلل في الثانية الواحدة

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

d) فترة عمر النصف Half-life time ($T_{1/2}$)

- يلاحظ أنه بمرور الزمن يتناقص عدد الأنوية المشعة المتاحة في العينة وهكذا ثم فإنه بعد إنقضاء فترة زمنية (طالت أم قصرت طبقاً لمعدل التحلل في الثانية الواحدة) سنصل إلى أن عدد الأنوية التي مازالت مشعة يساوي نصف العدد الأصلي . هذه الفترة الزمنية تسمى " زمن عمر النصف "

- زمن عمر النصف : هو الزمن الذي خلاله يتفكك نصف العدد الأصلي من الأنوية المشعة . ويرمز له بالرمز $T_{1/2}$ أو $t_{1/2}$. وهو أحد المعاملات المهمة لوصف المادة المشعة وهو يعتمد مباشرة ليس على عدد الأنوية المشعة وإنما على "ثابت الإضمحلال" λ (إحتمال تفكك نواة معينة في الثانية الواحدة . ويتم حسابه كالآتي

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

$$\text{at } t = T_{1/2} \quad \text{then} \quad N(t) = \frac{N_0}{2}$$

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

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

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

متوسط عمر العينة المشعة τ Mean life

- يقدر متوسط عمر العينة المشعة بمجموع أعمار الأنوية كلها مقسومة على عددها الأصلي ويرمز له بالرمز τ (تاو) ويتم تحديده كالآتي

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

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

$$= \frac{1}{\lambda} \qquad \because \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$$= 1.443\ T_{\frac{1}{2}}$$

- من خلال المعالجة الرياضية السابقة يتضح أنه لدينا ثلاث معاملات ثابتة وهي بمثابة خصائص تميز مادة مشعة عن غيرها وهي

- ثابت الاضمحلال λ
- فترة عمر النصف $T_{1/2}$
- متوسط عمر العينة τ

وحيث أن هذه المعاملات ثابتة للعينة الواحدة فيمكن معرفة إحداها يؤدي إلى معرفة باقي المعاملات.

- **كيف يمكن تحديد λ أو $T_{\frac{1}{2}}$ عملياً لعينة مشعة؟**

- يمكن ذلك باستخدام جهاز رصد الأشعة الصادرة من المادة المشعة. وحيث أن الأشعة تختلف باختلاف نوع المادة المشعة تحت الدراسة فإنه لابد من اختيار الجهاز المناسب طبقاً لنوع الأشعة وطاقتها.

- يمكن اجراء أي تجربة فيزيائية لمدة زمنية تتراوح من ثوانٍ حتى أيام ولا يمكن تخيل اجراء تجربة تستمر لسنوات لنفسه وحيث أن المواد المشعة المختلفة تتميز باختلاف فترات عمر النصف وبالتالي إذا كان $T_{\frac{1}{2}}$ صغيراً كان معدل التغير في الكفاءة الإشعاعية كبيراً وإذا كان $T_{\frac{1}{2}}$ كبيراً جداً (ثوانٍ أو آلاف السنين) كما هو الحال مع النويدة اليورانيوم - 238 أو الثوريوم - 230 فإن التغير في الكفاءة الإشعاعية لا يمكن إدراكه مهما كانت حساسية ودقة أجهزة رصد الأشعة المستخدمة. لذلك فإن تحديد λ أو $T_{\frac{1}{2}}$ عملياً يمكن تحقيقه فقط بالنسبة للنظائر التي تتراوح عمر النصف بينها عدة ثوانٍ وعدة سنوات.

ملاحظة: يوجد العديد من أجهزة مراقبة ورصد الأشعة تعتمد في عملها على أفكار فيزيائية متباينة لتناسب الأنواع المختلفة من الأشعة النووية علاوة على مجال الطاقة الذي تتطلعه به هذه الأشعة حيث أن كفاءة الجهاز لواحد تختلف بالنسبة لنوع الأشعة لواحد حسب الطاقة الصاحبة للأشعة.

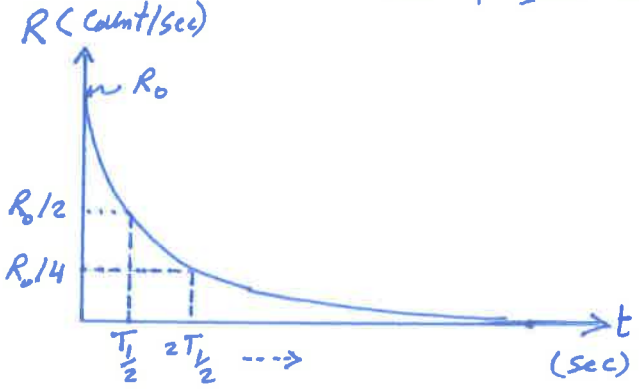
- بعد اختيار الجهاز المناسب للأشعة المطلوب رصدها، نقوم بتشغيل الجهاز عند أفضل شروط التشغيل كما يحددها المصنع أو الشركة المنتجة، مدة من الزمن تكافئ تماما زمن القياس (وتقيس عدة دقائق أو ساعات حسب الكفاءة الإشعاعية محل الدراسة) وذلك بدون وضع العينة المشعة أمام الجهاز. ما تقوم الجهاز بقياسه يعتبر هو الخلفية الإشعاعية للمعمل الذي تجرى به عملية القياس.
- نضع العينة محل الدراسة أمام جهاز الأشعة فترات مماثلة لتلك التي تمت فيها قياس الخلفية الإشعاعية.
- نطرح الخلفية الإشعاعية من القراءات التي حصلنا عليها. فإذا افترضنا أن معدل العد للخلفية الإشعاعية هو C_0 وأن العد من كل مرة نجري فيها التجربة هو C يمكننا تمثيل بياناتنا من جدول كالآتي

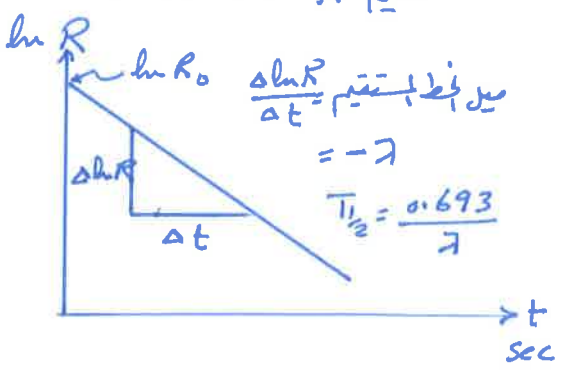
C_0 = — count/sec

Time (sec)	Count	Actual Count $C - C_0 = R$	ln R

* ملاحظة: يمكن استبدال وحدة الزمن المستخدمة هنا وهي الثانية بوحدة أخرى كالدقائق أو الساعات طبقاً لفترة عمر النصف المتوقعة للنظير المشع.

- نرسم البيانات بشرط أن يكون المحور السيني ممثلاً للزمن Time بينما المحور الصادي إما لقيم R أو ln R عندئذ نحصل على أحد الشكلين التاليين





ملاحظة: إجراء التجربة السابقة مع عناصر مشعة فترة عمر النصف لها تقدر بثوان أو دقائق (السنيه) لا تتوصل من خلالها لشيء حيث أن معدل العد R (Count rate) يظل ثابتاً وإن طالت مدة القياس إلى أشهر أو حتى سنوات.

• كيف يمكن تحديد عمر النصف لمادة مشعة كاليورانيوم - ٢٣٨ يبلغ عمرها النصف ٤٤٦٨ × ١٠^٩ سنة؟

- لابد من استخدام فكرة أخرى غير المستخدمة في التجربة السابقة ولتكن كالآتي

$$\therefore \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N = A = \frac{R}{\epsilon}$$

حيث λ ثابت الاضمحلال

N عدد أنوية النظير المشع في العينة تحت الدراسة في أي زمن t

A الكفاءة الإشعاعية للعينة

R معدل العد للجزء المستخدم

ϵ نسبة عدد النيوترونات التي يسجلها جزء العد إلى كل النيوترونات الصادرة من العينة وتسمى بكفاءة الجزء ولا يمكن أن تساوي ١ أي أنه $0 < \epsilon < 1$

ملاحظة - يمكن تحديد ϵ للجزء المستخدم (كفاءة الجزء) بواسطة مقارنة كفاءة الرصد لنفس نوع الأشعة عند نفس الطاقة تقريباً من عينة معائرة من التصميم الهندسي للعينة محل الدراسة وتمتلك مجهزة من عنصر عمر النصف له ساعات أو أيام

- باستخدام الحد الثاني والرابع من المعادلة السابقة أي

$$\lambda N = \frac{R}{\epsilon}$$

يمكن تحديد λ وبالتالي $T_{\frac{1}{2}}$ أو ح بعد معرفة عدد الأنوية المشعة N الموجودة في العينة. يتم تحديد N من المعادلة التالية

$$\text{Number of nuclei} = \frac{\text{mass (gm)} \times \text{Avogadro's number}}{\text{Atomic weight}}$$

• عدد أفوجادرو = ٦,٠٢ × ١٠^٢٣ ذرة / جرام

• الوزن الذري لليورانيوم المستخدم = ٢٣٨

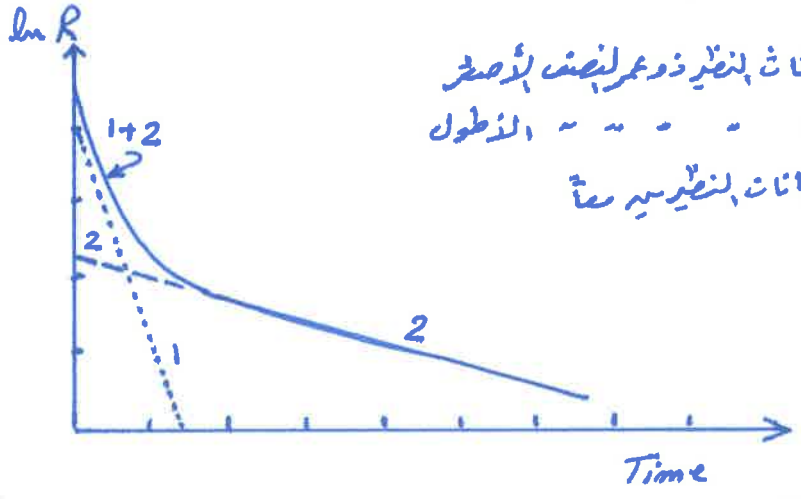
بفرض تحديد وزن العينة بالجرام، قد يظن البعض أن هذا الأمر يسير ويمكن إجراؤه باستخدام أي ميزان وقلة يزداد الإحساس بصعوبة الأمر إذا علمنا أن الجرام الواحد من نظير اليورانيوم - ٢٣٨ يحتوي على ٢,٥٢ × ١٠^٢١ ذرة يورانيوم وبالتالي إذا كانت دقة قياس الميزان المستخدم من النانوجرام (10^{-9} جرام) فإن الخطأ في عدد الذرات يكافئ ٢,٥٢ × ١٠^١٢ ذرة ٠٠٠

تحديد العمر النصفي للنظائر المختلطة :-

- إذا كان لدينا عينة من مادة مشعة تكونة من نظيرين أو ثلاثة وكل منهم يصدر نوعاً مختلفاً من الأشعة ، فيمكن بسهولة استخدام التدابير المناسبة لحساب الكفاءة الإشعاعية لكل نظير على حدة. أما إذا كان محتوى الخليط من النظائر يصدر نفس النوع من الأشعة فإنه يجوز رصد الأشعة لا يمكنه التفريق بين الأشعة الصادرة من كل نظير وبالتالي فإنه يتعامل مع الأشعة كما لو كانت من مصدر واحد. وبذلك يكون لدينا علاقة بين الزمن المنقضي منذ بدء التجربة ومعدل العد في وحدة الزمن.

- إذا كانت ثوابت الاضمحلال للنظائر الثلاثة المكونة للخليط λ_3 ، λ_2 ، λ_1 متساوية أو ذات قيم متقاربة فإن الرسم البياني للعلاقة بين الزمن t ومعدل العد $R(t)$ سيكون مشابه تماماً للبيانات التي نحصل عليها من نظير واحد.

- نفترض أن الخليط المشع الذي لدينا يتكون من نظيرين ويختلف قيم λ_2 ، λ_1 اختلافاً كبيراً كأن تكون λ_1 عشرة أضعاف λ_2 وبالتالي فإن فترة عمر النصف للنظير الثاني $(T_{\frac{1}{2}})_2$ تساوي عشرة أضعاف $T_{\frac{1}{2}}$ للنظير الأول $(T_{\frac{1}{2}})_1$. عندئذ نجد أن معدل العد $R(t)$ لم يسير على وتيرة واحدة وعند رسم البيانات ربما نحصل على شكل مشابه للرسم التالي



- ١ بيانات النظير ذو عمر النصف الأصغر
- ٢ " " " " الأطول
- ١+٢ بيانات النظيرين معاً

* علاقة لوغاريتم معدل العد $\ln R(t)$ مع الزمن لخليط مشع مكون من نظيرين

في هذه الحالة يكون الأمر سهلاً في الحصول على λ_1 ، λ_2 وبالتالي $T_{\frac{1}{2}_1}$ ، $T_{\frac{1}{2}_2}$ وذلك باستخدام طريقة تحليل الرسم البياني (طريقة المماسات) وتسمى Stripping Method.

- نأخذ مماس للمنحنى الناتج عند ذيل المنحنى (جزء 2) ونمد المماس حتى يقطع محور $\ln R$.
- نطرح كل قيمة في الخط المستقيم الناتج (المماس) من القيمة المناظرة من المنحنى فنحصل على خط مستقيم.
- من حساب الميل لكل خط مستقيم نحصل على قيمة ثابت الاضمحلال ومن ثم فترة عمر النصف.

اضمحلال الإشعاعي المتتابع :

- إضمحلال نواة المشعة إلى نظير مستقر ، يعقبه حالات خاصة من التحولات النووية ولذلك فإنه معظم التحولات النووية ينتج عنها نظائر أنوية غير مستقرة وبالتالي فإنها تتضمن إلى فئة النظائر المشعة .

مثال : بالنظر إلى خريطة الإضمحلال النووي صفحة ١٦ نجد أن كل عنصر مشع ينتج عنه عنصر مشع آخر ، ولنأخذ سلسلة منها ذات أهمية في حياتنا

$_{86}Ra^{226}$ $T_{1/2} = 1630$ year

$\downarrow \alpha$

$_{84}Rn^{222}$ $T_{1/2} = 3.825$ day

$\downarrow \alpha$

$_{82}Po^{218}$ $T_{1/2} = 3.05$ minute

$\downarrow$ كل مجموعة من التحولات النووية .

$_{82}Pb^{208}$ $T_{1/2} = \infty \rightarrow$ عنصر مستقر

- فإذا إفترضنا أن العينة الأصلية كانت تتكون فقط من ذرات الراديوم . فإذا إضمحلت ذرة واحدة فقط أصبحت العينة غير نقية وكيف نعرف أنه ذرة واحدة قد تفككت ؟ بالطبع لا نعرف لأن العملية الإشعاعية والتحولات الإشعاعية والنووية داخل النواة لا تجعل النواة محددة دون سواها وبالتالي توصف هذه التحولات بأنها عشوائية .

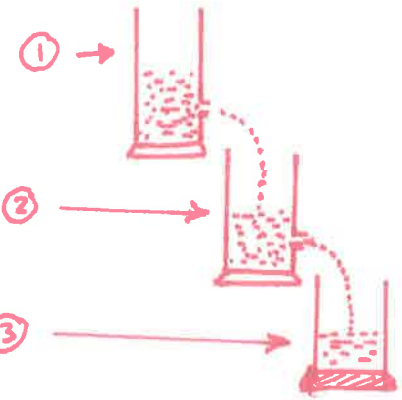
- من خلال دراستنا لتحلل الإشعاعي المتتابع وجد أنه يكون هناك سلسلة وباختلاف فترة عمر النصف لأعضاء السلسلة كما سبق لنا أن نعلم أن العينة مشعة على أعضاء عديدة والمطلوب هو معرفة عدد الذرات المتبقية لكل نظير من أي سلسلة اضمحلال نووي .

- لكي نمثل ما يحدث داخل العينة رياضياً ، وللتبسيط سنفترض أن العينة قيد الدراسة تحتوي فقط على ثلاث نظائر $_1X^{A_1}$ ، $_2Y^{A_2}$ ، $_3Z^{A_3}$ بحيث أن النظير $_1X^{A_1}$ مشع بينما الثاني مستقر . الأول يتحلل إلى الثاني والتحلل النووي الناتج للنظير $_1X^{A_1}$ إلى أنوية النظير $_2Y^{A_2}$ ومن ثم نمثل ذلك رياضياً باستخدام المعادلات التفاضلية كالآتي :

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

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

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2$$



- لحل هذه المعادلات التفاضلية البسيطة لابد من معرفة عدد النوية في كل نظير في العينة عند بدء فحص العينة ولنفترض أن عدد النوية للنظائر المتكونة ١، ٢، ٣ كانت على الترتيب N_{01}، N_{02} و N_{03} عند الزمن $t=0$.

- إيجاد عدد ذرات النظير الأول (النظير الأم)

$$\frac{dN_1}{N_1} = -\lambda_1 dt \rightarrow \ln N_1 = -\lambda_1 t + C$$ ؛ C = Constant of integration

وتكمن إيجاد قيمة C من الشروط الحدية المعطاة

at $t=0$ $\quad N_1 = N_{01} \rightarrow C = \ln N_{01}$

$$\therefore \ln N_1 - \ln N_{01} = -\lambda_1 t = \ln \frac{N_1}{N_{01}} \Rightarrow \boxed{N_1 = N_{01} e^{-\lambda_1 t}} \quad ①'$$

- إيجاد عدد ذرات النظير الثاني (النظير البوليد)

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t}$$

نضرب طرفي المعادلة في $e^{+\lambda_2 t}$ ←

$$e^{\lambda_2 t}\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t} e^{\lambda_2 t}$$

$$\therefore \frac{d}{dt}\left(N_2 e^{\lambda_2 t}\right) = \lambda_1 N_{01} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

بإجراء التكامل للطرفين

$$\int d\left(N_2 e^{\lambda_2 t}\right) = \lambda_1 N_{01} \int e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}\, dt$$

$$\therefore N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C$$

تكمن إيجاد قيمة C من الشروط الحدية

at $t=0$ $\quad N_2 = N_{02}$

$$\therefore N_{02} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} + C \rightarrow C = N_{02} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01}$$

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01}\left(-1 + e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}\right) + N_{02}$$

$$\therefore N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01}\left(-e^{-\lambda_2 t} + e^{-\lambda_1 t}\right) + N_{02} e^{-\lambda_2 t} \quad ②'$$

● ايجاد عدد ذرات النظير الثالث من خلال حل المعادلة رقم ③

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1} N_{01}\left(e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_1 t}\right) + \lambda_2 N_{02}\, e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_3 = \int dN_3 = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1} N_{01}\left[-\int e^{-\lambda_2 t}\,dt + \int e^{-\lambda_1 t}\,dt\right] + \lambda_2 N_{02}\int e^{-\lambda_2 t}\,dt$$

$$\therefore N_3 = \frac{N_{01}}{\lambda_2-\lambda_1}\left[-\lambda_2 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_1 e^{-\lambda_2 t}\right] - N_{02}\, e^{-\lambda_2 t} + C$$

حيث C قيمة ثابتة يمكن تحديدها من الشروط البدئية.

at $t=0$ $\quad N_3 = N_{03}$

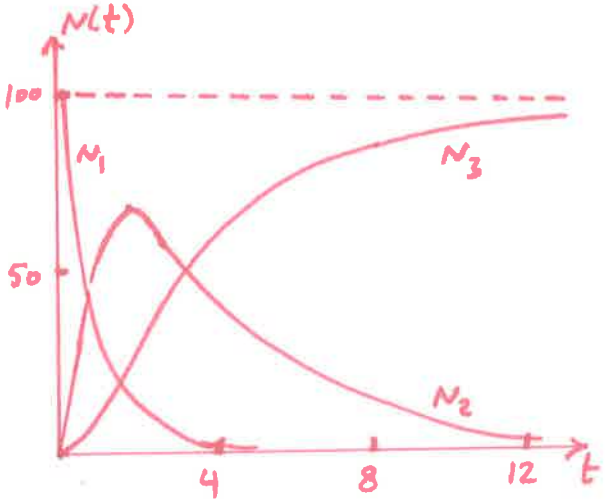
$$\therefore N_{03} = \frac{N_{01}}{\lambda_2-\lambda_1}\left[\lambda_1 - \lambda_2\right] - N_{02} + C \longrightarrow C = N_{02} + N_{03} + N_{01}$$

بالتعويض عن قيمة C نجد أن عدد ذرات النظير الثالث

$$N_3 = N_{03} + N_{02}\left(1 - e^{-\lambda_2 t}\right) + N_{01}\left[-\frac{\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1} e^{-\lambda_2 t}\right] \quad ③'$$

من خلال المعادلات ①، ② و ③ يمكن معرفة عدد أنوية أي نظير مشع من معلومات العينة المتكونة بعد مرور أي فترة زمنية t. الجدير بالذكر أن المعادلتين ② و ③ لا يمكن استخدامها إذا كان $\lambda_2 = \lambda_1$ وهذا نادر الوجود بين النظائر المشعة أن يتساوى ثابتي عمر النصف وبالتالي ثوابت التضمحل النووي للنواة الأم والابنة.

- إذا كانت العينة عند بدء الدراسة نقية تماماً عند بدء التجربة نحدد من وضع قيمتي N_{02} و N_{03} مساوية للصفر في المعادلتين ② و ③ وهذا تختزل قيمتي N_2 و N_3 كدالة في الزمن.



- يمكن استخدام الرسم البياني لتمثيل مدى تطور عدد الأنوية من النظائر المشكلة. ويشترط عند استخدام الرسم البياني أن تكون فترات نصف العمر (عمر النصف) للنظائر متقاربة.

مثال: الروثينيوم - 105 يتحول إلى الروديوم - 105 وهذا بدوره يتحول إلى البلاديوم - 105 المستقر

$$^{105}_{44}Ru \xrightarrow[T_{1/2}=4.5h]{\beta^-} {}^{105}_{45}Rh \xrightarrow[T_{1/2}=35h]{\beta^-} {}^{105}_{46}Pd \quad \text{مستقر}$$

- هل يمكن أن يحدث توازن اشعاعي بين N_1 و N_2؟ ومتى؟

* عدد أنوية الأم N_1 في تناقص مستمر.
* عدد أنوية البنت N_2 تتزايد من الصفر حتى تصل لقيمة عظمى وتبدأ في التناقص
* عدد أنوية الحفيدة N_3 في تزايد مستمر.

Radioactive Equilibrium التوازن الإشعاعي

- يقصد بالتوازن الإشعاعي عدم تغير نسب الأنوية المشعة من العينة الواحدة بمرور الزمن وتلك سمة من سمات الأنوية المشعة التحلل أي أن عدد الأنوية لأي نظير متبع من سلسلة إشعاعية ماعدا النظير الأم يكون حاصل (نتيجة) عمليتين

- الزيادة الناتجة بواسطة النظير الأم $= \lambda_1 N_1$

- النقص نتيجة تحلل بعض الأنوية المختلفة للنظير وهذا النقص يساوي $\lambda_2 N_2$

وهكذا نجد أنه بالتوازن الإشعاعي بين أعضاء السلسلة الإشعاعية يحدث عندما يتساوى معدلات تغير عدد الأنوية لكل نظير بالنسبة للزمن مع النظائر الأخرى أي أنه

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = \dots \simeq 0$$

- نلاحظ من المعادلة أنه جميع الأطراف تساوي تقريباً الصفر (كمية ثابتة صغيرة جداً) وتمثل لا تساوي مطلقاً الصفر ، لماذا ؟

• إذا أخذنا النظير الأول (الأب) نجد معادلته $\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1 = 0$ وهذا لا يحدث إلا إذا كانت $\lambda_1 = 0$ وهذا يعني أنه $T_{1/2} = \frac{0.693}{0} = \infty$ وبالتالي يكون النظير مستقر وهيهات أنه متبع فلابد أنه تقترب λ من الصفر ولا تساويه.

أما بالنسبة لباقي أعضاء السلسلة فيمكن أن يتساوى معدل التغير بالصفر وهذا يعني أن معدل التكوين ومعدل التحلل متساويان. $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$ عندما $\frac{dN_2}{dt} = 0$

ملاحظة لا ينطبق ذلك على العنصر الأخير من أي سلسلة إشعاعية. لماذا ؟

• التوازن الإشعاعي يحدث من إحدى صورتين

١- توازن إنتقالي Transient Equilibrium

٢- توازن أبدي Secular Equilibrium

التوازن الإشعاعي الانتقالي

- يحدث هذا التوازن بين نوى العناصر الأم والنظائر الوليدة إذا كانت فترة عمر النصف للنواة الأم كبيرة نسبياً مقارنة بفترة عمر النصف للنواة الوليدة.

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

بشرط ألا تقترب λ_1 من الصفر.

- تحديد حساب عدد أنوية النظير الوليد بدلالة عدد أنوية العنصر (النظير) الأم من خلال المعادلات ① ، ② مع إجراء بعض التعديلات كالآتي

$$\therefore N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) + N_{02} e^{-\lambda_2 t}$$

وبفرض أن $N_{02} = 0$ (كانت العينة نقية ومكونة من N_1 فقط عند بداية التجربة) عندئذ يسقط الحد الأخير من الطرف الأيمن $N_{02} e^{-\lambda_2 t} = 0$

- حيث أن $\lambda_2 > \lambda_1$ فإن معدل الاضمحلال في نتيجة $e^{-\lambda_2 t}$ يكون أسرع مما يحدث في نتيجة $e^{-\lambda_1 t}$ وخاصة عند زيادة الزمن t وهكذا نجد أنه يمكن إهمال $e^{-\lambda_2 t}$ مقارنة بـ $e^{-\lambda_1 t}$ بعد زمن مناسب يتوقف على $(T_{\frac{1}{2}})_1$ ، $(T_{\frac{1}{2}})_2$.

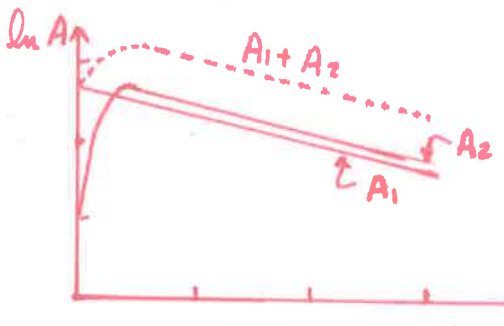
وبالتالي فإن عدد أنوية النظير الابنة هي

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} e^{-\lambda_1 t}$$

$$= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \rightarrow \underbrace{\lambda_2 N_2}_{A_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \underbrace{N_1 \lambda_1}_{A_1}$$

$$\therefore \frac{A_1}{A_2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} = \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)$$

حيث A_1 ، A_2 هما النشاط الإشعاعي للنوى الأم والوليدة على الترتيب



وهكذا يمكن توقع أن الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة تصبح أعلى من الشدة الإشعاعية للنوى الأم عند حدوث توازن مرحلي (انتقالي).

التوازن الإشعاعي الأبدي

- حيث هذا النوع من التوازن عندما يكون عمر النصف للنظير الأم كبير جداً مقارنة بعمر النصف للنظير الإبنة (الوليدة)

$$(T_{\frac{1}{2}})_1 \gg (T_{\frac{1}{2}})_2 \longrightarrow \lambda_1 \ll \lambda_2$$

وبالتالي قد تقترب λ_1 من الصفر أي أنه $e^{-\lambda_1 t}$

$$\therefore N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) + N_{02} e^{-\lambda_2 t}$$

عندما تكون العينة نقية من بداية التجربة $(N_{02} = 0)$ $\Rightarrow N_2 = N_{02} e^{-\lambda_2 t} = 0$

وحيث أن $\lambda_2 \gg \lambda_1$ فيمكن إعتبار أن $\lambda_2 \approx \lambda_2 - \lambda_1$

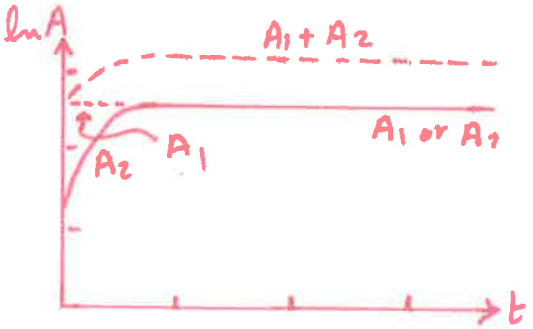
$$\therefore N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{01} \left(1 - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{01} \left(1 - e^{-\lambda_2 t} \right) \longrightarrow$$ عندما تكون t صغيرة

وكلما عندما تزداد الفترة الزمنية المنقضية تبدأ $e^{-\lambda_2 t}$ تقارب الصفر

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

وهكذا نجد أن من سمات التوازن الأبدي أن الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة تكافئ تماماً الشدة الإشعاعية للنوى الأم.



* هل تصعد أن العقاد الإشعاعي العينة تقصير تزداد ثم تثبت عند القيمة الأخيرة.

مثال: إذا كان عدد ذرات الراديوم - ٢٢٦ في عينة من أملاح اليورانيوم تقدر بـ 2.8×10^{7} ذرة يورانيوم مقابل ذرة واحدة من الراديوم. فلم يبلغ عمر النصف لليورانيوم إذا كان $T_{\frac{1}{2}}$ للراديوم ١٦٢٠ عام.

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

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{(T_{\frac{1}{2}})_1}{(T_{\frac{1}{2}})_2} \rightarrow 2.8 \times 10^{6} \times 1630 = (T_{\frac{1}{2}})_1$$
$$= 4.564 \times 10^{9} \text{ years}$$

مثال: يتحول الراديوم - ٢٢٦ إلى رادون - ٢٢٢ بانطلاق جسيمات ألفا. فإذا كان عمر النصف للراديوم = ١٦٢٠ عام بينما يبلغ ٣,٨٢ يوم للرادون فمتى يحدث توازن أبدي بينهما نظرياً؟