$$\frac{\sigma(\alpha + Li^6 \to p + Be^9)}{\sigma(p + Be^9 \to \alpha + Li^6)} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{p_p'^2}{p_\alpha'^2}\frac{(2J_p+1)(2J_{Be}+1)}{(2J_\alpha+1)(2J_{Li}+1)} = \frac{8}{3}\frac{p_p'^2}{p_\alpha'^2}$$

$$p_p'^2 = 2\frac{\mu_p'}{M}(m_{Li}E_{\alpha l} + MQ) = 2\frac{m_p m_{Be}}{M^2}(m_{Li}E_{\alpha l} + MQ)$$

$$p_\alpha'^2 = \frac{\mu_\alpha'^2}{m_\alpha^2}p_{\alpha l}^2 = \frac{2m_\alpha m_{Li}^2}{M^2}E_{\alpha l}$$

$$\frac{p_p'^2}{p_\alpha'^2} = \frac{m_p m_{Be}}{m_\alpha m_{Li}}\cdot\frac{E_{\alpha l} + (M/m_{Li})Q}{E_{\alpha l}}$$

$$= \frac{1\times 9}{4\times 6}\cdot\frac{3{,}7 + (10/6)\times 2{,}13}{3{,}7} = 0{,}0152$$

$$\sigma_1 = \frac{8}{3}\frac{p_p'^2}{p_\alpha'^2}\sigma_2 = \frac{8}{3}\times 0{,}0152\times 0{,}05 \text{ mbarn}$$

$$= 2{,}03.10^{-3} \text{ mbarn} = 2{,}03\ \mu\text{barn}$$

3.7.2. Các bài tập tự giải

3.1. Hạt deutron không tương đối tán xạ đàn hồi lên hạt nhân đứng yên. Cả deutron và hạt nhân bia đều bay ra dưới góc 30° so với phương bay của hạt deutron vào. Hỏi hạt nhân bia là hạt nhân gì?

3.2. Hạt α không tương đối tán xạ đàn hồi lên hạt nhân C^{12} và bay ra dưới góc θ = 60° trong hệ tâm quán tính. Hãy tính độ giảm năng lượng tương đối của hạt α.

3.3. Hãy tính hiệu ứng nhiệt Q của phản ứng $p + Li^7 \to \alpha + He^4$. Biết rằng năng lượng liên kết trung bình trên mỗi nucleon trong các hạt nhân Li^7 và He^4 là 5,6 MeV và 7,06 MeV.

3.4. Hãy tính vận tốc các hạt bay ra từ phản ứng $n + B^{10} \to \alpha + Li^7$ do tương tác của neutron chậm với hạt nhân B^{10} đứng yên.

3.5. Deutron động năng 10 MeV tương tác với hạt nhân C^{13} theo phản ứng $d + C^{13} \to \alpha + B^{11} + 5{,}16$ MeV. Hãy xác định góc giữa các phương bay của các sản phẩm phản ứng trong hai trường hợp:

a) Các hạt sau phản ứng bay đối xứng nhau qua phương bay của hạt deutron vào.

b) Hạt α bay vuông góc với phương bay của hạt deutron vào.

3.6. Neutron tương tác với hạt nhân O^{16} tạo nên hạt nhân O^{17} ở trạng thái cơ bản. Momen quỹ đạo của neutron bị chiếm trong hạt nhân O^{17} là $\ell_n = 2$. Hãy xác định spin của trạng thái cơ bản của hạt nhân O^{17}. Cho biết spin $J(O^{16}) = 0$ và $J(n) = \frac{1}{2}$.

3.7. Tính năng lượng kích thích của hạt nhân đứng yên có khối lượng M khi nó chiếm lượng tử γ có năng lượng $\hbar\omega$.

3.8. Một chùm neutron có động năng $E_o = 1$ MeV tán xạ không đàn hồi lên hạt nhân Li^7. Hãy xác định năng lượng kích thích của hạt nhân sau tán xạ. Cho biết động năng của neutron bay ra dưới góc 90^o so với phương bay của neutron vào bằng $E = 0,33$ MeV.

3.9. Khi deutron tương tác với hạt nhân C^{13}, tiết diện đạt cực đại ứng với các giá trị sau đây của động năng deutron: 0,60 ; 0,90 ; 1,55 và 1,80 MeV. Hãy tính các mức kích thích tương ứng của hạt nhân trung gian N^{15}.

3.10. Chiếu chùm deutron có động năng 10 MeV lên hạt nhân Be^9 và các neutron sinh ra do phản ứng $d + Be^9 \rightarrow n + B^{10}$. Hãy xác định cường độ neutron trong 1 giây khi dòng deutron vào bằng 100 μA và suất ra của phản ứng nói trên bằng 5.10^{-3}.

3.11. Suất ra của phản ứng (γ,n) khi chiếu chùm gamma năng lượng 17 MeV lên tấm đồng dày $d = 1$ mm là $w = 4,2.10^{-4}$. Hãy tìm tiết diện của phản ứng.

3.12. Xác định suất ra của phản ứng (n,α) khi chiếu chùm neutron nhiệt lên bia lithium tự nhiên dày $d = 0,5$ cm. Cho biết tiết diện phản ứng nói trên bằng 71 barn và mật độ của lithium tự nhiên là $\rho = 0,53$ g/cm^3.

3.13. Chiếu chùm neutron cường độ $J = 2.10^{10}$ neutron/s với động năng 2 MeV lên bản P^{31} dày $d = 1$ g/cm^2 trong thời gian $\tau = 4$ h theo phản ứng $n + P^{31} \rightarrow p + Si^{31}$. Sau thời gian $T = 1$ h sau khi kết thúc chiếu, hoạt độ đồng vị phóng xạ P^{31} bằng $a = 105$ μCi. Hãy tìm tiết diện của phản ứng nói trên.

3.14. Dùng phản ứng $d + d \rightarrow n + He^3$ với $Q = 3,26$ MeV để xác định spin hạt nhân He^3. Động năng deutron vào là 10 MeV. Cho biết tiết diện quá trình này là σ_1 còn tiết diện quá trình ngược lại $n + He^3 \to d + d$ là $\sigma_2 = 1{,}8\sigma_1$, các giá trị spin $J_d = 1$ và $J_{He} = \frac{1}{2}$.

3.15. Hãy chứng minh rằng tiết diện $\sigma(p,n)$ của phản ứng thu nhiệt $A(p,n)B$ ở gần ngưỡng phản ứng tỉ lệ với $\sqrt{E_{pt} - E_{pt}^{ng}}$, trong đó E_{pt} là động năng hạt proton vào trong hệ phòng thí nghiệm và E_{pt}^{ng} là năng lượng ngưỡng của phản ứng. Cho biết tiết diện quá trình ngược lại $\sigma(n,p)$ tỉ lệ với $\frac{1}{v_n}$, trong đó v_n là vận tốc neutron.

Chương 4

PHÂN RÃ PHÓNG XẠ

4.1. HIỆN TƯỢNG PHÂN RÃ PHÓNG XẠ

4.1.1. Hiện tượng phân rã phóng xạ

Năm 1892 Becquerel đã quan sát thấy muối uranium và những hợp chất của nó phát ra những tia gồm 3 thành phần là tia α (alpha), tức là hạt $_2He^4$, tia β (beta), tức là hạt electron, và tia γ (gamma), tức là bức xạ điện từ như tia X nhưng bước sóng rất ngắn. Hiện tượng đó gọi là *hiện tượng phân rã phóng xạ*. Các tia α, β, γ gọi *các tia bức xạ*. Chúng đều có những tính chất như có thể kích thích một số phản ứng hóa học, phá hủy tế bào, ion hóa chất khí, xuyên thấu qua vật chất, ...

Về bản chất, hiện tượng phân rã phóng xạ là hiện tượng mà một hạt nhân đồng vị này chuyển thành hạt nhân đồng vị khác thông qua việc phóng ra các hạt α, β hoặc chiếm electron quỹ đạo. Dịch chuyển gamma xảy ra khi một đồng vị phóng xạ ở trạng thái kích thích cao chuyển về trạng thái kích thích thấp hơn hoặc trạng thái cơ bản của chính đồng vị đó. Phân rã phóng xạ có thể kéo theo hoặc không kéo theo dịch chuyển gamma. Tính phóng xạ phụ thuộc vào hai nhân tố, thứ nhất là tính không bền vững của hạt nhân do tỉ số $\frac{N}{Z}$ quá cao hoặc quá thấp so với đường cong trên hình 1.8, và thứ hai là quan hệ khối lượng giữa hạt nhân mẹ (hạt nhân trước phân rã), hạt nhân con (hạt nhân sau phân rã) và hạt được phát ra. Tính phóng xạ không phụ thuộc vào các tính chất hóa học và vật lý của hạt nhân đồng vị và vì vậy không thể bị thay đổi bằng bất cứ cách gì.

4.1.2. Quy luật phân rã phóng xạ

4.1.2.1. Phân rã phóng xạ đơn giản

Khi phân rã phóng xạ, số hạt nhân chưa bị phân rã sẽ giảm theo thời gian. Giả sử ở thời điểm t, số hạt nhân phóng xạ chưa bị phân rã là N. Sau thời gian dt số đó trở thành N - dN vì có dN hạt nhân đã phân rã. Độ giảm số hạt nhân chưa bị phân rã - dN tỉ lệ với N và dt :

$$-dN = \lambda N dt \tag{4.1}$$

Trong đó hệ số tỉ lệ λ gọi là *hằng số phân rã*, có giá trị xác định đối với mỗi đồng vị phóng xạ. Từ (4.1) ta được :

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \tag{4.2}$$

Thực hiện phép lấy tích phân công thức (4.2), ta có :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \tag{4.3}$$

Trong đó N_0 là số hạt nhân chưa bị phân rã ở thời điểm ban đầu $t = 0$, N là số hạt nhân chưa bị phân rã ở thời điểm t. Đây là *quy luật phân rã* của hạt nhân phóng xạ.

Thời gian sống trung bình của hạt nhân phóng xạ được tính như sau:

$$T = \frac{\int_0^\infty tN(t)dt}{\int_0^\infty N(t)dt} = \frac{\int_0^\infty te^{-\lambda t}dt}{\int_0^\infty e^{-\lambda t}dt}$$

Thay $\lambda t = x$ ta có :

$$T = \frac{\frac{1}{\lambda^2}\int_0^\infty xe^{-x}dx}{\frac{1}{\lambda}\int_0^\infty e^{-x}dx}$$

Hay :

$$T = \frac{1}{\lambda} \tag{4.4}$$

Công thức (4.4) cho thấy thời gian sống trung bình của hạt nhân phóng xạ bằng nghịch đảo của hằng số phân rã. Khi thay $t = T$ vào (4.4) ta có:

$$N(T) = N_0 e^{-\lambda T} = \frac{N_0}{e} \tag{4.5}$$

Vậy T còn có nghĩa là khoảng thời gian để số hạt nhân phóng xạ giảm đi e = 2,72 lần. Nó còn được gọi là *chu kỳ phân rã*.

Để phân biệt được tốc độ phân rã của hạt nhân phóng xạ người ta dùng đại lượng *thời gian bán rã* $T_{1/2}$. Đó là khoảng thời gian để số hạt nhân phóng xạ giảm đi một nửa. Thay $t = T_{1/2}$ vào (4.5) ta có :

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Do đó

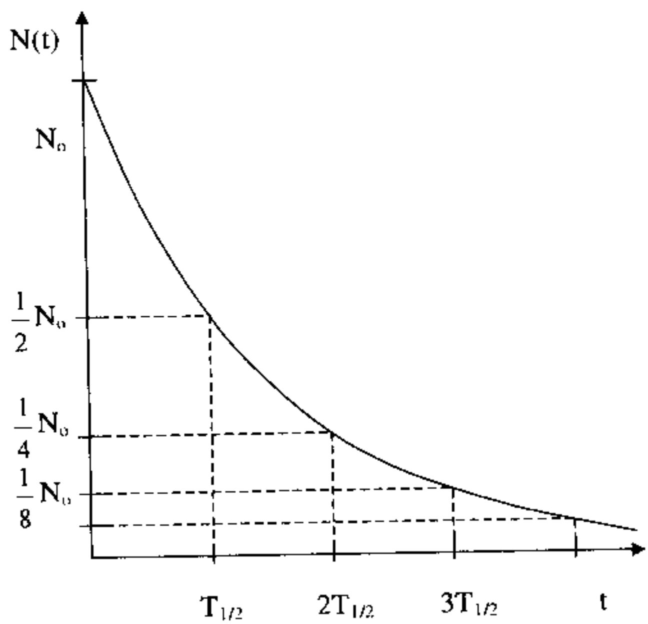
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \tag{4.6}$$

Ví dụ, thời gian bán rã của hạt nhân phóng xạ Co^{60} là $T_{1/2}$ = 5,27 năm, của Cs^{137} là $T_{1/2}$ = 30 năm.

Trên hình 4.1 trình bày sự phụ thuộc N(t) theo thời gian dựa theo công thức (4.3). Quy luật này rất đơn giản là cứ sau một thời gian bán rã $T_{1/2}$ thì số hạt nhân phóng xạ giảm đi còn một nửa.

Từ định nghĩa của thời gian bán rã $T_{1/2}$ suy ra rằng số hạt nhân đồng vị phóng xạ N còn lại sau n khoảng thời gian bán rã liên hệ với số hạt nhân đồng vị phóng xạ ban đầu N_o theo công thức sau đây:

$$\frac{N}{N_o} = \frac{1}{2^n} \tag{4.7}$$



Hình 4.1. Quy luật phân rã phóng xạ.

Hoạt độ phóng xạ là số phân rã của nguồn phóng xạ trong một đơn vị thời gian :

$$a = -\frac{dN}{dt} \tag{4.8}$$

Trong đó N là số hạt nhân chưa bị phân rã, tính theo công thức (4.3). Như vậy:

$$a = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.9)$$

Đơn vị đo hoạt độ phóng xạ trong hệ SI là *Becquerel (ký hiệu là Bq). 1 Bq là 1 phân rã trong 1 giây*. Đơn vị thường dùng khác là *Curie (ký hiệu là Ci)*, liên hệ với đơn vị Bq như sau:

$$1\ Ci = 3,7.10^{10}\ Bq \quad (4.10)$$

Liên hệ giữa các bội số của Bq với Ci và các ước số của Ci như sau:

Đơn vị Bq	*Đơn vị Ci*
1 GBq = 10^9 Bq	1 Ci = 37 GBq
1 MBq = 10^6 Bq	1 mCi = 37 MBq
1 kBq = 10^3 Bq	1 μCi = 37 kBq

4.1.2.2. Chuỗi nhiều phân rã phóng xạ

a) Chuỗi hai phân rã phóng xạ

Ta xét chuỗi phân rã từ đồng vị 1, gọi là đồng vị mẹ, thành đồng vị 2, gọi là đồng vị con, rồi đồng vị 2 phân rã thành đồng vị 3. Chuỗi phân rã này được miêu tả bởi hệ hai phương tương tự như phương trình (4.1):

$$dN_1(t) = -\lambda_1 N_1(t)dt \quad (4.11)$$

$$dN_2(t) = \lambda_1 N_1(t)dt - \lambda_2 N_2(t)dt \quad (4.12)$$

Trong đó $N_1(t)$ và $N_2(t)$ là số hạt nhân của các đồng vị 1 và 2 tại thời điểm t, λ_1 và λ_2 là các hằng số phân rã của các hạt nhân 1 và 2. Từ hai phương trình này ta được hệ hai phương trình vi phân sau:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t) \quad (4.13)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) \quad (4.14)$$

Để giải hệ hai phương trình vi phân (4.13) và (4.14) ta đặt các điều kiện ban đầu tại thời điểm t = 0 như sau: Số hạt nhân 1 là $N_1(0) = N_{10}$ và số hạt nhân 2 là $N_2(0) = N_{20}$. Khi đó ta được các nghiệm bằng:

$$N_1(t) = N_{10}\, e^{-\lambda_1 t} \quad (4.15)$$

$$N_2(t) = \frac{N_{10}\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) + N_{20} e^{-\lambda_2 t} \quad (4.16)$$

Nếu ở thời điểm ban đầu chỉ có đồng vị 1 mà không có đồng vị 2, nghĩa là $N_{20} = 0$ thì (4.16) trở thành:

$$N_2(t) = \frac{N_{10}\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) \quad (4.17)$$

b) Chuỗi ba phân rã phóng xạ

Ta xét chuỗi gồm ba đồng vị phóng xạ nối tiếp nhau từ đồng vị mẹ 1 sang đồng vị con 2, đồng vị con 2 sang đồng vị cháu 3, và đồng vị cháu 3 lại tiếp tục phân rã. Ví dụ chuỗi phân rã trong dãy U^{238}:

$_{88}Ra^{226} \rightarrow {}_{86}Rn^{222} + {}_2He^4$ $(T_{1/2,Ra} = 1622$ năm$)$ (4.18a)

$_{86}Rn^{222} \rightarrow {}_{84}Po^{218} + {}_2He^4$ $(T_{1/2,Rn} = 3{,}82$ ngày$)$ (4.18b)

$_{84}Po^{218} \rightarrow {}_{82}Pb^{214} + {}_2He^4$ $(T_{1/2,Po} = 3{,}05$ phút$)$ (4.18c)

Đồng vị 3 có số hạt nhân tại thời điểm t là $N_3(t)$, tại thời điểm t = 0 là N_{30} và hằng số phân rã là λ_3. Khi đó ta có hệ ba phương trình vi phân sau đây:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t) \tag{4.19}$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) \tag{4.20}$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) + \lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t) \tag{4.21}$$

Nghiệm đối với $N_1(t)$ và $N_2(t)$ có dạng (4.15) và (4.16) còn nghiệm đối với $N_3(t)$ như sau:

$$N_3(t) = N_{30}e^{-\lambda_3 t} + \frac{N_{20}\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2}\left(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t}\right) +$$
$$+ \lambda_1\lambda_2 N_{10}\left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_3-\lambda_1)(\lambda_2-\lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1-\lambda_3)(\lambda_2-\lambda_3)}\right] \tag{4.22}$$

Nếu ở thời điểm ban đầu chỉ có đồng vị 1 và mà không có đồng vị 2 và đồng vị 3, nghĩa là $N_{20} = 0$ và $N_{30} = 0$ thì (4.22) trở thành:

$$N_3(t) = \lambda_1\lambda_2 N_{10}\left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_3-\lambda_1)(\lambda_2-\lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1-\lambda_3)(\lambda_2-\lambda_3)}\right] \tag{4.23}$$

c) Cân bằng phóng xạ

Trong trường hợp chuỗi hai phân rã phóng xạ với $N_{20} = 0$, nếu đồng vị mẹ 1 có hằng số phân rã nhỏ hơn hằng số phân rã của đồng vị con 2, nghĩa là $\lambda_1 < \lambda_2$ và các thời gian bán rã của chúng xấp xỉ bằng nhau $T_{1/2,1} \approx T_{1/2,2}$ thì các đồng vị đó thiết lập một trạng thái cân bằng phóng xạ động. Từ biểu thức (4.17) thấy rằng, sau khoảng thời gian t lớn thì số hạng thứ hai trong dấu ngoặc đơn có thể bỏ qua so với số hạng thứ nhất và (4.17) trở thành:

$$N_2(t) = \frac{N_{10}\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \quad (4.24)$$

Nhân cả hai vế biểu thức này với λ_2 và chú ý rằng $N_1(t) = N_{10}\, e^{-\lambda_1 t}$ ta có hệ thức cân bằng phóng xạ động như sau:

$$\frac{N_2\lambda_2}{N_1\lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (4.25)$$

Nếu đồng vị mẹ có thời gian bán rã rất lớn so với thời gian bán rã của đồng vị con, nghĩa là $T_{1/2,1} >> T_{1/2,2}$ thì sau khoảng thời gian $t >> T_{1/2,2}$ ($T_{1/2,2} << t << T_{1/2,1}$) các đồng vị mẹ và con sẽ đạt tới trạng thái cân bằng bền, thỏa mãn hệ thức:

$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 \quad (4.26)$$

Từ (4.26) ta được:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{T_{1/2,1}}{T_{1/2,2}} \quad (4.27)$$

Có thể sử dụng biểu thức (4.27) để xác định thời gian bán rã của Ra^{226} nếu biết được thời gian bán rã của Rn^{222} và số hạt nhân N_{Ra} và N_{Rn} như sau:

$$T_{1/2,Ra} = \frac{N_{Ra}}{N_{Rn}} T_{1/2,Rn} \quad (4.28)$$

Suy rộng cho một chuỗi nhiều đồng vị phóng xạ nối tiếp nhau ở trạng thái cân bằng bền, ta có:

$$N_1\lambda_1 = N_2\lambda_2 = ... = N_n\lambda_n \quad (4.29)$$

Công thức (4.29) có nghĩa rằng, khi đạt đến sự cân bằng phóng xạ bền, hoạt độ phóng xạ của các đồng vị trong chuỗi phân rã đều bằng nhau. Từ (4.29) ta thu được biểu thức tương tự như (4.28):

$$N_1 : N_2 : ...: N_n = T_{1/2,1} : T_{1/2,2} : ...: T_{1/2,n} \quad (4.30)$$

4.1.3. Xác định hằng số phân rã bằng thực nghiệm

4.1.3.1. Một nguồn đồng vị phóng xạ

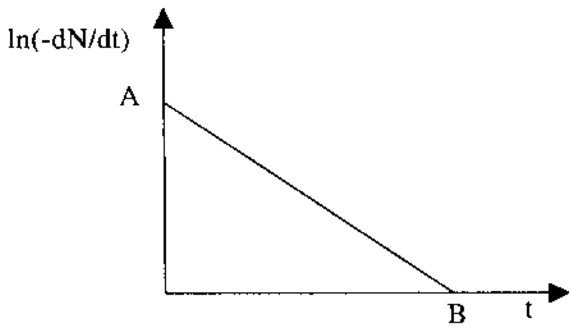
Khi chỉ có một nguồn phóng xạ thì sử dụng biểu thức hoạt độ phóng xạ

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.31)$$

và tính lôgarit hai vế biểu thức này ta được:

$$\ln\left(-\frac{dN}{dt}\right) = \ln(\lambda N_0) - \lambda t \quad (4.32)$$

Từ hình 4.2 biểu diễn hàm (4.32) trên thang bán lôgarit ta tính được λ là bằng góc lệch của đường thẳng AB.



Hình 4.2. Đường cong phân rã của một đồng vị phóng xạ.

4.1.3.2. Hai loại đồng vị phóng xạ

Khi nguồn phóng xạ chứa hai hay nhiều đồng vị khác nhau, đường cong phân rã sẽ phức tạp hơn nhiều. Để đơn giản ta xét nguồn chứa hai đồng vị khác nhau có hằng số phân rã λ_1 và λ_2. Số hạt nhân tổng cộng của hai loại đồng vị là:

$$N(t) = N_1(t) + N_2(t) = N_{10}\, e^{-\lambda_1 t} + N_{20}\, e^{-\lambda_2 t} \tag{4.33}$$

Lấy đạo hàm biểu thức (4.33) theo t và tính lôgarit ta được:

$$\ln(-\frac{dN}{dt}) = \ln(N_{10}\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + N_{20}\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) \tag{4.34}$$

Đồ thị hàm (4.34) không phải là đường thẳng nên từ đồ thị đó xác định λ_1 và λ_2 sẽ rất phức tạp. Để đơn giản ta xét một số trường hợp sau.

a) Trường hợp λ_1 và λ_2 khác xa nhau

Chẳng hạn khi $\lambda_1 >> \lambda_2$ hay $T_{1/2,1} << T_{1/2,2}$ và $N_{10} \approx N_{20}$. Với điều kiện này thì đồng vị thứ nhất rã nhanh nên có thể khảo sát nó trong khoảng thời gian ngắn ban đầu còn đồng vị thứ hai rã chậm nên có thể khảo sát nó trong khoảng thời gian chậm phía sau. Như vậy trên đồ thị hình 4.3, tại khoảng thời gian đầu đường tiếp tuyến AB mô tả đường thẳng phân rã của đồng vị thứ nhất. Cũng như vậy, trong khoảng thời gian sau, đường thẳng tiếp tuyến CD thể hiện đường phân rã của đồng vị thứ hai.

Trong khoảng thời gian đầu với điều kiện $t << \frac{1}{\lambda_2}$ tức là $t << T_{1/2,2}$ thì AB là đường biểu diễn của hàm: