

Công thức (5.52) mô tả sự suy giảm của chùm gamma hẹp và đơn năng. Hệ số suy giảm tuyến tính μ tỉ lệ với tiết diện tương tác σ nên nó bằng tổng các hệ số suy giảm tuyến tính do các hiệu ứng quang điện μ_{photo} , hiệu ứng Compton μ_{compt} và hiệu ứng tạo cặp μ_{pair} . Hệ số suy giảm tuyến tính đối với chì lúc đầu giảm khi tăng năng lượng gamma, đạt giá trị cực tiểu ở 3,5 MeV và sau đó tăng do đóng góp của hiệu ứng tạo cặp và kéo dài cho đến cỡ 10 MeV. Nói chung đối với các hạt nhân nặng, các hiệu ứng đều đóng góp vào hệ số μ , trong đó hiệu ứng quang điện đóng vai trò quan trọng trong miền năng lượng thấp cỡ 0,2 MeV đến 2 MeV, hiệu ứng Compton từ 0,5 MeV đến 5 MeV còn hiệu ứng tạo cặp từ 5 MeV trở đi.

Đối với nhôm và các hạt nhân nhẹ, hệ số suy giảm tuyến tính kéo dài đến 10 - 15 MeV do hiệu ứng tạo cặp có ảnh hưởng chỉ trong miền năng lượng cỡ 10 MeV. Sự hấp thụ quang điện chỉ có tác dụng trong miền năng lượng cỡ 100 - 150 KeV. Do đó đối với các đồng vị phóng xạ tự nhiên và nhân tạo với năng lượng tia gamma thường vào cỡ 0,25 - 2,6 MeV, hệ số suy giảm tuyến tính chủ yếu do hiệu ứng Compton đóng góp.

5.4. SỰ TRUYỀN NEUTRON QUA VẬT CHẤT

5.4.1. Các loại tương tác của neutron với vật chất

Tuy neutron là hạt trung hòa về điện nhưng giữa neutron và electron nguyên tử có tương tác điện từ do sự tương tác giữa các momen từ của chúng. Tương tác này yếu đến mức, để đủ năng lượng ion hóa nguyên tử, vào khoảng 10 eV, nó phải xảy ra ở khoảng cách khoảng 10^{-13} m. Như vậy tiết diện mất năng lượng neutron do ion hóa bằng 10^{-22} cm², tức là cỡ một phần triệu của tiết diện tương ứng của hạt tích điện. Mặc dù tiết diện này lớn hơn tiết diện tương tác của neutron nhanh với hạt nhân, cỡ 10^{-24} cm², nhưng độ mất năng lượng khoảng 10 eV do ion hóa thật không đáng kể so với độ mất năng lượng do neutron tương tác với hạt nhân. Chẳng hạn trong trường hợp va chạm chạm trán với proton, neutron có thể mất toàn bộ năng lượng của mình.

Sự tương tác của momen từ electron với momen từ neutron chỉ đáng kể khi các momen từ của tất cả các electron có cùng một định hướng, chẳng hạn trong sắt từ. Trong trường hợp này sự tương tác của momen từ neutron với momen từ của các electron dẫn tới hiệu ứng vĩ mô của tán xạ tổng cộng, cho phép đánh giá momen từ của neutron.

Ngoài ra, sự tồn tại momen từ của neutron có thể giải thích bằng giả thuyết cho rằng trong một phần thời gian sống của mình, neutron cấu tạo từ hai hạt với điện tích ngược dấu nhau. Do đó neutron có điện tích phân bố trong nó và điện tích đó sẽ tương tác với điện tích electron. Tuy nhiên tương tác này còn yếu hơn tương tác giữa các momen từ nói trên.

Nếu bỏ qua hai loại tương tác vừa trình bày thì tương tác của neutron với vật chất chủ yếu là tương tác của nó với hạt nhân. Phụ thuộc vào việc neutron có xuyên sâu vào trong hạt nhân hay không ta có thể chia tương tác của neutron với hạt nhân thành hai loại:

- Loại thứ nhất là tán xạ đàn hồi thế bởi lực hạt nhân, khi đó neutron không xuyên sâu vào trong hạt nhân.

- Loại thứ hai là các phản ứng hạt nhân như (n,γ) , (n,p) , (n,α) , (n,f) ...; tán xạ không đàn hồi; tán xạ đàn hồi cộng hưởng, khi đó neutron xuyên sâu vào trong hạt nhân.

Vai trò của mỗi quá trình phụ thuộc vào tiết diện của chúng. Trong một số vật liệu, tán xạ đàn hồi thế rất đáng kể, khi đó neutron nhanh mất năng lượng qua một loạt các va chạm đàn hồi liên tiếp nhau với hạt nhân. Đó là quá trình làm chậm neutron, đóng vai trò quan trọng trong vật lý lò phản ứng hạt nhân. Các phản ứng hạt nhân được nghiên cứu và ứng dụng trong vật lý neutron, chế tạo các đồng vị phóng xạ, phân tích kích hoạt neutron, phản ứng phân hạch hạt nhân, ... Sau đây sẽ trình bày ngắn gọn các quá trình tương tác này.

5.4.2. Sự suy giảm chùm neutron khi đi qua vật chất

Để xem xét sự tương tác của neutron với vật chất người ta chia các neutron theo năng lượng của chúng, thành các neutron nhiệt (năng lượng neutron E_n từ 0 đến 0,5 eV), các neutron trung gian (E_n từ 0,5 eV đến 10 KeV), các neutron nhanh (E_n từ 10 KeV đến 10 MeV) và các neutron rất nhanh (E_n lớn hơn 10 MeV). Tương tác của neutron với hạt nhân phụ thuộc rất mạnh vào năng lượng của nó.

Khi chùm hẹp các hạt neutron đi qua môi trường, cũng giống như tia gamma, cường độ chùm tia cũng giảm đi theo hàm số mũ. Ở đây thay cho việc sử dụng hệ số hấp thụ tuyến tính hay hệ số hấp thụ khối người ta dùng tiết diện vĩ mô $\Sigma = \sigma N$, trong đó σ là tiết diện hấp thụ vĩ mô của môi trường còn N là số các hạt nhân hấp thụ của môi trường trong 1 cm^3 . Khi đó cường độ chùm neutron I sau bản hấp thụ dày x liên hệ với cường độ chùm neutron I_0 trước bản hấp thụ như sau:

$$I = I_0 e^{-\Sigma x} = I_0 e^{-\sigma N x} \quad (5.80)$$

5.4.3. Sự làm chậm neutron do tán xạ đàn hồi

5.4.3.1. Khả năng làm chậm của các vật liệu

Tán xạ đàn hồi là quá trình phổ biến nhất khi neutron nhanh tương tác với các hạt nhân môi trường có số nguyên tử bé. Do tán xạ đàn hồi, năng lượng neutron giảm dần khi đi qua môi trường, ta gọi là neutron bị làm chậm và môi trường như vậy gọi là chất làm chậm.

Quá trình tán xạ đàn hồi giữa neutron nhanh với hạt nhân môi trường giống như sự va chạm đàn hồi giữa hai viên bi, trong đó hạt neutron có khối lượng bằng 1, động năng ban đầu E , còn hạt nhân đứng yên có khối lượng A . Sau tán xạ neutron có năng lượng E' . Theo định luật bảo toàn động năng và động lượng của quá trình tán xạ đàn hồi, ta có

$$\epsilon E \leq E' \leq E \quad (5.81)$$

Trong đó

$$\epsilon = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \quad (5.82)$$

Trong công thức (5.81), $E' = E$ khi neutron tán xạ về phía trước còn $E' = \epsilon E$ khi neutron tán xạ giạt lùi về phía sau, tức là va chạm chạm trán. Theo công thức (5.82) trong va chạm với hạt nhân hydrogen thì $\epsilon = 0$, do đó theo công thức (5.81) neutron truyền toàn bộ động năng của mình cho hydrogen khi va chạm chạm trán. Tuy nhiên, đối với các hạt nhân nặng hơn, do $\epsilon \neq 0$ nên neutron không thể truyền toàn bộ động năng của mình trong một va chạm. Chẳng hạn, đối với tán xạ đàn hồi giữa neutron và hạt nhân oxygen thì $\epsilon = 0,778$, do đó phần động năng của neutron được truyền cho hạt nhân oxygen trong một va chạm chạm trán là:

$$\frac{E-E'}{E} = 1 - \epsilon = 1 - 0,778 = 0,222, \text{ tức là } 22,2\%.$$

Như vậy, hạt nhân với khối lượng bé làm chậm neutron có hiệu quả hơn hạt nhân có khối lượng lớn.

Để biểu thị độ mất năng lượng khi neutron va chạm đàn hồi, người ta dùng tham số va chạm hay độ mất năng lượng lôgarit trung bình

$$\xi = \ln \frac{E}{E'} \quad (5.83)$$

Trong đó dấu gạch ngang ký hiệu việc lấy trung bình theo số các neutron tham gia tán xạ và theo các góc tán xạ. Thực hiện phép lấy trung bình ta được:

$$\xi = 1 + \frac{\varepsilon \ln \varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (5.84)$$

Do $\xi = \overline{\ln \frac{E}{E'}}$ nên $\frac{E'}{E} = e^{-\xi}$, hay phần năng lượng trung bình của neutron vào được truyền cho hạt nhân bia trong một va chạm là:

$$f = 1 - \frac{E'}{E} = 1 - e^{-\xi} \quad (5.85)$$

Theo công thức (5.85), đối với hydrogen thì $\xi = 1$ nên phần năng lượng trung bình của neutron nhanh truyền cho hạt nhân hydrogen trong một va chạm là $f = 63\%$, còn đối với carbon thì $\xi = 0,159$ nên $f = 14,7\%$.

Số va chạm cần thiết để làm chậm neutron từ năng lượng E_1 đến năng lượng E_2 là:

$$S(E_1, E_2) = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_1}{E_2} \quad (5.86)$$

Như vậy số va chạm cần thiết để chuyển từ neutron nhanh có năng lượng $E_0 = 2 \text{ MeV}$ đến neutron nhiệt có năng lượng $E_T = 0,025 \text{ eV}$ là:

$$S_T = S(E_0, E_T) = \frac{18,2}{\xi} \quad (5.87)$$

Trên bảng 5.3 dẫn ra các giá trị ξ và S_T đối với một số chất làm chậm.

Bảng 5.3. Các thông số đối với một số chất làm chậm.

Chất làm chậm	Mật độ γ (g/cm^3)	N $10^{24}/\text{cm}^3$	ξ	S_T	$\sqrt{\tau(E_T)}$ (cm)	L (cm)	D (cm^2/s)
H ₂ O	1	0,0335	0,948	~18,2	5,75	2,88	0,16
D ₂ O	1,1	0,0331	0,570	31,8	11	171	0,87
Be	1,85	0,1236	0,209	86	9,9	24	0,50
C	1,6	0,0803	0,158	114	17,3	50	0,84

Từ các biểu thức (5.81), (5.87) và bảng 5.3, ta thấy rằng khi số khối lượng của các hạt nhân tăng thì ξ giảm và do đó số va chạm cần thiết để

chuyển từ neutron nhanh đến neutron nhiệt tăng. Điều này cho thấy các hạt nhân nhẹ có tác dụng làm chậm tốt hơn các hạt nhân nặng.

5.4.3.2. Độ dài làm chậm và độ dài khuếch tán neutron

a) Độ dài làm chậm

Sau một số trung bình va chạm của neutron nhanh trong môi trường như trình bày trên bảng 5.3, neutron nhanh trở thành neutron nhiệt. Quãng đường mà neutron nhanh đi được trong môi trường cho đến khi trở thành neutron nhiệt được gọi là *độ dài làm chậm*. Độ dài làm chậm bằng căn bậc hai của tuổi Fermi $\tau(E)$, được xác định như sau:

$$\tau(E) = - \int_{E_0}^E \frac{\lambda_s \lambda_{tr}}{3\xi} \frac{dE}{E} \approx \frac{\lambda_s \lambda_{tr}}{3\xi} \ln \frac{E_0}{E} \quad (5.88)$$

Trong đó $E_0 = 2 \text{ MeV}$ là năng lượng neutron nhanh, E là năng lượng neutron trong quá trình làm chậm, λ_s và λ_{tr} là các độ dài tán xạ và độ dài dịch chuyển của neutron trong môi trường. Độ dài dịch chuyển được xác định như sau:

$$\lambda_{tr} = \frac{\lambda_s}{1 - \cos\theta} \quad (5.89)$$

$$\text{với} \quad \overline{\cos\theta} = \frac{2}{3A} \quad (5.90)$$

là trung bình cosin của góc bay của neutron sau tán xạ.

Với $E = E_T = 0,025 \text{ eV}$ thì $\tau(E_T)$ là tuổi neutron nhiệt còn $\sqrt{\tau(E_T)}$ là độ dài làm chậm. Bảng 5.3 trình bày độ dài làm chậm đối với một số chất làm chậm.

b) Độ dài khuếch tán

Sau khi trở thành neutron nhiệt, các neutron khuếch tán trong môi trường cho đến lúc bị hấp thụ. Độ dài khuếch tán L là quãng đường mà neutron đi được từ khi trở thành neutron nhiệt đến lúc bị hấp thụ và được xác định như sau:

$$L = \sqrt{\frac{\lambda_a \lambda_{tr}}{3}} \quad (5.91)$$

Trong đó λ_a là độ dài hấp thụ neutron nhiệt của môi trường. Với môi trường có độ dài khuếch tán L thì chùm tia neutron nhiệt bị suy giảm khi đi qua môi trường có bề dày x được xác định như sau:

$$I = I_0 e^{-x/L} \quad (5.92)$$

Các neutron khuếch tán với hệ số khuếch tán D được xác định qua độ dài dịch chuyển như sau:

$$D = \frac{\lambda_{tr}}{3} \quad (5.93)$$

Đối với một nguồn điểm S neutron nhiệt trong 1 giây đặt trong một quả cầu làm chậm bán kính R với độ dài khuếch tán L, hệ số khuếch tán D, thì mật độ thông lượng neutron nhiệt thoát khỏi bề mặt quả cầu là:

$$\Phi = \frac{Se^{-RL}}{4\pi RD} \quad (5.94)$$

Bảng 5.3 dẫn ra các giá trị độ dài khuếch tán L và hệ số khuếch tán D đối với một số môi trường làm chậm.

5.4.4. Hấp thụ neutron

Trong quá trình neutron nhanh được làm chậm thành neutron trên nhiệt hay neutron nhiệt trong môi trường, xác suất hấp thụ chúng tăng dần. Tiết diện hấp thụ của nhiều hạt nhân đối với neutron ở miền năng lượng nhiệt tuân theo quy luật một trên v như sau:

$$\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{E}} \sim \frac{1}{v} \quad (5.95)$$

Chẳng hạn đối với B^{10} , quy luật này đúng trong miền năng lượng từ 0,001 eV đến 1000 eV. Tiết diện neutron có giá trị cao nhất σ_T tại năng lượng nhiệt $E_T = 0,025$ eV. Khi đó quy luật (5.95) có thể viết thành:

$$\sigma = \sigma_T \frac{v_T}{v} = \sigma_T \sqrt{\frac{E_T}{E}} \quad (5.96)$$

Các phản ứng hấp thụ neutron nhiệt thường gặp như $H^1(n,\gamma)H^2$ với $\sigma_T = 0,33$ barns; $N^{14}(n,p)C^{14}$ với $\sigma_T = 1,70$ barns; $B^{10}(n,\alpha)Li^7$ với $\sigma_T = 4,01 \cdot 10^3$ barns và $Cd^{113}(n,\gamma)Cd^{114}$ với $\sigma_T = 2,1 \cdot 10^4$ barns.

5.5. BÀI TẬP

5.5.1. Các bài tập ví dụ

Ví dụ 5.1. Hãy tính độ mất năng lượng riêng do ion hóa đối với deuteron động năng 4 MeV trong khí nitơ ở các điều kiện tiêu chuẩn.

Bài giải.

Sử dụng công thức (5.10) tính độ mất năng lượng riêng do ion hóa:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = k^2 \frac{4\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2\right] \quad (1)$$

Chú ý rằng công thức này khác công thức (5.10) bởi hệ số $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ để tính trong hệ SI. Hơn nữa, để tính $\frac{dE}{dx}$ trong đơn vị eV/m thì thừa số e^4 được tách thành $e^2 \times e^2$, trong đó thừa số e^2 thứ nhất dùng trong công thức để tính còn thừa số e^2 thứ hai dùng cho đơn vị đo eV. Như vậy công thức (1) viết thành:

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}} = \frac{4\pi k^2 n_e z^2 e^2}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad \text{eV/m} \quad (2)$$

Tính số hạng β^2 : Do trường hợp này không tương đối nên $v^2 = \frac{2E}{m_d} = \frac{2E}{m_d c^2} c^2$, hay $\beta^2 = (v/c)^2 = \frac{2E}{m_d c^2} = \frac{2 \times 4}{1875,5} = 4 \cdot 10^{-3}$, nghĩa là $\beta^2 \ll 1$

và có thể bỏ qua. Khi đó công thức (2) trở thành:

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}} &= \frac{4\pi k^2 n_e z^2 e^2}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} \right] \quad \text{eV/m} \\ &= \frac{4\pi k^2 n_e z^2 e^2}{2E} \frac{m_d}{m_e} \left\{ \ln \frac{4Em_e}{Im_d} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$; $z = 1$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;

$$E = 4 \text{ MeV} = 4 \cdot 10^6 \text{ eV}$$

$$\frac{m_d}{m_e} = \frac{1875,5}{0,51} = 3677,5$$

n_e là số electron/ m^3 môi trường khí N_2 . Khi N_2 ở điều kiện chuẩn thì 1 mol có thể tích bằng 22,42 lít, do đó ta có $22,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$. 1 mol chứa $6,03 \cdot 10^{23}$ phân tử, do đó 1 m^3 chứa $(6,02 \cdot 10^{23}) / (22,42 \cdot 10^{-3}) = 0,2685 \cdot 10^{26}$ phân tử/ m^3 . 1 phân tử N_2 chứa 2 nguyên tử nên nó có 14 electron, vì vậy số electron trong 1 m^3 là:

$$n_e = 14 \times 0,2685 \cdot 10^{26} \text{ electron}/\text{m}^3 = 3,759 \cdot 10^{26} \text{ electron}/\text{m}^3$$

Thay số vào biểu thức dE/dx ta có:

$$\begin{aligned} \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}} &= \frac{4\pi \times (9 \cdot 10^9)^2 \times 3,759 \cdot 10^{26} \times 1^2 \times (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{2 \times 4 \cdot 10^6} \\ &\quad \times 3677,5 \times \ln \frac{4 \times 4 \cdot 10^6}{13,5 \times 7 \times 3677,5} \quad \text{eV/m} \\ &= 4,5 \cdot 10^6 \times \ln 46 \text{ eV/m} = 17 \cdot 10^6 \text{ eV/m} = 0,17 \text{ MeV/cm}. \end{aligned}$$

Ví dụ 5.2. Hãy tìm động năng của hạt α với quãng chạy trung bình trong sắt bằng 11 μm .

Bài giải.

Quãng chạy của hạt α trong không khí:

$$R_{kk}(\text{cm}) = 0,31E^{3/2}$$

Quãng chạy của hạt α trong vật chất có số khối lượng A:

$$R_A = 0,56R_{kk}(\text{cm})A^{1/3} \text{ mg/cm}^2 = 0,56 \times 0,31E^{3/2}A^{1/3} \text{ mg/cm}^2 \\ = 0,1736 E^{3/2}A^{1/3} \text{ mg/cm}^2$$

$$E^{3/2} = \frac{R_A(\text{mg/cm}^2)}{0,1736A^{1/3}} \text{ MeV}^{3/2}$$

Quãng chạy tuyến tính trong sắt là 11 μm nên quãng chạy khối trong sắt là:

$$R_A = \rho(\text{g/cm}^3) \times 11 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 7,8 \times 11 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^2 = 8,58 \text{ mg/cm}^2$$

$$E^{3/2} = \frac{8,58}{0,1736 \times 56^{1/3}} = 12,92 \text{ hay}$$

$$E = (12,92)^{2/3} \text{ MeV} = 5,5 \text{ MeV.}$$

Ví dụ 5.3. Hãy tính độ mất năng lượng riêng do bức xạ hãm của electron với động năng 20 MeV trong nhôm. Độ mất năng lượng riêng trong chì gấp bao nhiêu lần trong nhôm?

Bài giải.

Dùng công thức (5.36):

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}}^{(e)} = nE \frac{Z^2 r_e^2}{137} \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right)$$

Trong đó: $n = \rho(\text{g/cm}^3) \frac{N_A}{A}$ với $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$, $A = 27$;

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ phân tử/mol, $n = 6,02 \cdot 10^{22}$ phân tử/cm³;

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2,82 \cdot 10^{-13} \text{ cm}; Z = 13; E = 20 \text{ MeV.}$$

$$\left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}}^{(e)} = 6,02 \cdot 10^{22} \times 20 \times \frac{13^2 \times (2,82 \cdot 10^{-13})^2}{137} \times \left(4 \ln \frac{183}{13^{1/3}} + \frac{2}{9} \right) \\ = 0,472 \times 4,577 = 2,16 \text{ MeV/cm}$$

Tỉ số giữa độ mất năng lượng riêng trong chì và nhôm là:

$$\frac{(dE/dx)_{\text{Pb}}}{(dE/dx)_{\text{Al}}} = \frac{n_{\text{Pb}} Z_{\text{Pb}}^2}{n_{\text{Al}} Z_{\text{Al}}^2} \times \frac{\ln(183/Z_{\text{Pb}}^{1/3}) + 2/9}{\ln(183/Z_{\text{Al}}^{1/3}) + 2/9} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\rho_{\text{Pb}}}{\Lambda_{\text{Pb}}} \times \frac{A_{\text{Al}}}{\rho_{\text{Al}}} \times \frac{Z_{\text{Pb}}^2}{Z_{\text{Al}}^2} \times \frac{\ln(183/Z_{\text{Pb}}^{1/3}) + 2/9}{\ln(183/Z_{\text{Al}}^{1/3}) + 2/9} \\
&= \frac{11,3}{207} \times \frac{27}{2,7} \times \frac{82^2}{13^2} \times \frac{3,963}{4,577} = 18,7
\end{aligned}$$

Ví dụ 5.4. Hãy tính độ mất năng lượng riêng toàn phần của electron với động năng 30 MeV trong nhôm.

Bài giải.

$$\begin{aligned}
\frac{dE}{dz} &= \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \times \left[1 + \frac{(dE/dx)_{\text{ion}}}{(dE/dx)_{\text{rad}}} \right] \\
&= \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \times \left(\frac{800}{ZE} + 1 \right) \\
&= \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \times \left(1 + \frac{800}{13 \times 30} \right) = 3,051 \times \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} \\
\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} &= nE \frac{Z^2 r_e^2}{137} \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right)
\end{aligned}$$

Trong đó: $n = \rho(\text{g/cm}^3) \frac{N_A}{A}$ với $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$, $A = 27$;

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ phân tử/mol, $n = 6,02 \cdot 10^{22}$ phân tử/cm³;

$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2,82 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$; $Z = 13$; $E = 30 \text{ MeV}$.

$$\begin{aligned}
\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} &= 6,02 \cdot 10^{22} \times 30 \times \frac{13^2 \times (2,82 \cdot 10^{-13})^2}{137} \times \left(4 \ln \frac{183}{13^{1/3}} + \frac{2}{9} \right) \\
&= 0,7087 \times 4,577 = 3,244 \text{ MeV/cm} \\
\frac{dE}{dz} &= 3,051 \times \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} = 3,051 \times 3,244 \text{ MeV/cm} = 9,9 \text{ MeV/cm}
\end{aligned}$$

Ví dụ 5.5. Khi đi xuyên qua một lớp vật chất dày 0,4 cm thì năng lượng electron nhanh giảm đi 25%. Hãy tìm độ dài bức xạ của electron nếu cho biết độ mất năng lượng electron chủ yếu do bức xạ.

Bài giải.

Năng lượng electron giảm theo biểu thức:

$$E = E_0 e^{-\frac{x}{\ell_{\text{rad}}}}$$

$$\text{Do đó: } \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - e^{-\frac{x}{\ell_{\text{rad}}}}$$

$$\text{Vậy: } \ell_{\text{rad}} = \frac{x}{\ln\left(\frac{1}{1 - \Delta E/E_0}\right)}$$

$$\text{Thay số: } x = 0,4 \text{ cm; } \frac{\Delta E}{E_0} = 0,25 \text{ ta có } \ell_{\text{rad}} = 1,4 \text{ cm.}$$

Ví dụ 5.6. Một chùm tia hẹp γ năng lượng 0,15 MeV xuyên qua một tấm bạc dày 2 mm và bị suy giảm 4 lần. Hãy tìm tiết diện tương tác của chùm tia γ này trong bạc. Cho biết mật độ của bạc là $10,5 \text{ g/cm}^3$.

Bài giải.

Sự suy giảm cường độ chùm tia γ tuân theo công thức:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Trong đó $\mu = n\sigma$ với $n = \rho \frac{N_A}{A}$ và σ là tiết diện tương tác.

$$\text{Do đó: } \sigma = \frac{\mu}{n} = \frac{1}{nd} \ln\left(\frac{N_0}{N}\right)$$

$$\text{Thay số: } n = 10,5 \times \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{108} = 0,585 \cdot 10^{23} \text{ hạt nhân/cm}^3;$$

$$d = 0,2 \text{ cm; } \frac{N_0}{N} = 4$$

$$\sigma = \frac{\ln 4}{0,585 \cdot 10^{23} \times 0,2} = 118 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 118 \text{ barn}$$

Bài 5.7. Hãy tìm bề dày bản chì sao cho xác suất tạo cặp electron-positron bởi lượng tử γ với năng lượng 7 MeV bằng 0,1.

Bài giải.

Tiết diện tương tác σ của γ với vật chất gồm các tiết diện do hiệu ứng quang điện σ_{photo} , tán xạ Compton σ_{Compton} và hiệu ứng tạo cặp σ_{pair} :

$$\sigma = \sigma_{\text{photo}} + \sigma_{\text{Compton}} + \sigma_{\text{pair}}$$

Phần tia γ bị hấp thụ trong bản chì dày d là $1 - e^{-\mu d}$, do đó xác suất xảy ra hiệu ứng tạo cặp electron-positron bằng: