ĐẠI HỌC QUỐC GIA HCM
TRƯỜNG ĐH KHOA HỌC TỰ NHIÊN

VẬT LÝ NEUTRON VÀ LÒ PHẢN ỨNG

PHẦN: VẬT LÝ NEUTRON

HUỲNH TRÚC PHƯƠNG
Email: htphuong.oarai@gmail.com

NỘI DUNG

Chương 0: Khám phá ra neutron và các tính chất của neutron

Chương 1: Tương tác của neutron với vật chất

Chương 2: Làm chậm neutron

Chương 3: Lý thuyết khuếch tán neutron

Giáo trình: VẬT LÝ LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN, NXB ĐHQG-HCM, 2016
Tác giả: HUỲNH TRÚC PHƯƠNG

CHƯƠNG 0

KHÁM PHÁ RA NEUTRON VÀ CÁC TÍNH CHẤT CỦA NEUTRON

0.1. SỰ KHÁM PHÁ RA NEUTRON

Ernest Rutherford

- Năm 1919, Rutherford dùng hạt alpha bắn vào các hạt nhân nhẹ (C, N, O) thấy đều phát ra hạt proton.

  Khi bắn alpha vào các nguyên tố nhẹ hơn thì không thấy hạt proton bay ra.

Walter Bothe

- Năm 1930, Bothe và Becker thấy rằng khi bắn alpha vào 2 nguyên tố Be và Li xuất hiện tia lạ rất ít bị hấp thu trong chì.

  ➔ *tia lạ này là tia gamma ?*

- Để kiểm chứng, người ta đo hệ số hấp thụ của tia lạ này trong chì, thấy :

  $\mu = 0{,}22\ cm^{-1} << \mu_{min} = 0{,}46\ cm^{-1}$ của tia gamma có E = 3 ➔ 4MeV

  ➔ *Tia lạ không phải là tia gamma.*

Irene Curie

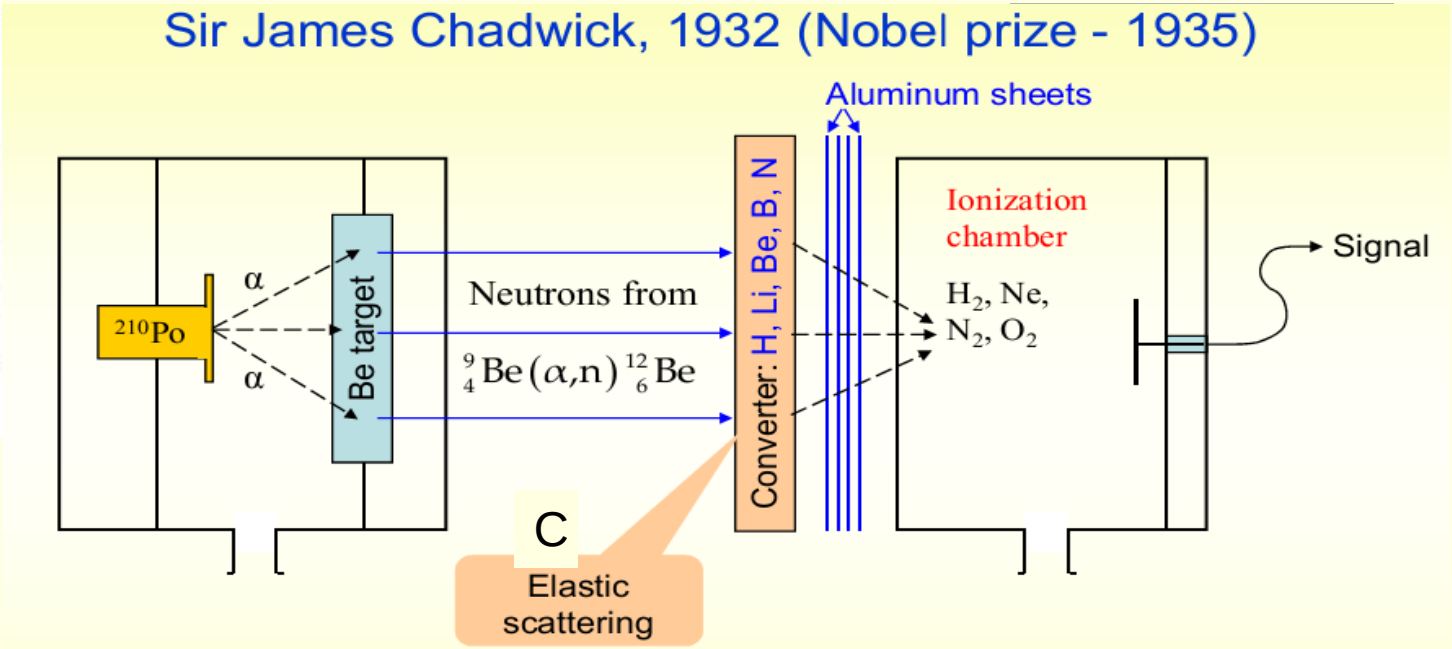
- Vợ chồng Curie phát hiện tia lạ đánh bật proton từ paraffin. Các proton này có quãng chạy 26cm trong không khí ⇔ E = 4,3MeV.

  Nếu cho tia lạ này là gamma thì theo công thức Compton ➔ E= 47MeV ➔ hệ số hấp thụ của nó trong chì << $0{,}46cm^{-1}$

  ➔ điều này khẳng định tia lạ không phải là gamma.

0.1. SỰ KHÁM PHÁ RA NEUTRON

James Chadwick



- **Chadwick làm thí nghiệm:**

Nhận thấy: Tia lạ có khả năng đâm xuyên rất lớn và không gây ion hóa trong buồng Wilson ➔ điện tích rất nhỏ hoặc bằng không➔ ông gọi tia này là hạt neutron.

0.2. CÁC TÍNH CHẤT CƠ BẢN CỦA NEUTRON

- Khối lượng của neutron: $m_n = 1{,}008662u = 1{,}675.10^{-27}kg$
- Điện tích của neutron: $q_n = 0 (= - 0{,}4.10^{-21}e)$
- Thời gian sống của neutron: $\tau = 886s$
- Spin của neutron: $s_n = 1/2$
- Mômen từ của neutron: $\mu_n = - 1{,}913\mu_N$, $\mu_N = e\hbar / 2m_p c$
- Tính hấp dẫn của neutron: $\mathbf{g = 979{,}7\ cm/s^2}$

Chương 1
Tương tác của neutron với vật chất

1.1.Tương tác của neutron với hạt nhân

1.2.Tiết diện phản ứng với neutron

1.3.Tiết diện vĩ mô – sự suy giảm neutron

1.4.Quãng đường tự do trung bình

1.5.Tốc độ phản ứng và thông lượng neutron

1.6.Sự phụ thuộc tiết diện vào năng lượng

1.1. Tương tác của neutron với hạt nhân

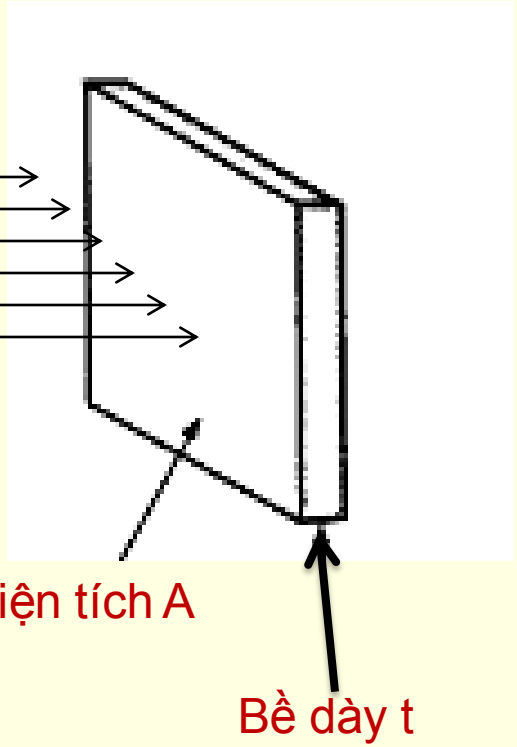
Các phản ứng có thể xảy ra với neutron:

- Tán xạ đàn hồi: *hạt nhân không thay đổi hoặc là thành phần đồng vị hoặc là năng lượng nội tại.* Kí hiệu (n, n)
- Tán xạ không đàn hồi: *hạt nhân không thay đổi thành phần đồng vị nhưng ở trạng thái kích thích*. Kí hiệu (n, n')
- ⇨ gọi chung là tán xạ (đàn hồi hoặc không đàn hồi)
- Bắt bức xạ (hấp thụ): (n, γ) ⇨ neutron biến mất
- Phản ứng hạt nhân: (n, p), (n, α) ⇨ neutron biến mất
- Phản ứng (n, 2n), (n, 3n) ⇨ Neutron tới như thế nào?
- Phản ứng phân hạch (n, f) ⇨ Khi nào xảy ra phản ứng này?

1.2. Tiết diện phản ứng với neutron

- Bia mỏng, dày t, diện tích A
- Mật độ nguyên tử N_0 (n.tử/cm^3)
- Chùm neutron đơn năng, cường độ **I** (n.cm^{-2} s^{-1})

$$I = n\ (cm^{-3}).v\ (cm/s)$$



Thực nghiệm thấy rằng:

Các tương tác xảy ra trong bia:
- Tỉ lệ với cường độ chùm neutron
- Tỉ lệ với mật độ, diện tích, bề dày của bia

- Diện tích tăng gấp đôi thì tốc độ tương tác cũng tăng gấp đôi.
- Cường độ chùm tăng gấp đôi thì tốc độ tương tác cũng tăng gấp đôi

1.2. Tiết diện phản ứng với neutron

Tốc độ tương tác : $r \sim I.N_0.A.t$

Hay | Tốc độ tương tác: $r = \sigma I.N_0.A.t$ | (1.1)

Hằng số tỉ lệ, được gọi là tiết diện

$\sigma = r/(I.N_0.A.t)$ (1.2)

$N_0.A.t$ = số nguyên tử trong bia

Vậy, *σ là tốc độ tương tác cho mỗi nguyên tử trong bia trên mỗi đơn vị cường độ chùm hạt tới*

1.2. Tiết diện phản ứng với neutron

Xác suất mà một neutron bất kỳ trong chùm tương tác với bia là

$$\frac{\sigma.I.N_0.A.t}{I.A} = \left(\frac{\sigma}{A}\right)(N_0.A.t) \qquad (1.3)$$

Xác suất mỗi nhân bia mà 1 neutron trong chùm sẽ tương tác

Do A không đổi nên xác suất tương tác được xác định chỉ bởi σ

Xác suất tương tác là tiết diện phản ứng Đơn vị: barn (b)

1.2. Tiết diện phản ứng với neutron

- Tiết diện tán xạ đàn hồi: σ_e
- Tiết diện tán xạ không đàn hồi: σ_i
- Tiết diện bắt bức xạ: σ_γ
- Tiết diện phân hạch: σ_f
- ……

- **Tiết diện toàn phần:** $\sigma_t = \sigma_e + \sigma_i + \sigma_\gamma + \sigma_f + ...$ (1.4)
- **Tiết diện hấp thụ:** $\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha ....$ (1.5)
- **Tiết diện tán xạ:** $\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i$ (1.6)

1.2. Tiết diện phản ứng với neutron

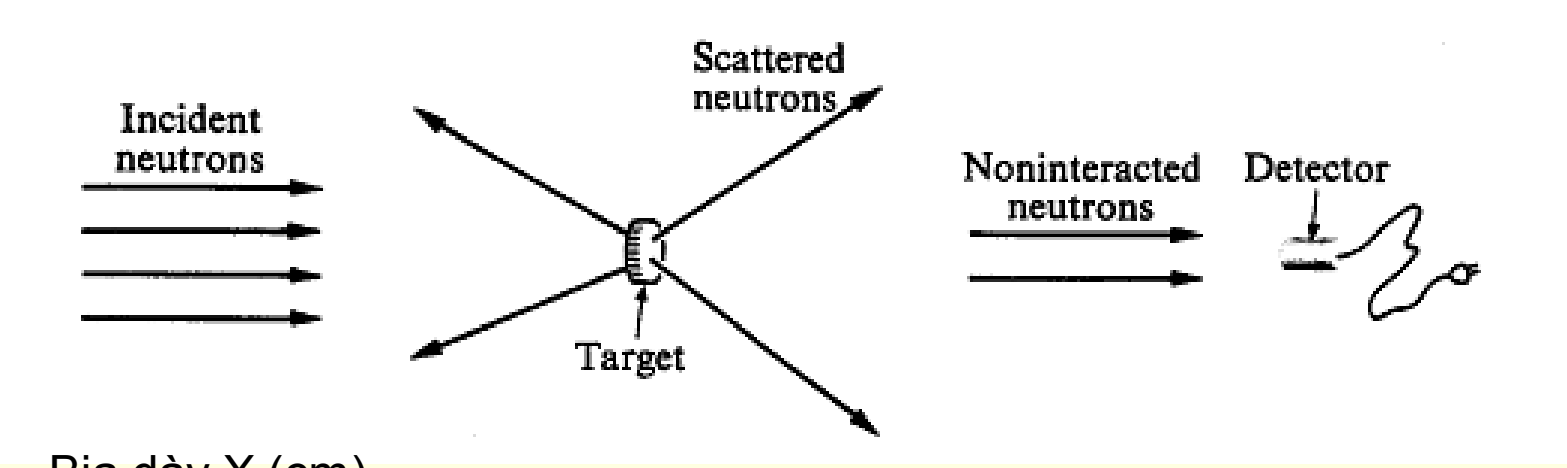
Ví dụ 1.1: Một chùm neutron năng lượng 1 MeV có cường độ 5.10^8 $n.cm^{-2}.s^{-1}$ va chạm với bia mỏng C^{12}. Diện tích của bia là 0,5 cm^2 và dày 0,05 cm. Chùm neutron có tiết diện 0,1 cm^2. Tại năng lượng 1 MeV, tiết diện toàn phần của C^{12} là 2,6 barn. Biết khối lượng riêng của C là 1,6 g/cm^3

(a) Tính tốc độ tương tác của neutron với bia

(b) Tính xác suất mà neutron có va chạm trong bia

Ví dụ 1.2: Chỉ có 2 phản ứng hấp thụ neutron là bắt bức xạ và phân hạch xảy ra khi neutron năng lượng 0,0253 eV tương tác với U^{235}. Tiết diện bắt bức xạ và phân hạch tương ứng là 99 barn và 582 barn. Khi U^{235} hấp thụ neutron 0,0253 eV, tính xác suất xảy ra phản ứng phân hạch.

1.3. Tiết diện vĩ mô – Sự suy giảm neutron



- Bia dày X (cm)
- Cường độ chùm neutron song song, I_0
- Đo neutron xuyên qua bia bằng detector

Đặt: I(x) là cường độ neutron không tương tác với bia sau khi qua quãng đường x

⇒ Độ suy giảm cường độ chùm neutron

$$-dI(x) = N\sigma_t I(x)dx \qquad (1.7)$$

1.3. Tiết diện vĩ mô – Sự suy giảm neutron

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma_t x} \qquad (1.8)$$

Cường độ chùm neutron thoát ra khỏi bia:

$$I(X) = I_0 e^{-N\sigma_t X} \qquad (1.9)$$

Được đo bởi detector

Đặt: $N\sigma_t = \Sigma_t$ (cm^{-1})

Tiết diện vĩ mô

Ví dụ 1.3: Tiết diện hấp thụ của Cd^{113} đối với neutron có năng lượng xác định là 20800 barn. Biết khối lượng riêng của Cd là 8,67 g/cm^3. Tính tiết diện vĩ mô và bề dày lớp Cd cần thiết để cường độ chùm neutron giảm 1% giá trị ban đầu của nó.

Pt.(1.7) được viết lại:

$$-dI(x) = \Sigma_t I(x)dx \qquad (1.10)$$

1.3. Tiết diện vĩ mô – Sự suy giảm neutron

$$-\frac{dI(x)}{I(x)} = \Sigma_t dx \qquad (1.11)$$

Xác suất mà 1 neutron tương tác trong dx

Phần % neutron có tương tác trong khoảng dx

Σ_t là xác suất mỗi đơn vị chiều dài mà neutron sẽ chịu một loạt tương tác.

Tiết diện vĩ mô toàn phần

Trở lại pt (1.8)

$$\frac{I(x)}{I_0} = e^{-N\sigma_t x} = e^{-\Sigma_t x}$$

Xác suất 1 neutron dịch chuyển quãng đường x mà không có tương tác

Phần % neutron không tương tác trên quãng đường x

1.3. Tiết diện vĩ mô – Sự suy giảm neutron

Đặt: *p(x) dx* là xác suất mà neutron có tương tác đầu tiên trong dx

$$p(x)dx = e^{-\Sigma_t x} \times \Sigma_t dx \qquad (1.12)$$

Xác suất mà neutron tồn tại đến khoảng cách x mà không có tương tác

Xác suất mà neutron tương tác trong khoảng dx

Xác suất neutron tương tác trong khoảng x = a và x = b

$$p(a,b) = \Sigma_t \int_a^b e^{-\Sigma_t x} dx = e^{-\Sigma_t a} - e^{-\Sigma_t b} \qquad (1.13)$$

Trên thực tế, xác suất mà neutron sẽ tương tác ít nhất một lần trong môi trường vô hạn thu được bằng cách đặt a = 0 và b = ∞

$$P(0,\infty) = \int_0^\infty p(x)dx = 1$$

1.4. Quãng đường tự do trung bình

Khoảng cách mà neutron di chuyển giữa các tương tác gọi là quãng đường tự do và trung bình tất cả các khoảng cách này được gọi là quãng đường tự do trung bình

$$\bar{x} = \lambda_t = \int_0^\infty x p(x) dx = \Sigma_t \int_0^\infty x e^{-\Sigma_t x} dx = \frac{1}{\Sigma_t} \quad (1.14)$$

Mặt khác,

$$\Sigma_t = N_0 \sigma_t = N_0 \sigma_s + N_0 \sigma_a = \Sigma_s + \Sigma_a \quad (1.15)$$

Trường hợp riêng: $\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s}$ và $\lambda_a = \frac{1}{\Sigma_a}$ (1.16)

Vậy:

$$\lambda_t = \frac{1}{\Sigma_t} = \frac{1}{\Sigma_s + \Sigma_a} = \frac{\lambda_a \lambda_s}{\lambda_s + \lambda_a} \quad (1.17)$$

1.4. Quãng đường tự do trung bình

Ví dụ 1.4: Tính quãng đường tán xạ tự do trung bình và thời gian cần thiết để neutron có năng lượng 100 eV có sự tương tác đầu tiên trong khối Fe. Biết $m_n = 1{,}67492716 \times 10^{-27}$kg, $\rho_{Fe} = 7{,}87$ g/cm^3 , $\sigma_{s,Fe} = 1{,}85$ barn

Ví dụ 1.5: Tính và so sánh quãng đường tán xạ tự do trung bình với quãng đường hấp thụ tự do trung bình đối với neutron trong graphit. Biết: $\sigma_s = 4{,}8$ barn, $\sigma_a = 3{,}2.10^{-3}$ barn, $\rho = 2{,}25$ g/cm^3

1.4. Quãng đường tự do trung bình

Xét hỗn hợp gồm 2 hạt nhân X và Y

$$\Sigma = \Sigma_X + \Sigma_Y = N_X\sigma_X + N_Y\sigma_Y \qquad (1.18)$$

Nếu công thức của phân tử là $X_m Y_n$ thì

$$\sigma = m\sigma_X + n\sigma_Y \qquad (1.19)$$

Tổng quát: $\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + ...$

Mật độ nguyên tử N_i của hạt nhân i là $N_i = \frac{\rho N_A . n_i}{M}$

$$\Sigma = \frac{\rho N_A}{M}\left(n_1\sigma_1 + n_2\sigma_2 + n_3\sigma_3 + ...\right)$$

1.4. Quãng đường tự do trung bình

Ví dụ 1.6: Tiết diện hấp thụ của U^{235} và U^{238} tại 0,0253 eV là 680 barn và 2,7 barn. Tính tiết diện hấp thụ vĩ mô Σ_a của uranium tự nhiên (U) tại năng lượng này. Biết U^{235} chiếm 0,7% U và U^{238} chiếm 99,3% U, ρ_U = 19,1 g/cm^3, M_U = 238,03

Ví dụ 1.7: Tính tiết diện tán xạ vĩ mô Σ_s của H_2O đối với neutron có năng lượng 2 MeV. Biết tiết diện tán xạ vi mô của H và O là 38 barn và 4,2 barn.

Ví dụ 1.8: Tính tiết diện vĩ mô toàn phần của nhiên liệu UO_2 đối với neutron 1 MeV. Biết $\rho(UO_2)$ = 10 g/cm^3, M = 270.

Đồng vị	**n_i**	**σ_t tại 1 MeV**
U^{235}	0,007	6,84 b
U^{238}	0,993	7,10 b
O^{16}	2,000	8,22 b

1.5. Tốc độ phản ứng và thông lượng neutron

Tốc độ phản ứng mỗi đơn vị thể tích của vật liệu bia trong đơn vị thời gian đối với tương tác *i* là

$$r_i\,(n.cm^{-3}.s^{-1}) = \frac{v}{\lambda_i}\,n = \phi.\Sigma_i = \phi.N_0\sigma_i \qquad (1.20)$$

Với ϕ là *thông lượng neutron* và có đơn vị là số neutron trong mỗi đơn vị thời gian mỗi đơn vị diện tích, $n/cm^2/s$.

Nếu tất cả neutron có cùng vận tốc *v* và mật độ neutron *n*, thì khi đó thông lượng neutron và tốc độ phản ứng được viết lại như sau

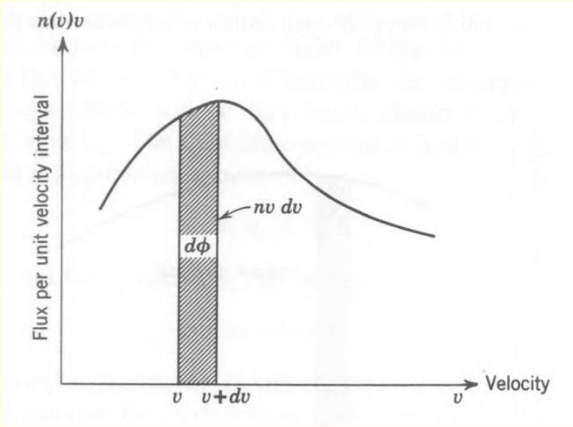
$$\phi = n.v \qquad r_i = n.v.N_0.\sigma_i \qquad (1.21)$$

⇨ Tốc độ phản ứng trong thể tích V $R_i\,(n.s^{-1}) = r_i.V = \phi.\Sigma_i.V$

1.5. Tốc độ phản ứng và thông lượng neutron

Mật độ neutron là hàm phân bố theo vận tốc:

$$n = \int_0^\infty n(v)dv \qquad (1.22)$$

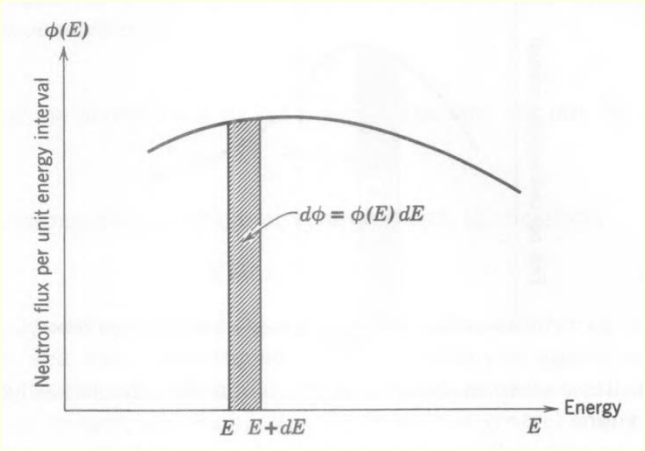


Thông lượng toàn phần

$$\phi = \int_0^\infty n(v)vdv = \int_0^\infty \phi(v)dv \qquad (1.23)$$

Trường hợp phân bố theo năng lượng

$$\phi = \int_0^\infty \phi(E)\,dE \qquad (1.24)$$



1.5. Tốc độ phản ứng và thông lượng neutron

Ví dụ 1.9: Một lò phản ứng chứa 50000kg uranium tự nhiên, trong đó có 0,7% đồng vị phân hạch U^{235}. Giả sử thông lượng trung bình là 10^{12} $n.cm^{-2}.s^{-1}$ và tiết diện phân hạch của U^{235} là σ_f = 580b, hãy tính phần % U^{235} "bị cháy" trong một năm. Biết rằng lò hoạt động liên tục trong thời gian này và bỏ qua sự tiêu thụ U^{235} do các phản ứng khác.

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

Năng lượng neutron được chia làm bốn vùng chính:

- Vùng năng lượng cao: 1 MeV đến 10 MeV. Neutron trong vùng này được gọi là *neutron nhanh*.
- Vùng năng lượng trung gian: 1 keV đến 1 MeV. Neutron trong vùng này được gọi là *neutron trung gian*.
- Vùng năng lượng cộng hưởng: từ 1 eV đến 1 keV. Neutron có năng lượng trong vùng này được gọi là *neutron trên nhiệt*.
- Vùng năng lượng nhiệt: < 1 eV. Neutron có năng lượng nằm trong vùng này được gọi là *neutron nhiệt* hay *neutron chậm*.

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

1. Neutron nhanh:

Chủ yếu là phản ứng (n, n), nghĩa là quá trình tán xạ chiếm ưu thế.

Tiết diện toàn phần hầu như là do tán xạ :

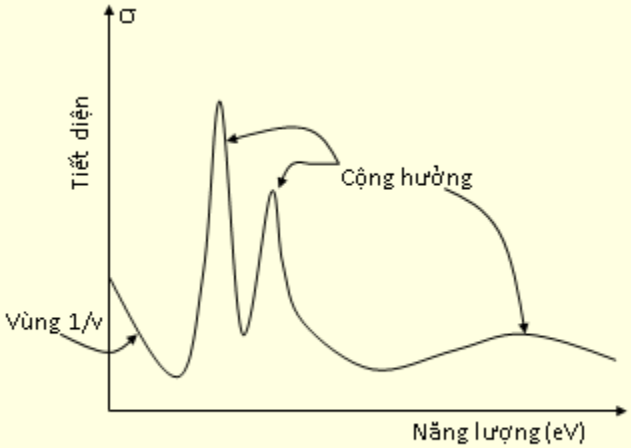
$$\sigma_t = \sigma_s = 2\pi R^2 \qquad (1.25)$$

2. Neutron trung gian:

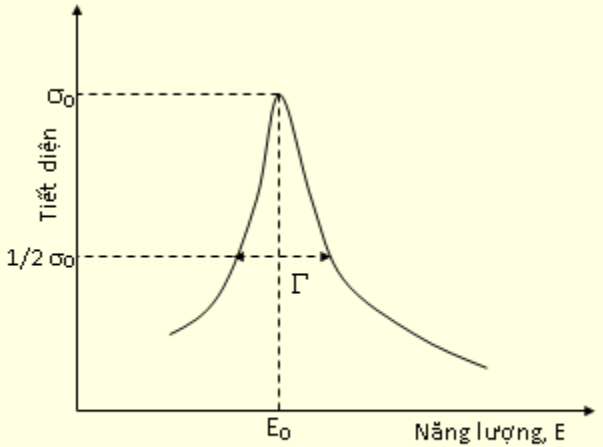
- Phản ứng (n, n) vẫn là phản ứng chiếm ưu thế đối với hạt nhân trung bình và nặng.
- Đối với hạt nhân trung bình và nặng thì các cộng hưởng chồng chập lên nhau và xuất hiện vùng bằng phẳng.
- Đối với hạt nhân nhẹ (A < 25) vùng này chứa những cộng hưởng tách rời nhau riêng biệt

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:



Hình 1.7: Sự biến thiên tiết diện theo năng lượng đối với một hạt nhân cho trước.



Hình 1.8: Bề rộng của một đỉnh cộng hưởng được biểu diễn dưới dạng Γ.

Tiết diện toàn phần trên nền phông σ_t giữa các cộng hưởng được cho bởi:

$$\sigma_t = \sigma_P = 4\pi R^2 \qquad (1.26)$$

⇩

Tán xạ thế

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:

XÁC ĐỊNH TIẾT DIỆN CỘNG HƯỞNG

Tiết diện tương tác = (Xác suất hình thành nhân hợp phần) x (Xác suất phân rã ra các hạt)

Xác suất mà hệ phân rã bằng cách phát neutron đàn hồi là $\frac{\Gamma_n}{\Gamma}$

Xác suất mà hệ phân rã bằng cách phát neutron không đàn hồi là $\frac{\Gamma_{n'}}{\Gamma}$

Tiết diện hình thành nhân hợp phần $\sigma_{CN}(E)$

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:

XÁC ĐỊNH TIẾT DIỆN CỘNG HƯỞNG

Tiết diện tán xạ đàn hồi cộng hưởng là

$$\sigma_s(E) = \sigma_{CN}(E)\frac{\Gamma_n}{\Gamma} \qquad (1.27)$$

Lân cận đỉnh cộng hưởng thì tiết diện hình thành nhân hợp phần

$$\sigma_{CN}(E) = \frac{\text{const.}}{(E-E_0)^2 + \Gamma^2/4} \qquad (1.28)$$

Với

$$\text{Const.} = \lambda^2 \Gamma\Gamma_n g/(4\pi) = \pi\lambda\!\!\!^{-2} g\Gamma\Gamma_n$$

$$g = \begin{cases} 1, & I = 0 \\ \frac{1}{2}\left(\frac{2J+1}{2I+1}\right) & I \neq 0 \end{cases}$$

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:

XÁC ĐỊNH TIẾT DIỆN CỘNG HƯỞNG

Phản ứng (n, n)

$$\sigma_s(E) = \pi\lambda^2 g \frac{\Gamma_n \Gamma_n}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

Phản ứng (n, n')

$$\sigma_i(E) = \pi\lambda^2 g \frac{\Gamma_n \Gamma_{n'}}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

Phản ứng (n, γ)

$$\sigma_\gamma(E) = \pi\lambda^2 g \frac{\Gamma_n \Gamma_\gamma}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

Công thức Breit-Wigner cho 01 mức cộng hưởng

(1.29)

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:

XÉT TRƯỜNG HỢP BẮT BỨC XẠ

$$\sigma_\gamma(E) = \pi\lambda^2 g \frac{\Gamma_n(E)\Gamma_\gamma}{(E-E_0)^2 + \Gamma^2/4} \qquad (1.30)$$

Tại đỉnh cộng hưởng ($E = E_0$): $$\sigma_0(E_0) = \pi\lambda_0^2 g \frac{\Gamma_n(E_0)\Gamma_\gamma}{\Gamma^2/4} \qquad (1.31)$$

$$\sigma_\gamma = \sigma_0 \left(\frac{E_0}{E}\right)^{1/2} \frac{1}{1 + \frac{(E-E_0)^2}{(\Gamma/2)^2}} \qquad (1.32)$$

Chú ý: $$\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 = \frac{E_0}{E}$$

$$\Gamma_n(E) \sim v \sim \sqrt{E}$$

$$\Gamma_n(E) = \Gamma_n(E_0)\sqrt{\frac{E}{E_0}}$$

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:

XÉT TRƯỜNG HỢP BẮT BỨC XẠ

Đối với một cộng hưởng rộng, nghĩa là khi $\Gamma >> E - E_0$ thì

$$\sigma_\gamma = \sigma_0 \left(\frac{E_0}{E} \right)^{1/2} = \frac{C}{v} = \frac{C}{\sqrt{E}} \qquad (1.33)$$

TỔNG QUÁT: Tiết diện toàn phần đối với miền cộng hưởng rộng

$$\sigma_t = 4\pi R^2 + \frac{C}{\sqrt{E}} \qquad (1.34)$$

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:

XÉT TRƯỜNG HỢP TÁN XẠ

- Chứng minh rằng tiết diện tán xạ cộng hưởng đối với neutron có năng lượng E có thể biểu diễn theo công thức Breit-Wigner:

$$\sigma_s(E) = \sigma_0 \frac{\Gamma_n}{\Gamma}\sqrt{\frac{E_0}{E}}\frac{\Gamma^2}{4(E-E_0)^2+\Gamma^2}$$ **(1.35)**

VỚI

$$\sigma_0 = 4\pi\lambda\!\!\!^{-2}_0 g\frac{\Gamma_n(E_0)}{\Gamma}$$ **(1.36)**

- Tiết diện tán xạ toàn phần tại đỉnh cộng hưởng là

$$\sigma_s = \sigma_0\frac{\Gamma_n}{\Gamma} + 4\pi R^2$$ **(1.37)**

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

3. Neutron trên nhiệt:

MỘT SỐ VÍ DỤ

Ví dụ 1.1: Đối với hạt nhân chỉ có một cộng hưởng được mô tả bởi định luật Breit-Wigner (với g = 1) và đối với neutron có năng lượng E cho trước. Xác định giới hạn của tiết diện hấp thụ mà ta có thể quan sát được.
Áp dụng cho trường hợp E = 0,0253 eV; 1eV; 10eV; 100eV; 1000eV

Ví dụ 1.2: Trong phản ứng bắt cộng hưởng neutron của ^{115}In, tại năng lượng cộng hưởng E_0 = 1,44eV, người ta đo được tiết diện bắt cộng hưởng là 26000 barn và Γ = 0,09eV. Trong thực nghiệm này người ta chỉ quan sát thấy có gamma và neutron phát ra và số tia gamma phát ra nhiều hơn số neutron gấp nhiều lần. Hãy tính số neutron phát ra ứng với 1 tia gamma phát ra?

Ví dụ 1.3: Tính tiết diện tán xạ toàn phần tại đỉnh cộng hưởng 36,67 eV của hạt nhân U^{238}. Biết: $\Gamma_\gamma = 2{,}289.10^{-2}$ eV; $\Gamma_n = 3{,}413.10^{-2}$ eV; J = 0,5; I = 0

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

4. Neutron nhiệt:

- Khi năng lượng neutron trở thành năng lượng chuyển động nhiệt của nguyên tử thì neutron cân bằng nhiệt với môi trường.

- Trong một môi trường lý tưởng không có hấp thụ và rò rỉ thì sự phân bố năng lượng neutron sẽ giống với sự phân bố năng lượng của nguyên tử trong chuyển động nhiệt.

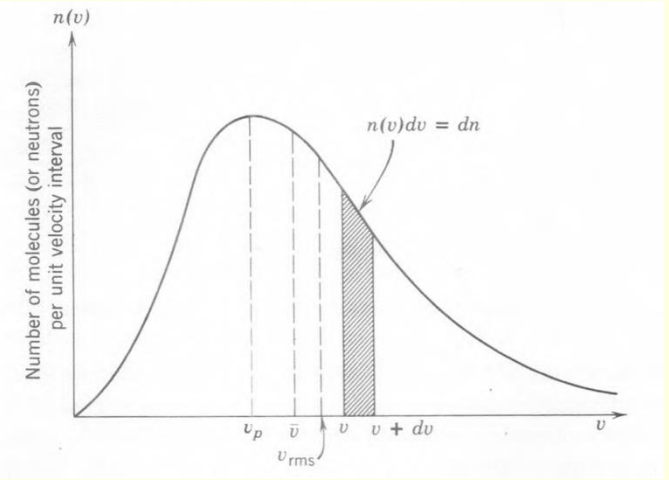
- Tất cả neutron nhiệt không có cùng năng lượng hoặc vận tốc. Phân bố phổ năng lượng neutron gọi là phân bố Maxwell-Boltzmann hay ngắn gọn là *phân bố Maxwell.*

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

4. Neutron nhiệt:

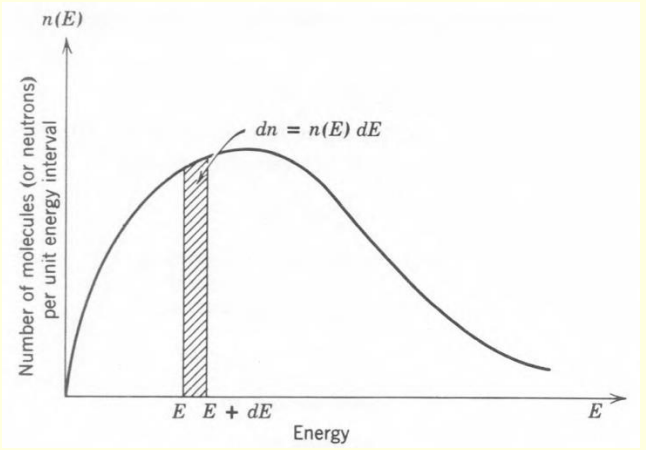
Phân bố mật độ theo vận tốc neutron:

$$dn = n(v)dv = \frac{4\pi n_0}{(2\pi kT/m)^{3/2}} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2/2}{kT}\right)dv \qquad (1.38)$$



Phân bố mật độ theo năng lượng neutron:

$$dn = n(E)dE = \frac{2\pi n_0}{(\pi kT/m)^{3/2}} E^{1/2} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)dE \qquad (1.39)$$



1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

4. Neutron nhiệt:

- *Vận tốc ứng với mật độ neutron có xác suất cao nhất*, v_p

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1.40)$$

Động năng của neutron nhiệt ứng với vận tốc v_p là

$$E_p = \frac{mv_p^2}{2} = kT$$

Ở nhiệt độ phòng t = 20,6°C (T = 293,6 K) thì:

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}38.10^{-23} \times 293{,}6}{1{,}66.10^{-27}}} \approx 2200\,(m/s)$$

$$E_p = kT = 1{,}38.10^{-23} \times 293{,}6 \approx 0{,}0253\,(eV)$$

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

4. Neutron nhiệt:

Vận tốc trung bình của neutron tính theo

$$\bar{v} = \frac{\int_0^\infty n(v) v dv}{\int_0^\infty n(v) dv} = \frac{\int_0^\infty \frac{4\pi n v^3 e^{-mv^2/2kT}}{(2\pi kT/m)^{3/2}} dv}{\int_0^\infty \frac{4\pi n v^2 e^{-mv^2/2kT}}{(2\pi kT/m)^{3/2}} dv} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \qquad (1.41)$$

Tỉ số giữa *vận tốc trung bình* và *vận tốc có xác suất cao nhất* của neutron trong phổ Maxwell là

$$\frac{\bar{v}}{v_p} = \frac{\sqrt{8kT/\pi m}}{\sqrt{2kT/m}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1.128$$

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

Hầu hết các hạt nhân trong vùng neutron nhiệt có tiết diện hấp thụ tuân theo luật 1/v.

$$\sigma_a \sim \frac{1}{v} \sim \frac{1}{\sqrt{E}} \sim \frac{1}{\sqrt{T}} \qquad (1.42)$$

Như vậy, $\sigma_a(T) = \sigma_a(T_0)\sqrt{\frac{T_0}{T}}$ và $\sigma_a(E) = \sigma_a(E_p)\sqrt{\frac{E_p}{E}}$ (1.43)

vì $\frac{\bar{v}}{v_p} = \frac{\sqrt{8kT/\pi m}}{\sqrt{2kT/m}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1.128$

Tiết diện hấp thụ hiệu dụng

nên $\bar{\sigma}_a(T) = \sigma_a(T_0)\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{T_0}{T}}$ (1.44)

và $\bar{\sigma}_a(E) = \sigma_a(E_p)\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{E_p}{E}}$ (1.45)

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

Tuy nhiên, có một vài hạt nhân không hoàn toàn tuân theo luật 1/v mà phải hiệu chỉnh bởi một hệ số g(T),

Như vậy,

$$\sigma_a(T) = g_a(T)\sigma_a(T_0)\sqrt{\frac{T_0}{T}} \qquad (1.46)$$

và

$$\overline{\sigma}_a(T) = g_a(T)\sigma_a(T_0)\frac{\sqrt{\pi}}{2}\sqrt{\frac{T_0}{T}} \qquad (1.47)$$

1.6. Sự phụ thuộc năng lượng của tiết diện neutron

Ví dụ 1.4: Thanh điều khiển trong lò phản ứng được làm bằng hợp kim Cd-In-Ag với hàm lượng tương ứng là 5% (Cd), 15% (In) và 80% (Ag). Tính tốc độ hấp thụ của neutron nhiệt trên mỗi gam vật liệu này (nguyên tử/giây/gam) tại nhiệt độ 400°C và thông lượng neutron nhiệt 5.10^{13} n.cm^{-2}.s^{-1}. Biết rằng, Cd và In là vật liệu có tiết diện không tuân theo luật 1/v, Ag là vật liệu có tiết diện tuân theo luật 1/v.

Ví dụ 1.5: Tiết diện hấp thụ của ^{235}U tại vận tốc v_p và năng lượng E_p là 98,81b. Từ bảng số liệu hạt nhân, hệ số $g_a(T_0)$ tìm được là 0,9898. Tính tiết diện hấp thụ trung bình tại năng lượng 0,0253 eV. Tính tiết diện này tại 400°C ?

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HCM
TRƯỜNG ĐH KHOA HỌC TỰ NHIÊN

VẬT LÝ NEUTRON VÀ LÒ PHẢN ỨNG

PHẦN: VẬT LÝ NEUTRON

HUỲNH TRÚC PHƯƠNG

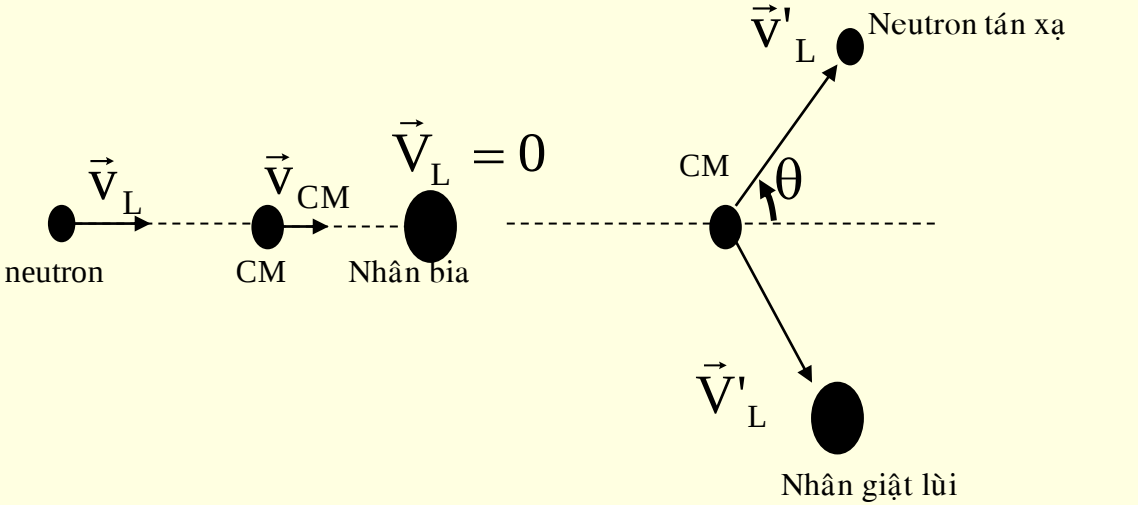
Email: htphuong.oarai@gmail.com

CHƯƠNG 2
LÀM CHẬM NEUTRON

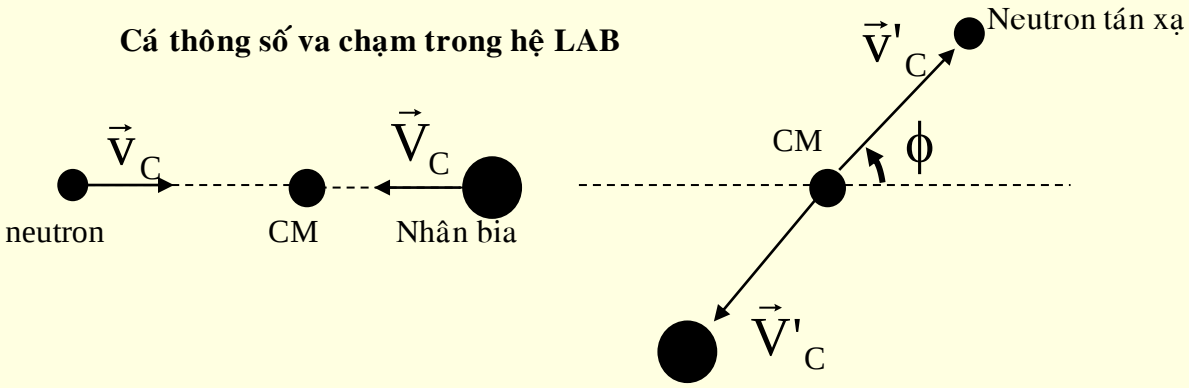
NỘI DUNG

- NĂNG LƯỢNG VÀ VẬN TỐC NEUTRON
- MỐI LIÊN HỆ GIỮA GÓC TÁN XẠ TRONG HỆ CM và LAB
- MỐI LIÊN HỆ GIỮA NĂNG LƯỢNG TRƯỚC VÀ SAU TÁN XẠ
- PHÂN BỐ GÓC VÀ NĂNG LƯỢNG SAU TÁN XẠ
- TÁN XẠ HƯỚNG TỚI TRONG HỆ L (Cosin trung bình của góc tán xạ)
- QUÃNG ĐƯỜNG VẬN CHUYỂN TỰ DO TRUNG BÌNH
- ĐỘ GIẢM LOGARIT NĂNG LƯỢNG TRUNG BÌNH - LETHARGY
- KHẢ NĂNG VÀ HỆ SỐ LÀM CHẬM
- MẬT ĐỘ LÀM CHẬM
- XÁC SUẤT THOÁT CỘNG HƯỞNG

2.1. VẬN TỐC VÀ NĂNG LƯỢNG NEUTRON



Cá thông số va chạm trong hệ LAB



Cá thông số va chạm trong hệ CM

2.1. VẬN TỐC VÀ NĂNG LƯỢNG NEUTRON

- Vận tốc khối tâm: $$\vec{v}_{CM} = \frac{1}{1+A}\vec{v}_L \qquad (2.1)$$

- Vận tốc neutron trong hệ khối tâm: $$\vec{v}_C = \frac{A}{1+A}\vec{v}_L \qquad (2.2)$$

- Vận tốc nhân bia trong hệ khối tâm: $$\vec{V}_C = -\vec{v}_{CM} = -\frac{1}{1+A}\vec{v}_L \qquad (2.3)$$

2.1. VẬN TỐC VÀ NĂNG LƯỢNG NEUTRON

Ta dễ dàng chứng minh được:

1) Động lượng toàn phần trong CM = 0

2) Động năng toàn phần trong hệ L trước khi va chạm $E_L = \frac{1}{2} v_L^2$ **(2.4)**

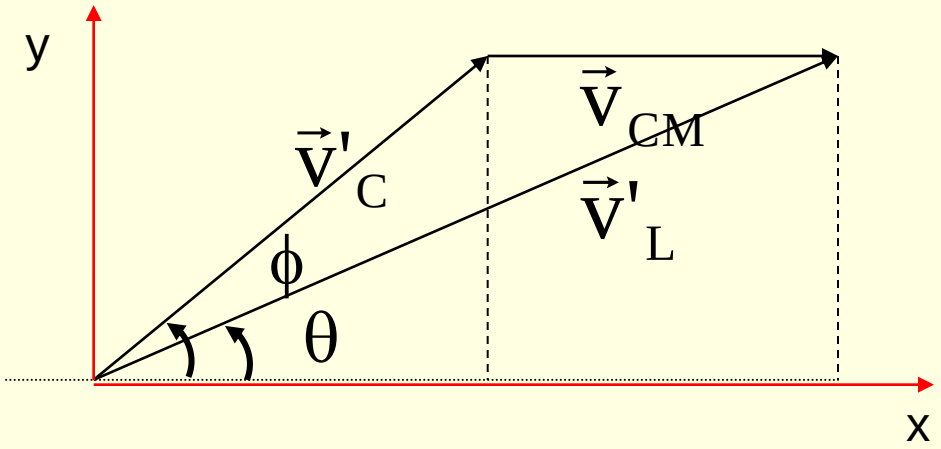
3) Động năng toàn phần trong hệ CM trước khi va chạm $E_C = \frac{1}{2} \frac{A}{A+1} v_L^2$

4) Tốc độ các hạt trước và sau va chạm trong hệ CM không đổi

$$E_C = \frac{A}{A+1} E_L$$ **(2.5)**

$V_c = V'_c$ và $v_c = v'_c$

2.2. MỐI LIÊN HỆ GIỮA GÓC TÁN XẠ TRONG HỆ CM VÀ LAB



Ta dễ dàng chứng minh được:

$$\cos\theta = \frac{A\cos\phi + 1}{\left(A^2 + 2A\cos\phi + 1\right)^{1/2}} \quad \textbf{(2.6)}$$

hay

$$\tan\theta = \frac{\sin\phi}{1/A + \cos\phi} \quad \textbf{(2.7)}$$

Nếu A >> 1 thì

$$\cos\theta = \frac{A\cos\phi}{\left(A^2\right)^{1/2}} \approx \cos\phi \quad \textbf{(2.8)}$$

2.2. MỐI LIÊN HỆ GIỮA GÓC TÁN XẠ TRONG HỆ CM VÀ LAB

Ví dụ 2.1: Một neutron năng lượng 100 keV va chạm với một hạt nhân ^{9}Be đứng yên. Sau va chạm neutron bị tán xạ một góc 45^{0} trong hệ L. Tính, trong hệ CM:

1) Động năng của hạt nhân ^{9}Be
2) Góc tán xạ của neutron

2.3. MỐI LIÊN HỆ GIỮA NĂNG LƯỢNG TRƯỚC VÀ SAU TÁN XẠ

Ta dễ dàng tìm được năng lượng của neutron sau tán xạ:

$$E = \left[\frac{A^2 + 1 + 2A\cos\phi}{(A+1)^2}\right]E_0 \qquad (2.9)$$

Nếu ta đặt: $\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2$ thì $$E = \left[\frac{(1+\alpha)+(1-\alpha)\cos\phi}{2}\right]E_0 \qquad (2.10)$$

Nhận xét:

Khi $\phi = 0$ ➔ không có va chạm ➔ $E = E_{max} = E_0$

Khi $\phi = 180^0$ ➔ năng lượng mất mát cực đại và $E = E_{min} = \alpha E_0$

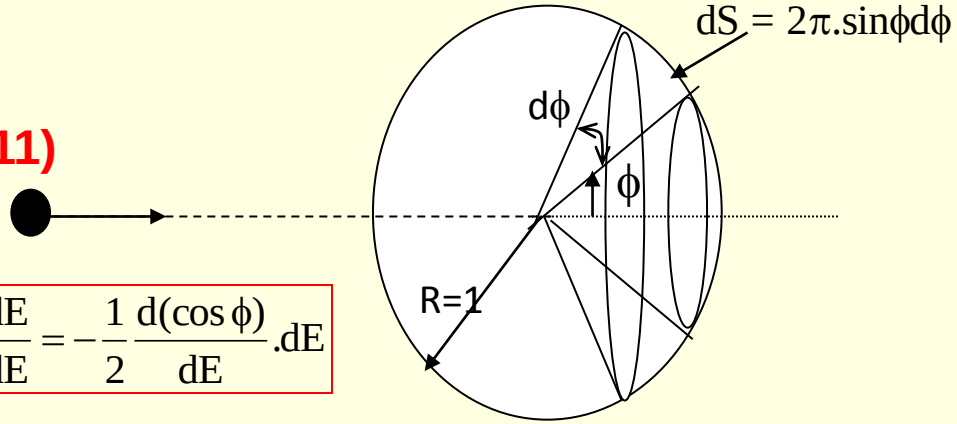
Năng lượng mất cực đại là : $\Delta E_{max} = E_0 - E = (1-\alpha)E_0$

2.4. PHÂN BỐ GÓC VÀ NĂNG LƯỢNG SAU TÁN XẠ

- Khi xét đến một số lớn các neutron va chạm với hạt nhân
- Đại lượng trung bình hoặc phân bố xác suất cần xem xét
- Trong hệ CM, tán xạ neutron là đẳng hướng (E < 10 MeV)

Xác suất neutron tán xạ vào một góc:

$$P(E)dE = \frac{\text{So hat tan xa giua } \phi \text{ va } d\phi}{\text{Tong so hat toi}} \quad \textbf{(2.11)}$$



hay

$$P(E)dE = \frac{dS}{S} = \frac{2\pi \sin\phi d\phi}{4\pi.1^2} = -\frac{d(\cos\phi)}{2}.\frac{dE}{dE} = -\frac{1}{2}\frac{d(\cos\phi)}{dE}.dE \quad \textbf{(2.12)}$$

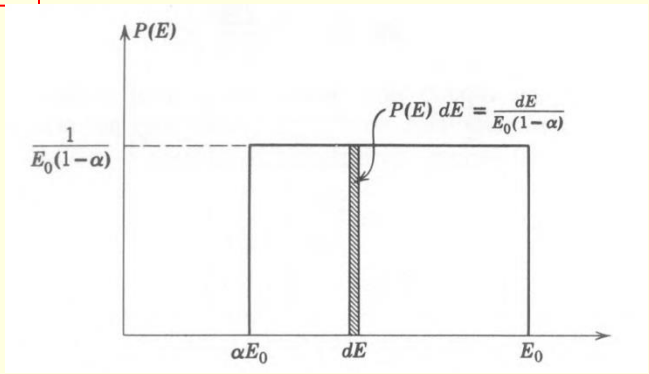
2.4. PHÂN BỐ GÓC VÀ NĂNG LƯỢNG SAU TÁN XẠ

do $$E = \frac{(1+\alpha)+(1-\alpha)\cos\phi}{2} E_0 \quad (2.13)$$ nên $$\cos\phi = \frac{2}{1-\alpha}\cdot\frac{E}{E_0} - \frac{(1+\alpha)}{(1-\alpha)} \quad (2.14)$$

$$\Rightarrow \frac{d(\cos\phi)}{dE} = \frac{2}{(1-\alpha)E_0}$$ Như vậy $$P(E)dE = -\frac{1}{(1-\alpha)E_0}.dE \quad (2.15)$$

Do dE âm và P(E) dương nên $$P(E) = \frac{1}{(1-\alpha)E_0} \quad (2.16)$$

tất cả các giá trị năng lượng nhận được sau một va chạm đều có xác suất như nhau.



2.4. PHÂN BỐ GÓC VÀ NĂNG LƯỢNG SAU TÁN XẠ

- **Năng lượng trung bình của neutron sau một va chạm**

$$\overline{E} = \frac{\int_{\alpha E_0}^{E_0} EP(E)dE}{\int_{\alpha E_0}^{E_0} P(E)dE}$$

hay

$$\overline{E} = \int_{\alpha E_0}^{E_0} E \frac{dE}{E_0(1-\alpha)} = \frac{1}{2}E_0(1+\alpha) \qquad (2.17)$$

- **% Năng lượng mất mát trung bình của neutron sau một va chạm**

$$\overline{\left(\frac{E_0 - E}{E_0}\right)} = \frac{\int_{\alpha E_0}^{E_0} \frac{E_0 - E}{E_0} P(E)dE}{\int_{\alpha E_0}^{E_0} P(E)dE} = \int_{\alpha E_0}^{E_0} \left(1 - \frac{E}{E_0}\right) P(E)dE = 1 - \int_{\alpha E_0}^{E_0} \left(\frac{1}{E_0}\right) EP(E)dE$$

hay

$$\overline{\left(\frac{\Delta E}{E_0}\right)} = \frac{1-\alpha}{2} \qquad (2.18)$$

2.4. PHÂN BỐ GÓC VÀ NĂNG LƯỢNG SAU TÁN XẠ

Ví dụ 2.2: Một neutron có năng lượng 50 keV va chạm với hạt nhân C^{12} đứng yên. Tính:

1) Năng lượng nhỏ nhất của neutron sau va chạm
2) Năng lượng trung bình của neutron sau va chạm
3) Năng lượng mất mát trung bình của neutron trong va chạm
4) Xác suất mà neutron sau va chạm có năng lượng: 10 keV; 20 keV, 40 keV và 60 keV

2.5. TÁN XẠ HƯỚNG TỚI TRONG HỆ L (Cosin trung bình của góc tán xạ)

- Trong hệ CM, cosin trung bình của góc tán xạ = 0
- Trong hệ L, neutron có khuynh hướng tán xạ hướng tới

Thật vậy,

$$\overline{\cos\theta} = \bar{\mu} = \frac{\int_0^{4\pi} \cos\theta \, d\Omega}{\int_0^{4\pi} d\Omega} \qquad (2.19)$$

$$d\Omega = 2\pi \sin\phi \, d\phi$$

Dễ dàng tìm được:

$$\overline{\cos\theta} = \bar{\mu} = \frac{1}{2}\int_{-1}^{1} \frac{(1 + A\cos\phi)}{(1 + A^2 + 2A\cos\phi)^{1/2}} d(\cos\phi) = \frac{2}{3A} \qquad (2.20)$$

Chỉ phụ thuộc số khối A

Với A >> 1 thì $\overline{\cos\theta} = \bar{\mu} = 0$

Tán xạ đẳng hướng

Đối với hỗn hợp:

$$\left(\overline{\cos\theta}\right)_{mix} = \frac{\sum_i \left(\Sigma_s \overline{\cos\theta}\right)_i}{\sum_i \left(\Sigma_{si}\right)} \qquad (2.21)$$

2.5. TÁN XẠ HƯỚNG TỚI TRONG HỆ L (Cosin trung bình của góc tán xạ)

Ví dụ 2.3: Tính cosin trung bình của góc tán xạ trong hệ L đối với neutron năng lượng 0,0253 eV trong chất làm chậm:

1) Graphit

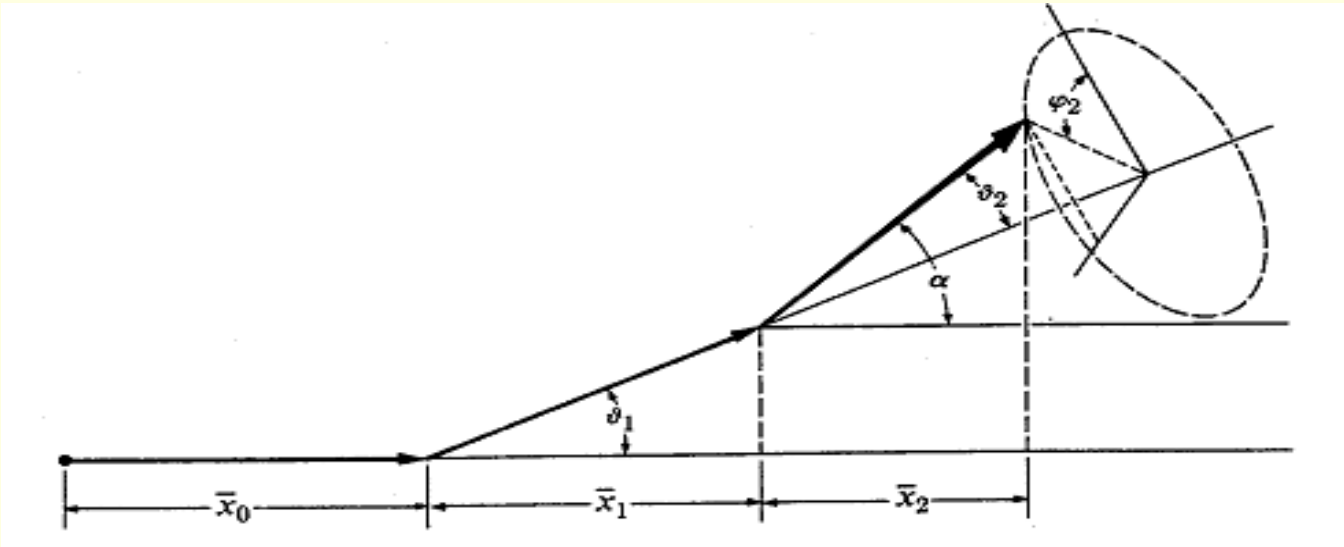
2) nước thường (H_2O)

3) BeO

Biết: $\rho(H_2O) = 1 g/cm^3$; $\rho(BeO) = 2,7\ g/cm^3$

2.6. QUÃNG ĐƯỜNG VẬN CHUYỂN TỰ DO TRUNG BÌNH

Sự ảnh hưởng của phân bố góc tán xạ lên sự chuyển động của neutron trong môi trường tán xạ có thể thực hiện bằng cách dùng tiết diện vận chuyển



2.6. QUÃNG ĐƯỜNG VẬN CHUYỂN TỰ DO TRUNG BÌNH

Sau một chuỗi va chạm neutron thực hiện được 1 quãng đường

$$\bar{x}_0 + \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + ... + \bar{x}_n = \lambda_s + \lambda_s\bar{\mu} + \lambda_s\bar{\mu}^2 + ... + \lambda_s\bar{\mu}^n = \frac{\lambda_s}{1-\bar{\mu}} \quad \textbf{(2.22)}$$

Quãng đường vận chuyển tự do trung bình: $\lambda_{tr} = \dfrac{\lambda_s}{1-\bar{\mu}}$ **(2.23)**

Tiết diện vận chuyển vĩ mô: $\Sigma_{tr} = \Sigma_s(1-\bar{\mu})$ **(2.24)**

Nếu có sự hấp thụ trong môi trường (tán xạ bất đẳng hướng) thì:

$$\Sigma_{tr} = \Sigma_a + \Sigma_s(1-\bar{\mu}) \quad \textbf{(2.25)}$$

2.6. QUÃNG ĐƯỜNG VẬN CHUYỂN TỰ DO TRUNG BÌNH

Ví dụ 2.4: Tính quãng đường vận chuyển tự do trung bình của neutron nhiệt trong khí hydro (ở điều kiện tiêu chuẩn). Biết σ_{sH} = 20 barn.

Ví dụ 2.5: Tính quãng đường vận chuyển tự do trung bình của neutron nhiệt trong BeO. Biết tiết ρ(BeO) = 2,7 g/cm^3; σ_s(Be) = 7 barn, σ_s(O) = 4,2 barn

2.7. ĐỘ GIẢM LOGARIT NĂNG LƯỢNG TRUNG BÌNH

$\Delta E/E$: không phụ thuộc vào năng lượng neutron trước khi va chạm.

$\Delta E/E \approx \Delta(\mathrm{Ln}E)$, nên dùng biến là LnE sẽ thuận lợi hơn.

- Lethargy, u:

$$du = -\frac{dE}{E} = -d(\mathrm{Ln}E) \Rightarrow u = -\int_{E_0}^{E} d(\mathrm{Ln}E) = \mathrm{Ln}\left(\frac{E_0}{E}\right) = \mathrm{Ln}(E_0) - \mathrm{Ln}(E) \quad (2.26)$$

- **Độ giảm logarit năng lượng trung bình trên mỗi va chạm**

$$\xi = \overline{\mathrm{Ln}\left(\frac{E_0}{E}\right)} \quad \text{hay} \quad \xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A}\mathrm{Ln}\frac{A-1}{A+1} \quad (2.27)$$

- Đối với A > 10, ξ gần bằng $\xi = \frac{2}{A + 2/3}$ (2.28)

2.7. ĐỘ GIẢM LOGARIT NĂNG LƯỢNG TRUNG BÌNH

- Số va chạm cần thiết để neutron có năng lượng đầu E_0 giảm tới năng lượng cuối $\tilde{E}_t$

$$n = \frac{LnE_0 - Ln\tilde{E}_t}{\xi} = \frac{1}{\xi} Ln\left(\frac{E_0}{\tilde{E}_t}\right) \qquad (2.29)$$

- Nếu chất làm chậm là hợp chất thì

$$n = \frac{1}{\bar{\xi}} Ln\left(\frac{E_0}{\tilde{E}_t}\right) \qquad (2.30)$$

Với

$$\bar{\xi} = \frac{\xi_1\Sigma_s^{(1)} + \xi_2\Sigma_s^{(2)} + ... + \xi_n\Sigma_s^{(n)}}{\Sigma_s^{(1)} + \Sigma_s^{(2)} + ... + \Sigma_s^{(n)}} \qquad (2.31)$$

Ví dụ 2.6: Tính số va chạm cần thiết để làm chậm neutron từ năng lượng 10 keV đến năng lượng 10 eV, trong môi trường:

1) Graphit
2) Nước nặng (D_2O)
3) Nước thường (H_2O)

Biết: σ_{sH} = 20 b; σ_{sD} = 3,4 b; σ_{sO} = 3,8 b

2.8. KHẢ NĂNG VÀ HỆ SỐ LÀM CHẬM

Hiệu quả của chất làm chậm thể hiện qua ξ, σ_s và N_0

- **Khả năng làm chậm**

$$SDP = \xi N_0 \sigma_s = \xi \Sigma_s = \frac{\xi}{\lambda_s} \qquad (2.32)$$

Hỗn hợp ⇨

$$SDP = \xi_1 \Sigma_s^{(1)} + \xi_2 \Sigma_s^{(2)} + ... + \xi_n \Sigma_s^{(n)} \qquad (2.33)$$

Tuy nhiên, nếu chất làm chậm có tiết diện hấp thụ đáng kể thì SDP không còn hiệu quả nữa

- **Hệ số làm chậm**

$$MR = \frac{SDP}{\Sigma_a} = \xi \frac{\Sigma_s}{\Sigma_a} \qquad (2.34)$$

Hỗn hợp ⇨

$$MR = \frac{\xi_1 \Sigma_s^{(1)} + \xi_2 \Sigma_s^{(2)} + ... + \xi_n \Sigma_s^{(n)}}{\Sigma_a^{(1)} + \Sigma_a^{(2)} + ... + \Sigma_a^{(n)}} \qquad (2.35)$$

2.8. KHẢ NĂNG VÀ HỆ SỐ LÀM CHẬM

Ví dụ 2.8:

Vật liệu	ξ	Σ_s (cm^{-1})	Σ_a (cm^{-1})	SDP	MR
H_2O	0,92	3,45	$2,2.10^{-2}$		
D_2O	0,51	0,45	$3,3.10^{-5}$		
BeO	0,173	0,50	$7,3.10^{-4}$		
B	0,171	0,35	103		
C	0,158	0,385	$3,2.10^{-4}$		
Al	0,072	0,084	$1,5.10^{-2}$		

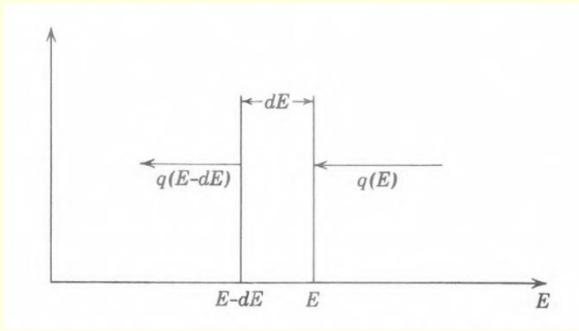
2.9. MẬT ĐỘ LÀM CHẬM

Tốc độ mà số neutron trong mỗi đơn vị thể tích chất làm chậm được làm chậm xuyên qua một năng lượng E cho trước được gọi là ***mật độ làm chậm***, kí hiệu: q(E) (n.cm^{-3}.s^{-1})

Trường hợp 1: $\Sigma_a = 0$

$$q(E) = Q = \text{const.}$$

$$-q(E)\Delta t = n(E)\Delta E$$



Số neutron ra khỏi ΔE

Số neutron vào ΔE

Mật độ neutron $q(E) = [n(E)\Delta E][v\Sigma_s]$ → Số va chạm mỗi giây

2.9. MẬT ĐỘ LÀM CHẬM

vì $\frac{\Delta E}{E} = \Delta(\mathrm{Ln}E) = \xi$ nên $q(E) = n(E)E\xi v\Sigma_s = \phi(E)E\xi\Sigma_s$

Vậy: $\phi(E) = \frac{Q}{E\xi\Sigma_s}$ **(2.36)**

Thông lượng neutron trong mỗi đơn vị năng lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}.eV^{-1}$)

Đại lượng $\phi(E)\Sigma_s\Delta E = \frac{Q}{E\xi}\Delta E$ **(2.37)**

Cho biết số neutron có năng lượng trong khoảng ΔE (mỗi cm^3) chịu sự va chạm với hạt nhân chất làm chậm và bị tán xạ ra khỏi vùng năng lượng đó trong mỗi giây.

2.9. MẬT ĐỘ LÀM CHẬM

Ví dụ 2.9: (a) Tính mật độ làm chậm neutron tại năng lượng 1 eV trong môi trường khí hydro vô hạn (ở điều kiện tiêu chuẩn). Biết rằng nguồn neutron tạo ra với tôc độ 10^4 n.cm^{-3}.s^{-1} tại năng lượng 100 keV
(b) Tính thông lượng neutron tại 10 eV

Đối với hydro: σ_s = 20 barn

Ví dụ 2.10: Tính thông lượng neutron tại năng lượng 1 ev trong chất làm chậm vô hạn:
a) H_2O b) D_2O
Biết rằng nguồn neutron sinh ra phân bố đều với năng lượng 2 MeV và với tốc độ 10^4 n.cm^{-3}.s^{-1}

$\sigma_{s,H}$ = 20 barn; $\sigma_{s,D}$ = 3,4 barn; $\sigma_{s,O}$ = 3,8 barn

2.10. XÁC SUẤT THOÁT CỘNG HƯỞNG

- Trường hợp 2: $\Sigma_a \neq 0$ thì q ≠ Q

- Mất mát do hấp thụ = $\Delta q = n(E)\Delta E\, v\Sigma_a = \phi(E)\Delta E\Sigma_a$ **(2.38)**

- Khi đó: $q(E) = Qp(E)$ ⇒ Xác suất thoát khỏi sự hấp thụ ⇒ Xác suất thoát cộng hưởng

Ở TRẠNG THÁI ỔN ĐỊNH

⇓

Mất mát do tán xạ + mất mát do hấp thụ = dòng neutron đi vào

⇓

$$\phi(E)\Sigma_s\Delta E + \phi(E)\Sigma_a\Delta E = \frac{q(E)}{\xi E}\Delta E \qquad \textbf{(2.39)}$$

2.10. XÁC SUẤT THOÁT CỘNG HƯỞNG

- Xác suất neutron bị hấp thụ trong ΔE

$$\frac{\phi(E)\Sigma_a \Delta E}{\phi(E)\Sigma_s \Delta E + \phi(E)\Sigma_a \Delta E} = \frac{\Delta q E \xi}{q(E)\Delta E} \qquad (2.40)$$

Hay $$\frac{\Sigma_a}{\Sigma_s + \Sigma_a}\frac{\Delta E}{E\xi} = \frac{\Delta q}{q(E)}$$ ⇒ Xác suất neutron bị hấp thụ trong ΔE

- Xác suất neutron bị hấp thụ trong E_0 đến E

$$\int_E^{E_0} \frac{\Sigma_a}{\Sigma_s + \Sigma_a}\frac{\Delta(LnE)}{\xi} = Ln\frac{q(E_0)}{q(E)} = P_a \qquad (2.41)$$

- Xác suất thoát cộng hưởng:

$$p(E) = \exp(-P_a) = 1 - P_a \qquad (2.42)$$

2.10. XÁC SUẤT THOÁT CỘNG HƯỞNG

Ví dụ 2.11: Tính xác suất thoát cộng hưởng tại năng lượng 1eV đối với neutron phát ra tại 100 keV trong hỗn hợp hydro và chất hấp thụ "1/v" có tiết diện hấp thụ vi mô là 760 barn tại năng lượng 0,0253 eV. Hỗn hợp chứa 100 nguyên tử hydro trong mỗi nguyên tử chất hấp thụ. Bỏ qua tiết diện tán xạ của chất hấp thụ.

2.11. TÍCH PHÂN CỘNG HƯỞNG HIỆU DỤNG

- Xác suất neutron bị hấp thụ

$$P_a = \int_E^{E_0} \frac{\Sigma_a}{\Sigma_s + \Sigma_a} \frac{d(LnE)}{\xi} = \frac{1}{\xi\Sigma_s} \int_E^{E_0} \frac{\Sigma_a}{1 + \Sigma_a / \Sigma_s} \frac{dE}{E} = \frac{N_a}{\xi\Sigma_s} \int_E^{E_0} \frac{\sigma_a}{1 + N_a\sigma_a / \Sigma_s} \frac{dE}{E} \quad (2.43)$$

- Xác suất thoát cộng hưởng

$$p = \exp\left[-\frac{N_a}{\xi\Sigma_s} \int_E^{E_0} \frac{\sigma_a}{1 + N_a\sigma_a / \Sigma_s} \frac{dE}{E} \right] \quad (2.44)$$

- Tích phân cộng hưởng hiệu dụng

$$I_{eff} = \int_E^{E_0} \frac{\sigma_a}{1 + N_a\sigma_a / \Sigma_s} \frac{dE}{E} \equiv \int_E^{E_0} (\sigma_a)_{eff} \frac{dE}{E} \quad (2.45)$$

Với $\frac{\sigma_a}{1 + N_0\sigma_a / \Sigma_s} \equiv (\sigma_a)_{eff}$ (2.46) ⇒ Tiết diện hiệu dụng

2.11. TÍCH PHÂN CỘNG HƯỞNG HIỆU DỤNG

Ví dụ 2.12: (a) Xét một nhiên liệu X trộn với graphit theo tỉ lệ cứ 100 nguyên tử graphit thì có 1 nguyên tử X. Tích phân cộng hưởng hiệu dụng đối với X là 6 barn. Tính xác suất thoát cộng hưởng p.

Biết rằng: $\xi_C = 0{,}158$; $\xi_X = 0$

$\sigma_s = 4{,}8$ barn đối với C

$\sigma_s = 5{,}2$ barn đối với X

(b) Nếu xác suất thoát cộng hưởng tăng 1% thì tích phân cộng hưởng phải thay đổi như thế nào?

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HCM
TRƯỜNG ĐH KHOA HỌC TỰ NHIÊN

PHẦN: VẬT LÝ NEUTRON

HUỲNH TRÚC PHƯƠNG
Email: htphuong.oarai@gmail.com

CHƯƠNG 3
LÝ THUYẾT KHUẾCH TÁN NEUTRON

3.1. THÔNG LƯỢNG VÀ VECTOR MẬT ĐỘ DÒNG NEUTRON

3.2. CÂN BẰNG NEUTRON TRONG MÔI TRƯỜNG

3.3. PHƯƠNG TRÌNH LIÊN TỤC

3.4. ĐỊNH LUẬT FICK – SỰ KHUẾCH TÁN GẦN ĐÚNG

3.5. PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

3.6. CÁC ĐIỀU KIỆN GIẢI PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

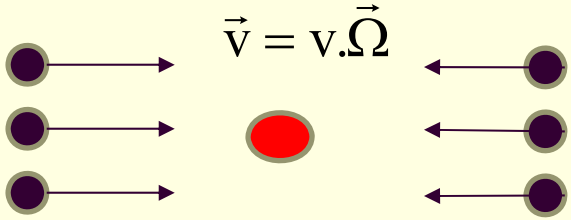
3.7. ỨNG DỤNG CHO CÁC TRƯỜNG HỢP ĐƠN GIẢN

3.8. CHIỀU DÀI KHUẾCH TÁN

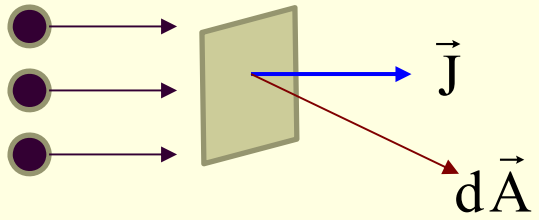
3.9. CÁC VÍ DỤ ỨNG DỤNG

3.10. KHUẾCH TÁN VỚI NEUTRON NHIỆT

3.1. THÔNG LƯỢNG VÀ VECTOR MẬT ĐỘ DÒNG NEUTRON



$$E = \frac{mv^2}{2}$$



Thông lượng neutron

$$\phi(r,E) = \sum_i v.n(\vec{r},\vec{\Omega}_i,E) = \int_{4\pi} v.n(\vec{r},\vec{\Omega},E)d\vec{\Omega}$$

Tốc độ phản ứng

$$R_x = \Sigma_x \phi$$

Mật độ dòng neutron

$$\vec{J}(\vec{r},E) = \sum_i \vec{v}_i.n(\vec{r},\vec{\Omega}_i,E) = \int_{4\pi} \vec{v}.n(\vec{r},\vec{\Omega},E)d\vec{\Omega}$$

Số neutron xuyên qua diện tích dA trong 1s

$$dn = \vec{J}.d\vec{A}$$

3.2. CÂN BẰNG NEUTRON TRONG MÔI TRƯỜNG

Tốc độ thay đổi số neutron trong V = Tốc độ sinh ra neutron trong V - Tốc độ hấp thụ neutron trong V - Tốc độ rò neutron ra khỏi V

Tốc độ thay đổi số neutron trong V $= \frac{d}{dt}\int_V n(\vec{r},E,t)dV = \int_V \frac{\partial n(\vec{r},E,t)}{\partial t}dV$ (3.1)

Tốc độ sinh ra neutron trong V $= \int_V S_{tot}dV$ (3.2)

Tốc độ hấp thụ neutron trong V $= \int_V \Sigma_a \phi dV$ (3.3)

Tốc độ rò neutron ra khỏi V $= \int_A \vec{J}.d\vec{A} = \int_V \nabla\vec{J}.dV$ (3.4)

3.3. PHƯƠNG TRÌNH LIÊN TỤC

$$\int_V \left(\frac{\partial n}{\partial t} - s_{tot} + \Sigma_a \phi + \nabla \vec{J} \right) dV = 0 \qquad (3.5)$$

Hay

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} = s + \nu \Sigma_f \phi - \Sigma_a \phi - \nabla \vec{J} \qquad (3.6)$$

Cường độ nguồn

Tốc độ phân hạch

Có 2 ẩn số chưa biết là ϕ và J

Cần tìm mối liên hệ giữa ϕ và J

ĐỊNH LUẬT FICK

3.4. ĐỊNH LUẬT FICK – SỰ KHUẾCH TÁN GẦN ĐÚNG

Mối liên hệ giữa ϕ và J thông qua định luật dùng cho hiện tượng khuếch tán trong chất khí và chất lỏng.

ĐỊNH LUẬT FICK

- Trong hóa lý, định luật Fick phát biểu:

  "Nếu nồng độ của chất tan trong một vùng nào đó lớn hơn nồng độ chất tan trong vùng khác của một dung dịch thì chất tan sẽ khuếch tán từ vùng có nồng độ cao đến vùng có nồng độ thấp hơn"

- Dùng định luật này áp dụng cho neutron trong lò phản ứng ta có sự khuếch tán gần đúng, với giả sử:

1. Môi trường vô hạn đồng nhất và đẳng hướng
2. Tán xạ là đẳng hướng trong hệ LAB.
3. Môi trường hấp thụ yếu $\Sigma_a << \Sigma_s$
4. Tất cả neutron có cùng vận tốc v (phép gần đúng 1 vận tốc)
5. Thông lượng biến thiên chậm theo vị trí

3.4. ĐỊNH LUẬT FICK – SỰ KHUẾCH TÁN GẦN ĐÚNG

Tìm vector mật độ dòng neutron tại góc tọa độ như hình vẽ:

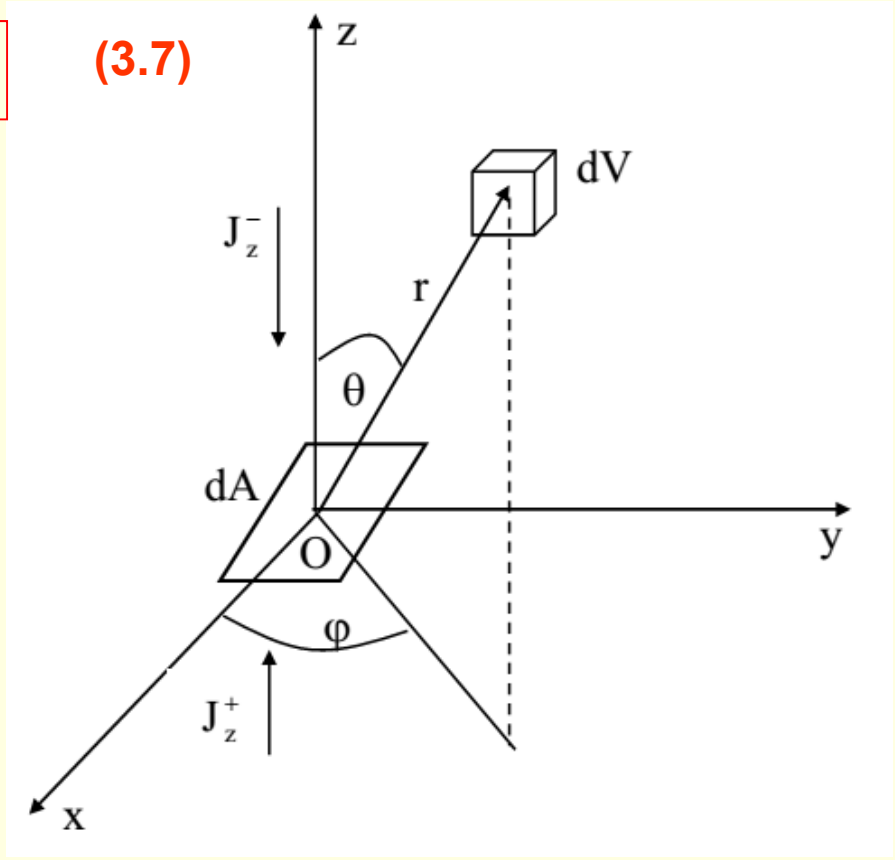
Thật vậy: $$\vec{J}(\vec{r}) = J_x\vec{e}_x + J_y\vec{e}_y + J_z\vec{e}_z \quad (3.7)$$

Trong đó:

$$J_x = J_x^+ - J_x^-$$
$$J_y = J_y^+ - J_y^-$$
$$J_z = J_z^+ - J_z^- \quad (3.8)$$

Dễ dàng tìm được:

$$J_z^- = \frac{\phi_0}{4} + \frac{1}{6\Sigma_s}\frac{\partial\phi}{\partial z}\bigg|_0$$
$$J_z^+ = \frac{\phi_0}{4} - \frac{1}{6\Sigma_s}\frac{\partial\phi}{\partial z}\bigg|_0 \quad (3.9)$$



3.4. ĐỊNH LUẬT FICK – SỰ KHUẾCH TÁN GẦN ĐÚNG

Vậy: $$J_z = J_z^+ - J_z^- = -\frac{1}{3\Sigma_s}\left.\frac{\partial\phi}{\partial z}\right|_0 \quad (3.10)$$

Tương tự: $$J_x = J_x^+ - J_x^- = -\frac{1}{3\Sigma_s}\left.\frac{\partial\phi}{\partial x}\right|_0 \quad (3.11)$$

$$J_y = J_y^+ - J_y^- = -\frac{1}{3\Sigma_s}\left.\frac{\partial\phi}{\partial y}\right|_0$$

$$\vec{J}(\vec{r}) = -\frac{1}{3\Sigma_s}\nabla\phi(r) \quad (3.12)$$

Đặt $$D = \frac{1}{3\Sigma_s} = \frac{\lambda_s}{3} \quad (3.13)$$

Hệ số khuếch tán

Như vậy, định luật Fick đối với khuếch tán neutron là $$\vec{J}(\vec{r}) = -D\nabla\phi(r) \quad (3.14)$$

3.4. ĐỊNH LUẬT FICK – SỰ KHUẾCH TÁN GẦN ĐÚNG

CÁC HẠN CHẾ CỦA ĐỊNH LUẬT FICK

1. Gần sát biên môi trường

2. Gần nguồn neutron

3. Tán xạ bất đẳng hướng trong hệ LAB

4. Môi trường hấp thụ mạnh

5. Gần mặt giao nhau giữa 2 môi trường

Nếu tán xạ bất đẳng hướng thì hệ số khuếch tán D phải sửa chữa theo lý thuyết vận chuyển:

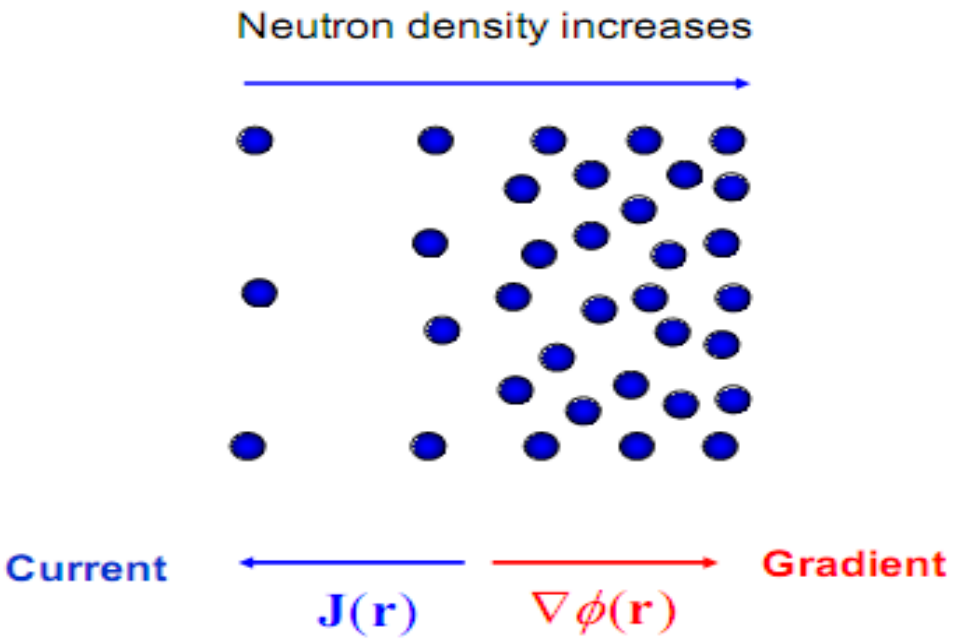
$$D = \frac{1}{3\Sigma_{tr}} = \frac{1}{3(\Sigma_t - \Sigma_s \bar{\mu})} = \frac{1}{3(\Sigma_a + \Sigma_s(1-\bar{\mu}))} \quad (3.15)$$

Nếu $\Sigma_a << \Sigma_s$ thì

$$D = \frac{1}{3\Sigma_s(1-\bar{\mu})} = \frac{1}{3\Sigma_{tr}} = \frac{\lambda_{tr}}{3} \quad (3.16)$$

Interpretation of Fick's Law

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = -D\nabla\phi(\mathbf{r})$$



3.5. PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

Từ phương trình liên tục và định luật Fick dẫn tới phương trình khuếch tán:

$$\frac{1}{v}\frac{\partial\phi(\vec{r},t)}{\partial t} = \nabla\left[D(\vec{r})\nabla\phi(\vec{r},t)\right] - \Sigma_a(\vec{r})\phi(\vec{r},t) + s(\vec{r},t) \qquad (3.17)$$

Nếu môi trường đồng nhất và đẳng hướng thì D và Σ_a không phụ thuộc r

$$\frac{1}{v}\frac{\partial\phi(\vec{r},t)}{\partial t} = \nabla\left[D\nabla\phi(\vec{r},t)\right] - \Sigma_a\phi(\vec{r},t) + s(\vec{r},t) \qquad (3.18)$$

Nếu thông lượng không phụ thuộc thời gian thì

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + s = 0$$

hay

$$\nabla^2\phi - \frac{1}{L^2}\phi = -\frac{s}{D} \qquad (3.19)$$

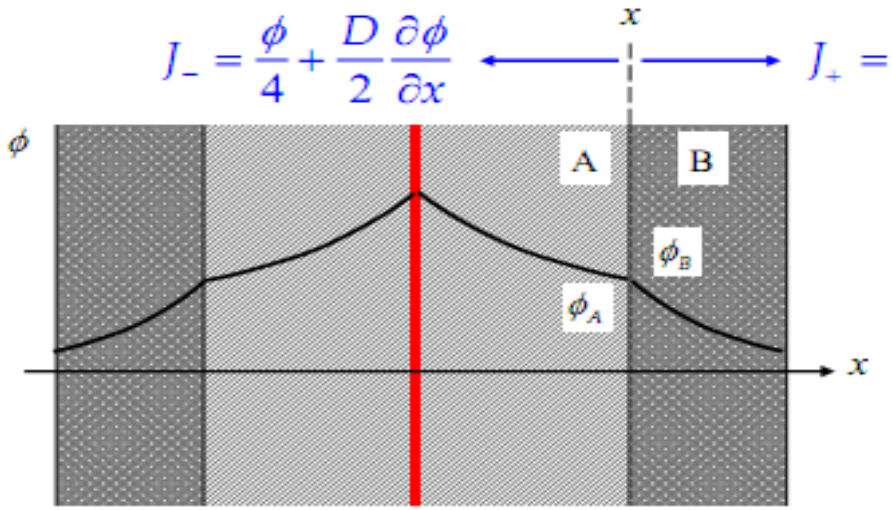
Với $L^2 = \frac{D}{\Sigma_a}$ Diện tích khuếch tán (cm^2)

$L = \sqrt{\frac{D}{\Sigma_a}}$ Chiều dài khuếch tán (cm)

3.6. CÁC ĐIỀU KIỆN GIẢI PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

Interface Conditions

$$J_- = \frac{\phi}{4} + \frac{D}{2}\frac{\partial\phi}{\partial x} \qquad J_+ = \frac{\phi}{4} - \frac{D}{2}\frac{\partial\phi}{\partial x}$$



$$\phi_A \equiv \phi(x-0)$$
$$\phi_B \equiv \phi(x+0)$$

$$J_+(A) = J_+(B) \longrightarrow \frac{\phi_A}{4} - \frac{D_A}{2}\frac{\partial\phi_A}{\partial x} = \frac{\phi_B}{4} - \frac{D_B}{2}\frac{\partial\phi_B}{\partial x}$$

$$J_-(A) = J_-(B) \longrightarrow \frac{\phi_A}{4} + \frac{D_A}{2}\frac{\partial\phi_A}{\partial x} = \frac{\phi_B}{4} + \frac{D_B}{2}\frac{\partial\phi_B}{\partial x}$$

$$\boxed{\begin{aligned} &\phi(x-0) = \phi(x+0) \\ &D_A \left.\frac{\partial\phi}{\partial x}\right|_{x-0} = D_B \left.\frac{\partial\phi}{\partial x}\right|_{x+0} \end{aligned}}$$

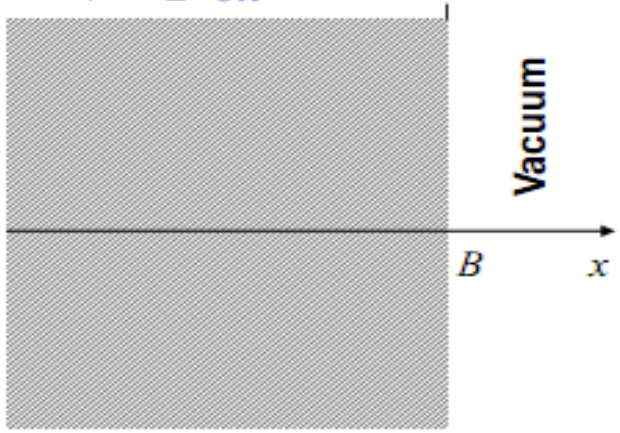
3.6. CÁC ĐIỀU KIỆN GIẢI PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

Boundary Condition

Diffusion theory predicts: $J_- = \frac{\phi}{4} + \frac{D}{2}\frac{\partial\phi}{\partial x}$ $\longleftarrow$ | $\longrightarrow$ $J_+ = \frac{\phi}{4} - \frac{D}{2}\frac{\partial\phi}{\partial x}$

Diffusion theory is not accurate near:

- Sources
- Sinks
- Interfaces
- Boundaries

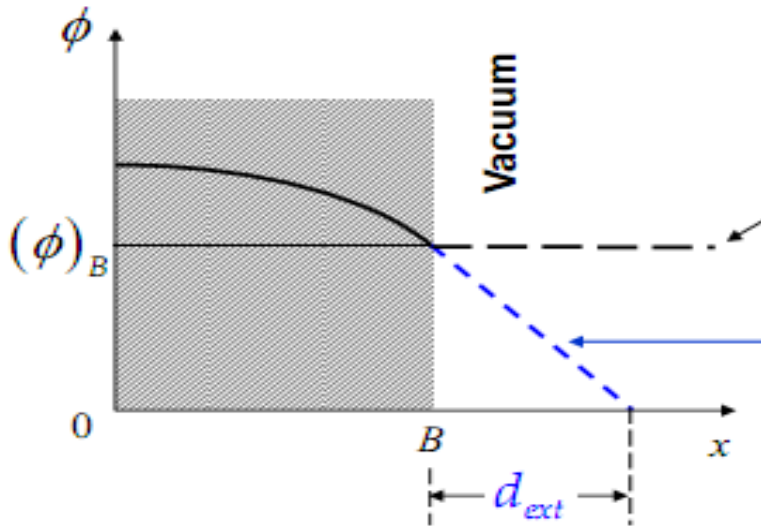


First step: $J_- = \frac{\phi}{4} + \frac{\lambda_{tr}}{6}\frac{\partial\phi}{\partial x} = 0 \qquad \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_B = -\frac{(\phi)_B}{2/3\,\lambda_{tr}}$

3.6. CÁC ĐIỀU KIỆN GIẢI PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

Extrapolated Length

BC: $\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_B = -\frac{(\phi)_B}{2/3\,\lambda_{tr}}$



Neutron flux in reality

Linearly extrapolated flux:

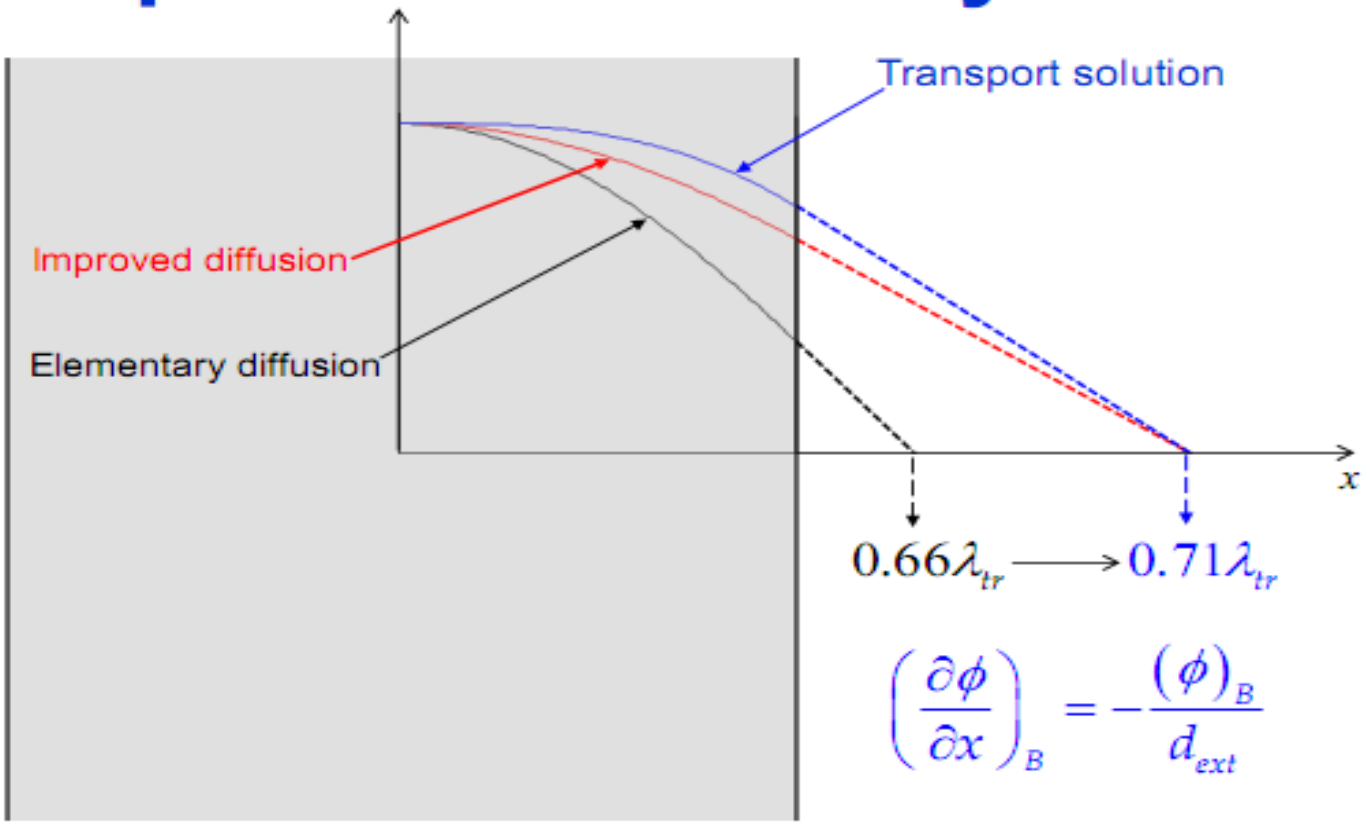
$\phi_{ext}(x) = (\phi)_B - \frac{(\phi)_B}{2/3\,\lambda_{tr}} \cdot x$

Extrapolated length: $d_{ext} = \frac{2}{3}\lambda_{tr} = 0.66\lambda_{tr}$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_B = -\frac{(\phi)_B}{d_{ext}}$$

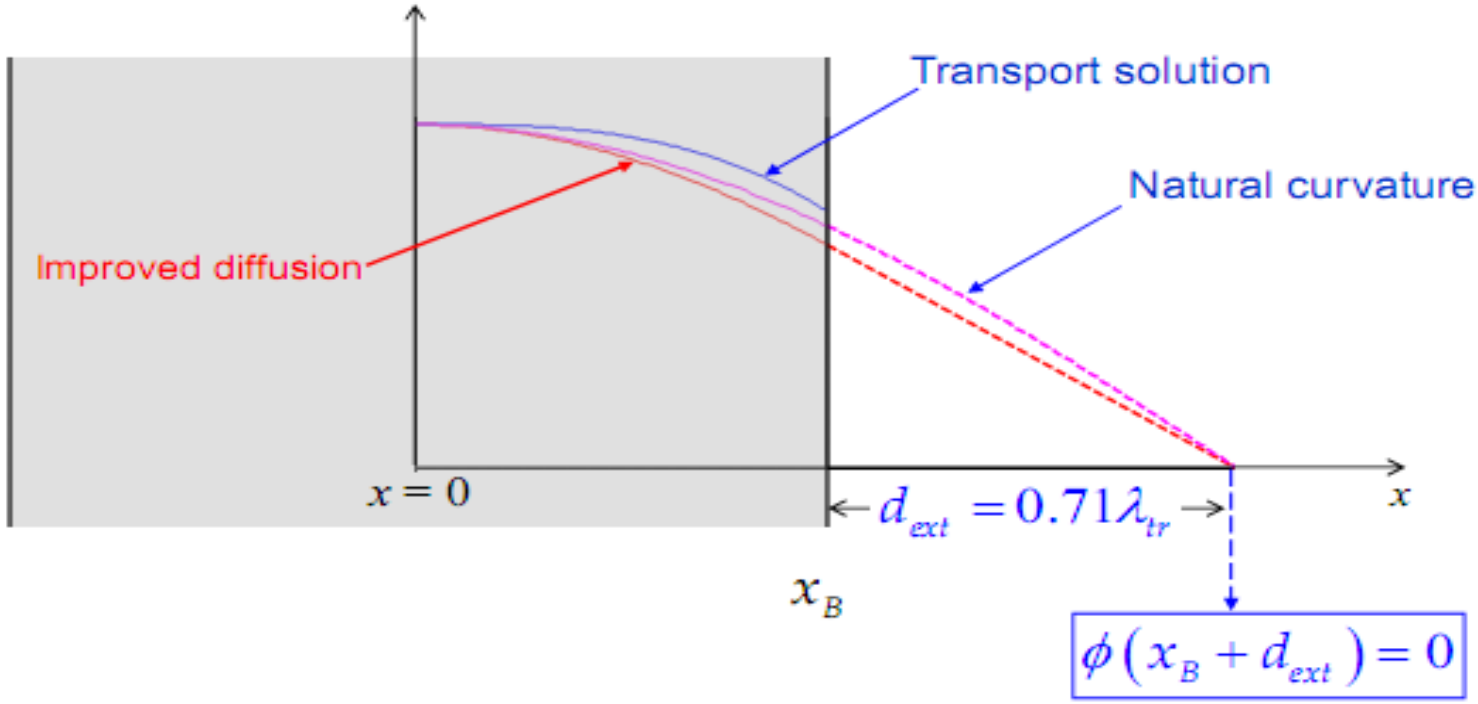
3.6. CÁC ĐIỀU KIỆN GIẢI PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

Improved Boundary Condition



3.6. CÁC ĐIỀU KIỆN GIẢI PHƯƠNG TRÌNH KHUẾCH TÁN

Practical Boundary Condition



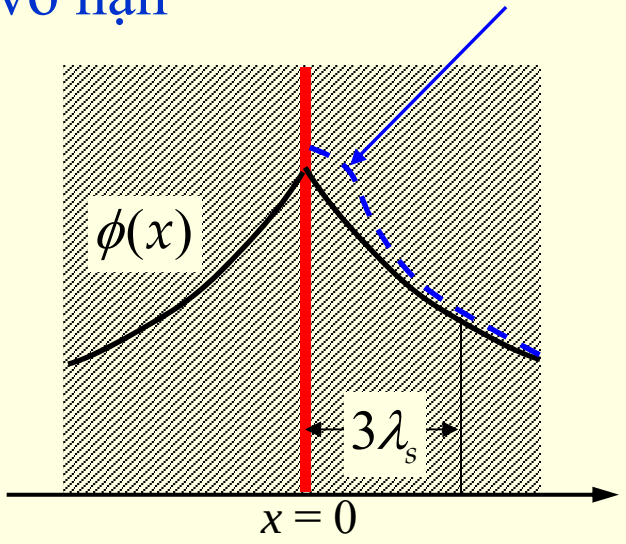
3.7. ỨNG DỤNG CHO CÁC TRƯỜNG HỢP ĐƠN GIẢN

1. Nguồn phẳng vô hạn trong môi trường vô hạn

Transport equation

$$D\frac{d^2\phi}{dx^2}-\Sigma_a\phi(x)+s(x)=0$$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2}-\frac{1}{L^2}\phi(x)=-\frac{s(x)}{D}=-\frac{s_0\delta(x)}{D}$$



$$\frac{d^2\phi}{dx^2}-\frac{1}{L^2}\phi(x)=0\Rightarrow\phi(x)=Ae^{-x/L}+Be^{+x/L}$$

$$\lim_{x\to\infty}\phi(x)=0\Rightarrow B=0$$

$$\lim_{x\to+0}J(x)=\frac{s_0}{2}\Rightarrow A=\frac{s_0L}{2D}$$

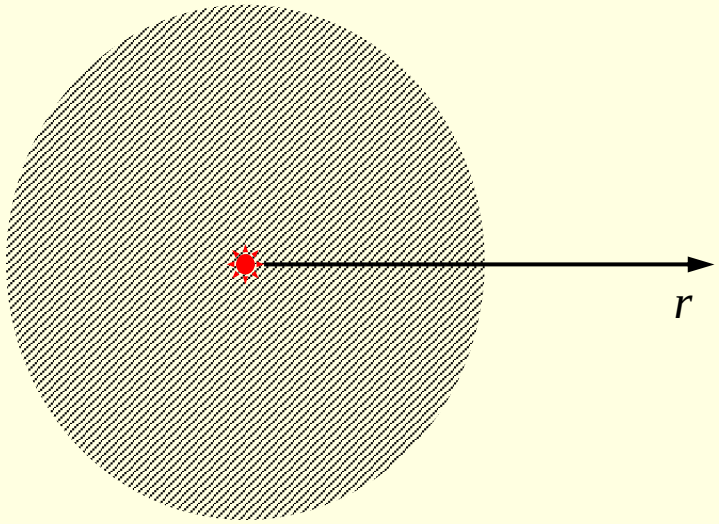
$$\phi(x)=\frac{s_0L}{2D}e^{-|x|/L}\qquad (3.20)$$

3.7. ỨNG DỤNG CHO CÁC TRƯỜNG HỢP ĐƠN GIẢN

2. Nguồn điểm trong môi trường vô hạn

$$D\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}r^2\frac{d\phi}{dr}-\Sigma_a\phi(r)+s(x)=0$$

$$\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}r^2\frac{d\phi}{dr}-\frac{1}{L^2}\phi(r)=0$$



$u = r.\phi$

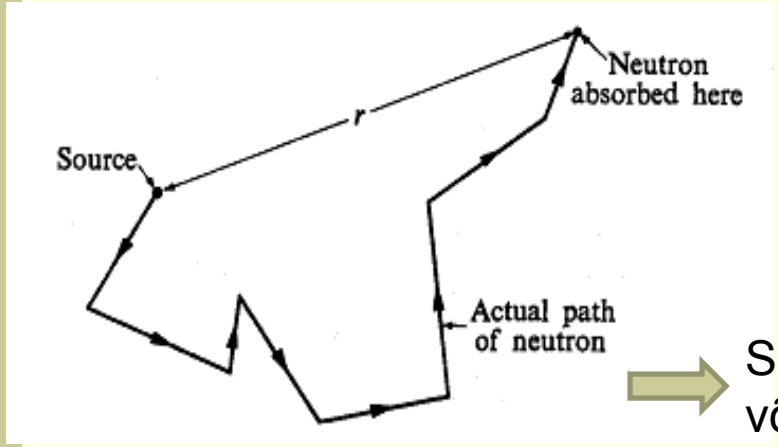
$$\frac{d^2u}{dr^2}-\frac{1}{L^2}u(r)=0\Rightarrow\phi(r)=A\frac{e^{-r/L}}{r}+B\frac{e^{+r/L}}{r}$$

$$\lim_{r\to\infty}\phi(r)\neq\infty\Rightarrow B=0$$

$$\lim_{r\to+0}4\pi r^2J(r)=s_0\Rightarrow A=\frac{s_0}{4\pi D}$$

$$\phi(x)=\frac{s_0}{4\pi Dr}e^{-r/L} \quad (3.21)$$

3.8. CHIỀU DÀI KHUẾCH TÁN



Ta đã biết, thông lượng neutron của nguồn điểm tại khoảng cách r là

$$\phi(r) = \frac{Se^{-r/L}}{4\pi Dr}$$

Số neutron dN bị hấp thụ mỗi giây trong một vỏ cầu thể tích $dV = 4\pi r^2 dr$

$$dN = \Sigma_a \phi(r) dV = \frac{\Sigma_a S}{D} re^{-r/L} dr \quad \textbf{(3.22)}$$

Vì $L^2 = D/\Sigma_a$ nên $$dN = \frac{S}{L^2} re^{-r/L} dr$$

Xác suất mà neutron bị hấp thụ trong dr: $$p(r)dr = \frac{dN}{S} = \frac{1}{L^2} re^{-r/L} dr \quad \textbf{(3.23)}$$

3.8. CHIỀU DÀI KHUẾCH TÁN

Khi đó, trị trung bình của bình phương khoảng cách r (từ lúc sinh ra đến khi bị mất đi) dễ dàng tính được:

$$\overline{r^2} = \frac{1}{L^2}\int_0^\infty r^3 e^{-r/L} dr = 6L^2 \qquad (3.24)$$

Hay, *diện tích khuếch tán* là:

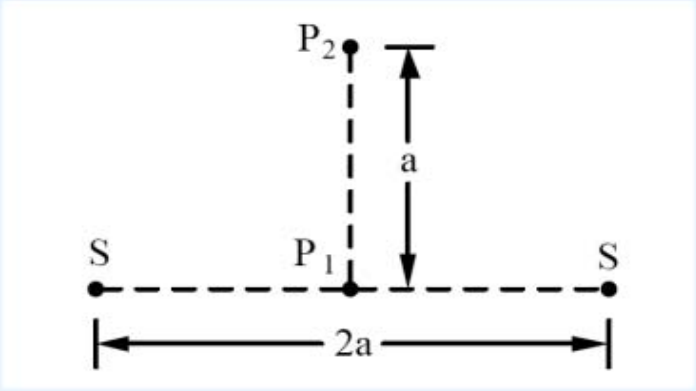
$$L^2 = \frac{1}{6}\overline{r^2} \qquad (3.25)$$

⇒ Chiều dài khuếch tán

$$L = \sqrt{\frac{1}{6}\overline{r^2}} \qquad (3.26)$$

3.9. CÁC VÍ DỤ ỨNG DỤNG

- *Find the expression for the flux and the current at (i) point P_1, (ii) at point P_2, as indicated in the following figure (considering the 2 point sources as each emitting S n/s).*



3.9. CÁC VÍ DỤ ỨNG DỤNG

- *Consider a plate of diffusive material of finite thickness (between $x = 0$ and $x = x_0$. Neutrons, arriving from a uniform planar source, located at $x = 0$, diffuse within the plate. Show that:*

  (a) for the boundary condition $\Phi = 0$ at $x = x_0$,

  $$\Phi(x) = A' \cdot \sinh\left(\frac{(x_0 - x)}{L}\right)$$

  where L is the diffusion length, while

  (b) for the condition $d\Phi/dx = 0$ at $x = x_0$,

  $$\Phi(x) = A' \cdot \cosh\left(\frac{(x_0 - x)}{L}\right)$$

  What is the physical significance of each of the boundary conditions? Which are the parameters which determine A'?

3.9. CÁC VÍ DỤ ỨNG DỤNG

- *The x-variation of the neutron flux in a moderator assembly is given by*

$$\Phi = \Phi_0 \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{a}\right)$$

where $\Phi_0 = 10^4$ *n/cm*^{2}*-s and* $a = 200$ *cm. At the point* $x = 75$ *cm, calculate:*

(a) The neutron current in the positive X-direction

(b) The neutron current in the negative X-direction

(c) The net neutron current and its direction.

The diffusion constant of the medium is 0.80 cm.

3.10. KHUẾCH TÁN VỚI NEUTRON NHIỆT

Theo phân bố Maxwell-Boltzmann, thông lượng neutron phụ thuộc năng lượng:

$$\phi(E) = n(E)v(E) = \frac{2\pi n_0}{(\pi kT)^{3/2}}\left(\frac{2}{m}\right)^{1/2} E.e^{-E/kT} \qquad (3.27)$$

Thông lượng một nhóm nhiệt: $\phi_T = \int_T \phi(E)dE$

hay $$\phi_T = \frac{2\pi n_0}{(\pi kT)^{3/2}}\left(\frac{2}{m}\right)^{1/2}\int_0^\infty Ee^{-E/kT}dE = \frac{2n_0}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \qquad (3.28)$$

vì $\frac{1}{2}mv_T^2 = E_T$ nên $\phi_T = \frac{2}{\sqrt{\pi}}n_0 v_T$ (3.29) với $\phi_0 = n_0 v_0$

Vậy $$\frac{\phi_0}{\phi_T} = \frac{\sqrt{\pi}}{2}\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2} \qquad (3.30)$$

ϕ_T được dùng để thiết kế lò phản ứng, còn ϕ_0 dùng để nghiên cứu tính chất hạt nhân khi dùng lò phản ứng đó.

3.10. KHUẾCH TÁN VỚI NEUTRON NHIỆT

Trong nhóm nhiệt, tiết diện hấp thụ được tính theo giá trị trung bình:

$$\overline{\Sigma}_a = \frac{1}{\phi_T}\int_T \Sigma_a(E)\phi(E)dE$$

với

$$\int_T \Sigma_a(E)\phi(E)dE = g_a(T)\Sigma_a(E_0)\phi_0$$

Vậy

$$\overline{\Sigma}_a = g_a(T)\Sigma_a(E_0)\frac{\phi_0}{\phi_T} = \frac{\sqrt{\pi}}{2}g_a(T)\Sigma_a(E_0)\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}$$

Phương trình khuếch tán cho một nhóm neutron nhiệt:

$$\overline{D}\nabla^2\phi_T - \overline{\Sigma}_a\phi_T = -s_T$$

hay

$$\nabla^2\phi_T - \frac{1}{L_T^2}\phi_T = -\frac{s_T}{\overline{D}} \qquad (3.21)$$

3.10. KHUẾCH TÁN VỚI NEUTRON NHIỆT

Trong đó, $L_T^2 = \frac{\overline{D}}{\overline{\Sigma}_a}$ được gọi là *diện tích khuếch tán nhiệt*; L_T được gọi là *chiều dài khuếch tán nhiệt*.

Lời giải của phương trình khuếch tán một nhóm nhiệt cũng tương tự như trong trường hợp phương trình khuếch tán tổng quát.

BÀI 1: (dành cho các HV có họ Nguyễn, họ Trần, họ Lê)

Nguồn neutron có cường độ 2.10^8 $n.cm^{-3}.s^{-1}$ phân bố đều trong khối graphit cao vô hạn và dày 100 cm. Giả sử neutron tán xạ bất đẳng hướng trong môi trường graphit

a) Tìm thông lượng neutron tại vị trí x = 25 cm tính từ tâm khối graphit.
b) Tìm mật độ dòng neutron tại vị trí x = 25 cm tính từ tâm khối graphit.

Cho: σ_{sC} = 4,75 barn; σ_{aC} = 0,0034 barn; ρ_C = 1,6 g/cm^3

BÀI 2: (dành cho các HV có họ Huỳnh, họ Phan, họ Lý)

Nguồn neutron có cường độ 2.10^8 $n.\ s^{-1}$ phân bố đều trong khối cầu graphit bán kính 100 cm. Giả sử neutron tán xạ bất đẳng hướng trong môi trường graphit

a) Tìm thông lượng neutron tại vị trí r = 25 cm tính từ tâm khối graphit.
b) Tìm mật độ dòng neutron tại vị trí r = 25 cm tính từ tâm khối graphit.

Cho: σ_{sC} = 4,75 barn; σ_{aC} = 0,0034 barn; ρ_C = 1,6 g/cm^3

BÀI 3: (dành cho các HV có họ còn lại)

Nguồn điểm neutron có cường độ 2.10^8 $n.\ s^{-1}$ đặt tại tâm khối cầu graphit bán kính 100 cm. Giả sử neutron tán xạ bất đẳng hướng trong môi trường graphit

a) Tìm thông lượng neutron tại vị trí r = 25 cm tính từ tâm khối graphit.
b) Tìm mật độ dòng neutron tại vị trí r = 25 cm tính từ tâm khối graphit.

Cho: σ_{sC} = 4,75 barn; σ_{aC} = 0,0034 barn; ρ_C = 1,6 g/cm^3

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN
BỘ MÔN VLHN - KTHN

LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

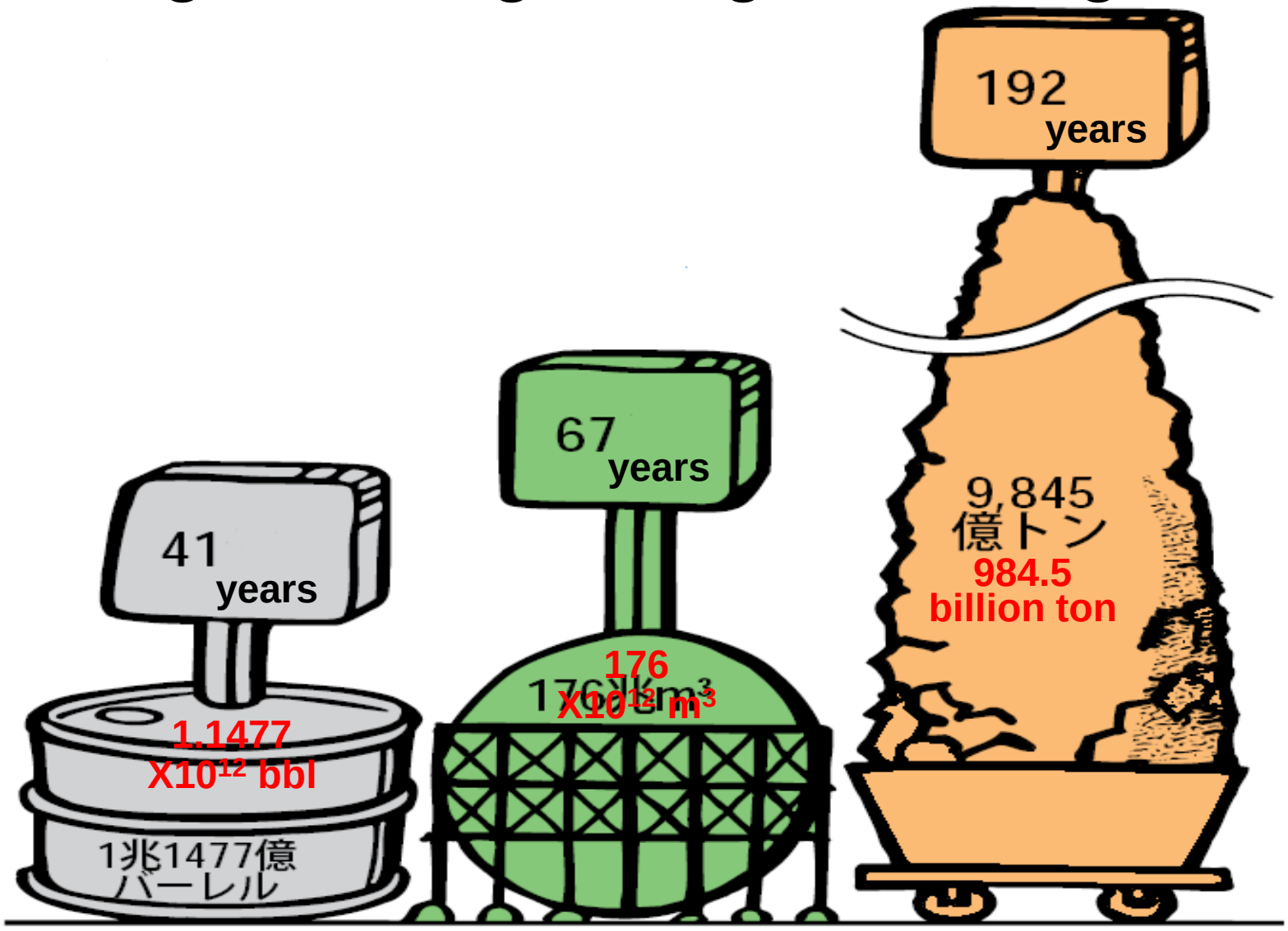
CBPT: **Trần Thiện Thanh**
ĐT : 09 08 57 58 51
Email: ttthanh@hcmus.edu.vn

TpHCM, 4-2017

CHƯƠNG 6

PHẢN ỨNG HẠT NHÂN DÂY CHUYỀN

Nguồn năng lượng trên thế giới



Dầu mỏ **Khí tự nhiên** **Than đá**

Nhiên liệu hạt nhân

Vật liệu phân hạch:

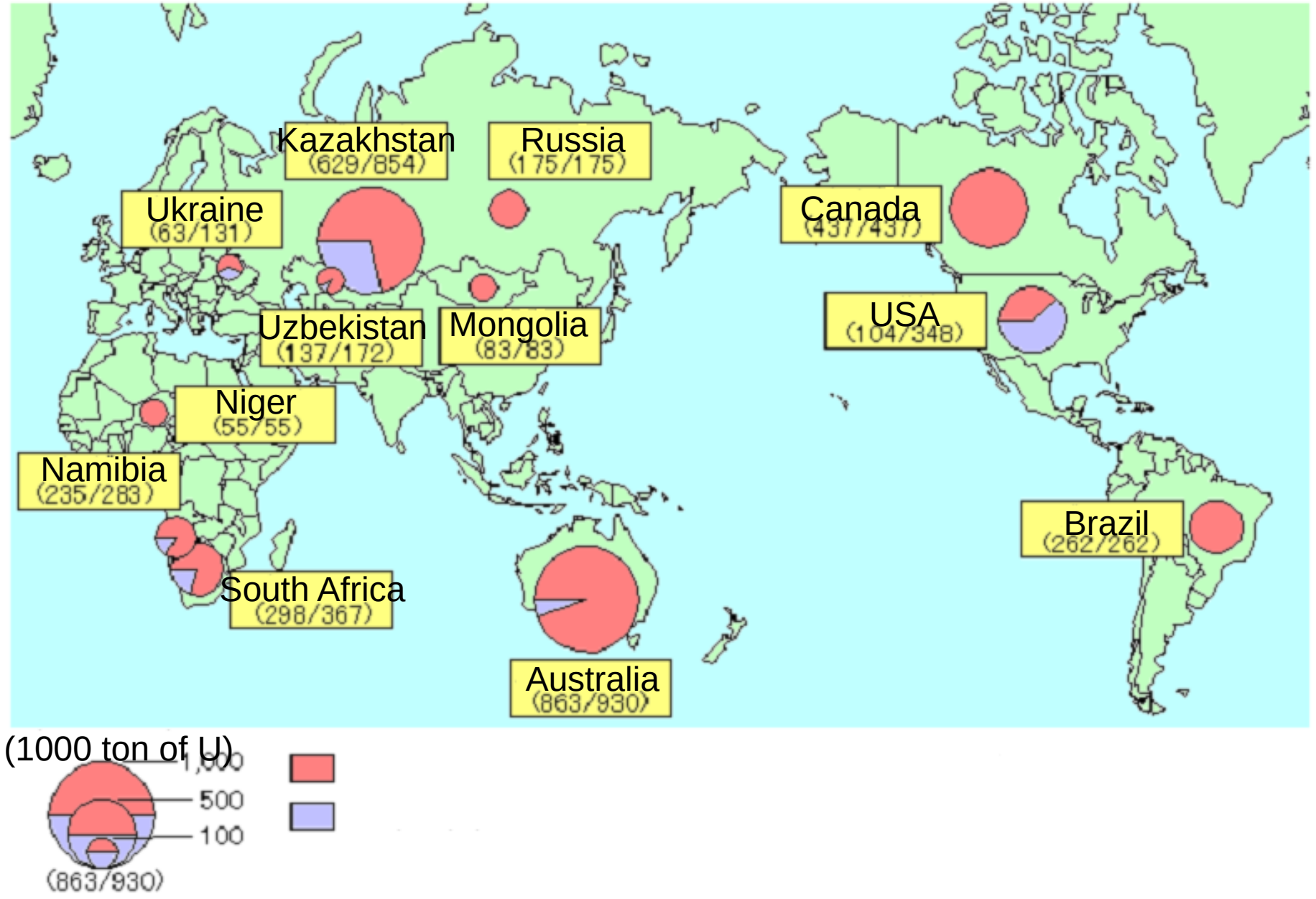
^{235}U: 0.7% Uran tự nhiên

^{239}Pu: được sinh ra do quá trình hấp thụ neutron của ^{238}U.

$$^{238}U + {}^{1}n \rightarrow {}^{239}U \rightarrow {}^{239}Np + e^{-} \rightarrow {}^{239}Pu + e^{-}$$

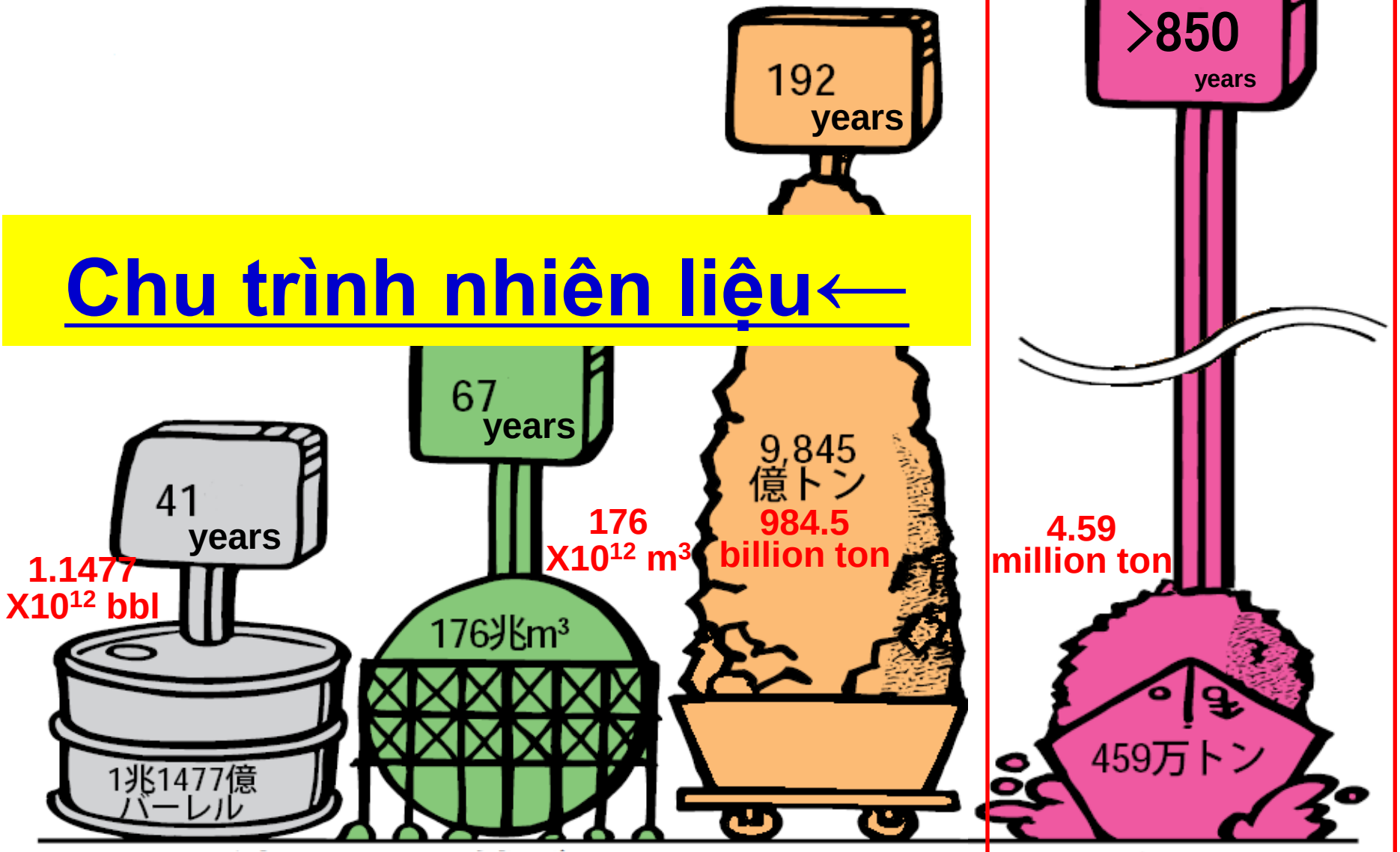
^{233}U: được sinh ra do quá trình hấp thụ neutron của ^{232}Th.

$$^{232}Th + {}^{1}n \rightarrow {}^{233}Th \rightarrow {}^{233}Pa + e^{-} \rightarrow {}^{233}U + e^{-}$$



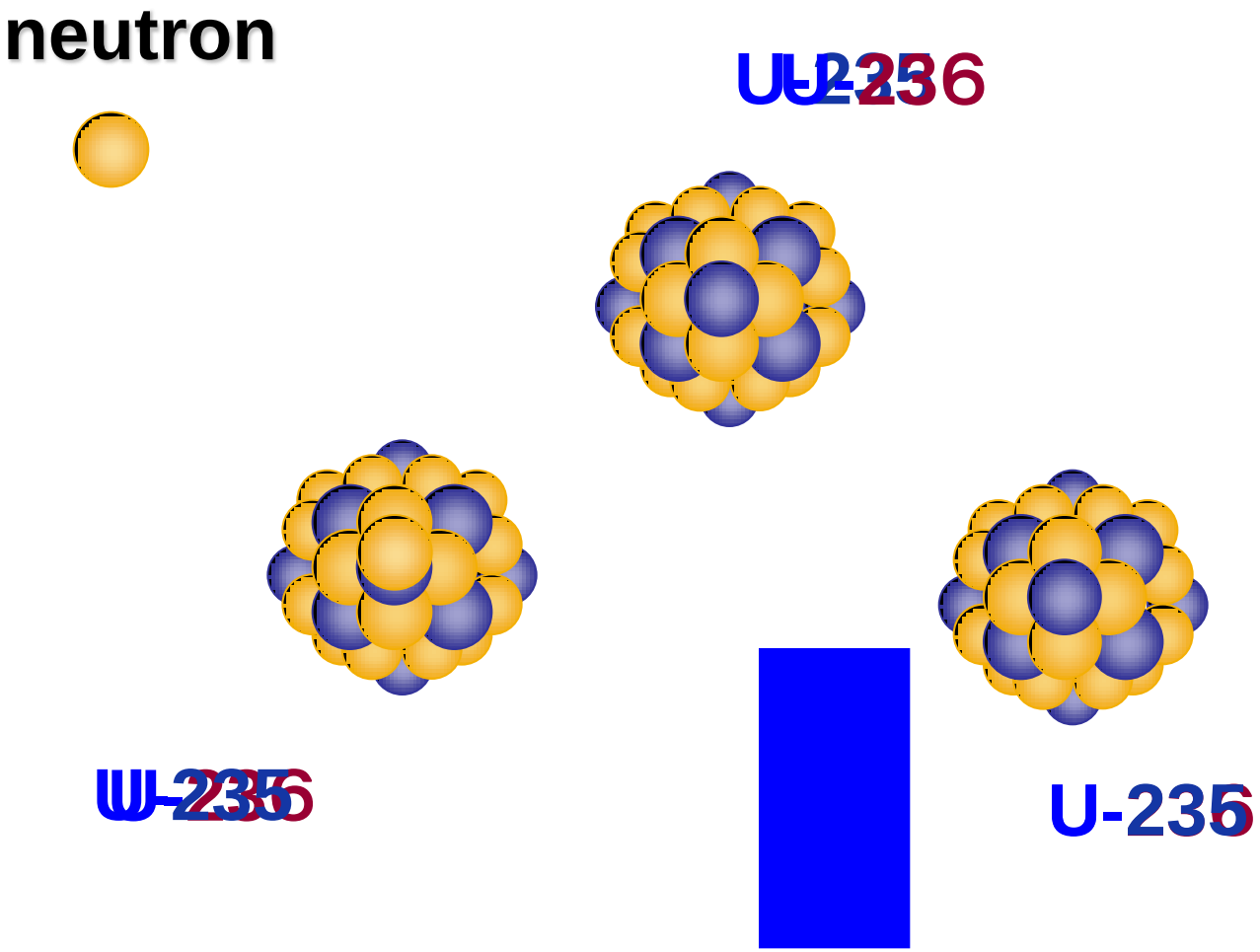
Nguồn Uran trên thế giới

Chu trình nhiên liệu←



Dầu mỏ Khí tự nhiên Than đá U+Pu

Phân hạch U-235



- Để phân hạch hạt nhân xảy ra liên tục trong quá trình phản ứng dây chuyền đòi hỏi phải có một số lượng neutron sinh ra trong quá trình phân hạch.

- Độ lớn của năng lượng được sinh ra trong phản ứng hạt nhân tỉ lệ thuận với số lượng phân hạch xảy ra. Vì thế **mức công suất của lò phản ứng** có thể điều khiển bởi việc **thay đổi số lượng neutron giữa những lần sinh ra kế tiếp nhau**.

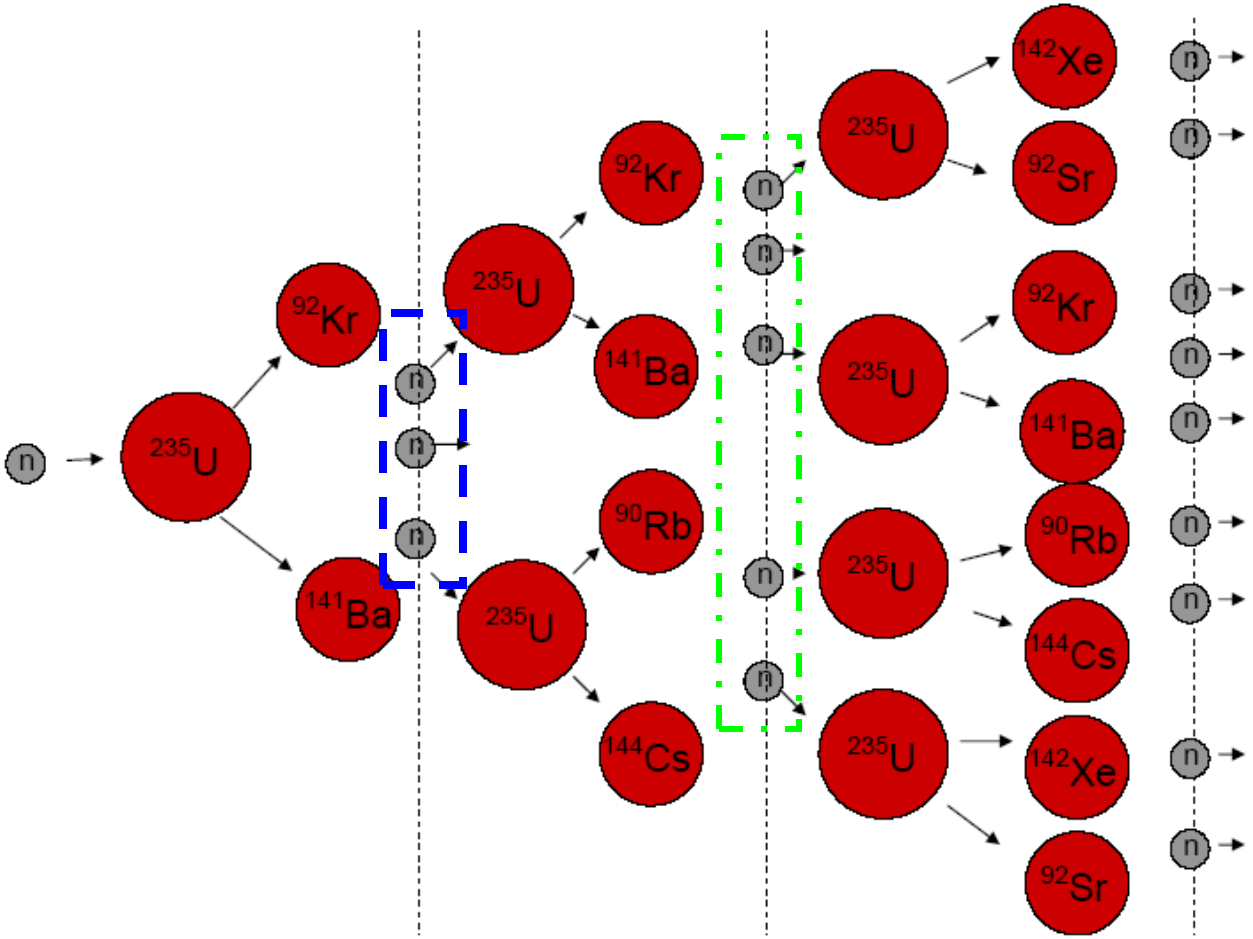
- Trong phần này chúng ta quan tâm tới những gì xảy ra với neutron từ khi chúng "sinh ra" trong quá trình phân hạch cho tới khi chúng chúng bị hấp thụ trong những vật liệu của lò phản ứng hoặc bị rò rỉ ra khỏi lò.

- Hiểu biết về "**chu trình sống của neutron**" sẽ giúp chúng ta hiểu các cách khác nhau để có thể điều khiển phản ứng dây chuyền.

Nội dung

- Chu trình neutron và hệ số nhân
- Hệ số sử dụng (hữu dụng) nhiệt
- Rò rỉ neutron và kích thước tới hạn
- Tính toán k_∞ cho lò PU đồng nhất
- Lò PU không đồng nhất
- Ảnh hưởng của sự sắp xếp không đồng nhất lên p, f và ε

Phản ứng phân hạch dây chuyền



Phản ứng phân hạch dây chuyền

Hệ số nhân (multiplicaton factor)

$$k \equiv \frac{\text{number of neutrons in generation n}}{\text{number of neutrons in generation n-1}}$$

k < 1 dưới tới hạn (subcritical)
k = 1 tới hạn (critical)
k > 1 trên tới hạn (supercritical)

Có một định nghĩa khác

$$k \equiv \frac{\text{rate of neutron production}}{\text{rate of neutron loss}} \equiv \frac{P(t)}{L(t)}$$

Các sự kiện có thể xảy ra với neutron

1. **Neutron có khả năng phân hạch khi hấp thụ bởi ^{238}U (> 1MeV)**

2. Neutron bị hấp thụ bởi ^{238}U mà không phân hạch (~ 1MeV – 5eV).

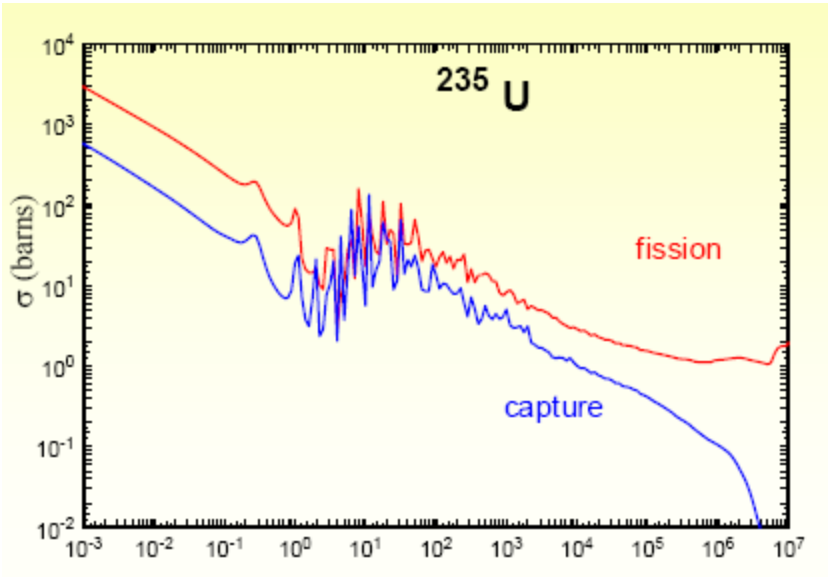
3. **Neutron có khả năng phân hạch khi hấp thụ bởi ^{235}U**

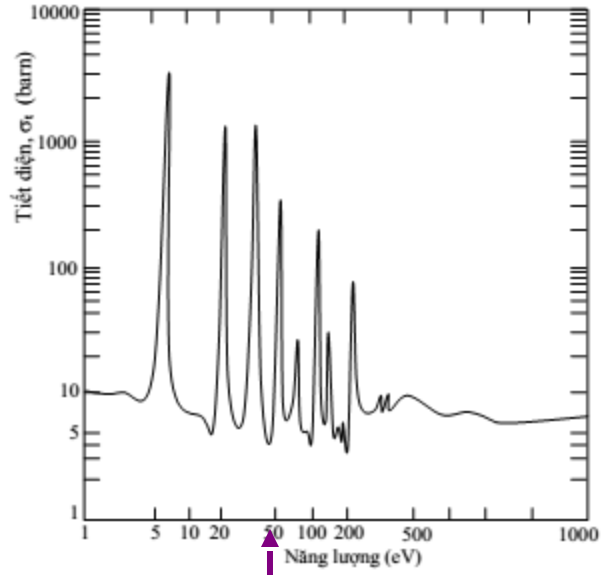
4. Neutron bị hấp thụ bởi ^{235}U mà không phân hạch

5. Neutron bị hấp thụ bởi nguyên liệu hoặc tạp chất mà không phân hạch

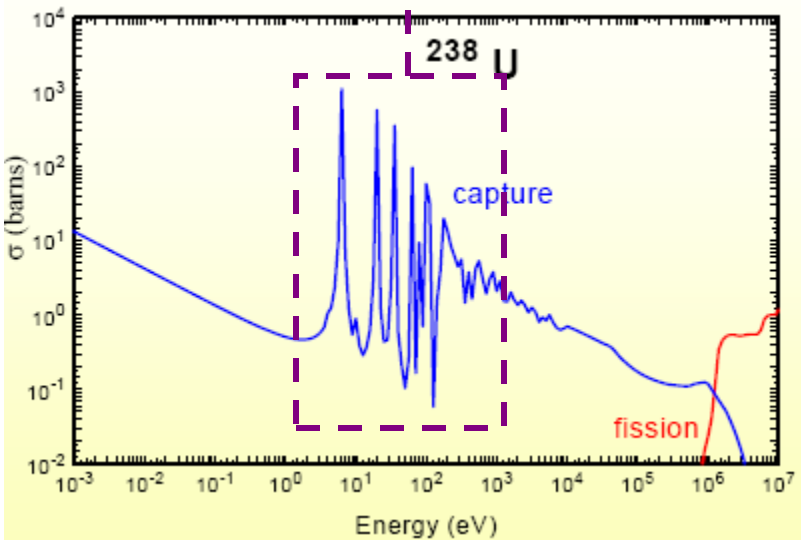
6. Neutron thoát khỏi bó nhiên liệu và bị mất do rò rỉ

Tiết diện phân hạch và tiết diện bắt neutron của ^{235}U and ^{238}U





Hình 6.1: Vùng hấp thụ cộng hưởng của hạt nhân U^{238}.



Hệ số phân hạch nhanh (ε)

- Là hệ số biểu diễn sự tăng số lượng neutron nhanh do phân hạch nhanh của ^{238}U. Đối với U tự nhiên giá trị đặc trưng này là 1,03.

$$\varepsilon = \frac{\text{Số neutron phân hạch nhiệt + số neutron từ phân hạch nhanh}}{\text{Số neutron từ phân hạch nhanh}}$$

Xác suất thoát cộng hưởng (p):

- Là xác suất neutron sẽ không trải qua quá trình bắt cộng hưởng trong ^{238}U trong quá trình làm chậm chậm từ neutron nhanh xuống neutron nhiệt . Với U tự nhiên giá trị đặc trưng này là 0,90.

$$p = \frac{\text{Số neutron có nằm trong khoảng năng lượng cộng hưởng bay ra}}{\text{Số neutron nằm trong khoảng năng lượng cộng hưởng đi vào}}$$

Hệ số tái sinh neutron (η)

- **Số lượng những neutron sinh ra từ phân hạch trên số neutron nhiệt bị hấp thụ trong nhiên liệu (fuel).** Chú ý rằng trong định nghĩa này "nhiên liệu" mang ý nghĩa cho tất cả các thành phần có trong một viên nhiên liệu (fuel pellet), ví dụ: tất cả các đồng vị của uranium, plutonium, và các sản phẩm phân hạch. **Đối với U tự nhiên giá trị η đặc trưng này là 1,34.**
- Σ_a là tiết diện hấp thụ vĩ mô và là tiết diện phân hạch vĩ mô.
- **ν là số neutron trung bình sinh ra trên phân hạch nhiệt (giá trị đặc trưng cho U tự nhiên là 2,5).**
- Chú ý rằng η là số lượng neutron sinh ra do phân hạch trên số neutron bị hấp thụ trong tất cả các dạng nhiên liệu trong khi là số neutron trung bình sinh ra trên phân hạch nhiệt.

$$\eta = \nu \frac{\sum_f (fuel)}{\sum_a (fuel)} = \nu \frac{\sum_f (fuel)}{\sum_f (fuel) + \sum_{n,\gamma} (fuel)}$$

Hệ số sử dụng (hữu dụng) nhiệt (f):

Là tỉ số neutron nhiệt bị hấp thụ bởi nhiên liệu (fuel) như đã định nghĩa so với tất cả số lượng neutron nhiệt bị hấp thụ trong toàn phản ứng (total reactor). **Đối với U tự nhiên giá trị này là 0,94.**

$$f = \frac{\sum_a (\text{fuel})\Phi(\text{fuel})}{\sum_a (\text{totalreactor})\Phi(\text{totalreactor})}$$

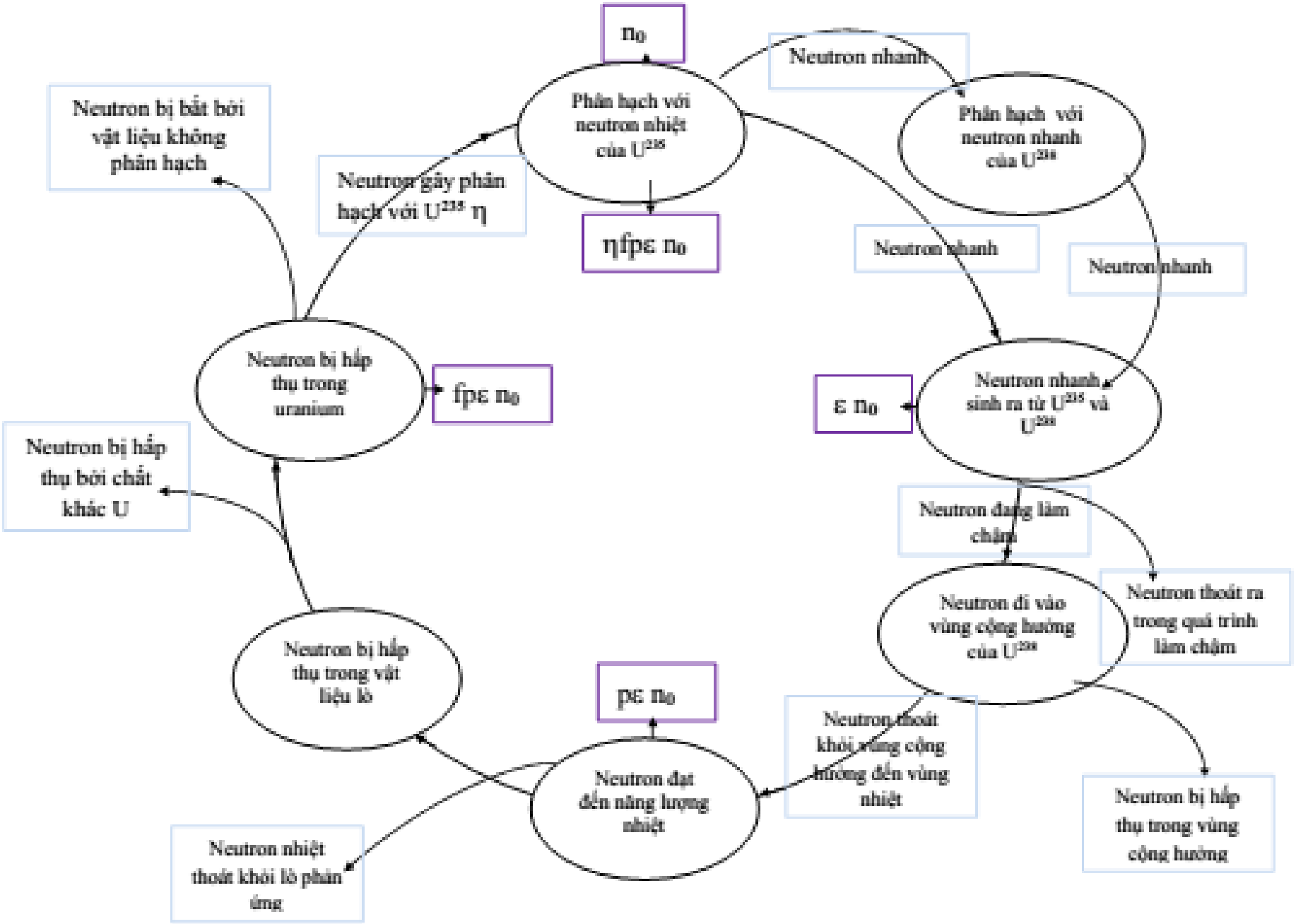
Ở đây Φ(fuel) và Φ(total reactor) là thông lượng neutron nhiệt trung bình tương ứng trong nhiên liệu và trong toàn lò.

Xác suất không rò rỉ neutron nhanh (l_f)

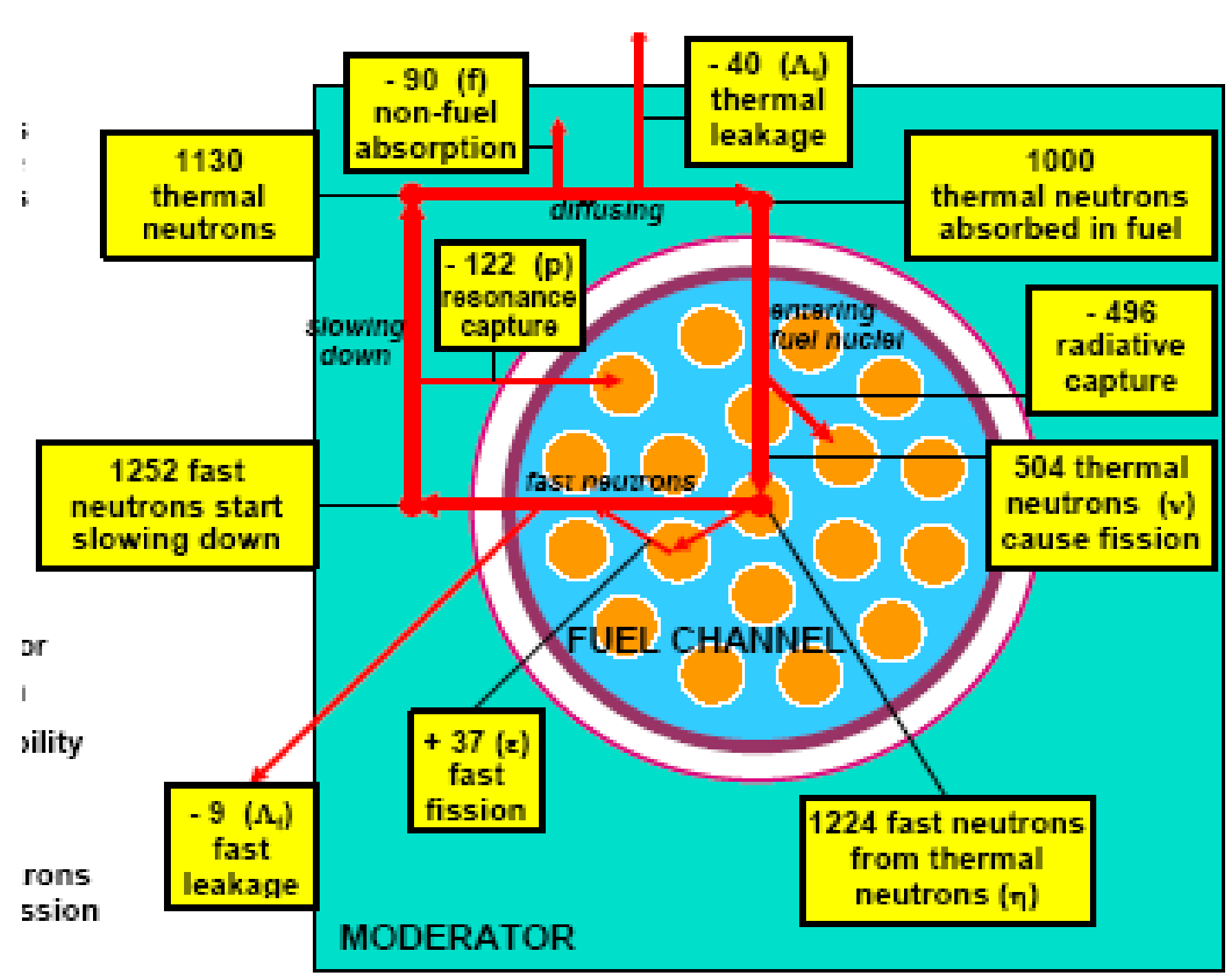
Là xác suất neutron nhanh không rò rỉ ra ngoài lò phản ứng. Giá trị đặc trưng cho lõi CANDU là 0,995.

Xác suất không rò rỉ neutron nhiệt (l_{th}) :

Là xác suất neutron nhiệt không bị rò rỉ ra ngoài lò phản ứng. Giá trị đặc trưng cho lõi CANDU là 0,98.



Hình 6.2: Chu kỳ neutron trong lò phản ứng.


- 90 (f)
non-fuel
absorption
- 40 (Λ_f)
thermal
leakage
1130
thermal
neutrons
1000
thermal neutrons
absorbed in fuel
diffusing
- 122 (p)
resonance
capture
slowing
down
entering
fuel nuclei
- 496
radiative
capture
1252 fast
neutrons start
slowing down
fast neutrons
504 thermal
neutrons (v)
cause fission
FUEL CHANNEL
+ 37 (ε)
fast
fission
- 9 (Λ_f)
fast
leakage
1224 fast neutrons
from thermal
neutrons (η)
MODERATOR

Hệ số nhân (multiplicaton factor)

Ý nghĩa của “hệ số nhân”.
Số neutron trong một phân hạch sinh ra (N_i). Hoạt động của một lò phản ứng dưới tới hạn, tới hạn hoặc trên tới hạn.

Chu trình neutron trong hệ thống công thức 6 hệ số bao gồm:

- Hệ số phân hạch (neutron) nhanh (ε)
- Xác suất thoát cộng hưởng (p)
- Hệ số tái sinh(η).
- Sử dụng nhiệt (f).
- Xác xuất không rò rỉ neutron nhanh (l_f)
- Xác suất không rò rỉ neutron nhiệt (l_{th}).

Chu trình neutron và công thức 6 hệ số

- Hệ số nhân (k) biểu hiện tỉ lệ số neutron nhiệt trong một phân hạch (N_i) trên số neutron nhiệt sinh ra trong phân hạch trước đó (N_{i-1}) bởi 6 hệ số.

Ký hiệu

- ε : là hệ số phân hạch nhanh.
- p: là xác suất thoát cộng hưởng.
- η : là hệ tái sinh neutron.
- f : là hệ số sử dụng nhiệt.
- l_f: là xác suất không rò rỉ neutron nhanh.
- l_{th}: là xác suất rò rỉ không rò rỉ neutron chậm.
- ν: là số neutron trung bình sinh ra trên một phân hạch nhiệt.

$$k_{eff} = \frac{N_i}{N_{i-1}} = \varepsilon p \eta f \ell_f \ell_{th} = k_\infty L$$

$$L = \ell_f \ell_{th}$$

Chu trình neutron và công thức 4 hệ số

- Nếu xét lò vô hạn hoặc lò có vành phản xạ thì công thức 6 thừa số chuyển thành công thức 4 thừa số
-

Ký hiệu

- ε : là hệ số phân hạch nhanh.
- p: là xác suất thoát cộng hưởng.
- η : là hệ tái sinh neutron.
- f : là hệ số sử dụng nhiệt.
- l_f = 1: là xác suất không rò rỉ neutron nhanh.
- l_{th} = 1: là xác suất rò rỉ không rò rỉ neutron chậm.

$$k_\infty = \varepsilon \eta f p$$

Chu trình neutron và công thức tính k_∞

- Nếu ^{238}U không có trong nhiên liệu thì công thức 4 thừa số trở thành
-

Ký hiệu

- ε = 1: là hệ số phân hạch nhanh.
- p = 1: là xác suất thoát cộng hưởng.
- η : là hệ tái sinh neutron.
- f : là hệ số sử dụng nhiệt.
- l_f = 1: là xác suất không rò rỉ neutron nhanh.
- l_{th} = 1: là xác suất rò rỉ không rò rỉ neutron chậm.

$$k_\infty = \eta f$$

Hệ số nhân trong chu trình neutron

- Quá trình điều khiển phản ứng bao gồm những việc thay đổi một hoặc nhiều tới 6 hệ số để đạt được giá trị mong muốn của hệ số nhân neutron.
- **ε và p được xác định bởi thiết kế của lõi lò**

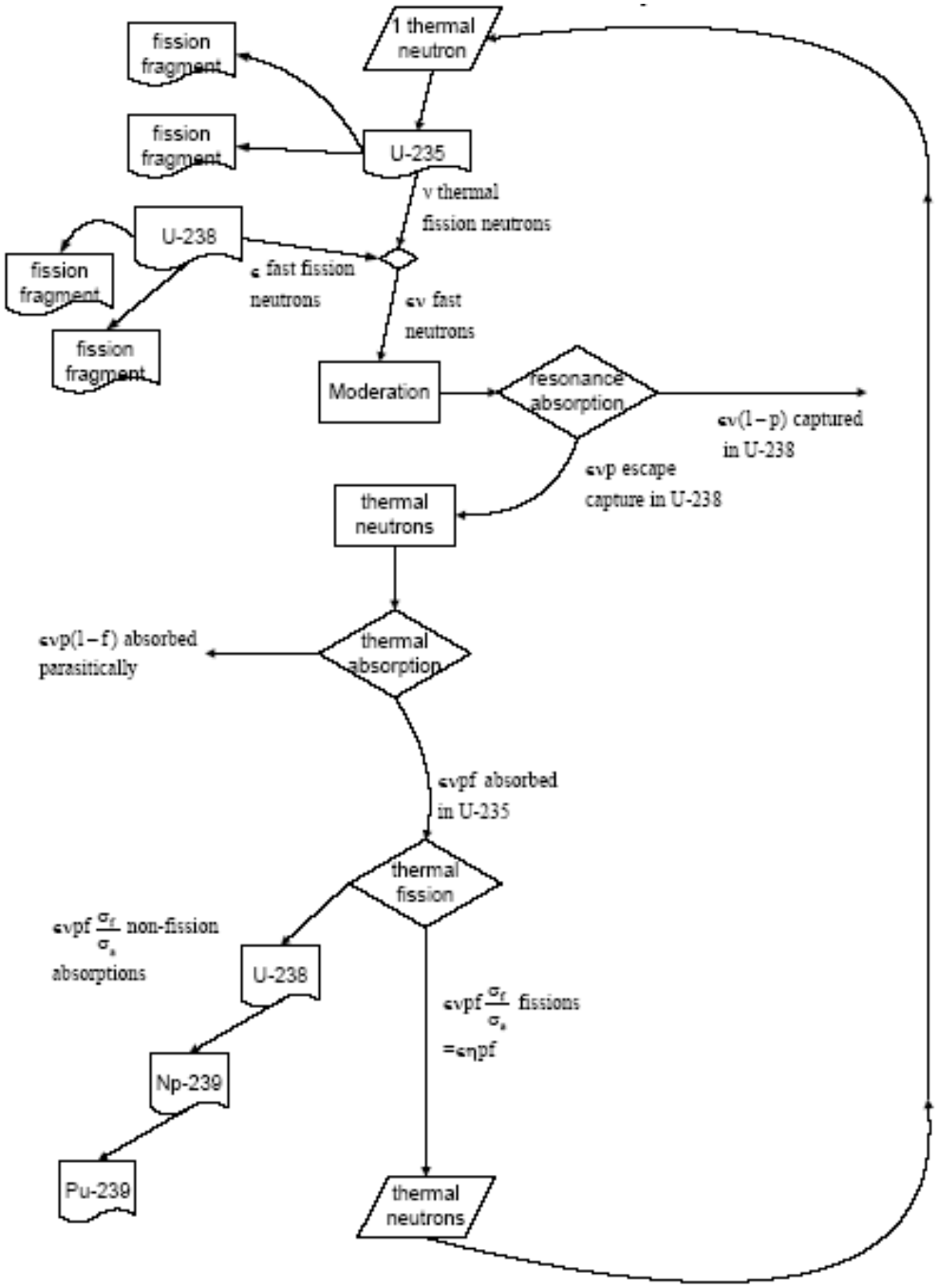
- **η có thể thay đổi bởi việc thay thế những nhiên liệu cũ bằng những nhiên liệu mới**. Một vài lò phản ứng hiện đại sử dụng những kỹ thuật thay đảo hiện đại có thể làm giảm thời hạn thay đổi cho η.

- **l_f và l_{th} có thể được thay đổi bởi chất làm chậm**.

- **f là thông số được thay đổi trong điều khiển độ phản ứng thời gian ngắn trong hầu hết các lò neutron nhiệt**: nó có thể thay đổi bằng cách thay đổi số lượng vật liệu hấp thụ neutron trong lõi, thông thường là trong dạng thanh điều khiển hoặc những "vị trí can thiệp"

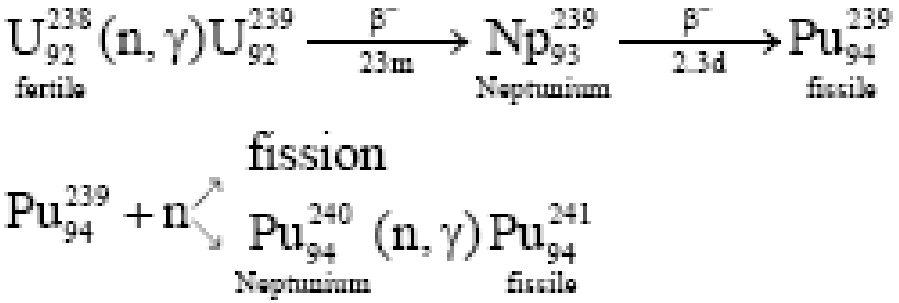
Phản ứng phân hạch dây chuyền

- Công thức 4 thừa số trong mối quan hệ với thời gian sống của neutron

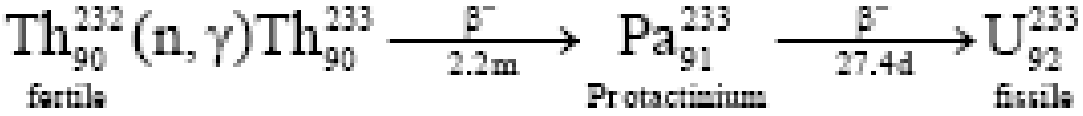


Phản ứng phân hạch dây chuyền

Chuỗi U:



Chuỗi Th:



Ví dụ 1 (1)

Bài toán:

Tính hệ số nhân vô cùng của một hỗn hợp đồng nhất Uran tự nhiên – graphit. Hỗn hợp được trộn 300mol graphit – 1mol Uran. Giả sử tỉ lệ $^{235}U/^{238}U$ là 1:139.

Cho trước các số liệu hạt nhân

$$\sigma_{a(U)} = 7,68\text{barn};\ \ \sigma_{s(U)} = 8,3\text{barn};\ \ \sigma_{a(M)} = 0,0032\text{barn}$$

$$\sigma_{s(M)} = 4,8\text{barn};\ \ \xi = 0,158$$

Ví dụ 1 (2)

Lời giải:

Sử dụng tỷ số nguyên tử để đơn giản bài toán

$$\frac{N_a}{N_U}=\frac{139}{140};\ \frac{N_a}{N_U}=\frac{300}{1}\Rightarrow\frac{N_m}{N_a}=\frac{300}{1}\,x\,\frac{140}{139}=302,2$$

Hệ số sử dụng (hữu dụng) nhiệt

$$f=\frac{\sum_{a(U)}}{\sum_{a(u)}+\sum_{a(M)}}=\frac{1}{1+\dfrac{\sum_{a(U)}}{\sum_{a(M)}}}=0,889$$

$$p=\frac{\sum_s}{N_a}=\frac{\sum_{s(U)}+\sum_{s(M)}}{N_a}=1458\text{barn}$$

Ví dụ 1 (3)

Tích phân cộng hưởng hiệu dụng

$$I_{eff} = 3,85\left(1458\right)^{0,415} = 80\text{barn}$$

Xác suất thoát cộng hưởng hiệu dụng theo công thức (3.77)

$$p = \exp\left(-\frac{N_a}{\Sigma_s}\frac{1}{\xi} I_{eff} \right) = 0,707; \quad \xi\Sigma_s = \xi_U \Sigma_{s(U)} + \xi_M \Sigma_{s(M)}$$

Hệ số nhân vô cùng

$$k_\infty = \varepsilon\eta pf = 1x1,34x0,707x0,889 = 0,842$$

Kết luận: Không thể sử dụng Uran tự nhiên và graphit để lò phản ứng đạt tới hạn

Ví dụ 2 (1)

Bài toán:

Tính hệ số nhân vô cùng của một hỗn hợp đồng nhất Uran tự nhiên – nước nặng. Hỗn hợp được trộn 50mol nước nặng – 1mol Uran. Giả sử tỉ lệ $^{235}U/^{238}U$ là 1:139.

Cho trước các số liệu hạt nhân

$$\sigma_{a(U)} = 7,68\text{barn};\ \ \sigma_{s(U)} = 8,3\text{barn};\ \ \sigma_{a(D_2O)} = 0,00092\text{barn}$$

$$\sigma_{s(D_2O)} = 10,6\text{barn};\ \ \xi = 0,570$$

Ví dụ 2 (2)

Lời giải:

Sử dụng tỷ số nguyên tử để đơn giản bài toán

$$\frac{N_a}{N_U}=\frac{139}{140};\ \frac{N_a}{N_U}=\frac{50}{1}\Rightarrow\frac{N_m}{N_a}=\frac{50}{1}\,x\,\frac{140}{139}=50,36$$

Hệ số sử dụng (hữu dụng) nhiệt

$$f=\frac{\sum_{a(U)}}{\sum_{a(u)}+\sum_{a(M)}}=\frac{1}{1+\dfrac{\sum_{a(U)}}{\sum_{a(M)}}}=0,994$$

$$p=\frac{\sum_s}{N_a}=\frac{\sum_{s(U)}+\sum_{s(M)}}{N_a}=542,1\text{barn}$$

Ví dụ 2 (3)

Tích phân cộng hưởng hiệu dụng

$$I_{eff} = 3,85\left(542,1\right)^{0,415} = 52,5 \text{barn}$$

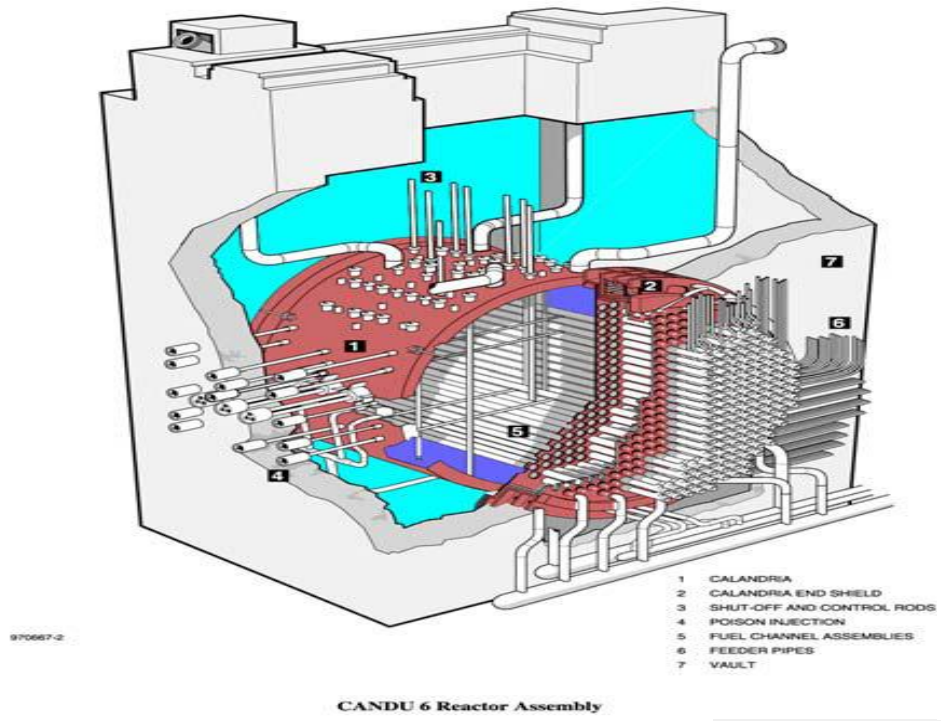
Xác suất thoát cộng hưởng hiệu dụng theo công thức (3.77)

$$p = \exp\left(-\frac{N_a}{\Sigma_s}\frac{1}{\xi} I_{eff} \right) = 0,843; \quad \xi\Sigma_s = \xi_U \Sigma_{s(U)} + \xi_M \Sigma_{s(M)}$$

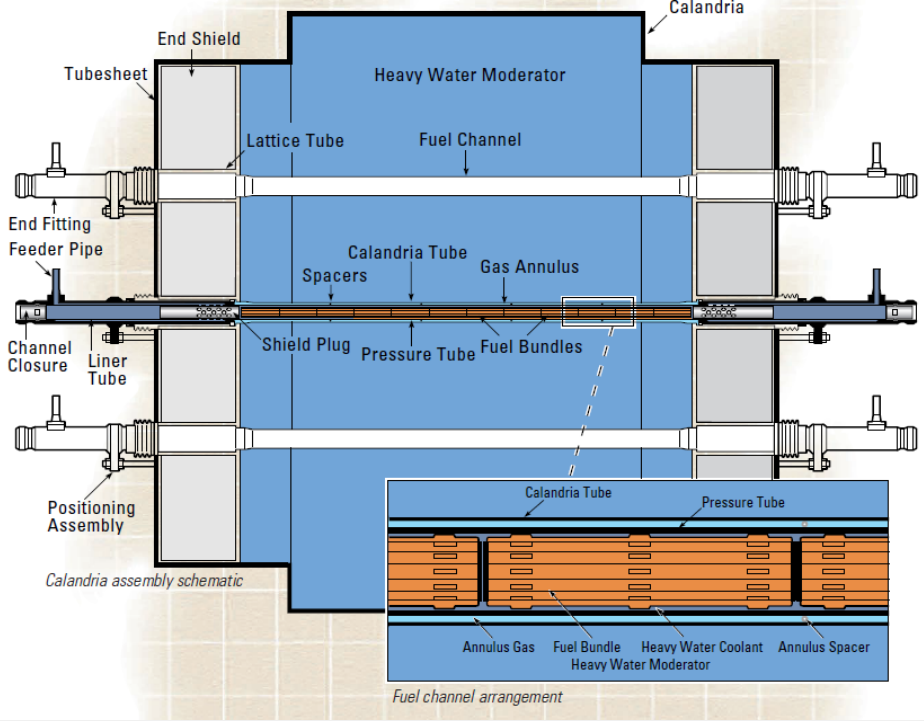
Hệ số nhân vô cùng

$$k_\infty = \varepsilon\eta p f = 1x1,34x0,843x0,994 = 1,123$$

Kết luận: có thể sử dụng Uran tự nhiên và nước nặng để lò phản ứng đạt tới hạn

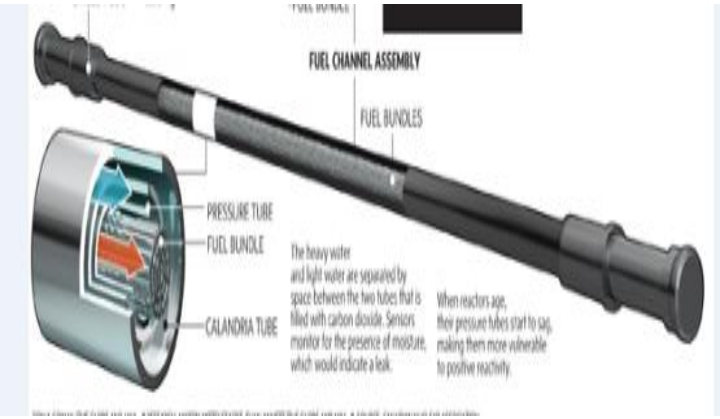


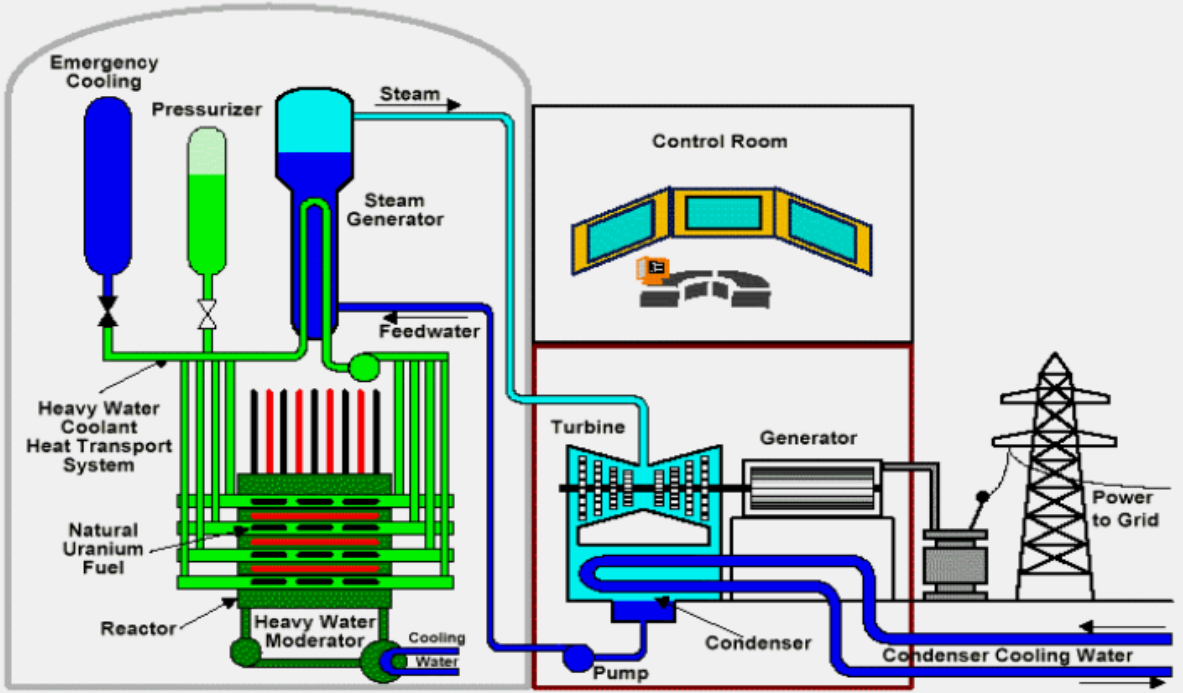
CANDU 6 Reactor Assembly



Calandria assembly schematic

Fuel channel arrangement





Ví dụ 3 (1)

Bài toán:

Tính hệ số nhân vô cùng của một hỗn hợp đồng nhất Uran làm giàu – graphit. Hỗn hợp được trộn 400mol graphit – 1mol Uran. Giả sử tỉ lệ $^{238}U/^{235}U$ là 70.

Cho trước các số liệu hạt nhân

$$\sigma_{a(235)} = 698\text{barn};\quad \sigma_{a(238)} = 2,75\text{barn};\quad \sigma_{f(235)} = 590\text{barn}$$

$$\sigma_{a(M)} = 0,0032\text{barn};\quad \nu = 2,46$$

Ví dụ 3 (2)

Lời giải:

Tiết diện hấp thụ đối với nhiên liệu làm giàu

$$\sigma_{a(U)} = \frac{N_{(235)}\sigma_{a(235)} + N_{(238)}\sigma_{a(238)}}{N_{(235)} + N_{(238)}} = 12,54\text{barn}$$

Hệ số tái sinh neutron

$$\eta = \frac{N_{(235)}\sigma_{f(235)}}{N_{(235)}\sigma_{a(235)} + N_{(238)}\sigma_{a(238)}}\nu = 1,63$$

Ví dụ 3 (3)

Hệ số sử dụng (hữu dụng) nhiệt

$$f = \frac{\Sigma_{a(U)}}{\Sigma_{a(u)} + \Sigma_{a(M)}} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma_{a(U)}}{\Sigma_{a(M)}}} = 0,907$$

Xác suất thoát cộng hưởng

$$p = \frac{\Sigma_s}{N_a} = \frac{\Sigma_{s(U)} + \Sigma_{s(M)}}{N_a} = 1955,7 \text{barn}$$

Ví dụ 3 (4)

Tích phân cộng hưởng hiệu dụng

$$I_{eff} = 3,85\left(1955,7\right)^{0,415} = 89,4 barn$$

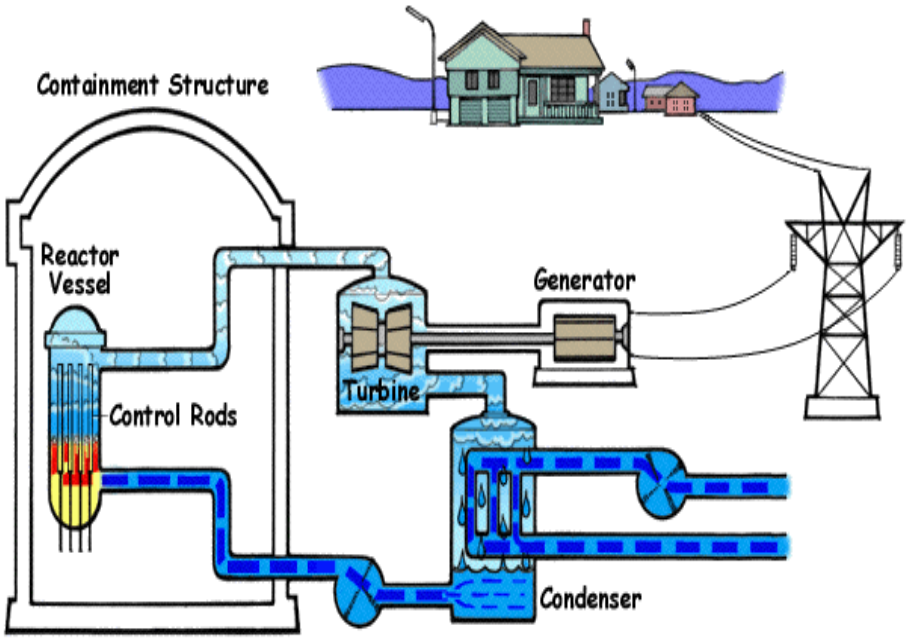
Xác suất thoát cộng hưởng hiệu dụng theo công thức (3.77)

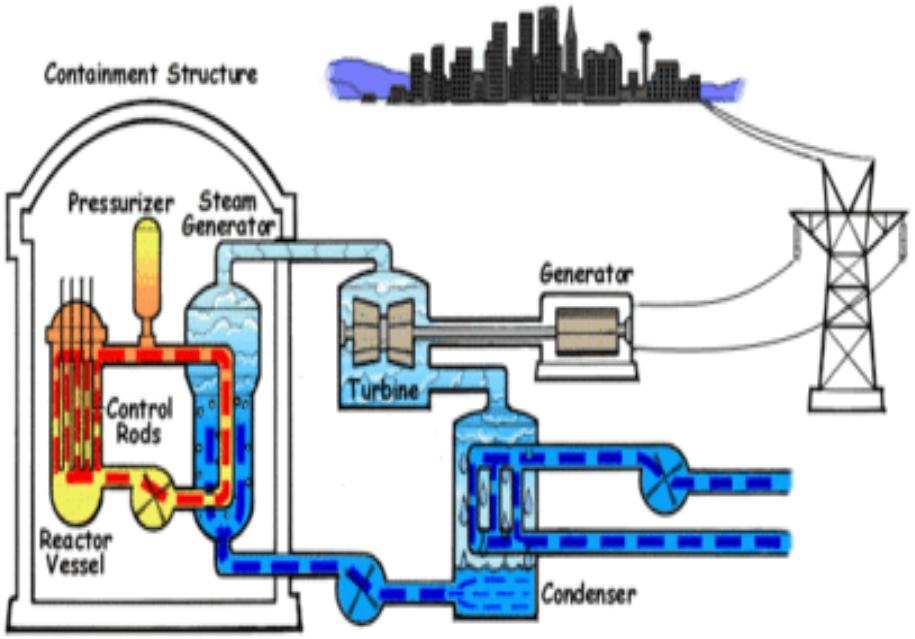
$$p = \exp\left(-\frac{N_a}{\Sigma_s}\frac{1}{\xi}I_{eff}\right) = 0,749; \quad \xi\Sigma_s = \xi_U\Sigma_{s(U)} + \xi_M\Sigma_{s(M)}$$

Hệ số nhân vô cùng

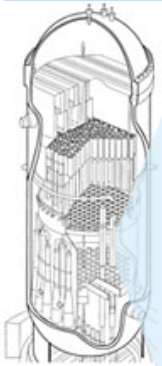
$$k_\infty = \varepsilon\eta pf = 1x1,63x0,907x0,749 = 1,11$$

Kết luận: có thể sử dụng Uran làm giàu và graphit để lò phản ứng đạt tới hạn



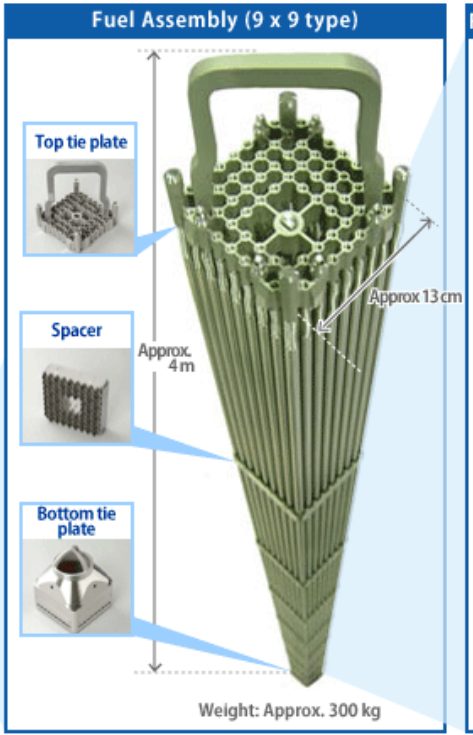


Boiling Water Reactor (BWR)



72 fuel rods are bundled with tie plates and spacers. ▶

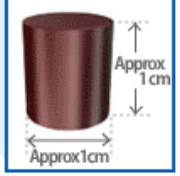
Fuel Assembly (9 x 9 type)



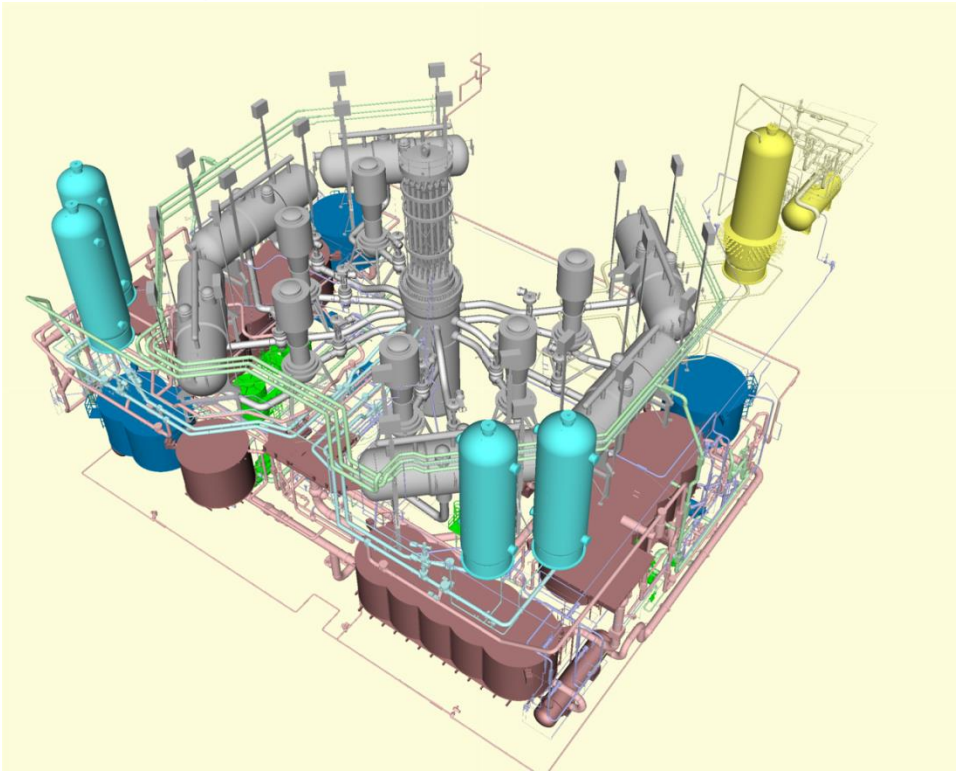
Fuel Rod

◀ A metal pipe contains 350 pellets with both ends plugged. Those pellets are fixed with springs.

Pellet



▲ Uranium powder is baked into the pellet form in a cylindrical shape. About eight grams of the pellet can produce electricity by that could support a normal household life for eight months.



Ví dụ 4 (1)

Bài toán:

Cho lò phản ứng sử dụng nhiên liệu sulphat Uran làm giàu với các thông số cho trong bảng/ Tính hệ số nhân hiệu dụng vô cùng

	Khối lượng (g)	σ_a(barn)	σ_s(barn)
^{235}U	580	698	10
^{238}U	3378	2,75	8,3
S	534	0,49	1,1
O	14068	0,0002	4,2
H	1573	0,33	20

Ví dụ 4 (2)

Lời giải:

Hàm lượng ^{235}U làm giàu

$$EU = \frac{m_{(235)}}{m_{(235)} + m_{(238)}} x100\% = 14,56\%$$

Hệ số sử dụng (hữu dụng) nhiệt

$$f = \frac{\Sigma_{a(U)}}{\Sigma_{a(u)} + \Sigma_{a(M)}} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma_{a(U)}}{\Sigma_{a(M)}}} = 0,754$$

Xác suất thoát cộng hưởng

$$p = \frac{\Sigma_s}{N_a} = \frac{\Sigma_{s(U)} + \Sigma_{s(M)}}{N_a} = 2475 barn$$

Ví dụ 4 (3)

Tích phân cộng hưởng hiệu dụng

$$I_{eff} = 3,85\left(2475\right)^{0,415} = 99\text{barn}$$

Xác suất thoát cộng hưởng hiệu dụng theo công thức (3.77)

$$p = \exp\left(-\frac{N_a}{\Sigma_s}\frac{1}{\xi} I_{eff} \right) = 0,957; \quad \xi\Sigma_s = \xi_U \Sigma_{s(U)} + \xi_M \Sigma_{s(M)}$$

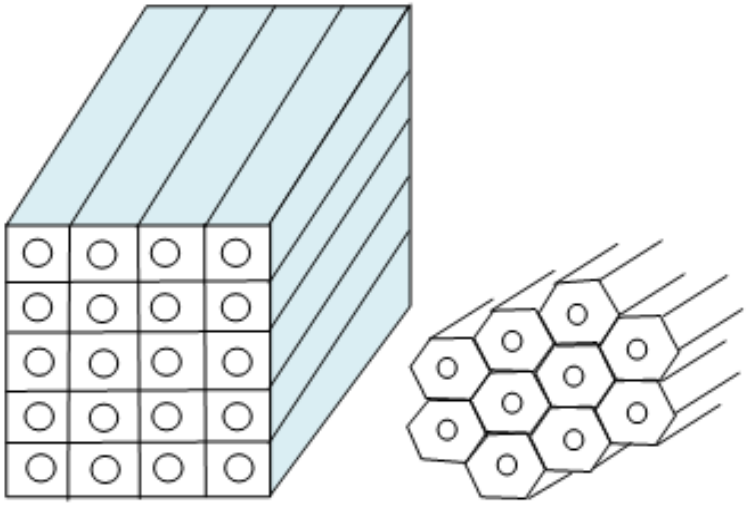
Hệ số nhân vô cùng

$$k_\infty = \varepsilon\eta p f = 1 x 2,08 x 0,957 x 0,754 = 1,50$$

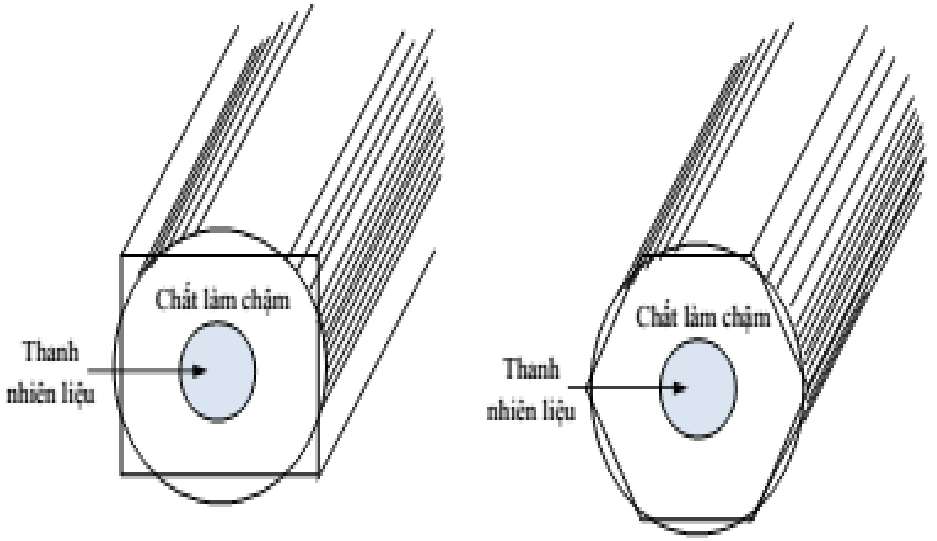
Lò phản ứng không đồng nhất

Mặc dù xây dựng lò đồng nhất đơn giản hơn lò không đồng nhất. Thực tế lại cho thấy hiện nay đa số lò PU đang được sử dụng làm nhiều trên thế giới, vì:

1. Phản ứng dây chuyền có thể xảy ta đối với Uran tự nhiên và chất làm chậm là graphit.
2. Thuận lợi về mặt kỹ thuật trong thiết kế lò PU



Hình 6.7: Cấu trúc mạng gồm những ô đơn vị hình vuông và hình lục giác.



Hình 6.8: Các ô mạng hình trụ tương đương đối với ô mạng hình vuông và hình lục giác.

Lò phản ứng không đồng nhất

Tuy nhiên về mặt tính toán chúng ta phải giải sử rằng:

$$\Phi(r) = F(r)f(r)$$

1. Dạng f(r) lập lại tuần hoàn khi đi từ ô mạng này qua ô mạng tiếp theo và giống nhau đối với mỗi ô mạng
2. Vecto mật độ dòng neutron xuyên qua đường biên của mỗi ô là bằng không.
3. Tốc độ sinh neutron nhiệt trong chất làm chậm là không đổi
4. Không có neutron nhiệt nào được sinh ta trong phần tử nhiên liệu
5. Ô mạng lò phản ứng có thể được thay thế bằng ô mạng hình trụ tương đương

Hệ số sử dụng (hữu dụng) nhiệt

Thêm vào các giá trị thông lượng neutron nhiệt trung bình của vùng chồng lấn của chất làm chậm và nhiên liệu.

Tỉ số giữa thông lượng của neutron nhiệt trung bình trong chất làm chậm và thông lượng của neutron nhiệt trung bình trong khối Uran được gọi là hệ số bất lợi nhiệt $\frac{\overline{\Phi}_M}{\overline{\Phi}_U}$

Tốc độ hấp thụ trong nhiên liệu: $R_u = \Sigma_{a(U)} \overline{\Phi}_U V_U$

Tốc độ hấp thụ trong chất làm chậm: $R_u = \Sigma_{aM} \overline{\Phi}_M V_M$

$$f == \frac{\sum_{a(U)} \overline{\Phi}_U V_U}{\sum_{a(U)} \overline{\Phi}_U V_U + \sum_{a(M)} \overline{\Phi}_M V_M} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{a(M)} \overline{\Phi}_M V_M}{\sum_{a(U)} \overline{\Phi}_U V_U}}$$

f (không đồng nhất) < f (đồng nhất)

Ví dụ 5 (1)

Bài toán:

Tính f đối với mạng không đồng nhất gồm các thanh nhiên liệu Uran hình trụ có đường kính 3cm, cách đều nhau và cách nhau 18cm trong graphit. Giả sử hệ số bất lợi nhiệt bằng 1,6. *Cho trước các số liệu hạt nhân*

$$\sigma_{a(U)} = 7,68\text{barn};\ \ \sigma_{a(M)} = 4,5.10^{-3}\text{barn}$$

$$\rho_{(U)} = 18,7\text{g}/\text{cm}^3;\ \ \rho_{(M)} = 1,62\text{g}/\text{cm}^3$$

Ví dụ 5 (2)

Lời giải:

Theo công thức 6.18 ta có

$$f = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{a(M)} \overline{\Phi}_M V_M}{\sum_{a(U)} \overline{\Phi}_U V_U}}$$

$$\frac{\sum_{a(M)}}{\sum_{a(U)}} = \frac{N_M}{N_U} x \frac{\sigma_{a(M)}}{\sigma_{a(U)}} = \frac{\rho_M / A_M}{\rho_U / A_U} x \frac{\sigma_{a(M)}}{\sigma_{a(U)}} = 1,01.10^{-3}$$

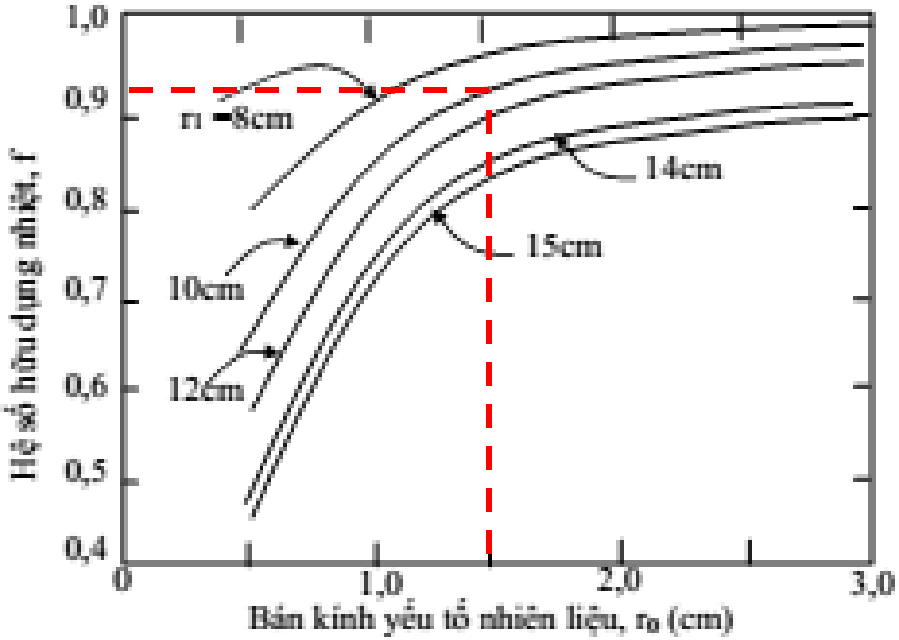
$$\frac{V_m}{V_U} = 44,8; \quad \frac{\overline{\Phi}_M}{\overline{\Phi}_U} = 1,6$$

Hệ số sử dụng nhiệt f = 0,933

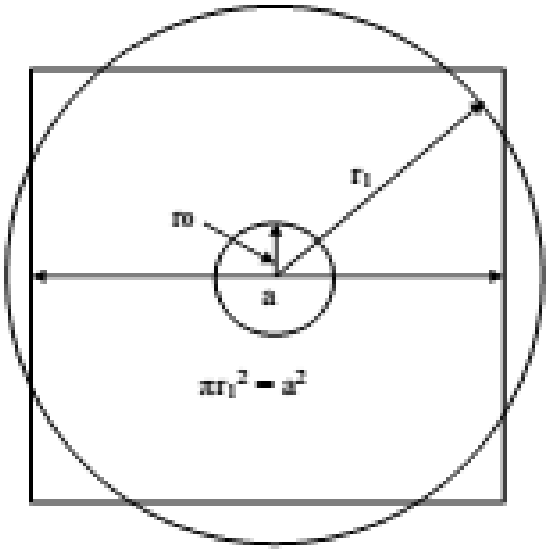
Ví dụ 6 (1)

Bài toán:

Tính f đối với mạng không đồng nhất gồm các thanh nhiên liệu Uran hình trụ cách đều nhau có đường kính 3cm và cách nhau 18cm trong graphit. Tính hệ số bất lợi nhiệt.



Hình 6.11: Đồ thị biểu diễn hệ số f theo r_0 ứng với r_1 khác nhau



Hình 6.12: ô đơn vị và bán kính ô tương đương.

Ví dụ 6 (2)

Lời giải:

Theo công thức 6.18 ta có

$$f = \frac{1}{1 + \dfrac{\sum_{a(M)} \overline{\Phi}_M V_M}{\sum_{a(U)} \overline{\Phi}_U V_U}}$$

Đồ thị 6.11 ta suy ra f = 0,93. Ta tính được hệ số bất lợi nhiệt

$$\frac{\overline{\Phi}_M}{\overline{\Phi}_U} = \frac{\dfrac{1}{f} - 1}{\left(\sum_{a(M)} / \sum_{a(U)}\right)\left(V_M / V_U\right)} = 1,66$$

Xác suất thoát cộng hưởng

Đối với lò PU không đường nhất thì xác suất thoát cộng hưởng tăng vì:

1. Quá trình làm chậm chỉ diễn ra trong chất làm chậm. Năng lượng của neutron giảm xuống dưới vùng bắt cộng hưởng của ^{238}U.

2. Neutron có năng lượng cộng hưởng sẽ bị hấp thụ khi tương tác với bề mặt khối Uran.

Tích phân công hưởng sẽ bao gồm hai thành phần: (1) đóng góp từ bề mặt; (2) đóng góp bởi khối Uran

$$I_{eff} = 9,25\left[1 + \frac{2,67}{(M/S) + r_0}\right](barn)$$

Xác suất thoát cộng hưởng

Thông lượng neutron trung bình trong khối Uran: $\overline{\Phi}_0$

Thông lượng neutron trung bình trong chất làm chậm: $\overline{\Phi}_m$

Xác suất thoát cộng hưởng đối với hệ không đồng nhất

$$p = \exp\left(-\frac{N_a}{\xi\Sigma_s}\frac{V_0\overline{\Phi}_0}{V_M\overline{\Phi}_M} I_{eff} \right)$$

Đối với yếu tố Uran hình trụ dài diện tích đáy có thể bỏ qua so với diện tích xung quanh thì Xác suất thoát cộng hưởng đối với hệ không đồng nhất

$$p = \exp\left(-\frac{N_a}{\xi\Sigma_s}\frac{V_0\overline{\Phi}_0}{V_M\overline{\Phi}_M}(9,25 + 49,4/r\rho) \right);\ \frac{S}{M} = \frac{2\pi r\ell}{\pi r^2\ell\rho} = \frac{2}{r\rho}\left(\rho = 18,7 g/cm^3\right)$$

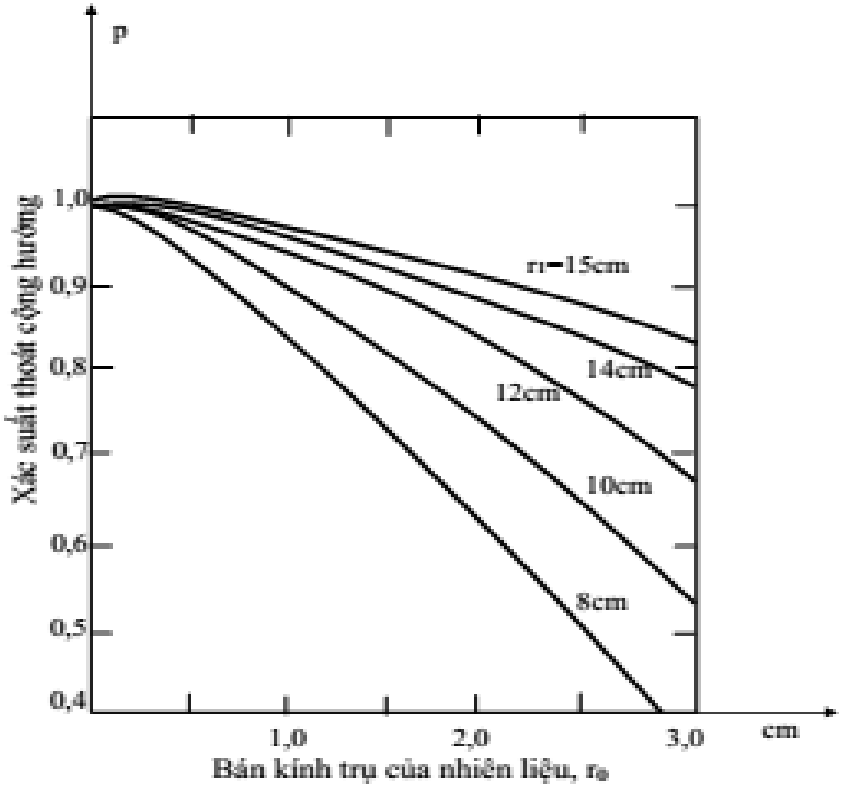
Xác suất thoát cộng hưởng

Khi thiết kế lò không đồng nhất thì việc thay đổi yếu tố nhiên liệu ảnh hưởng tới p và f theo hai chiều ngược nhau. Do đó, phải lựa chọn kích thước yếu tố nhiên liệu và không gian mạng để đạt được một sự sắp xếp tối ưu nhất.

$$p = \exp\left(-\frac{f_r}{1-f_r}\right)$$

f_r là hệ số hữu dụng cộng hưởng

$$f_r = \frac{V_0 \overline{\Phi}_0 N_0 \int_E^{E_0} (\sigma_a)_{eff} \frac{dE}{E}}{V_0 \overline{\Phi}_0 N_0 \int_E^{E_0} (\sigma_a)_{eff} \frac{dE}{E} + \xi \Sigma_s V_M \overline{\Phi}_M}$$



Hình 6.13: Sự biến thiên của p theo bán kính hình trụ của nhiên liệu đối với các ô hình trụ tương đương khác nhau.

Ví dụ 7 (1)

Bài toán:

Tính p đối với mạng gồm các thanh nhiên liệu Uran tự nhiên tiết diện tròn đường kính 3cm cách đều nhau và cách nhau 25cm trong graphit. *Cho trước các số liệu hạt nhân*

$$\rho_{(U)} = 18,7 g/cm^3; \quad \rho_{(M)} = 1,62 g/cm^3$$

$$\sigma_{s(M)} = 4,8 barn; \quad \xi = 0,158$$

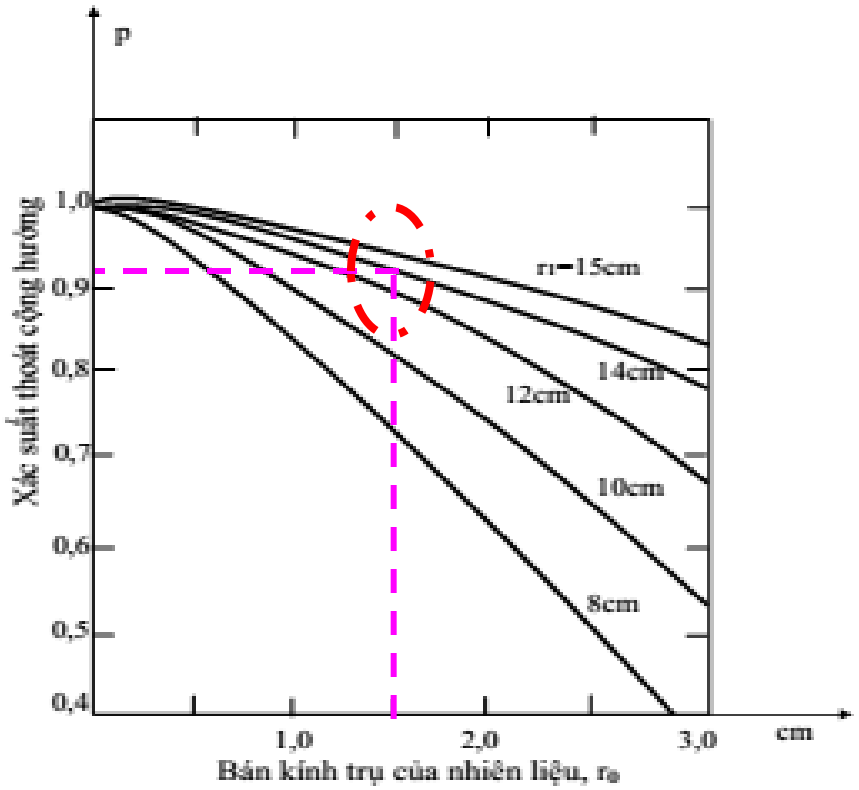
Ví dụ 7 (2)

Lời giải:

Theo công thức 6.22 ta có $$p = \exp\left(-\frac{N_a}{\xi\Sigma_s}\frac{V_0\overline{\Phi}_0}{V_M\overline{\Phi}_M}\left(9,25 + 49,4/r\rho\right)\right)$$

Xác suất thoát cộng hưởng đối với hệ không đồng nhất

$$p = \exp\left(-\frac{1}{87,5} x \frac{1}{1,72} x \frac{2,29}{0,158}\right) = 0,908$$



Hình 6.13: Sự biến thiên của p theo bán kính hình trụ của nhiên liệu đối với các ô hình trụ tương đương khác nhau.

Hệ số phân hạch nhanh

Gọi P là xác suất neutron phan hạch được sinh ra trong yếu tố nhiên liệu sẽ va chạm với Uran trước khi thoát khỏi yếu tố nhiên liệu là đi vào chất làm chậm.

$$\varepsilon = 1 + \frac{(\nu - 1)\sigma_f - \sigma_c}{\sigma_t - (\nu\sigma_f + \sigma_s)P} P$$

Đối với Uran tự nhiên ta có:

$$\varepsilon = 1 + \frac{0,0952xP}{1 - 0,521xP};$$

$$\nu = 2,55;\ \sigma_f = 0,29\text{barn};\ \sigma_c = 0,04\text{barn};\ \sigma_s = 1,5\text{barn};\ \sigma_t = 4,3\text{barn}$$

Ví dụ 8 (1)

Bài toán:

Tính k_∞ đối với lò không đồng nhất thanh Uran bọc nhôm đặt cách đều nhau khoảng 20,3cm. Mỗi viên nhiên liệu đường kính 2,8cm, dài 10,2cm bọc nhôm dày 1mm. Chứa trong các ống có tiết diện tròn $36cm^2$ sao cho không khí xuyên qua như chất làm mát. *Cho trước các số liệu hạt nhân*

$$\rho_{(U)} = 18,7g/cm^3;\ \rho_{(C)} = 1,62g/cm^3; \rho_{(Al)} = 2,7g/cm^3;\ \rho_{(kk=100^0C)} = 9.10^{-4}g/cm^3$$

$$\sigma_{s(TB)} = 4,8barn; \sigma_{a(U)} = 7,68barn; \sigma_{a(C)} = 0,0032barn; \sigma_{a(Al)} = 0,23barn; \sigma_{a(kk)} = 1,5barn$$

BÀI TẬP

CHƯƠNG 7

LÝ THUYẾT LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

Nội dung (1)

- Phương trình lò một nhóm
- Lò phản ứng thanh trần (dạng tấm)
- Lò phản ứng hình cầu
- Lò dạng hình trụ vô hạn
- Lò dạng hình trụ hữu hạn
- Giá trị cực đại trên trung bình của thông lượng và công suất

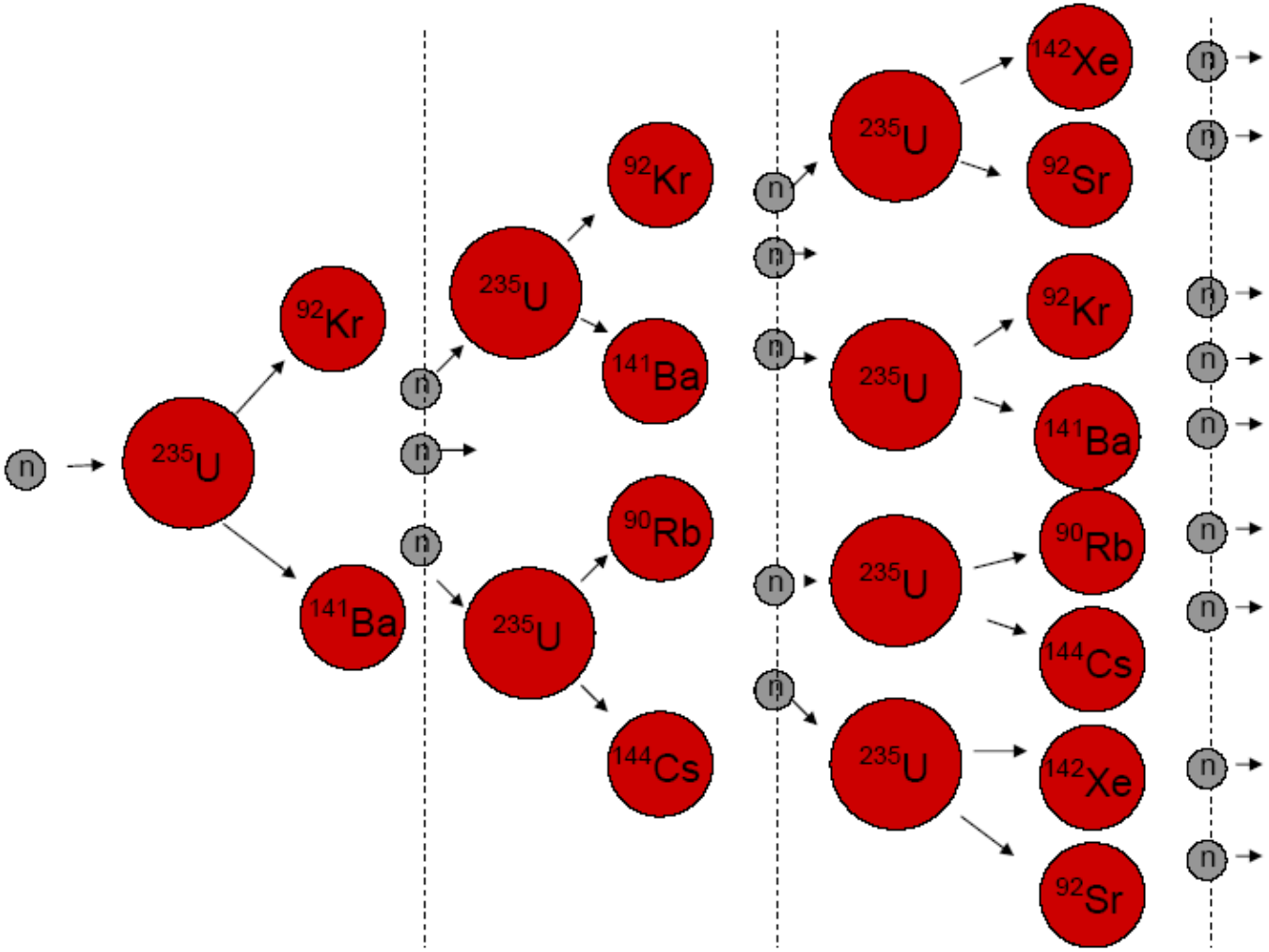
Nội dung (2)

- Phương trình tới hạn một nhóm
- Lò nhiệt
- Lò có phản xạ
- Tính toán nhiều nhóm
- Lò không đồng nhất
- Ví dụ

Mở đầu

- Trong một lò phản ứng tới hạn có sự cân bằng giữa số neutron sinh ra từ phân hạch và số neutron mất đi do bị hấp thụ trong lò hay bị rò ra ngoài.
- Một trong những bài toán trọng tâm trong thiết kế một lò phản ứng là tính toán kích thước và thành phần của hệ sao cho duy trì được sự cân bằng này.

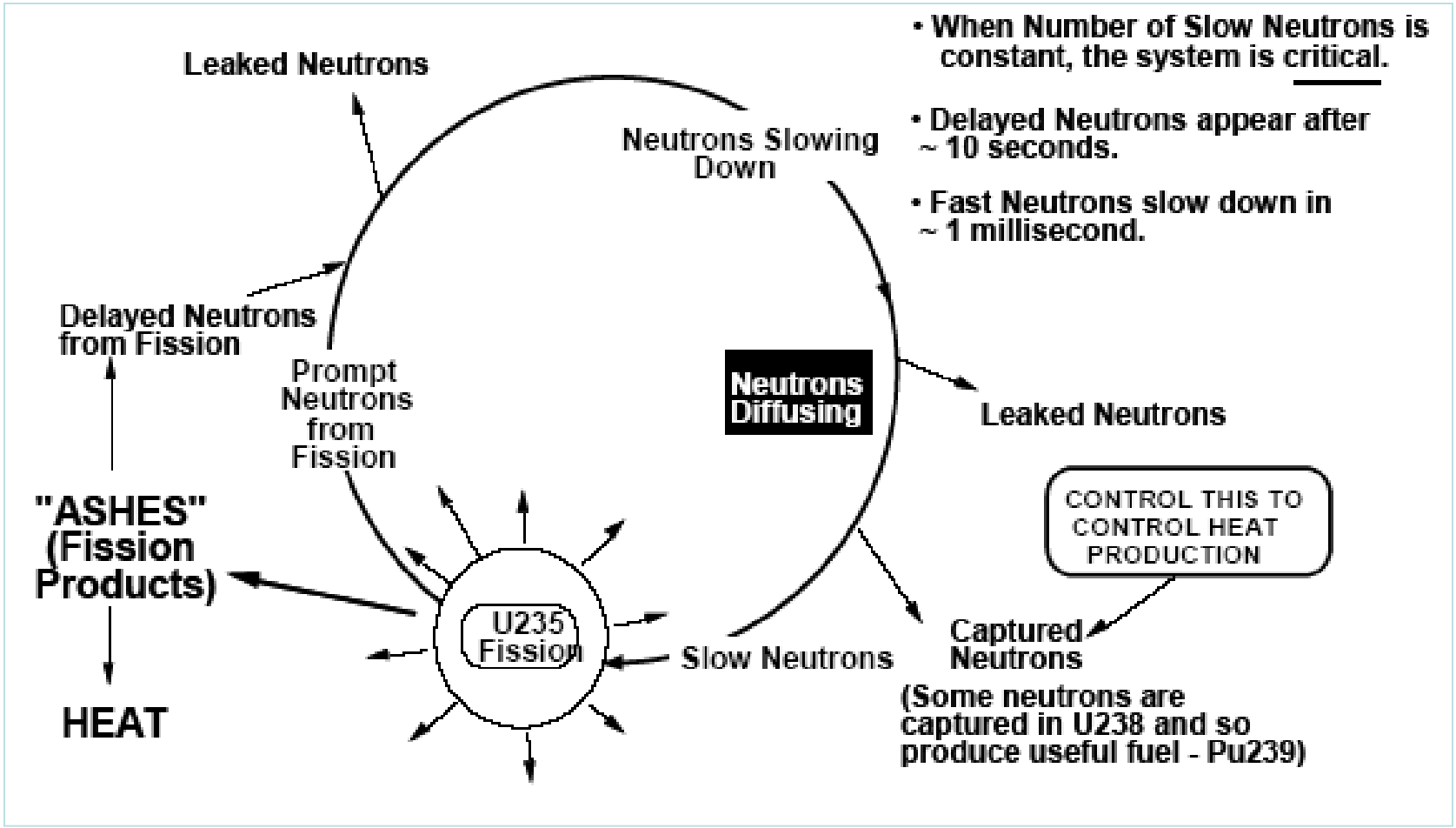
Phản ứng phân hạch dây chuyền



Năng lượng phân hạch

Fission fragments	Released energy [MeV]		Range [m]
	^{235}U	^{239}Pu	
Lighter fragment	99.81	101.82	$< 1\times10^{-4}$
Heavier fragment	68	73.2	$< 1\times10^{-4}$
Prompt neutrons	4.8	5.8	*
Prompt γ ($t < 1$ μs)	7.5	7.0	1.0
	Decay products:		
β-particles	7.8	8.0	$< 1\times10^{-2}$
γ – rays ($t > 1$ μs)	6.8	6.2	1.0
neutrino	12.0	12.0	∞
Σ	**210**	**215**	

Chu kì sống của neutron trong một lò nhiệt



Phương trình lò một nhóm (1)

- ✓ Môi trường nhân neutron ($\Sigma_f > 0$)
- ✓ Môi trường không nhân ($\Sigma_f = 0$)

Để ý một lò nhanh tới hạn gồm một hỗn hợp nhiên liệu và chất làm nguội, không có *blanket* cũng như vành phản xạ (*lò trần - bare reactor*)

Phương trình khuếch tán dừng được viết cho một nhóm như sau

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi = -s$$

Nguồn bây giờ là các neutron phân hạch

$$s = \eta\Sigma_{aF}\phi$$

Phương trình lò một nhóm (2)

$$s = \eta \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_a} \Sigma_a \phi = \eta f \Sigma_a \phi$$

$f = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_a}$ là *hệ số sử dụng nhiên liệu (fuel utilization)*

Hệ số nhân (multiplication factor) được định nghĩa

$$k = \frac{\text{number of fission in one generation}}{\text{number of fission in preceding generation}}$$

Xét một lò phản ứng với cùng thành phần

$$k_\infty = \frac{\eta f \Sigma_a \phi}{\Sigma_a \phi} = \eta f$$

Phương trình lò một nhóm (3)

Số hạng nguồn có thể được viết như sau

$$s = k_\infty \Sigma_a \phi$$

$$\Rightarrow \qquad D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi = -k_\infty \Sigma_a \phi$$

$$\nabla^2\phi + \frac{k_\infty - 1}{L^2}\phi = 0 \qquad \left[\; L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \;\right]$$

Thay $B^2 = \dfrac{k_\infty - 1}{L^2}$ vào ph/trính kh/tán một nhóm

$$\nabla^2\phi + B^2\phi = 0$$

Gọi là *phương trình lò một nhóm (one-group reactor equation)*

Các toán tử laplace

$$\Delta \equiv \nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} =$$

Cartesian geometry

$$= \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} =$$

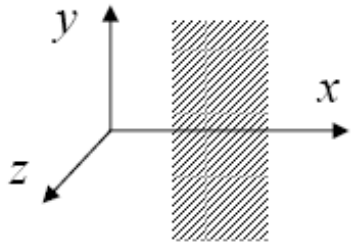
Cylindrical geometry

$$= \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$$

Spherical geometry

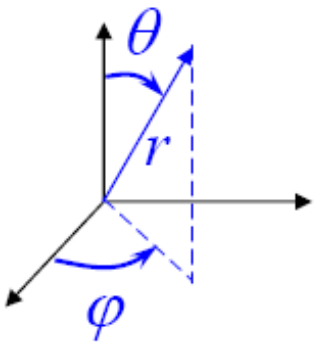
Trường hợp đối xứng

Plane geometry



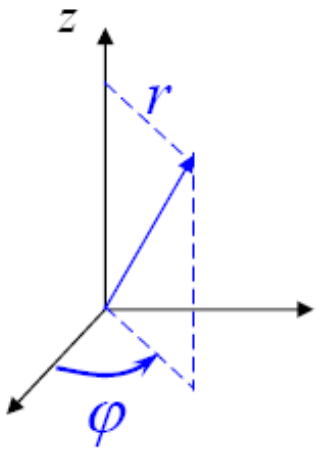
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$

Spherical geometry



$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}r^2\frac{\partial}{\partial r}$$

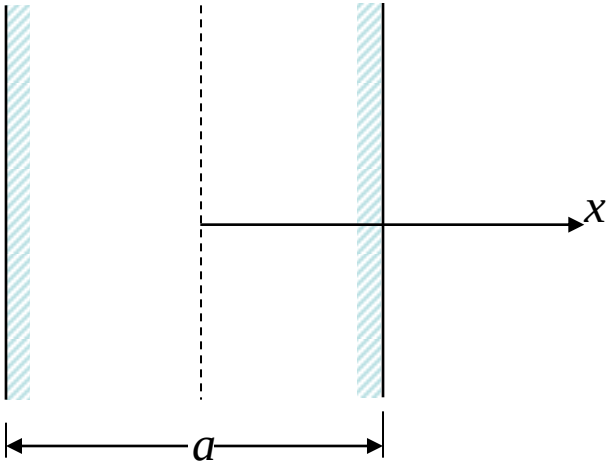
Cylindrical geometry



$$\nabla^2 = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}r\frac{\partial}{\partial r}$$

Lò phản ứng dạng tấm (1)

Xét một hệ thống gồm một tấm trần vô hạn có độ dày a



Phương trình lò

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + B^2\phi = 0$$

Lò phản ứng dạng tấm (2)

Để xác định thông lượng trong lò, phương trình lò phải được giải với các điều kiện biên (bỏ qua độ dài ngọai suy).

$$\phi\left(\frac{a}{2}\right)=\phi\left(-\frac{a}{2}\right)=0$$

Vì đây là bài toán đối xứng nên tại tâm của tấm

$$\frac{d\phi}{dx}=0 \quad \text{hay} \quad \phi(-x)=\phi(x)$$

Nghiệm tổng quát của phương trình lò

$$\phi(x)=A\cos Bx+C\sin Bx$$

Lò phản ứng dạng tấm (3)

$$\frac{d\phi}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \quad C = 0$$

$$\Rightarrow \quad \phi(x) = A\cos Bx$$

Đưa vào điều kiện biên

$$\phi\left(\frac{a}{2}\right) = A\cos\left(\frac{Ba}{2}\right) = 0$$

$$A = 0 \quad \text{hoặc} \quad \cos\left(\frac{Ba}{2}\right) = 0$$

Trường hợp thứ hai sẽ thỏa mãn nếu B nhận bất kì giá trị nào

$$B_n = \frac{n\pi}{a}$$, n là số nguyên lẻ

Lò phản ứng dạng tấm (4)

Các hằng số B_n khác nhau là các *trị riêng (eigenvalues)* và các hàm tương ứng $cosB_nx$ được gọi là *hàm riêng (eigenfunctions).*

Nếu lò phản ứng tới hạn thì tất cả các hàm này ngoại trừ trường hợp thứ nhất sẽ biến mất theo thời gian và thông lượng được coi là ở dạng dừng của hàm riêng đầu tiên hay là dạng cơ bản (*fundamental)*

$$\phi(x) = A\cos B_1 x = A\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$$

Đây là thông lượng trong một lò phản ứng dạng tấm tới hạn.

Lò phản ứng dạng tấm (5)

B_1^2 Được gọi là *buckling* của lò phản ứng.

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + B_1^2\phi = 0$$

$$\Rightarrow \quad B_1^2 = -\frac{1}{\phi}\frac{d^2\phi}{dx^2}$$

Vì trong lò dạng tấm, $B_1^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$

buckling giảm khi a tăng. Khi a tiến đến vô cùng, thì $B_1^2 = 0$, ϕ là hằng số, không bị "buckle".

Lò phản ứng dạng tấm (6)

Trong biểu thức này $\phi(x) = A\cos B_1 x = A\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$

A xác định độ lớn của ϕ. Về mặt vật lý, độ lớn của thông lượng trong một lò phản ứng được xác định bởi công suất mà hệ thống vận hành.

Công suất tổng trên mỗi đơn vị diện tích tấm

$$P = E_R \Sigma_f \int_{-a/2}^{a/2} \phi(x) dx$$

Thay $\phi(x) = \cos(\pi x/a)$ rồi lấy tích phân

$$P = \frac{2aE_R\Sigma_f A}{\pi}$$

⇨

$$\phi(x) = \frac{\pi P}{2aE_R\Sigma_f}\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$$

E_R là năng lượng thu hồi được từ mỗi phân hạch

Lò phản ứng dạng hình cầu (1)

Xét một lò phản ứng dạng hình cầu trần có bán kính R. Thông lượng trong lò là một hàm của r, phương trình lò là

$$\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}r^2\frac{d\phi}{dr}+B^2\phi=0$$

Thông lượng phải thỏa mãn điều kiện biên $\phi(R)=0$ (bỏ qua độ dài ngoại suy)

Nghiệm tổng quát của phương trình lò

$$\Rightarrow \quad \phi = A\frac{\sin Br}{r}+C\frac{\cos Br}{r}$$

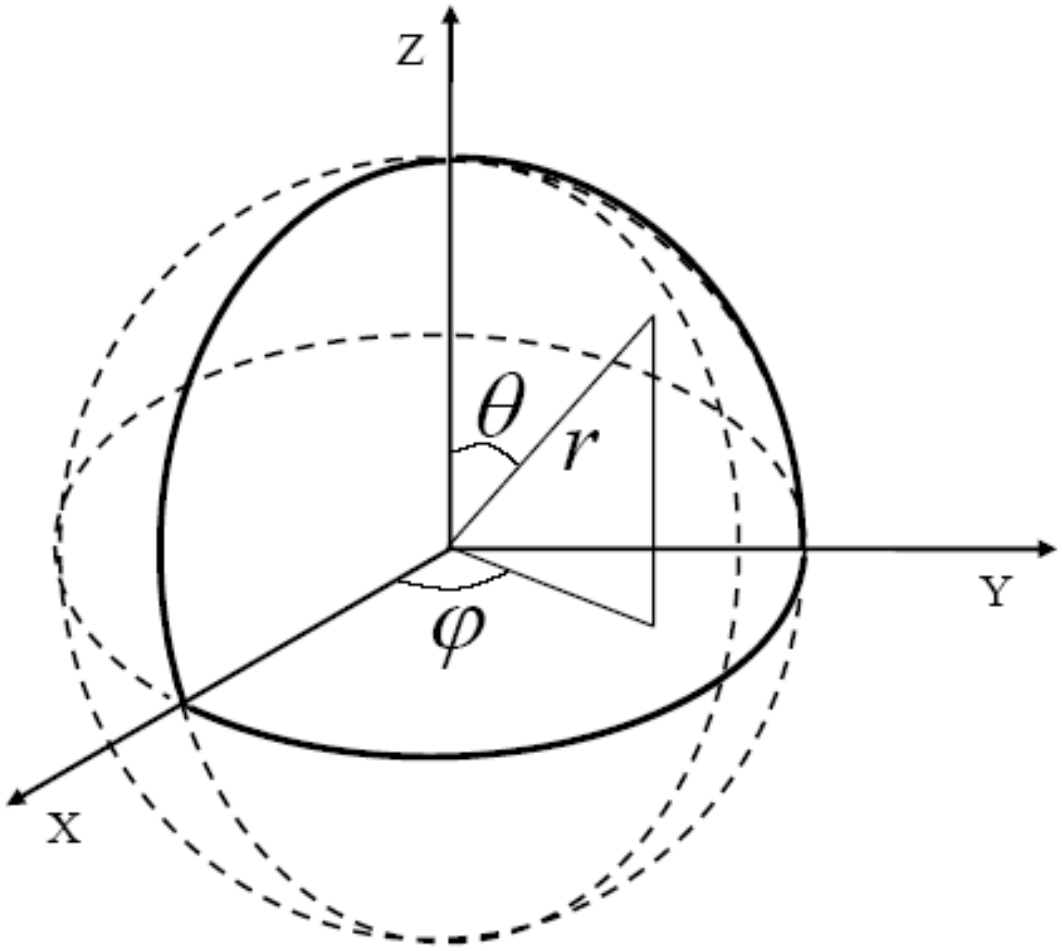
$w=\Phi r$ (change of variable)

$$\frac{d^2w}{dr^2}+B^2w=0$$

$$w(r)=A\sin Br+C\cos Br$$

$$\Phi(r)=\frac{w}{r}$$

Lò phản ứng dạng hình cầu (2)



Lò phản ứng dạng hình cầu (3)

Vì số hạng thứ hai của nghiệm trở nên vô hạn khi r tiến đến không, C phải bằng không, nên

$$\phi = A\frac{\sin Br}{r}$$

Điều kiện biên $\phi(R)=0$ có thể được thỏa mãn khi B là một trong các trị riêng sau

$$B_n = \frac{n\pi}{R}$$

n là số nguyên

Với một lò tới hạn, $n=1$, buckling sẽ là

$$B_1^2 = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2$$

Lò phản ứng dạng hình cầu (4)

$$\Rightarrow \qquad \phi = A\frac{\sin(\pi r/R)}{r}$$

Hằng số A được xác định bởi công suất vận hành

$$P = E_R \Sigma_f \int \phi(r) dV = 4\pi E_R \Sigma_f \int_0^R r^2 \phi(r) dr$$

$$P = 4E_R \Sigma_f A R^2$$

Do đó thông lượng trong một lò hình cầu có thể viết

$$\phi = \frac{P}{4E_R \Sigma_f R^2} \frac{\sin(\pi r/R)}{r}$$

Lò phản ứng dạng hình trụ vô hạn (1)

Khảo sát một lò phản ứng dạng hình trụ vô hạn bán kính R. Thông lượng chỉ phụ thuộc vào khoảng cách r từ trục. Phương trình lò như sau:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}r\frac{d\phi}{dr}+B^2\phi=0$$

Thực hiện vi phân số hạng đầu ta được

$$\frac{d^2\phi}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{d\phi}{dr}+B^2\phi=0$$

ϕ phải thỏa mãn các điều kiện biên bao gồm điều kiện $\phi(R)=0$

Lò phản ứng dạng hình trụ vô hạn (2)

Phương trình lò là một trường hợp đặc biệt của *hàm Bessel*

$$\frac{d^2\phi}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{d\phi}{dr}+(B^2-\frac{m^2}{r^2})\phi=0$$

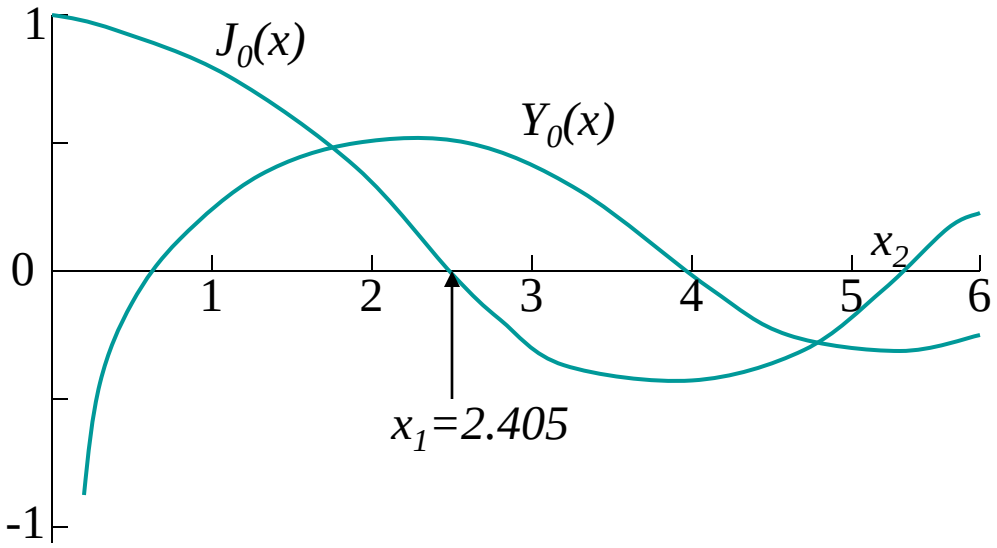
m là hằng số. Phương trình vi phân bậc hai này có hai nghiệm độc lập: $J_m(Br)$ và $Y_m(Br)$, gọi là hàm Bessel thường bậc nhất và bậc hai.

Trong phương trình lò , $m = 0$. Nghiệm tổng quát:

$$\phi = AJ_0(Br)+CY_0(Br)$$

Lò phản ứng dạng hình trụ vô hạn (3)

Các hàm Bessels được vẽ như sau



Tại $x = 0$, $J_0(0) = 1$ trong khi $Y_0(0)$ là vô cùng. Vì thế, C phải bằng không. Thông lượng sẽ là

$$\phi = AJ_0(Br)$$

Lò phản ứng dạng hình trụ vô hạn (4)

Điều kiện biên $\phi(R) = AJ_0(BR) = 0$

Phương trình này sẽ thỏa mãn với bất cứ giá trị nào

$$B_n = \frac{x_n}{R}$$

Trong một lò tới hạn, buckling bằng

$$B_1^2 = \left(\frac{x_1}{R}\right)^2 = \left(\frac{2{,}405r}{R}\right)^2$$

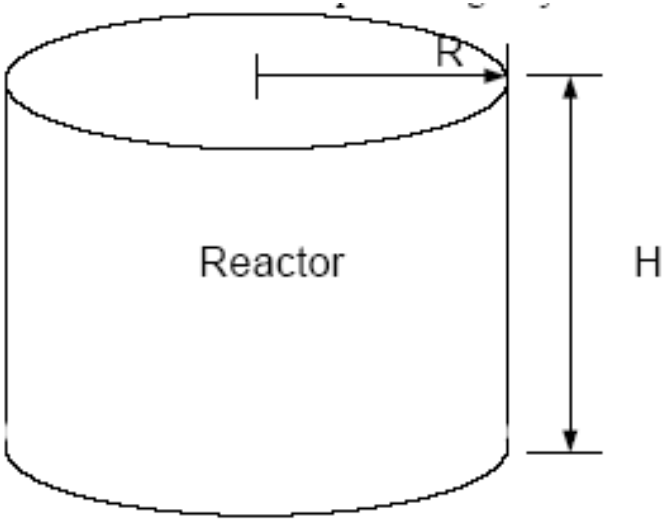
Thông lượng một nhóm sẽ là

$$\phi = AJ_0\left(\frac{2{,}405r}{R}\right)$$

A được xác định theo công suất lò, cuối cùng ta có

$$\phi = \frac{0{,}738P}{E_R \Sigma_f R^2} J_0\left(\frac{2{,}405r}{R}\right)$$

Lò phản ứng dạng hình trụ hữu hạn (1)



Phương trình lò trở thành

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{d\phi}{dr}\right)+\frac{d^2\phi}{dz^2}+B^2\phi=0$$

Lò phản ứng dạng hình trụ hữu hạn (2)

Các điều kiện biên

$$\phi(\tilde{R}, z) = 0$$

$$\phi(r, \pm \tilde{H}/2) = 0$$

Tách biến thông lượng thành hai thành phần

$$\phi(r, z) = \mathrm{R}(r)\mathrm{Z}(z)$$

Thay vào phương trình lò ta có

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{d\mathrm{R}}{dr}\right) + \alpha^2 \mathrm{R} = 0$$

$$\frac{d^2\mathrm{Z}}{dr^2} + \lambda^2 \mathrm{Z} = 0$$

Lò phản ứng dạng hình trụ hữu hạn (3)

Nghiệm của phương trình theo bán kính

$$\mathrm{R} = AJ_0(\alpha r) + \cancel{CY_0(\alpha r)}$$

Nghiệm của phương trình theo hướng trục

$$\mathrm{Z} = \cos(\lambda z)$$

với, $\alpha = \dfrac{2.405}{\tilde{R}}$ $\lambda = \left(\dfrac{\pi}{\tilde{H}}\right)$

Nghiệm đầy đủ

$$\phi = AJ_0\left(2.405r/\tilde{R}\right)\cos\left(\frac{\pi z}{\tilde{H}}\right)$$

$$A = 3.63P/VE_R\Sigma_f$$

Giá trị cực đại trên trung bình của thông lượng và công suất (1)

Giá tị cực đại của thông lượng (và do đó, công suất) trong một lò phản ứng trần, đồng nhất luôn ở tâm của lò. Trong thiết kế lò tỷ số giá trị thông lượng cực đại trên giá trị trung bình là một trong những thông số rất quan trọng.

Trong trường hợp một lò hình trụ trần, giá trị thông lượng cực đại thu được bằng cách lấy giới hạn của phương trình nghiệm khi r tiến đến không:

$$\phi_{\max} = \frac{P}{4E_R\Sigma_f R^2}\lim_{r\to 0}\frac{\sin(\pi r/R)}{r} = \frac{\pi P}{4E_R\Sigma_f R^3}$$

Giá trị cực đại trên trung bình của thông lượng và công suất (2)

Trung bình thông lượng được cho bởi

$$\phi_{\text{av}} = \frac{1}{V}\int \phi dV$$

Công suất lò

$$P = E_R \Sigma_f \int \phi dV$$

$$\Rightarrow \phi_{av} = \frac{P}{E_R \Sigma_f V}$$

Kết quả này đúng cho tất cả các dạng hình học. Tính tỷ lệ thông lượng cực đại trên trung bình cho lò hình cầu

$$\Omega = \frac{\phi_{\max}}{\phi_{\text{av}}} = \frac{\pi^2}{3} = 3{,}29$$

Giá trị cực đại trên trung bình của thông lượng và công suất (3)

Giá trị bucklings và thông lượng đối với các lò phản ứng trần tới hạn

Geometry	Dimensions	Buckling	Flux	A	$\frac{\phi_{max}}{\phi_{av}}$
Infinite Slab	a	$\left(\frac{\pi}{a}\right)^2$	$A\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$	$1{,}57P/aE_R\Sigma_f$	1,57
Regt. Parallelepiped	$a\times b\times c$	$\left(\frac{\pi}{a}\right)^2+\left(\frac{\pi}{b}\right)^2+\left(\frac{\pi}{c}\right)^2$	$A\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{\pi z}{c}\right)$	$3{,}87P/VE_R\Sigma_f$	3,88
Infinite Cylinder	R	$\left(\frac{2{,}405}{R}\right)^2$	$AJ_0\left(\frac{2{,}405r}{R}\right)$	$0{,}738P/R^2E_R\Sigma_f$	2,32
Finite Cylinder	R H	$\left(\frac{2{,}405}{R}\right)^2+\left(\frac{\pi}{H}\right)^2$	$AJ_0\left(\frac{2{,}405r}{R}\right)\cos\left(\frac{\pi z}{H}\right)$	$13{,}63P/VE_R\Sigma_f$	3,64
Sphere	R	$\left(\frac{\pi}{R}\right)^2$	$A\frac{1}{r}\sin\left(\frac{\pi r}{R}\right)$	$P/4R^2E_R\Sigma_f$	3,29

LPƯ Đà lạt trước khi thay NL: 2,63

Phương trình tới hạn một nhóm (1)

Như ta đã thấy rằng một điều kiện cần để một lò phản ứng tới hạn là

$$B^2 = \frac{k_\infty - 1}{L^2} = B_1^2$$

Phương trình tới hạn (critical equation) một nhóm

$$\frac{k_\infty}{1 + B^2 L^2} = 1$$

Số neutron bị hấp thụ trong một lò trần tới hạn là

$$\Sigma_a \int_V \phi dV$$

Số neutron bị rò thoát ra khỏi hệ

$$-D \int_V \nabla^2 \phi dV = DB^2 \int_V \phi dV$$

Từ phương trình lò 1 nhóm

$$\nabla^2 \phi + B^2 \phi = 0$$

Phương trình tới hạn một nhóm (2)

Xác suất để một neutron sẽ bị hấp thụ (không rò)

$$P_L = \frac{\Sigma_a \int_V \phi dV}{\Sigma_a \int_V \phi dV + DB^2 \int_V \phi dV} = \frac{\Sigma_a}{\Sigma_a + DB^2} \quad \Rightarrow \quad (P_L = \frac{1}{1 + B^2 L^2})$$

Phương trình tới hạn được viết lại: $k_\infty P_L = 1$

⇨ Từ $\Sigma_a \int_V \phi dV$ neutrons bị hấp thụ dẫn đến

$P_L k_\infty \Sigma_a \int_V \phi dV$ neutrons bị hấp thụ trong thế hệ tiếp theo

Từ định nghĩa hệ số nhân, ta có

$$k = \frac{P_L k_\infty \Sigma_a \int_V \phi dV}{\Sigma_a \int_V \phi dV} = k_\infty P_L$$

Hệ số nhân = hệ số nhân vô cùng * xác suất không rò

Lò (pư) (dùng neutron) nhiệt (1)
Công thức 4 thừa số (four-factor formula)

Xét một lò phản ứng vô hạn gồm một hỗn hợp nhiên liệu và chất làm chậm đồng nhất. Tiết diện hấp thụ neutron nhiệt vĩ mô của hỗn hợp:

$$\overline{\Sigma}_a = \overline{\Sigma}_{aF} + \overline{\Sigma}_{aM}$$

Phần hấp thụ trong nhiên liệu gọi là *hệ số sử dụng nhiệt (thermal utilization)* trong lò nhiệt

$$f = \frac{\overline{\Sigma}_{aF}}{\overline{\Sigma}_a} = \frac{\overline{\Sigma}_{aF}}{\overline{\Sigma}_{aF} + \overline{\Sigma}_{aM}}$$

$f\overline{\Sigma}_a\phi_T$ neutron hấp thụ trong nhiên liệu [#/cm^3.s]

⇨ $\eta_T f\overline{\Sigma}_a\phi_T$ neutron phân hạch phát ra [#/cm^3.s]

Lò nhiệt (2)
Công thức bốn thừa số (tt)

η_T là *số neutron trung bình phát ra khi một neutron nhiệt bị hấp thụ trong nhiên liệu*

$$\eta_T = \frac{\int \eta(E)\sigma_{aF}(E)\phi(E)dE}{\int \sigma_{aF}(E)\phi(E)dE}$$

Thông thường trong các lò nhiệt có một lượng lớn ^{238}U, một tỷ lệ nhỏ các phân hạch được gây ra bởi các neutron nhanh.

$$\varepsilon = \frac{\text{fast fission neutrons} + \text{thermal fission neutrons}}{\text{thermal fission neutrons}}$$

ε là *hệ số nhân hạch nhanh (fast fission factor)*

Tổng số neutron phân hạch [#/cm^3.s]:

$$\varepsilon\eta_T f\bar{\Sigma}_a\phi_T$$

Lò nhiệt (3)
Công thức bốn thừa số (tt)

Trong một lò vô hạn: Tất cả các neutron nhân hạch phải bị hấp thụ đâu đó trong lò (không rò).

Trong lò nhiệt: Hầu hết các neutron bị hấp thụ sau khi làm chậm đến năng lượng nhiệt.

Một số neutron có thể bị hấp thụ trong khi làm chậm bởi các hạt nhân có hấp thụ cộng hưởng. Chỉ có

$$p\varepsilon\eta_T f\overline{\Sigma}_a\phi_T$$

neutron được làm chậm đến năng lượng nhiệt. p được gọi là xác suất thoát cộng hưởng *(resonance escape probability)* và là một trong các hệ số quan trọng nhất trong thiết kế một lò nhiệt.

Lò nhiệt (4)
Công thức bốn thừa số (tt)

Từ $\overline{\Sigma}_a \phi_T$ neutron nhiệt bị hấp thụ dẫn đến

$p\varepsilon\eta_T f\overline{\Sigma}_a \phi_T$ neutron nhiệt mới được sinh ra,

và tất cả phải bị hấp thụ trong một lò vô hạn.

Hệ số nhân (vô hạn) của lò:

$$k_\infty = \frac{p\varepsilon\eta_T f\overline{\Sigma}_a \phi_T}{\overline{\Sigma}_a \phi_T} = \eta_T fp\varepsilon$$

gọi là *công thức bốn thừa số (four-factor formula)*.

(Thêm hai thừa số về xác suất tránh rò của neutron nhanh và neutron nhiệt ta có *công thức 6-thừa số:*

$$k = \frac{p\varepsilon\eta_T f\overline{\Sigma}_a \phi_T}{\overline{\Sigma}_a \phi_T} = \eta_T fp\varepsilon P_{FNL} P_{TNL}$$

Lò nhiệt (5)
Tính toán tới hạn

Phương pháp một nhóm chỉ cho những đánh giá thô kích thước hoặc thành phần tới hạn của một lò nhiệt. Thông thường để mô tả lò nhiệt người ta dùng hai nhóm: *neutron nhanh (fast)* với năng lượng trên vùng năng lượng nhiệt; và *neutron nhiệt (thermal).*

Giả sử rằng: Không có sự hấp thụ neutron trong nhóm nhanh, hấp thụ cộng hưởng được tính đến bởi xác suất thoát cộng hưởng; Neutron mất đi từ nhóm nhanh chỉ là kết quả của sự tán xạ vào nhóm nhiệt.

Hầu hết phân hạch được giả thiết từ nhóm nhiệt. Phân hạch nhanh được tính đến trong hệ số phân hạch nhanh.

Lò nhiệt (6)
Tính toán tối hạn (tt)

Neutron phân hạch phát ra trong mỗi cm^3/s:

$$\eta_T f \varepsilon \overline{\Sigma}_a \phi_T = (k_\infty / p) \overline{\Sigma}_a \phi_T$$

Mật độ nguồn của nhóm nhanh:

$$s_1 = \frac{k_\infty}{p} \overline{\Sigma}_a \phi_T$$

Thay nguồn này vào trong phương trình khuếch tán nhóm của nhóm nhanh

$$D_1 \nabla^2 \phi_1 - \Sigma_1 \phi_1 + \frac{k_\infty}{p} \overline{\Sigma}_a \phi_T = 0$$

Do không có hấp thụ cộng hưởng, $\Sigma_1 \phi_1$ [#/cm^2.s] tán xạ ra khỏi nhóm và sẽ xuất hiện như là nguồn neutron trong phương trình thông lượng nhiệt. Tính đến hấp thụ cộng hưởng, chỉ có $p\Sigma_1 \phi_1$ đi vào nhóm nhiệt.

Lò nhiệt (7)
Tính toán tới hạn (tt)

Số hạng nguồn neutron nhiệt:

$$s_T = p\Sigma_1\phi_1$$

Phương trình khuếch tán neutron nhiệt (thermal diffusion equation):

$$\overline{D}\nabla^2\phi_T - \overline{\Sigma}_a\phi_T + p\Sigma_1\phi_1 = 0$$

Hai phương trình khuếch tán này là *hệ phương trình hai nhóm (two-group equations)* mô tả lò nhiệt trần:

$$\begin{cases} D_1\nabla^2\phi_1 - \Sigma_1\phi_1 + \dfrac{k_\infty}{p}\overline{\Sigma}_a\phi_T = 0 \\ \overline{D}\nabla^2\phi_T - \overline{\Sigma}_a\phi_T + p\Sigma_1\phi_1 = 0 \end{cases}$$

Lò nhiệt (8)
Tính toán tới hạn (tt)

Trong một lò trần tất cả thông lượng nhóm có cùng sự phụ thuộc không gian, thông lượng hai nhóm có thể viết như sau

$$\phi_1 = A_1\phi$$
$$\phi_T = A_2\phi$$

A_1 và A_2 là hằng số, và ϕ thỏa mãn phương trình

$$\nabla^2\phi + B^2\phi = 0$$

Thay các phương trình này vào hệ phương trình khuếch tán hai nhóm ta được

$$\begin{cases} -(D_1B^2 + \Sigma_1)A_1 + \dfrac{k_\infty}{p}\overline{\Sigma}_a A_2 = 0 \\ p\Sigma_1 A_1 - (\overline{D}B^2 + \overline{\Sigma}_a)A_2 = 0 \end{cases}$$

Lò nhiệt (9)
Tính toán tới hạn (tt)

Đây là hệ phương trình đại số tuyến tính với hai ẩn số A_1 và A_2 và có nghiệm không tầm thường chỉ khi định thức của các hệ số nhân A_1 và A_2 triệt tiêu, nghĩa là

$$\begin{vmatrix} -(D_1 B^2 + \Sigma_1) & \dfrac{k_\infty}{p}\overline{\Sigma}_a \\ p\Sigma_1 & -(\overline{D}B^2 + \overline{\Sigma}_a) \end{vmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow \quad k_\infty \overline{\Sigma}_a \Sigma_1 - (\overline{D}B^2 + \overline{\Sigma}_a)(D_1 B^2 + \Sigma_1) = 0$$

$$\Rightarrow \quad \frac{k_\infty \Sigma_1 \overline{\Sigma}_a}{(D_1 B^2 + \Sigma_1)(\overline{D}B^2 + \overline{\Sigma}_a)} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{k_\infty}{(1 + B^2 L_T^2)(1 + B^2 \tau_T)} = 1$$

$$\left[\quad L_T^2 = \frac{\overline{D}}{\overline{\Sigma}_a} \qquad \tau_T = \frac{D_1}{\Sigma_1} \quad \right]$$

Lò nhiệt (10)
Tính toán tới hạn (tt)

Trong phương trình tới hạn hai nhóm đối với một lò nhiệt trần

$$\frac{k_\infty}{(1+B^2L_T^2)(1+B^2\tau_T)}=1$$

hệ số

$$P_T=\frac{1}{1+B^2L_T^2}$$

là *xác suất một neutron nhiệt không rò* thoát khỏi lò

hệ số

$$P_F=\frac{1}{1+B^2\tau_T}$$

là *xác suất để một neutron phân hạch không rò* thoát khỏi lò trong quá trình làm chậm.

⇨ $k=k_\infty P_T P_F$ ⇨ phương trình tới hạn: $k=1$

"effective"

Lò nhiệt (11)
Tính toán tới hạn (tt)

Vì các lò phản ứng được thiết kế sao cho các neutron rò thoát ít nhất có thể, cả P_T và P_F là rất gần bằng một, nên $B^2 L_T^2$ và $B^2 \tau_T$ là rất nhỏ.

$$\frac{k_\infty}{1 + B^2 (L_T^2 + \tau_T)} = 1$$

hay là

$$\frac{k_\infty}{1 + B^2 M_T^2} = 1$$

$M_T^2 = L_T^2 + \tau_T$

Diện tích di cư nhiệt (thermal migration area)

Phương trình này gọi là *phương trình tới hạn một nhóm sửa đổi (modified one-group critical equation)*, có dạng giống phương trình tới hạn một nhóm

$$\frac{k_\infty}{1 + B^2 L^2} = 1$$

Lò nhiệt (12)
Tính toán tới hạn (tt)

Thông lượng neutron nhiệt được cho bởi cùng phương trình như trong tính toán một nhóm.

$$\nabla^2\phi_T + B^2\phi_T = 0$$

với B^2 là buckling. Sự khác nhau duy nhất giữa tính toán một nhóm thông thường và một nhóm sửa đổi cho một lò trần là: L_T^2 được thay bằng M_T^2

Lưu ý: Nếu τ_T nhỏ hơn nhiều so với L_T^2 chúng ta có thể sử dụng tính toán một nhóm thông thường với sai số nhỏ (như các trường hợp làm chậm bằng D_2O và Graphite.

Comparison of τ_T and L_T^2		
Moderator	τ_T	L_T^2
Light Water	27	8.1
Heavy Water	131	9600
Be	102	480
Graphite	368	3500

Lò nhiệt (13)
Áp dụng

Đánh giá thành phần tới hạn hoặc kích thước tới hạn của một lò nhiệt trần (?)

Xét một lò gồm một hỗn hợp đồng nhất của một đồng vị phân hạch và chất làm chậm (không có chất hấp thụ cộng hưởng hoặc phân hạch nhanh).

$$k_\infty = \eta_T f$$

Có hai tình huống:

(1)Kích thước vật lý đã xác định. Thành phần tới hạn?

(2)Thành phần xác định. Kích thước tới hạn?

Lò nhiệt (14)

Áp dụng: *Trường hợp 1: Kích thước xác định*

Với kích thước cho trước, B^2 có thể tính được. Thành phần phải được hiệu chỉnh sao cho k_∞ và M_T^2 có giá trị cần thiết thỏa mãn phương trình tới hạn.

Đưa vào tham số Z được định nghĩa như sau

$$Z = \frac{\overline{\Sigma}_{aF}}{\overline{\Sigma}_{aM}} = \frac{N_F \overline{\sigma}_{aF}}{N_M \overline{\sigma}_{aM}}$$

Hệ số sử dụng nhiệt được viết $f = \dfrac{Z}{Z+1}$

$$k_\infty = \eta_T f \quad \Rightarrow \quad k_\infty = \frac{\eta_T Z}{Z+1}$$

Để ý diện tích khuếch tán neutron nhiệt

$$L_T^2 = \frac{\overline{D}}{\overline{\Sigma}_a}$$

$$f = \frac{\overline{\Sigma}_{aF}}{\overline{\Sigma}_{aF} + \overline{\Sigma}_{aM}}$$

Lò nhiệt (15)

Áp dụng: *Trường hợp 1: Kích thước xác định (tt)*

$\overline{D}$ và $\overline{\Sigma}_a$:của hỗn hợp nhiên liệu và chất làm chậm,

Nhưng do nồng độ nhiên liệu trong chất làm chậm thường là nhỏ trong các lò nhiệt đồng nhất. Vì vậy,

$$\overline{D} = \overline{D}_M$$

$$\Rightarrow L_T^2 = \frac{\overline{D}_M}{\overline{\Sigma}_a} = \frac{\overline{D}_M}{\overline{\Sigma}_{aF} + \overline{\Sigma}_{aM}}$$

$$f = \frac{Z}{Z+1}$$

$$L_T^2 = \frac{L_{TM}^2}{Z+1}$$

Diện tích khuếch tán nhiệt của chất làm chậm

$$L_T^2 = (1-f)L_{TM}^2$$

Lò nhiệt (16)

Áp dụng: *Trường hợp 1: Kích thước xác định (tt)*

Vì D, τ_T phụ thuộc vào các tính chất tán xạ của môi trường. Trong một lò đồng nhất vật liệu phân hạch thường nhỏ hơn chất làm chậm. Do đó

$$\tau_T \longrightarrow \tau_{TM}$$

$$\frac{\eta_T Z}{Z+1+B^2(L_{TM}^2+Z\tau_{TM}+\tau_{TM})}=1$$

$$Z=\frac{1+B^2(L_{TM}^2+\tau_{TM})}{\eta_T-1-B^2\tau_{TM}}$$

Đưa biểu thức của k_∞ và L_T^2 ivào phương trình tới hạn

$$\frac{k_\infty}{1+B^2M_T^2}=1$$

Đây là giá trị Z dẫn đến một lò phản ứng tới hạn với giá trị xác định của B^2

Lò nhiệt (17)

Áp dụng: *Trường hợp 1: Kích thước xác định (tt)*

Sử dụng giá trị của Z vừa rồi để xác định khối lượng nhiên liệu đòi hỏi để đạt tới hạn *(critical mass)*. Từ định nghĩa của Z, mật độ nguyên tử của nhiên liệu:

$$N_F = Z \frac{\bar{\sigma}_{aM}}{\bar{\sigma}_{aF}} N_M$$

Khối lượng nhiên liệu

$$m_F = \frac{N_F V M_F}{N_A}$$

$$= Z \frac{\bar{\sigma}_{aM} V M_F}{\bar{\sigma}_{aF} N_A} N_M$$

Thể tích lò PU

Khối lượng nguyên tử của nhiên liệu

Hằng số Avogadro

Lò nhiệt (18)

Áp dụng: *Trường hợp 1: Kích thước xác định (tt)*

Tổng khối lượng của chất làm chậm là:

$$m_M = \frac{N_M V M_M}{N_A}$$

$$m_F = Z \frac{\bar{\sigma}_{aM} M_F}{\bar{\sigma}_{aF} M_M} m_M$$

$$\Rightarrow \quad m_F = Z \frac{\sigma_{aM}(E_0) M_F}{g_{aF}(T) \sigma_{aF}(E_0) M_M} m_M$$

Lưu ý: hệ số non-1/v của chất làm chậm được lấy bằng đơn vị, E_0 = 0.0253 eV

Lò nhiệt (19)

Áp dụng: *Trường hợp 2: Thành phần xác định*

Với thành phần đã biết, k_∞ và M_T^2 có thể tính được trực tiếp. Từ phương trình tới hạn

$$\frac{k_\infty}{1+B^2M_T^2}=1$$

$$\Rightarrow \quad B^2=\frac{k_\infty-1}{M_T^2}$$

Nếu dạng hình học của lò được xác định, kích thước xác định được từ công thức tương ứng của B^2.

Lò phản ứng có phản xạ (1)

Nếu bao bọc xung quanh một vùng hoạt lò phản ứng bằng một vành phản xạ *reflector* (dày, vùng chất làm chậm không chứa nhiên liệu), sự tiết kiệm neutron sẽ tăng lên. Vì vậy khối lượng tới hạn sẽ giảm xuống.

Xét lò hình cầu bán kính vùng hoạt R và vành phản xạ vô hạn. Theo lý thuyết một nhóm

$$\nabla^2\phi_c + B^2\phi_c = 0 \qquad \left[B^2 = \frac{k_\infty - 1}{L_c^2}\right]$$

$$\nabla^2\phi_r - \frac{1}{L_r^2}\phi_r = 0 \quad \text{(không có nhiên liệu)}$$

Thông lượng trong vùng hoạt

$$\phi_c = A\frac{\sin Br}{r} + C\frac{\cos Br}{r}$$

$C=0$ thỏa B.C.: ϕ_c là hữu hạn tại $r=0$

Lò phản ứng có phản xạ (2)

Nghiệm tổng quát của phương trình khuếch tán của vành phản xạ

$$\phi_r = A'\frac{e^{-r/L_r}}{r} + C'\frac{e^{r/L_r}}{r}$$

$C=0$ thỏa B.C.: ϕ_c là hữu hạn khi r vô hạn

Dùng điều kiện biên trên mặt tiếp xúc

$$\begin{cases} \phi_c(R) = \phi_r(R) \\ J_c(R) = J_r(R) \quad \text{hay} \quad D_c\phi_c'(R) = D_r\phi_r'(R) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A\dfrac{\sin BR}{R} = A'\dfrac{e^{-R/L_r}}{R} \\ AD_c\left(\dfrac{B\cos BR}{R} - \dfrac{\sin BR}{R^2}\right) = -A'D_r\left(\dfrac{1}{RL_r} + \dfrac{1}{R^2}\right)e^{-R/L_r} \end{cases}$$

Đây là hệ phương trình tuyến tính đồng nhất của hai nghiệm A và A'

Lò phản ứng có phản xạ (3)

Để định thức của các hệ số triệt tiêu, ta có

$$D_c\left(B\cot BR-\frac{1}{R}\right)=-D_r\left(\frac{1}{L_r}+\frac{1}{R}\right)$$

Ph.tr. siêu việt

$$B^2=\frac{k_\infty-1}{M_T^2}$$

$$BR\cot BR-1=-\frac{D_r}{D_c}\left(\frac{R}{L_r}+1\right)$$

Biết thành phần tâm lò

Tính được B

Xác định được R

Xác định được Tp

Tính được B

R được chọn trước

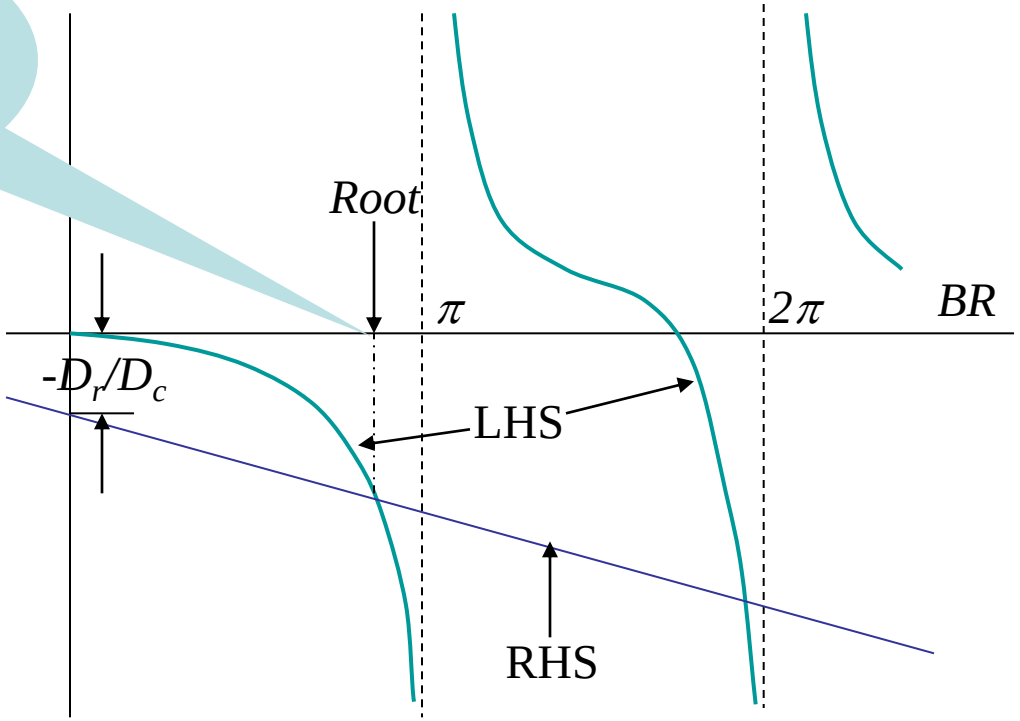
Lò phản ứng có phản xạ (4)

Giải phương trình bằng phương pháp đồ thị

$$BR\cot BR - 1 = -\frac{D_r}{D_c}\left(\frac{R}{L_r} + 1\right)$$

BK lò có VPX < BK lò trần

Biết BR, B có thể tính R (bán kính tới hạn)



Lò phản ứng có phản xạ (4)

Trường hợp đặc biệt, chất làm chậm trong vùng hoạt và trong vành phản xạ là giống nhau thì $D_r = D_c$

$$BR\cot BR - 1 = -\frac{D_r}{D_c}\left(\frac{R}{L_r}+1\right) \quad \Rightarrow \quad B\cot BR = -\frac{1}{L_r}$$

Phương trình này không phải là phương trình siêu việt theo R. Nếu biết B, R có thể tính trực tiếp

Vì có mối quan hệ ta chỉ cần xác định A hoặc A'. Các hằng số này có thể tính được từ công suất lò.

$$P = E_R \Sigma_f \int \phi_c dV$$

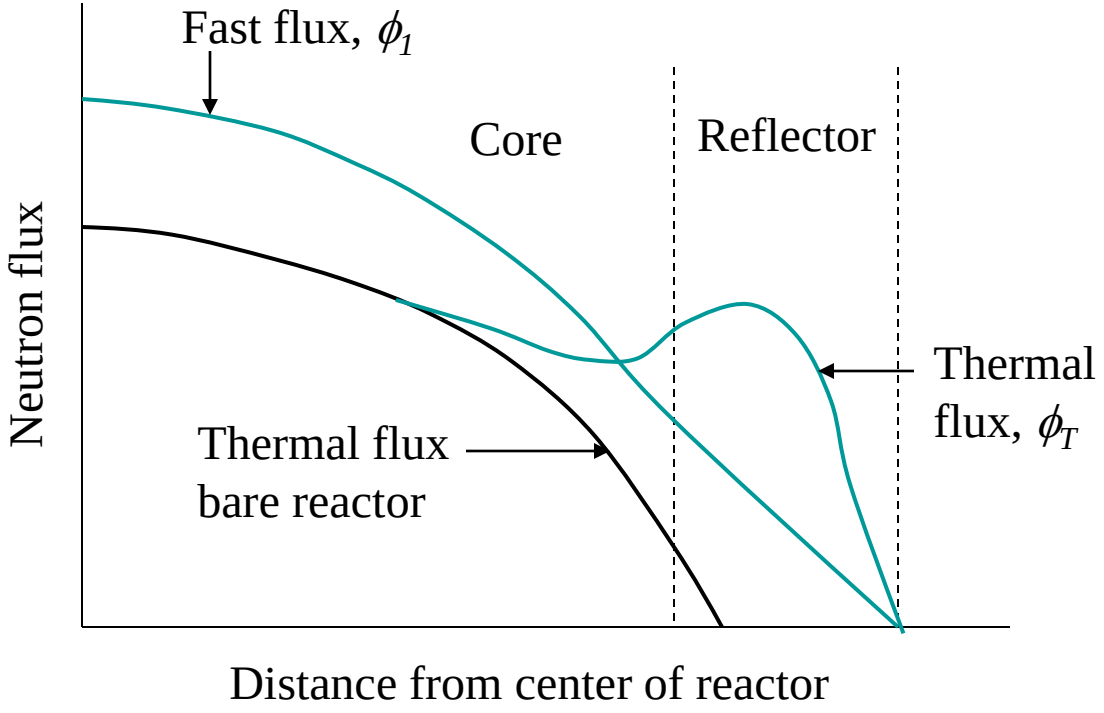
$A' = Ae^{R/L_r}\sin BR$

$\phi_c = A\dfrac{\sin Br}{r}$

$$\Rightarrow \quad A = \frac{PB^2}{4\pi E_R \Sigma_f (\sin BR - BR\cos BR)}$$

Lò phản ứng có phản xạ (5)

Thông lượng trong lò nhiệt có phản xạ



Một vành phản xạ không chỉ giảm kích thước và khối lượng tới hạn của lò mà còn làm giảm tỷ số cực đại trên trung bình của thông lượng.

Lò phản ứng có phản xạ (6)

Reflector savings

Độ giảm kích thước tới hạn của vùng hoạt lò nhờ một vành phản xạ gọi là *reflector savings*. Đối với một lò hình cầu

$$\delta = R_0 - R$$

Nếu biết vành phản xạ, chỉ cần xác định bán kính tới hạn trần R_0 thì bán kính vùng hoạt có phản xạ sẽ là $R = R_0 - \delta$. Muốn biết δ cần thực hiện tính toán giải tích hay thực nghiệm với bài toán lò có phản xạ.

Vành phản xạ δ là tương đối nhạy với sự thay đổi của thành phần trong lò. Điều này có nghĩa là δ được xác định cho một lò sau đó giá trị này cũng dùng được cho một lò khác có thành phần tương tự.

Lò phản ứng có phản xạ (7)
Reflector savings (tt)

Với mục đích thực hiện tính toán thô về kích thước và khối lượng tới hạn của các lò nhiệt (ngoại trừ phản xạ bằng H_2O), công thức đơn giản sau có thể sử dụng

$$\delta \cong \frac{\overline{D}_c}{\overline{D}_r} L_{Tr}$$

Vành phản xạ xem như vô hạn

Đối với hệ làm chậm và phản xạ bằng nước, công thức thực nghiệm phát triển bởi R. W. Deutsch có thể dùng để thu được reflector savings

$$\delta = 7{,}2 + 0{,}10(M_T^2 - 40{,}0)$$

[cm]

Diện tích khuếch tán trong tâm lò [cm^2]

Tính toán nhiều nhóm (1)

Trong phần trước "Khuếch tán và làm chậm neutron", chúng ta đã thu được phương trình khuếch tán dừng cho nhóm neutron thứ *g:*

$$D_g \nabla^2 \phi_g - \Sigma_{af} \phi_g - \sum_{h=g+1}^{N} \Sigma_{g \to h} \phi_g + \sum_{h=1}^{g-1} \Sigma_{h \to g} \phi_h = -s_g$$

Để thiết lập phương trình nhiều nhóm cho một lò tới hạn, 3 hằng số mới phải được định nghĩa:

Σ_{fg} = tiết diện phân hạch vĩ mô trung bình của nhóm;

ν_g = số neutron trung bình sinh ra từ các phân hạch gây bởi neutron nhóm thứ *g*;

χ_g = tỷ số neutron phân hạch phát ra trong nhóm thứ *g*.

Tính toán nhiều nhóm (2)

Tổng số neutron phân hạch phát ra trong tất cả các nhóm là

$$\sum_{h=1}^{N} \nu_h \Sigma_{fh} \phi_h$$

Số neutron phát ra trong nhóm thứ g_{th}

$$s_g = \chi_g \sum_{h=1}^{N} \nu_h \Sigma_{fh} \phi_h$$

Phương trình nhóm thứ *g* trong chuỗi N phương trình nhiều nhóm:

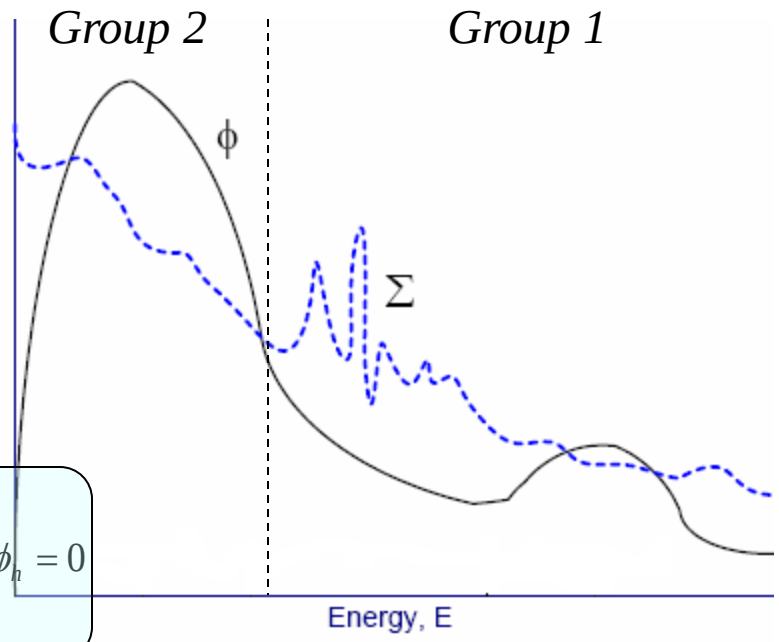
$$D_g \nabla^2 \phi_g - \Sigma_{ag} \phi_g - \sum_{h=g+1}^{N} \Sigma_{g \to h} \phi_g + \sum_{h=1}^{g-1} \Sigma_{h \to g} \phi_g + \chi_g \sum_{h=1}^{N} \nu_h \Sigma_{fh} \phi_h = 0$$

Đối với một lò phản ứng thông thường có vài vùng với tính chất vật liệu khác nhau sẽ có một chuỗi phương trình tương tự cho mỗi vùng.

Tính toán nhiều nhóm (3)

Phương trình hai nhóm

- Neutrons chỉ phát ra trong nhóm 1(fast)
- Phân hạch chỉ xảy ra trong nhóm 2
- Không có up-scattering



$$D_g \nabla^2 \phi_g - \Sigma_{ag}\phi_g - \sum_{h=g+1}^{N} \Sigma_{g\to h}\phi_g + \sum_{h=1}^{g-1} \Sigma_{h\to g}\phi_g + \chi_g \sum_{h=1}^{N} \nu_h \Sigma_{fh}\phi_h = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} D_1 \nabla^2 \phi_1 - \Sigma_{a1}\phi_1 - \Sigma_{1\to 2}\phi_1 + \nu\Sigma_f \phi_2 = 0 \\ D_2 \nabla^2 \phi_2 - \Sigma_{a2}\phi_2 + \Sigma_{1\to 2}\phi_1 = 0 \end{cases}$$

Lò không đồng nhất (1)

Cho tới bây giờ chúng ta vẫn giả thiết rằng: vùng hoạt lò phản ứng bao gồm một hỗn hợp đồng nhất chất phân hạch, chất làm nguội và chất làm chậm (đối với lò nhiệt). Nhưng trong hầu hết các lò phản ứng, nhiên liệu chứa trong *thanh nhiên liệu* (*fuel rods*: plate, pin rod), vì thế nó *không đồng nhất (heterogeneous)*. Các lò phản ứng như vậy được chia thành 2 loại:

gần đồng nhất (quasi-homogeneous): quãng đường tự do trung bình tại tất cả các năng lượng là lớn so với độ dày của thanh nhiên liệu.

không đồng nhất: quãng đường tự do trung bình của tất cả các năng lượng là tương đương hoặc nhỏ hơn độ dày của thanh nhiên liệu.

Lò không đồng nhất (2)

Trên quan điểm về neutron, một lò gần đồng nhất trên thực tế là đồng nhất, các công thức đã phát triển trong các phần trước cho các hệ đồng nhất có thể sử dụng được cho các lò gần đồng nhất.

Các tính toán cho các lò không đồng nhất là phức tạp hơn nhiều. Tuy nhiên vẫn có thể viết công thức bốn thừa số

$$k_\infty = \eta_T \, f p \varepsilon$$

và có thể sử dụng các phương trình cho hệ tới hạn đã dẫn ra trước đây nhưng các hệ số trong các công thức này với một số lưu ý.

Lò không đồng nhất (3)

Giá trị η_T

Nhiên liệu trong hầu hết các lò phản ứng được coi là hỗn hợp của ^{235}U, ^{238}U và Oxy nên

$$\eta_T = \frac{\nu_{25}\overline{\Sigma}_{f25}}{\overline{\Sigma}_{a25} + \overline{\Sigma}_{a28}}$$

Tiết diện hấp thụ bé

Lò không đồng nhất (4)

Hệ số sử dụng nhiệt

$$f = \frac{\overline{\Sigma}_{aF}\overline{\phi}_{TF}V_F}{\overline{\Sigma}_{aF}\overline{\phi}_{TF}V_F + \overline{\Sigma}_{aM}\overline{\phi}_{TM}V_M}$$

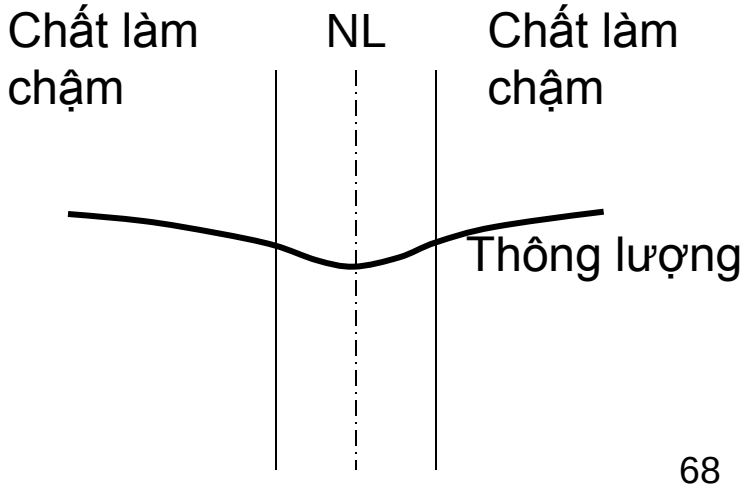
Chia tử và mẫu cho $\overline{\phi}_{TF}$

$$f = \frac{\overline{\Sigma}_{aF}V_F}{\overline{\Sigma}_{aF}V_F + \overline{\Sigma}_{aM}V_M\zeta}$$

Hệ số suy giảm nhiệt

$$\zeta = \overline{\phi}_{TM} / \overline{\phi}_{TF}$$

Vì tiết diện hấp thụ của nhiên liệu cao hơn nhiều so với chất làm chậm, $\phi_{TF} < \phi_{TM}$, nên $\zeta > 1$



Lò không đồng nhất (5)

Xác suất thoát cộng hưởng

Xác suất thoát cộng hưởng có thể biểu thị một cách xấp xỉ bởi công thức sau (từ thực nghiệm):

$$p = \exp\left[\frac{N_F V_F I}{\xi_M \Sigma_{sM} V_M}\right]$$

Sự tăng trung bình lethargy trên một va chạm trong chất làm chậm

Tích phân cộng hưởng (Resonance integral) đối với thanh nhiên liệu hình trụ

$$I = A + C/\sqrt{a\rho}$$

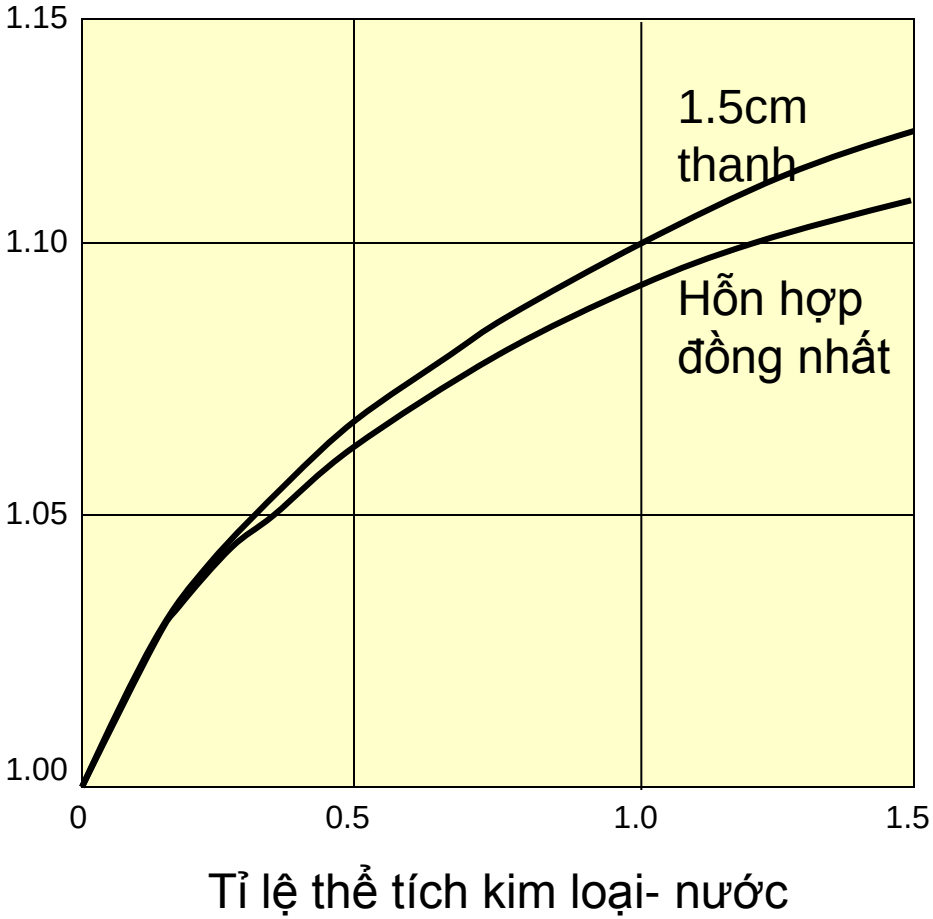
a - Bán kính của thanh NL
ρ - Mật độ của nhiên liệu

Lò không đồng nhất (6)

Hệ số phân hạch nhanh

Hệ số phân hạch nhanh là một hàm của tỷ số thể tích kim loại/nước đối với nhiên liệu độ giàu thấp.

ε tăng khi tỷ số uran/nước tăng



Lò không đồng nhất (7)

Hệ số nhân vô cùng k_∞

$$f_{\text{hetero}} = \frac{\overline{\Sigma}_{aF} V_F}{\overline{\Sigma}_{aF} V_F + \overline{\Sigma}_{aM} V_M \zeta}$$

$\zeta > 1$, ⟹ $f_{hetero} < f_{homo}$

$\zeta = 1$ $f_{hetero} = f_{homo}$

Thông lượng bên trong nhiên liệu thấp hơn trong chất làm chậm do hiệu ứng *tự che chắn (self-shielding)*

Trong khi tự che chắn làm giảm sự hấp thụ neutron nhiệt trong nhiên liệu nó cũng làm giảm số neutron bị hấp thụ do các chất hấp thụ cộng hưởng trong nhiên liệu. Vì thế xác suất thoát cộng hưởng của một hệ không đồng nhất lớn hơn hỗn hợp đồng nhất tương đương.

$p_{hetero} > p_{homo}$

Lò không đồng nhất (8)

Hệ số nhân vô cùng (tt)

Vì tiết diện hấp thụ trung bình của nhiên liệu ở năng lượng cộng hưởng lớn hơn nhiều so với tiết diện hấp thụ ở năng lượng nhiệt, sự giảm thông lượng neutron cộng hưởng lớn hơn đối với neutron nhiệt.

$$(fp)_{hetero} > (fp)_{homo}$$

Hệ số phân hạch nhanh đối với lò không đồng nhất lớn hơn hệ đồng nhất vì trong trường hợp không đồng nhất neutron đi qua vùng nhiên liệu thuần nơi chúng có thể gây ra phản ứng phân hạch nhanh trước khi tới được chất làm chậm.

$$\varepsilon_{hetero} > \varepsilon_{homo}$$

Lò không đồng nhất (9)

Hệ số nhân vô cùng (tt)

k_∞ đ/v lò đồng không đồng nhất > k_∞ của lò đồng nhất tương đương

Đúng cho nhiên liệu uran độ giàu khoảng 5%

Giá trị cực đại của k_∞ đối với một hỗn hợp uran tự nhiên và graphite đồng nhất là 0.85 trong khi trong hệ không đồng nhất k_∞ có thể lớn hơn 1 nên một lò tới hạn có thể xây dựng bởi các vật liệu này!

Ví dụ 1 (1)

Bài toán:

Tính hệ số nhân vô cùng của một hỗn hợp chứa 200 moles graphite trên mỗi mole uran độ giàu 5%. Giả sử không có phân hạch nhanh và không có chất hấp thụ cộng hưởng ($\varepsilon p = 1$)

Cho trước các số liệu hạt nhân

$$\sigma_a^{235} = 694$$

$$\sigma_f^{235} = 582$$

$$\sigma_a^{238} = 2.71$$

$$\sigma_a^{C} = 0.0034$$

$$\nu = 2.43$$

Ví dụ 1 (2)

Lời giải:

Sử dụng tỷ số nguyên tử để đơn giản bài toán

$$\frac{N238}{N235} = \frac{.95}{.05} = 19$$

$$\frac{NC}{N235} = \frac{200\ \text{moles}C/\text{mole}U}{.05\ \text{mole}U\ 235/\text{mole}U} = 4000\ \frac{\text{mole}C}{\text{mole}U\ 235}$$

$$f = \frac{\text{absorption in the fuel}}{\text{absorption in the fuel} + \text{absorption in everything else}}$$

$$f = \frac{N^{235}\sigma_a^{235} + N^{238}\sigma_a^{238}}{N^{235}\sigma_a^{235} + N^{235}\sigma_a^{235} + N^c\sigma_a^c} \Rightarrow f = \frac{\sigma_a^{235} + \frac{N^{238}}{N^{235}}\sigma_a^{238}}{\sigma_a^{235} + \frac{N^{238}}{N^{235}}\sigma_a^{235} + \frac{N^c}{N^{235}}\sigma_a^c}$$

Ví dụ 1 (3)

$$\eta = \frac{\sigma_f^{235}\nu}{\sigma_a^{235} + \frac{N^{238}}{N^{235}}\sigma_a^{238}}$$

Thay các giá trị tiết diện và số hạng sinh neutron, ta có

f=.985 and η= 1.898

k_∞= 1.869

Ví dụ 2

Bài toán:

Một lò hình cầu trần bán kính 50cm ở công suất 100MW (=10^8 J/s). Cho Σ_f = 0.0047cm^{-1}, hỏi giá trị cực đại và giá trị trung bình của thông lượng ?

Lời giải:

Giá trị cực đại của ϕ

$$\phi_{\max} = \frac{\pi P}{4 E_R \Sigma_f R^3} = \frac{\pi \times 10^8}{4 \times 3{,}2 \times 10^{-11} \times 0{,}0047 \times (50)^3}$$

$$= 4{,}18 \times 10^{15} \text{ neutron/cm}^2\text{s}$$

Giá trị trung bình

$$\phi_{\text{av}} = \frac{\phi_{\max}}{\Omega} = \frac{4{,}18 \times 10^{15}}{3{,}29} = 1{,}27 \times 10^{15} \text{ neutron/cm}^2\text{s}$$

Ví dụ 3 (1)

Bài toán:

Một cơ cấu lò nhanh chứa hỗn hợp đồng nhất ^{239}Pu và Natri có dạng hình cấu trần. Mật độ nguyên tử của các thành phần cấu tạo là $N_F = 0.00395x10^{24}$ (ngtu/cm^3) đối với ^{239}Pu và $N_S = 0.0234x10^{24}$ (ngtu/cm^3 đối với natri. Xác định bán kính tới hạn của hệ.

Các hằng số nhóm danh định đối với một lò nhanh: (barn = 10^{-24}cm^2)

Nguyên tố hay đồng vị	σ_γ	σ_f	σ_a	σ_{tr}	ν	η
Na	0,0008	0	0,0008	3,3	---	---
Al	0,002	0	0,002	3,1	---	---
Fe	0,006	0	0,006	2,7	---	---
^{235}U	0,25	1,4	1,65	6,8	2,6	2,2
^{238}U	0,16	0,095	0,255	6,9	2,6	0,97
^{239}Pu	0,26	1,85	2,,11	6,8	2,98	2,61

Ví dụ 3 (2)

Lời giải:

$$B_1^2 = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2$$

$$\frac{k_\infty - 1}{L^2} = B_1^2 \quad \Rightarrow \quad R = \pi\sqrt{\frac{L^2}{k_\infty - 1}}$$

Cần phải tính k_∞ và L^2

Sử dụng tiết diện đã cho trong bảng, ta có

$$\Sigma_{aF} = 0{,}00395 \times 2{,}11 = 0{,}00833\ \text{cm}^{-1}$$

$$\Sigma_{aS} = 0{,}0234 \times 0{,}0008 = 0{,}000019\ \text{cm}^{-1}$$

$$\Sigma_a = \Sigma_{aF} + \Sigma_{aS} = 0{,}00835\ \text{cm}^{-1}$$

$$f = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_a} = \frac{0{,}00833}{0{,}00835} \cong 1$$

$$k_\infty = \eta f \cong 2{,}61$$

Ví dụ 3 (3)

$$L^2 = D/\Sigma_a \qquad D = \frac{1}{3\Sigma_{tr}}$$

$$\Sigma_{tr} = 0{,}00395 \times 6{,}8 + 0{,}0234 \times 3{,}3 = 0{,}104\ \text{cm}^{-1}$$

$$\Rightarrow \quad D = \frac{1}{3 \times 0{,}104} = 3{,}21\ \text{cm} \quad \Rightarrow \quad L^2 = \frac{3{,}21}{0{,}00835} = 384\ \text{cm}^2$$

Thay giá trị k_∞ và L^2 vào biểu thức cho R, ta được

$$R = \pi \sqrt{\frac{384}{2{,}61 - 1}} = 48{,}5\ \text{cm}$$

[ans]

Ví dụ 4 (1)

Bài toán:

Một lò nhiệt hình cầu trần, bán kính 100cm chứa một hỗn hợp đồng nhất gồm ^{235}U và graphite. Lò tới hạn và hoạt động ở công suất 100kW. Dùng lý thuyết một nhóm sửa đổi để tính: (a) buckling; (b) khối lượng tới hạn; (c) k_∞; (d) L_T^2 ; (e) thông lượng n nhiệt. Thực hiện tính ở nhiệt độ phòng.

$$L_{TM}^2 = 3500\,\text{cm}^2 \quad \tau_{TM} = 368\,\text{cm}^2 \text{ (graphite)} \quad \eta_T = 2{,}065 \ (^{235}U)$$

$$\sigma_{aM}(E_0) = 0{,}0034\,\text{b} \quad \sigma_{aF}(E_0) = 0{,}681\,\text{b} \quad g_{aF}(T) = 0{,}987$$

$$g_{fF}(T) = 0{,}976 \quad \sigma_f(E_0) = 582\,\text{b}$$

Lời giải:

a) $B^2 = (\pi/R)^2 = (\pi/100)^2 = 9{,}88\times10^{-4}\ \text{cm}^{-2} \Rightarrow B = 3{,}14\times10^{-2}$

b) $$Z = \frac{1+B^2(L_{TM}^2+\tau_{TM})}{\eta_T - 1 - B^2\tau_{TM}} = \frac{1+9{,}88\times10^{-4}(3500+368)}{2{,}065-1-9{,}88\times10^{-4}\times368} = 6{,}87$$

Ví dụ 4 (2)

$$m_F = Z\frac{\sigma_{aM}(E_0)M_F}{g_{aF}(T)\sigma_{aF}(E_0)M_M}m_M$$

$$m_F = \frac{6{,}87\times 0{,}0034\times 235}{0{,}978\times 681\times 12}m_M = 6{,}87\times 10^{-4}\,m_M$$

Mật độ graphite xấp xỉ 1.6g/cm^3, do đó

$$m_M = \tfrac{4}{3}\pi R^3\times 1{,}60 = 6{,}70\times 10^6\ \text{g} = 6700\ \text{kg}$$

Từ đó ta có

$$m_F = 6{,}87\times 10^{-4}\times 6700 = 4{,}60\ \text{kg}$$ [ans.]

Ví dụ 4 (3)

c) $$f = \frac{Z}{Z+1} = \frac{6{,}87}{7{,}87} = 0{,}873$$

Hệ số nhân vô cùng

$$k_\infty = \eta_T f = 2{,}065 \times 0{,}873 = 1{,}803$$

d) $$L_T^2 = (1-f)L_{TM}^2 = (1-0{,}873) \times 3500 = 444\,\text{cm}^2$$

Ví dụ 4 (4)

e) Thông lượng nhiệt được cho bởi $\phi_T = A\dfrac{\sin Br}{r}$

$A = P/4R^2 E_R \overline{\Sigma}_f$

$P = 100\ \text{kW} = 10^5\ \text{J/s}$

$E_R = 3{,}2 \times 10^{-11}\ \text{J}$

$\overline{\Sigma}_f = N_F \overline{\sigma}_f$

$N_F = \dfrac{m_F N_A}{V M_F}$

$\overline{\Sigma}_f = \dfrac{m_F N_A \overline{\sigma}_f}{V M_F}$

$= \dfrac{m_F N_A}{V M_F} \times 0{,}886 g_{fF}(T)\sigma_f(E_0)$

$\overline{\Sigma}_f = 1{,}41 \times 10^{-3}\ \text{cm}^{-1}$

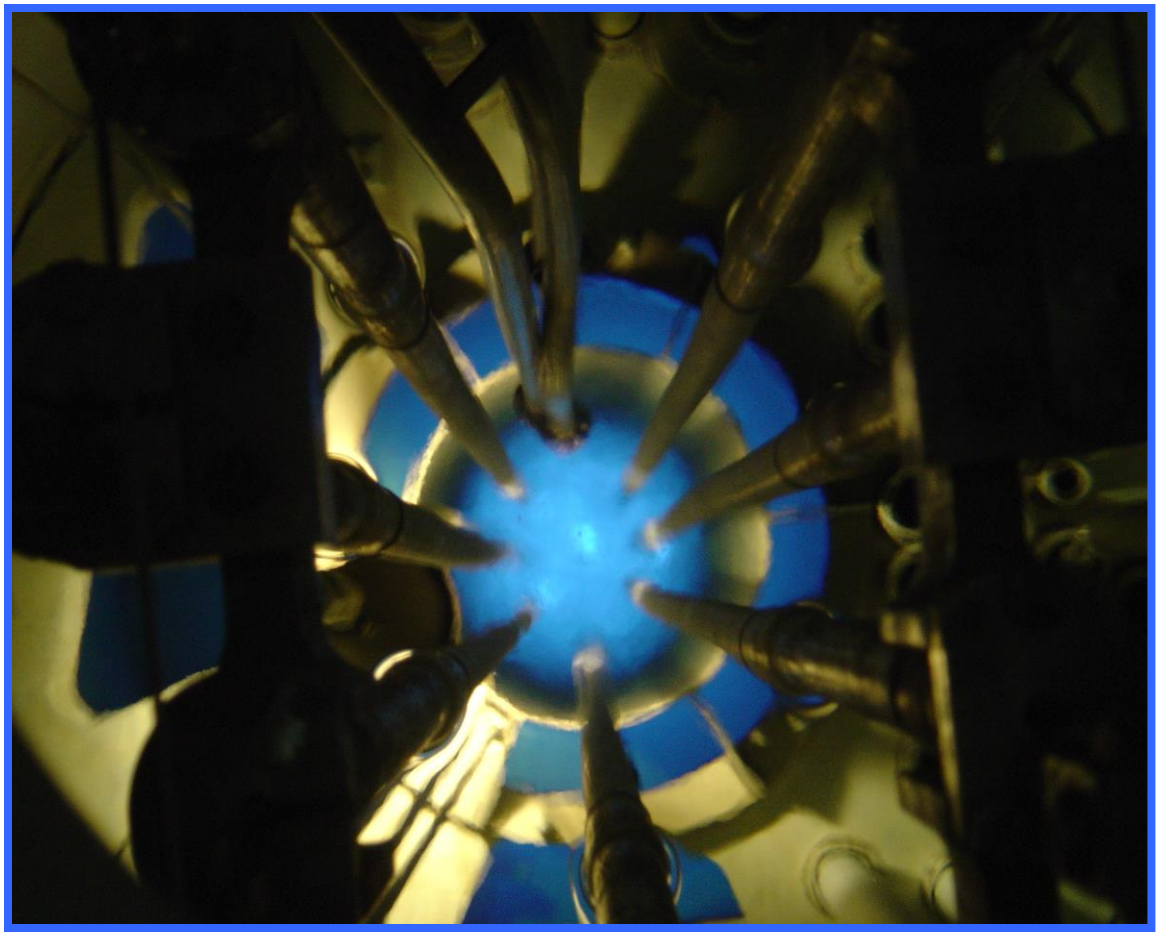
Ví dụ 4 (5)

$$A = \frac{10^5}{4\times10^4 \times 3{,}2\times10^{-11} \times 1{,}41\times10^{-3}} = 5{,}54\times10^{13}$$

$$\Rightarrow \qquad \phi_T(r) = 5{,}54\times10^{13}\,\frac{\sin Br}{r}$$

Giá trị thông lượng neutron nhiệt đạt cực đại tại *r = 0* và bằng

$$\phi_T(0) = 5{,}54\times10^{13}B = 1{,}74\times10^{12}\ \text{neutron/cm}^2\text{s}$$



Dalat Nuclear Research Reactor: Cherenkov Radiation

CHƯƠNG 8

LÒ PHẢN ỨNG PHỤ THUỘC THỜI GIAN

LPU PHỤ THUỘC TG

Động học lò

Dự đoán sự thay đổi neutron trong tâm lò khi có sự thay đổi hệ số nhân neutron

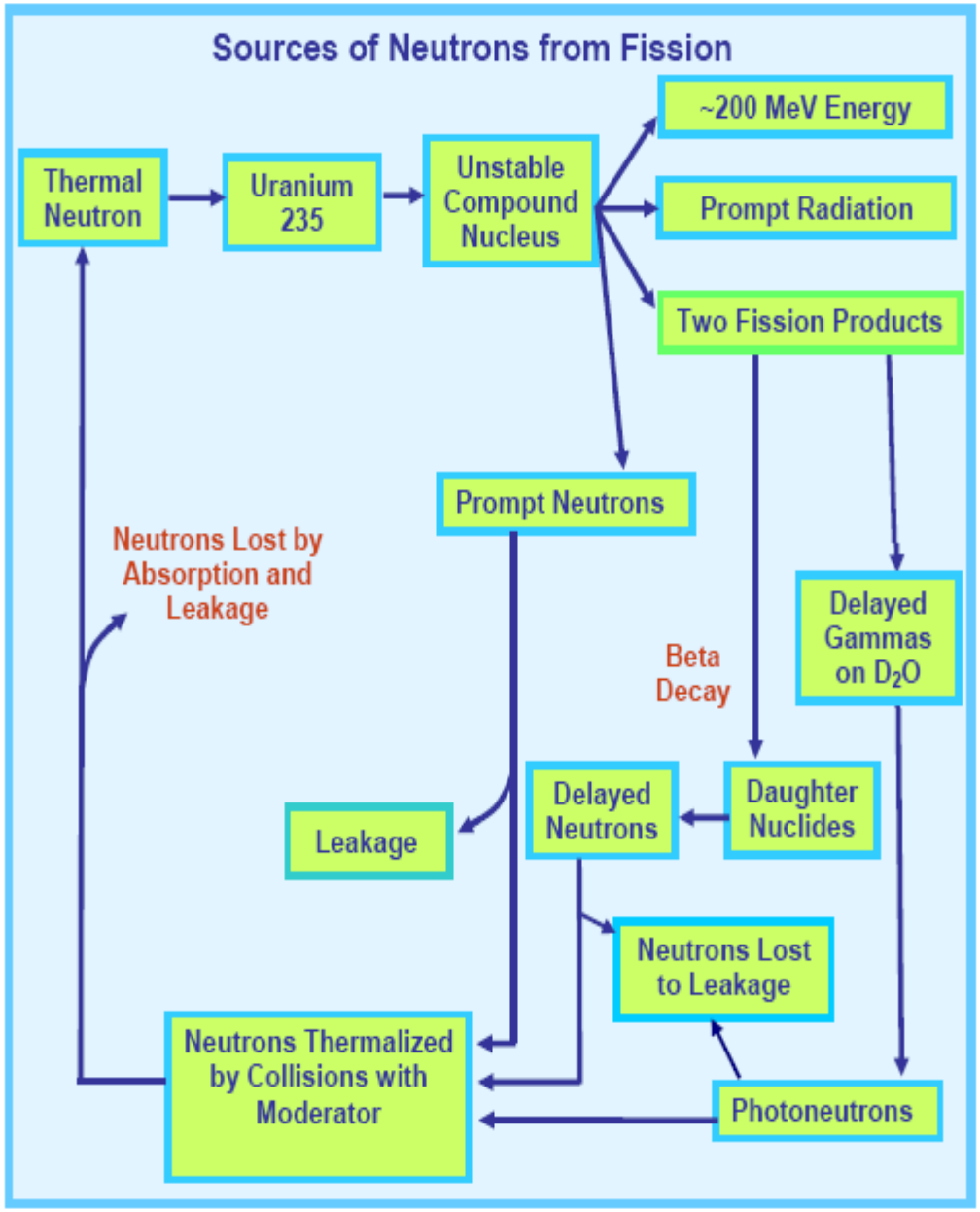
Động lực học lò

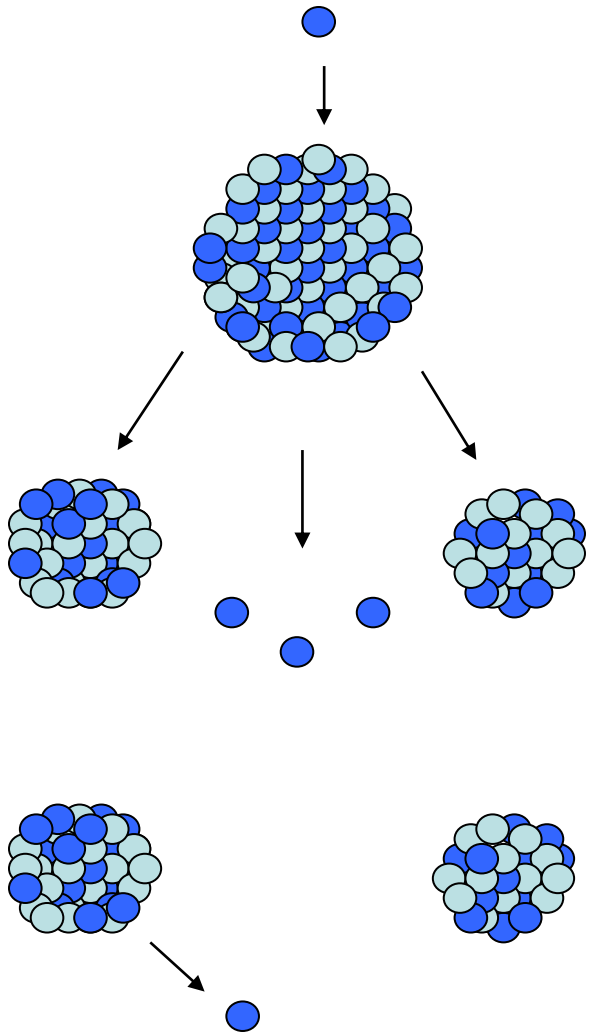
Nghiên cứu các quá trình liên quan như nhiệt độ của thanh nhiên liệu, mật độ của chất làm chậm. Bao gồm cả việc xac định hệ số nhân trong tâm lò như là một hàm của mức công suất lò

ĐỘNG HỌC LÒ PHẢN ỨNG

1.Sự đáp ứng của một lò phản ứng đối với thay đổi từng bước độ phản ứng dương.
2.Chu kỳ lò phản ứng là gì.
3.Tầm quan trọng của Neutron chậm trong điều khiển lò phản ứng.
4.Phép gần đúng về sự thay đổi đột ngột.
5.Tới hạn tức thời là gì.
6.Sự đáp ứng của lò phản ứng đối với việc đưa vào những độ phản ứng âm lớn, như những sự ngưng lò
7. Ý nghĩa của những tham số khác nhau trong phương trình động học điểm

Sự quan trọng của neutron trễ





Hệ số neutron trễ $\beta < 1\%$

Hệ số neutron tức thời $(1-\beta) > 99\%_4$

Sự quan trọng của neutron trễ
Thời gian số của neutron và hệ số nhân

- Nhìn chung, một neutron sinh ra do sự phân hạch sẽ bị hấp thụ hoặc rò rỉ sau khi bị làm chậm
- Đối với lò nhiệt vo hạn thì không có neutron trễ

Thời gian làm chậm neutron là nhỏ khi so sánh với thời gian neutron nhiệt bị khuếch tán

Thời gian sống của neutron= *thời gian sống của neutron tức thời* ≅ *Thời gian khuếch tán trung bình*

$$l_\infty = l_p \cong t_d = \lambda_a / \upsilon = (\upsilon \Sigma_a)^{-1}$$

Hệ số nhân $k_\infty = \nu\Sigma_f / \Sigma_a$

Sự quan trọng của neutron trễ
Thời gian số của neutron và hệ số nhân

- Đối với lò hữu hạn, nếu có hệ số rò rỉ neutron thì thời gian số của neutron và hệ số nhân sẽ giảm.

$$l_{finite} = \frac{l_\infty}{1 + B^2 D / \sum_a} \quad \text{và} \quad k_{eff} = \frac{k_\infty}{1 + B^2 D / \sum_a}$$

Ở đây, B^2D/Σ_a – hệ số rò rỉ, đối với lò có kích thước lớn thì vào khoảng vài %

Sự quan trọng của neutron trễ
Chu trình lò

- Từ định nghĩa của k_{eff} , nếu N(t) là số neutron ở thời điểm t, thì *1/s sau đó*

$$N(t+l) = N(t) + l\frac{dN(t)}{dt} \approx k_{eff}N(t)$$

$$\Rightarrow \qquad \frac{dN(t)}{dt} = \frac{k_{eff}-1}{l}N(t)$$

Nghiệm phương trình là

$$N(t) = N(0)\exp\left(\frac{k_{eff}-1}{l}t\right) = N(0)\exp\left(\frac{t}{T}\right)$$

Với $$T = \frac{l}{k_{eff}-1}$$ Được gọi là *chu trình lò*

Sự quan trọng của neutron trễ

Ví dụ: Trong một lò nhiệt $l \sim 10^{-4}$, *lò tới hạn tại thời điểm* $t=0$, *và* k_{eff} *tăng từ 1.000 đến 1.001*

Chu trình lò $T=10^{-4}/(1.001-1.0)=0.1$ *sec*,

Công suất lò, $N(t)=N(0)\, e^{10}=22{,}000\, N(0)$ *trong 1s*

❑ Ảnh hưởng của neutron trễ

$$< l >= (1-\beta) l + \sum_{i=1}^{6} \beta_i \left[\frac{1}{\lambda_i} + l \right]$$

Sử dụng neutrong trễ, thời gian sống trung bình là

$< l > \sim 0.1$ *sec*,

Được xem như khá dài khi so sánh với neutron tức thời

Phương trình động học lò điểm

- Quá trình cân bằng neutron

[sự tăng] = [sinh ra] - [hấp thụ] - [rò rỉ]

$$\frac{dN(t)}{dt} = S(t) - \sum_a \phi(t) - DB^2\phi(t)$$

và

$$S(t) = (1-\beta)\nu\sum_f \phi(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i C_i(t)$$

Với hoạt độ thứ i trước đó $C_i(t)$ được xác định từ phương trình

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \beta_i \nu \sum_f \phi(t) - \lambda_i C_i(t)$$

và $\phi(t) = \upsilon N(t)$ $l = \frac{1}{\left(\sum_a + B^2 D\right)\upsilon}$ $k_{eff} = \frac{\nu\Sigma_f}{\sum_a + B^2 D}$

Phương trình động học lò điểm

❑ Phương trình động học lò điểm

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{k(1-\beta)-1}{l} n(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \beta_i \frac{k}{l} n(t) - \lambda_i C_i(t) \qquad \text{i=1,…,6}$$

Thời gian sinh neutron $\Lambda = l/k$

Và **độ phản ứng** $\rho = \frac{k-1}{k}$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \left[\frac{\rho-\beta}{\Lambda}\right] n(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i C_i(t)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \qquad \text{i=1,…,6}$$

Độ phản ứng

- Dưới những điều kiện hoạt động bình thường một lò phản ứng có thể hoạt động ở mức tới hạn hoặc gần tới hạn, k gần bằng 1.
- Độ lệch của k trên dưới 1 sẽ làm thay đổi công suất của lò phản ứng.
- Hệ số thông dụng trong những phân tích lò để mô tả hoạt động của lò phản ứng khi k lệch khỏi 1 được gọi là "độ phản ứng". "Độ phản ứng" là một đại lượng được định nghĩa bằng toán học và không thể đo đạc trực tiếp trong thực tế:

$$reactivity = \frac{k-1}{k}$$

- Như đã nói ở trên, trong điều kiện thông thường k gần ở giá trị 1 nên công thức trên có thể viết lại dưới dạng như sau :

Reactivity = k-1 = δk

- Vì những thay đổi về độ phản ứng trong điều kiện bình thường là nhỏ nên đơn vị của nó thông dụng nhất là milli-k , viết tắt là mk.

Ví dụ : Hệ số nhân k = 1,003 thì δk = 0,003.

Phương trình động học lò điểm

- Giới hạn của phương trình

  Giải định

  - Một nhóm neutron
  - Phụ thuộc độc lập vào không gian và thời gian

Phương trình động học lò điểm có thể giải bằng phương trình vận chuyển *với các định nghĩa* β, Λ, *và* ρ

Giải phương trình động học lò điểm với một nhóm neutron trễ

- Chúng ta giã sử neutron trễ chỉ có một nhóm

$$\beta = \sum_i \beta_i \qquad \lambda = <\lambda> = \left[\frac{1}{\beta} \sum_i \frac{\beta_i}{\lambda_i} \right]^{-1}$$

phương trình động học lò điểm

$$\frac{dP}{dt} = \left[\frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda} \right] P(t) + \lambda C(t)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} P(t) - \lambda C(t) \qquad t \geq 0$$

Giải phương trình động học lò điểm với một nhóm neutron trễ

Tại t ≤ 0, lò vận hành ở trạng thái ổn định

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dC}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad P(0) = P_0 \qquad \text{và} \qquad C(0) = \frac{\beta}{\lambda\Lambda} P_0$$

Ta thu được

$$P(t) = P\exp(st) \qquad \text{và} \qquad C(t) = C\exp(st)$$

Với P, C và s có thể xác định được

Thay vào phương trình trên ,ta được

$$sP = \left(\frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda}\right)P + \lambda C \qquad \text{và} \qquad sC = \frac{\beta}{\Lambda}P - \lambda C \qquad (*)$$

$$\Rightarrow \qquad \Lambda s^2 + \left(\lambda\Lambda + \beta - \rho_0\right)s - \rho_0\lambda = 0$$

Giải phương trình động học lò điểm với một nhóm neutron trễ

Các giá trị có thể có của s

$$s_{1,2} = \frac{1}{2\Lambda}\left[-(\beta - \rho_0 + \lambda\Lambda) \pm \sqrt{(\beta - \rho_0 + \lambda\Lambda)^2 + 4\Lambda\lambda\rho_0}\right]$$

Nghiệm tổng quát của phương trình có dạng

$$P(t) = P_1 \exp(s_1 t) + P_2 \exp(s_2 t)$$

$$C(t) = C_1 \exp(s_1 t) + C_2 \exp(s_2 t)$$

Để xác định P_1, P_2, C_1, và C_2, ta phải áp dụng các điều kiện ban đầu (*). Nhưng kết quả rất nặng nề

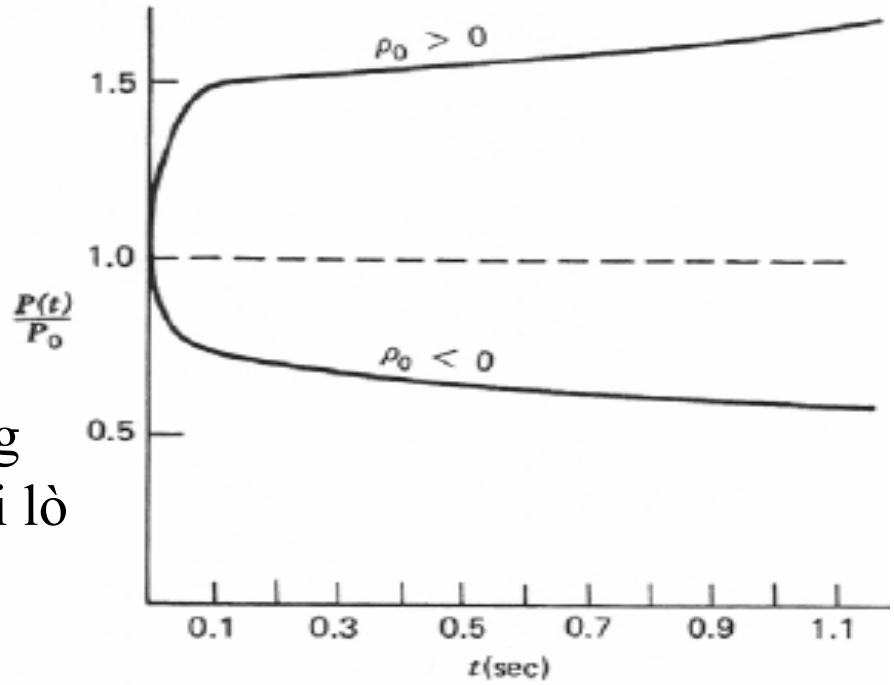
Giải phương trình động học lò điểm với một nhóm neutron trễ

Trường hợp $(\beta - \rho_0 + \lambda\Lambda)^2 >> 4\Lambda\lambda\rho_0$ hoặc $(\lambda\Lambda/\beta << 1)$ và $|\rho_0| << \beta$. Hai giá trị bình phương sấp xỉ bằng

$$s_1 \cong \frac{\lambda\rho_0}{\beta - \rho_0}, \qquad s_2 \cong -\frac{\beta - \rho_0}{\Lambda} \qquad \text{and}$$

$$P(t) \cong P_0\left[\left(\frac{\beta}{\beta - \rho_0}\right)\exp\left(\frac{\lambda\rho_0}{\beta - \rho_0}t\right) - \left(\frac{\rho_0}{\beta - \rho_0}\right)\exp\left(-\frac{\beta - \rho_0}{\Lambda}t\right)\right]$$

Trong hình là việc đưa vào giá trị dương và âm của độ phản $|\rho_0|$=0.0025 và trong lò β=0.0075, λ=0.08 sec^{-1}, và $\Lambda=10^{-3}$ sec.



Bởi vì S_2^{-1}~-0.2 s, quá trình chuyển trạng thái bai đầu t, P(t) trở thành hàm exp với lò hoạt độ ổn định là $T=S_1^{-1}$ ~25 sec.

Giải phương trình động học lò điểm
Phương trình giờ

Định nghĩa $\Lambda = l / k$ và $\rho = (k-1)/k$, phương trình

$$\Lambda s^2 + (\lambda\Lambda + \beta - \rho_0)s - \rho_0\lambda = 0$$

Có thể viết lại

$$\rho_0 = \frac{sl}{sl+1} + \frac{1}{sl+1}\left(\frac{s\beta}{s+\lambda}\right)$$

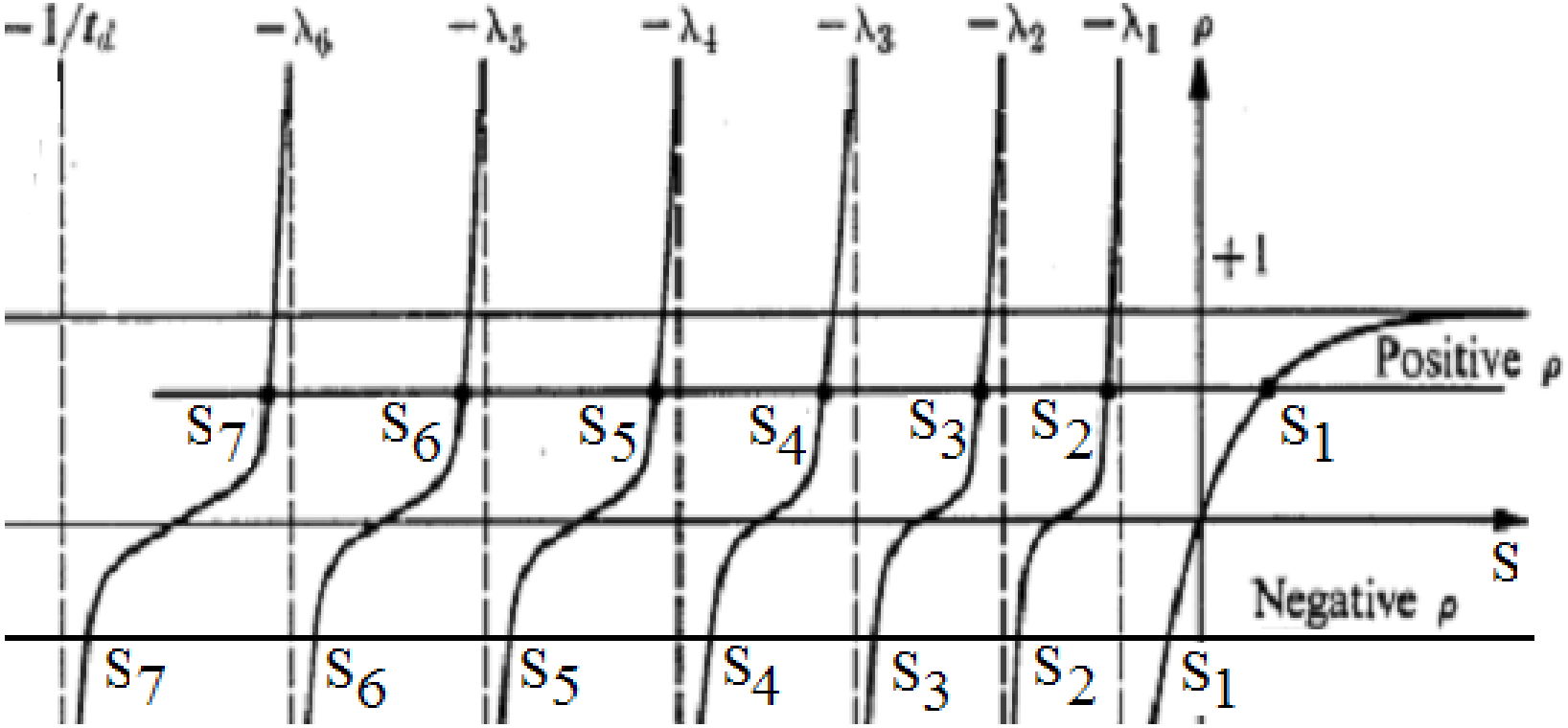
Nếu s và độ phản ứng là hằng số ρ_0. Tổng quát cho 6 nhóm neutron,

Viết lại

$$\rho_0 = \frac{sl}{sl+1} + \frac{1}{sl+1}\sum_{i=1}^{6}\left(\frac{s\beta_i}{s+\lambda_i}\right) \equiv \rho(s)$$

Hằng số thời gian s_j là đa thức bậc 7, được gọi là phương trình giờ (**inhour equation)**.

Giải phương trình động học lò điểm
Phương trình giờ



$$P(t) = P_0 \sum_{j=1}^{7} A_j \exp(s_j t) \qquad C_i(t) = C_{i0} \sum_{j=1}^{7} B_{ij} \exp(s_j t)$$

Nghiệm s_1 là chu kỳ lò, $s_1=T^{-1}$. Nghiệm s_j, $j>1$, có thể xac định trong thời gian ngắn với độ phản ứng ρ_0 được đưa vào lò

Giải phương trình động học lò điểm
Phương trình giờ

Trogn trường hợp nghiệm ban đầu nhỏ

$$|s_1| << \lambda_1 < \lambda_2 \cdots < \frac{1}{l}$$

Phương trình giờ

$$\rho_0 = \frac{sl}{sl+1} + \frac{1}{sl+1}\sum_{i=1}^{6}\left(\frac{s\beta_i}{s+\lambda_i}\right) \equiv s_1 l + s_1 \sum_{i=1}^{6}\left(\frac{\beta_i}{\lambda_i}\right)$$

Chu trình lò

$$T = \frac{1}{s_1} = \frac{1}{\rho_0}\left[l + \sum_{i=1}^{6}\frac{\beta_i}{\lambda_i}\right] = \frac{<l>}{\rho_0} = \frac{<l>}{k-1}$$

Điều kiện $s_1 << \lambda_i \Rightarrow 1/s_1 >> 1/\lambda_i \Rightarrow T >> t_i$. t_i khoảng 80 s. Độ phản ứng khoảng 10 cents đối với U^{235}.

Giải phương trình động học lò điểm
Phương trình giờ

- Đưa vào độ phản ứng dương ($\rho_0 >> \beta$)

Giả sử $s_1 >> \lambda_i$.

Phương trình giờ

$$\rho_0 \cong \frac{s_1}{s_1 + l^{-1}} + \frac{l^{-1}}{s_1 + l^{-1}} \sum_{i=1}^{6} \beta_i = \frac{s_1 + \beta l^{-1}}{s_1 + l^{-1}}$$

Chu trình lò

$$T = \frac{1}{s_1} = \frac{l}{k(\rho_0 - \beta)} \cong \frac{l}{k-1}$$

Độ phản ứng dương lớn, đáp ứng của lò được xác định bởi neutron tức thời.

Giải phương trình động học lò điểm
Phương trình giờ

❑ Điều kiện tới hạn tức thời($\rho = \beta$)

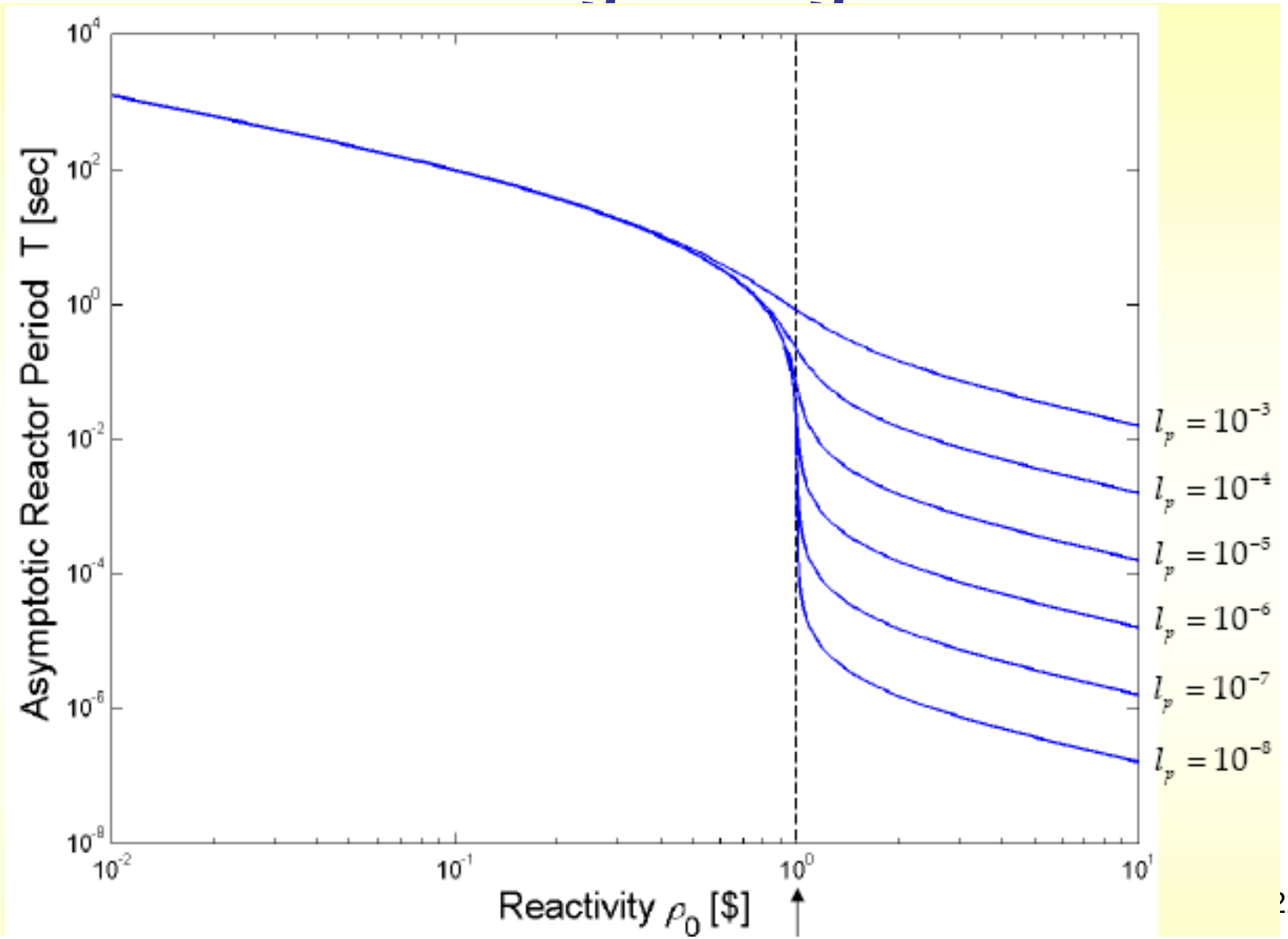
➢ Từ hệ số (1 - β) của neutron tức thời, hệ số nhân

(1 - β) k.

➢ Nếu (1 - β) k = 1 hoặc $\rho = \beta$ là trạng thái tới hạn của neutron tức thời

➢ Đối với 0 < $\rho < \beta$ Neutron trễ phân bố theo đk tới hạn của neutrong trễ, trong khi đó, $\rho \geq \beta$ được xem như đk tới hạn tức thời (*prompt critical*) hay trên tới hạn tức thời (*prompt supercritical*)

Giải phương trình động học lò điểm
Phương trình giờ



Giải phương trình động học lò điểm
Phương pháp xấp xỉ

- Tốc độ sinh neutron trễ được xác định

$$\frac{dP}{dt} = \left[\frac{\rho(t)-\beta}{\Lambda}\right]P(t) + Q(t) \qquad \text{Ở đây} \qquad Q(t) = \sum_{i=1}^{6}\lambda_i C_i(0) = \frac{\beta}{\Lambda}P_0$$

Đưa vào độ dốc âm, $\rho(t)=-\gamma t$

$$P(t) = P_0\left\{\exp-\frac{1}{\Lambda}\left(\frac{\gamma t^2}{2}+\beta t\right)+\frac{1}{\Lambda}\int_0^t dt'\exp-\frac{1}{\Lambda}\left[\frac{\gamma}{2}(t-t')^2-\beta(t-t')\right]\right\}$$

➢ Sau khi thanh điều khiển hoàn toàn vào lò. Độ phản ứng âm là một hằng số và P(t) có thể xác định cho thời gian sau đó.

Giải phương trình động học lò điểm
Phương pháp xấp xỉ

- Bước nhảy tức thời
  - Đáp ứng của công suất lò P(t)
  - Công suất thay đổi dP/dt = 0

$$0 = \left[\rho(t) - \beta\right]P(t) + \Lambda\sum_{i=1}^{6}\lambda_i C_i(t)$$

Độ phản ứng thay đổi từ ρ_1 đến ρ_2 do công suất thay đổi từ P_1 đến P_2

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta - \rho_1}{\beta - \rho_2}$$

SỰ THAY ĐỔI CỦA ĐỘ PHẢN ỨNG DO ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ VÀ BỌT KHÍ.

- Độ phản ứng như một hàm của công suất lò phản ứng.
- Cơ sở vật lí của những ảnh hưởng của nhiệt độ tới độ phản ứng, bao gồm:
  - Những ảnh hưởng của mật độ neutron.
  - Ảnh hưởng của phổ năng lượng neutron.
  - Ảnh hưởng của dãn nở doppler.
- Những hệ số nhiệt và công thức 6 hệ số
- Những hệ số về nhiên liệu, làm chậm và hệ số nhiệt của chất lỏng làm nguội.
- Hệ số công suất của độ phản ứng.

Những ảnh hưởng do hình thành khoảng trống.

Giới thiệu

- Độ phản ứng đã được định nghĩa là độ lệch của nhân neutron khỏi mức tới hạn và những phương trình mô tả thay đổi phụ thuộc với thời gian của số lượng neutron tới độ phản ứng.

- Trước khi chúng ta quan tâm tới các phương tiện thay đổi độ phản ứng của lõi lò bởi các yếu tố bên ngoài, chúng ta cần xem xét những ảnh hưởng bên trong tới lò phản ứng.

- Trong phần trước đã đưa ra, những thay đổi về độ phản ứng được coi như thành phần của những thay đổi nhiên liệu với "độ cháy"-burnup.

- Trong phần này chúng ta sẽ xem xét những ảnh hưởng đến độ phản ứng của nhiệt độ của các vật liệu thay đổi trong lõi của lò, và những ảnh hưởng của những bọt khí có thể hình thành trong chất lỏng và chất làm nguội khi chúng bị sôi.

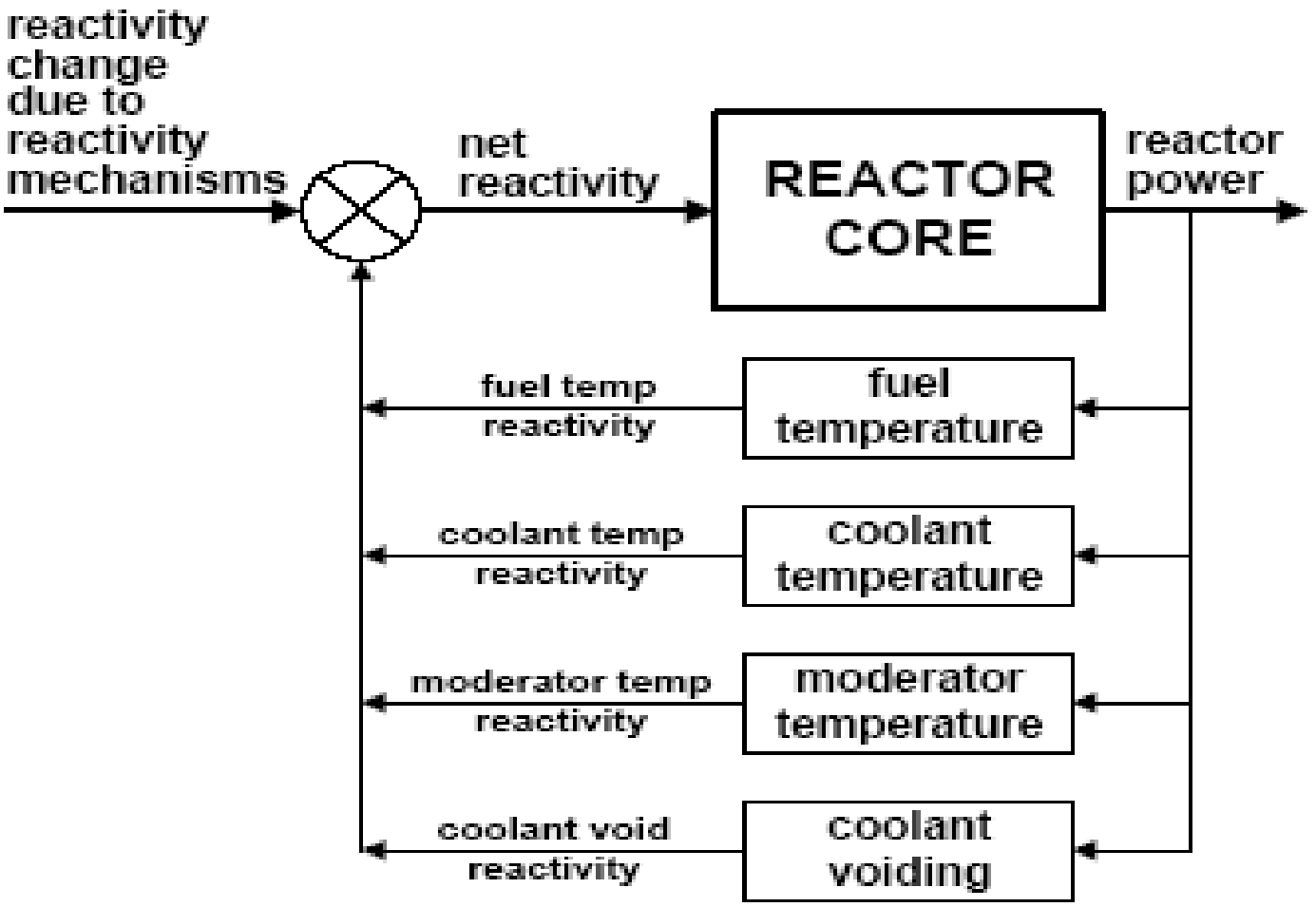
Độ phản ứng như một hàm của công suất lò

- Khi công suất lò phản thay đổi, nhiệt độ của các thành phần lò khác nhau và số lượng bọt khí trong chất lỏng làm nguội cũng sẽ thay đổi.

  Ví dụ: mức công suất của lò tăng nhiệt độ tương ứng của nhiên liệu, chất làm nguội và làm chậm cũng tăng.
- Khi nhiệt độ thay đổi sẽ làm thay đổi một hay nhiều các hệ số trong 6 hệ số của công thức và dẫn đến độ phản ứng thay đổi.
- Khi độ phản ứng thay đổi do những thay đổi trong hệ thống điều khiển làm công suất thay đổi, gây nên nhiệt độ (có thể cả bọt khí) thay đổi theo. Sự thay đổi này lại làm độ phản ứng thay đổi. Sự thay đổi của độ phản ứng gây ra bởi sự thay đổi về nhiệt (có thể cả bọt khí) sẽ tạo ra những hiệu ứng phản hồi của độ phản ứng.

- Hệ thống điều khiển độ phản ứng vì thế phải điều chỉnh liên tục các thiết bị trong khi công suất thay đổi để giữ độ thay đổi công suất lò đã được ấn định tương ứng với những thay đổi trước đó.
- Phản hồi dương sẽ có khuynh hướng gây bất ổn định.
- Phản hồi âm lớn sẽ chống với mọi thay đổi của công suất.
- Phản hồi của độ phản ứng âm nhỏ có một ảnh hưởng tới sự “tự điều chỉnh” và tạo ra sự “an toàn nội tại”.

Sự phản hồi của độ phản ứng



5.3.3 Cơ sở vật lí cho những ảnh hưởng của nhiệt độ tới độ phản ứng

- Tốc đô phản ứng đối với một nhân xác định được cho bởi công thức: $R = \Phi\sum = \Phi N\sigma$, với N là số hạt nhân trên một đơn vị thể tích và σ là tiết diện phân hạch hoặc tiết diện hấp thụ của nhân tương ứng.
- Tốc độ phản ứng sẽ thay đổi như một hàm của nhiệt độ vì một trong các lý do sau:

  → Sự nở vì nhiệt của vật liệu sẽ làm giảm mật độ của nó dẫn đến N giảm

  → Sư thay đổi về phổ năng lượng của thông lượng neutron nhiệt sẽ gây thay đổi σ.

  → Sự chuyển động của nhân với tốc độ cao hơn làm tăng xác suất bắt cộng hưởng của neutron trên nhiệt (hiệu ứng Doppler, Dãn nở Doppler, dãn nở cộng hưởng).

Những ảnh hưởng của mật độ

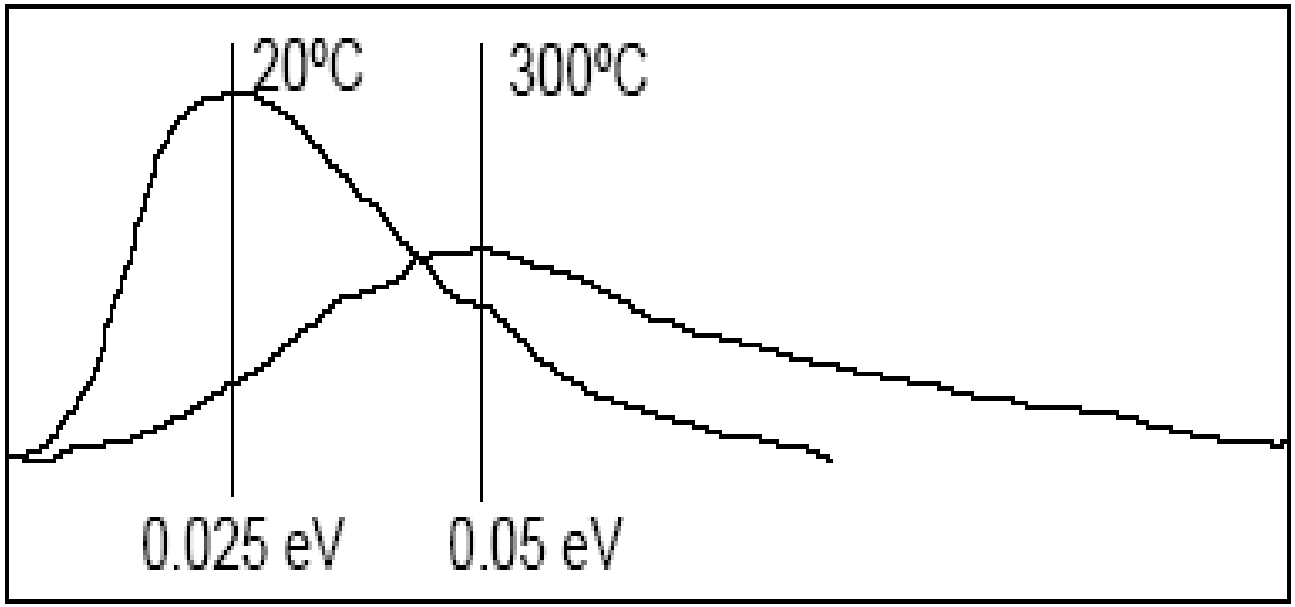
- Nhiệt độ của chất làm chậm và chất làm nguội tăng làm mật độ của nó giảm.
- Do đó số lượng nguyên tử trên một đơn vị thể tích giảm đi, neutron sẽ văng xa hơn trong quá trình tương tác vì thế tăng khả năng thoát ra khỏi lõi lò dẫn đến xác suất không rò rỉ neutron nhanh (Λ_f) và neutron nhiệt (Λ_t) giảm và do đó độ phản ứng giảm.
- ·Sự giảm mật độ nguyên tử Σ_a sẻ dẫn đến tiết diện hấp thụ vĩ mô của chất làm chậm và chất làm nguội nhỏ đi vì thế làm tăng hệ số sử dụng nhiệt, nghĩa là độ phản ứng tăng.
- Nếu như có chất hấp thụ nơ-tron trong chất làm nguội hoặc chất làm chậm hoặc cả hai thì ảnh hưởng độ phản ứng do thay đổi mật độ sẽ tăng lên nhiều.
- Nếu như nhiên liệu được chứa trong ceramic có độ bền tinh thể cao thì ảnh hưởng về nhiệt mật độ do nhiệt là không đáng kể miễn là nhiệt độ của nhiên liệu được giữ ở mức đước nóng chảy.

Ảnh hưởng của phổ năng lượng neutron

- Những thay đổi về nhiệt độ của các vật liệu khác nhau trong lõi mà neutron tương tác làm thay đổi phân bố năng lượng neutron nhiệt (gọi là nhiệt neutron)
- Phổ nhiệt của neutron thay đổi theo nhiệt được thể hiện trong đồ thị: Đỉnh của phổ neutron nhiệt giảm, năng lượng trung bình và toàn bộ tăng.
- Những thay đổi trong phổ năng lượng nhiệt với nhiệt độ sẽ làm thay đổi cân bằng giữa phân hạch và hấp thụ trong lõi do chúng phụ thuộc vào năng lượng neutron.

  → "Sự làm cứng phổ"dẫn đến những neutron "nóng hơn".

  → "Sự làm mềm phổ" dẫn đến những neutron "lạnh hơn"
- Thông số bị ảnh hưởng nhất là hệ số tái sinh η.



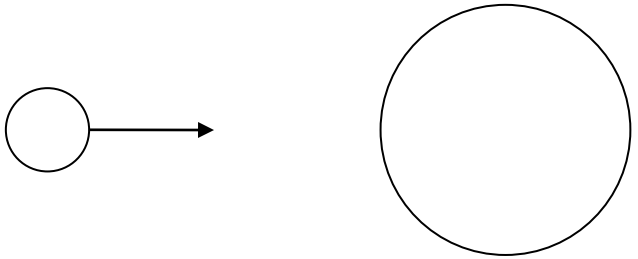
Ảnh hưởng của giãn nở Doppler

- Ảnh hưởng của Doppler tăng khi nhiệt độ của nhiên liệu thay đổi bởi vì nhiệt độ của nhiên liệu tăng sẽ làm tăng sự bắt neutron trong U-238 khi chúng đi qua vùng cộng hưởng.

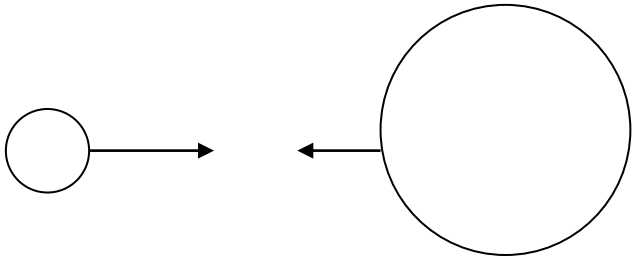
- Sự hấp thụ tại đỉnh cộng hưởng là một hàm của tốc độ neutron với tốc độ của nhân U-238 và vì vậy nhiệt độ của nhiên liệu cao làm nguyên tử U-238 chuyển động mạnh hơn và có một khoảng rộng những vận tốc neutron trùng với đỉnh hấp thụ U-238.
- ·Khoảng năng lượng ở đó neutron bị bắt giữ tăng lên.

- Mặc dù tiết diện bắt tại đỉnh cộng hưởng bị giảm nhưng xác suất bắt toàn bộ tăng.

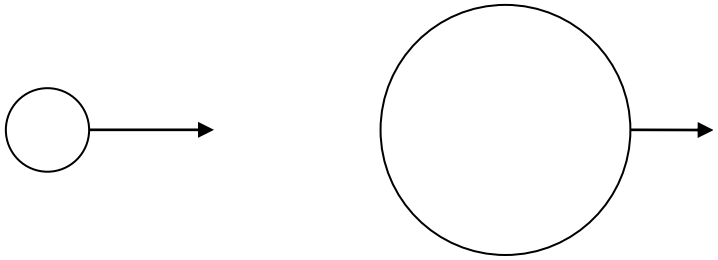
- Ảnh hưởng toàn bộ là xác xuất tránh bắt cộng hưởng giảm (p) và do đó độ phản ứng cũng giảm.



Hạt nhân đứng yên, chỉ có neutron tại năng lượng cộng hưởng bị hấp thụ



Hạt nhân di truyển ngược hướng với neutron dưới năng lượng cộng hưởng bị hấp thụ



Neutron di chuyển theo hướng của hạt nhân trên khoảng năng cộng hưởng lượng bị hấp thụ

CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ

$$\alpha_T = \frac{1}{k}\frac{dk}{dT} = \frac{d(\ln k)}{dT}$$

$k = \eta_T f p \varepsilon P_t P_f$, *cho phép khai triển như sau:*

$$\alpha_T = \frac{1}{\eta_T}\frac{d\eta_T}{dT} + \frac{1}{f}\frac{df}{dT} + \frac{1}{p}\frac{dp}{dT} + \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dT} + \frac{1}{P_t}\frac{dP_t}{dT} + \frac{1}{P_f}\frac{dP_f}{dT}$$

- Nhiệt độ làm giảm mật độ,
- Nhiệt độ cao làm thay đổi phổ neutron nhiệt
- Tăng sự chuyển động của nguyên tử như U^{238} làm tăng tiết diện bắt neutron được biết như hiệu ứng Doppler

CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ
Mật độ thay đổi

- Sự giản nở nhiệt làm giảm mật độ của chất làm chậm, vì thế neutron khuếch tán rộng hơn.

Ảnh hưởng của quá trình khuếch tán rộng bao gồm:

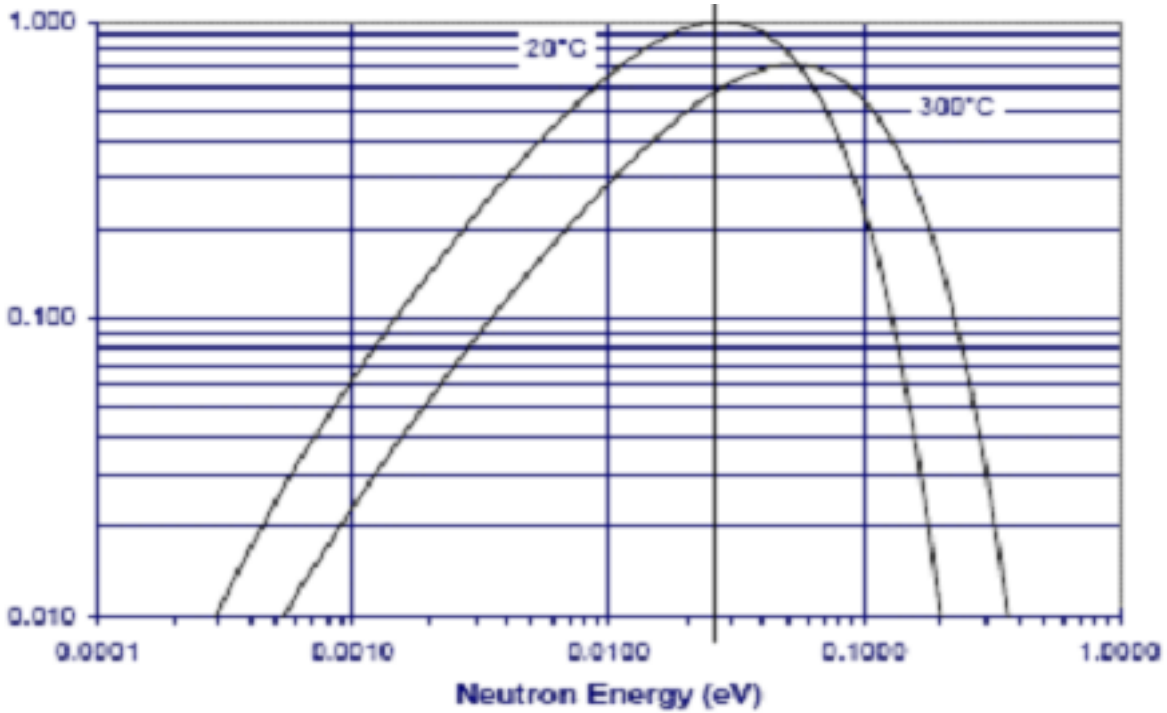
- Tăng xác suất rò rỉ neutron, P_t và P_f.

- Nhưng quan trọng hơn là tăng xác suất bắt cộng hưởng *p*,

- Mật độ giảm kéo theo tiết diện hấp thụ vĩ mô của chất làm chậm giảm kết quả làm tăng hệ số sử dụng nhiệt *f*. Hiệu ứng náy ảnh hưởng mạnh đến chấy làm chậm là được gọi là nhiễm độc lò (poisson).

CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ

Phổ neutron



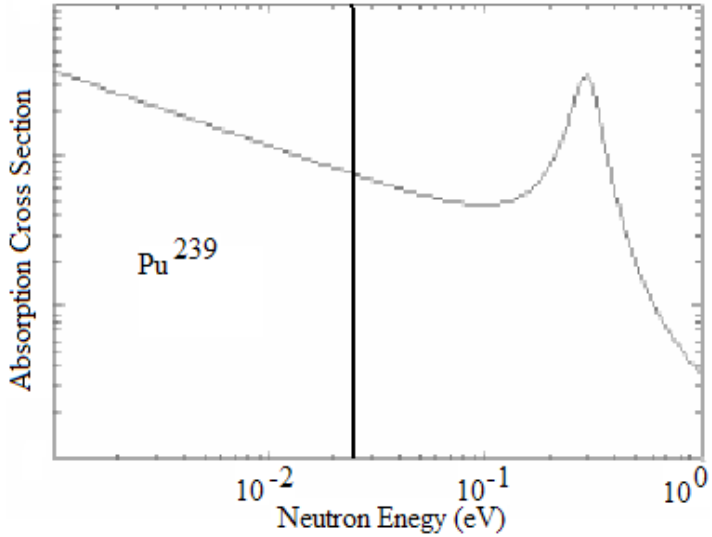
- Neutron nhiệt truyền động năng khi nó tương tác với nguyên tử và phân tử. Năng lượng trung bình tỉ lệ với nhiệt độ. Khi phổ neutron bị dịch chuyển sẽ ảnh hưởng đến hệ số sinh neutron (η_T), vì thế sẽ làm thay đổi tốc độ hấp thụ neutron nhiệt đối với đồng vị có khả năng phân hạch.

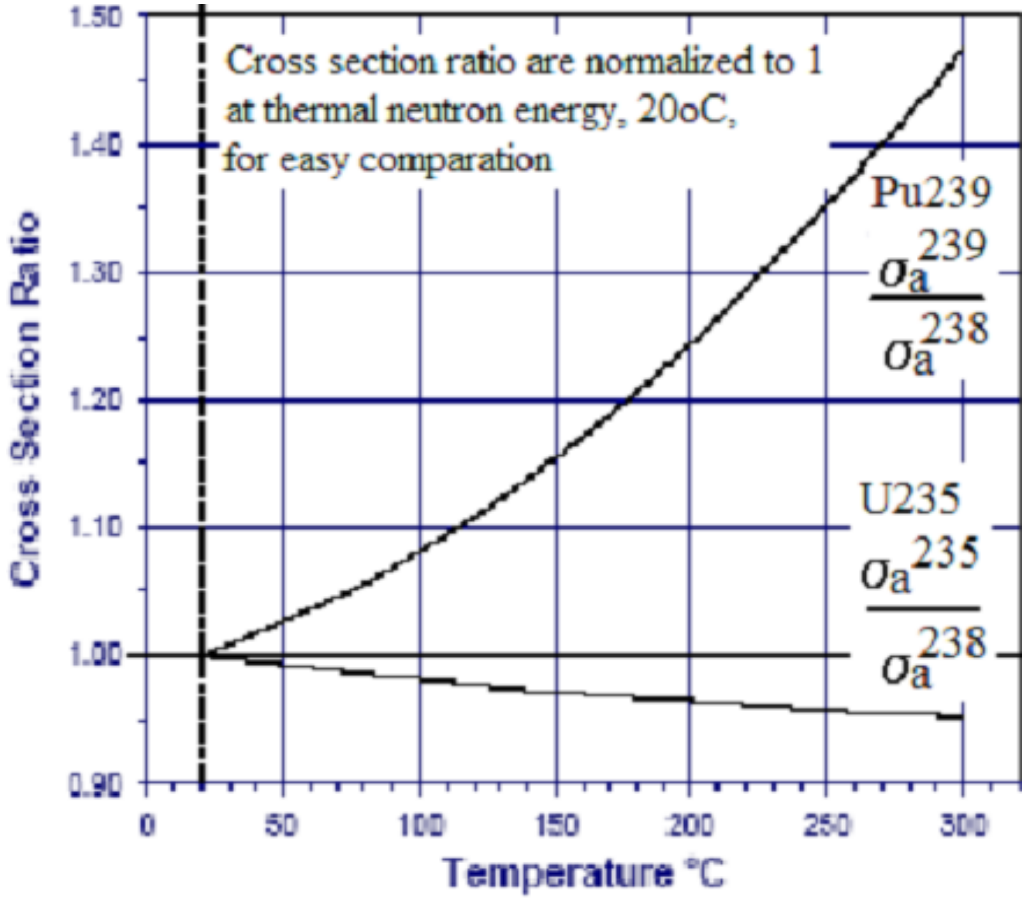
CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ
Phổ neutron

❑ Tốc độ phản ứng

➢(σ_a~1/v) và (ϕ= nv), thì R_a = $N\sigma_a \phi$ không thay đổi.

➢Tiết diện của U^{238} gần l/v thay đổi mạnh theo nhiệt độ.





➢ Tiết diện hấp thụ của đồng vị phân hạch phụ thuộc vào l/v.

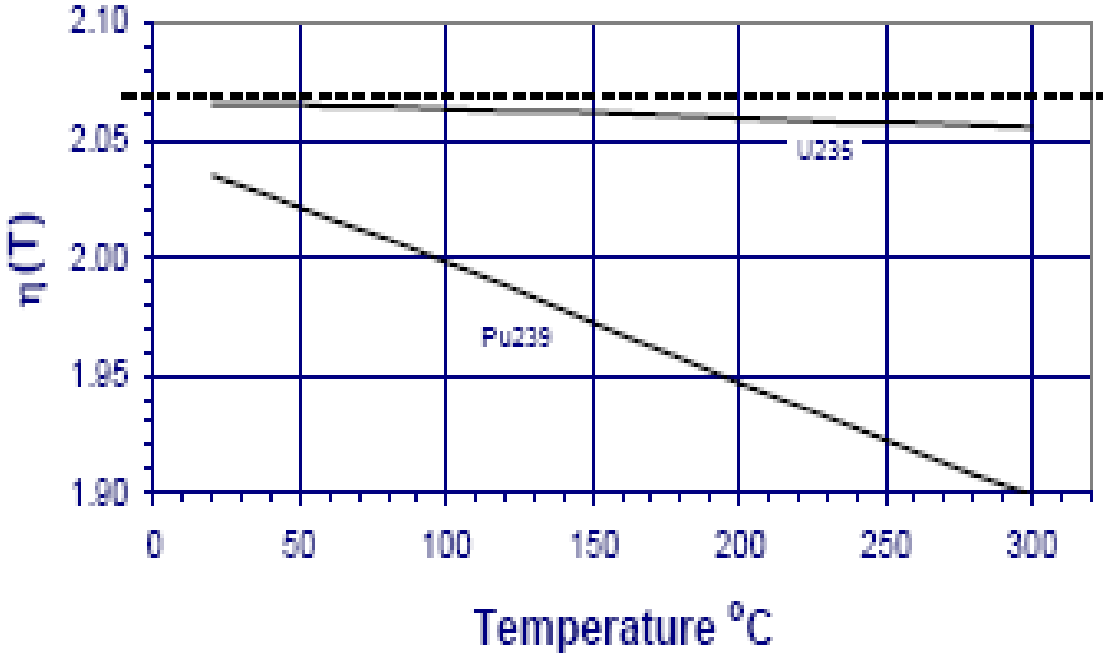
➢Tiết diện hấp thụ thay đổi ít U^{235} và rất mạnh Pu^{239}.

CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ
Phổ neutron

❑ **Thay đổi hệ số sinh neutron η_T**

$$\eta_T = \nu \frac{\sum_f (fuel)}{\sum_a (fuel)}$$

$$\eta_T = \frac{\eta_5 \sum_a^5 + \eta_9 \sum_a^9}{\sum_a (fuel)}$$



➢ Phân bố đối với U^{235} là âm

➢ Đối với Pu^{239} thì tăng tốc độ phản ứng và giảm chậm η trong cùng thời gian. Phân bố của Pu^{239} hệ số nhiệt độ là dương.

$d\eta_T/\eta_T dT$ là dương cho nhiên liệu lò CANDU .

CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ
Phổ neutron

❑ **Mặt khác**

➢ Sự hấp thụ neutron của Pu^{239} là tăng và hấp thụ của môi trường là không phụ vào nhiệt độ.

$$f = \frac{\sum_a (fuel)}{\sum_a (fuel) + \sum_a (non - fuel)}$$

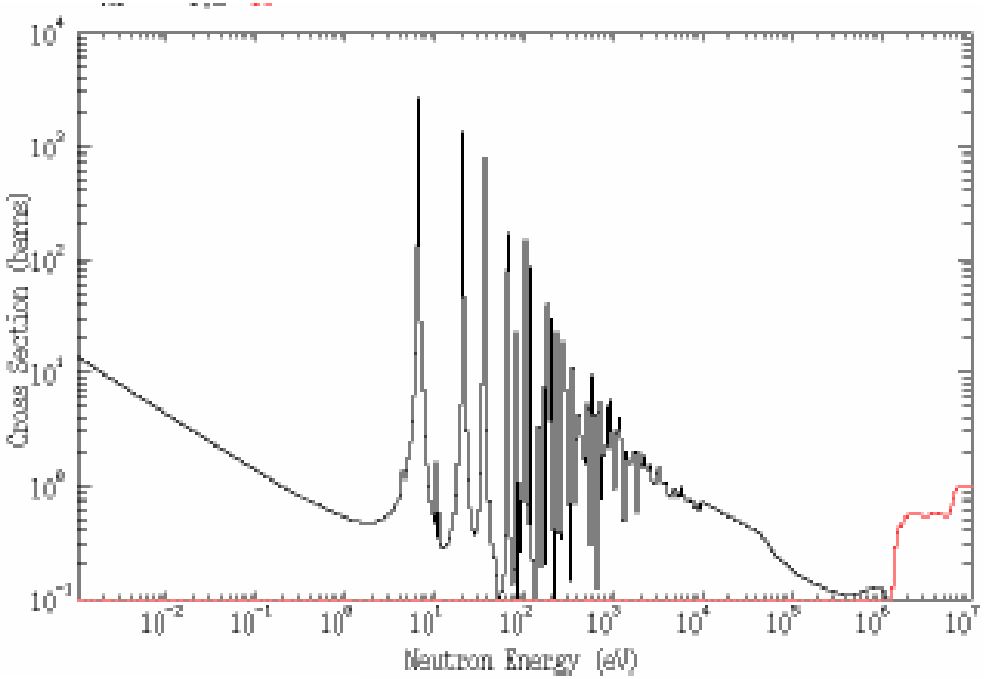
Vì thế hệ số sử dụng nhiệt f *tăng*.

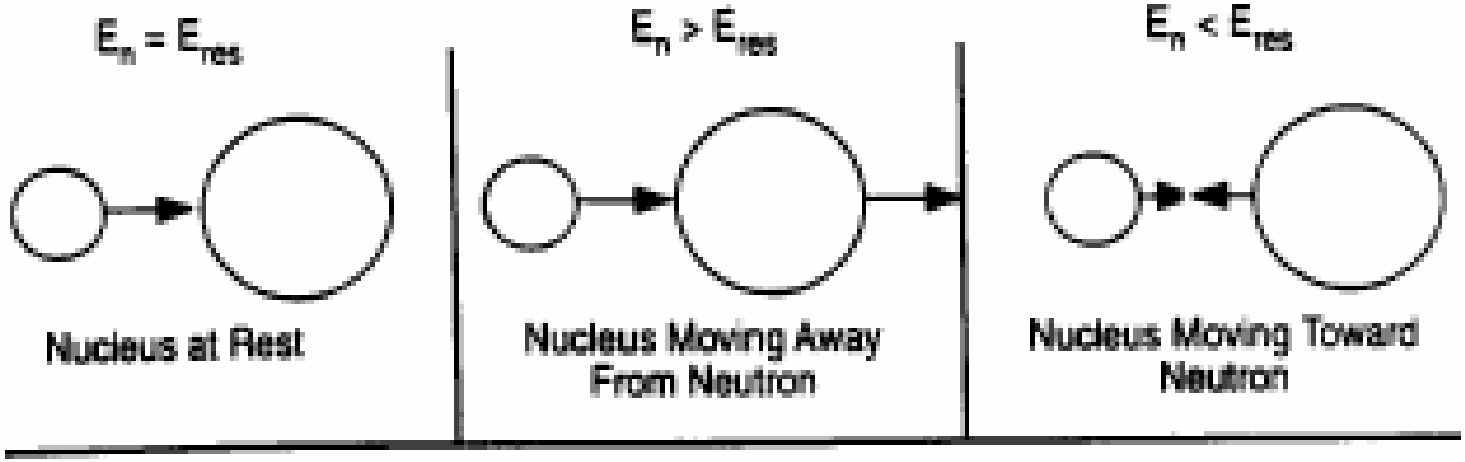
➢ Sự rò rỉ neutron nhiệt tăng chậm khi bị nhiệt độ neutrong nhiệt tăng. Tất cá tiết diện hấp thụ giảm khi năng lượng neutron tăng.

CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ

Hiệu ứng Doppler

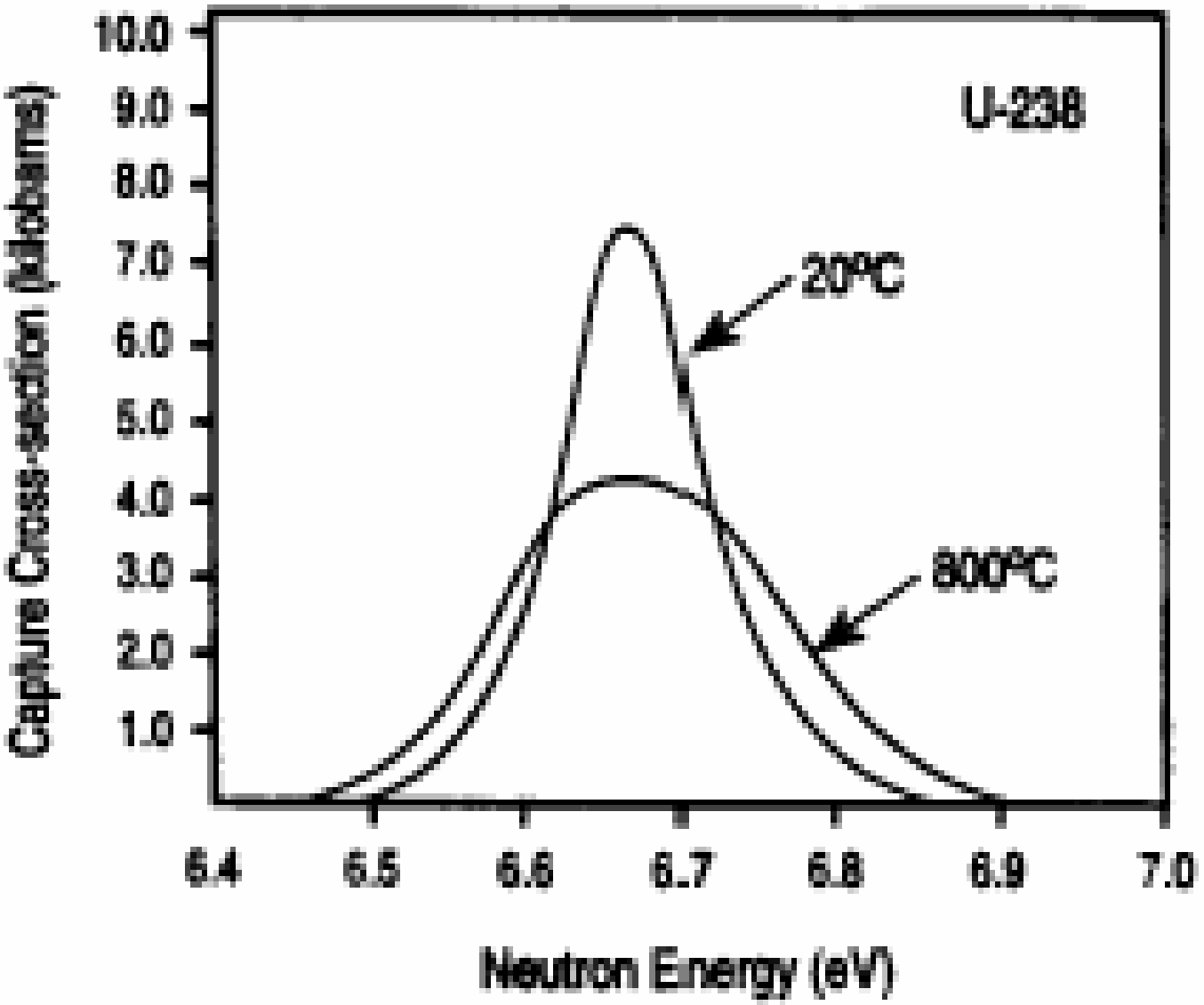
- Bắt cộng hưởng U^{238} thay đổi theo những nguyên nhân sau.





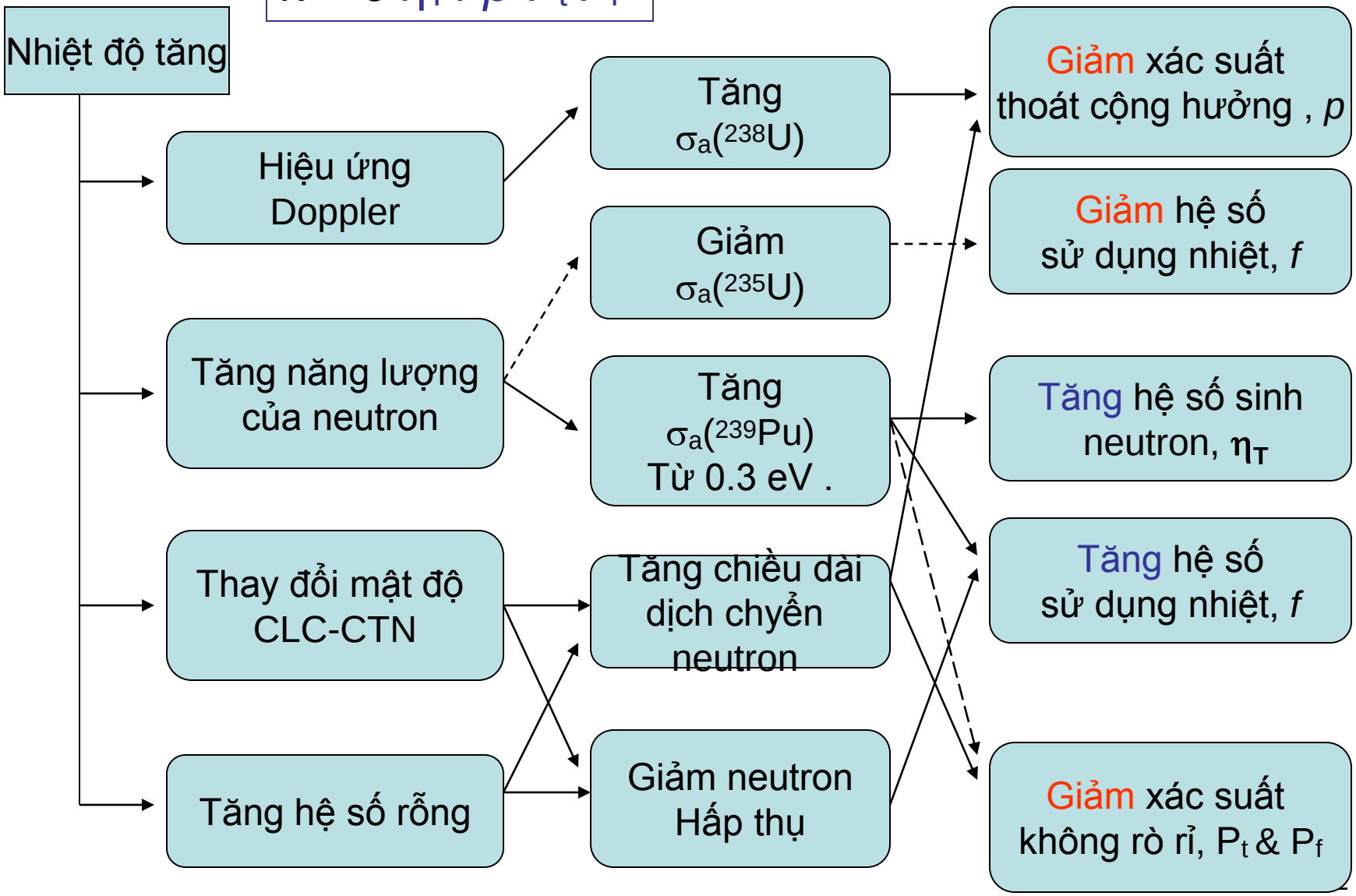
CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ

Hiệu ứng Doppler



CƠ SỞ VẬT LÝ CHO HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ

$$k = \varepsilon\, \eta_T\, f\, p\, P_t\, P_f$$



HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ CỦA ĐỘ PHẢN ỨNG
Hệ số nhiệt độ của độ phản ứng đối với chất làm chậm và chất tải nhiệ

- Đối với chất làm chậm có 2 hiệu ứng vật lý quan trọng :

Giảm mật độ và tăng năng lượng neutron trung bình

- Giảm mật độ
  (a) Giảm hấp thụ neutron nhiệt→ tăng f.
  (hiệu ứng này được gọi là chêm hóa học (chemical shim)
  (b) Tăng chiều dài neutron
  - Tăng xs rò rỉ→ Giảm xs không rò rỉ P_t và P_f.
  → Giảm xác suất thoát cộng hưởng p.

- Tăng năng lượng neutron trung bình→ tăng xs hấp thụPu^{239} → Tăng hệ số sinh neutron η_T.

HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ CỦA ĐỘ PHẢN ỨNG
Hệ số nhiệt độ của độ phản ứng đối với nhiên liệu

❑ Hai hiệu ứng quan trọng:
- Hiệu ứng Doppler
- Hiệ ứng phổ neutron

➢ Hiệu ứng Doppler giảm p (Đây là hiệu ứng quan trọng)

➢ Dịch chuyển phổ neutron→ tăng tốc độ hấp thụ Pu^{239}
→ tăng hệ số sinh neutron η_T.

HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ CỦA ĐỘ PHẢN ỨNG
Hệ số rỗng của độ phản ứng

❑ Độ rỗng của chất tải nhiệt làm giảm khả năng hấp thụ của vật liệu trong lò phản ứng, vì thế, ảnh hưởng của độ rỗng bao gồm:

➢ Giảm hấp thụ neutron nhiệt → tăng f.
(Hiệu ứng chêm hóa học)

➢ Làm cứng phổ neutron
- Tăng xs rò rỉ→ giảm xác suất P_t và P_f.
→ Giảm xs thoát cộng hưởng p.

ẢNH HƯỞNG CỦA SP PHÂN HẠCH LÊN ĐỘ PHẢN ỨNG

- Hiệu ứng của sp phân hạch chỉ ảnh hưởng tới (f)

Nhiễm độc lò

$$f_0 = \frac{\overline{\sum}_{aF}}{\overline{\sum}_{aF} + \overline{\sum}_{aM}}$$

$$f = \frac{\overline{\sum}_{aF}}{\overline{\sum}_{aF} + \overline{\sum}_{aM} + \overline{\sum}_{aP}}$$

Độ phản ứng trong quá trình nhiễm độc

$$\rho = \frac{f - f_0}{f} = -\frac{\overline{\sum}_{aP}}{\overline{\sum}_{aF} + \overline{\sum}_{aM}}$$

Hệ số nhân khi không nhiễm độc

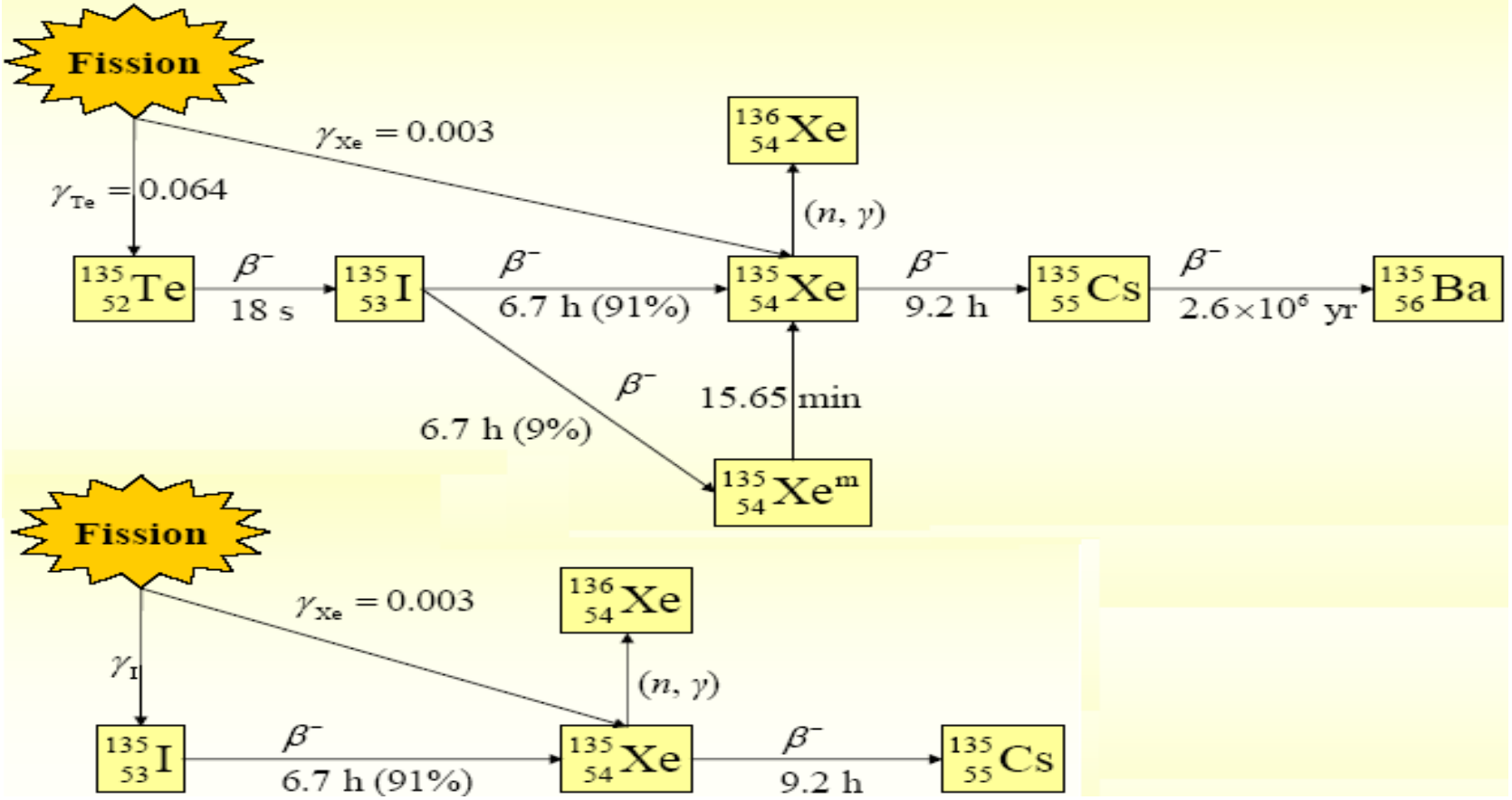
$$k = 1 = \eta_T f p \varepsilon = \frac{\eta_T p \varepsilon \overline{\sum}_{aF}}{\overline{\sum}_{aF} + \overline{\sum}_{aM}} = \frac{\nu p \varepsilon \overline{\sum}_{f}}{\overline{\sum}_{aF} + \overline{\sum}_{aM}}$$

$$\rho = -\frac{1}{\nu p \varepsilon} \frac{\overline{\sum}_{aP}}{\overline{\sum}_{f}}$$

Sự nhiễm độc đối với sp phân hạch

ẢNH HƯỞNG CỦA SP PHÂN HẠCH LÊN ĐỘ PHẢN ỨNG

- Xenon-135



$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \overline{\sum}_f \phi_T - \lambda_I I$$

$$\frac{dX}{dt} = \lambda_I I + \gamma_X \overline{\sum}_f \phi_T - \lambda_X X - \overline{\sigma}_{aX} \phi_T X$$

ẢNH HƯỞNG CỦA SP PHÂN HẠCH LÊN ĐỘ PHẢN ỨNG

❑ Cân bằng Xenon

✓ Bởi vì chu kỳ bán rã của I^{135} và Xe^{135} khá ngắn và tiết diện hấp thụ neutron của Xe^{135} thì quá lớn, vì thế hàn lượng của Xenon tăng nhanh và đạt giá trị bão hòa

$$I_\infty = \frac{\gamma_I \bar{\Sigma}_f \phi_T}{\lambda_I} \quad \text{và} \quad X_\infty = \frac{\lambda_I I_\infty + \gamma_X \bar{\Sigma}_f \phi_T}{\lambda_X + \bar{\sigma}_{aX}\phi_T} = \frac{(\lambda_I + \gamma_X)\bar{\Sigma}_f \phi_T}{\lambda_X + \bar{\sigma}_{aX}\phi_T}$$

$$\Rightarrow \quad \bar{\Sigma}_{aX} = X_\infty \bar{\sigma}_{aX} = \frac{(\lambda_I + \gamma_X)\bar{\Sigma}_f \phi_T \bar{\sigma}_{aX}}{\lambda_X + \bar{\sigma}_{aX}\phi_T} = \frac{(\lambda_I + \gamma_X)\bar{\Sigma}_f \phi_T}{\phi_X + \phi_T}$$

$\phi_X = \lambda_X/\sigma_{aX}$ thì phụ thuộc vào nhiệt độ và bằng 0.756×10^{13} tại 20°C

$$\Rightarrow \rho = -\frac{\lambda_I + \gamma_X}{\nu p \varepsilon} \frac{\phi_T}{\phi_X + \phi_T}$$

If $\phi_T << \phi_X$ thông lượng thấp $\rho = -\dfrac{(\lambda_I + \gamma_X)\phi_T}{\nu p \varepsilon \phi_X}$

ρ tuyến tính với ϕ_T

If $\phi_X << \phi_T$ $\rho = -\dfrac{\lambda_I + \gamma_X}{\nu p \varepsilon}$

$$\rho_{MAX} = -\frac{\lambda_I + \gamma_X}{\nu} = -2{,}62\%$$

ẢNH HƯỞNG CỦA SP PHÂN HẠCH LÊN ĐỘ PHẢN ỨNG

❑ Xenon sau khi dập lò– thời gian chết của lò

✓ Mặc dù Xe^{135} không thay đổi khi dập lò, Xe^{135} vẫn được tiếp tục sinh ra từ I^{135}.

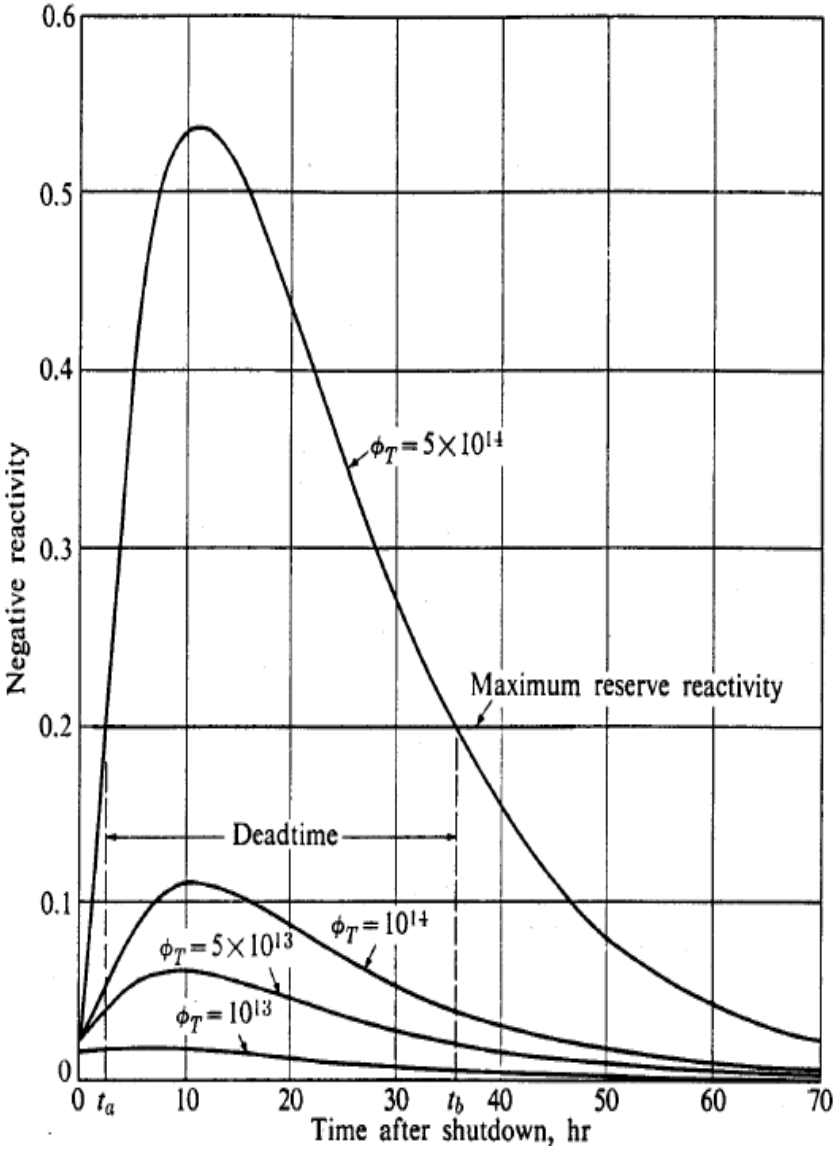
$$I(t) = I_0 e^{-\lambda_I t} \quad \text{and} \quad X(t) = X_0 e^{-\lambda_X t} + \frac{\lambda_I I_0}{\lambda_I - \lambda_X}(e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_I t})$$

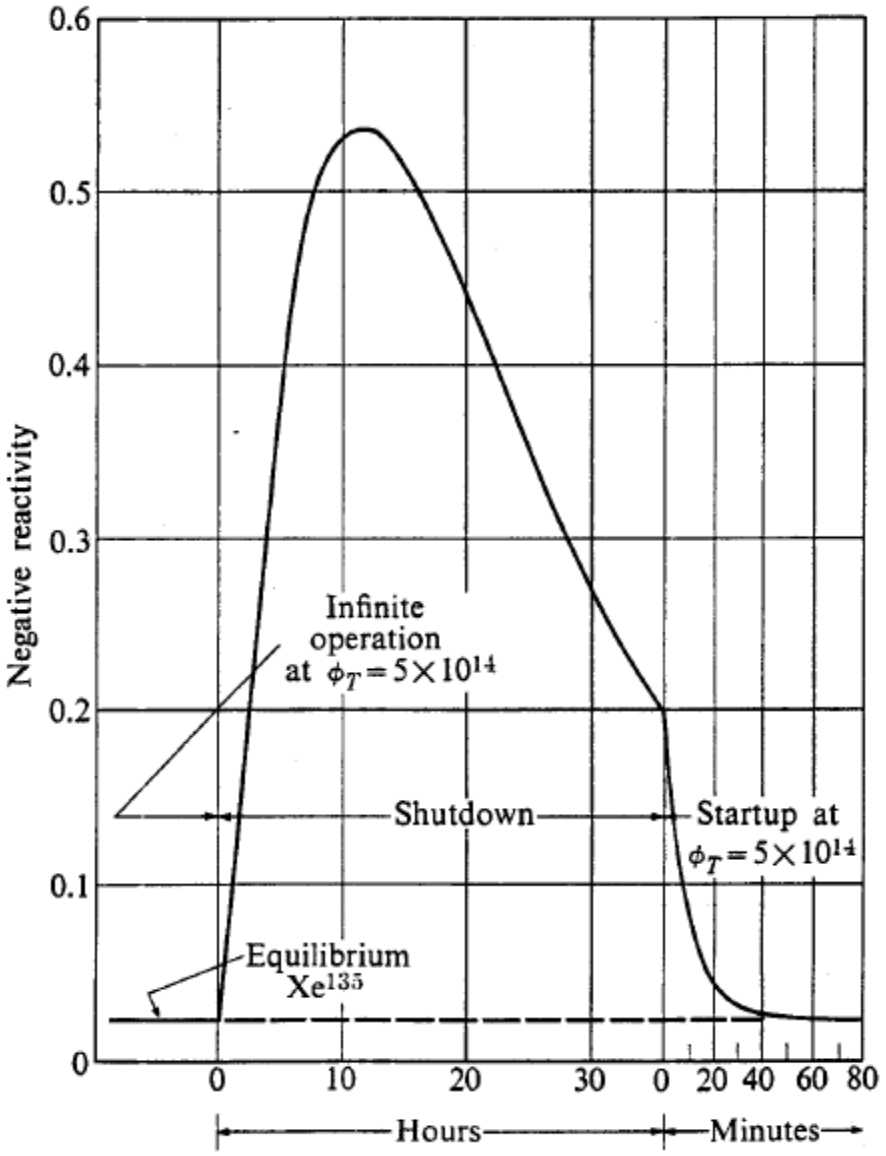
$$\Rightarrow \quad \rho = -\frac{1}{\nu p \varepsilon}\left[\frac{(\lambda_I + \gamma_X)\phi_T}{\phi_X + \phi_T} e^{-\lambda_X t} + \frac{\gamma_I \phi_T}{\phi_I + \phi_T}(e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_I t})\right]$$

$\phi_I = \lambda_I / \sigma_{aX}$ là tham số phụ thuộc vào nhiệu độ = 1.038×10^{13} at 20°C

❑ Dao động Xenon (**Xenon oscillation)**

ẢNH HƯỞNG CỦA SP PHÂN HẠCH LÊN ĐỘ PHẢN ỨNG



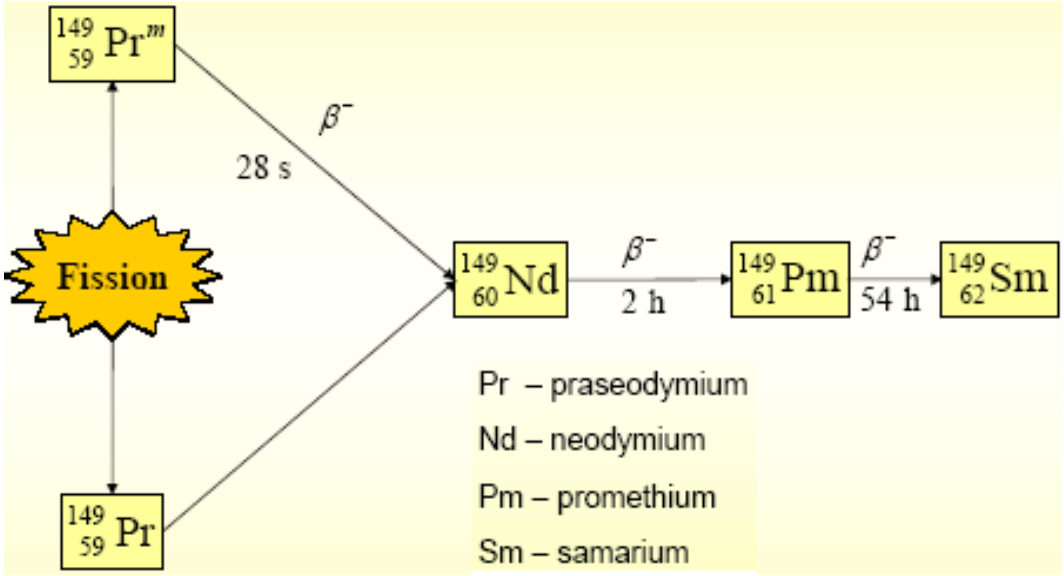


ẢNH HƯỞNG CỦA SP PHÂN HẠCH LÊN ĐỘ PHẢN ỨNG

- **Sumarium-149**

$$\frac{dP}{dt} = \gamma_P \bar{\Sigma}_f \phi_T - \lambda_P P$$

$$\frac{dS}{dt} = \lambda_P P - \bar{\sigma}_{aS} \phi_T S$$



- **Cân bằng Sumarium**

Tiết diện hấp thụ của Sm^{149} nhỏ hơn rất nhiều Xe^{135} và thời gian sống Pm^{149} thì lâu hơn I^{135} và Xe^{135}, vì thế Pm^{149} và Sm^{149} đạt giá trị cân bằng.

$$P_\infty = \frac{\gamma_P \bar{\Sigma}_f \phi_T}{\lambda_P} \quad \text{and} \quad S_\infty = \frac{\gamma_P \bar{\Sigma}_f}{\bar{\sigma}_{aS}} \Rightarrow \bar{\Sigma}_{aS} = \gamma_P \bar{\Sigma}_f \Rightarrow \rho = -\frac{\lambda_P}{\nu p \varepsilon}$$

Độ phản ứng không phụ thuộc vào công suất lò

ρ_{MAX}= -0.0113/2.44 = -0.463%

ẢNH HƯỞNG CỦA SP PHÂN HẠCH LÊN ĐỘ PHẢN ỨNG

❑Sumarium sau khi dập lò

✓Sau khi dập lò, Sm^{149} được tích lũy từ phân rã Pm^{149}. Tuy nhiên, Sm^{149} thì bền và duy trì cho đến khi lò đạt trạng thái tới hạn

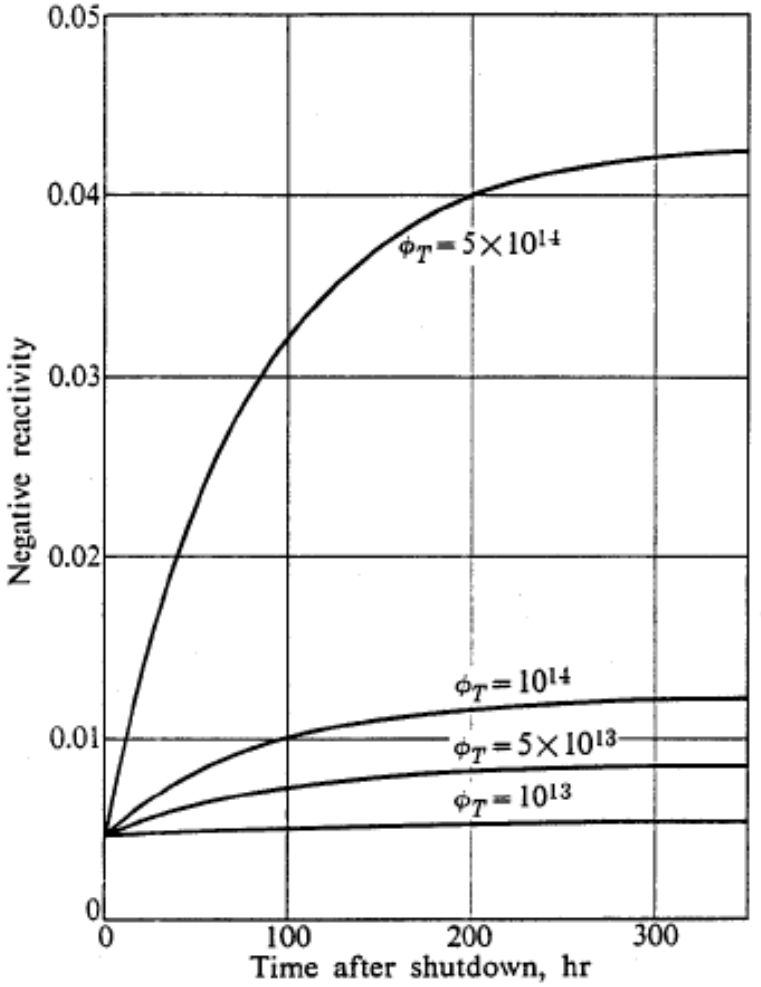
$$S(t) = S_0 + P_0(1 - e^{-\lambda_P t})$$

As $T \to \infty$, $S = S_0 + P_0$

$$\rho = -\frac{\gamma_P}{\nu p \varepsilon}\left[1 + \frac{\phi_T}{\phi_S}(1 - e^{-\lambda_P t})\right]$$

$$\phi_S = \frac{\lambda_P}{\sigma_{aS}} = 6.095x10^{13} cm^{-2}\,\sec^{-1}$$

$$\rho_\infty = -\frac{\gamma_P}{\nu p \varepsilon}\left(1 + \frac{\phi_T}{\phi_S}\right)$$ tuyến tính ϕ_T



ĐẶC TRƯNG CỦA LÕI LÒ TRONG THỜI GIAN SỐNG

❑ Tính toán thời gian cháy

➢ Fuel

Nếu $N_F(\mathbf{r},t)$ thì mật độ nhiên liệu tại điểm **r** và thời gian t

$$\frac{dN_F(r,t)}{dt} = -N_F(r,t)\overline{\sigma}_{aF}\phi_T(r,t)$$

Dạng nghiệm

$$N_F(r,t) = N_F(r,0)\exp\left[-\overline{\sigma}_{aF}\int \phi_T(r,t)dt\right]$$

Thông lượng và mật độ nhiên liệu; $\phi(\mathbf{r},t)$ không thể giải tường minh theo $N_F(\mathbf{r},t)$ mà phải giải bằng phương pháp số.

ĐẶC TRƯNG CỦA LÕI LÒ TRONG THỜI GIAN SỐNG

➢Chuyển đổi vật liệu

Pu^{239} là sản phẩm của U^{238}

$$U^{238} + n \rightarrow U^{239} \rightarrow Np^{239} \rightarrow Pu^{239}$$

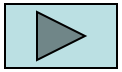
$$\frac{dN_{39}(r,t)}{dt} = N_{38}\overline{\sigma}_{a38}\phi_T(r,t) - N_{39}(r,t)\overline{\sigma}_{a39}\phi_T(r,t)$$

$$+(1-p)\varepsilon P_F\left[\nu_{35}N_{35}(r,t)\overline{\sigma}_{f35} + \nu_{39}N_{39}(r,t)\overline{\sigma}_{f39}\right]\phi_T(r,t)$$

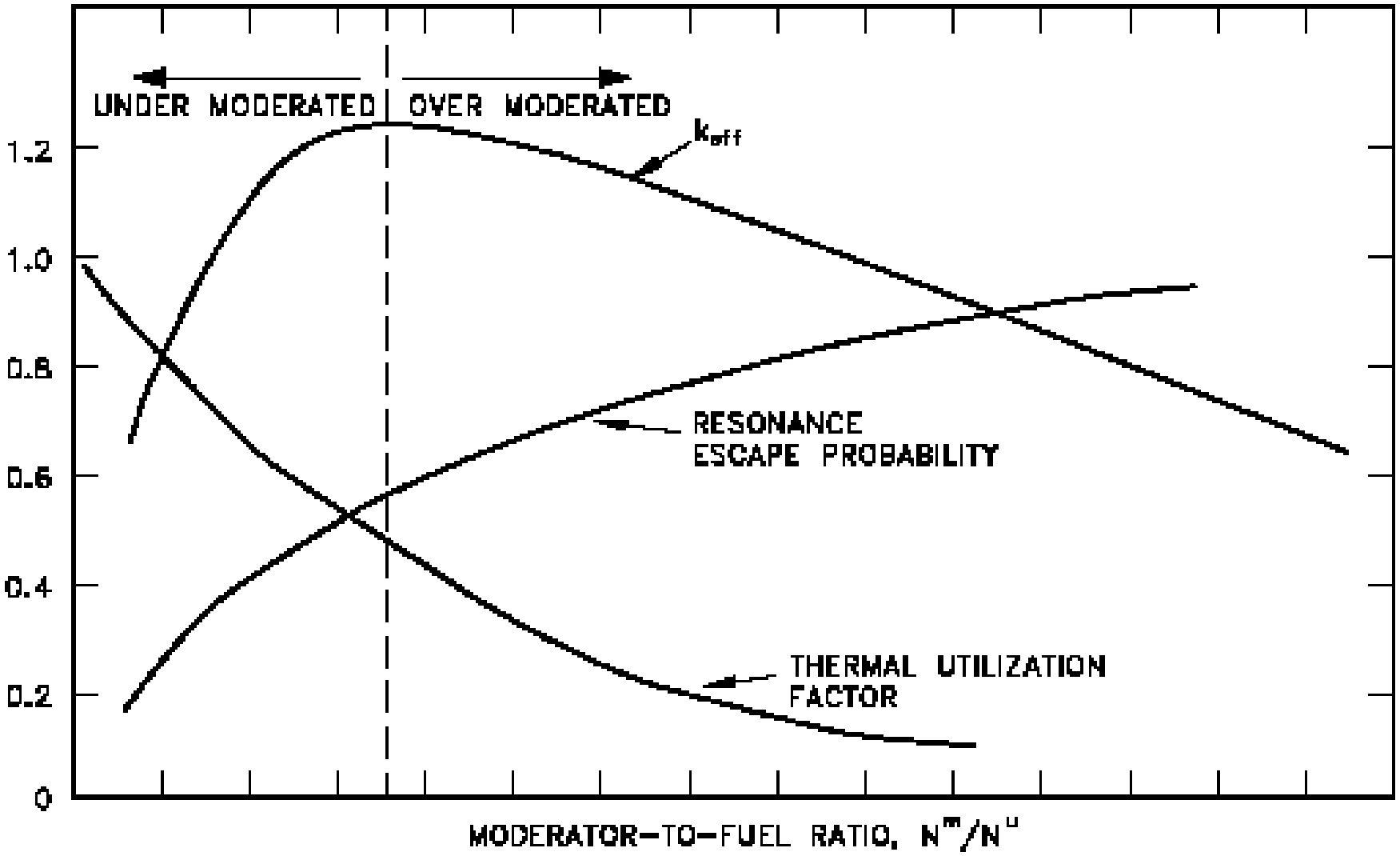
$$N_{39}(r,t) = \frac{N_{38}\overline{\sigma}_{a38} + (1-p)\varepsilon P_F\nu_{35}N_{35}(r,t)\overline{\sigma}_{f35}}{\overline{\sigma}_{a39} - (1-p)\varepsilon P_F\nu_{39}\overline{\sigma}_{f39}}$$

$$x\left\{1 - \exp - \left[\overline{\sigma}_{a39} - (1-p)\varepsilon P_F\nu_{39}\overline{\sigma}_{f39}\right]\phi_T(r,t_0)\Delta t\right\}$$

Delayed Neutron Fractions for Various Fuels				
Group	Half-Life (sec)	Uranium-235	Uranium-238	Plutonium-239
1	55.6	0.00021	0.0002	0.00021
2	22.7	0.00141	0.0022	0.00182
3	6.22	0.00127	0.0025	0.00129
4	2.30	0.00255	0.0061	0.00199
5	0.61	0.00074	0.0035	0.00052
6	0.23	0.00027	0.0012	0.00027
TOTAL	-	0.00650	0.0157	0.00200



- The *tỉ số chất làm chậm/nhiên liệu*(Nm/Nu)



Hệ số nhiệt và công thức 6 hệ số

- Hệ số nhiệt của độ phản ứng được định nghĩa như sự thay đổi của độ phản ứng trên một đơn vị thay đổi nhiệt độ, mk/^{0}C hoặc μk/^{0}C.
- Hệ số nhiệt được tính toán như sau: nhớ rằng : $k = \eta f p \varepsilon \Lambda_f \Lambda_t$

Lấy ln hai vế : $\ln k = \ln \eta + \ln f + \ln p + \ln \varepsilon + \ln \Lambda_f + \ln \Lambda_t$. Viết theo cách khác ta được:

$$\frac{1}{k}\frac{dk}{dT} = \frac{1}{\eta}\frac{d\eta}{dT} + \frac{1}{f}\frac{df}{dT} + \frac{1}{p}\frac{dp}{dT} + \frac{1}{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{dT} + \frac{1}{\Lambda_t}\frac{d\Lambda_t}{dT} + \frac{1}{\Lambda_t}\frac{d\Lambda_t}{dT}$$

Các thành phần đặc trưng của hệ số nhiệt nhiên liệu (μk/^{0}C) đối với CANDU là:

Hệ số	Nhiên liệu mới	Nhiên liệu cân bằng
(1/ε) dε/dT	0.0	0.0
(1/p) dp/dT	-9.3	-9.3
(1/f) df/dT	-0.8	+0.3
(1/η) dη/dT	-4.0	+5.3
(1/Λ_f) dΛ_f /dT	0.0	0.0
(1/Λ_t) d Λ_t /dT	-0.8	-0.4
Toàn phần	-15	-4

Các hệ số nhiệt nhiên liệu, làm chậm và làm nguội

- Những ảnh hưởng của mật độ, nhiệt độ neutron và giãn nở Doppler làm thay đổi các thành phần của công thức 6 hệ số theo các cách khác nhau và giá trị của chúng luôn luôn là một hàm của "tuổi" nhiên liệu.
- Bởi vì nhiệt độ của nhiên liệu, chất làm chậm và làm nguội có thể thay đổi độc lập, hệ số độ phản ứng cho mỗi ảnh hưởng này cần phải được biết.

Gía trị của các điều kiện hoạt động công suất gần tối đa cho CANDU	Đơn vị của $\mu k/^0C$	ΔT từ công suất zero tới công suất gần tối đa
Hệ số nhiệt nhiên liệu	-4.5	530
Hệ số nhiệt của chất làm nguội	+30	25
Hệ số nhiệt làm chậm	+70	5

• Trong phần trước đã nhấn mạnh rằng lò phản ứng sẽ có thể không bền vững nếu như hệ số nhiệt dương của độ phản ứng lớn. Với tham số trên, lò có ổn định không?
•Theo phân tích độ ổn đinh của hệ thống điều khiển phản hồi thì phần thu được và pha của tín hiệu phải được xem xét.
• Đối với lò ở giai đoạn chuyển đổi công suất trong thời gian ngắn, sự thay đổi nhiệt độ cho nhiên liệu sẽ lớn hơn nhiều và xảy ra nhanh hơn đối với chất làm chậm và làm nguội thế nên hệ số nhiệt của nhiên là âm và lò sẽ ổn định.

Hệ số công suất của độ phản ứng

- Hệ số công suất được định nghĩa như sự thay đổi độ phản ứng bởi tất cả các hiệu ứng nhiệt độ công suất lò thay đổi từ mức tắt nóng (hot shutdown) tới công suất cực đại (100% FP- full power)
- Chú ý rằng đây không phải là thay đổi độ phản ứng trên đơn vị nhiệt độ như những hệ số nhiệt độ trước đã được định nghĩa mà là sự thay đổi độ phản ứng toàn phần giữa hai trạng thái hoạt động.
- Có thể giả sử rằng ảnh hưởng của độ phản ứng là một hàm tuyến tính của công suất giữa 10% và 100% FP.

Ảnh hưởng của việc hình thành các bọt khí

- Các bọt khí sẽ được hình thành trong vùng hoạt của lò nếu như nhiệt độ của chất làm chậm hoặc dòng hệ thống chất tải nhiệt đạt tới điểm sôi.

- Chú ý rằng điểm sôi BWR của các chất làm chậm và làm nguội lò sẽ xảy ra dưới các điều kiện bình thường.

- Hai hiện tượng có thể là nguyên nhân gây bọt khí là:
  → Tai nạn làm mất chất làm nguội như vỡ ống và sụt áp.
  → Mất điều điều khiển quá nhanh dẫn đến công suất tăng quá mức.

- Những phân tích an toàn phải cho thấy rằng hệ thống dập lò hoạt động độc lập có thể giới hạn sự tăng công suất tới một mức an toàn trong trường hợp rủi ro.

- Các thành phần của độ phản ứng do bọt khí được đưa ra trong bảng (mk).

Thành phần	Nhiên liệu mới	Nhiên liệu cân bằng
$\Delta\varepsilon/\varepsilon$	5.0	5.0
$\Delta p/p$	6.0	6.0
$\Delta f/f$	3.0	2.5
$\Delta\eta/\eta$	2.3	-2.5
$\Delta\Lambda_f / \Lambda_f$	-0.8	-0.8
$\Delta\Lambda_t / \Lambda_t$	-0.3	-0.3
Toàn phần	15	10