

BAB 9 REAKSI INTI

Secara eksperimen telah diamati bahwa jika partikel misalnya neutron, proton atau elektron yang bergerak cepat ditembakkan pada sebuah unsur maka besar peluang bahwa partikel itu ditangkap oleh inti dan dalam waktu yang sangat singkat (10^{-13} s) inti akan memancarkan kembali sinar gamma atau partikel yang berbeda dengan partikel datang. Proses ini disebut sebagai reaksi inti. Inti tersebut sesudah memancarkan sinar gamma atau partikel lain dapat berada dalam keadaan stabil atau tidak stabil. Dalam kasus tidak stabil atau radioaktif inti akan meluruh dengan usia paroh tertentu dan mengikuti hukum-hukum peluruhan seperti unsur radioaktif alamiah.

9.1 Transmutasi Inti

Inti yang terbentuk sesudah penembakan partikel dalam banyak kasus biasanya berbeda dengan inti target baik nomor massanya maupun nomor atom. Perubahan inti target ini disebut sebagai transmutasi dan reaksinya disebut sebagai reaksi transmutasi.

Untuk setiap reaksi nuklir dapat ditulis suatu persamaan yang merupakan suatu persamaan kimia. Persamaan reaksi nuklir dapat ditulis sebagai



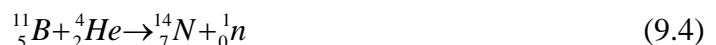
Yang berarti sebuah partikel x menumbuk inti X , hasil reaksi berupa inti Y dan partikel y . Persamaan (1) dapat juga ditulis sebagai



Contoh reaksi nuklir adalah partikel alfa yang berasal dari sumber alamiah menumbuk berilium menghasilkan karbon dan partikel neutron. Persamaan reaksi nuklir ini adalah



Reaksi lain adalah



Reaksi transmutasi yang pertama ditemukan oleh E. Rutherford tahun 1919 yaitu nitrogen sebagai target ditembaki dengan partikel alpha yang berasal dari sumber radioaktif alamiah



Reaksi nuklir pertama yang menggunakan mesin pemercepat partikel yang diamati oleh J. Cockcroft dan E. Walton tahun 1930 adalah



Reaksi-reaksi di atas dapat juga ditulis sebagai ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n){}^{12}_6\text{C}$, ${}^{11}_5\text{B}(\alpha, n){}^{14}_7\text{N}$, ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$, dan ${}^7_3\text{Li}(p, \alpha){}^4_2\text{He}$, masing-masingnya.

9.2 Hukum Kekekalan Energi Dalam Reaksi Inti

Dalam reaksi inti berlaku Hukum Kekekalan Energi. Dengan menggunakan system koordinat laboratorium (LAB coordinate system) jika E_i adalah energi awal dan E_f adalah energi akhir maka

$$E_i = K_x + m_x c^2 + K_X + M_X c^2 \quad (9.7)$$

$$E_i = K_y + m_y c^2 + K_Y + M_Y c^2 \quad (9.8)$$

Karena tidak ada usaha luar maka berlaku

$$E_f = E_i$$

atau

$$K_Y + M_Y c^2 + K_y + m_y c^2 = K_x + m_x c^2 + K_X + M_X c^2 \quad (9.9)$$

Dari persamaan (9.1), (9.7) dan (9.8) diperoleh

$$[(K_Y + K_y) - (K_X + K_x)] = [(M_X + m_x)c^2 - (M_Y + m_y)c^2] \quad (9.10)$$

Harga nilai bersih (net) dari energi kinetik disebut energi disintegrasi atau nilai Q yaitu

$$Q = (K_Y + K_y) - (K_X + K_x) \quad (9.11)$$

Harga Q ini juga sama dengan

$$Q = (M_X + m_x)c^2 - (M_Y + m_y)c^2 \quad (9.12)$$

Pada umumnya dalam eksperimen inti target biasanya dalam keadaan diam sehingga tidak memiliki energi kinetik, dengan demikian nilai Q menjadi

$$\begin{aligned} Q &= (K_Y + K_y) - K_x \\ &= (M_X + m_x)c^2 - (M_Y + m_y)c^2 \end{aligned} \quad (9.13)$$

Umumnya tidak mudah mengukur energy recoil inti K_Y . Misalkan sebuah partikel x dengan massa m_x bergerak dengan kecepatan v_x , menumbuk inti target X yang mempunyai massa M_X yang berada dalam keadaan diam. Sesudah reaksi nuklir inti hasil Y membuat sudut ϕ dengan

arah datang x yang memiliki massa M_Y dan kecepatan V_Y , sementara partikel hasil y membuat sudut θ yang memiliki massa m_y dan kecepatan v_y . Dari Hukum Kekekalan Momentum kita dapatkan

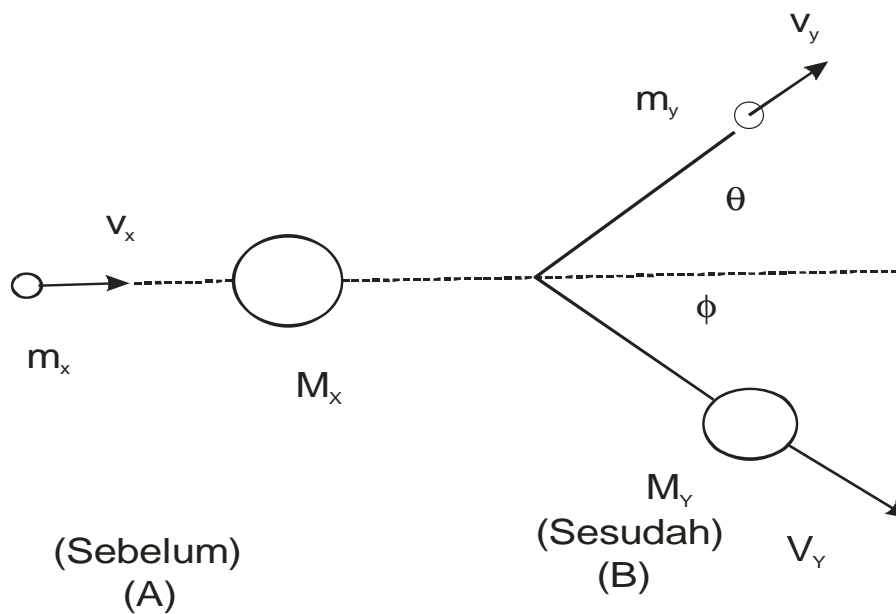
$$m_x v_x = m_y v_y \cos \theta + M_Y V_Y \cos \phi \quad (9.14)$$

$$0 = m_x v_x \sin \theta - M_Y V_Y \sin \phi \quad (9.15)$$

atau

$$M_Y V_Y \cos \phi = m_x v_x - m_y v_y \cos \theta \quad (9.14a)$$

$$M_Y V_Y \sin \phi = m_x v_x \sin \theta \quad (9.15a)$$



Gambar 9.1 (A) Memperlihatkan partikel datang mendekati inti target sebelum reaksi. (B) Partikel dan inti hasil sesudah reaksi.

Kuadratkan dan kemudian tambahkan, kita peroleh.

$$M_Y^2 V_Y^2 = m_x^2 v_x^2 + m_y^2 v_y^2 - 2m_x m_y v_x v_y \cos \theta \quad (9.16)$$

Gunakan hubungan

$$K_x = \frac{1}{2} m_x v_x^2, \quad K_y = \frac{1}{2} m_y v_y^2 \quad \text{dan} \quad K_Y = \frac{1}{2} M_Y V_Y^2 \quad (9.17)$$

Setelah disusun kita dapatkan

$$K_Y = \frac{m_x}{M_Y} K_x + \frac{m_y}{M_Y} K_y - \frac{2}{M_Y} (m_x m_y K_x K_y)^{1/2} \cos \theta \quad (9.18)$$

Nilai Q dari reaksi untuk $K_X = 0$ adalah

$$Q = (K_Y + K_y) - K_x \quad (9.13)$$

Substitusikan nilai K_Y , diperoleh

$$Q = K_y \left(1 + \frac{m_y}{M_Y} \right) - K_x \left(1 - \frac{m_x}{M_Y} \right) - \frac{2}{M_Y} (m_x m_y K_x K_y)^{1/2} \cos \theta \quad (9.19)$$

Ini adalah persamaan umum untuk nilai Q suatu reaksi inti.

Persamaan (9.17) merupakan persamaan umum untuk reaksi nuklir. Jika nilai Q positif disebut reaksi exoergic dan jika negatif disebut reaksi endoergic.

Beberapa catatan terhadap persamaan di atas :

- A. (i) Persamaan di atas tidak melibatkan energi kinetik inti recoil atau energi massa diam inti target.
- (ii) Peranan suku terakhir berkurang jika massa M_Y bertambah. Kenyataannya jika $M_Y \rightarrow \infty$, suku terakhir akan mendekati nol.
- (iii) Jika partikel hasil membuat sudut tegak lurus terhadap partikel datang, atau $\theta = 90^\circ$, $\cos 90^\circ = 0$, maka persamaan menjadi

$$Q = K_y \left(1 + \frac{m_y}{M_Y} \right) - K_x \left(1 - \frac{m_x}{M_Y} \right) \quad (9.20)$$

- (iv) Meskipun kita menyebut massa inti untuk menghitung Q, sebenarnya kita menggunakan massa atom.

- B. Persamaan di atas mengasumsikan kecepatan partikel cukup rendah yaitu kurang dari 5×10^9 cm/det. Jika kita menggunakan koreksi relativistik persamaan menjadi

$$Q = \left(1 + \frac{m_y}{M_Y} \right) K_y - \left(1 - \frac{m_x}{M_Y} \right) K_x + \left(\frac{K_x^2 + K_y^2 - K_Y^2}{2M_Y c^2} \right) - \frac{2(m_x m_y K_x K_y)^{1/2} \cos \theta \left(1 + \frac{K_x}{2m_x c^2} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{K_y}{2m_y c^2} \right)^{1/2}}{M_Y} \quad (9.21)$$

- C. Persamaan Q dapat dilihat dari pandangan energi datang (penembak), untuk reaksi yang bersifat exoergic. Kita dapat menyatakan energi kinetik partikel hasil dalam bentuk :

$$(M_Y + m_y)K_y - 2(m_x m_y K_x)^{1/2} \cos \theta \sqrt{K_y} - [K_x (M_Y - m_x) + M_Y Q] = 0 \quad (9.20)$$

Solusinya adalah

$$\sqrt{K_y} = \frac{\sqrt{m_x m_y K_x} \cos \theta \pm \left\{ (m_x m_y K_x \cos^2 \theta) + (M_Y + m_y) [K_x (M_Y - m_x) + M_Y Q] \right\}^{1/2}}{(M_Y + m_y)} \quad (9.22)$$

Atau

$$\sqrt{K_y} = a \pm \sqrt{a^2 + b} \quad (9.23)$$

Dimana

$$a = \frac{\sqrt{m_x m_y K_x}}{(M_Y + m_y)} \cos \theta \quad (9.24a)$$

$$b = \frac{K_x (M_Y - m_x) + M_Y Q}{(M_Y + m_y)} \quad (9.24b)$$

Jika energi datang hampir nol atau $K_x \approx 0$, maka

$$K_y = \frac{M_Y Q}{M_Y + m_y} \quad \text{Untuk } Q > 0 \quad (9.25)$$

Ini berarti bahwa K_y bernilai sama untuk semua sudut θ , atau reaksi bersifat isotropic.

Jika $Q > 0$ dan $M_Y > m_x$, yang biasanya terjadi, hanya 1 dari 2 solusi untuk K_y yang dapat dipakai yaitu yang bernilai positif, karena yang bernilai negatif tidak sesuai untuk situasi fisis dan persamaan menjadi

$$\sqrt{K_y} = a + \sqrt{a^2 + b} \quad (9.26)$$

Dalam kasus ini K_y tergantung pada sudut θ . K_y memiliki nilai maksimum untuk $\theta = 0$, minimum untuk $\theta = 180^\circ$, dan untuk $\theta = 90^\circ$, $K_y = b$, atau

$$K_y = \frac{K_x (M_Y - m_x) + M_Y Q}{(M_Y + m_y)} \quad (9.27)$$

Sehingga K_y bernilai tunggal. K_y dapat bernilai ganda untuk kondisi tertentu.

9.2 Reaksi Nuklir dalam Sistem Koordinat Pusat Massa

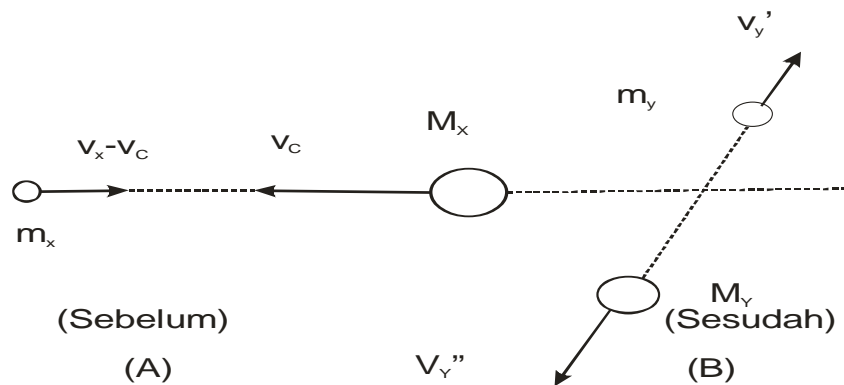
Sebelumnya telah dibahas dinamika reaksi inti dengan menggunakan Sistem Koordinat Laboratorium (SKL) atau LAB Coordinate System (LCS) Tetapi dari sudut pandangan teori lebih biasa digunakan Sistem Koordinat Pusat Massa (SKPM) atau Center of Mass Coordinate System (CMCS),

(1) Sebelum tumbukan

Jika sebuah partikel dengan massa m_x memiliki kecepatan v_x dalam SKL sementara partikel dengan massa M_X dalam keadaan diam, kecepatan v_C dari pusat massa dapat dicari dengan menggunakan hubungan

$$(m_x + M_X)v_C = m_x v_x + M_X \cdot 0$$

$$v_C = \frac{m_x v_x}{(m_x + M_X)} \quad (9.28)$$



Gambar 9.2 Suatu reaksi nuklir yang diamati dalam (A) Sistem Koordinat Laboratorium, (B) Sistem Koordinat Pusat Massa

Jika kecepatan m_x dan M_X dalam SKPM adalah v_x' dan V_X' , diperoleh

$$v_x' = v_x - v_C = v_x - \frac{m_x v_x}{m_x + M_X} = \frac{M_X}{m_x + M_X} v_x \quad (9.29)$$

dan

$$V_X' = 0 - v_C = -\frac{m_x}{m_x + M_X} v_x \quad (9.30)$$

Energi kinetik kedua partikel masing-masing adalah

$$K_x' = \frac{1}{2} m_x v_x'^2 = \frac{1}{2} m_x \left(\frac{M_X}{m_x + M_X} v_x \right)^2 = \left(\frac{M_X}{m_x + M_X} \right)^2 K_x \quad (9.31)$$

$$K_X' = \frac{1}{2} M_X V_X'^2 = \frac{1}{2} M_X \left(\frac{-m_x v_x}{m_x + M_X} \right)^2 = \frac{m_x M_X}{(m_x + M_X)^2} K_x \quad (9.32)$$

Energi kinetik total sebelum tumbukan K_i' adalah

$$K_i' = K_x' + K_X' = \left(\frac{M_X}{m_x + M_X} \right)^2 K_x + \frac{m_x M_X}{(m_x + M_X)^2} K_x$$

Atau

$$K_i' = K_x \left(\frac{M_X}{m_x + M_X} \right) \quad (9.33)$$

(2) Sesudah tumbukan

Kecepatan m_y dan M_Y sesudah tumbukan adalah v_y' dan V_Y' dan energi total sistem adalah K_f' . Dari hukum kekekalan momentum diperoleh

$$m_y v_y' = M_Y V_Y' \quad (9.34)$$

Energi kinetik m_y dan M_Y masing- masing adalah K_y' dan K_Y'

$$K_y' = \frac{1}{2} m_y v_y'^2 \quad (9.35)$$

$$K_Y' = \frac{1}{2} M_Y V_Y'^2 = \frac{1}{2} M_Y \left(\frac{m_y}{M_Y} v_y' \right)^2 = \frac{m_y}{M_Y} K_y' \quad (9.36)$$

Energi kinetik adalah

$$K_f' = K_y' + K_Y' = \frac{1}{2} m_y v_y'^2 + \frac{1}{2} M_Y V_Y'^2 \quad (9.37)$$

Hubungan K_i' dan K_f' adalah

$$K_i' = K_f' - Q \quad (9.38)$$

Dengan mensubsitusikan K_i' diperoleh

$$\begin{aligned} K_x \left(\frac{M_x}{m_x + M_x} \right) &= K_f' - Q \\ K_f' &= Q + K_x \left(\frac{M_x}{m_x + M_x} \right) \\ &= Q + K_x \left(1 - 1 + \frac{M_x}{m_x + M_x} \right) \end{aligned}$$

Atau

$$K_f' = Q + K_x \left(1 - \frac{m_x}{m_x + M_x} \right) \quad (9.39)$$

Menarik untuk membandingkan K_f' dan K_f dengan menggunakan hubungan

$$K_f = Q + K_x \quad (9.40)$$

Diperoleh energi kinetik K_y' dan K_Y'

$$K_y' = \frac{M_Y}{m_y + M_Y} \left[Q + \left(1 - \frac{m_x}{m_x + M_x} \right) K_x \right] \quad (9.41)$$

$$K_Y' = \frac{m_Y}{m_y + M_Y} \left[Q + \left(1 - \frac{m_x}{m_x + M_x} \right) K_x \right] \quad (9.42)$$

Secara sama diperoleh hubungan energi kinetik pusat massa sebelum dan sesudah tumbukan dengan energi kinetik K_x dalam SKL

$$K_C(\text{sebelum}) = \left(\frac{m_x}{m_x + M_x} \right) K_x \quad (9.43)$$

$$K_c(\text{sesudah}) = \left(\frac{m_x}{m_y + M_Y} \right) K_x \quad (9.44)$$

9.4 Energi Ambang untuk Reaksi Endoergic

Energi minimum yang diperlukan oleh reaksi endoergic disebut energi ambang. Sebuah partikel m_x bergerak mendekati partikel M_X yang diam, dengan kecepatan v dalam SKL, energi dalam SKPM

$$K_i' = \frac{1}{2} m_{red} v^2 \quad (9.45)$$

Dimana m_{red} adalah

$$m_{red} = m_x M_X / (m_x + M_X) \quad (9.46)$$

Energi yang diperlukan dalam SKPM untuk reaksi endoergic adalah

$$K_i' \geq |Q| \quad (9.47)$$

atau

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{m_x M_X}{m_x + M_X} v^2 &\geq |Q| \\ \frac{1}{2} m_x v^2 &\geq \frac{m_x + M_X}{M_X} |Q| \\ &\geq (1 + m_x / M_X) |Q| \end{aligned} \quad (9.48)$$

Tetapi $\frac{1}{2} m_x v^2 = K_x =$ energi kinetik dalam SKL, karena itu

$$K_x \geq (1 + m_x / M_X) |Q| \quad (9.49)$$

Dengan demikian

$$\text{Energi Ambang} = (K_x)_{\min} = (1 + m_x / M_X) |Q| \quad (9.50)$$

Hasil yang sama dapat diperoleh dengan menggunakan SKL

$$\sqrt{K_y} = a \pm \sqrt{a^2 + b} \quad (9.51)$$

Dimana

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sqrt{m_x m_y K_x}}{(M_Y + m_y)} \cos \theta \\ b &= \frac{K_x (M_Y - m_x) + M_Y Q}{(M_Y + m_y)} \end{aligned} \quad (9.52)$$

Untuk $K_x \approx 0$, maka

$$a \approx 0 \text{ dan}$$

$$b \approx M_Y Q / (M_Y + m_y)$$

Karena Q negatif, maka $(a^2 + b)$ akan negatif. Ini berarti $\sqrt{K_y}$ adalah imajiner, karena itu K_y akan bernilai negatif yang tidak punya arti fisis. Karena itu reaksi endoergic tidak akan terjadi jika tidak cukup energi. Dengan meningkatkan energi kinetik K_x , reaksi akan terjadi pada suatu harga minimum yang dengan kondisi $(a^2 + b) = 0$, yaitu

$$(K_x)_{\min} = -Q \left[\frac{M_Y + m_y}{M_Y + m_y - m_x - (m_x m_y / M_Y) \sin^2} \right] \quad (9.53)$$

Jika partikel hasil m_y diamati pada sudut $\theta = 0$, ini akan memberikan

$$(K_x)_{\min} = -Q \left[\frac{M_Y + m_y}{M_Y + m_y - m_x} \right] \quad (9.54)$$

Dengan menggunakan relasi

$$M_X + m_x = M_Y + m_y + \frac{Q}{c^2} \quad (9.55)$$

Diperoleh

$$(K_x)_{\min} = -Q \left[\frac{M_X + m_x - Q/c^2}{M_X - Q/c^2} \right] \quad (9.56)$$

Karena energi ekivalen dari M_X biasanya amat besar dibandingkan dengan Q maka persamaan dapat ditulis

$$(K_x)_{\min} = -Q \left[\frac{M_X + m_x}{M_X} \right] = -Q \left(1 + \frac{m_x}{M_X} \right) \quad (9.57)$$

Jika energi partikel datang sama dengan energi ambang, partikel hasil akan dipancarkan pada sudut $\theta = 0$ dengan energi

$$K_y = (K_x)_{\min} \frac{m_x m_y}{(m_y + M_Y)^2} \quad (9.58)$$

Dalam sistem laboratorium energi kinetik total timbul dari energi kinetik partikel datang saja

$$K_{lab} = \frac{1}{2} m_x v_x^2 \quad (9.59)$$

Dalam sistem pusat massa atau Center of Mass Coordinate System (CMCS), kedua partikel dan inti (x dan X) bergerak dan memberi kontribusi pada energi kinetik total

$$K_{cm} = \frac{1}{2} m_x (v - V)^2 + \frac{1}{2} M_X V^2 = \left(\frac{M_X}{m_x + M_X} \right) K_{lab} \quad (9.60)$$

Dimana V adalah kecepatan pusat massa yang besarnya adalah

$$V = \left(\frac{m_x}{m_x + M_x} \right) v_x \quad (9.61)$$

Jika Q berharga negatif diperlukan energi agar reaksi dapat berlangsung sebesar

$$K_{cm} + Q \geq 0 \quad (9.62)$$

9.5 Penampang Reaksi Nuklir

Untuk menyatakan peluang partikel penembak akan berinteraksi dengan inti target digunakan ide penampang (cross section). Setiap inti target dibayangkan memiliki suatu bidang dengan luas tertentu yang disebut penampang terhadap partikel datang. Setiap partikel datang yang masuk dalam bidang ini akan berinteraksi dengan inti target. Jadi penampang merupakan ukuran kemungkinan interaksi antara partikel datang dengan inti target.

Misalnya kita mempunyai lempeng material yang luasnya A dan tebalnya dx. Jika material tersebut mengandung n atom per satuan volume, maka jumlah total inti dalam lempengan tersebut adalah nAdx. Jika setiap inti berpenampang untuk interaksi tertentu, maka penampang bersama semua inti dalam lempengan tersebut adalah nA dx. Jika terdapat N partikel dalam berkas penembak, banyaknya dN yang berinteraksi dalam lempengan dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\text{Partikel berinteraksi}}{\text{Partikel datang}} = \frac{\text{Penampang bersama}}{\text{Luas target}}$$

$$\frac{dN}{N} = \frac{nA \dagger dx}{A} = n \dagger dx \quad (9.63)$$

Karena dN memiliki harga negatif (lebih banyak partikel datang dibandingkan partikel yang tidak berinteraksi) maka harus dimasukkan tanda minus pada persamaan (1) sehingga

$$-\frac{dN}{N} = n \dagger dx \quad (9.64)$$

Hasil integrasi persamaan (2) adalah

$$N = N_0 e^{-n \dagger x} \quad (9.65)$$

Satuan untuk penampang adalah barn dimana $1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$. Penampang hampir semua reaksi nuklir bergantung pada energi partikel yang datang.

9.6 Lintasan bebas rata-rata

Lintasan bebas rata-rata sebuah partikel dalam material ialah jarak rata-rata yang ditempuhnya dalam material sebelum mengalami interaksi. Karena $e^{-n \cdot x} dx$ ialah peluang sebuah partikel berinteraksi dalam interval dx pada jarak x , maka didapatkan

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-n \cdot x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-n \cdot x} dx} = \frac{1}{n} \quad (9.66)$$

9.7 Laju Reaksi

Jumlah reaksi nuklir yang berlangsung persatuan waktu disebut laju reaksi. Misalkan v adalah kecepatan partikel didalam berkas dengan kerapatan q persatuan volume. Berkas ini dijatuhkan pada lempeng material dengan ketebalan t , luas permukaan A dan memiliki n atom persatuan volume. Jika material memiliki penampang σ , maka laju reaksi atau Reaction Rate (RR) adalah

$$R.R. = qv(n \cdot t)A \quad (9.67)$$

Fluks Φ didefinisikan sebagai jumlah partikel yang melewati suatu satuan luas dalam satu satuan waktu. Dalam kasus ini $\Phi = qv$. Juga $tA = V$, volume dari material. Dengan demikian

$$R.R. = \Phi \cdot N \quad (9.68)$$

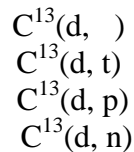
Perkalian n dan σ disebut penampang makroskopik Σ . Dinyatakan dalam Σ maka

$$R.R. = \Phi \Sigma V \quad (9.69)$$

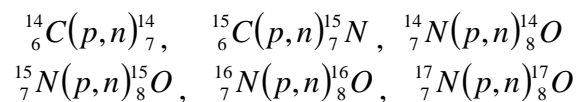
PERTANYAAN DAN SOAL-SOAL

1. Sebuah berkas deuteron ditembakkan pada Si^{29} yang menyebabkan terjadinya reaksi nuklir. Berikan simbol, nomor massa, dan nomor atom dari inti rekoil jika dipancarkan (a) sebuah proton, atau (b) sebuah neutron.

2. Lengkapi reaksi berikut :



3. (a) Tentukan manakah reaksi yang exoergic dan endoergic dari reaksi berikut ini. (b) Hitung nilai Q nya



4. Sebuah partikel alfa dengan energi kinetik 3,5 MeV menumbuk sebuah inti ${}^{10}\text{B}$ yang berada dalam keadaan diam. Akibat reaksi dihasilkan proton yang bergerak dalam arah yang sama dengan arah partikel semula.

- a. Tulis persamaan reaksi di atas.
- b. Berapa nilai Q reaksi ini
- c. Hitung energi kinetik proton

5. Dalam banyak kasus neutron cepat dihasilkan dalam laboratorium dengan reaksi $\text{H}^3(\text{d}, \text{n})\text{He}^4$. Misalnya energi deuteron 400 keV.

- (a) Hitunglah nilai Q dari reaksi
- (b) Berapakah energi dari neutron jika tritium ditembak dengan deuteron 4 MeV pada berbagai sudut.

6. Nilai Q dari reaksi $\text{Li}^7(\text{p}, \text{n})\text{Be}^7$ adalah -1,645 MeV.

- a. Berapa energi ambang untuk reaksi ini.
- b. Berapa energi neutron pada energi ambang.

7. Nilai Q dari reaksi $\text{H}^3(\text{p}, \text{n})\text{He}^3$ adalah -0,764 MeV.

- a. Berapa energi ambang untuk reaksi ini.
- b. Berapa energi neutron pada energi ambang.

8. Carilah energi kinetik minimum dalam sistem laboratorium yang harus dimiliki proton untuk memulai reaksi $\text{N}^{15}(\text{p}, \text{n})\text{O}^{15}$

9. Partikel alfa 5 MeV menumbuk O^{16} yang berada dalam keadaan diam. Carilah kelajuan pusat massa sistem dan energi kinetik partikel relatif terhadap pusat massa.

10. Kerapatan aluminium adalah $2,7 \text{ gm/cm}^3$ dan penampang untuk neutron yang berenergi $0,02 \text{ MeV}$ adalah $4,5 \text{ b}$. Berapa fraksi neutron yang akan melewati lembaran aluminium setebal 1 mm .
11. Hitunglah lintasan bebas rata-rata neutron yang berenergi 1 MeV di dalam grafit ($\sigma = 2,6 \text{ b}$, $\rho = 2.250 \text{ kg/m}^3$).
12. Hitunglah lintasan bebas rata-rata neutron thermal dalam air ($\sigma = 0,33 \text{ b}$, $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$).
13. Tebal lempeng penyerap besarnya sama dengan jalan bebas rata-rata untuk berkas partikel tertentu. Berapa persentase partikel yang keluar dari lempengan tersebut.
14. Penampang penangkapan ^{59}Co untuk neutron termal adalah 37 b . (a) Berapa persentase berkas neutron termal yang menembus lempengan ^{59}Co setebal 1 mm . Massa jenis ^{59}Co adalah $8,9 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$, (b) Berapa lintasan bebas rata-rata neutron termal dalam ^{59}Co .