

บทที่ 5 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (NUCLEAR REACTIONS)

ในบทที่ 3 นั้น ได้กล่าวถึงปฏิกิริยานิวเคลียร์ ในการคำนวณสามารถหาค่าควมซึ่งเป็นพลังงานสมมูลของสมการได้ ไม่ว่าจะเป็นการส่งอนุภาคออกมาเป็นมุมเท่าใด ส่วนในบทนี้ จะได้พิจารณาถึงพลังงานของนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เพราะบางคราวนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะยังคงอยู่ที่สภาวะถูกกระตุ้นต่าง ๆ กัน โดยการพิจารณาจากพลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมา และค่าควมที่เกิดขึ้น อาศัยการคำนวณจากสมการ (3.9), (3.10) ในบทที่ 3 ในหนังสือตำรา PH 424 จะสามารถสร้างระดับพลังงานนิวเคลียร์ได้

5.1 นิวเคลียสเชิงประกอบ

บอร์เป็นผู้ตั้งทฤษฎีขึ้น เพื่อใช้อธิบายการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยกล่าวถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้า อาจเขียนเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

- (1) เมื่ออนุภาคตกกระทบเป้า จะถูกดูดกลืนเข้าไปในนิวเคลียส เพื่อเกิดเป็นคอมพาว์นนิวเคลียส
- (2) พลังงานรวมของระบบจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบ
- (3) พลังงานรวมของระบบจะเข้าไปแบ่งปันกันแบบสุ่ม ๆ ระหว่างอนุภาคในนิวเคลียสอย่างรวดเร็ว ก่อนที่จะส่งอนุภาคออกมา
- (4) พลังงานจลน์ส่วนหนึ่งของอนุภาคที่เข้าชน จะถูกแบ่งปันให้เป็นพลังงานจลน์ของนิวเคลียสเชิงประกอบเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่
- (5) วิธีการสลายไม่ขึ้นกับวิธีการเกิด
- (6) การสลายของนิวเคลียสเชิงประกอบนั้น อาจส่งอนุภาค หรือรังสีแกมมาออกมาโดยเหลือนิวเคลียสที่เกิดใหม่ไว้

5.2 การหาพลังงานของนิวเคลียสเชิงประกอบที่ถูกกระตุ้น

เมื่อนิวคลีอิดเข้าชนเป้า จะรวมกันเพื่อเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ จากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม นิวเคลียสเชิงประกอบจะเคลื่อนที่ไปเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้ พลังงานจลน์ของนิวคลีอิดที่เข้าชน จึงต้องเสียไปเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่นิวเคลียสเชิงประกอบ จึงเหลือพลังงานจลน์ที่จะทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้นเพียง E_x' ซึ่งหาได้จาก

$$E_x' = E_x \left(\frac{M_x}{M_x + m_x} \right) \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

เมื่อ E_x คือ พลังงานจลน์ของนิวคลีอิดที่เข้าชน (ดูรายละเอียดในหนังสือตำรา PH 424)

5.3 การหาระดับพลังงานของนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้น

ในการทดลองมักจะใช้พลังงานของนิวคลีอิดที่เรโซแนนซ์ เพราะเป็นพลังงานที่จะทำให้มีโอกาสเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบได้มาก และส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมาได้มาก สำหรับพลังงานเรโซแนนซ์ค่าต่าง ๆ จะหาค่าพลังงานจลน์ที่จะทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้นได้ ดังนี้

(1) หาค่าแตกต่างของมวลก่อนทำปฏิกิริยา และนิวเคลียสเชิงประกอบที่เกิดขึ้นในหน่วยเอเอ็มยู

(2) เปลี่ยนค่าที่ได้ในข้อ (1) เป็นพลังงานโดยคูณด้วย 931.5 จะได้ค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในหน่วยเอเอ็มอีวี

(3) นำค่าพลังงานของนิวคลีอิดที่วิ่งเข้าชน เข้าไปรวมเพื่อเป็นพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ กรณีที่นิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่ไป จะนำพลังงาน E_x' เข้าไปรวม เพื่อเป็นพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ จะได้พลังงานที่ถูกกระตุ้นที่พลังงานเรโซแนนซ์ต่าง ๆ กัน

$$\text{พลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ} = [M(X) + m(x) - M_{CN}]931.5 + E_x' \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

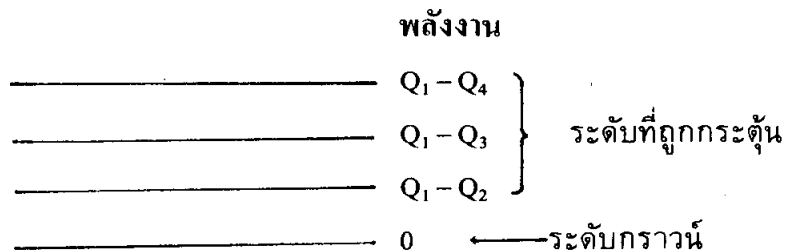
พลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ จะถูกแบ่งปันให้กับนิวคลีอิดในนิวเคลียส เรียกสภาวะควาซีสเตชันนารี (Quasi-stationary state) เป็นการทำนายว่า นิวเคลียสเชิงประกอบนั้น จะส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมาออกมา ถ้าพลังงานที่ถูกกระตุ้นมากกว่าพลังงานแยกนิวคลีอิดแล้ว นิวเคลียสเชิงประกอบนั้นก็ส่งอนุภาคออกมาได้ เรียกสภาวะที่แท้จริง (virtual state) แต่ถ้าพลังงานที่ถูกกระตุ้นน้อยกว่าค่าพลังงานแยกนิวคลีอิด นิวเคลียสเชิงประกอบนั้นก็ส่งรังสีแกมมาออกมา เรียกสภาวะที่ถูกยึดอยู่ (bound state)

5.4 การหาระดับพลังงานของนิวเคลียส

ในการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ เมื่อให้อนุภาคที่มีพลังงานค่าหนึ่งวิ่งเข้าชนนิวเคลียส จะทำให้เกิดอนุภาคใหม่พลังงานต่าง ๆ กันมากมาย จากการคำนวณหาค่าคิวในปฏิกิริยา จะได้หลายค่า กรณีที่ค่าคิวมีค่าสูงสุด จะไม่มีรังสีแกมมาส่งออกมา แสดงว่า นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นอยู่ที่สภาวะกราวน์ แต่ถ้าค่าคิวมีค่าต่ำลงมา แสดงว่า จะมีพลังงานจำนวนหนึ่งเหลืออยู่เป็นพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสที่เกิดขึ้น ดังนั้น จะสามารถเขียนระดับพลังงานของนิวเคลียสได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

พลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมา	ค่าคิวที่คำนวณได้	พลังงานที่ถูกกระตุ้น
E_{y_1}	Q_1	0
E_{y_2}	Q_2	$Q_1 - Q_2$
E_{y_3}	Q_3	$Q_1 - Q_3$
E_{y_4}	Q_4	$Q_1 - Q_4$

ระดับพลังงานของนิวเคลียส



5.5 การทำนายว่าจะมีการส่งอนุภาคออกมาหรือไม่

จากการทดลองพบว่า เมื่ออนุภาคที่เข้าชนมีพลังงานต่างกัน จำนวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็จะต่างกันไป เมื่อเกิดปฏิกิริยาได้น้อย จำนวนอนุภาคที่ถูกส่งออกมาก็จะมีน้อย ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาจะสามารถวัดได้จากค่าภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการเกิดปฏิกิริยานั้น ที่พลังงานนั้นกับเป้า โดยปกติจะวัดที่พลังงานของอนุภาคที่เรโซแนนซ์ เพราะเป็นพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี คือมีค่าภาคตัดขวางสูง

การที่จะพิจารณาว่า จะมีการส่งอนุภาคออกมาเท่าใดนั้น จะต้องพิจารณาว่า เมื่ออนุภาคเข้าชนนิวเคลียส จะมีโอกาสเกิดนิวเคลียสเชิงประกอบมากน้อยเท่าใด และจะมีโอกาสส่งอนุภาคออกมาได้เท่าใด

5.6 สูตรของเบรทและวิกเนอร์ (Breit and Wigner formula)

เป็นสูตรที่ใช้หาค่าภาคตัดขวางสำหรับการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออนุภาค x เข้าชนเป้า แล้วส่งอนุภาค y ออกมา เป็นการพิจารณา เมื่ออนุภาคที่เข้าชนเป้าหมายมีพลังงานเรโซแนนซ์ เป็นการนำลักษณะที่เป็นคลื่นของนิวคลีออนมาใช้ทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ด้วย สูตรของเบรทและวิกเนอร์ คือ

$$\sigma(x, y) = \frac{\lambda^2 \Gamma_x \Gamma_y}{4\pi \left[(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2 \right]} \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นเดอบรอยของอนุภาคที่ตกกระทบ

E คือพลังงานของอนุภาค

E_0 คือพลังงานที่เรโซแนนซ์

Γ คือระดับความกว้างของพลังงานที่เรโซแนนซ์ ($E = E_0$)

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{2.87 \times 10^{-9}}{\sqrt{E(\text{eV})}} \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

h คือค่าคงที่ของพลังค์

5.7 โอกาสการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์

การพิจารณาว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์จะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด จะต้องพิจารณาค่าภาคตัดขวางที่พลังงานนั้นกับเป้า $\sigma(E)$ ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด และค่าฟลักซ์ของอนุภาค ϕ

$$\phi = nv \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

ฟลักซ์ หมายถึง จำนวนอนุภาคต่อเซนติเมตร³ (n) ที่วิ่งเข้าชนเป้าด้วยความเร็ว v เซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้น ฟลักซ์จึงมีหน่วยเป็น อนุภาค/ซม²วินาที

โดยปกติมักจะหาค่าภาคตัดขวางจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เมื่อนำธาตุที่มีเสถียรภาพเข้าไปอาบรังสี (รายละเอียดจะต้องศึกษาจากตำรา PH 424)

$$\text{ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการอาบรังสี } R = \Sigma \phi \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม}^2 \text{วินาที}} \quad \dots\dots\dots(5.6)$$

$$\text{เมื่อ } \Sigma = N\sigma \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม}^3} \frac{\text{ซม}^2}{\text{อะตอม}} = \text{ซม}^{-1} \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

ขณะที่นำธาตุเข้าไปอาบรังสี จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นธาตุกัมมันตรังสี และมีการสลายตามเวลาที่นำไปอาบรังสี นั่นคือ ถ้าอาบรังสีนาน T ความแรงจะเหลือเพียง

$$R = \Sigma \phi (1 - e^{-\lambda T}) \quad \dots\dots\dots(5.8)$$

ในการคำนวณ ค่าภาคตัดขวางจะเป็นค่าภาคตัดขวางสำหรับแต่ละปฏิกิริยาที่แต่ละพลังงานกับเป้า แต่ถ้าโจทย์ไม่กำหนด จะคิดว่า มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นเพียงปฏิกิริยาเดียว หรือเป็นค่าภาคตัดขวางทั้งหมด คือ

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$$

ยังมีการหาค่าภาคตัดขวางจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนของพื้นที่ส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับพื้นที่ทั้งหมดของเป้า คือ

$$\frac{R}{R_0} = \frac{N\sigma Ax}{A} \dots\dots\dots(5.9)$$

เมื่อ

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อผ่านเป้า}}{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด (ก่อนผ่านเป้า)}}$$

$$\frac{N\sigma Ax}{A} = \frac{\text{พื้นที่ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในเป้า}}{\text{พื้นที่ทั้งหมด}}$$

แบบฝึกหัดบทที่ 5

ข้อ 5.1 โจทย์ จงอธิบายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้า โดยใช้ทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบของบอร์

เฉลย กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้า โดยใช้ทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบของบอร์ ได้แบ่งไว้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

- (1) เมื่ออนุภาคตกกระทบนิวเคลียสของเป้า จะถูกดูดกลืนเข้าไปในนิวเคลียสของเป้า เพื่อกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ
- (2) พลังงานรวมทั้งหมดของระบบจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบ
- (3) พลังงานจลน์ส่วนหนึ่งของอนุภาคที่เข้าชน จะต้องถูกแบ่งเป็นพลังงานจลน์ของนิวเคลียสเชิงประกอบเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่
- (4) พลังงานรวมทั้งหมดของระบบจะถูกแบ่งปันกัน (แบบสุ่ม) ระหว่างอนุภาคในนิวเคลียสอย่างรวดเร็ว ก่อนที่จะส่งอนุภาคออกมา
- (5) การสลายของนิวเคลียสเชิงประกอบ อาจส่งอนุภาค (โปรตอน, นิวตรอน หรืออนุภาคอื่น ๆ) หรือรังสีแกมมา โดยเหลือนิวเคลียสที่เกิดใหม่ไว้
- (6) วิธีการสลายไม่ขึ้นกับวิธีการเกิด

ข้อ 5.2 โจทย์ ให้ความหมายของ

- (ก) Quasi - stationary state
- (ข) Virtual state
- (ค) Bound state

เฉลย

- (ก) Quasi - stationary state หมายถึง สภาวะที่นิวเคลียสเชิงประกอบใช้เวลาในการแบ่งปันพลังงานให้กับอนุภาคในนิวเคลียส โดยที่ยังไม่มีการส่งอนุภาคหรือรังสีแกมมา
- (ข) Virtual state หมายถึง สภาวะที่นิวเคลียสเชิงประกอบจะสลายโดยการส่งอนุภาค อาจเป็นโปรตอน นิวตรอน หรืออนุภาคอื่น ๆ
- (ค) Bound state หมายถึง สภาวะที่นิวเคลียสเชิงประกอบจะสลายโดยการส่งรังสีแกมมา

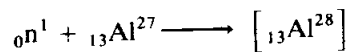
ข้อ 5.3 โจทย์ โดยใช้ทฤษฎีนิวเคลียสเชิงประกอบของบอร์ จงหาพลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนพลังงาน 2 เอมอีวีเข้าชนนิวเคลียสอะลูมิเนียม -27 กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$${}_{13}\text{Al}^{27} = 26.981535$$

$${}_0n^1 = 1.0086654$$

$${}_{13}\text{Al}^{28} = 27.981908$$

เฉลย



$$\begin{aligned} \text{มวลที่ต่างกัน} &= M(\text{Al}^{27}) + m_n - M(\text{Al}^{28}) \\ &= 26.981535 + 1.0086654 - 27.981908 \\ &= 8.29 \times 10^{-3} \text{ เอเอ็มยู} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานกระตุ้น} &= 8.29 \times 10^{-3} \times 931.5 \\ &= 7.72 \text{ เอมอีวี} \end{aligned}$$

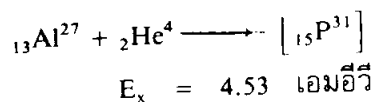
$$E'_x = \text{พลังงานกระตุ้นเนื่องจากอนุภาคที่เข้าชนมีพลังงานจลน์}$$

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x \left(\frac{M_x}{M_x + m_x} \right) \\ &= 2 \times \frac{27}{28} = 2 \times 0.9642 \\ &= 1.928 \end{aligned}$$

$$\text{พลังงานกระตุ้นของนิวเคลียสเชิงประกอบทั้งหมด} = 7.72 + 1.92 = 9.64 \text{ เอมอีวี}$$

ข้อ 5.4 โจทย์ กำหนดพลังงานของอนุภาคแอลฟา = 4.53 เอมอีวี วิ่งเข้าชนนิวเคลียสของอะลูมิเนียม -27 จงหาพลังงานของอนุภาคแอลฟา ส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบมีพลังงานสูงขึ้น และพลังงานส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่

เฉลย



$$E_x = 4.53 \text{ เอมอีวี}$$

$$\text{พลังงานของอนุภาคแอลฟาส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบมีพลังงานสูงขึ้น} = E'_x$$

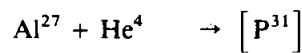
$$\begin{aligned}
 E'_x &= E_x \left[\frac{M_x}{M_x + m_x} \right] \\
 &= 4.53 \times \frac{27}{27+4} \\
 &= 3.945 \text{ เมมอีวี}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่} &= 4.53 - 3.94 = 0.5845 \\
 &= 0.58 \text{ เมมอีวี}
 \end{aligned}$$

ข้อ 5.5 โจทย์ ใช้อุณหภูมิแอลฟาพลังงาน 8.42 เมมอีวี ยิงเข้าไปในนิวเคลียสอะลูมิเนียม - 27
จงหาพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น
กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$$\begin{aligned}
 {}_{13}\text{Al}^{27} &= 26.981535, & {}_2\text{He}^4 &= 4.0026036 \\
 {}_{15}\text{P}^{31} &= 30.973763
 \end{aligned}$$

เฉลย



$$\begin{aligned}
 \text{มวลที่ต่างกัน} &= M(\text{Al}^{27}) + M(\text{He}^4) - M(\text{P}^{31}) \\
 &= 26.981535 + 4.0026036 - 30.973763 \text{ เอเอ็มยู}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานที่เกิดขึ้น} &= 0.0103756 \times 931.5 \\
 &= 9.66487 \text{ เมมอีวี}
 \end{aligned}$$

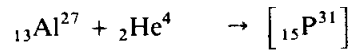
พลังงานกระตุ้นเนื่องจากอนุภาคที่เข้าชนมีพลังงานจลน์ = E'_x

$$\begin{aligned}
 E'_x &= E_x \left(\frac{M_x}{M_x + m_x} \right) \\
 &= 8.42 \times \frac{27}{31} = 7.33 \text{ เมมอีวี}
 \end{aligned}$$

$$\text{พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น} = 7.33 + 9.66 = 16.99 \text{ เมมอีวี}$$

ข้อ 5.6 โจทย์ อนุภาคแอลฟาพลังงาน 6.82 เมมอีวี ยิงเข้าไปในนิวเคลียสของอะลูมิเนียม - 27
จงหาพลังงานของอนุภาคแอลฟาส่วนที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น

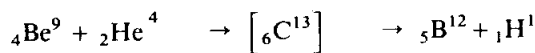
เฉลย



$$\begin{aligned} E_x' &= E_x \left(\frac{M_x}{M_x + m_x} \right) \\ &= 6.82 \left(\frac{27}{27+4} \right) \\ &= 6.82 \times \frac{27}{31} \\ &= 5.94 \text{ เมมอีวี} \end{aligned}$$

- ข้อ 5.7 โจทย์ อนุภาคแอลฟาพลังงาน 21.7 เมมอีวี วิ่งเข้าชนเป้าเบอร์ริลเลียม-9 เกิดโปรตอนขึ้นหลายกลุ่มในแนวทำมุม 90° กับลำอนุภาคแอลฟา ถ้าวัดพลังงานของอนุภาคได้ 6.09 เมมอีวี จงหา
- (ก) ค่าคิวก่เกิดขึ้น
- (ข) ถ้าวัดค่าคิวก่ได้เท่ากับ -6.92 เมมอีวี จงหาพลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมา

เฉลย



$$\begin{aligned} \text{(ก)} \quad Q &= E_y \left(1 + \frac{m_y}{M_y} \right) - E_x \left(1 - \frac{m_x}{M_y} \right) \\ &= 6.09 \left(1 + \frac{1}{12} \right) - 21.7 \left(1 - \frac{4}{12} \right) \\ &= 6.09 \times \frac{13}{12} - 21.7 \times \frac{8}{12} \\ &= 6.5975 - 14.46 \end{aligned}$$

$$\text{ค่าคิวก่} = -7.869 \text{ เมมอีวี}$$

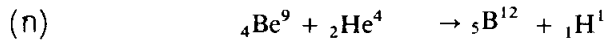
$$\begin{aligned} \text{(ข)} \quad Q &= -6.92 \text{ เมมอีวี} \\ -6.92 &= E_y \left(1 + \frac{1}{12} \right) - 21.7 \left(1 - \frac{4}{12} \right) \\ E_y &= 6.97 \text{ เมมอีวี} \end{aligned}$$

$$\text{พลังงานของอนุภาคที่ส่งออกมา} = 6.97 \text{ เมมอีวี}$$

- ข้อ 5.8 โจทย์ อนุภาคแอลฟาพลังงาน 21.7 เมมอีวี วิ่งเข้าชนเป้าเบอร์ริลเลียม-9 ปรากฏว่ามีโปรตอนเกิดขึ้น 4 กลุ่ม ในแนวทำมุม 90° กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา วัดค่าคิวก่ได้ -6.92 , -7.87 , -8.57 และ -10.74 เมมอีวี ตามลำดับ จงหา

- (ก) พลังงานของโปรตอน
 (ข) ค่าที่ทำให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นอยู่ที่สภาวะกราวน์
 (ค) จงหาระดับพลังงานนิวเคลียร์
 (ง) หาค่าพลังงานเทรสโฮลด์ที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ที่สภาวะกราวน์

เฉลย



$$Q = E_y \left(1 + \frac{m_y}{M_Y}\right) - E_x \left(1 - \frac{m_x}{M_X}\right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$-6.92 = E_y \left(1 + \frac{1}{12}\right) - 21.7 \left(1 - \frac{4}{12}\right)$$

$$E_y = \frac{1}{13} (-6.92 \times 12 + 21.7 \times 8)$$

$$\text{พลังงานของโปรตอน} = \frac{1}{13} \times 90.56 = 6.96 \text{ เมมอีวี}$$

โดยการใช้สูตรในสมการที่ (1) จะหาค่า E_y เมื่อ Q มีค่าต่าง ๆ กันได้

- (ข) ค่าที่ทำให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นอยู่ที่สภาวะกราวน์ คือ -6.92 เมมอีวี
 (ค) ได้แสดงไว้ในตาราง
 (ง) พลังงานเทรสโฮลด์คือ

$$\begin{aligned} E_{th} &= -Q \left(1 + \frac{m_x}{M_X}\right) \\ &= +6.92 \left(\frac{9+4}{9}\right) \\ &= 6.92 \times \frac{13}{9} \\ &= 9.99 \text{ เมมอีวี} \end{aligned}$$

(ค)

Q	E_y	E_{th}	Energy level
-6.92	6.96	9.99	0
-7.87	6.09	11.36	0.95
-8.57	5.45	12.38	1.65
-10.74	3.44	15.51	3.82

ข้อ 5.9 โจทย์ กำหนดให้นิวตรอนพลังงาน 10 เมมอีวี ชนนิวเคลียสของคาร์บอน-12 จงหา

ค่าพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น

(ก) ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ

(ข) คัดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ

(ค) จงหาพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่

กำหนดมวลของ

$${}^6\text{C}^{12} = 12.000000 \text{ เอเอมยู}, \quad {}^6\text{C}^{13} = 13.003354 \text{ เอเอมยู}$$

$${}_0\text{n}^1 = 1.0086654 \text{ เอเอมยู}$$

เฉลย

$$\begin{aligned} {}^6\text{C}^{12} + {}_0\text{n}^1 &\rightarrow [{}^6\text{C}^{13}] \\ \text{พลังงานที่เกิดขึ้น} &= [M(\text{C}^{12}) + m_n - M(\text{C}^{13})]931.5 \text{ เมมอีวี} \\ &= [12.000000 + 1.0086654 - 13.003354]931.5 \\ &= \mathbf{0.0053114 \times 931.5} \\ &= \mathbf{4.941} \text{ เมมอีวี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(ก) พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น} &= 4.947 + 10 \text{ เมมอีวี} \\ &= \mathbf{14.95} \text{ เมมอีวี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(ข) ถ้านิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่} & \quad E'_x = E_x \left(\frac{M_x}{M_x + m_x} \right) \\ &= 10 \times \frac{12}{12+1} \\ &= \mathbf{9.23} \text{ เมมอีวี} \end{aligned}$$

$$\text{พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น} = 4.95 + 9.23 = 14.18 \text{ เมมอีวี}$$

$$\text{(ค) พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบเคลื่อนที่} = 10 - 9.23 = 0.77 \text{ เมมอีวี}$$

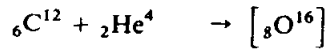
ข้อ 5.10 โจทย์ อนุภาคแอลฟาพลังงาน 10 เมมอีวี ยิงเข้าไปในนิวเคลียสของคาร์บอน-12 เกิด

พลังงานขึ้นในปฏิกิริยา α เมมอีวี จงหาค่าพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น

(ก) กรณีที่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ

(ข) กรณีที่คัดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ

เฉลย



- (ก) ถ้าไม่คิดการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสเชิงประกอบ
พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น = $Q + 10$ เมมอีวี
- (ข) เพื่อให้เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม นิวเคลียสเชิงประกอบจะเคลื่อนที่เล็กน้อย ดังนั้น พลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชนจึงต้องเสียไป เพื่อเป็นพลังงานจลน์ของนิวเคลียสเชิงประกอบ
พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้นจึงเหลือ E'_x

$$\begin{aligned} E'_x &= \left[\frac{M_x}{M_x + m_x} \right] E_x \\ &= \left[\frac{12}{12+4} \right] \times 10 \\ &= 7.5 \text{ เมมอีวี} \end{aligned}$$

พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบถูกกระตุ้น = $Q + 7.5$ เมมอีวี

- ข้อ 5.11 โจทย์ ปฏิกิริยา ${}_{48}\text{Cd}^{113} (n, \gamma) {}_{48}\text{Cd}^{114}$ เกิดเรโซแนนซ์ที่พลังงาน 0.176 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีระดับความกว้างของพลังงานที่จะส่งรังสีแกมมา $\Gamma = 0.115$ อิเล็กตรอนโวลต์ จงหาชีวิตเฉลี่ยของสถานะถูกกระตุ้นเพื่อจะส่งรังสีแกมมาออกมา

เฉลย

โดยใช้หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

ระดับความกว้าง (Γ) ตรงกับความไม่แน่นอนในพลังงานของสถานะ (ΔE)
ชีวิตเฉลี่ย (τ) ตรงกับความไม่แน่นอนในเวลาที่สถานะนั้นจะสลาย (Δt)

$$\begin{aligned} \tau &\equiv \frac{\hbar}{2\pi\Gamma} \\ \tau &= \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{2 \times \pi \times 0.115 \text{ eV}} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \\ &= \frac{1.05 \times 10^{-15}}{0.115 \times 1.6} \end{aligned}$$

$$\text{ชีวิตเฉลี่ย} = 5.7 \times 10^{-15} \text{ วินาที}$$

ข้อ 5.12 โฟทซ์ นิวตรอนพลังงาน 1 เอมอีวี เข้าชนนิวเคลียสของแมกนีเซียม-24 เกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบแมกนีเซียม-25 จงหาพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบอยู่เหนือระดับกราวน์ และกรณีนี้มีโอกาสที่จะส่งอนุภาคออกมาหรือไม่ เพราะเหตุใด กำหนดมวลของ

$${}_{12}\text{Mg}^{24} = 23.985045 \text{ เอมมยู}, \quad {}_0n^1 = 1.0086654 \text{ เอมมยู}$$

$${}_{12}\text{Mg}^{25} = 24.985840 \text{ เอมมยู}$$

เฉลย

$$\begin{aligned} {}_{12}\text{Mg}^{24} + {}_0n^1 &\rightarrow [{}_{12}\text{Mg}^{25}] \\ \text{มวลที่ต่างกัน} &= M(\text{Mg}^{24}) + m_{(n)} - M(\text{Mg}^{25}) \\ &= 23.985045 + 1.0086654 - 24.985840 \text{ เอมมยู} \\ &= (24.9937104 - 24.985840)931.5 \text{ เอมอีวี} \\ &= 7.8704 \times 10^{-3} \times 931.5 \\ &= 7.33 \text{ เอมอีวี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E'_x &= E_x \frac{M_x}{M_x + m_x} \\ &= 1 \times \left(\frac{24}{24 + 1} \right) \\ &= 0.96 \text{ เอมอีวี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบอยู่เหนือระดับกราวน์} &= 7.33 + 0.96 \\ &= 8.29 \text{ เอมอีวี} \end{aligned}$$

นิวเคลียสเชิงประกอบมีโอกาสส่งอนุภาคออกมาได้ เพราะพลังงานกระตุ้นมากกว่าพลังงานที่จะทำให้อนุภาคหลุดออกจากนิวเคลียส ซึ่งมีค่าประมาณ 8 เอมอีวีต่อนิวคลีออน