

บทที่ 1

นิวเคลียส (THE NUCLEUS)

นิวเคลียสเป็นแก่นกลางของอะตอม มีขนาดเล็กมาก แต่มีค่ามวลสูง ประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอน ซึ่งมีมวลอะตอมใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 1 เอเอ็มยู (หน่วยมวลอะตอม = atomic mass unit) สิ่งที่จะต้องทราบในบทนี้มีดังต่อไปนี้

1.1 ต้องทราบคุณสมบัติทั่วไปของนิวเคลียสพร้อมที่จะนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ในการทำโจทย์ได้

(1) จะต้องเขียนสัญลักษณ์ของธาตุหรือนิวไคลด์ที่ต้องการ พร้อมทั้งเลขอะตอมและเลขมวลอะตอมให้ได้ก่อน เช่น



เมื่อ A คือ เลขมวล

Z คือ เลขอะตอม

(2) สามารถอ่านค่าต่าง ๆ จากแผนภูมินิวไคลด์ได้ การหามวลของแต่ละนิวไคลด์จะหาได้ในหน่วยเอเอ็มยู จากการอ่านตารางนิวไคลด์ เช่น มวลของไฮโดรเจน = 1.0078252 เอเอ็มยู

(3) หาประจุของนิวเคลียสได้จากประจุที่มีอยู่ในนิวเคลียสซึ่งมีค่าเท่ากับเลขอะตอม Z คูณกับประจุ e เช่น ประจุของนิวเคลียส $M_{Z, A}$ คือ

$$+ Ze$$

เมื่อ e = 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

(4) หาจำนวนนิวตรอนในนิวเคลียสได้ เช่น นิวไคลด์ $M_{Z, A}$ จะมีจำนวนนิวตรอน = $A - Z$

(5) มวลอะตอมของธาตุใด ๆ จะมีค่าเท่ากับมวลของไฮโดรเจนอะตอม Z ตัว รวมกับมวลของนิวตรอน $A - Z$ ตัว ดังนั้น

$$M_{Z, A} = Zm_{H^1} + (A - Z)m_n \quad \dots\dots\dots(1.1)$$

เมื่อ Zm_{H^1} คือมวลของไฮโดรเจน และ
 $(A - Z)m_n$ คือมวลของนิวตรอนในนิวเคลียสนั้น

(6) รัศมีของนิวเคลียส หาได้โดยใช้สูตร

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

เมื่อ $R_0 \approx 1.4 \times 10^{-15}$ เมตร และ

A คือเลขมวลอะตอม หรือมวลอะตอมของนิวไคลด์นั้น

1.2 สามารถหาระยะทางที่อนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสมากที่สุดได้

โดยพิจารณาจากพลังงานรวมที่แต่ละตำแหน่งจะมีค่าคงที่ ดังนั้น ณ ตำแหน่งที่ปล่อยให้อนุภาควิ่งเข้าชนนิวเคลียสจะมีพลังงานจลน์ $KE = \frac{1}{2}mv^2$ เมื่ออนุภาควิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสพลังงานจลน์จะลดลง ส่วนพลังงานศักย์มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงตำแหน่งที่พลังงานจลน์ลดลงจนเป็นศูนย์ ค่าพลังงานศักย์จะสูงสุด ผลักให้อนุภาคกระเด็นออกมา เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze \cdot Z'e}{d_0} \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

เมื่อ ϵ_0 เป็นค่าเพอิมิททิวิตีในสุญญากาศ = 8.854×10^{-12} นิวตัน⁻¹เมตร⁻²คูลอมบ์²
 $Ze, Z'e$ คือประจุของนิวเคลียส และประจุของอนุภาคที่วิ่งเข้าชนตามลำดับ
 d_0 คือระยะทางห่างจากจุดศูนย์กลางของนิวเคลียส

$$\begin{aligned} d_0 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze \cdot Z'e}{\frac{1}{2}mv^2} \\ &= \frac{Ze \cdot Z'e}{4\pi\epsilon_0 \cdot E(\text{จูล})} \\ d_0 &= \frac{ZeZ'e \times 1.6 \times 10^{-13}}{4\pi\epsilon_0 \cdot E(\text{เอมอีวี})} \quad \dots\dots\dots(1.4) \end{aligned}$$

1.3 ความหมายของคำต่างๆ

(1) ไอโซโทป

เป็นคำที่ใช้เรียกนิวไคลด์หรืออะตอมที่มีเลขอะตอมเหมือนกัน (Z เหมือนกัน) แต่มีเลขมวลต่างกัน (A ต่างกัน) เช่น ${}_{49}\text{In}^{115}$, ${}_{49}\text{In}^{116}$

(2) ไอโซโทปกอบันแดนซ์

เป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่ไอโซโทปชนิดนั้นมียู่ในธรรมชาติ เช่น ${}_{7}\text{N}^{14}$ มีเปอร์เซ็นต์กอบันแดนซ์อยู่ 99.634, ${}_{7}\text{N}^{15}$ มีเปอร์เซ็นต์กอบันแดนซ์ 0.366

(3) ไอโซบาร์

หมายถึง นิวไคลด์ที่มีเลขมวล (A) เท่ากัน แต่มีเลขอะตอม (Z) ต่างกัน เช่น ${}_{7}\text{N}^{14}$ - ${}_{8}\text{O}^{14}$

(4) ไอโซทอน

หมายถึง นิวไคลด์ที่มีเลขนิวตรอน (N) เท่ากัน แต่มีเลขมวล (A) ต่างกัน เช่น ${}_{9}\text{F}^{18}$ - ${}_{10}\text{Ne}^{19}$

(5) ไอโซเมอร์

หมายถึง นิวไคลด์ชนิดเดียวกัน (A, Z เหมือนกัน) แต่สภาวะพลังงานต่างกัน คือ อาจจะอยู่ที่สภาวะถูกกระตุ้นต่าง ๆ กัน และจะกลับสู่สภาวะกราวน์โดยการส่งรังสีแกมมา

1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและพลังงาน

โดยการใช้สูตรความสัมพันธ์ระหว่างมวลและพลังงานของไอสไตน์ จะสามารถหาค่ามวลของอนุภาคที่อยู่หนึ่งในสภาวะที่เป็นพลังงานได้จาก

$$E = mc^2$$

เมื่อ m คือมวลในหน่วยกิโลกรัม

c คือความเร็วของแสงในหน่วยเมตรต่อวินาที

E จะเป็นพลังงานมีหน่วยเป็นจูล

การคำนวณในวิชานิวเคลียร์ฟิสิกส์ จะใช้หน่วยของพลังงานเป็นเอมอีวี มีความสัมพันธ์

$$1 \text{ เอ็มอีวี} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ จูล}$$

ดังนั้น เมื่อเปลี่ยนมวลขณะอยู่นิ่ง (rest mass) เป็นพลังงาน

สำหรับมวล 1 เอเอ็มยู มีค่าเท่ากับพลังงาน 931.5 เอ็มอีวี

มวลของนิวตรอนเมื่อเปลี่ยนเป็นพลังงาน มีค่าประมาณ 940 เอ็มอีวี

อิเล็กตรอน มีค่าพลังงานขณะอยู่นิ่งประมาณ 0.511 เอ็มอีวี

1.5 พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) = (B.E.)

หมายถึงพลังงานที่ใช้ยึดนิวคลีออนเข้าด้วยกันเพื่อรวมกันเป็นนิวเคลียส หาได้จากค่าแตกต่างระหว่างมวลของทุก ๆ นิวคลีออนในนิวเคลียสและอิเล็กตรอน กับมวลของนิวไคลด์นั้น

การคำนวณ จะใช้มวลของนิวคลีออนและนิวไคลด์ในหน่วยเอเอ็มยู แล้วเปลี่ยนเป็นหน่วยเอเอ็มอีวี โดยใช้ค่าที่มีหน่วยเอเอ็มยู คูณด้วย 931.5 เช่น พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวไคลด์ ${}_Z X^A$ คือ

$$[Zm_H + (A - Z)m_n - M({}_Z X^A)] \text{ เอเอ็มยู} \times 931.5 \frac{\text{เอเอ็มอีวี}}{\text{เอเอ็มยู}} \dots\dots\dots(1.5)$$

1.6 พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ($\frac{B.E.}{A}$)

เมื่อหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวได้แล้ว จะหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนได้ โดยการนำจำนวนนิวคลีออนทั้งหมดที่มีอยู่ในนิวเคลียสมหาร นั่นคือ $\frac{B.E.}{A}$, เมื่อ A คือจำนวนนิวคลีออนทั้งหมดในนิวเคลียส เช่น

$$\begin{aligned} \text{B.E. ของฮีเลียม} &= 28.3 \text{ เอเอ็มอีวี} \\ \frac{B.E.}{A} &= \frac{B.E.}{4} = \frac{28.3}{4} = 7.1 \frac{\text{เอเอ็มอีวี}}{\text{นิวคลีออน}} \dots\dots\dots(1.6) \end{aligned}$$

การคำนวณ ต้องการความละเอียด จึงต้องใช้ตัวเลขหลังทศนิยมทุกตำแหน่งที่โจทย์กำหนดให้

1.7 การหาพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวคลีออนตัวสุดท้ายที่ยึดอยู่ในนิวเคลียส

หมายถึง การหาค่าพลังงานที่จะทำให้อนุภาคในนิวเคลียส (นิวตรอนหรือโปรตอน) ตัวหนึ่งหลุดออกมาจากนิวเคลียสโดยมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ (E_s)

(1) สำหรับนิวตรอนตัวสุดท้าย (last neutron)

ในการคำนวณจะคิดว่า มีมวลส่วนหนึ่งหายไป เนื่องจากการรวมมวลของนิวตรอน 1 ตัว กับมวลของนิวไคลด์ X^{A-1} เพื่อให้เป็นมวลของนิวไคลด์ X^A มวลที่หายไปนี้ จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเพื่อใช้ยึดนิวตรอน 1 ตัวสุดท้ายไว้ในนิวเคลียสนั้น ดังนั้น พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้ายของนิวไคลด์ ${}_Z X^A$ คือ

$$\begin{aligned} &{}_Z X^{A-1} + {}_0 n^1 \longrightarrow {}_Z X^A \\ E_s &= [m_n + M({}_Z X^{A-1}) - M({}_Z X^A)] \text{ เอเอ็มยู} \times 931.5 \frac{\text{เอเอ็มอีวี}}{\text{เอเอ็มยู}} \dots\dots\dots(1.7) \end{aligned}$$

ในการทำงานเดียวกัน จะหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับโปรตอนตัวสุดท้ายได้เช่นกัน สำหรับนิวไคลด์ ${}_Z X^A$

$${}_1 Y^{A-1} + {}_1 H^1 \longrightarrow {}_Z X$$

$$E_s = [m_H + M({}_{Z-1} Y^{A-1}) - M({}_Z X^A)] \text{เอเอมยู} \times 931.5 \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{เอเอมยู}} \dots\dots\dots(1.8)$$

1.7 การเสถียรภาพทางนิวเคลียร์

จากการคำนวณในหัวข้อ 1.3 ในหนังสือตำรา PH 424 แสดงว่า นิวคลีออนในนิวเคลียสถูกกระทำด้วยพลังงานกूलอมบ์มีค่าสูง ดังนั้น พลังงานยึดเหนี่ยวนิวคลีออน จะต้องมียุทธศาสตร์ที่สูงกว่า มิฉะนั้นแล้วนิวคลีออนเหล่านั้นจะต้องถูกแยกออกจากกัน ไม่รวมกันเป็นนิวเคลียสได้ ปัจจุบันมีการค้นพบนิวไคลด์มากมาย บางนิวไคลด์ก็มีเสถียรภาพ บางนิวไคลด์ก็สลายได้ เรียกว่าเป็นกัมมันตรังสี พอมีหลักเกณฑ์ที่จะพิจารณาได้ดังนี้

(1) พิจารณาอัตราส่วนระหว่างจำนวนนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียส (N : Z) ถ้าจำนวนนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสมีค่าดังนี้ คือ

- N : Z = 1, มักจะเสถียรภาพ
- N : Z > 1, มักสลายโดยการให้เบตาเนกาตรอน
- N : Z < 1, มักสลายโดยการให้โพซิตรอน

(2) พิจารณาจำนวนนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสว่าเป็นเลขคู่หรือเลขคี่ (odd-even effect)

นิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวตรอนและโปรตอนเป็นเลขคู่-คู่ มักมีเสถียรภาพมาก รองลงมา ก็เป็นเลขคู่-คี่ หรือคี่-คู่ ส่วนที่เป็นเลขคี่-คี่ นั้นไม่ค่อยมีเสถียรภาพ

(3) พิจารณาจำนวนโปรตอนและนิวตรอนที่มีอยู่ในนิวเคลียสนั้นว่าเป็นตัวเลขแมจิกหรือไม่ นิวไคลด์ที่มีจำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนเป็นตัวเลข 2, 8, 20, 50, 82 หรือนิวตรอน 126 มักเป็นนิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพ จึงเรียกตัวเลขเหล่านี้ว่าตัวเลขแมจิก (magic number)

(4) พิจารณานิวไคลด์นั้น มีพลังงานมากพอที่จะสลายโดยการส่งอนุภาค หรือรังสีแกมมา ตามหลักการสลายหรือไม่ ซึ่งจะหาได้จากการคำนวณ

แบบฝึกหัดบทที่ 1

ข้อ 1.1 โจทย์ จงแสดงให้เห็นจริงว่า พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนหาได้จาก

$$\frac{B.E.}{A} = [(m_n - 1) - \frac{Z}{A}(m_n - m_H) - P]931.5$$

เมื่อ $P =$ Packing fraction

เฉลย

ถ้า $M =$ มวลอะตอมของนิวไคลด์ที่ต้องการหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยว

$A =$ เลขมวลของนิวไคลด์นั้น

$Z =$ เลขอะตอมของนิวไคลด์นั้น

$$B.E. = [Zm_H + (A - Z)m_n - M]931.5$$

$$= [Am_n - Z(m_n - m_H) - M]931.5$$

$$\frac{B.E.}{A} = \left[m_n - \frac{Z}{A}(m_n - m_H) - \frac{M}{A} \right] 931.5$$

$$= \left[(m_n - 1) - \frac{Z}{A}(m_n - m_H) - \left(\frac{M - A}{A} \right) \right] 931.5$$

$$= \left[(m_n - 1) - \frac{Z}{A}(m_n - m_H) - P \right] 931.5$$

$$\text{เมื่อ } P = \frac{M - A}{A}$$

ข้อ 1.2 โจทย์ จงหาความหนาแน่นของนิวคลีออนในนิวเคลียส ในหน่วย กิโลกรัม/เมตร³ สำหรับอะตอมของธาตุที่มีเลขมวล A , กำหนดค่า $R_0 \approx 1.4 \times 10^{-15}$ เมตร และมวลของโปรตอน มีค่าประมาณเท่ากับมวลของนิวตรอน

เฉลย

ในนิวเคลียสมีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนรวมกัน $= A$

ถ้ามวลของโปรตอนและนิวตรอนประมาณว่ามีค่าเท่ากันคือ

$$\approx 1.67 \times 10^{-27} \quad \text{กิโลกรัม} \quad \dots\dots\dots(1)$$

มวลของนิวเคลียสคือ $M = 1.67 \times 10^{-27} A$ กิโลกรัม

ปริมาตรของนิวเคลียส $V = \frac{4}{3} \pi R^3$ เมตร³

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

$$= 1.4 \times 10^{-15} \times A^{\frac{1}{3}}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi (1.4 \times 10^{-15})^3 A \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{(1)}{(2)}, \quad D = \frac{M}{V} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \text{ A}}{\frac{4}{3} \times \frac{22}{7} (1.4 \times 10^{-15})^3 A}$$

$$= \frac{1.67 \times 10^{18}}{\frac{4}{3} \times \frac{22}{7} \times 2.744}$$

$$= \frac{1.67}{11.4986} \times 10^{18}$$

$$= 0.1452 \times 10^{18} = 1.45 \times 10^{17} \frac{\text{กิโลกรัม}}{\text{เมตร}^3}$$

ข้อ 1.3 โจทย์ จงหาพลังงานยึดเหนี่ยว และพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของนิวไคลด์ ${}^4_2\text{Be}^8$ กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$${}^4_2\text{Be}^8 = 8.005308, \quad {}^1_0\text{n}^1 = 1.0086654, \quad {}^1_1\text{H}^1 = 1.0078252$$

เฉลย

$$\text{B.E.} = [Zm_H + (A - Z)m_n - M(\text{Be}^8)]931.5 \quad \text{เอมอีวี}$$

$$= [4 \times 1.0078252 + 4 \times 1.0086654 - 8.005308]931.5$$

$$= [4.0313008 + 4.0346616 - 8.005308]931.5$$

$$= [8.0659624 - 8.005308]931.5$$

$$= 0.0606544 \times 931.5$$

$$= 56.499573 \quad \text{เอมอีวี}$$

$$\frac{\text{B.E.}}{A} = \frac{\text{B.E.}}{8}$$

$$= \frac{56.499573}{8}$$

$$= 7.06 \quad \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{นิวคลีออน}}$$

ข้อ 1.4 โจทย์ จงแสดงให้เห็นจริงว่า ${}_4\text{Be}^8$ ไม่มีเสถียรภาพ
กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ
 ${}_4\text{Be}^8 = 8.005308, {}_2\text{He}^4 = 4.0026036$

เฉลย



ถ้า ${}_4\text{Be}^8$ สลายจะได้ ${}_2\text{He}^4$

พิจารณาค่าคิวที่เกิดขึ้นในสมการ (1)

$$\begin{aligned} Q &= [M(\text{Be}^8) - M(\text{He}^4) - M(\text{He}^4)]931.5 && \text{เอเอ็มอีวี} \\ &= [8.005308 - 2 \times 4.0026036]931.5 \\ &= [8.005308 - 8.0052072]931.5 \\ &= 1.008 \times 10^{-4} \times 931.5 \\ &= 0.0938952 \end{aligned}$$

ค่าคิวเป็นบวก แสดงว่ามีการสลายได้

ข้อ 1.5 โจทย์ สำหรับนิวไคลด์ที่มีมวลปานกลาง ตั้งแต่ ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ จนถึง ${}_{50}\text{Sn}^{120}$
จงแสดงให้เห็นจริงว่า ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมีค่าประมาณ 8.5
เอเอ็มอีวีต่อนิวคลีออน

$$\begin{aligned} \text{กำหนดมวลของ } {}_{50}\text{Sn}^{120} &= 119.90219 \text{ เอเอ็มยู} \\ m_n^1 &= 1.0086654 \text{ เอเอ็มยู} \\ {}_1\text{H}^1 &= 1.0078252 \text{ เอเอ็มยู} \end{aligned}$$

เฉลย

ตามที่ได้พิสูจน์ให้เห็นจริงแล้วว่า

$$\frac{B.E.}{A} = \left[(m_n - 1) - \frac{Z}{A}(m_n - m_H) - \left(\frac{M - A}{A} \right) \right] 931.5 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{ค่า } \frac{Z}{A} \text{ สำหรับ } {}_{20}\text{Ca}^{40} = 0.5$$

$$\frac{Z}{A} \text{ สำหรับ } {}_{50}\text{Sn}^{120} = 0.42, \text{ ค่าเฉลี่ยประมาณ } \frac{0.5 + 0.42}{2} = 0.46$$

$$\frac{M - A}{A} = \frac{119.90219 - 120}{120} = -8.15 \times 10^{-4}$$

แทนค่าลงในสมการ (1)

$$\begin{aligned}\frac{\text{B.E.}}{\text{A}} &= [(1.0086654 - 1) - 0.46(1.0086654 - 1.0078252) + 8.15 \times 10^{-4}]931.5 \\ &= [0.0086654 - 0.0003864 + 0.000815]931.5 \\ &= 9.094 \times 10^{-3} \times 931.5 \\ &= 8.471 \approx 8.5\end{aligned}$$

เอมอีวี
นิวคลีออน

ข้อ 1.6 โจทย์ จงหาพลังงานยึดเหนี่ยว และพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของนิวไคลด์ Cl^{35}
กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$${}_{17}\text{Cl}^{35} = 34.968854, \quad {}_0n^1 = 1.0086654, \quad {}_1\text{H}^1 = 1.0078252$$

เฉลย

$$\begin{aligned}\text{B.E.} &= 931.5[17 \times 1.0078252 + (35 - 17)1.0086654 - 34.968854] \quad \text{เอมอีวี} \\ &= 931.5[17.133028 + 18.155977 - 34.968854] \\ &= 931.5[35.289005 - 34.968854] \\ &= 931.5 \times 0.32015 \\ &= 298.22065\end{aligned}$$

$$\frac{\text{B.E.}}{\text{A}} = \frac{\text{B.E.}}{35} = 8.52 \quad \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{นิวคลีออน}}$$

ข้อ 1.7 โจทย์ จงเปรียบเทียบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนสำหรับนิวไคลด์ ${}_{27}\text{Co}^{59}$
และ ${}_{83}\text{Hg}^{198}$

กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$$\begin{aligned}{}_1\text{H}^1 &= 1.0078252, & {}_0n^1 &= 1.0086654 \\ {}_{27}\text{Co}^{59} &= 58.933189, & {}_{83}\text{Hg}^{198} &= 197.96677\end{aligned}$$

เฉลย

$$\begin{aligned} \text{B.E.}(\text{Co}^{59}) &= [27m_{\text{H}} + 32m_{\text{n}} - M(\text{Co}^{59})]931.5 && \text{เอมอีวี} \\ &= [27 \times 1.0078252 + 32 \times 1.0086654 - 58.933189]931.5 \\ &= [27.21128 + 32.277292 - 58.933189]931.5 \\ &= [59.488572 - 58.933189]931.5 \\ &= 0.555383 \times 931.5 \\ &= 517.33926 && \text{เอมอีวี} \\ \frac{\text{B.E.}}{\text{A}} &= \frac{517.33926}{59} = 8.76 && \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{นิวคลีออน}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{B.E.}(\text{Hg}^{198}) &= [83m_{\text{H}} + 115m_{\text{n}} - M(\text{Hg}^{198})]931.5 && \text{เอมอีวี} \\ &= [83 \times 1.0078252 + 115 \times 1.0086654 - 197.96677]931.5 \\ &= [83.649491 + 115.99652 - 197.96677]931.5 \\ &= [199.64601 - 197.96677]931.5 \\ &= 1.67924 \times 931.5 \\ &= 1564.212 && \text{เอมอีวี} \\ \frac{\text{B.E.}}{\text{A}} &= \frac{1564.212}{198} = 7.9 && \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{นิวคลีออน}} \end{aligned}$$

เลขอะตอมของปรอทสูงขึ้นทำให้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมีค่าต่ำลง

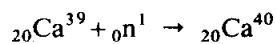
ข้อ 1.8 โจทย์ จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้ายของนิวไคลด์ Li^7 , Ca^{40}
กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$$\begin{aligned} {}_3\text{Li}^6 &= 6.015126 && {}_3\text{Li}^7 = 7.016005, \\ {}_0\text{n}^1 &= 1.0086654 && {}_{20}\text{Ca}^{39} = 38.97071, \\ {}_{20}\text{Ca}^{40} &= 39.962589 \end{aligned}$$

เฉลย

$$\begin{aligned} \text{สำหรับ } & {}_3\text{Li}^6 + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_3\text{Li}^7 \\ \Delta m &= m({}_3\text{Li}^6) + m({}_0\text{n}^1) - m({}_3\text{Li}^7) && \text{เอเอ็มยู} \\ &= (6.015126 + 1.0086654) - 7.016005 \\ &= 7.023791 - 7.016005 && \text{เอเอ็มยู} \\ \text{B.E.} &= 0.007786 \times 931.5 && \text{เอมอีวี} \\ &= 7.2526 && \text{เอมอีวี} \end{aligned}$$

สำหรับ ${}_{20}\text{Ca}^{40}$,



$$\Delta m = (38.97071 + 1.0086654) - 39.962589 \quad \text{เอเอมยู}$$

$$= 39.9793754 - 39.962589 \quad \text{เอเอมยู}$$

$$\text{พลังงาน} = 0.0167864 \times 931.5 \quad \text{เอมอีวี}$$

$$= 15.636531 \approx 15.63 \quad \text{เอมอีวี}$$

ข้อ 1.9 โจทย์ การสลายจากนิวตรอนไปเป็นโปรตอนในนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic or exoergic) ให้พลังงาน 0.78 เอมอีวี จงหาค่าพลังงานของโปรตอนต่ำสุดที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^7$

กำหนดมวลในหน่วยเอเอมยูของ

$${}_3\text{Li}^7 = 7.016005, \quad {}_4\text{Be}^7 = 7.016931$$

เฉลย



$$Q = [M(\text{Li}^7) + m_{\text{H}} - M(\text{Be}^7) - m_{\text{n}}] 931.5 \quad \text{เอมอีวี}$$

$$= [M(\text{Li}^7) - M(\text{Be}^7)]931.5 - [m_{\text{n}} - m_{\text{H}}]931.5$$

$$= [7.016005 - 7.016931]931.5 - 0.78$$

$$= 0.8625 - 0.78$$

$$= -1.64 \quad \text{เอมอีวี}$$

$$E_{\text{th}} = -Q \left[1 + \frac{m_x}{M_x} \right]$$

$$= 1.64 \left[1 + \frac{1}{7} \right]$$

$$= 1.64 \times \frac{8}{7}$$

$$= 1.87 \quad \text{เอมอีวี}$$

ข้อ 1.10 โจทย์ สำหรับ ${}_{7}\text{N}^{17}$ จงหา

(ก) พลังงานยึดเหนี่ยว และพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน

(ข) พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้าย

(ค) พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับโปรตอนตัวสุดท้าย

กำหนดมวลในหน่วยเอเอมยูของ

$${}_6\text{C}^{16} = 16.0147, \quad {}_7\text{N}^{16} = 16.00609, \quad {}_7\text{N}^{17} = 17.00845$$

$${}_8\text{O}^{18} = 17.9991598, \quad {}_1\text{H}^1 = 1.0078252, \quad {}_0\text{n}^1 = 1.0086654$$

เฉลย

(ก) หาพลังงานยึดเหนี่ยวของ N^{17} จาก

$$\begin{aligned}\Delta m &= Zm_H + (A - Z)m_n - M(N^{17}) \\ &= 7 \times 1.0078252 + (17 - 7)1.0086654 - 17.00845 \\ &= 7.0547764 + 10.086654 - 17.00845 \\ &= 17.14143 - 17.00845\end{aligned}$$

เอเอ็มยู

$$\begin{aligned}B.E. &= 0.13298 \times 931.5 \\ &= 123.87087\end{aligned}$$

เอเอ็มอีวี

เอเอ็มอีวี

$$\frac{B.E.}{\text{นิวคลีออน}} = \frac{B.E.}{A} = \frac{123.87087}{17} = 7.28$$

เอเอ็มอีวี
นิวคลีออน

(ข) ${}_7N^{16} + {}_0n^1 \rightarrow {}_7N^{17}$

$$\begin{aligned}E_s &= [16.00609 + 1.0086654 - 17.00845]931.5 \\ &= [6.3054 \times 10^{-3}]931.5 \\ &= 5.87\end{aligned}$$

เอเอ็มอีวี

เอเอ็มอีวี

เอเอ็มอีวี

(ค) ${}_6C^{16} + {}_1H^1 \rightarrow {}_7N^{17}$

$$\begin{aligned}E_s &= [16.01470 + 1.0078252 - 17.00845]931.5 \\ &= [0.0140752]931.5 \\ &= 13.11\end{aligned}$$

เอเอ็มอีวี

เอเอ็มอีวี

เอเอ็มอีวี

ข้อ 1.11 โจทย์ จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับโปรตอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียสของ ${}_7N^{15}$

กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$$\begin{aligned}{}_6C^{14} &= 14.0032419, & {}_1H^1 &= 1.0078252 \\ {}_7N^{15} &= 15.000108, & {}_7N^{16} &= 16.00609\end{aligned}$$

เฉลย

${}_6C^{14} + {}_1H^1 \rightarrow {}_7N^{15}$

$$\begin{aligned}\Delta m &= (14.0032419 + 1.0078252) - 15.000108 \\ E_s &= (15.0110671 - 15.000108)931.5 \\ &= 0.0109591 \times 931.5 \\ &= 10.2\end{aligned}$$

เอเอ็มยู

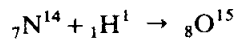
เอเอ็มอีวี

เอเอ็มอีวี

ข้อ 1.12 โจทย์ จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับโปรตอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียส ${}^8\text{O}^{15}$
กำหนดมวลในหน่วยเอเอ็มยูของ

$${}^8\text{O}^{15} = 15.003072 \qquad {}^7\text{N}^{14} = 14.0030744$$

เฉลย



$$\Delta m = 14.0030744 + 1.0078252 - 15.003072 \qquad \text{เอเอ็มยู}$$

$$= 15.0108996 - 15.003072$$

$$E_s = 0.0078276 \times 931.5 \qquad \text{เอเอ็มอีวี}$$

$$= 7.29 \qquad \text{เอเอ็มอีวี}$$

ข้อ 1.13 โจทย์ ในปฏิกิริยา $\text{Pb}^{206}(\text{d}, \text{p})\text{Pb}^{207}$ พบค่าคิว = 4.51 เอเอ็มอีวี จงแสดงให้เห็นจริงว่า
ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่นั้น หาได้จาก
การรวมค่าคิว และพลังงานยึดเหนี่ยวของดิวเทรียม กำหนดค่ามวลในหน่วยเอเอ็มยู
ดังนี้

$${}^{82}\text{Pb}^{206} = 205.97447, \quad {}^{82}\text{Pb}^{207} = 206.9759, \quad {}^1\text{H}^2 = 2.0141022$$

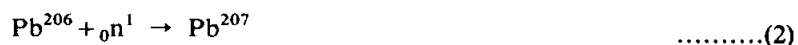
$${}^0\text{n}^1 = 1.0086654, \quad {}^1\text{H}^1 = 1.0078252$$

เฉลย

ปฏิกิริยา $\text{Pb}^{206}(\text{d}, \text{p})\text{Pb}^{207}$ คือ



และสมการการรวมนิวตรอนกับนิวไคลด์ของตะกั่วเพื่อเป็น Pb^{207} คือ



พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับดิวเทรียมคือ

$$\text{B.E.} = [m_{\text{H}} + m_{\text{n}} - M(\text{H}^2)]931.5 \qquad \text{เอเอ็มอีวี}$$

$$= [1.0078252 + 1.0086654 - 2.0141022]931.5$$

$$= [2.0164906 - 2.0141022]931.5$$

$$= [2.3884 \times 10^{-3}]931.5$$

$$= 2.22$$

$$\text{Q} + \text{B.E.} = 4.51 + 2.22 = 6.73 \qquad \text{เอเอ็มอีวี} \dots\dots\dots(3)$$

จากสมการ (2)

$$\begin{aligned}
 E_s &= [205.97447 + 1.0086654 - 206.9759]931.5 && \text{เอมอีวี} \\
 &= [206.9831254 - 206.9759]931.5 && \text{เอมอีวี} \\
 &= 7.2254 \times 10^{-3} \times 931.5 && \text{เอมอีวี} \\
 &= 6.73 && \text{เอมอีวี}
 \end{aligned}$$

แสดงว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่ในปฏิกิริยา $Pb^{206}(d, p)Pb^{207}$ อาจหาได้จากการรวมค่าคิว และพลังงานยึดเหนี่ยวของดิวเทรียม

ข้อ 1.14 โจทย์ จงหาพลังงานแยกนิวคลีออนออกจากนิวไคลด์ Pb^{207} พบว่า ในปฏิกิริยา $Pb^{206}(d, p)Pb^{207}$ ได้ค่าคิว = +4.5 เอมอีวี

กำหนดมวลในหน่วยเอมยูของ

$${}_1H^2 = 2.0141022, \quad {}_1H^1 = 1.0078252, \quad {}_0n^1 = 1.0086654$$

เฉลย



ถ้า E_s เป็นพลังงานที่จะทำให้นิวตรอนหลุดออกจากนิวเคลียสโดยมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์

$$\text{สมการ (2), } E_s = [M(Pb^{206}) + m({}_0n^1) - M(Pb^{207})]931.5 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{สมการ (1), } Q = [M(Pb^{206}) + M({}_1H^2) - M(Pb^{207}) - m({}_1H^1)]931.5$$

$$4.5(\text{เอมอีวี}) = [M(Pb^{206}) - M(Pb^{207}) + M({}_1H^2) - m({}_1H^1)]931.5$$

$$4.5(\text{เอมอีวี}) - M({}_1H^2) \times 931.5 + m({}_1H^1) \times 931.5 = [M(Pb^{206}) - M(Pb^{207})]931.5 \dots\dots(4)$$

จากสมการ(3)

$$E_s = [M(Pb^{206}) - M(Pb^{207}) + m({}_0n^1)]931.5 \quad \dots\dots\dots(5)$$

แทน (4) ใน (5),

$$\begin{aligned}
 E_s &= 4.5(\text{เอมอีวี}) - M({}_1H^2) \times 931.5 + m({}_1H^1) \times 931.5 + m({}_0n^1) \times 931.5 \\
 &= 4.5 - 2.0141022 \times 931.5 + 1.0078252 \times 931.5 + 1.0086654 \times 931.5 \\
 &\hspace{15em} \text{เอมอีวี}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 4.5 - 1876.1362 + 938.7891738 + 939.5718201 \\
&= 6.7248 \\
&= 6.7
\end{aligned}$$

เอมอีวี

ข้อ 1.15 โจทย์ ในปฏิกิริยา $X_{Z, N}(d, p)$ จงแสดงว่า พลังงานแยกนิวตรอนออกจากนิวเคลียส $X_{Z, N+1}$ คือ

$$X_{Z, N+1} = Q(d, p) + B.E.({}_1H^2)$$

เมื่อ $Q(d, p)$ เป็นพลังงานที่ส่งออกมาจากปฏิกิริยา $X_{Z, N}(d, p)$ และ $B.E.({}_1H^2)$ คือพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอน

เฉลย

ปฏิกิริยา $X_{Z, N}(d, p)$

$${}_ZX^N + {}_1H^2 \rightarrow {}_ZX^{N+1} + {}_1H^1 + Q \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Q = [M({}_ZX^N) + M({}_1H^2) - M({}_ZX^{N+1}) - m({}_1H^1)]931.5 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$B.E.({}_1H^2) = [m({}_1H^1) + m({}_0n^1) - M({}_1H^2)]931.5 \quad \dots\dots\dots(3)$$

นำสมการ (3) รวมกับสมการ (2)

$$\begin{aligned}
Q + BE({}_1H^2) &= [M({}_ZX^N) + M({}_1H^2) - M({}_ZX^{N+1}) - m({}_1H^1) + m({}_1H^1) + m({}_0n^1) - \\
&\quad M({}_1H^2)]931.5 \\
&= [M({}_ZX^N) - M({}_ZX^{N+1}) + m({}_0n^1)]931.5 \quad \dots\dots\dots(4)
\end{aligned}$$

ถ้า $E_S =$ พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้ายสำหรับนิวไคลด์ $X_{Z, N+1}$

$${}_ZX^N + {}_0n^1 \rightarrow {}_ZX^{N+1} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$E_S = [M({}_ZX^N) + m({}_0n^1) - M({}_ZX^{N+1})]931.5 \quad \dots\dots\dots(6)$$

สมการ (4) = สมการ(6)

ข้อ 1.16 โจทย์ (ก) ซิลิคอนประกอบด้วย 3 ไอโซโทป มีเปอร์เซ็นต์อับนแดนซ์ต่าง ๆ กันดังนี้

$Si^{28} = 92.21,$	มวล = 27.976927	เอเอมยู
$Si^{29} = 4.7,$	มวล = 28.976491	เอเอมยู
$Si^{30} = 3.09,$	มวล = 29.973761	เอเอมยู

จงหามวลของซิลิคอน

- (ข) ถ้า O^{16} มีมวล = 15.9949149 เอเอมยู และทรายมีสูตร SiO_2 ความหนาแน่น 1.4 กรัม/ซม³ จงหาความหนาแน่นอะตอมของซิลิคอน และออกซิเจนในทราย

เฉลย

$$\begin{aligned} \text{(ก) มวลของซิลิคอน} &= \frac{92.21}{100} \times 27.976927 + \frac{4.7}{100} \times 28.976491 + \frac{3.09}{100} \times 29.973761 \\ &= 25.797524 + 1.361895 + 0.9261892 \\ &= 28.085608 \end{aligned} \quad \text{เอเอมยู}$$

$$\begin{aligned} \text{(ข) มวลของ } SiO_2 &= 28.085608 + 2 \times 15.9949149 \\ &= 28.085608 + 31.989828 \\ &= 60.075436 \end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร } N = \frac{\rho N_a}{M}$$

$$\begin{aligned} N_{Si^{28}} &= \frac{1.4 \times 0.602 \times 10^{24}}{60.075436} \\ &= 0.014029 \times 10^{24} \quad \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม}^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{O^{16}} &= 2 \times \left(\frac{1.4 \times 0.602 \times 10^{24}}{60.075436} \right) \\ &= 0.028058 \times 10^{24} \quad \frac{\text{อะตอม}}{\text{ซม}^3} \end{aligned}$$

ข้อ 1.17 โจทย์ ทริเทียม -3 เกิดจากการดักกลืนนิวตรอนพลังงานต่ำของดิวทีเรียม -2 แล้วส่งรังสีแกมมา พลังงาน 6.256 เอเอมอีวี ออกมา

(ก) จงเขียนสมการที่เกิดขึ้น

(ข) หาค่าคิวของปฏิกิริยา

(ค) จงหาพลังงานของนิวเคลียสที่เคลื่อนที่ถอย

(ง) จงหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนตัวสุดท้ายของทริเทียม

(จ) ถ้าพลังงานยึดเหนี่ยวของดิวทีเรียม = 2.22 เอเอมอีวี จงหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวทั้งหมดของทริเทียม

กำหนดมวลในหน่วยเอเอมยูของนิวไคลด์

$${}^1_1H^2 = 2.0141022, \quad {}^1_0n^1 = 1.0086654, \quad {}^1_1H^3 = 3.0160494$$

เฉลย

(ก) สมการ ${}_1\text{H}^2 + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_1\text{H}^3 + \gamma$ (1)

(ข) หาค่าคิวจาก $\Delta m = 2.0141022 + 1.0086654 - 3.0160494$ เอเอมยู
 $= 3.0227676 - 3.0160494$
 $= 6.7182 \times 10^{-3}$
 $= [6.7182 \times 10^{-3}]931.5$ เอเมอีวี
 $= 6.258$ เอเมอีวี

(ค) พลังงานของนิวเคลียสที่เคลื่อนที่ถอย = $6.258 - 6.256 = 2.0033 \times 10^{-3}$
= 2 เคอีวี

(ง) เหมือนข้อ (ข)

(จ) พลังงานยึดเหนี่ยวของทริเทียม = $2.22 + 6.25$
= 8.47 เอเมอีวี

ข้อ 1.18 โจทย์ จากปฏิกิริยา ${}_{79}\text{Au}^{197}(\text{d}, \text{p})$ พบว่าเกิด Au^{198} แล้วสลายต่อไปเป็น Hg^{198} ซึ่งมีเสถียรภาพด้วยครึ่งชีวิต 2.7 วัน โดยที่ Au^{198} จะส่งเบตาเนกาตรอนมีค่าพลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.963 เอเมอีวี และยังมีรังสีแกมมาพลังงาน 0.412 เอเมอีวี ออกมาด้วย กำหนดมวลในหน่วย เอเอมยูของนิวไคลด์

$${}_{79}\text{Au}^{197} = 196.96655, \quad {}_{80}\text{Hg}^{198} = 197.96677, \quad {}_1\text{H}^2 = 2.0141022$$
$${}_1\text{H}^1 = 1.0078252, \quad {}_0\text{n}^1 = 1.0086654$$

(ก) จงหามวลอะตอมของ Au^{198}

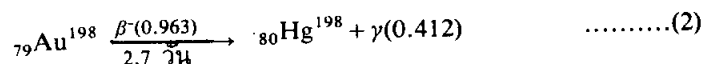
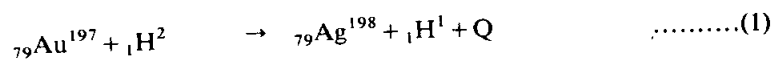
(ข) ค่าคิวในปฏิกิริยา

(ค) พลังงานที่จะใช้แยกนิวตรอนตัวสุดท้ายออกจาก Au^{198} เปรียบเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน

(ง) จำนวนอะตอมของ Hg^{198} ที่เกิดขึ้นในเวลา 3 วัน

เฉลย

ปฏิกิริยา $\text{Au}^{197}(\text{d}, \text{p})\text{Au}^{198}$ คือ



(ก) จากสมการ (2)

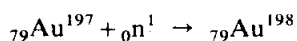
$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ส่งออกมาจากการสลายโดยการส่งเบตาเนกาตรอน} &= 0.412 + 0.963 \\ &= 1.375 && \text{เอมอีวี} \\ &= \frac{1.375}{931.5} = 1.476 \times 10^{-3} && \text{เอเอมยู} \\ \text{มวลของทอง} - 198 &= M(\text{Hg}^{198}) + 1.476 \times 10^{-3} \\ &= 197.96677 + 1.476 \times 10^{-3} \\ &= 197.9682461 && \text{เอเอมยู} \end{aligned}$$

(ข) หาค่าคิวในปฏิกิริยา

จากสมการ (1)

$$\begin{aligned} Q &= [M(\text{Au}^{197}) + M(\text{H}^2) - m_{\text{H}} - M(\text{Au}^{198})]931.5 && \text{เอมอีวี} \\ &= [196.96655 + 2.0141022 - 1.0078252 - 197.9682461]931.5 \\ &= 4.58 \times 10^{-3} \times 931.5 \\ &= 4.2671 && \text{เอมอีวี} \end{aligned}$$

(ค) พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้ายหาได้จาก



$$\begin{aligned} E_s &= [196.76655 + 1.0086654 - 197.9682461]931.5 && \text{เอมอีวี} \\ &= 6.9693 \times 931.5 \\ &= 6.4919029 \approx 6.49 && \text{เอมอีวี} \end{aligned}$$

เปรียบเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ Au^{198}

$$\begin{aligned} \text{B.E.} &= [79m_{\text{H}} + (198 - 79)m_{\text{n}} - M(\text{Au}^{198})]931.5 && \text{เอมอีวี} \\ &= 79 \times 1.0078252 + 119 \times 1.0086654 - 197.9682461]931.5 \\ &= [79.61819 + 120.03118 - 197.9682461]931.5 \\ &= [199.64999 - 197.9682461]931.5 \\ &= 1.68175 \times 931.5 \\ &= 1566.5501 && \text{เอมอีวี} \end{aligned}$$

$$\frac{\text{B.E.}}{\text{A}} = \frac{1566.5501}{198} = 7.91 \quad \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{นิวคลีออน}}$$

(ง) หาจำนวนอะตอมของ Hg^{198} ที่เกิดจากการสลายของ Au^{198} N_0 อะตอม

$$\text{จากสูตร } N_2 = N_0(1 - e^{-\lambda t})$$

$$= N_0(1 - e^{-\frac{0.693 \times 3}{2.7}})$$

$$= N_0(1 - e^{-0.77})$$

$$= N_0(1 - 0.4630)$$

$$N_2 = 0.537 N_0 = 53.7\% \text{ ของ } N_0$$
