บทที่ 1
นิวเคลียส
THE NUCLEUS

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. ทราบคุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของนิวเคลียส และสามารถนำคุณสมบัติของนิวเคลียสมาใช้ได้อย่างถูกต้อง
2. คำนวณหาแรงกระทำภายในนิวเคลียส เช่น พลังงานยึดเหนี่ยว และพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนสำหรับนิวไคลด์ต่าง ๆ ได้
3. หาพลังงานที่จะทำให้อนุภาคหลุดออกมาจากนิวเคลียส โดยมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ได้
4. อธิบายถึงความมีเสถียรภาพ และการแผ่กัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์ต่าง ๆ ได้

เมื่อกล่าวถึงอะตอม คงจะเห็นภาพแก่นกลางที่มีขนาดเล็ก มีความหนาแน่นสูง ล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนที่เรียงตัวกันอยู่เป็นวงโคจร มีจำนวนจำกัดสำหรับแต่ละวงโคจร รัศมีของนิวเคลียสมีขนาดเล็กประมาณ 10^{-14} เมตร เมื่อเทียบกับรัศมีอะตอม ซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-10} เมตร จำนวนโปรตอนหรือนิวตรอนในนิวเคลียสเรียก นิวคลีออน

1.1 คุณสมบัติทั่วไปของนิวเคลียส

1.1.1 มวลนิวเคลียส

(Nuclear mass)

หมายถึงมวลของสิ่งที่มีอยู่ในนิวเคลียส คือมวลของนิวตรอนและโปรตอนที่ยึดรวมกันอยู่ภายในนิวเคลียส

1.1.2 ประจุนิวเคลียส

(Nuclear charge)

หมายถึงจำนวนหน่วยของประจุบวกที่นิวเคลียสมีอยู่ มีค่าเท่ากับจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสนั้น จำนวนประจุของนิวเคลียส แทนได้ด้วยเลขอะตอม Z เช่น นิวเคลียสของไฮโดรเจน (มีโปรตอนตัวเดียว) จะมีประจุบวกเพียง 1 หน่วย คือ Z = 1 อะตอมที่เป็นกลาง มีจำนวนอิเล็กตรอนวนอยู่รอบนิวเคลียสเท่ากับจำนวนประจุบวกในนิวเคลียส **ประจุของนิวเคลียสที่มีเลขอะตอม Z มีค่าเท่ากับ** $+Ze$ เมื่อ e คือค่าของประจุ 1 หน่วย มีค่าเท่ากับ 1.6021×10^{-19} คูลอมบ์ หรือ 4.80298×10^{-10} หน่วย ไฟฟ้าสถิต (electrostatic unit = esu.)

1.1.3 เลขนิวตรอน

(Neutron number)

หมายถึงจำนวนนิวตรอนที่มีอยู่ในนิวเคลียส นิวเคลียสที่มีเลขมวล A เลขโปรตอน Z จะมีจำนวนนิวตรอน (A−Z) ดังแสดงในรูป (1.1)

H	He	Li	Be
A=1	A=4	A=7	A=9
Z=1	Z=2	Z=3	Z=4
A−Z=0	A−Z=2	A−Z=4	A−Z=5

รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบของนิวเคลียส

อะตอมที่มีมวล $M_{Z,A}$ อาจเขียนได้ว่า

$$M_{Z,A} = Z\,M_p + Z\,M_e + (A-Z)\,M_n$$

แต่ $M_p + M_e = M_{H^1}$

เมื่อ M_p = มวลของโปรตอน

M_e = มวลของอิเล็กตรอน

M_{H^1} = มวลของไฮโดรเจน

M_n = มวลของนิวตรอน

ดังนั้น $$M_{Z,A} = Z\,M_{H^1} + (A-Z)\,M_n \quad \ldots\ (1.1)$$

ต่อไปนี้ จะไม่กล่าวถึงมวลของอิเล็กตรอนในหน่วยเอเอมยู แต่จะใช้มวลของไฮโดรเจนแทน

มวลอะตอมของธาตุ $M_{Z,A}$ ประกอบด้วยมวลของไฮโดรเจน Z ตัว และมวลของนิวตรอน (A-Z) ตัว

1.1.4 รัศมีของนิวเคลียส

(Nuclear radius)

รัศมีของนิวเคลียส คำนวณได้จากการสังเกตการกระเจิงของอนุภาคแอลฟาเป็นมุมที่มีค่าสูงสุด โดยใช้นิวคลีไอที่เป็นเป้าต่าง ๆ กัน จากการทดลองของ รัทเธอร์ฟอร์ด โดยใช้แผ่นทองบาง ๆ พบว่าการกระเจิงของอนุภาคจะลดลงเมื่อมุมที่เบนออกมีค่าสูงขึ้น โดยการวัดมุมที่มีค่าสูงสุดที่อนุภาคกระเจิงออกมา พบว่า ระยะทางที่อนุภาคเข้าไปใกล้ที่สุดระหว่างจุดศูนย์กลางของนิวเคลียส และอนุภาคแอลฟาที่คำนวณได้ มีขนาดประมาณ 10^{-14} เมตร เป็นผลรวมของรัศมีของนิวเคลียส และอนุภาคแอลฟา โดยคิดว่า นิวเคลียสมีลักษณะเป็นทรงกลม ค่าของรัศมีหาได้จาก

$$R = R_0 A^{1/3} \quad \ldots (1.2)$$

เมื่อ R_0 เป็นค่าคงที่ มีค่าเฉลี่ย 1.4×10^{-15} เมตร

สำหรับยูเรเนียม–238 $A = 238$

$$R = 1.4 \times 10^{-15} \times 238^{1/3}$$

$$= 8.68 \times 10^{-15} \text{ เมตร}$$

จะเห็นว่า รัศมีของนิวเคลียสมีค่าประมาณ 10^{-15} เมตร

การหาระยะทางที่อนุภาคจะเข้าไปใกล้นิวเคลียสได้มากที่สุด

ในการคำนวณ สำหรับอนุภาคแอลฟา ที่มีมวล m, เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v, มีพลังงานจลน์ $\frac{1}{2} mv^2$, วิ่งเข้าชนนิวเคลียสที่เป็นเป้า ถ้าอนุภาคแอลฟาเข้าไปได้ใกล้นิวเคลียสที่สุด วัดระยะห่างจากศูนย์กลางของนิวเคลียสได้เท่ากับ d_0 อนุภาคแอลฟาจะหยุด ในทันใดนั้น พลังงานจลน์ทั้งหมดก็จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังสมการ

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

$$d_0 = \frac{Z e^2}{\pi \epsilon_0 m v^2}$$

เมื่อ m คือมวลของอนุภาคแอลฟา $= 4 \times 1.66 \times 10^{-24}$ กรัม หรือ 0.664×10^{-26} กิโลกรัม

v คือความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟา มีค่าประมาณ 1.5×10^7 เมตร ต่อวินาที

และ Z คือเลขอะตอมของธาตุที่ใช้เป็นเป้า,

ถ้า $Z = 20$, $d_0 = \dfrac{20 (1.602 \times 10^{-19})^2}{\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.664 \times 10^{-26} (1.5 \times 10^7)^2}$

$$= 1.2 \times 10^{-14} \text{ เมตร}$$

ถ้าจะเปรียบเทียบกับรัศมีของนิวเคลียส $A = 40$

จากสูตร $R = R_0 A^{1/3}$

$$= 1.4 \times 10^{-15} \times 3.42$$

$$= 4.7 \times 10^{-15} \text{ เมตร}$$

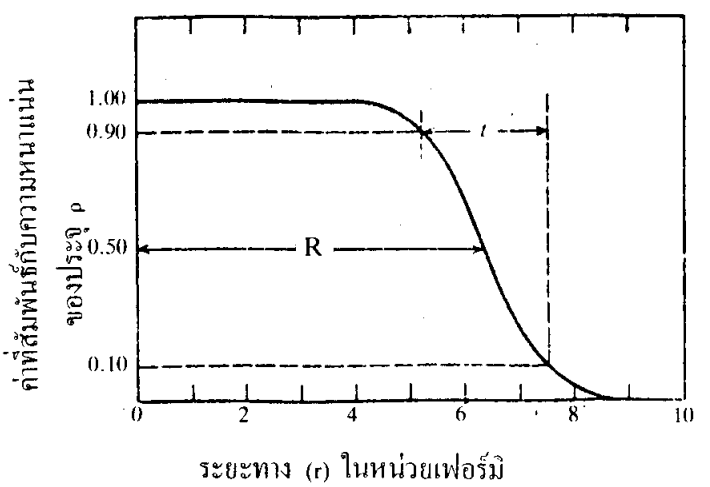
แสดงว่า สำหรับนิวเคลียสที่มีค่า Z = 20, A = 40, รัศมีจะมีค่าประมาณ 4.7 เฟอร์มิ แต่อนุภาคจะเข้าไปใกล้นิวเคลียสได้เพียง 12 เฟอร์มิเท่านั้น (1 เฟอร์มิ = 10^{-15} เมตร)

1.1.5 การแจกแจงความหนาแน่นของนิวคลีออนในนิวเคลียส

เนื่องจากนิวเคลียสมีขนาดเล็ก แต่มวลมีค่าสูงมาก ความหนาแน่นจึงมีค่าสูง ความหนาแน่นของอนุภาคในนิวเคลียส (nuclear matter) ประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากันหมด คือประมาณ 10^{17} กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร รอบนอกนิวเคลียส มีอิเล็กตรอนวนอยู่รอบตามจำนวนจำกัดในแต่ละวงโคจรเรียก **เมฆอิเล็กตรอน** (electron cloud)

การทดลอง จากการใช้การกระเจิงของอิเล็กตรอน (electron scattering) กับหลาย ๆ นิวคลีไอ และพลังงานของอิเล็กตรอนต่าง ๆ กัน จะสามารถหาการแจกแจงความหนาแน่นของนิวคลีออนในนิวเคลียสได้ ดังสมการ

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left[\frac{r-R}{a}\right]} \qquad \ldots\ (1.4)$$



รูปที่ 1.2 แสดงการแจกแจงความหนาแน่นของประจุในนิวเคลียสของทอง โดยใช้การกระเจิงของอิเล็กตรอน

เมื่อ $\rho(r)$ คือความหนาแน่นของนิวคลีออนในนิวเคลียส

ρ_0 คือความหนาแน่นของนิวคลีออน ใกล้จุดศูนย์กลางของนิวเคลียส มีค่าประมาณ 1.65×10^{44} นิวคลีออน ต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 0.165 นิวคลีออน ต่อลูกบาศก์เฟอร์มิ

1 = เฟอร์มิ = 10^{-15} เมตร

R คือรัศมีที่ความหนาแน่นลดลงครึ่งหนึ่ง มีค่าประมาณ $1.07\ A^{1/3}$ เฟอร์มิ เมื่อ A คือ มวลอะตอม

t คือความหนาของผิวระหว่างจุดที่มีความหนาแน่น 90% จนถึง 10% ของความหนาแน่นสูงสุด

สำหรับนิวคลีไอที่มีค่า Z มากกว่า 10, t มีค่าประมาณ 2.4 เฟอร์มิ หรือหาได้จาก $t = 4\ a \ln 3$ มีค่าประมาณ 4.4.a เมื่อ a เป็นค่าคงที่ มีค่าประมาณ 0.55 เฟอร์มิ

พอสรุปได้ว่า **ความหนาแน่นของนิวคลีออนบริเวณที่อยู่ภายในใกล้จุดศูนย์กลางของนิวเคลียส มีค่าประมาณได้เท่า ๆ กัน ส่วนที่บริเวณความหนาใกล้ผิว ทุก ๆ นิวคลีไอจะมีลักษณะคล้ายกันหมด**

1.2 นิวไคลด์

(Nuclides)

เป็นคำที่ใช้เรียกไอโซโทปหรืออะตอมของธาตุ กรณีที่ต้องการแสดงถึง จำนวนนิวตรอนและโปรตอน ในนิวเคลียส

(1) ไอโซโทป (Isotopes)

หมายถึง**อะตอมของธาตุชนิดเดียวกัน (Z เท่ากัน) แต่จำนวนนิวตรอนต่างกัน** คือ A มีค่าต่างกัน เช่น ออกซิเจน มี 3 ไอโซโทปที่มีเสถียรภาพ คือ O^{16}, O^{17}, O^{18}, (Z = 8, N = 8, 9, 10) และยังมีอีกหลายไอโซโทปที่เป็นธาตุกัมมันตรังสี เช่น O^{13}, O^{14}, O^{15}, O^{19}, O^{20} (Z = 8, N = 5, 6, 7, 11, 12)

(2) ไอโซโทปิก อบันแดนซ์ (Isotopic abundance %)

คือจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่ไอโซโทปชนิดนั้นมีอยู่ในธรรมชาติ พบว่าแต่ละไอโซโทปของธาตุเดียวกัน มีเปอร์เซ็นต์อบันแดนซ์ต่างกัน เช่น ไอโซโทปออกซิเจน – 16 เกิดในธรรมชาติ 99.8 เปอร์เซ็นต์, ออกซิเจน – 17 ประมาณ 0.037 เปอร์เซ็นต์ และออกซิเจน – 18 ประมาณ 0.204 เปอร์เซ็นต์,ค่าต่าง ๆ เหล่านี้ อ่านได้จากตารางท้ายเล่ม เป็นอะตอมเปอร์เซ็นต์ คือจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่อะตอมของธาตุนั้นมีอยู่ในแต่ละไอโซโทป

มวลอะตอมของธาตุ หาได้จากค่าเฉลี่ยของมวลอะตอมของแต่ละไอโซโทปที่รวมกันอยู่ ดังนั้น ถ้า ν_i เป็นไอโซโทปิกอบันแดนซ์ (เปอร์เซ็นต์) ของไอโซโทปที่ i ที่มีมวลอะตอม M_i, มวลอะตอมของธาตุนั้นคือ

$$M = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\nu_i M_i}{100} \qquad \ldots (1.5)$$

ตัวอย่างที่ 1.1

น้ำถ้วยหนึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจน 6.6×10^{24} อะตอม จะมีอะตอมของดิวทิเรียมอยู่เท่าไร

ตามตารางทราบว่า ไอโซโทปิก อบันแดนซ์ ของ ดิวทิเรียม เท่ากับ 0.015%

จำนวนอะตอมของดิวทิเรียม คือ $1.5 \times 10^{-4} \times 6.6 \times 10^{24}$

$= 9.9 \times 10^{20}$ อะตอม

ตัวอย่างที่ 1.2

จงหามวลอะตอมของออกซิเจน ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ กำหนดให้

ไอโซโทป	อบันแดนซ์ (เปอร์เซ็นต์)	มวลอะตอม (เอเอมยู)
0^{16}	99.759	15.9949149
0^{17}	0.037	16.99133
0^{18}	0.204	17.9991598

โดยใช้สูตร (1.5) จะหามวลอะตอมของออกซิเจนได้เท่ากับ 15.99938 เอเอมยู

(3) ไอโซบาร์ (Isobars)

หมายถึงอะตอมของธาตุ **ที่มีเลขมวล (A) เท่ากัน แต่มีเลขอะตอม (Z) ต่างกัน**

เช่น $_{80}Hg^{204} - _{82}Pb^{204}$, $_{54}Xe^{130} - _{56}Ba^{130}$

(4) ไอโซโทน (Isotones)

หมายถึงอะตอมของธาตุ**ที่มีจำนวนนิวตรอน (N) เท่ากัน แต่มีเลขมวล (A) ต่างกัน**

เช่น $_{14}Si^{30} - _{15}P^{31} - _{16}S^{32}$

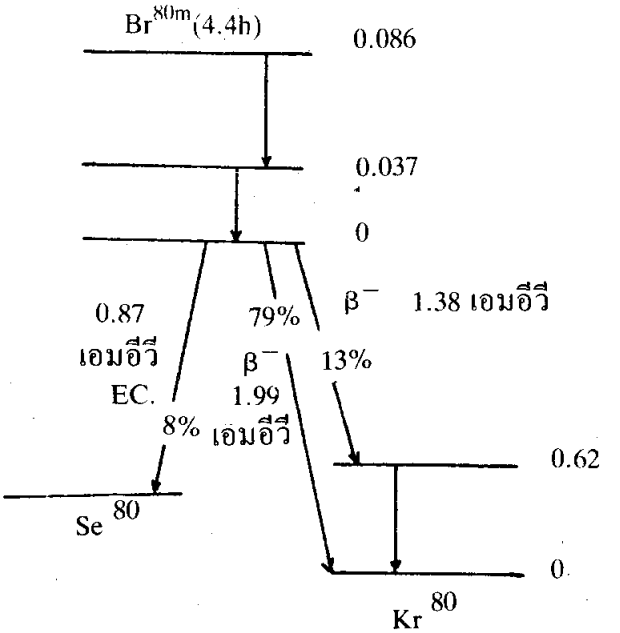
(5) ไอโซเมอร์ (Isomers)

หมายถึงอะตอมของ**ธาตุชนิดเดียวกัน** (Zเท่ากัน, เลขมวลเท่ากัน, จำนวนนิวตรอนเท่ากัน) **แต่มีสภาวะพลังงาน** (energy state) **ในนิวเคลียส และครึ่งชีวิตต่างกัน** นอกจากอยู่ที่สภาวะกราวน์ (ground state) ซึ่งอาจจะมีเสถียรภาพ เช่น Sb^{124} มีครึ่งชีวิต 60 วัน, 1.5 นาที และ 21 นาที ถ้ามีหลายสภาวะที่พลังงานสูงกว่าสภาวะกราวน์ จะใช้คำว่า **สภาวะไอโซเมอริก (isomeric state)** หรือ **สภาวะเสถียรภาพชั่วเวลาสั้น ๆ (m)** (metastable state) **ก็จะอยู่สภาวะนั้นชั่วเวลาสั้น ๆ** แล้วสลายโดยการส่งรังสีแกมมาเพื่อกลับสู่สภาวะกราวน์ แทนด้วย m_1, m_2, m_3 เช่น Sb^{124} (60 วัน), $Sb^{124m}1$ (1.5 นาที) และ $Sb^{124m}2$ (21 นาที)

ตัวอย่างที่ 1.3

จงแสดงระดับพลังงาน (energy level) และลักษณะการสลายของธาตุ Br^{80m}

Br^{80m} มีครึ่งชีวิต 4.4 ชั่วโมง อยู่ในสภาวะเสถียรภาพชั่วเวลาสั้น ๆ จึงกลับสู่สภาวะกราวน์โดยการส่งรังสีแกมมา พลังงาน 0.049 เอมอีวี และ 0.037 เอมอีวี เกิดเป็น Br^{80} แล้วสลายต่อไป โดยการส่งรังสีเบตา 2 พลังงาน คือ พลังงาน 1.38 เอมอีวี 13% และรังสีเบตา พลังงาน 1.99 เอมอีวี 79% เพื่อเป็น Kr^{80} นอกนั้นเป็นการสลายโดยการจับอิเล็กตรอน (E.C) พลังงาน 0.87 เอมอีวี อีก 8% เพื่อเป็น Se^{80}



รูปที่ 1.3 แสดงระดับพลังงานและแผนผังการสลายของโบรมีน

(Energy level diagram and decay schemes)

ในการเขียนแผนผังการสลายจะกำหนดให้แกนตั้ง (แกน Y) แทนระดับพลังงาน และแกนนอน (แกน X) แทนเลขอะตอม จากนั้นจะอาศัยหลักการสลายของธาตุ โดยพิจารณาว่าเมื่อสลายแล้วเกิดธาตุใหม่พลังงานจะอยู่ระดับกราวน์หรือไม่ และค่า Z จะเพิ่มขึ้นหรือลดลง

ในการศึกษานิวไคลด์ จำเป็นจะต้องทราบถึงคุณสมบัติทั่ว ๆ ไปของนิวไคลด์ พร้อมทั้งสามารถเขียนแผนผังแสดงการสลายได้

1.3 พลังงานที่กระทำกับนิวคลีออนในนิวเคลียส

การหาพลังงานไฟฟ้าสถิต (E_c) ที่กระทำกับโปรตอนในนิวเคลียส จะหาได้จากสูตร

$$E_c = \frac{Z e^2}{4 \pi \epsilon_o R} \qquad \ldots (1.6)$$

สำหรับนิวเคลียสที่มีลักษณะปานกลาง (Z=50, A=120)

$$E_c = \frac{50\,(1.6 \times 10^{-19})^2\ C^2 \quad 1\ J. \quad 1\ eV.}{4 \pi\,(8.9 \times 10^{-12}) \quad \frac{C^2}{N.m^2}\,(1.07 \times 120^{1/3})\ 10^{-15}\ m.\ 1N.m.1.6 \times 10^{-19} J.}$$

$$= 13 \times 10^6 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} = 13 \text{ เอมอีวี}$$

เป็นการแสดงว่า อนุภาคในนิวเคลียส ยึดกันอยู่ ด้วยพลังงานมีค่ามากกว่า 13 เอมอีวี

1.4 ลักษณะที่เป็นคลื่นของนิวคลีออน

พิจารณาความยาวคลื่นของนิวคลีออน ที่มีพลังงาน 10 เอมอีวี

$$\lambda = \frac{h}{m v} \qquad \ldots (1.7)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นเดอร์บรอย (De Broglie wavelength)

และ h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant)

สมการ (1.7), เขียนใหม่ คือ

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\,m\,E}}$$

แทนค่า เพื่อหาความยาวคลื่นของมวล 1 เอเอมยู, พลังงาน 10 เอมอีวี

$$\lambda = \frac{6.6\times10^{-34}\ \text{จูล.วินาที.}\ \frac{1\ \text{กิโลกรัม}\cdot\text{เมตร}\cdot\text{เมตร}}{\text{วินาที}\cdot\text{วินาที}}}{\left(2\times1.67\times10^{-27}\ \text{กิโลกรัม.}\ 10\ \text{เอมอีวี.}\ 1.6\times10^{-13}\ \text{จูล}\ \frac{1\ \text{กิโลกรัม. เมตร. เมตร}}{\text{วินาที. วินาที}}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\text{เอมอีวี}\ \ 1\ \text{จูล}}{\lambda = 9.0\times10^{-15}\ \text{เมตร}}$$

ความยาวคลื่น มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของนิวเคลียส

แสดงว่า คุณสมบัติที่เป็นคลื่นของสาร นำมาใช้กับนิวเคลียสได้

1.5 มวลและพลังงาน

ผลจากทฤษฎีของไอสไตน์ทฤษฎีหนึ่งคือ ความสัมพันธ์ระหว่างมวล และ พลังงาน ซึ่งมีลักษณะแทนกันได้

ในการถูกทำลาย (annihilation) ของมวลขณะอยู่นิ่ง (m_O) จะกลายเป็นพลังงาน หาค่าได้จากสูตร

$$E_{rest} = m_O C^2 \qquad \ldots (1.8)$$

เมื่อ C คือ ความเร็วของแสง $= 2.99792\times10^8$ เมตร/วินาที

m_O คือมวลนิ่ง (rest mass)

ตัวอย่างที่ 1.4

การถูกทำลายของมวลสาร 1 กรัม จะปล่อยพลังงานออกมาเท่าไร

$$E = m\,C^2$$
$$= 10^{-3}\times(2.9979\times10^8)^2$$
$$= 8.9874\times10^{13}\ \text{จูล}$$

$$= 8.9874 \times 10^{13} \frac{1}{1.6\times10^{-13}}$$

$$= 5.617 \times 10^{26} \quad \text{เอมอีวี}$$

ยังมีอีกหน่วยหนึ่งของพลังงานที่มักใช้ในวิชานี้ คือ อิเล็กตรอนโวลต์ ใช้ตัวย่อ**อีวี** (eV.) มีค่าเท่ากับพลังงานจลน์ที่ทำให้อิเล็กตรอน 1 ตัว สามารถวิ่งผ่านความต่างศักย์ 1 โวลต์ได้ จึงมีค่าเท่ากับผลคูณของประจุของอิเล็กตรอน 1 ตัว กับความต่างศักย์ 1 โวลต์

1 อิเล็กตรอนโวลต์ $= 1.60219\times10^{-19}$ คูลอมบ์. 1 โวลต์

$= \mathbf{1.60219\times10^{-19}}$ **จูล**

$= 10^{-6}$ เอมอีวี

การคำนวณทางนิวเคลียร์นิยมใช้ เคอีวี และเอมอีวี โดยกำหนดว่า

1 เคอีวี (KeV) $= 10^{3}$ อิเล็กตรอนโวลต์

และ 1 เอมอีวี (MeV) $= 10^{6}$ อิเล็กตรอนโวลต์ $= 1.6\times10^{-13}$ จูล

ตัวอย่างที่ 1.5

จงคำนวณหาพลังงานของอิเล็กตรอนขณะอยู่นิ่ง ในหน่วยเอมอีวี

จากสมการ $E_{rest} = m_o C^2$

$m_o = 9.1095 \times 10^{-31}$ กิโลกรัม

$= 9.1095 \times 10^{-31} (2.9979 \times 10^{8})^2$

$= 8.1871 \times 10^{-14}$ จูล

$= \dfrac{8.1871 \times 10^{-14}}{1.6022 \times 10^{-13}}$ เอมอีวี

$= 0.511$ เอมอีวี

ในการทำโจทย์ จะใช้ค่า**มวลของอิเล็กตรอนขณะอยู่นิ่ง มีค่าเท่ากับพลังงาน 0.511 เอมอีวี**

ตัวอย่างที่ 1.6

จงหาพลังงานที่ใช้แทนมวล 1 เอเอมยู

1 เอเอมยู $= 1.6605 \times 10^{-27}$ กิโลกรัม

$$E = m C^2$$

$$= (1.6605 \times 10^{-27}) (2.9979 \times 10^{8})^2$$

$$= 14.9235 \times 10^{-11} \quad \text{จูล}$$

$$= \frac{14.9235 \times 10^{-11}}{1.602 \times 10^{-13}} \quad \text{จูล} \quad \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{จูล}}$$

$$= 931.5 \quad \text{เอมอีวี}$$

มวล 1 เอเอมยู มีค่าเท่ากับพลังงาน 931.5 เอมอีวี

กรณีที่วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงประมาณ มากกว่า 0.2 เท่าของความเร็วของแสง หรือประมาณ มากกว่า 0.02 เท่า ของพลังงานของอนุภาคนั้น ขณะอยู่นิ่ง จะต้องนำทฤษฎีสัมพัทธภาพมาใช้ในการคำนวณด้วย

ในวิชานิวเคลียร์ฟิสิกส์ จะพิจารณามวลที่มีขนาดเล็ก เช่น อะตอมของธาตุต่าง ๆ จะต้องใช้ความละเอียด จึงใช้ค่าพลังงานในหน่วยเอมอีวี

1.6 พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy)

ทุกครั้งที่นำมวลของทุก ๆ นิวคลีออน ในนิวเคลียสมารวมกันจะพบว่ามีค่ามากกว่ามวลของนิวเคลียสที่ทดลองได้ เป็นการแสดงว่ามนุษย์ไม่สามารถนำนิวคลีออนมารวมกัน เพื่อให้ยึดกันเป็นนิวเคลียสได้ นั่นคือ **มวลส่วนหนึ่งได้หายไป กลายเป็นพลังงานยึดเหนี่ยว สำหรับอนุภาคในนิวเคลียสเรียก พลังงานยึดเหนี่ยว** (Binding Energy = B.E.) มวลที่หายไป เรียกมวลที่เสียไป (Mass defect) ใช้สัญลักษณ์ ΔM

$$\Delta M = Z M_H + (A-Z) M_n - M_{Z,A} \quad \text{เอเอมยู} \quad \ldots (1.9)$$

มวลจำนวนนี้ จะเปลี่ยนเป็นพลังงานยึดเหนี่ยวนิวคลีออนให้ยึดกันอยู่ในนิวเคลียส

$$BE. = 931.5 \left[Z M_H + (A-Z) M_n - M_{Z,A} \right] \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{เอเอมยู}} \cdot \text{เอเอมยู} \quad \ldots (1.10)$$

ยังมีคำว่า **แพกกิง แฟรกชัน** (packing fraction) ซึ่งจะให้คำจำกัดความว่า

$$\textbf{Packing fraction} = f = \frac{\textbf{Atomic mass} - \textbf{Mass number}}{\textbf{Mass number}} \quad \ldots (1.11)$$

หรือ $f = \dfrac{M_{Z,A} - A}{A}$

และ $M_{Z,A} = A(1+f)$

ตัวอย่างที่ 1.7

จงคำนวณหาแพกกิ้งแฟรกชันของธาตุโซเดียม – 23 กำหนดมวลอะตอมของโซเดียม = 22.989773

$$f = \frac{M_{Z,A} - A}{A}$$

$$= \frac{22.989773 - 23}{23}$$

$$= -4.44 \times 10^{-4}$$

ตัวอย่างที่ 1.8

จงคำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยว และพลังงานยึดเหนี่ยว ต่อนิวคลีออน ของ He^4 กำหนดมวลในหน่วย เอเอมยู ของ $He^4 = 4.0026036$, $H^1 = 1.0078252$, $n^1 = 1.0086654$

โดยการรวมมวลของ 2 ไฮโดรเจนอะตอม และ 2 นิวตรอนเข้าด้วยกัน

$= 2 \times 1.0078252 + 2 \times 1.0086654$

$= 4.0329812$ เอเอมยู

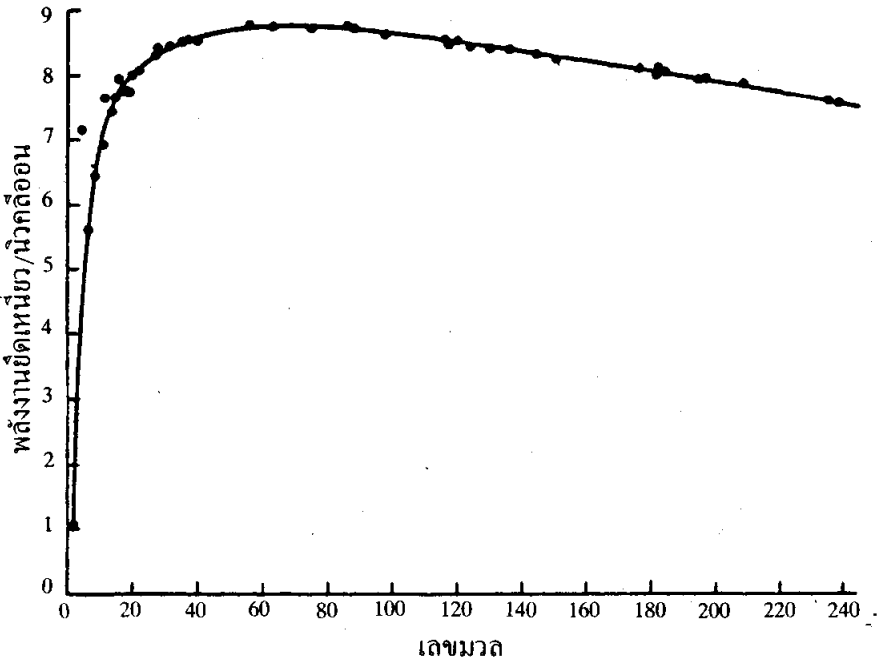
มวลที่เสียไป $= 4.0329812 - 4.0026036$

$= 0.030377$ เอเอมยู

พลังงานยึดเหนี่ยวของ He^4 $= 0.030377 \times 931.5$ เอมอีวี

$= 28.29$ เอมอีวี

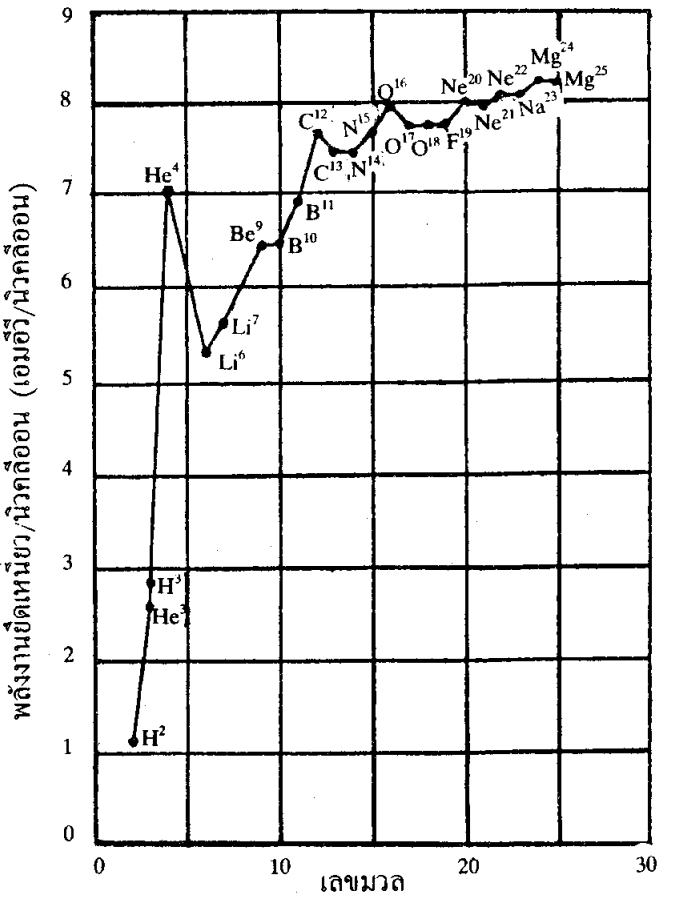
พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน $= \dfrac{28.29}{4} = 7.07$ $\dfrac{\text{เอมอีวี}}{\text{นิวคลีออน}}$



รูปที่ 1.4 แสดงพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน เป็นฟังก์ชันของเลขมวล

กราฟรูปที่ 1.4 แสดงให้เห็นว่า ธาตุที่มีเลขมวลต่ำ พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนมีค่าไม่คงที่ และจะมีค่าเกือบคงที่เมื่อเลขมวลมีค่าสูงปานกลาง แต่เมื่อเลขมวลมีค่าสูงขึ้นอีก พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนจะมีค่าลดลง

นิวคลีไอที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว/นิวคลีออนสูง จะมีเสถียรภาพมาก หรืออาจกล่าวได้ว่า นิวคลีออน **ยึดกันอยู่อย่างแน่น** (tightly bound) นิวคลีไอเหล่านี้ ต้องการพลังงานสูงในการที่จะให้ **นิวคลีออน แยกออกจากกัน เรียกพลังงานนี้ว่า พลังงานแยกนิวคลีออน** (separation energy) แต่บางนิวไคลด์ มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนต่ำ แสดงว่า **นิวคลีออนยึดกันอยู่อย่างหลวม ๆ** (loosely bound)



รูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขมวล และพลังงานยึดเหนี่ยว ต่อนิวคลีออน สำหรับธาตุที่มีเลขมวลต่ำ

จากกราฟ แสดงให้เห็นว่า สำหรับธาตุเบา ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนเปลี่ยนแปลง ไม่เป็นไปตามกฎเกณฑ์

1.7 พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้าย

(BE.of the last neutron)

พิจารณามวลของนิวเคลียส X^A และผลรวมของมวลของนิวตรอน และนิวเคลียส X^{A-1} พบว่า $M_n + M(X^{A-1})$ มีค่ามากกว่า $M(X^A)$ พลังงานที่หายไปก็คือพลังงานยึดเหนี่ยวที่จะทำให้นิวตรอนเข้ามารวมอยู่ในนิวเคลียส X^{A-1} เพื่อให้เกิดเป็นนิวเคลียส X^A หรืออาจเรียกว่า **เป็นพลังงานที่จะทำให้นิวตรอนหลุดออกจากนิวเคลียสโดยมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์** (E_s)

สมการ $${}_{Z}X^{A-1} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{Z}X^{A}$$

$$E_s = \left[M_n + M(X^{A-1}) - M(X^{A})\right] \text{เอเอมยู} \times 931.5 \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{เอเอมยู}} \quad \ldots (1.12)$$

ในทางตรงข้าม **ถ้านิวตรอนถูกดูดกลืนเข้าไปในนิวเคลียส X^{A-1} จะปล่อยพลังงานออกมา E_s**

ในทำนองเดียวกัน จะสามารถหาค่า**พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับโปรตอนตัวสุดท้าย** (last proton) ในแต่ละนิวคลีไอได้อีกด้วย ดังนั้นในการหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับโปรตอนตัวสุดท้ายของธาตุ ${}_{Z}X^{A}$, สมการคือ

$${}_{Z-1}Y^{A-1} + {}_{1}H^{1} \longrightarrow {}_{Z}X^{A}$$

ตัวอย่างที่ 1.9

จงหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนตัวสุดท้ายของนิวไคลด์ C^{13}

เมื่อนิวตรอนหลุดออกจากนิวเคลียส C^{13} นิวเคลียสที่เหลือคือ C^{12} ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวหรือพลังงานแยกนิวคลีออน หาได้ดังนี้

จากสมการ $${}_{6}C^{12} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{6}C^{13}$$

$$E_s = \left[M(C^{12}) + M_n - M(C^{13})\right] \text{เอเอมยู} \times 931.5 \frac{\text{เอมอีวี}}{\text{เอเอมยู}}$$

$$= \left[12.00000 + 1.00866 - 13.00335\right] 931.5 \quad \text{เอมอีวี}$$

$$= 0.00531 \times 931.5 \quad \text{เอมอีวี}$$

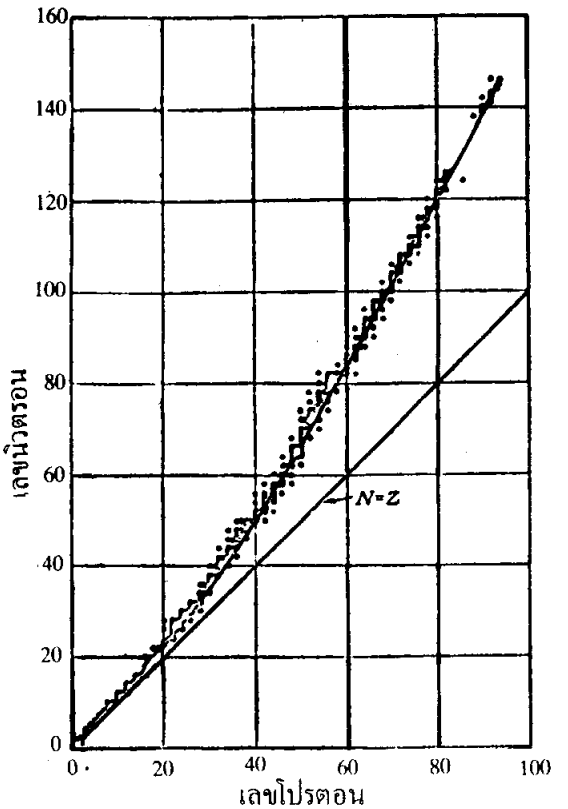
$$= 4.95 \quad \text{เอมอีวี}$$

1.8 การเสถียรภาพทางนิวเคลียร์

(Nuclear stability)

เป็นที่แน่ชัดว่า จะมีจำนวนนิวตรอน และโปรตอนจำนวนหนึ่งเท่านั้น ที่จะทำให้นิวคลีไอมีเสถียรภาพ หลายนิวคลีไอที่มีเลขอะตอมเหมือนกัน แต่จำนวนนิวตรอนต่างกัน (ไอโซโทปของธาตุ) อาจมีนิวตรอนน้อยไป (neutron deficient) หรือมีนิวตรอนมากเกินไป (neutron excess) เป็นผลให้ไม่มีเสถียรภาพ เป็นพวกกัมมันตรังสี ดังเช่นไอโซโทปของออกซิเจน (Z=8) จำนวนนิวตรอน (N) อาจเป็น 5,6,7,11,12 จะไม่มีเสถียรภาพ กรณีของไอโซโทปที่มี

N = 5,6 และ 7 มีนิวตรอนไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพ ขณะที่ไอโซโทปที่มี N = 11 และ 12 ก็มีนิวตรอนมากเกินไป



รูปที่ 1.6 แสดงจำนวนนิวตรอนและโปรตอนของนิวไคลด์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับแนวเส้นตรง N:Z=1

1.9 ปฏิกิริยารวมตัว

(Fusion reaction)

ในกรณีที่จะนำ 2 นิวเคลียสที่มีเสถียรภาพมารวมกัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ 2 นิวเคลียสใหม่ มีพลังงานเกิดขึ้น ดังสมการ

$$2\,H^2 \longrightarrow H^3 + H^1$$

ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของดิวทิรอน หาได้จาก $\left[1\,M_n + 1\,M_p - M\,(H^2)\right] C^2$

$\Delta m = 1.00866 + 1.00782 - 2.01410$ เอเอมยู

พลังงาน $= 2.38 \times 10^{-3} \times 931.5 = 2.21697$ เอมอีวี

หาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ H^3 และ H^1 ได้โดยวิธีเดียวกัน มีค่า 8.49 เอมอีวี พลังงานที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาคือ $8.49 - 2 \times 2.22 = 4.05$ เอมอีวี **ปฏิกิริยาที่เกิดจากการรวม 2 นิวเคลียสเข้าด้วยกัน แล้วให้พลังงานมากมายนี้เรียกปฏิกิริยารวมตัว**

1.10 ปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว

(Fission reaction)

บางที**ธาตุหนักอาจแตกออกเป็นสองส่วน แล้วให้พลังงานมหาศาล เรียกปฏิกิริยาแบ่งแยกตัว เช่น นิวเคลียส** U^{235} มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว ประมาณ 7.59 เอมอีวี/นิวคลีออน เมื่อเกิดแบ่งแยกตัว จะเกิดส่วนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว (fission fragment) มีค่าเลขมวล A ประมาณ 117 ธาตุที่มีเลขมวลใกล้เคียงกับส่วนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 8.48 เอมอีวี/นิวคลีออน ดังนั้น พลังงานที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว $= 8.48 - 7.59 = 0.89$ เอมอีวี/นิวคลีออน พลังงานทั้งหมดที่เกิดจาก 235 นิวคลีออน คือ $235 \times 0.89 = 209.15$ เอมอีวี

สรุปได้ว่า ธาตุที่ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวได้ จะให้พลังงานออกมาประมาณ 200 เอมอีวี/ฟิชชัน

1.11 การสลายทางนิวเคลียร์

(Nuclear disintegration)

(1) การสลายโดยการส่งโพซิตรอน

โพซิตรอน พบครั้งแรกจากรังสีคอสมิก **เป็นอนุภาคที่มีมวลเท่ากับมวลของอิเล็กตรอน แต่มีประจุบวก** ต่อมาก็พบจากการสลายของสารกัมมันตรังสี และกระบวนการเกิดแพร์โพรดักชัน (pair production) โพซิตรอนนี้ มักจะไม่พบบ่อยนัก เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้ววิ่งผ่านตัวกลาง พลังงานลดลง จะรวมกับอิเล็กตรอน เรียก**การถูกทำลายของโพซิตรอนและอิเล็กตรอน** (positron-electron annihilation) กลายเป็น 2 โฟตอน เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค พลังงานของแต่ละโฟตอน เท่ากับ 0.511 เอมอีวี โพซิตรอนจะเกิดขึ้นเมื่อ นิวคลีไอขาดนิวตรอน เช่น 0^{15} จะสลายโดยการส่งโพซิตรอน ในกระบวนการนี้ โปรตอน 1 ตัวในนิวเคลียส จะถูกเปลี่ยนให้เป็นนิวตรอน และโพซิตรอน และส่ง

นิวตริโนออกมา จำนวนโปรตอนจึงลดลงจาก 8 เป็น 7 ดังนั้น นิวเคลียสที่เหลือจึงเป็นไอโซโทป ของ N^{15} ซึ่งมีเสถียรภาพ, การเปลี่ยนแปลงเขียนได้ ดังนี้

$$0^{15} \longrightarrow N^{15} + \beta^{+} + \nu$$

β^{+} เป็นโพซิตรอนที่ส่งออกมา

ν คือนิวตริโน

(2) การสลายโดยการส่งเบตาเนกาตรอน (β^{-} – decay)

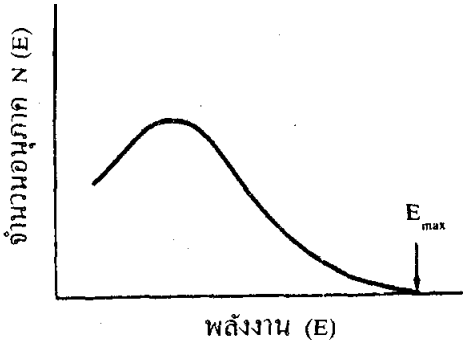
นิวคลีไอ 0^{19} ซึ่งเป็นพวกที่มีนิวตรอนมากเกินไป จะสลายโดยการส่งอิเล็กตรอน และแอนตินิวตริโนออกมา เช่น

$$0^{19} \longrightarrow F^{19} + \beta^{-} + \bar{\nu}$$

เมื่อ $\bar{\nu}$ แทนแอนตินิวตริโน

ในกรณีนี้ นิวตรอนเปลี่ยนเป็นโปรตอน เลขอะตอมจึงเพิ่มขึ้น 1 หน่วย เป็นที่น่าสังเกตว่า **ทั้งการสลายโดยการส่งโพซิตรอนและเบตาเนกตรอน เลขมวลอะตอม ยังคงมีค่าคงเดิมเป็น วิธีหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงแบบไอโซบาริก** (Isobaric transition)

การสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา อนุภาคที่ส่งออกมา จะมีพลังงานต่อเนื่อง (continuous energy spectrum) ดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงสเปกตรัมของพลังงานของอิเล็กตรอน ที่ส่งออกมาจากการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา

เมื่อ N (E) คือจำนวนอิเล็กตรอนที่ส่งออกมา ต่อหน่วยพลังงาน ที่มีพลังงานจลน์ E

E_{max} เป็นพลังงานสูงสุดที่พบอิเล็กตรอนจากการสลาย

ยังแสดงว่า พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน $\bar{E}$ มีค่าประมาณ 0.3 E_{max}

บางทีนิวเคลียสที่เกิดขึ้น (daughter nucleus) หลังจากเกิดการสลายโดยส่งอนุภาคเบตาแล้วยังไม่เสถียรภาพ และยังเกิดการส่งอนุภาคเบตาต่อไป จนมีเสถียรภาพทำให้เกิดเป็นการสลายแบบลูกโซ่ (decay chain) ดังสมการ

$$0^{13} \xrightarrow{\beta^+} N^{13} \xrightarrow{\beta^+} C^{13} \qquad \text{(เสถียรภาพ)}$$

$$0^{20} \xrightarrow{\beta^-} F^{20} \xrightarrow{\beta^-} Ne^{20} \qquad \text{(เสถียรภาพ)}$$

(3) การสลายโดยการจับอิเล็กตรอน (Orbital electron capture)

$$_{29}Cu^{64} + {}_{-1}e^{0} \longrightarrow {}_{28}Ni^{64}$$

นิวเคลียสที่ขาดนิวตรอน สามารถเพิ่มจำนวนนิวตรอนได้โดยวิธีการที่เรียก **การจับอิเล็กตรอนโดยโปรตอนในนิวเคลียส (E.C)** ในกระบวนการนี้ อิเล็กตรอนรอบอะตอมเกิดกิริยา (interact) กับโปรตอนตัวหนึ่งในนิวเคลียสในลักษณะที่เป็นคลื่น ทำให้นิวตรอนในนิวเคลียสเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดที่ว่างในเมฆอิเล็กตรอน จึงต้องมีอิเล็กตรอนตัวอื่นเข้ามาแทนที่ เกิดการส่งรังสีเอกซ์ หรือโดยการส่งออเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) โดยปกติอิเล็กตรอนที่ถูกจับเข้าไปในนิวเคลียส มักเป็นอิเล็กตรอนตัวในสุด คือ เค-อิเล็กตรอน วิธีการสลายนี้จึงเรียก เค-แคพเชอร์ (K-capture) และเนื่องจาก**นิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นโดยการจับอิเล็กตรอนมีลักษณะเหมือนกับนิวเคลียสที่เกิดขึ้นโดยการส่งโพซิตรอน การสลายทั้งสองอย่างนี้ จึงมักเกิดแข่งขันกัน** การเกิดการจับอิเล็กตรอน สังเกตได้ยากกว่าการส่งโพซิตรอนและพลังงานของอิเล็กตรอนจะสังเกตได้จากรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นคือ พลังงานของคาแรกเทอริสติก เอกซ์เรย์ (characteristic X-ray) มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนใน เค-เชล และ แอล-เชล บางทีพลังงานจำนวนนี้ จะส่งให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร ถ้าพลังงานมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจร มีพลังงานจลน์เท่ากับ คาแรกเทอริสติก เอกซ์เรย์ – พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียก ออเจอร์อิเล็กตรอน

(4) การสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา (Alpha decay)

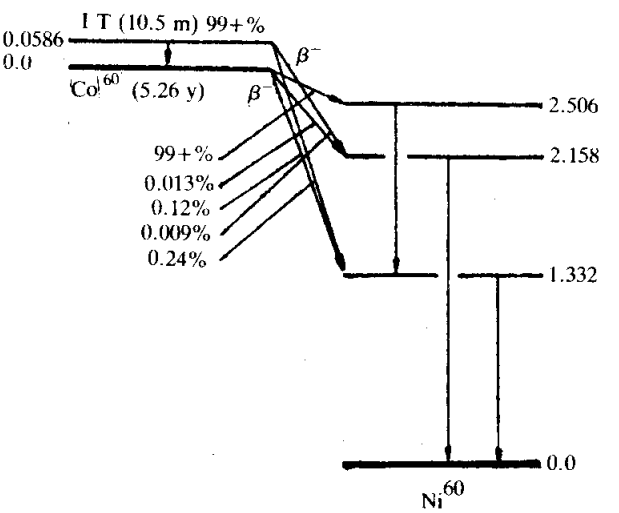
การสลายของนิวคลีไอที่ไม่เสถียรภาพอีกวิธีหนึ่งคือ การส่งอนุภาคแอลฟา อนุภาคนี้ก็คือ นิวเคลียสของฮีเลียม He^4 ประกอบด้วย 2 โปรตอน และ 2 นิวตรอน การส่งอนุภาคแอลฟา ทำให้เลขอะตอมลดลง 2 หน่วย และมวลลดลง 4 หน่วย ดังนั้นในการสลายของ U^{238} โดยการส่งอนุภาคแอลฟา ทำให้เกิด TH^{234} ดังสมการ

$$_{92}U^{238} \longrightarrow {}_{90}Th^{234} + {}_{2}He^{4}$$

การสลายโดยการส่งอนุภาคแอลฟา จะพบน้อยมาก สำหรับนิวคลีไอที่เบากว่าตะกั่ว แต่**จะเกิดขึ้นเสมอสำหรับนิวคลีไอหนัก** พลังงานของอนุภาคแอลฟา จะเป็นสเปกตรัมของพลังงานที่เป็นเส้น (discrete (line) energy spectrum)

(5) การเปลี่ยนแปลงโดยการส่งรังสีแกมมา (Gamma transition and isomerism)

นิวเคลียสที่เกิดขึ้นจากการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา (ทั้งอิเล็กตรอนและโพซิตรอน) การจับอิเล็กตรอน หรือการส่งอนุภาคแอลฟา มักจะทิ้งนิวเคลียสที่เกิดขึ้นไว้ในสภาวะถูกกระตุ้น นิวเคลียสใหม่ที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น มักจะสลายโดยการส่งรังสีแกมมาตัวหนึ่ง หรือหลายตัวออกมา ดังตัวอย่างการสลายของ Co^{60} ในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แผนผังการสลาย แสดงการส่งรังสีของ Co^{60} จำนวนด้านข้างแทนพลังงานของสภาวะถูกกระตุ้นในหน่วยเอมอีวีเหนือสภาวะกราวน์ การสลายที่เกิดแข่งขันกันหาได้จากค่าที่แสดงไว้เป็นเปอร์เซ็นต์

สำหรับการสลายของ Co^{60} ซึ่งเป็นนิวไคลด์ที่พบบ่อย รูปที่เขียนในลักษณะนี้เรียก **แผนผังการสลาย** (decay scheme) สังเกตว่า รังสีแกมมาส่วนใหญ่ ส่งออกมาจากนิวเคลียสใหม่ คือ Ni^{60}. สภาวะที่เป็นไอโซเมอร์ สลายได้ 2 วิธี คือโดยการส่งรังสีแกมมาเพื่อกลับไปยังสภาวะกราวน์ ของ Co^{60} และโดยการส่งเบตาเนกาตรอนไปยังสองสภาวะที่ถูกกระตุ้น ของ Ni^{60} วิธีการสลายกรณีแรกประมาณ 99%

พลังงานของรังสีแกมมาหาได้จาก $E = h\nu$, เมื่อ ν คือความถี่

เมื่อนิวเคลียสส่งพลังงานที่ถูกกระตุ้นเหนือสภาวะกราวน์ออกมาในลักษณะของรังสีแกมมา เข้าชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอก เป็นผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร เรียก **อินเทอร์นัล คอนเวอร์ชั่น อิเล็กตรอน** (internal – conversion electron) อิเล็กตรอนที่วิ่งออกมาจะมีพลังงานจลน์ เท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น

อีกแบบหนึ่งที่นิวเคลียสจะลดพลังงานได้ก็คือ ในกรณีที่พลังงานที่ถูกกระตุ้นมีค่ามากกว่า 1.02 เอมอีวี อาจจะเกิดอิเล็กตรอนขึ้น 1 ตัว และโพซิตรอน 1 ตัว วิ่งออกมาด้วยความเร็วเท่ากับพลังงานที่ถูกกระตุ้น –1.02 เอมอีวี มักจะไม่พบบ่อยนัก

สรุปได้ว่า นิวเคลียสที่ไม่มีเสถียรภาพ จะมีการสลายโดยการส่งรังสีแอลฟา, รังสีเบตาหรือโดยการจับอิเล็กตรอน ทั้ง 3 กรณี มักจะส่งรังสีแกมมาออกมาด้วย การส่งรังสีแกมมาเป็นการเปลี่ยนระดับพลังงานภายในนิวเคลียส โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งเลขอะตอม Z และ เลขมวล A

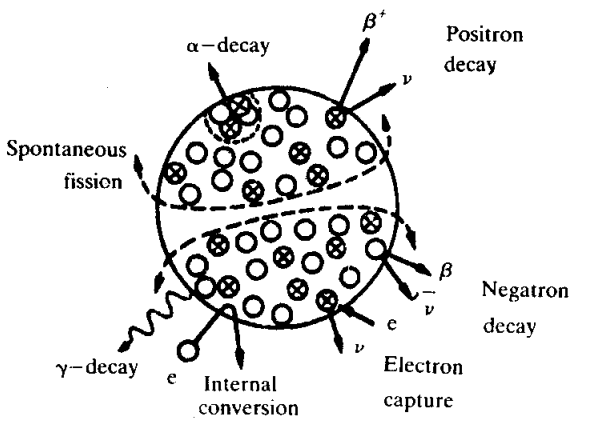
(6) นิวตริโน (neutrino)

อนุภาคเบตาที่ส่งออกมาจากสารกัมมันตรังสี จะมีพลังงานต่อเนื่องกัน ตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าสูงสุด สเปกตราของรังสีเบตา หาได้โดยใช้การเบนในสนามแม่เหล็ก ดับบลิว ปอลลี (W.Pauli) ตั้งสมมติฐานว่า ในกระบวนการสลายโดยการส่งอนุภาคเบตา จะต้องมีนิวตริโนเกิดขึ้น นิวตริโนนี้ไม่มีประจุ, มีค่าสปิน (spin) = ½ เป็นไปตามสถิติของเฟอร์มิ เป็นตัวพาพลังงาน และโมเมนตัมออกไป ความจริงแล้ว นิวตริโนนี้วัดปริมาณไม่ได้ เพราะเล็กมาก, โมเมนต์แม่เหล็ก เป็นศูนย์, ในการวัดการสลาย โดยการส่งเบตาของ H^3 อย่างแม่นยำที่สุด พบว่ามวลขณะอยู่นิ่งของนิวตริโนมีค่าประมาณ 200 อิเล็กตรอนโวลต์ (0.0004 เท่าของมวลขณะอยู่นิ่ง ของอิเล็กตรอน) นิวตริโนที่เป็นตัวพาพลังงานออกมาจากการสลายโดยการส่ง

โพซิตรอน ไม่เหมือนกับที่เกิดขึ้นกับการส่งเบตาเนกาตรอน จึงเรียก นิวตริโน (ν) และแอน-**ตินิวตริโน** ($\bar{\nu}$) บางที **เรียกรวมกันว่า นิวตริโน**

(7) การเกิดแบ่งแยกตัวโดยธรรมชาติ (Spontaneous fission)

นิวคลีไอหนัก สลาย (decay) ได้เองโดยการแบ่งแยกตัว คือนิวเคลียสจะแยกออกเป็น 2 หรือ 3 ส่วน กับนิวตรอน ชิ้นส่วนใหญ่จะเป็นนิวคลีไอใหม่ ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสี มีการสลายโดยการส่งรังสีเบตา จนกระทั่งเป็นนิวคลีไอที่มีเสถียรภาพมีมวลปานกลาง



รูปที่ 1.9 แสดงวิธีการสลายทางนิวเคลียร์
(Nuclear decay modes)

1.12 ข้อคิดเกี่ยวกับการเสถียรภาพของนิวไคลด์

การที่จะพิจารณาว่านิวไคลด์ใดมีเสถียรภาพหรือไม่นั้น อาจพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

(1) พิจารณาอัตราส่วนระหว่างจำนวนนิวตรอน และโปรตอนในนิวเคลียส (N:Z)
ถ้าจำนวนนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสมีค่าเท่ากัน
(N:Z = 1), นิวไคลด์นั้นมักจะเสถียรภาพ แต่ถ้า
(N:Z > 1), มักสลายโดยการส่งเบตาเนกาตรอน
(N:Z < 1), มักสลายโดยการส่งโพซิตรอน

(2) พิจารณาจำนวนนิวตรอนและโปรตอนในนิวเคลียสว่าเป็นเลขคี่หรือเลขคู่ (odd-even effect)

นิวไคลด์ที่มีจำนวนนิวตรอนและโปรตอน เป็นเลข คู่-คู่ มักมีเสถียรภาพมาก รองลงมาก็เป็นเลข คี่-คู่ หรือ คู่-คี่ ส่วนที่เป็นเลข คี่-คี่ นั้น ไม่ค่อยมีเสถียรภาพ จากการทดลองได้ตัวเลขประมาณดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงจำนวนนิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพต่อการสลายโดยให้อนุภาคเบตาที่สัมพันธ์กับจำนวนนิวตรอนและโปรตอนที่เป็นเลขคู่และเลขคี่

นิวตรอน (N)	โปรตอน (Z)	เลขมวล (A)	จำนวนนิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพต่อการสลายโดยให้อนุภาคเบตา
คู่	คู่	คู่	201
คี่	คี่	คี่	69
คู่	คี่	คี่	61
คี่	คู่	คู่	4 นิวไคลด์ ดังนี้ H^2, Li^6, B^{10}, N^{14}

(3) พิจารณาจำนวนโปรตอนและนิวตรอนที่มีอยู่ในนิวเคลียสนั้นว่าเป็นตัวเลขแมจิกหรือไม่ นิวไคลด์ที่มีจำนวนโปรตอน หรือนิวตรอน เป็นตัวเลข 2, 8, 20, 50, 82 หรือนิวตรอน 126 มักเป็นนิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพ จึงเรียกตัวเลขเหล่านี้ว่า **ตัวเลขแมจิก** (magic number) ตัวอย่างสำหรับธาตุเบา ๆ เช่น ${}_2He^4$, ${}_8O^{16}$ หรือ ${}_{20}Ca^{40}$ จะเป็นพวกที่มีเสถียรภาพ

(4) พิจารณาว่านิวไคลด์นั้นมีพลังงานมากพอที่จะสลายโดยการส่งอนุภาค หรือรังสีแกมมา ตามหลักการสลายหรือไม่ ซึ่งจะหาได้โดยการคำนวณ

1.13 แรงกระทำต่อนิวคลีออนในนิวเคลียส

เนื่องจากโปรตอนมีประจุ จึงต้องพิจารณาแรงคูลอมบ์ระหว่าง 2 อนุภาค ซึ่งเป็นแรงผลักชนิดค่อนข้างแรง นอกจากนี้ ยังมีแรงกระทำระหว่างมวล เรียก แรงความโน้มถ่วง เป็นแรงชนิดดูดระหว่างแต่ละคู่ของนิวคลีออน มีค่าน้อยมาก น้อยกว่าประมาณ 10^{37} เท่าของแรงคูลอมบ์ สำหรับอนุภาคคู่หนึ่ง

อีกแรงหนึ่งคือ **แรงนิวเคลียร์** แรงนี้มีค่ามาก **จัดว่าเป็นแรงชนิดแรง (strong), กระทำในระยะทางสั้น (short range) และเป็นชนิดอิ่มตัว (saturated)** มีค่ามากกว่าแรงคูลอมบ์ จึงทำให้นิวเคลียสไม่ถูกแยกออกจากกัน พอที่จะเชื่อได้ว่าแรงนิวเคลียร์มี**คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับประจุ** (charge independent) แต่ก็ยังมีแรงแม่เหล็กไฟฟ้าอีกเล็กน้อย หมายความว่า นอกจากความแตกต่างทางแรงกระทำทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) แล้ว แรงยึดเหนี่ยวนิวคลีออนไว้ด้วยกันในนิวเคลียสย่อมมีค่าเหมือนกันระหว่าง นิวตรอน-นิวตรอน หรือ โปรตอน-โปรตอน หรือนิวตรอน-โปรตอน พอที่จะเห็นได้จากลักษณะที่คล้ายกันของรูปแบบที่แสดงระดับพลังงานของนิวไคลด์ที่เป็นคล้ายกระจกเงา (mirror nuclei)

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก เป็นผลให้เกิดแรงในสนามแม่เหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ แต่แรงแม่เหล็ก (magnetic interaction) ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

1.14 ปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยานิวเคลียร์มักได้มาจากการทดลอง โดยทราบชนิดของนิวเคลียสที่เป็นเป้า พลังงาน และชนิดของอนุภาคที่ยิงเข้าไป

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่จะกล่าวถึงนี้เป็นปฏิกิริยาที่พบเสมอในวิชานี้ ได้แก่

(1) การเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคนิวเคลียร์และการกระเจิง

(Nuclear–particle reaction and scattering)

อนุภาคนิวเคลียร์ ในที่นี้หมายถึง นิวคลีออน (โปรตอนหรือนิวตรอน หรือนิวคลีไอหนึ่งของอะตอมเบา ๆ เช่น ดิวทิรอน, อนุภาคแอลฟา ฯลฯ) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อ พลังงานของอนุภาคที่ใช้ยิง มีค่าสูงพอที่จะเอาชนะแรงผลักไฟฟ้าสถิตของนิวเคลียส พลังงานของอนุภาคเหล่านี้ ได้มาจากเครื่องเร่งประจุ

การที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์นั้น จะต้องให้อนุภาคในลำแสงพุ่งเข้าใกล้นิวคลีไอของเป้า จนทำให้เกิดกิริยา (interact) กับนิวคลีออน หรืออาจจะทะลวงเข้าไปในนิวเคลียสของเป้า ถ้าอนุภาคชนิดเดียวกันนี้ ถูกผลักออกจากนิวเคลียส เรียก กระบวนการกระเจิง (scattering) ถ้ามีอนุภาคชนิดที่แตกต่างกันหนึ่ง หรือมากกว่า 1 ชนิด ส่งออกมาจากนิวเคลียส เรียก กระบวนการเปลี่ยนรูป (transmutation) เพราะนิวเคลียสได้ถูกเปลี่ยนรูป นิวเคลียสที่เหลือ อาจจะยังคงอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น ต่อไปก็จะสลาย เพื่อกลับไปยังสภาวะกราวน์ โดยส่งรังสีแกมมา

พลังงานหนึ่ง หรือหลาย ๆ พลังงานออกมา ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น โดยใช้อนุภาคยิงเข้าไปกระทบกับนิวเคลียสของเป้า แล้วเกิดกระบวนการต่าง ๆ เช่น $Mg^{26}(p,p)$ Mg^{26} กระบวนการที่เกิดขึ้น ถ้านิวเคลียสที่เกิดขึ้นอยู่ที่สภาวะกราวน์ เรียก **การกระเจิงแบบยืดหยุ่น** (elastic scattering) แต่ถ้านิวเคลียสที่เกิดขึ้นอยู่ที่สภาวะถูกกระตุ้น เรียก **การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น** (inelastic scattering) ในกระบวนการ Mg^{26} (p,α) Na^{23} เป็นปฏิกิริยาที่มีการเปลี่ยนรูป ผลที่ได้จากการใช้โปรตอนยิงเข้าไปยัง Mg^{26} จะเกิดนิวเคลียสใหม่ Na^{23} กับอนุภาคแอลฟา เพื่อให้สมการสมดุล จำนวนโปรตอนและนิวตรอนทั้งหมด ทั้งทางซ้าย และทางขวาต้องมีค่าเท่ากัน

(2) การจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา

(Radiative capture)

นิวตรอนหรือโปรตอนที่มีพลังงานต่ำ อาจถูกจับเข้าไปอยู่ในนิวเคลียส แล้วเกิดนิวเคลียสใหม่ ในสภาวะพลังงานที่ถูกกระตุ้นสูง แทนที่นิวเคลียสนั้นจะส่งอนุภาคออกมา นิวเคลียสอาจสลายเพื่อกลับมายังสภาวะกราวน์ โดยการส่งรังสีแกมมาพลังงานหนึ่งหรือหลายพลังงานออกมา เรียก การจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา เช่น

$$_{12}Mg^{26} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{12}Mg^{27} + \gamma$$

(3) การสลายโดยการผ่านรังสีแกมมา

(Photodisintegration)

กรณีที่นิวเคลียสถูกชนด้วยรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ที่มีพลังงานมากพอ จะส่งอนุภาคหนึ่ง หรือหลายอนุภาคออกมา เช่น

$$_{13}Al^{27} + \gamma \longrightarrow {}_{13}Al^{26} + {}_{0}n^{1}$$

สังเกตได้ว่า กระบวนการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา และการสลายโดยการผ่านรังสีแกมมา เป็นกระบวนการที่กลับกัน

(4) การแบ่งแยกตัว

(Induced fission)

ในการจับอนุภาคเข้ามารวมอยู่ในนิวเคลียส พบว่า ถ้าเป็นนิวเคลียสหนัก จะเกิดการแปรรูปอย่างรุนแรง เช่นเกิดการแบ่งแยกตัว ซึ่งเป็นประเภท **การระเบิดทางนิวเคลียร์** (nuclear explosion) มีตัวอย่างเช่น กระบวนการเปลี่ยนแปลงจากมวลสารเป็นพลังงานของยูเรเนียมในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor)

$$U^{235} \quad + \quad n \text{ (slow)} \longrightarrow X + Y + \text{นิวตรอน } \nu \text{ ตัว}$$

นิวเคลียสที่เป็นเป้ารับนิวตรอนช้าเข้าไปและแตกออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ X และ Y เรียกส่วนที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว (fission fragments) ถ้าเป็นนิวเคลียสของ U^{235} จะเกิด Xe^{140} และ Sr^{93} และนิวตรอนอีก 2-3 ตัว นิวตรอนอิสระที่เกิดขึ้นทันที (prompt neutron) เป็นนิวตรอนเร็ว (fast neutron) นิวตรอนเหล่านี้ จะถูกทำให้ความเร็วลดลง จนเป็นนิวตรอนช้า ตามกระบวนการลดพลังงานจนมีพลังงานเทอร์มาล (thermalized) แล้วนิวตรอนช้าเหล่านี้จะกลับไปยิงนิวเคลียสของ U^{235} ทำให้เกิดการแบ่งแยกตัวซ้ำเติมอีก เรียก ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)

สรุป

1. นิวเคลียสประกอบด้วยนิวตรอนและโปรตอน เป็นอนุภาคหลักมูล จำนวนโปรตอนแสดงถึงจำนวนประจุบวกของนิวเคลียส นิวไคลด์ที่มีมวล $M_{Z,A}$ จะเขียนใหม่เพื่อใช้ในการคำนวณคือ

$$M_{Z,A} = z M_H + (A-Z) M_n$$

2. พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวไคลด์ หาได้จากสูตร

พลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวไคลด์ที่มีมวล $M_{Z,A} = |zM_H + (A-Z)M_n - M_{Z,A}|931.5$ เอมอีวี

$$\text{และพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน} = \frac{\text{พลังงานยึดเหนี่ยว}}{\text{เลขมวล}}$$

3. การหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสำหรับนิวตรอนหรือโปรตอนตัวสุดท้ายของนิวไคลด์ใด จะเขียนสมการโดยนำนิวตรอนหรือโปรตอน 1 ตัวเข้าไปรวมกับนิวไคลด์อื่น เพื่อให้เกิดนิวไคลด์นั้น แล้วพิจารณาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในสมการ

4. การสลายทางนิวเคลียร์ อาจส่งอิเล็กตรอน, โพซิตรอน การจับอิเล็กตรอน ทั้ง 3 วิธีการสลาย มักเกิดขึ้นกับนิวคลีไอเบา เพื่อเปลี่ยนแปลงประจุในนิวเคลียส ส่วนการส่งอนุภาคแอลฟา จะเกิดกับนิวคลีไอหนัก ไม่ว่าจะส่งอนุภาคใด นิวเคลียสอาจมีพลังงานเหลืออยู่ ทำให้เกิดการส่งรังสีแกมมา เพื่อกลับสู่สภาวะกราวน์

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1.1 จงหามวลอะตอมของคลอรีน ซึ่งประกอบด้วย Cl^{35} และ Cl^{37}

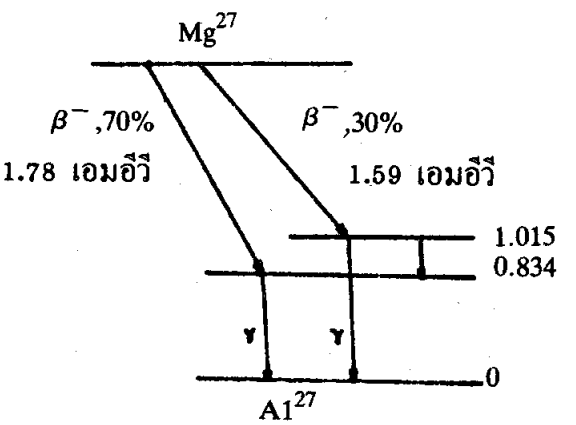
	อบันแดนซ์ (%)	มวลของนิวไคลด์
Cl^{35}	75.53	34.968854
Cl^{37}	24.47	36.965898

1.2 จงให้ความหมายของไอโซโทน, ไอโซบาร์, ไอโซเมอร์, การเปลี่ยนแปลงแบบไอโซบาริก, การเปลี่ยนแปลงแบบไอโซเมอร์

1.3 โดยคิดว่านิวเคลียสมีรูปแบบคล้ายหยดของเหลว จงหารัศมีของ Au^{197} กำหนด $R_0 = 1.5 \times 10^{-15}$ เมตร

1.4 อนุภาคแอลฟาพลังงาน 7.6 เอมอีวี จะเข้าไปใกล้นิวเคลียสของ $_{13}Al^{27}$ ได้ใกล้ที่สุดเท่าไร

1.5 จงอ่านแผนผังการสลายตามรูป



1.6 จงหาพลังงานศักย์ที่เกิดจากอนุภาคโปรตอน วิ่งเข้าไปถึง ณ จุดที่ผิวของนิวเคลียสของ $_{30}Zn^{64}$

1.7 จงหาความยาวคลื่นของนิวตรอนพลังงาน 10 เอมอีวี

1.8 จากกฎของไอสไตน์ จงแสดงการเปลี่ยนแปลงมวล 1 กรัม ให้เป็นพลังงานในหน่วยเอมอีวี

1.9 พลังงานยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นได้อย่างไร จงอธิบาย

1.10 จงให้ความหมายของ ยึดกันอยู่อย่างแน่นในนิวเคลียส, ยึดกันอยู่อย่างหลวม ๆ, พลังงานแยกนิวคลีออน, การแบ่งแยกตัว, การรวมตัว

1.11 เพราะเหตุใด ธาตุที่ไม่มีเสถียรภาพที่เกิดตามธรรมชาติ บางทีก็ส่งอนุภาคเบตา บางทีก็ส่งโพซิตรอน บางทีก็เกิดการจับอิเล็กตรอน หรือบางทีก็ส่งอนุภาคแอลฟา

1.12 **จงหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยว และพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนของ Li^6, Li^7, N^{14}, N^{15}, Mn^{55}, Mn^{56}, U^{235}, U^{238}**

1.13 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยว และพลังงานยึดเหนี่ยว/นิวคลีออน ของ Be^8 ถ้า Be^8 ไม่เสถียรภาพ จงเขียนสมการแสดงการสลายของ Be^8 กำหนดมวลในหน่วยเอเอมยู ของ

$_4Be^8 = 8.005308$, $_1H^1 = 1.0078252$, $_0n^1 = 1.0086654$

1.14 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวนิวตรอนตัวสุดท้ายของไอโซโทป $_{20}Ca^{40}$ กำหนด

$_{20}Ca^{39} = 38.97071$ เอเอมยู, $_0n^1 = 1.0086654$ เอเอมยู, $_{20}Ca^{40} = 39.962589$ เอเอมยู

1.15 จงหาพลังงานยึดเหนี่ยวโปรตอนตัวสุดท้าย สำหรับไอโซโทป $_80^{15}$ กำหนด มวลในหน่วยเอเอมยู ของ $_7N^{14} = 14.0030744$, $_1H^1 = 1.0078252$, $_80^{15} = 15.003072$

1.16 ท่านจะพิจารณาได้อย่างไร เพื่อให้ทราบว่า นิวไคลด์ใดมีเสถียรภาพหรือเป็นพวกกัมมันตรังสี

1.17 อธิบายกระบวนการสลายทางนิวเคลียร์ ตามที่ท่านทราบ

1.18 อธิบายปฏิกิริยานิวเคลียร์ ตามที่ท่านรู้จัก