

# บทที่ 1

## นิวตรอนและการเกิดอันตรกิริยากับสสาร (Neutron and Its Interaction with Matter)

### วัตถุประสงค์

เพื่อให้ นักศึกษามีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ

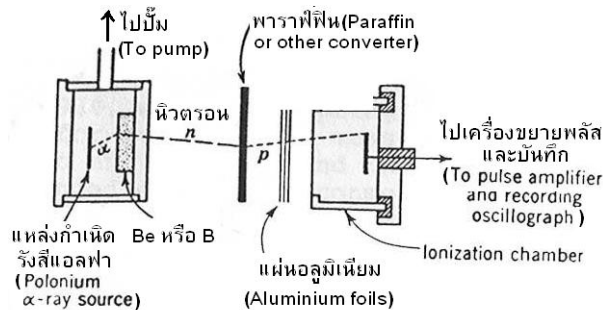
1. สมบัติของนิวตรอน
2. อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในสสารเนื่องจากนิวตรอน
3. การคำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียส
4. ปฏิกริยาต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนิวเคลียส

### 1.1 การค้นพบนิวตรอน (Discovery of the Neutron)

ในปี ค.ศ.1930 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อโบเช(W. Bothe) และเบคเกอร์(H. Becker) ได้ทดลองระดมยิงเบอริลเลียม (Beryllium) และ ธาตุเบาอื่นๆ (เช่น Li, B, Mg และ Al) ด้วย อนุภาคแอลฟา ( $\alpha$  - particles)ซึ่งเกิดจากโปโลเนียมกัมมันตรังสี(radioactive polonium) และสังเกตโดยใช้เครื่องนับไกเกอร์-มุลเลอร์ (Geiger – Müller counters) เป็นตัววัด พบการแผ่รังสีออกมาที่มีพลังงานขนาดรังสีแกมมา ( $\gamma$ - rays) ที่เกิดตามธรรมชาติ ต่อมาคูรี(Irene Curie) และสามีชื่อโจลิออต(Frederic Jöliot)ได้ทำการทดลองต่อ โดยใช้ ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ (Ionization Chamber) ที่มีความไวต่อทั้งอนุภาคประจุ และ รังสีแกมมา และ ใช้โปโลเนียม ที่ให้อนุภาคแอลฟาความเข้มสูง ทั้งสองคนยืนยันผลการทดลองของโบเช และเบคเกอร์ และ ยังกล่าวว่ามีอนุภาคอื่น ๆเกิดตามมาด้วย ต่อมา เจมส์ แชดวิก (James Chadwick) ได้ทดลองซ้ำในปี ค.ศ. 1932 ที่ห้องปฏิบัติการคาเวนดิช (Cavendish laboratory)ของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ (Cambridge University) เครื่องมือในการทดลองของ แชดวิก ให้ดูรูปที่ 1-1 เป็นการทดลองยืนยันและการค้นพบอนุภาคนิวตรอนซึ่งมีมวลเมื่ออยู่หนึ่งใกล้เคียงกับของโปรตรอน นิวตรอนนี้ไม่มีประจุทำให้เกิดการแตกตัวน้อย และ ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าหรือ สนามแม่เหล็ก จึงยากต่อการตรวจวัดนิวตรอนเป็นชื่อที่รูเธอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) เคยกล่าวถึงเมื่อ 12 ปีก่อนการค้นพบของแชดวิกซึ่งเป็นผู้ร่วมงานของเขาเอง ในปัจจุบันนี้เป็นที่รู้กันดีว่า เมื่ออนุภาคแอลฟาหรือนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม ( ${}^4_2\text{He}$ ) ชนกับเบอริลเลียม ( ${}^9_4\text{Be}$ ) จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



หรืออาจเขียนเป็น



รูปที่ 1-1 การทดลองที่ค้นพบนิวตรอนของแซดวิก

โดยที่เครื่องหมาย \* ในสมการ (1.1a) หมายถึงนิวเคลียสของคาร์บอนที่เกิดขึ้นมาอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excited state) แล้วจะกลับมาสู่สถานะพื้น (ground state) เมื่อปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 1-2 MeV ออกมาซึ่งเป็นรังสีแกมมาที่สังเกตพบโดยโบเชและเบคเกอร์จากการค้นพบนิวตรอนทำให้การศึกษาโครงสร้างของนิวเคลียสถูกต้องกว่าเดิมและทำให้รู้จักกันภายหลังว่านิวเคลียสประกอบด้วยโปรตรอนและนิวตรอน

## 1.2 สมบัติของนิวตรอน (Properties of Neutrons)

เมื่อมีการค้นพบนิวตรอน นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการทดลองศึกษาหาสมบัติของนิวตรอน ซึ่งจะละเอียดการศึกษาก็ได้ แต่จะเอาผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมบัติของโปรตรอนและอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคซึ่งโคจรรอบๆนิวเคลียสทำให้เกิดเป็นอะตอม (atom ดังตารางที่ 1.1 นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียร คือ มีการสลายตัวโดยมีครึ่งชีวิตหรือเวลาที่สลายตัวเหลือปริมาณอยู่ครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น ( $641 \pm 8$  วินาที) โดยการสลายตัวของนิวตรอนเป็นไปตามสมการ



ในสมการ (1.2)  $\bar{\nu}$  คือ แอนตินิวทริโน (antineutrino) ตามทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) อนุภาคมีคุณสมบัติเป็นคลื่นได้ เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจนเราสัมผัสแบบปกติไม่ได้ ต้องศึกษาด้วยฟังก์ชันคลื่น (wave function) ดังนั้นอิเล็กตรอน โปรตรอนและ นิวตรอน จึงมีความยาวคลื่นประจำตัว เรียกว่าความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength)  $\lambda$  เมื่อ

ตารางที่ 1.1 สมบัติบางประการของนิวตรอน โปรตรอน และ อิเล็กตรอน

อนุภาค	มวลเมื่ออยู่นิ่ง		ประจุ(e)	สปิน(Spin) $h / 2\pi$	ครึ่งชีวิต(Half life) ( s )
	$m_e$	U			
นิวตรอน (n)	1838.68	1.00866 5	0	$\frac{1}{2}$	$641 \pm 8$
โปรตรอน (p)	1836.15	1.007276	1	$\frac{1}{2}$	$\infty$
อิเล็กตรอน ( $e^-$ )	1	0.000548	-1	$\frac{1}{2}$	$\infty$

หมายเหตุ

- $m_e$  คือ มวลของอิเล็กตรอน มีค่า  $m_e = 9.1093897 \times 10^{-31}$  kg
- u คือ หน่วยมวลเชิงอะตอม (atomic mass unit) บางครั้งใช้ตัวย่อ amu มีค่าเท่ากับ (1/12) ของมวลไอโซโทปคาร์บอน-12 ( $^{12}_6\text{C}$  isotope) ซึ่งมีค่า  $u = 1.6605 \times 10^{-27}$  kg เมื่อเทียบเป็นพลังงานโดยอาศัยสมการไอน์สไตน์ (Albert Einstein)  $E = mc^2$  จะได้

$$1u = 931.5 \text{ MeV}/c^2 \text{ เมื่อ } c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s เป็นอัตราเร็วของแสง}$$

ดังนั้นจะได้  $m_e =$  มวลของอิเล็กตรอน  $\approx 0.511 \text{ MeV}/c$

$$m_p = \text{มวลของโปรตรอน} \approx 938.27 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = \text{มวลของนิวตรอน} \approx 939.56 \text{ MeV}/c^2$$

- e คือ ขนาดประจุของอิเล็กตรอน โดย  $e = 1.60217733 \times 10^{-19}$  C
- มีการทำนายทางทฤษฎีโปรตรอนจะสลาย (decay) ด้วยครึ่งชีวิตขนาด  $10^{30}$  ปีซึ่งในปัจจุบันมีการทดลองกันอยู่
- แต่ละตัวจะมีปฏิอนุภาค(antiparticle)ของตนเองโดยมีมวลและสปินเท่ากันแต่มีประจุตรงกันข้ามและใช้สัญลักษณ์ต่างไปคือ

$\bar{n}$  แทนแอนตินิวตรอน (antineutron)

$\bar{p}$  แทนแอนติโปรตรอน (antiproton)

และ  $e^+$  แทนโพสิตรอน (positron)

พิจารณาว่าอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  จะมีโมเมนตัม  $p$  และพลังงานจลน์  $E$  โดยนิวตรอนจะมีความยาวคลื่นดังกล่าวตามสมการ

$$\lambda = \frac{h}{|p|} = \frac{h}{m_n |v|} = \frac{h}{(2m_n E)^{1/2}} \quad (1.3)$$

เมื่อ  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J.s คือ ค่าคงตัวของ พลังค์ (Planck's constant) และการเคลื่อนที่ของนิวตรอนไม่สูงมาก ดังนั้นจึงสามารถที่จะไม่ใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพได้ และ บางครั้งเราอาจจะหาอุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature) จากพลังงานจลน์เฉลี่ยของอนุภาคได้โดยอาศัยหลักการแบ่งส่วนเท่ากัน (equipartition principle)

$$E = \frac{3}{2} kT \quad (1.4)$$

โดย  $k = 8.617 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$  คือ ค่าคงตัวของ โบลท์ซแมนน์

(Boltzmann's constant)

### ตัวอย่างที่ 1.1

จงหาความยาวคลื่นของนิวตรอนที่มีพลังงานจลน์ 1 MeV และ 0.0253 eV

#### วิธีทำ

จากสมการ (1.3) เมื่อแทนค่ามวลและพลังงานจลน์ของนิวตรอนลงไปจะได้ว่า

นิวตรอนพลังงาน 1 MeV จะได้ความยาวคลื่น

$$\begin{aligned} \lambda_{1 \text{ MeV}} &= h / (2 m_n E)^{1/2} \\ &= 2.86 \times 10^{-4} \text{ \AA} \end{aligned}$$

ขณะที่เทอร์มอลนิวตรอนพลังงานจลน์ขนาด 0.0253 eV จะมีความยาวคลื่น

$$\lambda_{0.0253 \text{ eV}} = 1.798 \text{ \AA}$$

อย่างไรก็ตามเมื่อนิวตรอนมีการแพร่(diffusion)ผ่านอะตอมตัวกลางเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลเชิงความร้อน(thermal equilibrium)กับอะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางใด ๆ แล้วจะมีการแจกแจงพลังงาน(energy distribution) ตามแบบแมกซ์เวลล์ (James Clark Maxwell) ให้ดูในหัวข้อ 6.6 ในที่นี้จะแบ่งนิวตรอนตามพลังงานออกเป็น 3 กลุ่ม ตามตารางที่ 1-2 จะมียอดของการแจกแจงอยู่ที่  $kT/2$  (เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของตัวกลาง) และ จะมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเท่ากับ  $E = \frac{3}{2} kT$  ในการนำไปใช้ทางนิวเคลียร์มักจะรวมค่าทั้งสองเป็นพลังงานจลน์  $kT$  ดังนั้นเมื่อนิวตรอนสมดุลเชิงความร้อนกับตัวกลางที่อุณหภูมิห้อง หรือ  $T \sim 293 \text{ K}$  จะมีค่า พลังงานจลน์เฉลี่ย  $E = \frac{3}{2} kT$

## ตารางที่ 1-2

### การจำแนกนิวตรอนตามพลังงานจลน์

ประเภทนิวตรอน (nomenclature)	ช่วงพลังงาน และอุณหภูมิ		ความยาวคลื่น (Å)
	(eV)	(K)	
Fast neutrons	$>0.5 \times 10^6$	$>6 \times 10^9$	$<4 \times 10^{-4}$
Intermediate neutrons	$10^3-0.5 \times 10^6$	$10^7-6 \times 10^9$	$4 \times 10^{-4}-9 \times 10^{-3}$
Slow neutrons	$0-10^3$	$0-10^7$	$9 \times 10^{-3}-\infty$
(a) Epithermal neutrons	$0.2-10^3$	$2.7 \times 10^3-10^7$	$9 \times 10^{-3}-0.4$
(b) Thermal neutrons*	$0-0.2$	$0-2.7 \times 10^3$	$0.4-\infty$
(c) Ultra-cold neutrons	$<10^{-4}$	$<1$	$>30$

### 1.3 พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสทั้งหลาย (Binding Energy of Nuclei)

คำว่า นิวเคลียส (Nuclei) หมายถึงนิวเคลียสทั้งหลาย อะตอม ของธาตุ X ใด ๆ เราอาจเขียนระบุเป็น  ${}^A_ZX$  โดยอะตอมปกตินี้ มีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนคือ Z ตัว ตามเลขอะตอม (atomic number) Z โดยมีนิวเคลียส  ${}^A_ZX$  ประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอนจำนวน A ตัว เมื่อ A คือเลขมวล(mass number) ดังนั้น จำนวนนิวตรอน =  $N = A - Z$

เป็นที่รู้กันจากผลการทดลอง ว่ามวลที่วัดได้ของนิวเคลียสใดๆ จะมีค่าน้อยกว่า มวลรวมของอนุภาคแต่ละตัวที่ประกอบเป็นนิวเคลียสนั้น ค่าแตกต่างดังกล่าวคือมวลที่หายไปเรียกว่า ส่วนพร่องมวล(mass defect) ใช้สัญลักษณ์  $\Delta m$  โดย

$$\Delta m = [ Zm_p + (A-Z)m_n ] - M(A,Z) \quad (1.5)$$

เมื่อ  $m_p$  คือมวลของโปรตอน  $m_n$  คือมวลของนิวตรอน และ  $M(A,Z)$  คือมวลของนิวเคลียสของธาตุใด ๆ โดย  $M(A,Z) = M - Z m_e$  เมื่อ M คือมวลอะตอมของธาตุนั้นเมื่อหักมวลของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่โคจรรอบ ๆ ออกโดยละพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อยก็จะกลายเป็นมวลของนิวเคลียสของธาตุนั้น หรือเราอาจเขียนใหม่ในรูป

$$\begin{aligned} \Delta m &= (Zm_p + Nm_n) - (M - Zm_e) \\ &= (Zm_p + Zm_e) + Nm_n - M \end{aligned}$$

$$= Zm_H + Nm_n - M \quad (1.6)$$

โดย  $m_H$  = มวลของอะตอมไฮโดรเจนเมื่อละพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส

$$= m_p + m_e$$

นักวิทยาศาสตร์มักจะแทนมวลที่หายไปด้วยพลังงาน ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ยึดเหนี่ยวนิวเคลียสให้อยู่ด้วยกันเนื่องจาก  $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

ดังนั้นเราจะได้พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสใดๆ ( $E_B$ ) มีค่า

$$E_B = \Delta m c^2 = \Delta m (\text{u}) \times 931.5 \text{ MeV} / \text{u} \quad (1.7)$$

ดังนั้น เมื่อเราต้องการที่จะแยกอนุภาคในนิวเคลียส ซึ่งหมายถึงโปรตรอนและนิวตรอนที่ประกอบกันเป็นนิวเคลียสใดๆ ให้ออกจากกันเราต้องป้อนพลังงานเข้าสู่นิวเคลียสอย่างน้อยเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสนั้นๆ ด้วยเหตุนี้พลังงานยึดเหนี่ยวจึงเป็นตัววัดเสถียรภาพเชิงนิวเคลียร์ (Nuclear stability) และค่าของพลังงานยึดเหนี่ยวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวคลีออนที่อยู่ภายในนิวเคลียส จากการทดลองพบว่า แรงนิวเคลียร์เป็นแรงระยะสั้น (short range) ที่เกิดภายในนิวเคลียสรัศมีประมาณ

$$R = 1.2 \times 10^{-15} \text{ A}^{1/3} \text{ m} = 1.2 \text{ A}^{1/3} \text{ fm}$$

เมื่อ A คือ เลขมวลของนิวเคลียสใดๆ และ f (หรือ femto) มีค่า  $10^{-15}$  ซึ่ง fm นี้มักถูกเรียกว่า fermi

### ตัวอย่างที่ 1.2

ให้คำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสยูเรเนียม-235 ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) กำหนดให้มวลจริงของอะตอมยูเรเนียม-235 หรือ  $^{235}_{92}\text{U} = M(^{235}_{92}\text{U}) = 235.043933 \text{ u}$

#### วิธีทำ

จากตารางที่ 1.1 จะได้มวลของไฮโดรเจนอะตอมเมื่อละพลังงานยึดเหนี่ยวจะได้

$$m_H = m_p + m_e = 1.007825 \text{ u}$$

มวลของนิวตรอน  $m_n = 1.008665 \text{ u}$

ดังนั้น นำสมการ (1.7) หาด้วยเลขมวล A = 235 จะได้พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสต่อนิวคลีออน มีค่า

$$\frac{E_B(^{235}_{92}\text{U})}{A} = \frac{931.5}{235} [Zm_H + Nm_n - M] \quad \frac{\text{MeV}}{\text{u} \cdot \text{nucleon}}$$

เมื่อแทนค่าเลขอะตอม Z = 92 และจำนวนนิวตรอน N = A - Z = 235 - 92 = 143 เมื่อแทน

$m_H$  และ  $m_n$  ลงไปจะได้พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสยูเรเนียม-235 ต่อนิวคลีออนมีค่า

$$\frac{E_B(^{235}_{92}\text{U})}{A} = 7.6 \text{ MeV/nucleon}$$

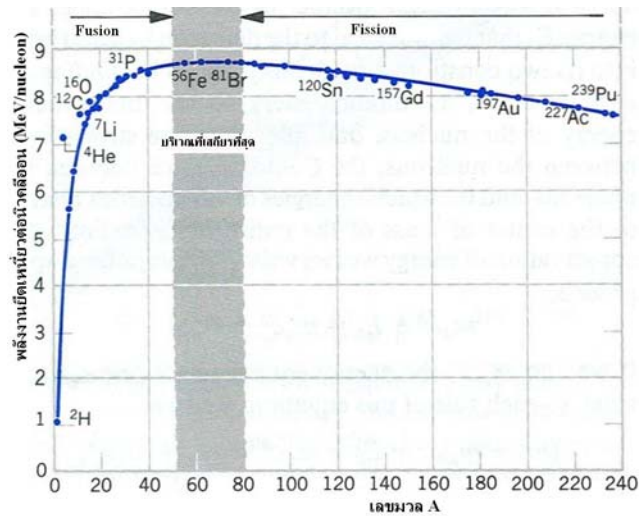
นิวเคลียสพื้นฐานที่สุดคือ นิวเคลียสของไฮโดรเจนอะตอม( $^1_1\text{H}$ ) ซึ่งมีโปรตรอนตัวเดียว ถัดมาคือไอโซโทปของไฮโดรเจนที่มีเลขมวล 2 หรือดิวทีเรียม (deuterium,  $^2_1\text{H}$ ) ซึ่งนิวเคลียสมีโปรตรอนและนิวตรอนอย่างละตัวเรียกดิวทีรอน (deuteron,  $^2\text{H}$ ) เมื่อมวลอะตอมของดิวทีเรียมมีค่า 2.014102 u จะได้พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสต่อนิวคลีออน โดยอาศัยสมการ (1.16) และ (1.17) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{E_B}{A} &= \frac{931.5}{2}(1.007825 + 1.008665 - 2.014102) \frac{\text{MeV}}{\text{nucleon}} \\ &= 1.112 \text{ MeV/nucleon} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะทำให้  $^2\text{H}$  มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อดิวคลีออนมีค่าต่ำสุดของนิวไคลด์ (nuclides) ทั้งหมด คำว่า นิวไคลด์หมายถึง นิวเคลียสของธาตุที่มีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนมีค่าเฉพาะแต่ละไอโซโทปแตกต่างกันไปดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เช่น  $^1\text{H}$  คือ นิวไคลด์ไฮโดรเจน ( $Z=1$ ) ที่มีโปรตรอนตัวเดียวเป็นนิวเคลียส  $^2\text{H}$  คือนิวไคลด์ไฮโดรเจน โดยมีนิวตรอนเพิ่มอีกหนึ่งตัวในนิวเคลียส จึงมักเรียกอะตอมนี้ว่า ดิวทีเรียม หรือ ไฮโดรเจนหนัก (heavy hydrogen)  $^4\text{He}$  คือ นิวไคลด์ฮีเลียม ( $Z=2$ ) ที่มีโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 ตัว ในนิวเคลียส เพื่อความชัดเจนจึงอาจเขียน  $Z$  เป็นตัวห้อย ที่กล่าวมาจึงอาจเขียน  $^1_1\text{H}$ ,  $^2_1\text{H}$ ,  $^4_2\text{He}$  เป็นต้น อะตอมที่มีโปรตอนเท่ากับ ( $Z$  เท่ากัน) แต่มีนิวตรอนไม่เท่ากัน ( $N$  ต่างกัน) เรียกไอโซโทป ดังกล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเพิ่มเติมคือ ออกซิเจน (oxygen) มี 3 ไอโซโทปที่เสถียรคือ  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  และมีอีก 5 ไอโซโทปที่ไม่เสถียร เรียกไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioactive isotopes) คือ  $^{13}\text{O}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{19}\text{O}$  และ  $^{20}\text{O}$  โดย ออกซิเจน มี  $Z = 8$  รูปที่ 1-2 แสดงกราฟของพลังงานยึดเหนี่ยวต่อดิวคลีออนเป็นฟังก์ชันกับเลขมวล  $A$  ของนิวไคลด์ที่ค่อนข้างเสถียร (stable nuclides) นิวไคลด์ที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อดิวคลีออนสูงสุด เมื่อเลขมวลประมาณ 62 หรืออาจกล่าวคือ  $^{62}\text{Ni}$  เมื่อมวลอะตอมของ  $^{62}_{28}\text{Ni}$  มีค่า 61.928346 u จะได้พลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสต่อดิวคลีออน มีค่า

$$\begin{aligned} E_B &= (931.5 / 62)[28 \times 1.007825 + (62 - 28) \times 1.008665] - 61.928346 \text{ MeV/ nucleon} \\ &= 8.795 \text{ MeV/ nucleon} \end{aligned}$$

จากกราฟในรูปที่ 1.2 มีข้อสังเกตว่า  $^4\text{H}$  เป็นนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม  $^4_2\text{He}$  หรืออนุภาคแอลฟา (alpha particle)  $^{12}\text{C}$  เป็นนิวเคลียสของอะตอมคาร์บอน  $^{12}_6\text{C}$  และ  $^{16}\text{O}$  ซึ่งเป็นนิวเคลียสของอะตอมออกซิเจน  $^{16}_8\text{O}$  มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อดิวคลีออนค่อนข้างจะสูง แยกออกไปจากกลุ่มใกล้เคียง ทั้งนี้เป็นเพราะอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างนิวคลีออน ซึ่งมีจำนวนโปรตอนและนิวตรอนเท่ากัน เกิดอันตรกิริยาแบบรุนแรง (strong interactive) ในระยะสั้นหรือในนิวเคลียส



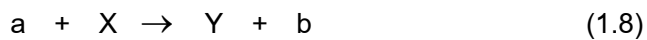
รูปที่ 1-2 พลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ( $E_B/A$ ) เป็นฟังก์ชันกับเลขมวล ( $A$ ) ของนิวไคลด์

ที่ทำให้มี  $E_B$  ที่สูงกว่านิวไคลด์ใกล้เคียง

ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนในช่วงเลขมวล  $A \leq 20$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะมีค่าสูงสุดที่เลขมวลประมาณ 62 จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนประมาณ 8.795 MeV/nucleon ซึ่งบริเวณนี้ในรูปที่ 1-2 จะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนสูงเป็นกลุ่มนิวไคลด์ที่มีเสถียรภาพสูงสุด (region of greatest stability) และเมื่อพิจารณาทั้งกราฟแล้วจะเห็นว่านิวไคลด์ส่วนใหญ่จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออนอยู่เหนือ 8 MeV/nucleon ในการนำเอาพลังงานนิวเคลียร์มาใช้จะอาศัยการปลดปล่อยพลังงานที่เกิดจากการแบ่งแยกตัว (fission) ของนิวเคลียสที่มีเลขมวลสูง และพลังงานที่เกิดจากการรวมนิวเคลียส (nuclear fusion) ซึ่งเกิดในกลุ่มที่มีเลขมวลต่ำ

#### 1.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Nuclear Reactions)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคนิวเคลียร์ เช่น โปรตอน, นิวตรอน และ นิวเคลียส เกิดอันตรกิริยาต่อกัน แล้วเกิดอนุภาคนิวเคลียร์อื่นขึ้นมา และอาจเกิดการปลดปล่อยรังสีแกมมา ( $\gamma$  rays) ออกมาด้วย รูปแบบทั่วไปของปฏิกิริยานิวเคลียร์ เขียนได้โดย



เมื่อ  $a$  และ  $X$  คืออนุภาคนิวเคลียร์ที่เกิดอันตรกิริยาต่อกันแล้วเกิดอนุภาค  $Y$  และ  $b$  ขึ้นมา

ปฏิกิริยานิวเคลียร์แตกต่างไปจากปฏิกิริยาเคมี ตรงที่ ปฏิกิริยาเคมีเกิดในขนาดของอะตอมซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบๆ ชาติที่เกิดปฏิกิริยาต่อกัน ขนาดอะตอมประมาณ  $10^{-10}$  m ส่วนปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดในนิวเคลียสของอนุภาคซึ่งเกิดในขนาด  $10^{-14}$  m



### 1.4.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับอนุภาคประจุ (Charged Particle Reaction)

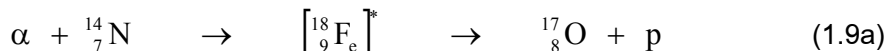
อนุภาคประจุ ที่จะเข้าทำปฏิกริยากับนิวเคลียสหรืออนุภาคอื่น มักได้จากเครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerators) อนุภาคประจุเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะเป็น โปรตอน, ดิวทีรอน และ อนุภาคแอลฟา การเพิ่มปฏิกริยานิวเคลียร์อาจทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ ของ กลุ่มอะตอมเบาที่เป็นเป้าเพื่อให้เกิดเป็นไอออน ระหว่างการชนหรือเข้าทำปฏิกริยาต่อกัน และ เป็นการเพิ่มพลังงานแก่อนุภาคเพื่อให้สามารถชนะแรงคูลอมบ์ (coulomb force) ที่ต้านการเข้าทำปฏิกริยาต่อกัน และที่มักเกิดขึ้นคือ การกระเจิง (scattering) เมื่ออนุภาคที่เข้าชนเข้าไปใกล้ หรือชนเป้านิวเคลียส แล้วถูกผลักดันให้เปลี่ยนทิศทาง ความเร็วอาจเปลี่ยนไปเมื่อมีการสูญเสียพลังงาน การกระเจิงมี 2 แบบ คือ

1.) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) ซึ่งกรณีนี้ พลังงานจลน์ และ โมเมนตัมของระบบที่มีการชนกันมีค่าอนุรักษ์ โดยมีจำนวนอนุภาคเหมือนเดิม

2.) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) กรณีนี้พลังงานจลน์ส่วนหนึ่งของอนุภาคที่เข้าชนจะหายไป กลายเป็นพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสของเป้า อยู่ในสถานะตื่นเต้น (excited state) อย่างไรก็ตามโมเมนตัมของระบบยังคงมีค่าอนุรักษ์

อีกแบบที่เกิดขึ้นกับอนุภาคประจุที่เข้าชน คือ ถูกจับไว้ (captured) ในนิวเคลียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส ทำให้เกิดเป็นธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element) ตัวใหม่แล้วจะเกิดการสลายตัว โดยการปล่อยอนุภาคอื่นออกมา อาจปล่อยอนุภาคที่มีประจุ, ไม่มีประจุ หรือ ปล่อยรังสีแกมมาออกมาก็ได้

ปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากอนุภาคประจุ ถูกพบครั้งแรกโดย รัทเธอร์ฟอร์ด (Rutherford, E) ในปี ค.ศ.1919 เมื่อเขาเป็นคนแสดงว่าเกิดการปลดปล่อยโปรตอน (p) ออกมา เมื่อไนโตรเจน (Nitrogen)  $^{14}_7\text{N}$  ถูกกระทบยิง ด้วย อนุภาคแอลฟา ( $\alpha$ ) ซึ่งเกิดปฏิกริยาตามสมการ



สลายตัวให้โปรตอนออกมาพร้อมกับเปลี่ยนเป็นธาตุใหม่ ปฏิกริยานี้เขียนย่อเหมือนที่เคยเขียนมาตามแบบสมการ (1.1b)จะได้สมการ

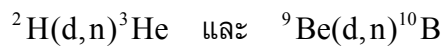


เราเรียกปฏิกิริยาตามสมการ (1.9b) นี้ว่าปฏิกิริยา ( $\alpha, p$ ) เป็นที่น่าสังเกตว่าการจับ อนุภาคแอลฟา ของนิวเคลียสไม่ก่อให้เกิดการแผ่อนุภาคโปรตอนเสมอไปดังสมการ (1.1b) เบอร์รีลีเยียมจับ อนุภาคแอลฟา แล้วให้นิวตรอนออกมา

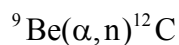
สรุปจากการศึกษาทดลองพบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดกับอนุภาคประจุ ที่สำคัญนอกเหนือจากการกระเจิง แล้วมีโอกาสดังนี้

1. ปฏิกิริยาที่เกิดจากโปรตอน (proton reaction) ( $p, n$ ), ( $p, d$ ), ( $p, \alpha$ ), ( $p, \gamma$ ) ซึ่งส่วนใหญ่ มักจะพบการดูดกลืนโปรตอนในธาตุเบา โดยปฏิกิริยา  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  เป็นปฏิกิริยาแรกที่พิสูจน์ ความสัมพันธ์ระหว่างมวล และ พลังงานตามสมการ  $E = mc^2$

2. ปฏิกิริยาที่เกิดจากดิวทีรอน (deuteron reaction) ( $d, p$ ), ( $d, n$ ), ( $d, \alpha$ ) ปฏิกิริยาที่สำคัญ และ มักพบในทุกธาตุ คือ ( $d, p$ ) ในสมัยก่อนที่มีการเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แหล่งกำเนิดนิวตรอนหาได้จากปฏิกิริยา



3. ปฏิกิริยาที่เกิดจาก แอลฟา (Alpha reaction) ( $\alpha, p$ ), ( $\alpha, n$ ) ปฏิกิริยาที่สำคัญในการ ค้นพบอนุภาคนิวตรอน ตัวที่เคยกกล่าวมาแล้ว ตามสมการ (1.1b) คือ



4. ปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัว (fission reaction) เกิดเมื่อนิวไคลด์ใหญ่ ถูกยิงด้วย โปรตอน, ดิวทีรอน หรือ อนุภาคแอลฟา แล้วแบ่งแยกตัวเป็น 2 ธาตุ (บางครั้งอาจเป็น 3 ธาตุ)

5. การแตกเป็นเสี่ยง(spallation) เกิดขึ้นเมื่อโปรตอนถูกเร่งให้มีพลังงานสูงกว่า  $10^3$  MeV เข้าชนนิวเคลียสของธาตุหนักแล้วเกิดการแตกแยกออกเป็นหลายส่วน แล้วเกิดนิวตรอนพลังงาน สูงออกมามากมาย ปฏิกิริยานี้มีประโยชน์ในการผลิตเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

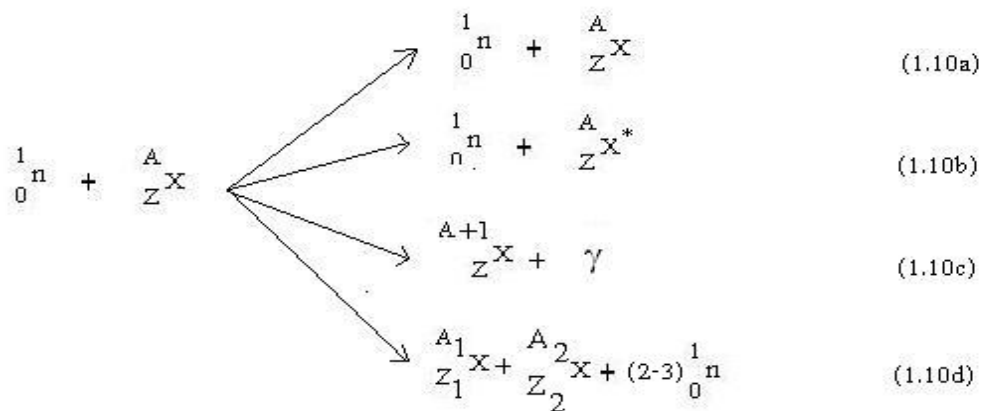
#### 1.4.2 ปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอน (Neutron Reaction)

นิวตรอนไม่มีประจุ จึงง่ายที่จะทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ เนื่องจากไม่มีแรงคูลอมบ์ ซึ่งเกิดจากอนุภาคของประจุชนิดเดียวกันมาขวางกั้น แต่จะมีศักย์ทางนิวเคลียร์ (nuclear potential) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับประจุ เมื่อเข้าใกล้นิวเคลียส ปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอนมี มากมายหลายแบบ โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ คือ ปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส (nuclear fission reaction) ซึ่งจะขอกล่าวรายละเอียดในบทที่ 2 ในที่นี้จะกล่าวถึงพื้นฐาน โดยทั่วไปว่าปฏิกิริยาที่เกิดจากนิวตรอนอาจแบ่งกว้างๆเป็น

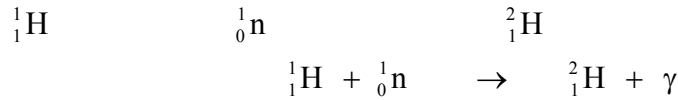
ก.) ปฏิกิริยาโดยตรงหรือการกระเจิงแบบศักย์ (direct reaction or potential scattering) ถือว่าเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานที่สุดที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนปะทะกับศักย์นิวเคลียร์แล้วเกิดการกระเจิง ออกไป โดยยังไม่ได้เข้าไปในนิวเคลียส ปฏิกิริยาโดยตรง หรือ การกระเจิงแบบศักย์นี้มีทั้งแบบ ยืดหยุ่น และ แบบไม่ยืดหยุ่น ช่วงเวลาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยานี้ประมาณ  $10^{-22}$  s การกระเจิง

ข.) ปฏิกริยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนิวเคลียส (reaction via compound nucleus formation) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอน ( ${}_0^1n$ ) ที่เข้าชนถูกดูดกลืนไว้โดยนิวเคลียสที่เป็นเป้า ( ${}_Z^AX$ ) ทำให้เกิดนิวเคลียสเชิงประกอบใหม่ขึ้นมา (new compound nucleus)  ${}_{Z}^{A+1}X$  ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งมักจะเขียนในรูป  $[{}_{Z}^{A+1}X]^*$  จากนั้นนิวเคลียสเชิงประกอบนี้ก็จะเกิดการสลายตัว โดยปลดปล่อยอนุภาคบางอย่างออกมา นิวตรอนที่วิ่งเข้าชน อาจมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่อนิวคลีออน ในนิวเคลียส (ซึ่งมีค่าประมาณ 8 MeV) โดยเฉพาะนิวตรอนช้า (ความเร็วประมาณ  $10^5$  cm/s) ซึ่งมีค่าพลังงานต่ำกว่ามากจะถูกนิวเคลียสดูดกลืนแล้วเกิดอันตรกิริยากับนิวคลีออนที่อยู่ในนิวเคลียสทั้งหมด ช่วงเวลานิวตรอนจะผ่านไปใช้เวลาประมาณ  $10^{-17}$  s แต่ถ้กรณีเกิดปฏิกริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส จะใช้เวลาประมาณ  $10^{-14}$  s หรือ ใช้เวลาประมาณ 1,000 เท่าของเวลาที่เคลื่อนที่ผ่านนิวเคลียส บางกรณีที่นิวเคลียสเชิงประกอบอยู่ในสถานะตื่นตัว แล้วกลับสู่สถานะพื้นโดยการปลดปล่อยรังสีแกมมา ( $\gamma$ ) ออกมา

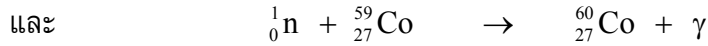
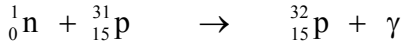
ปฏิกริยาที่เกิดจากนิวตรอน ( ${}_0^1n$ ) เข้าชนนิวเคลียสของธาตุ  ${}_Z^AX$  จึงอาจเขียนเป็น



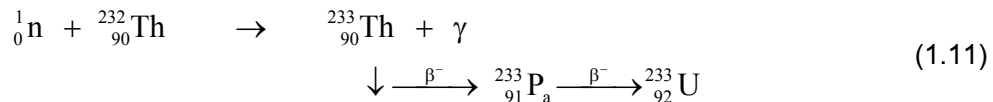
สมการการเกิดปฏิกริยาต่างๆ ได้เป็นสมการ (1.10a) เรียกว่าการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) เป็นกรณีที่นิวตรอนที่กระเจิงมีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานจลน์ตอนเข้าชน และ อาจเรียกว่า เรโซแนนซ์ (resonance) ถ้านิวตรอนที่เข้าชนมีพลังงานจับคู่ได้กับหนึ่งในระดับพลังงานในนิวเคลียสเชิงประกอบ สมการ (1.10b) เรียกว่าการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นเมื่อพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่กระเจิงมีพลังงานจลน์น้อยกว่าตอนเข้าชน และ ตามด้วย  $({}_Z^AX)^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$



การจับนิวตรอนช้า (slow neutron) เป็นวิธีการผลิตไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotopes) ตัวอย่างของปฏิกิริยาแบบนี้ เช่น

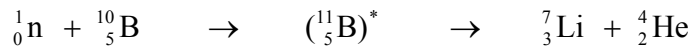


ปฏิกิริยานี้อาจเขียนย่อเป็น (n,γ) เนื่องจากนิวตรอนที่เข้ามาถูกดูดกลืน จึงถือเป็นแบบหนึ่งของปฏิกิริยาการดูดกลืน (absorption reaction) ถ้ายิ่งนิวตรอนไปยังธาตุหนักมากๆ จะทำให้เกิดนิวเคลียสที่ไม่เสถียร มีการสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคบีตา ลบ ( $\beta^-$  - particle) หรืออิเล็กตรอนออกมา หรือเรียกการสลายบีตา ลบ ( $\beta^-$  - Decay)



ตามสมการ (1.11) นี้เป็นวิธีการในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตเชื้อเพลิง (breeder reactor) ผลิตธาตุหรือไอโซโทปที่ไม่แบ่งแยกตัวได้ที่เรียกว่า เฟอริล์ไอโซโทป (fertile isotopes)  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  ให้เป็นไอโซโทปที่แบ่งแยกตัวได้ หรือ (fissile isotopes)  ${}^{233}_{92}\text{U}$  ซึ่งจะขอกว่าเรื่องนี้ในบทหลัง

นอกจากการปลดปล่อยอนุภาคบีตาแล้ว ยังมีปฏิกิริยาที่ปลดปล่อยอนุภาคอื่นออกมา เช่น ปลดปล่อยโปรตอน (p) หรือ อนุภาคแอลฟา ( $\alpha$ - particle) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบว่ามีนิวตรอนหรือไม่ เช่น ปฏิกิริยา



เมื่อ  ${}^4_2\text{He}$  คือ อนุภาคแอลฟา หรือ นิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม ปฏิกิริยานี้อาจเขียนย่อเป็น  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  โดยอนุภาคแอลฟาสามารถตรวจวัดได้ในเครื่องวัดที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็น

ไอออน เช่น ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ (ionization chamber)

ส่วนสมการ (1.10d) เป็นปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัว (fission reaction) จะกล่าวในรายละเอียดในบทที่ 2

## สรุปเนื้อหาในบทที่ 1

1. การสลายตัวของนิวตรอนเป็นไปตามสมการ  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$  เมื่อ  $\bar{\nu}$  คือ แอนตินิวทริโน (antineutrino)
2. ตามทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) อนุภาคมีคุณสมบัติเป็นคลื่นได้ มีความยาวคลื่นประจำตัว เรียกว่าความยาวคลื่น เดอบรอยล์ (de Broglie wavelength)  $\lambda$  เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  จะมีโมเมนตัม  $p$  และ พลังงานจลน์  $E$  จะมี

$$\lambda = \frac{h}{|p|} = \frac{h}{m_n |v|} = \frac{h}{(2m_n E)^{1/2}}$$

เมื่อ  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J.s คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)

3. อะตอม ของธาตุ X ใด ๆ เขียนเป็น  ${}^A_Z X$  โดยอะตอมปกติมีจำนวนโปรตอนเท่ากับ จำนวน อิเล็กตรอน ตามเลขอะตอม  $Z$  โดยมีนิวเคลียส  ${}^A X$  ประกอบด้วย โปรตอนและ นิวตรอน ตามเลขมวล  $A$  โดยจำนวนนิวตรอน  $= N = A - Z$
4. มวลที่วัดได้ของนิวเคลียสใดๆ จะมีค่าน้อยกว่า มวลรวมของอนุภาคแต่ละตัวที่ประกอบ เป็นนิวเคลียสนั้น ค่าแตกต่างคือส่วนพร่องมวล(mass defect) ใช้สัญลักษณ์  $\Delta m$  โดย  $\Delta m = [Zm_p + (A-Z)m_n] - M(A,Z)$  เมื่อ  $m_p$  คือมวลของโปรตอน และ  $m_n$  คือมวลของ นิวตรอน และ  $M(A,Z)$  คือมวลของนิวเคลียสของธาตุใด ๆ โดย  $M(A,Z) = M - Z m_e$  เมื่อ  $M$  คือมวลอะตอมของธาตุนั้น หรือ  $\Delta m = Zm_H + Nm_n - M$  โดย  $m_H = m_p + m_e$
5. นักวิทยาศาสตร์มักจะแทนมวลที่หายไปด้วยพลังงาน ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ยึดเหนี่ยว นิวเคลียสให้อยู่ด้วยกัน เมื่อ  $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$  จะได้พลังงานยึดเหนี่ยวนิวเคลียสใดๆ

$$E_B = \Delta m c^2 = \Delta m (\text{u}) \times 931.5 \text{ MeV} / \text{u}$$

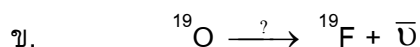
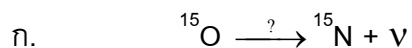
6. นิวเคลียสมีรัศมีประมาณ  $R = 1.2 \times 10^{-15} A^{1/3} \text{ m} = 1.2 A^{1/3} \text{ fm}$  เมื่อ  $A$  คือ เลขมวลของ นิวเคลียสใดๆ และ  $f$  (หรือ femto) มีค่า  $10^{-15}$
7. ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เขียนได้เป็น  $a + X \rightarrow Y + b$  เมื่อ  $a$  และ  $X$  คืออนุภาคนิวเคลียร์ที่ เกิดอันตรกิริยาต่อกันแล้วเกิดอนุภาค  $Y$  และ  $b$  ขึ้นมา
8. การกระเจิงมี 2 แบบ คือ
  - 1.) การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) ซึ่งกรณีนี้ พลังงานจลน์และโมเมนตัม ของระบบที่มีการชนกันมีค่าอนุรักษ์ โดยมีจำนวนอนุภาคเหมือนเดิม
  - 2.) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) กรณีนี้พลังงานจลน์ส่วนหนึ่งของ อนุภาคที่เข้าชนจะหายไป กลายเป็นพลังงานที่ทำให้นิวเคลียสของเป้า อยู่ในสถานะ

ต้นตัว โดยโมเมนต์ของระบบยังคงมีค่าอนุรักษ์

9. ปฏิกริยาที่เกิดกับอนุภาคประจุ ที่สำคัญนอกเหนือจากการกระเจิง แล้วมีโอกาสเกิด
  1. ปฏิกริยาที่เกิดจากโปรตอน (p,n), (p,d), (p,  $\alpha$ ), (p, $\gamma$ )
  2. ปฏิกริยาที่เกิดจากดิวทีรอน (d,p), (d,n), (d,  $\alpha$ )
  3. ปฏิกริยาที่เกิดจาก แอลฟา ( $\alpha$ ,p), ( $\alpha$ ,n)
  4. ปฏิกริยาการแบ่งแยกตัว เกิดเมื่อนิวไคลด์ใหญ่ ถูกยิงด้วย โปรตอน, ดิวทีรอน หรือ อนุภาคแอลฟา แล้วแบ่งแยกตัวเป็น 2 ธาตุ (บางครั้งอาจเป็น 3 ธาตุ)
  5. การแตกเป็นเสี่ยง(spallation) เกิดขึ้นเมื่อโปรตอนถูกเร่งให้มีพลังงานสูงกว่า  $10^3$  MeV เข้าชนนิวเคลียสของธาตุหนักแล้วเกิดการแตกแยกออกเป็นหลายส่วน
10. ปฏิกริยาที่เกิดจากนิวตรอน(neutron reaction)นิวตรอนไม่มีประจุจึงง่ายที่จะทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุเนื่องจากไม่มีแรงคูลอมบ์แต่จะมีศักย์ทาง นิวเคลียร์ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับประจุ เมื่อเข้าใกล้นิวเคลียส ปฏิกริยาที่เกิดจากนิวตรอนมีมากมายที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ คือ ปฏิกริยาการแบ่งแยกนิวเคลียส
11. ปฏิกริยาที่เกิดจากนิวตรอนอาจแบ่งกว้างๆเป็น
  - ก.) การกระเจิงแบบศักย์
  - ข.) ปฏิกริยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนิวเคลียส

## แบบฝึกหัดบทที่ 1

- 1.1 อิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์ 88 keV จะมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์ ( De Broglie Wavelength) เท่าใด
- 1.2 นิวคลีออนตัวหนึ่งได้รับพลังงานจลน์มา 8 MeV และเคลื่อนที่อยู่ภายในนิวเคลียส เมื่อ นิวคลีออนตัวนี้มีมวล  $m \sim 940 \text{ MeV}/c^2$  ให้คำนวณหาความยาวคลื่นเดอบรอยล์
- 1.3 อิเล็กตรอนตัวหนึ่งมีพลังงานจลน์ 8 MeV เมื่อพิจารณาว่าต้องใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพจะมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่าใด
- 1.4 นิวตรอนอิสระสลายตัวตามสมการ  $n \longrightarrow p + e + \bar{\nu} + Q$  เมื่อ  $Q$  คือ พลังงานจลน์สูงสุดที่ปล่อยออกมา มีค่า 780 keV ถ้า  $m_p = 1.007825 \text{ u}$  และ  $m_e = 0.0055 \text{ u}$  ให้คำนวณหามวลเมื่ออยู่นิ่งของนิวตรอน
- 1.5 ให้หาพลังงานที่จะเป็นไปได้สูงสุดและพลังงานเฉลี่ยของโมเลกุลอากาศที่  $38^\circ \text{ C}$
- 1.6 ให้คำนวณหาพลังงาน ( $Q$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยา  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$  เมื่อกำหนดให้  $M(^{14}\text{N}) = 14.007518 \text{ u}$        $M(\alpha) = 4.003873 \text{ u}$        $M(^{17}\text{O}) = 17.004529 \text{ u}$  และ  $m_p = 1.007825 \text{ u}$
- 1.7 เมื่อตริตอน(triton,  $^3\text{H}$ )ถูกยิงด้วยดิวทีรอน  $d$  (deuteron,  $^2\text{H}$ ) เกิดผลตามปฏิกิริยา  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$  ให้คำนวณหาพลังงาน  $Q$  ของปฏิกิริยานี้ เมื่อกำหนดให้  $M(^3\text{H}) = 3.016049 \text{ u}$   $M(^4\text{He}) = 4.002604 \text{ u}$        $M(^2\text{H}) = 2.014102 \text{ u}$       และ  $m_n = 1.008665 \text{ u}$
- 1.8 ให้คำนวณหารัศมีของนิวเคลียส  $^{235}\text{U}$  จากสมการ  $R = 1.23 \times 10^{-15} \text{ A}^{1/3} \text{ m}$  ถ้าให้มวลของแต่ละนิวคลีออนมีค่าประมาณ  $1.6 \times 10^{-27} \text{ kg}$  และให้ประมาณหาความหนาแน่นของมวลในปริมาตรนิวเคลียสในหน่วย  $\text{kg}/\text{m}^3$
- 1.9 ให้คำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายใน  $^{13}\text{C}$  กำหนดให้  $M(^{12}\text{C}) = 12.0000 \text{ u}$        $M(^{13}\text{C}) = 13.00335 \text{ u}$       และ  $m_n = 1.008665 \text{ u}$
- 1.10 ดิวทีรอน(deuteron,  $^2\text{H}$ ) 2 ตัว เกิดปฏิกิริยาการหลอมนิวเคลียส (nuclear fusion reaction) เป็นตริตอน(triton,  $^3\text{H}$ )และโปรตอนตามสมการ  $^2\text{H} + ^2\text{H} \longrightarrow ^3\text{H} + ^1\text{H}$  จงหาพลังงาน  $Q$  ของปฏิกิริยานี้ กำหนดให้  $M(^2\text{H}) = 2.014102 \text{ u}$        $M(^3\text{H}) = 3.016049 \text{ u}$  และ  $M(^1\text{H}) = 1.007825 \text{ u}$
- 1.11 จากการสลายกัมมันตรังสี(radioactive decay) ตามสมการต่อไปนี้ ไอโซโทปด้านซ้ายต้องสลายอนุภาคอะไรออกมาจึงจะได้ด้านขวามือ



- 1.12 ทริเทียม(tritium,  ${}^3_1\text{H}$ ) เกิดจากดิวทีเรียม(deuterium,  ${}^2_1\text{H}$ ) ดูดกลืนนิวตรอน( ${}^1_0\text{n}$ ) พลังต่ำตามปฏิกิริยา  ${}^2_1\text{H} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + \gamma$  เมื่อรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 6.256 MeV
- ก. ให้แสดงว่าพลังงานจลน์ของตริตอน( ${}^3_1\text{H}$ )ที่เคลื่อนที่(recoil energy)มีค่าประมาณ 7 keV
- ข. ค่าพลังงาน Q ของปฏิกิริยามีค่าเท่าใด
- ค. ให้คำนวณหาพลังงานที่ใช้แยกนิวตรอนตัวสุดท้ายใน  ${}^3_1\text{H}$
- ง. ให้ใช้พลังงานยึดเหนี่ยวของ  ${}^2_1\text{H}$  ซึ่งมีค่า 2.23 MeV และผลจากข้อ ค.คำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวทั้งหมดของ  ${}^3_1\text{H}$
- 1.13 จากลูกโซ่การสลายตัว (decay chain) ต่อไปนี้ ไอโซโทปต้นซ้ายต้องสลายอนุภาคอะไรออกมาจึงจะได้ต้นขวามี
- ก.  ${}^{13}\text{O} \xrightarrow{?} {}^{13}\text{N} \xrightarrow{?} {}^{13}\text{C}$  (stable)
- ข.  ${}^{20}\text{O} \xrightarrow{?} {}^{20}\text{F} \xrightarrow{?} {}^{20}\text{Ne}$  (stable)
- 1.14 ให้คำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวทั้งหมด(total binding energy) และ พลังงานยึดเหนี่ยวเฉลี่ยต่อนิวคลีออนของ ก.  ${}^{11}\text{B}$  ข.  ${}^{12}\text{C}$  ค.  ${}^{14}\text{N}$  เมื่อกำหนดให้  $M({}^{11}\text{B}) = 11.009305 \text{ u}$   $M({}^{12}\text{C}) = 12.000000 \text{ u}$  และ  $M({}^{14}\text{N}) = 14.003074 \text{ u}$
- 1.15 ให้คำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายใน  ${}^4\text{He}$  และ โปรตอนตัวสุดท้ายใน  ${}^{16}\text{O}$  ให้เปรียบเทียบกับ B/A ของนิวคลีไอเหล่านี้ด้วย