

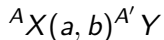
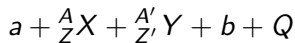
บรรยาย 23 ปฏิกริยานิวเคลียร์
SCPY152 หลักฟิสิกส์ทั่วไป 2

อุดม รอบคอบ

26 เมษายน พ.ศ. 2565

นิยาม

- ▶ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับนิวเคลียส (จำนวนนิวคลีออน)
- ▶ สมการปฏิกิริยา



เมื่อ a, b เป็นอนุภาคนิวเคลียร์พลังงานสูง และ Q คือพลังงานจากปฏิกิริยา

$$Q = (M_X + m_a - M_Y - m_b)c^2$$

โดยที่ $Q > 0$ เป็นปฏิกิริยาแบบให้พลังงาน (exoergic reaction) และ $Q < 0$ เป็นปฏิกิริยาแบบรับพลังงาน (endoergic reaction) ซึ่งต้องการพลังงานเริ่มต้น (threshold energy)

▶ ตัวอย่างปฏิกิริยานิวเคลียร์



$$\begin{aligned} Q &= (14.003074 + 4.001506 \\ &\quad - 16.9991315 - 1.007276)(uc^2)(931.5\text{MeV}/u) \\ &= -1.873\text{MeV} \text{ (endoergic reaction)} \quad (2) \end{aligned}$$

▶ ตัวอย่างปฏิกิริยานิวเคลียร์



$$\begin{aligned} Q &= (14.003074 + 4.001506 \\ &\quad - 16.9991315 - 1.007276)(uc^2)(931.5\text{MeV}/u) \\ &= -1.873\text{MeV} \text{ (endoergic reaction)} \quad (2) \end{aligned}$$

Reaction	Measured Q (MeV)	Reaction	Measured Q (MeV)
${}^2\text{H}(n, \gamma){}^3\text{H}$	6.257 +/- 0.004	${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$	2.132 +/- 0.006
${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$	4.032 +/- 0.004	${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$	2.793 +/- 0.003
${}^6\text{Li}(p, \alpha){}^3\text{H}$	4.016 +/- 0.005	${}^{10}\text{B}(p, \alpha){}^7\text{Be}$	1.148 +/- 0.003
${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$	5.020 +/- 0.006	${}^{12}\text{C}(n, \gamma){}^{13}\text{C}$	4.948 +/- 0.004
${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$	-1.645 +/- 0.001	${}^{13}\text{C}(p, n){}^{13}\text{N}$	-3.003 +/- 0.002
${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$	17.337 +/- 0.007	$*{}^{14}\text{N}(p, n){}^{14}\text{C}$	-0.627 +/- 0.001
${}^9\text{Be}(n, \gamma){}^{10}\text{Be}$	6.810 +/- 0.006	${}^{14}\text{N}(n, \gamma){}^{15}\text{N}$	10.833 +/- 0.007
${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$	-1.666 +/- 0.002	${}^{18}\text{O}(p, n){}^{18}\text{F}$	-2.453 +/- 0.002
${}^9\text{Be}(d, p){}^{10}\text{Be}$	4.585 +/- 0.005	${}^{19}\text{F}(p, \alpha){}^{16}\text{O}$	8.124 +/- 0.007

▶ จลศาสตร์ของปฏิกิริยา



LAB frame:

$$p_a = p_Y \cos \phi + p_b \cos \theta, \quad 0 = -p_Y \sin \phi + p_b \sin \theta \quad (3)$$

$$M_X c^2 + m_a c^2 + K_a = M_Y c^2 + K_Y + m_b c^2 + K_b \quad (4)$$

▶ ใช้เอกลักษณ์ $p = \sqrt{2mK}$ แก้สมการ (3,4) หาค่า Q ได้ดังนี้

$$Q = K_b \left(1 + \frac{m_b}{M_Y}\right) - K_a \left(1 - \frac{m_a}{M_Y}\right) - \frac{2}{M_Y} \sqrt{m_a m_b K_a K_b} \cos \theta \quad (5)$$

- เขียนสมการ (5) ในรูปของ $\sqrt{K_b}$ กำลังสอง และหาคำตอบได้ดังนี้

$$\sqrt{K_b} = r \pm \sqrt{r^2 + s}, \quad r = \frac{\sqrt{m_a m_b K_a}}{m_b + M_Y} \cos \theta \quad (6)$$

$$s = \frac{K_a(M_Y - m_a) + M_Y Q}{m_b + M_Y}$$

จากความจริงที่ว่า $\sqrt{K_b} \geq 0$ ในกรณี $Q > 0$ พบว่า

$$\theta = 0 \mapsto K_{b,max}, \quad \theta = \pi \mapsto K_{b,min}$$

ในกรณี $Q < 0$ มีความต้องการพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy)

$K_{a,th}$ พิจารณาจาก $K_{b,min}$ ในทิศทาง $\theta = 0$ พบว่า

$$\sqrt{r^2 + s} = 0 \mapsto K_{a,th} = -Q \frac{m_b + M_Y}{m_b + M_Y - m_a}$$

และ b จะถูกปลดปล่อยด้วยพลังงาน

$$K_{b,th} = K_{a,th} \frac{m_a m_b}{(m_b + M_Y)^2} \xrightarrow{M_Y \gg m_b} 0$$

▶ เซ็นในกรณีของ $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ จะพบว่า

$$K_{\alpha,th} = (1.873\text{MeV}) \frac{1 + 17}{1 + 17 - 4} = 2.408\text{MeV}$$

$$K_{p,th} = (2.408\text{MeV}) \frac{1 \cdot 4}{(1 + 17)^2} = 0.030\text{MeV}$$

▶ เช่นในกรณีของ $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$ จะพบว่า

$$K_{\alpha,th} = (1.873\text{MeV}) \frac{1 + 17}{1 + 17 - 4} = 2.408\text{MeV}$$

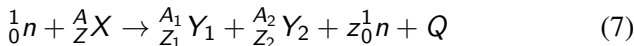
$$K_{p,th} = (2.408\text{MeV}) \frac{1 \cdot 4}{(1 + 17)^2} = 0.030\text{MeV}$$

กรณีอื่นๆ

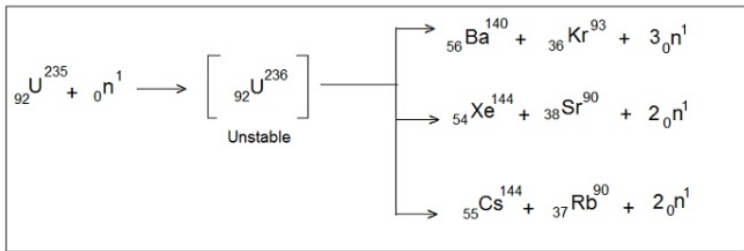
Reaction	Q-value (MeV)	Threshold (MeV)
$^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)$	-1.52	1.61
$^{16}\text{O}(\text{n},\alpha)$	-2.22	2.36
$^{19}\text{F}(\text{n},\text{n}+\alpha)$	-4.01	4.23
$^{19}\text{F}(\text{n},\text{p})$	-4.04	4.25
$^{12}\text{C}(\text{n},\alpha)$	-5.70	6.18
$^{19}\text{F}(\text{n},\text{d})$	-5.77	6.08
$^{16}\text{O}(\text{n},\text{n}+\alpha)$	-7.16	7.61
$^{19}\text{F}(\text{n},\text{t})$	-7.56	7.96
$^{19}\text{F}(\text{n},\text{n}+\text{p})$	-7.99	8.42

ปฏิกิริยาแบบแยกสลาย (fission)

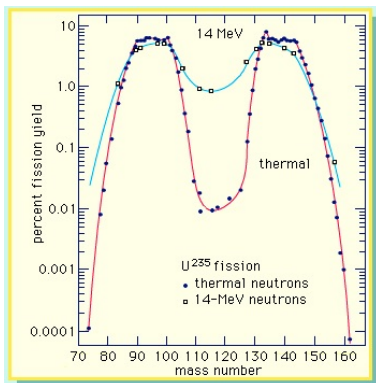
- ▶ เกิดกับนิวเคลียสขนาดใหญ่ ที่มีอันตรกิริยากับนิวตรอน (n) และได้ผลผลิตเป็นนิวเคลียสขนาดเล็ก 2 นิวเคลียส และนิวตรอนจำนวนหนึ่ง (z) สมการปฏิกิริยาทั่วๆ ไปเป็นดังนี้



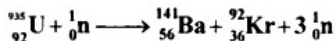
ตัวอย่างเช่น



▶ การปรากฏของนิวเคลียสผลผลิต (fission fragment)



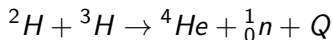
- ▶ พลังงาน Q จะอยู่ที่ประมาณ 200 MeV ต่อหนึ่งปฏิกิริยา
- ▶ แบบฝึกหัด ให้คำนวณ Q จากปฏิกิริยาต่อไปนี้



Given : ${}_{92}^{235}\text{U} = 235.0439 \text{ u}$, ${}_0^1\text{n} = 1.0087 \text{ u}$, ${}_{56}^{141}\text{Ba} = 140.9139 \text{ u}$, ${}_{36}^{92}\text{Kr} = 91.8973 \text{ u}$

ปฏิกิริยาแบบหลอมรวม (fusion)

- ▶ เกิดกับนิวเคลียสขนาดเล็ก ที่หลอมรวมกันเป็นนิวเคลียสที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหลังจากที่มีการชนกัน ด้วยพลังงานที่มากพอ (เพื่อเอาชนะแรงผลักรวมกันที่เกิดขึ้นขณะที่นิวเคลียสทั้งสองมาอยู่ใกล้กันมากพอ ที่จะเข้าสู่ระยะของแรงดึงดูดนิวเคลียร์)
- ▶ กรณีตัวอย่าง



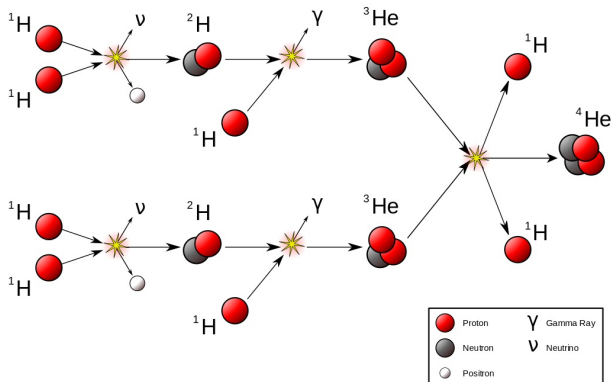
$$M({}^2\text{H}) = 2.014102u, M({}^3\text{H}) = 3.016049, M({}^4\text{He}) = 4.002602u, m_n = 1.008665u$$

$$\mapsto Q = 17.6\text{MeV}$$

ใน CM-frame $K_n = 14.1\text{MeV}$, $K_{{}^4\text{He}} = 3.5\text{MeV}$

ปฏิกิริยาหลอมรวมบนดาวฤกษ์ (star)

- ▶ ให้คำทำนายโดย อาร์เธอร์ เอ็ดดิงตัน (1920)
- ▶ วัฏจักรโปรตอน



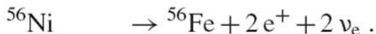
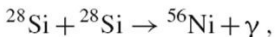
▶ วัฏจักรฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และซิลิกอน

- Triple-alpha (1) $4\text{He} + 4\text{He} \leftrightarrow {}^8\text{Be}$,
(He burning) (2) ${}^8\text{Be} + 4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$.

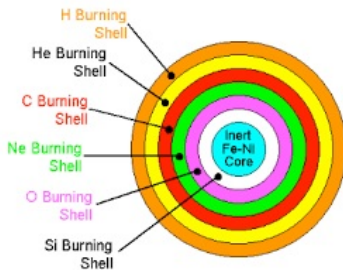
- Carbon burning ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{24}\text{Mg} + \gamma$
 $\rightarrow {}^{23}\text{Na} + {}^1\text{H}$
 $\rightarrow {}^{20}\text{Ne} + {}^4\text{He}$

- Oxygen burning $\rightarrow {}^{23}\text{Mg} + \text{n}$
 ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{32}\text{S} + \gamma$
 $\rightarrow {}^{16}\text{O} + 2{}^4\text{He}$.

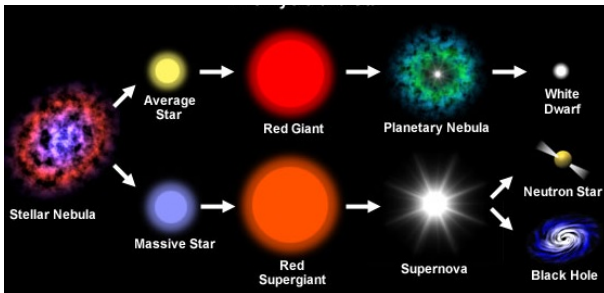
- Silicon burning $\rightarrow {}^{31}\text{P} + {}^1\text{H}$
 $\rightarrow {}^{28}\text{Si} + {}^4\text{He}$
 $\rightarrow {}^{31}\text{S} + \text{n}$
 $\rightarrow {}^{24}\text{Mg} + 2{}^4\text{He}$.



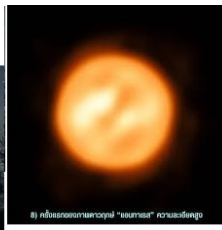
▶ โครงสร้างสสาร ในดวงดาว



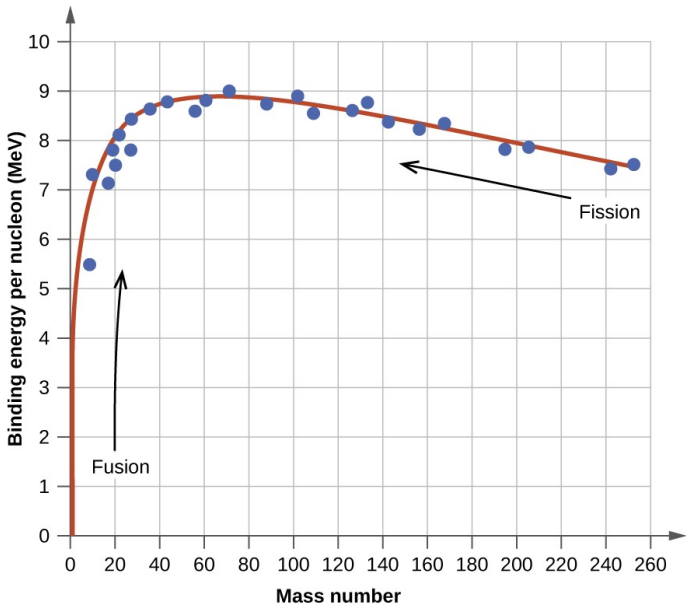
▶ ชีวิตดวงดาวหลังจากเผาไหม้ไฮโดรเจนหมด



▶ บีเทลจูสส์ (Betelgeuse) ดาวยักษ์แดงที่กำลังจะตาย

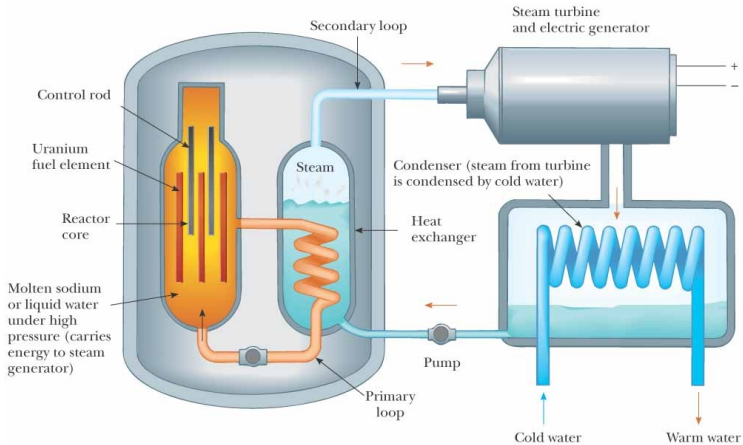


▶ กำเนิดสารที่พบบนดาวเคราะห์



เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor)

▶ แบบแยกสลาย



▶ แบบหลอมรวม มีชื่อเรียกว่า TOKAMAK

