

核物理學

沈威宇

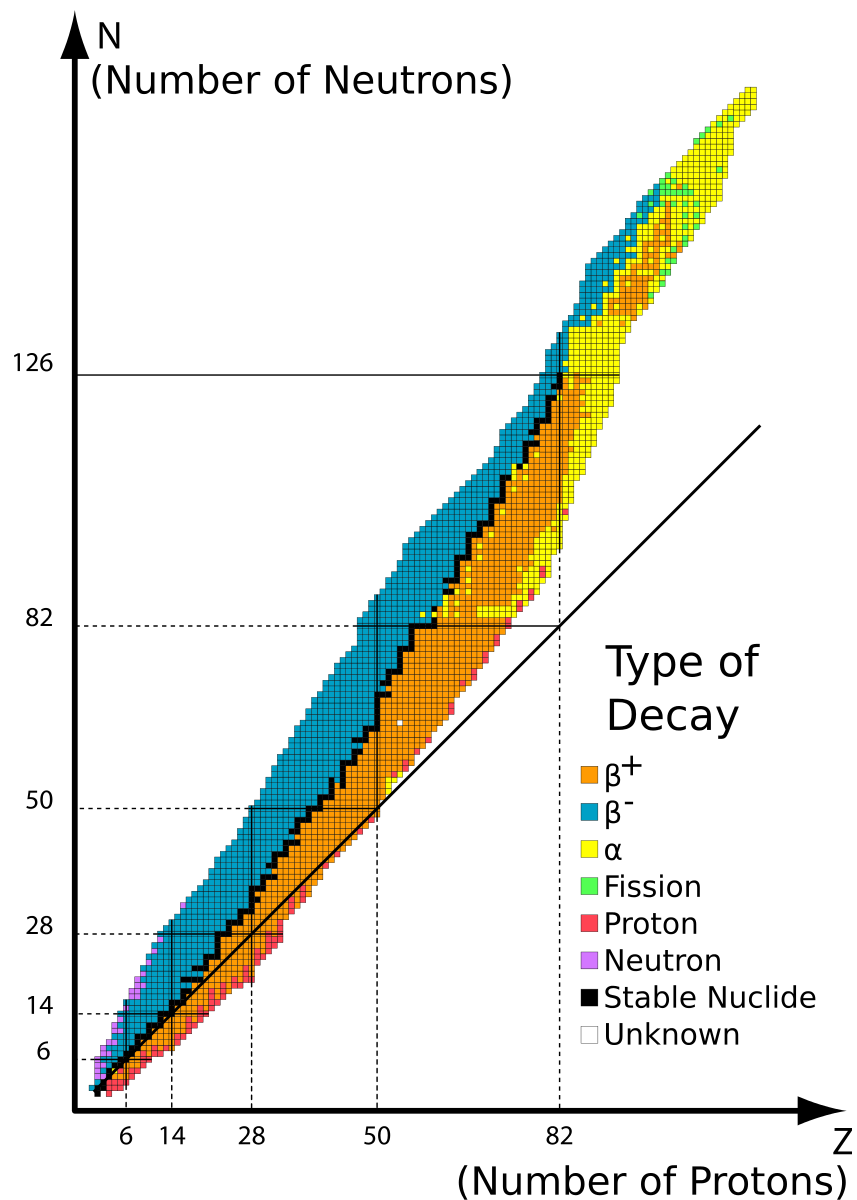
2025 年 4 月 15 日

目錄

第一節 核物理學 (Nuclear physics)	1
一、 穩定原子核質子數和中子數關係	1
二、 衰變 (Decay)	2
(一) 三種自然放射線的比較	2
(二) 衰變反應	2
(三) 輻射曝露	3
(四) 放射性衰變定律	3
(五) 平均壽命 (Mean life)	4
(六) 釷系/釷-232 (Thorium-232, Th-232) 的衰變鏈	4
(七) 錒系/錒-237 (Neptunium-237, Np-237) 的衰變鏈	4
(八) 鈾系/鈾-238 (Uranium-238, U-238) 的衰變鏈	5
(九) 錒系/鈾-235 (Uranium-235, U-235) 的衰變鏈	5
(十) 鈾-239 (Uranium-239, Pu-239)	6
(十一) 鈾-233 (Uranium-233, U-233) 的衰變鏈	6
(十二) 鈾-232 (Uranium-232, U-232)	6
(十三) 常見衰變的半衰期	6
三、 核分裂 (Nuclear fission)	7
(一) 核分裂反應	7
(二) U-235 核分裂	7
(三) 核電廠	8
四、 核融合 (Nuclear fusion)	8
(一) 核融合反應的條件	8
(二) 質子-質子鏈反應 (proton-proton chain, p-p chain)	9
(三) 碳氮氧循環 (CNO cycle) / 貝斯-魏茨澤克循環 (Bethe-Weizsäcker cycle)	9
(四) 氫彈 (Hydrogen bomb)	9
(五) 可控核融合	9
五、 原子核束縛能 (Binding energy, B.E.)	10
(一) 原子核束縛能	10
(二) 核子平均束縛能與質量數的關係	10

第一節 核物理學 (Nuclear physics)

一、 穩定原子核質子數和中子數關係



Napy1kenobi & Sjlegg, 2009.

質子數 Z ，中子數 N ：

- $Z < 20$: $N \approx Z$
- $Z > 20$: $N > Z$ ，因為原子核內靜電排斥力增加，需要更多中子增加強核力。

二、 衰變 (Decay)

(一) 三種自然放射線的比較

	α 射線	β 射線	γ 射線	高能量中子束
本體	氦核	電子	0.01 奈米以下波長的電磁波	中子
電荷	+2e	-e	0	0
靜止質量	4 u	0.00055 u	0	1.008665 u
速度	$<0.1c$	0.4 至 $0.6c$	c	
能量	最少	次少	次多	最多
游離氣體能力	強	中	弱	中
感光能力	弱	中	強	否
穿透能力	弱，紙片即可屏蔽	中，鋁箔或金屬板即可屏蔽	強，2 毫米厚鉛板難以完全屏蔽，足夠厚的鉛板可屏蔽	強，厚鉛板難以完全屏蔽，富含氫核者可屏蔽，如混凝土、水
電場中偏折	負極，小	正極，大	否	否

(二) 衰變反應

- 母核 (Parent nucleus)：衰變前的發射性原子核。
- 子核 (Daughter nucleus)：衰變後的原子核。
- β 衰變：

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$$

中子轉變成質子；放出之電子稱 β 粒子，該射線稱 β 射線；反微中子質量極小（原先包立提出時以為沒有質量，實驗證實有之），有二分之一的自旋，其能量為 β 衰變放出之能量減去 β 粒子之能量，其中後者之最大值等於前者。

- γ 衰變： α 或 β 衰變後的子核常處於不穩定 (meta-stable) 激發態，放出 γ 射線躍遷到較低能量的狀態。原子核躍遷的能量可達 MeV 量級，為 γ 射線範圍；電子躍遷的能量僅約 eV 量級，範圍為紅外線到紫外光。
- 自然衰變 (Spontaneous decay)：原子序大於 82 (鉛) 者皆具放射性，會自然衰變，其中天然存在者有 Ra, Ac, Th, Pa, U (半衰期 $>4.5E9$ 年)，原子序大於 92 稱超鈾元素 (Transuranics) 皆人工合成。
- 衰變鏈 (Decay chain)：一些原子核經衰變後之子核仍會自發衰變，需經過多次衰變才能形成穩定的原子核。

- 衰變的發生是一種機率性的過程，無法預測哪一個原子核、哪一個時刻會發生衰變，每一次的衰變都是獨立事件，其機率與其半衰期屬於原子核本身的特性，不受化學作用、溫度、壓力等影響。
- 放射性原子核的放射強度與實際所含該放射性原子核的密度有關，與其相與結合狀態無關。
- 半衰期（Half-life）：母核數量減少一半所需的時間，常以 τ 或 $T_{\frac{1}{2}}$ 表示，常用在放射性元素定年法（Radiative dating）。

(三) 輻射曝露

- 西弗（Sievert, Sv）：輻射曝露等效劑量之單位，每公斤生物組織吸收一焦耳輻射能稱一西弗。
- 碘片：碘化鉀片。可用於治療甲狀腺相關疾病。服用足夠量三十分鐘後可發生阻塞游離碘集入甲狀腺的功能，放射性碘由曝露環境吸入到甲狀腺約需要十到十二小時，故吸入後三到四小時服用碘片可阻擋約一半。日本福島核輻射災害時，日本政府以福島電廠半徑 30 公里內民眾為發放碘片對象。
- 口腔 X 光攝影：0.01 mSv/次。
- 中華民國核電廠界外年劑量法規限值 0.5 mSv/yr。
- 乳房 X 光攝影：0.7 mSv/次。
- 臺灣人接受天然背景輻射劑量：1.6 mSv/yr。
- 腸胃鋇劑攝影：8 mSv/次。
- 心臟冠狀動脈電腦斷層掃描：16 mSv/次。
- 輻射工作人員年劑量限值：20 mSv/yr。
- 全身一次急性曝露噁心、嘔吐：1000~2000 mSv。
- 鈷 60 遠隔治療：2000 mSv。
- 全身一次急性曝露致死：6000 mSv。
- 癌症放射治療總劑量：20000~100000 mSv。

(四) 放射性衰變定律

放射性強度/活性（activity） R ：指單位時間內衰變的原子核數，單位居里（Curie）為一克鐳的衰變率，約為 3.7×10^{10} 衰變每秒，與母核數 N 呈正比。

放射衰變定律指出：

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

其中 λ 為衰變常數。

衰變常數 λ 乘以半衰期 τ 等於 $\ln(2) \approx 0.693$ 。

(五) 平均壽命 (Mean life)

$$\begin{aligned}\langle t \rangle &= \frac{-\int_{\infty}^0 t \cdot N(t) dt}{N_0} \\&= -\lambda \int_{\infty}^0 t e^{-\lambda t} dt \\&= -\left(e^{-\lambda t} \left(t - \frac{1}{\lambda} \right) \right) \Big|_{\infty}^0 \\&= \frac{1}{\lambda}\end{aligned}$$

(六) 釷系/釷-232 (Thorium-232, Th-232) 的衰變鏈

原子核質量數為四的倍數。自然中存在。

1. Th-232 \rightarrow Ra-228 (經 α 衰變, 半衰期: 1.405 億年)
 2. Ra-228 \rightarrow Ac-228 (經 β 衰變, 半衰期: 5.75 年)
 3. Ac-228 \rightarrow Th-228 (經 β 衰變, 半衰期: 6.15 小時)
 4. Th-228 \rightarrow Ra-224 (經 α 衰變, 半衰期: 1.91 年)
 5. Ra-224 \rightarrow Rn-220 (經 α 衰變, 半衰期: 3.66 天)
 6. Rn-220 \rightarrow Po-216 (經 α 衰變, 半衰期: 55.6 秒)
 7. Po-216 \rightarrow Pb-212 (經 α 衰變, 半衰期: 0.145 秒)
 8. Pb-212 \rightarrow Bi-212 (經 β 衰變, 半衰期: 10.64 小時)
- 64% :
 - (i) Bi-212 \rightarrow Tl-208 (經 β 衰變, 半衰期: 61 分鐘)
 - (j) Tl-208 \rightarrow Pb-208 (經 β 衰變, 半衰期: 3.05 分鐘)
 - 36% :
 - (i) Bi-212 \rightarrow Po-212 (經 α 衰變, 半衰期: 61 分鐘, 36%)
 - (j) Po-212 \rightarrow Pb-208 (經 α 衰變, 半衰期: 0.3 微秒)
 - Pb-208 (穩定)

(七) 鐳系/鐳-237 (Neptunium-237, Np-237) 的衰變鏈

原子核質量數除以四餘一。自然中罕見。

1. Np-237 \rightarrow Pa-233 (經 α 衰變, 半衰期: 2,144 萬年)
2. Pa-233 \rightarrow U-233 (經 β 衰變, 半衰期: 27 天)
3. U-233 \rightarrow Th-229 (經 α 衰變, 半衰期: 15.68 萬年)
4. Th-229 \rightarrow Ra-225 (經 α 衰變, 半衰期: 7,340 年)
5. Ra-225 \rightarrow Ac-225 (經 β 衰變, 半衰期: 14.9 天)

6. Ac-225 \rightarrow Fr-221 (經 α 衰變, 半衰期: 10.0 天)
7. Fr-221 \rightarrow At-217 (經 α 衰變, 半衰期: 4.8 分鐘)
8. At-217 \rightarrow Bi-213 (經 β 衰變, 半衰期: 32.3 毫秒)
9. Bi-213 \rightarrow Po-213 (經 α 衰變, 半衰期: 45.6 分鐘)
10. Po-213 \rightarrow Pb-209 (經 α 衰變, 半衰期: 4.2 微秒)
11. Pb-209 \rightarrow Bi-209 (經 β 衰變, 半衰期: 3.25 小時)
12. Bi-209 (穩定)

(八) 鈾系/鈾-238 (Uranium-238, U-238) 的衰變鏈

原子核質量數除以四餘二。自然中存在。

1. U-238 \rightarrow Th-234 (經 α 衰變, 半衰期: 4.468 億年)
 2. Th-234 \rightarrow Pa-234m (經 β 衰變, 半衰期: 24.1 天)
 3. Pa-234m \rightarrow U-234 (經 β 衰變, 半衰期: 1.17 分鐘)
 4. U-234 \rightarrow Th-230 (經 α 衰變, 半衰期: 24.5 萬年)
 5. Th-230 \rightarrow Ra-226 (經 α 衰變, 半衰期: 7,538 年)
 6. Ra-226 \rightarrow Rn-222 (經 α 衰變, 半衰期: 1,600 年)
 7. Rn-222 \rightarrow Po-218 (經 α 衰變, 半衰期: 3.825 天)
 8. Po-218 \rightarrow Pb-214 (經 α 衰變, 半衰期: 3.1 分鐘)
 9. Pb-214 \rightarrow Bi-214 (經 β 衰變, 半衰期: 26.8 分鐘)
 10. Bi-214 \rightarrow Po-214 (經 β 衰變, 半衰期: 19.9 分鐘)
 11. Po-214 \rightarrow Pb-210 (經 α 衰變, 半衰期: 164 微秒)
 12. Pb-210 \rightarrow Bi-210 (經 β 衰變, 半衰期: 22.3 年)
 13. Bi-210 \rightarrow Po-210 (經 β 衰變, 半衰期: 5 天)
 14. Po-210 \rightarrow Pb-206 (經 α 衰變, 半衰期: 138.4 天)
- Pb-206 (穩定)

(九) 錒系/鈾-235 (Uranium-235, U-235) 的衰變鏈

原子核質量數除以四餘三。自然中存在。鈾-235 是今核電廠主要燃料。

1. U-235 \rightarrow Th-231 (經 α 衰變, 半衰期: 7.04 億年)
2. Th-231 \rightarrow Pa-231 (經 β 衰變, 半衰期: 25.52 小時)
3. Pa-231 \rightarrow Ac-227 (經 β 衰變, 半衰期: 3.28 萬年)
4. Ac-227 \rightarrow Th-227 (經 β 衰變, 半衰期: 21.77 年)

5. Th-227 → Ra-223 (經 α 衰變, 半衰期: 18.68 天)
6. Ra-223 → Rn-219 (經 α 衰變, 半衰期: 11.43 天)
7. Rn-219 → Po-215 (經 α 衰變, 半衰期: 3.96 秒)
8. Po-215 → Pb-211 (經 α 衰變, 半衰期: 1.78 毫秒)
9. Pb-211 → Bi-211 (經 β 衰變, 半衰期: 36.1 分鐘)
10. Bi-211 → Tl-207 (經 α 衰變, 半衰期: 2.14 分鐘)
11. Tl-207 → Pb-207 (經 β 衰變, 半衰期: 4.77 分鐘)
 - Pb-207 (穩定)

(十) 鈾-239 (Uranium-239, Pu-239)

1. U-239 → Np-239 (經 β 衰變, 半衰期: 23.45 分鐘)
2. Np-239 → Pu-239 (經 β 衰變, 半衰期: 2.36 天)
3. Pu-239 → U-235 (經 α 衰變, 半衰期: 24,110 年)
 - 進入鈾系/U-235 的衰變鏈。

(十一) 鈾-233 (Uranium-233, U-233) 的衰變鏈

1. U-233 → Th-229 (經 α 衰變, 半衰期: 159,200 年)
 - 進入鐳系/Np-237 的衰變鏈

(十二) 鈾-232 (Uranium-232, U-232)

1. U-232 → Th-228 (經 α 衰變, 半衰期: 68.9 年)
 - 進入釷系/Th-232 的衰變鏈。

(十三) 常見衰變的半衰期

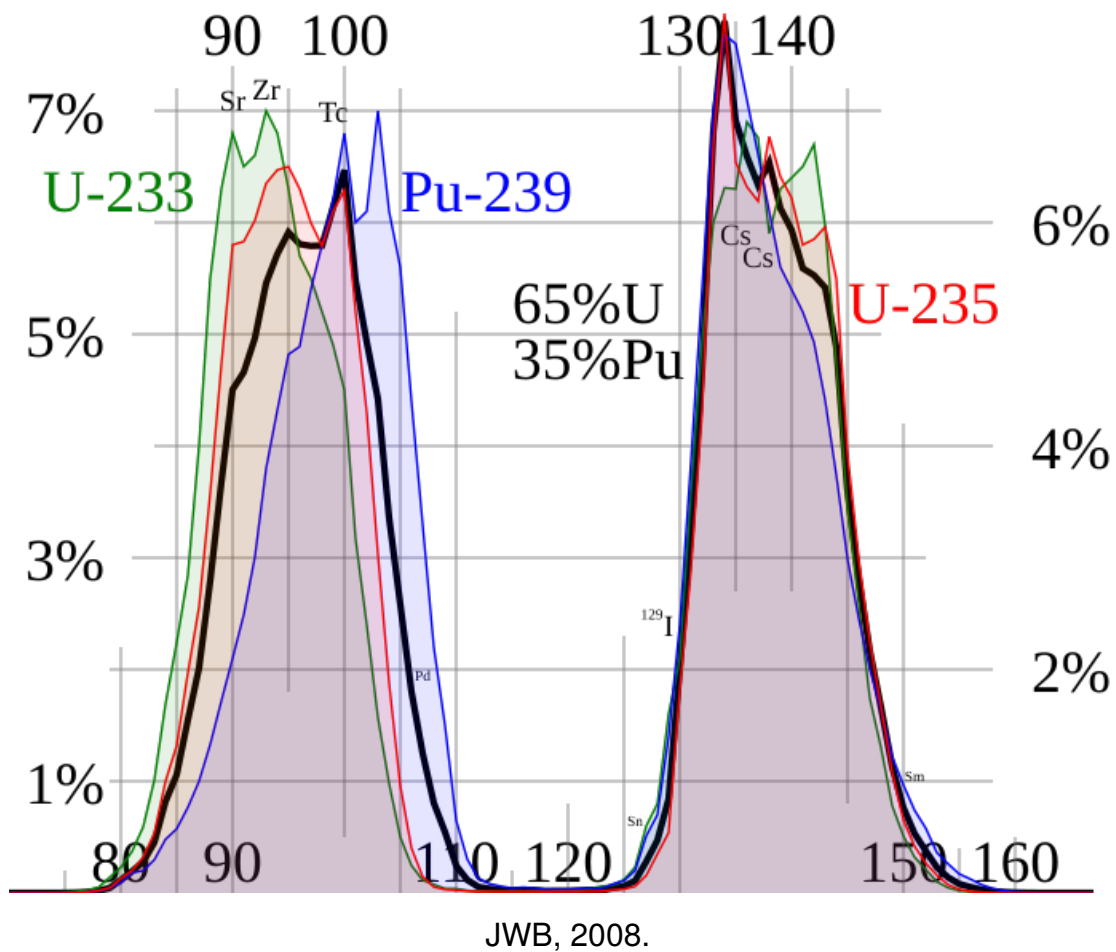
母核	子核	衰變形式	半衰期
自由中子	質子	β	615 秒, 平均壽命 887 秒
$^{14}_6\text{C}$	$^{14}_7\text{N}$	β 衰變	5730 年
$^{60}_{27}\text{Co}$	$^{60}_{28}\text{Ni}$	β 衰變	5.27 年
$^{131}_{53}\text{I}$	$^{131}_{54}\text{Xe}$	β 衰變	8.04 天
$^{190}_{78}\text{Pt}$	$^{186}_{76}\text{Os}$	α 衰變	6.5×10^{11} 年
$^{226}_{88}\text{Ra}$	$^{222}_{86}\text{Rn}$	α 衰變	1600 年

三、 核分裂 (Nuclear fission)

核分量指一個原子核分裂成兩個較輕的原子核，反應後總質量減少釋出能量。

(一) 核分裂反應

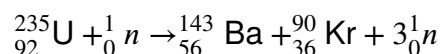
- 核分裂的反應物：中子轟擊原子核，原子核捕捉 (capture) 一個中子，發生核分裂反應。
- 慢中子/熱中子：約等於室溫下的氣體分子的速率，能量約 40 電子伏特，較高能量的快速中子轟擊原子誘發核分裂更有效。費米 1934 年發現中子源和銀金屬間放一塊石蠟激發的核反應更激烈即因變成慢中子。
- 核分裂的產物：核分裂時，分裂成兩個原子核，並放出快中子，產物每次並不相同，可觀察到在質量數-產量比圖一有兩個高峰的分布。

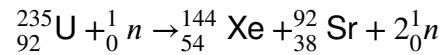
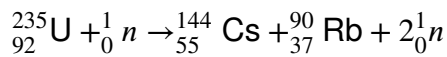
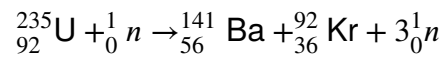


- 核分裂的核能：核分裂反應後總質量減少，服從愛因斯坦質能互換公式 $E = mc^2$ 轉換成能量。
- 連鎖/鏈鎖反應 (Chain reaction)：核分裂產生的中子可用於參與其他核分裂反應，故核分裂可持續不斷地進行。

(二) U-235 核分裂

U-235 核分裂主要反應為





質量約減少 0.1%，1 個 U-235 原子分裂放出的可用能量約 $202.5 \text{ MeV} \approx 3.24 \times 10^{11} \text{ J}$ ，即約 $19.54 \text{ TJ/mol} \approx 83.14 \text{ TJ/kg}$ ，其中兩個分裂出的核共約有動能 169.1 MeV ，中子約共有動能 4.8 MeV ， γ 射線約有能量 7.0 MeV ，另外又約 8.8 MeV 給反微中子逃逸而不可用。單位質量放出能量約是石油的 2M 倍、煤炭的 3M 倍。

天然鈾中 U-238 占 99.3%，U-235 占 0.7%。

U-238 會吸收中子但不會核分裂，而是形成 U-239 的激發態，而後 β 衰變成 Np-239，再 β 衰變成 Pu-239。Pu-239 與 U-235 較易分離，U-238 與 U-235 則較難。

最常用的核分裂材料為 U-235，用於核電廠（濃度約 3%）、原子彈（Atomic bomb）等；次之為 Pu-239，用於原子彈等。

(三) 核電廠

- 反應器/原子爐：內含燃料棒、減速劑、控制棒、冷卻劑。
- 燃料棒：3% 至 5% U-235。
- 減速劑：重水或石墨，使快中子變成慢中子。
- 冷卻劑：水，吸熱蒸發。
- 控制棒：硼或鎘，可吸收中子，故用於控制反應速率。
- 發電機組：水受熱蒸發，推動渦輪機，帶動發電機發電。

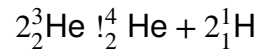
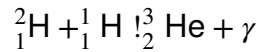
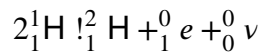
四、核融合 (Nuclear fusion)

核融合指兩個原子核（通常是氫等較輕核種）融合成一個較重的原子核，反應後總質量減少釋出能量。

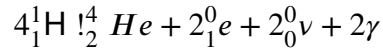
(一) 核融合反應的條件

- 高溫：一億度以上的高溫，使核有足夠動能得以克服電斥力，此種溫度下所有電子均已遊離，形成原子核與電子混合體，稱等離子態或電漿。因為核融合需要此種高溫，故稱熱核反應。若欲人工重現太陽的核融合反應約需要 50 億度以上的高溫。
- 高壓：足夠大粒子密度，使碰撞機率增加。
- 輕核：通常為 ${}_1^1\text{H}$ 、 ${}_1^2\text{H}$ (D)、 ${}_1^3\text{H}$ (T)。
- 時間：足夠長的拘束時間。

(二) 質子-質子鏈反應 (proton-proton chain, p-p chain)



淨反應為：



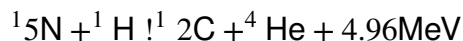
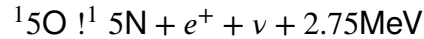
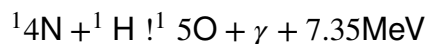
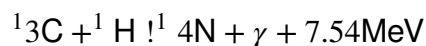
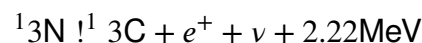
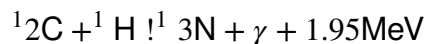
放出能量約 26.7MeV 或 4.27×10^{-12} J，屬逆 β 衰變反應。

質子-質子鏈反應在太陽及以下質量的恆星占主導地位。

太陽每日約消耗 5.13×10^{16} kg 的氫融合成氦，放出約 3.4×10^{31} J 的能量，功率約 3.9×10^{29} W，每秒約有五十兆個微中子穿過人體，但微中子與其他物質交互作用極弱。

(三) 碳氮氧循環 (CNO cycle) / 貝斯-魏茨澤克循環 (Bethe-Weizsäcker cycle)

碳氮氧-I 分支反應式：



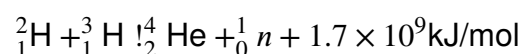
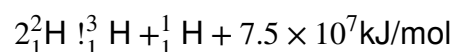
這個循環的淨效應是 4 個質子成為一個 α 粒子、2 個正電子（和電子湮滅，以 γ 射線的形式釋放出能量）和 2 個攜帶著部分能量逃逸出恆星的電子微中子。

碳氮氧-I 分支是碳氮氧循環的主要分支，具有 ^{17}F 與 ^{17}O 的碳氮氧-II 次之，較重的恆星還有碳氮氧-III 和碳氮氧-IV 分支及氧氮循環。

碳氮氧循環在質量大於太陽的恆星中占主導地位。太陽只有 1.7% 的氦-4 核是經由碳氮氧循環的過程產生的。

(四) 氫彈 (Hydrogen bomb)

由小型原子彈開啟無控制核融合反應，其威力可達原子彈千倍，反應式：



(五) 可控核融合

核融合無輻射汙染，碳排放亦遠低於燃燒化石燃料，故未來可能用於發電。目前主要嘗試使用氘核和氚核變成氦-4 核與中子，所需燃料氘和氚只需從海水提煉，但目前仍無法控制反應速率。

五、 原子核束縛能 (Binding energy, B.E.)

(一) 原子核束縛能

原子核內受有強力束縛，將所有核子分開所需加入的最小能量稱該原子核的束縛能。因加入的能量轉換為系統質量的增加 Δm ，故 $B.E. = (\Delta m)c^2$ 。

設 m_X 為 A_ZX 原子之質量， m_H 為氫原子的質量， m_n 為中子之質量，則 A_ZX 原子核之束縛能 B.E. 為：

$$B.E. = (Zm_H + (A - Z)m_n - m_X)c^2$$

其中 Zm_H 與 m_X 均有 Z 個電子可抵銷。

以 ${}^4_2\text{He}$ 為例， $m_H = 1.007825\text{u}$ ， $m_{\text{He}} = 4.002604\text{u}$ ， $m_n = 1.008665\text{u}$ ：

$$B.E. = (2 \times 1.007825\text{u} + 2 \times 1.008665 - 4.002604\text{u})c^2 = 0.030376\text{uc}^2 = 28.30\text{MeV}$$

A_ZX 原子核的核子平均束縛能為其原子核束縛能除以其質量數。

如 ${}^4_2\text{He}$ 中核子平均束縛能為

$$\frac{B.E.}{A} = \frac{28.30}{4}\text{MeV} = 7.075\text{MeV}$$

(二) 核子平均束縛能與質量數的關係

若每個原子核中兩個核子之間的束縛能均同，則原子核束縛能應正比於 $\frac{A(A-1)}{2}$ ，故核子平均束縛能與質量數完全正相關，但實際上強力作用距離短，較遠的核子間交互作用和為斥力，故核子平均束縛能-質量數曲線在 ${}^{56}\text{Fe}$ 的 8.75MeV 附近達到最大後開始緩降，到 ${}^{238}\text{U}$ 時為 7.6MeV 。

因此，質量數遠小於 62 的核融合放能，質量數遠大於 62 的核融合吸能，這解釋了為何當恆星核融合產生鐵後開始降溫。