

充裕、高效的能源——

# 蘊藏在原子核中的能量

原子核由緊密結合的質子與中子所構成，外圍環繞著電子，而原子核的融合與分裂可釋出超乎預料的龐大能量，成為人類文明進化的動力。

李 敏

早在西元前400年，希臘哲學家德謨克利特（Democritus）即提出原子（atom）的名稱，1803年英國化學與物理學家道耳吞（J. Dalton）提出原子假說，認為物質是由不可再分割之原子所構成。

## 發現原子結構的歷史

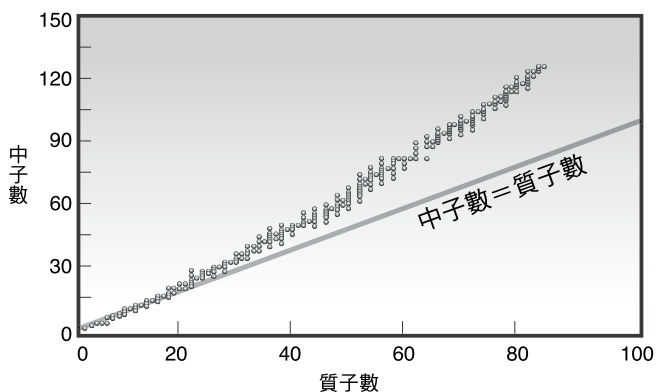
1897年，英國物理學家湯木生（J. J. Thomson）指出原子中含有帶負電之電子。當時認為，電子是均勻地分布於原子的空間內。到了1911年英國物理學家拉塞福（E. Rutherford）利用 $\alpha$ 粒子撞擊金箔，發現帶正電之原子核。此項發現使得原子內的電子如何抗拒原子核的庫倫力，不被吸入，成為一個待探討的議題。1913年，丹麥化學家波爾（N. Bohr）提出氫原子之量化理論模型解釋氫原子之光譜，也唯有以量子力學才能解釋帶正電之原子核與帶負電之電子間運

動關係，從此進入量子力學的紀元。

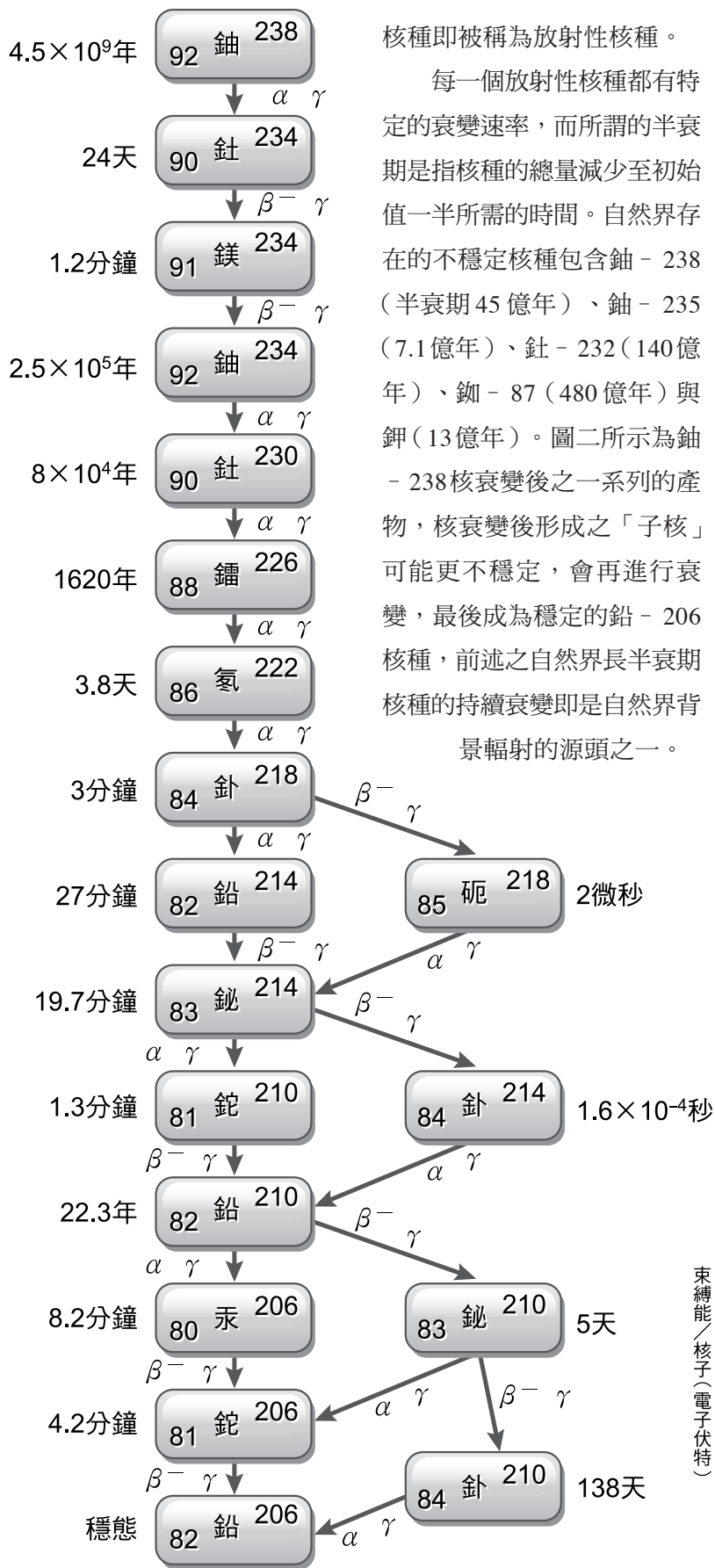
氫原子核是最簡單的原子核，其電荷為1，質量數亦為1，故氫原子核本身應為構成原子核的基本粒子之一；但電荷數為2的氦原子核其質量卻約為氫原子核的4倍，代表原子核中尚有另一種不帶電的粒子，後來被稱為中子。1932年，英國物理學家查兌克（J. Chadwick）指出1930年德國化學物理學家波赫（W. G. Bothe）及貝克（H. Becker）利用 $\alpha$ 粒子撞擊鈹（Be-9）原子核，產生穿透力極強之不帶電粒子即為尋找中的中子。至此可以確認原子是由原子核及環繞原子核進行軌道運動的電子所構成，而原子核則由質子（氫原子核）及中子所構成。

## 天然放射性核種

如圖一所示，自然界中存在著許多不同的原子核，而原子的化學與物理特性由質子數決定。中子數不同但質子數相同的原子在週期表上有同樣的位子，故稱為同位素。自然界穩定存在的核種，其中子與質子數須滿足如圖一之關係，否則即會釋出 $\beta$ 粒子或 $\alpha$ 粒子等放射性粒子，藉此改變原子核的組成以尋求穩定的狀態，此過程稱為放射性衰變，而會釋出放射性粒子的



圖一：自然界穩定存在之核種，其原子核內質子與中子數的配比關係圖。較輕的核種中其質子數約略等於中子數，而較重核種的中子數大於質子數。



核種即被稱為放射性核種。

每一個放射性核種都有特定的衰變速率，而所謂的半衰期是指核種的總量減少至初始值一半所需的時間。自然界存在的不穩定核種包含鈾-238（半衰期45億年）、鈾-235（7.1億年）、釷-232（140億年）、鉀-87（480億年）與鉀（13億年）。圖二所示為鈾-238核衰變後之一系列的產物，核衰變後形成之「子核」可能更不穩定，會再進行衰變，最後成為穩定的鉛-206核種，前述之自然界長半衰期核種的持續衰變即是自然界背景輻射的源頭之一。

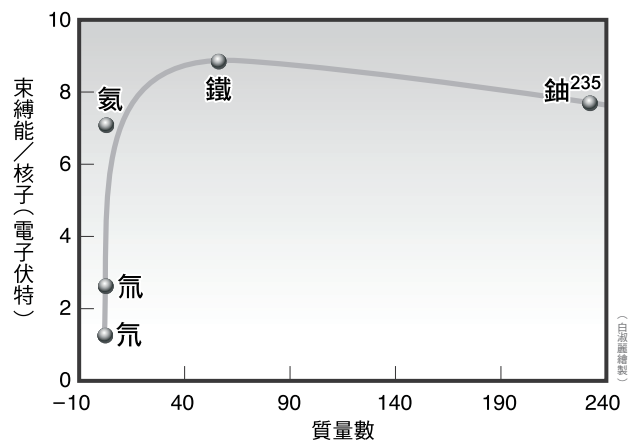
圖二：鈾-238核衰變系列。鈾-238經過一系列的衰變，最後成為穩定的鉛-206。

## 原子核的束縛能

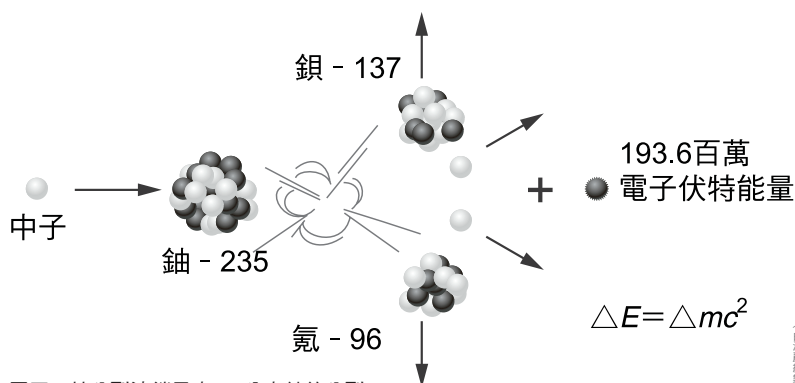
原子核由中子與質子所構成，質子帶正電荷，多個質子同存在於一個極小的空間會有極強的庫倫斥力，而原子核能夠穩定存在，勢必有其他的力量來克服質子間的庫倫斥力，這個力量也就是核力。核力存在於各核成子（質子與中子的統稱）間。如圖一所示，當原子核的質子數增加，需要有更多的中子，以形成較強的核力克服質子間的庫倫力；以鈾-235核為例，其質子數為92，而中子數為143。可想而知，如果重核分裂成兩個較輕的原子核，一定會有多餘的自由中子可以釋出。

原子核的存在是靠核力將中子與質子束縛在一起，換句話說，當中子與質子聚在一起形成原子核時會釋放出能量，以尋求一個穩定的狀態，這個能量稱為束縛能。如果要將原子核「打碎」，必須提供能量給原子核以克服核力。

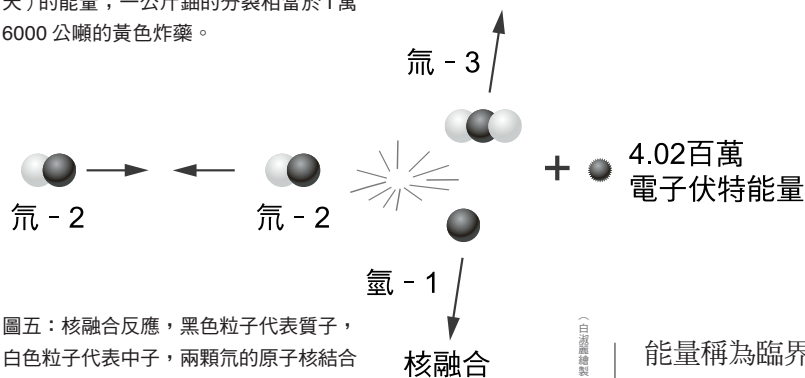
束縛能的釋出造成了質量的減少，其間的關係即為愛因斯坦的質能互換公式。以鈾-235核為例，92莫耳質子與143莫耳中子質量加在一起為236.82公克，而1莫耳鈾-235的質量為234.96公克，質量差異為1.86公克，其換算為能量是 $1.67 \times 10^8$ 百萬焦耳



圖三：核成子平均束縛能與原子核質量數的關係。輕原子核束縛能隨質量數的增加而迅速增加；鐵-56的平均束縛能達到極大值，之後核成子平均束縛能隨原子質量數的增加而緩緩下降。



圖四：核分裂連鎖反應，1公克鈾的分裂可產生960瓩·天（以功率960瓩做功1天）的能量；一公斤鈾的分裂相當於1萬6000公噸的黃色炸藥。



圖五：核融合反應，黑色粒子代表質子，白色粒子代表中子，兩顆氦的原子核結合之後成為氦，氦的原子核有一顆質子和兩顆中子，並釋放出氦原子和能量。

(MJ)，相當於燃燒 $3.77 \times 10^6$ 公斤的石油。

原子核質量數越大，其總束縛能會越高，但是原子核各核成子之平均束縛能與原子核質量數間有如圖三所示之關係。如圖三所示，每核成子之束縛能在鐵 - 56 會有極大值，然後隨著質量數上升會緩慢地下滑。換句話說，如果有辦法讓一個較重的原子核，分裂成兩個較輕的原子核，會因總束縛能的增加而釋出能量，當然新產生的兩個原子核與數個自由中子的總質量會較原來的重核為少，這個現象稱為核分裂。如果兩個質量數較小於 60 的核種結合成一個較重的核種，也會有能量釋出，此現象稱為核融合。

## 核分裂與核融合

重核發生分裂需有適當的方法將能量「注入」重核，使其處於激發的狀態，激發態造成原子核的形狀改變，當原子核內的質

子形成兩個中心，其間的庫倫斥力會將原子核分成兩塊，引發核分裂。

將能量「注入」重核的方式為利用中子撞擊重核，因為中子不帶電可以直接進入原子核，原子核吸收一個中子後，會釋出該中子的束縛能，所以新形成的複成核（重核 + 中子）會處於激發態；若激發態具有足夠的能量讓質子形成兩個中心，則複成核即有機會分裂。形成兩個質子中心所需要的最小

能量稱為臨界能量，若複成核形成時釋出之中子束縛能大於臨界能量，該重核即具有分裂的潛力；另一重要的現象是核分裂時會有自由中子產生，會繼續誘發核分裂，形成核分裂連鎖反應，而自然界只有鈾 - 235 核能夠維持核分裂連鎖反應（圖四）。

核融合現象的產生則需要將兩個輕核帶到極其接近的程度，使其核成子間產生核力，形成新的原子核（圖五）。而原子核帶有正電，為了使原子核極其接近，必須以極大的動能來克服庫倫斥力。核融合的發生需要將輕核加熱到近似太陽的溫度，使其存在於電漿態，目前最大的困難為如何設計出適當的方法或容器，能夠長時間地容納電漿，讓其發生連鎖核融合反應。目前商用核分裂反應器也已經使用了近 50 年，但商用核融合反應器至今尚未完全發展成功，為了解決未來的能源危機，核融合反應器的研發是當前的重要議題之一。

李 敏：任教清華大學工程與系統科學系