

核分裂和核子連鎖反應

簡介

二十世紀最偉大的發現之一，就是鈾的原子核可以經由被中子撞擊分裂來產生巨大的能量。這個過程被稱為核分裂，讓我們聯想到核能電廠所生產的大量電力，以及核子武器所造成的大規模破壞。要瞭解核分裂如何產生如此巨大的能量，我們一定得先從認識鈾元素開始。

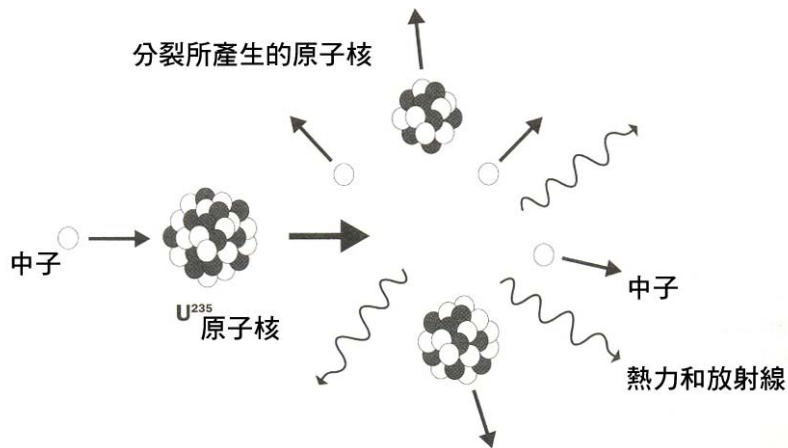
鈾元素的特性

鈾是一種可以在大自然裡面找得到的元素。元素是一種由相同原子組成的物質，而每一粒原子都帶著相同數量的質子和電子。每一粒鈾原子的原子核裡都有 92 個質子，有 92 個電子繞著它的原子核運轉。然而，並不是每一粒鈾原子都是相同的。不同的鈾原子在它們的原子核裡有不同數量的中子。這些不同種類的鈾原子就叫做同位素。除了鈾之外，其它還有很多元素也有同位素。鈾的同位素之中被用來生產核能的是鈾-235(簡稱 U^{235})。它之所以會被稱為 U^{235} 是因為它的每一粒原子核裡面都有 92 個質子和 143 個中子，兩個加起來總數是 235。鈾的另外一個很重要的同位素是鈾-238(U^{238})，在它的原子核裡面有 92 個質子和 146 個中子($92+146=238$)。一粒 U^{238} 的原子核裡面比 U^{235} 的原子核多了三個中子。在鈾元素的各個同位素中，將質子和中子約束在一起的力量並不穩定。當這種力量被破壞的時候，能量就會以放射性的伽瑪波(類似 X 光)的型態釋放出來。因此，鈾元素的另外一種特徵就是：它具有放射性。

核分裂所產生的能量

爲了要製造核分裂，必須想辦法使鈾的原子核分裂。這個目標可以利用中子來達成。大部分的中子都是以慢速行進。這種中子具有足夠的能量來分裂 U^{235} 。反之，只有以非常高速行進的中子具有足以分裂 U^{238} 原子核的能量，而且它們非常少見。所以，用 U^{235} 來進行核分裂比用 U^{238} 來得容易多了。

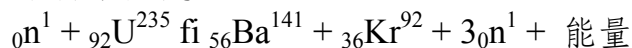
一個中子和一個 U^{235} 的原子核相撞，把這個原子核分裂成兩個其它元素的小原子核，而且依據因此而形成的原子核，釋放出兩到三個不等的中子。譬如說，一個 U^{235} 原子核可能會被分裂成鋇和氙元素的原子核，並釋放出三個中子。分裂另外一顆 U^{235} 原子核則可能會產生鐳和鉅，而只釋出兩個中子。這些以及其它經由分裂而產生的元素都具有放射性。



把分裂後的兩個小原子和中子的總質量，和分裂之前的 U²³⁵ 原子核加上分裂它的中子的總質量比較之後，你會發現，有一小部分的質量不見了。不管分裂之後是哪種原子核和中子的組合，結果都是一樣。不見的質量跑到哪裡去了呢？愛因斯坦著名的方程式 $E=mc^2$ 解開了這個謎團—不見的質量其實是被轉換成能量了(見 **$E=mc^2$ ：如何以核分裂來產生能量**)。以質量型態儲存在原子核中的能量，以及把中子和質子約束在一起的能量，兩者合稱「核能」。這是一種勢能的型態。根據觀察，這種經由分裂所釋出的能量是由被分裂的原子核和中子的移動(動能)以及被釋放的熱氣(熱能)所組成。

$E=mc^2$ ：如何以核分裂來產生能量

爲了瞭解核分裂是怎麼產生能量的，讓我們來看看一個 U^{235} 原子核可能會產生的其中一種分裂反應：



一個中子(${}_0n^1$)撞上一個 U^{235} 原子，把它分裂成一個鋇原子(${}_{56}Ba^{141}$)和一個氪原子(${}_{36}Kr^{92}$)。在同時有三個中子($3{}_0n^1$)和一些能量也被釋放出來。把分裂後的鋇原子、氪原子和三個中子的總質量，和中子加上分裂之前的 U^{235} 原子核的總質量比較之後，結果是有一小部分的質量不見了。

不見的質量和這個反應釋出的能量是可以計算出來的。因為原子核非常渺小，利用原子質量單位(**amu**)會比用公斤來表達它們的質量方便得多(一個 **amu** 相當於 C^{12} ，碳原子最普遍的形式，質量的十二分之一)。

中子和分裂之前的 U^{235} 原子核的總質量是

$${}_{92}U^{235} = 235.04393 \text{ amu}$$

$${}_0n^1 = 1.00867 \text{ amu}$$

$$\text{總計} = 236.05260 \text{ amu}$$

分裂後的鋇原子、氪原子和三個中子的總質量是

$${}_{56}Ba^{141} = 140.91436 \text{ amu}$$

$${}_{36}Kr^{92} = 91.92627 \text{ amu}$$

$$3{}_0n^1 = 3.02601 \text{ amu}$$

$$\text{總計} = 235.86664 \text{ amu}$$

要算出少了多少質量，把中子和 U^{235} 原子核的總質量減去鋇原子、氪原子和三個中子的總質量。

不見的質量 = 分裂前的總質量 - 分裂後的總質量

$$= 236.05260 \text{ amu} - 235.86664 \text{ amu}$$

$$= 0.18596 \text{ amu}$$

接下來，用愛因斯坦的 $E=mc^2$ 方程式來計算等同於失去質量的能量數目。要達成這個目的，必須先把質量由 amu 轉換成公斤。

$$0.18596 \text{ amu} \times \frac{1.66 \times 10^{27} \text{ 公斤}}{1 \text{ amu}} = 3.09 \times 10^{28} \text{ 公斤}$$

分裂產生出來的能量等於以 m ——也就是失去的質量(以公斤計)，來乘以 c^2 ——光速的平方(每秒幾公尺)。

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ &= (3.09 \times 10^{28} \text{ 公斤}) \times (3 \times 10^8 \text{ 公尺/秒})^2 \\ &= 2.78 \times 10^{11} \text{ 焦耳每 } U^{235} \text{ 原子核的能量} \end{aligned}$$

分裂一顆 U^{235} 原子核產生 2.78×10^{11} 焦耳的能量，這是一個小到難以衡量的數目。然而，0.45 公斤的純 U^{235} 原子核分裂所產生的能量則是極大的數目。0.45 公斤的純 U^{235} 含有 1.18×10^{24} 顆的 U^{235} 原子核。假設每一顆原子都進行了前面所提的反應，那麼釋放出來的能量就有

$$\frac{2.64 \times 10^{14} \text{ Btu}}{U^{235} \text{ 原子核}} \times \frac{1.18 \times 10^{24} \text{ 顆的 } U^{235} \text{ 原子核}}{U^{235} \text{ 的公斤數}} = \frac{3.11 \times 10^{10} \text{ Btu 每磅}}{U^{235}}$$

這等於是 1,264 公噸的煙煤、942,565 公升的汽油、或者 2,642 公噸的木材所儲存的能量。

這樣的數目比 0.45 公斤的 U^{235} 分裂所產生的平均能量數目小了一點。其它的分裂反應可能會產生的不是鋇和氙原子和三個中子，而是例如鍇、釷、錒、釷和鐳等的原子和兩個中子。分裂出不同的產物使得每顆分裂 U^{235} 原子核產生些許不同數目的能量。如果整個平均起來的話，0.45 公斤的純 U^{235} 分裂產生的能量是 3.5×10^{10} Btu。