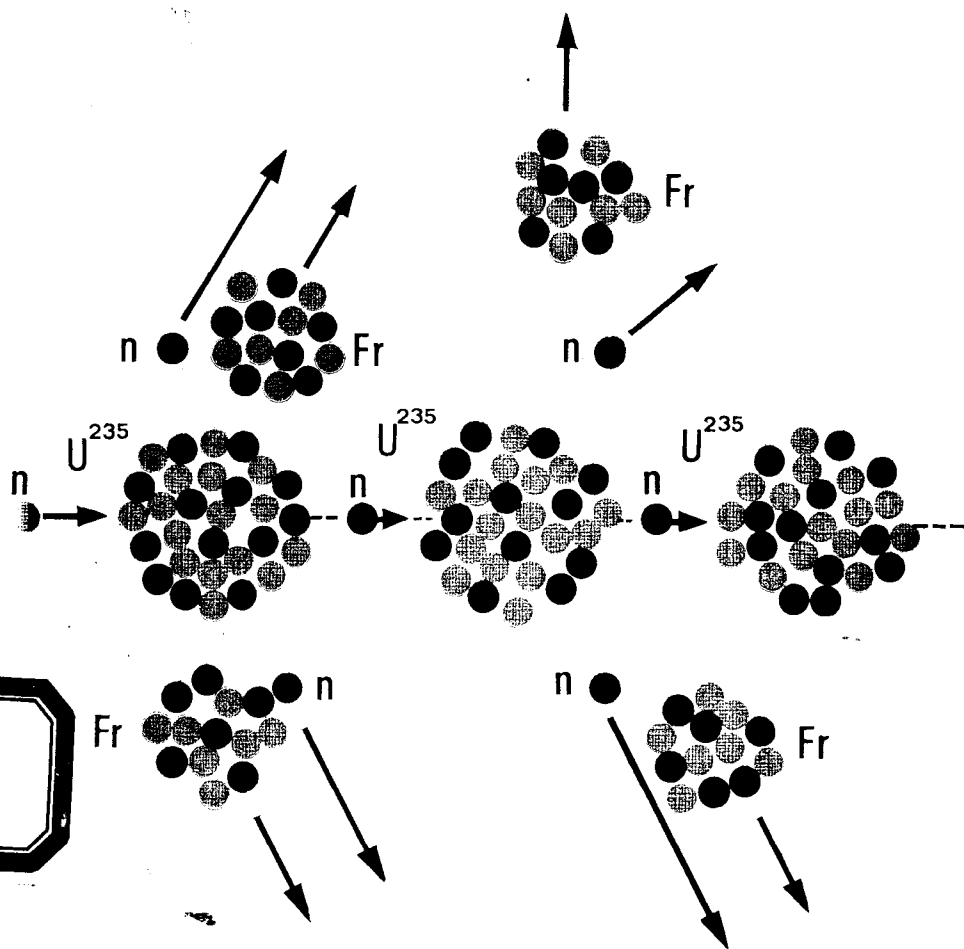


核子能及核子工程

陳經時編著 商務印書館



陳經時編著

核子能及核子工程

商務印書館

算子能及算子工理

陳經時撰著

出版者 商務印書館香港分館
香港皇后大道中三十五號

印刷者 商務印書館香港印刷廠
香港九龍彌敦道七十五號

版權所有

1979年3月初版

目 錄

一、核子力與核子模型·····	1
二、核子反應·····	23
三、核裂變與核子能·····	45
四、中 子·····	79
五、核子反應堆·····	102
六、熱核動力·····	154

一、核子力與核子模型

研究原子核的主要課題就是要了解核內基本粒子結合力的基本性質。

核子力 (Nuclear forces) 是原子核中的中子與質子相互結合之力量，其性質可按兩種方法解釋：

第一是研究兩核子間交互作用去發現原子核微粒之間的力性質。氘核之特性和質子散射的中子和質子可由此分辨。

第二是研究複核 (Complex nuclei) 的性質並且試從組成原子核微粒作推論。據說此法在科學上只有部分成功。

用質量分光光度計或其他方法所測出的原子質量都是接近於整數而與整數有着些小差異。科學家阿斯頓提出用每一個核素的斂集率來表示這個差異。核素 (nuclide) 是指核中有相同的質子數及中子數的核。但構成的核有不同的能級，因而有不同的放射性。

$$\text{斂集率} = \frac{\text{原子質量} - \text{質量數}}{\text{質量數}} \times 10,000 \quad (1)$$

按原子量標度，原子質量是核素的確實質量，而質量數則最接近整數。在原子質量與質量數間之差別稱為質量虧損 (Mass defect)。不過，這個名稱不夠適合，故應該使用斂集率，由於原子質量減質量數之差值非常之小，所以阿斯頓將該數除以質量數後再乘以 10,000，就便於應用了。

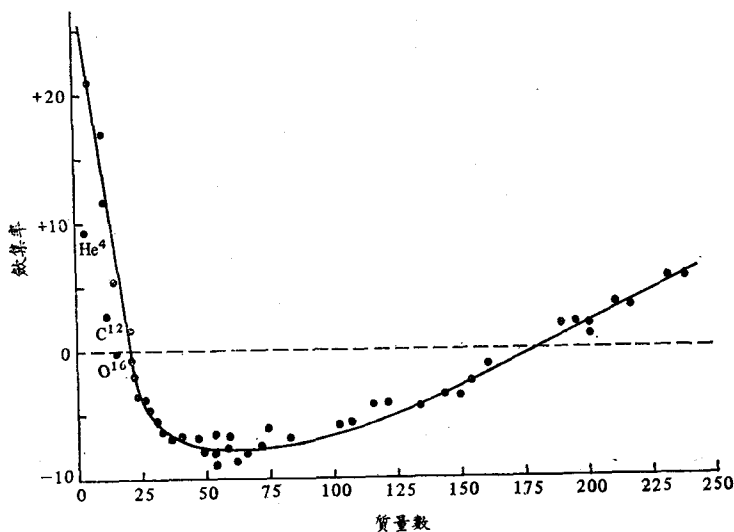
例如：氯的一種核素質量是 34.980，代進上面的方程式，可

得

$$\text{斂集率} = \frac{34.980 - 35.000}{35.000} \times 10,000 = -5.7$$

化學上以氧作標準，將氧的斂集率定為 0，如果某元素有正的斂集率，則說明它較氧穩定性差；而具有負的斂集率的元素比氧更為穩定。中等質量數的元素斂集率為負值比較穩定，一般較輕元素具有正的斂集率，高質量數的元素斂集率也是正的，所以這些元素多具有放射性。

圖一是穩定核素的斂集率曲線，繪出質量數 A 與斂集率之間的對比關係。He⁴、C¹² 和 O¹⁶ 則例外，它們居於曲線之上方。除上述核素外，對於低質量數之元素斂集率較高，而隨着質量數的增加又很快降低。像氧-16，其值剛好為零。如 A 增大，斂集率



圖一 穩定核之斂集率曲線

變成爲負數，意味着原子質量小於最近的整數值。當曲線通過零點後向下降，平緩地到達最低值後再逐漸上升，當 A 接近於 180 時，斂集率又成爲正值、意味着原子核較不穩定，斂集率只是陳述某些實驗事實的方法，它有利於研究同位素的質量，並探求質量數與核穩定性的關係。其本身並沒有什麼特殊的物理意義。如由圖一，可看出 He^4 ， C^{12} ， O^{16} 比同質量數區域的其他元素更爲穩定。而原子核的結合能才是我們要主要討論的物理量。

核子結合能之測定

爲了精密地研究原子質量與質量數之間的差別，要引入“確實質量虧損”的概念 (true mass defect)。如果元素的原子序數用 Z 代表，質量數用 A ，則在原子核中包含有 Z 個質子和 $(A - Z)$ 個中子，及 Z 個核外電子與 Z 個質子的電荷相平衡。原子的組成中既含有 Z 個質子和 Z 個電子；在質量上相當於 Z 個氫原子的質量，此外還有 $(A - Z)$ 個中子。原子的總質量是：

$$Zm_H + (A - Z)m_n$$

m_H 是氫原子質量， m_n 是中子質量。假如實驗測出的原子質量是 M ，則確實質量虧損爲：

$$\text{確實質量虧損} = Zm_H + (A - Z)m_n - M \quad (2)$$

這個質量虧損即是失去的質量，正確地說是變換成爲能量了，如果要將某元素的原子分裂成爲各個構成粒子，質子，中子和電子，就需要有這個數值的能量才行，因此，用與質量虧損相當的能量來量度原子核的結合能 (binding energy)。若 m_H ， m_n 和 M 都採用原子質量單位 (amu)，結合能用 MeV，應用愛因斯坦氏的質量—能量變換公式 ($E = MC^2$)，可得下列方程式：

$$\text{結合能(MeV)} = 931 \cdot 4 [Zm_H + (A - Z)m_n - M] \quad (3)$$

可用來計算給定的核中各粒子的結合能。以下例題可說明所得的結果。

例如計算 ${}^6\text{C}^{12}$ 的質量虧損和結合能，其同位素質量按物理標計是 12.0038，氫原子質量為 1.007825，中子質量是 1.008665。代進方程式 (2) 和 (3)，可得

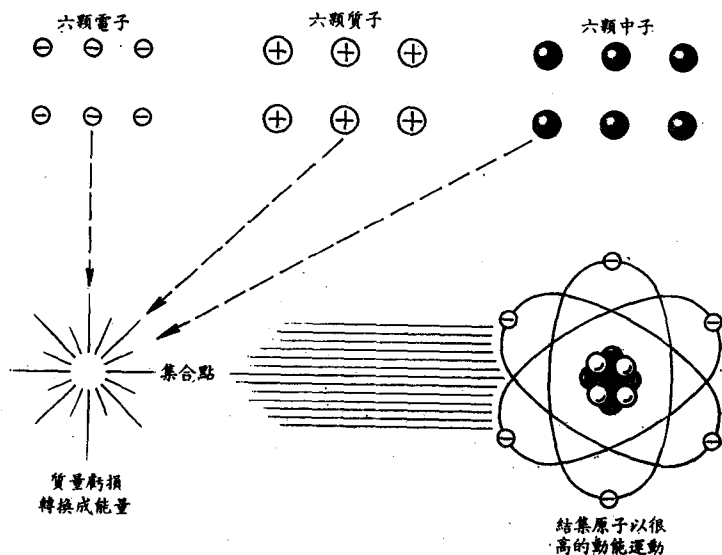
$$\begin{aligned}\text{質量虧損} &= [6(1.007825) + 6(1.008665)] - 12.0038 \\ &= 0.095 \text{ amu}\end{aligned}$$

$$\text{結合能 (B.E.)} = 931.4 \times 0.095 = 88.48 \text{ MeV}$$

此能量值再被相應的質量數來除，所獲得的數值即是每個核子的結合能：

$$88.48/12 = 7.37 \text{ MeV/每個核子}$$

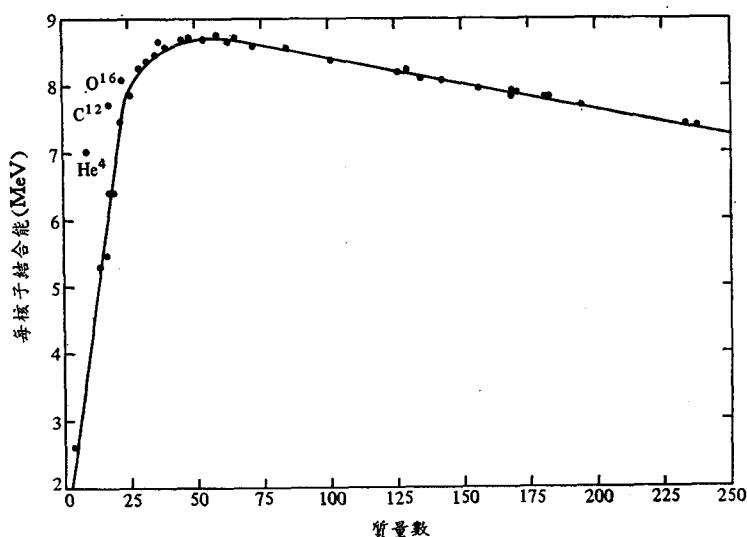
由圖二可以看出利用微粒迅速集合構成原子，其質量虧損能



圖二 質量虧損變換成集結原子的能量

突然間變換為能量。此能量化為所構成的原子的動能。

圖三表明在穩定核中每一核子結合能是質量數之函數。圖中標繪的是每個核子的結合能與質量數的關係曲線。 H^4 、 C^{12} 和 O^{16} 則例外，其值只是靠近單曲線，有些較輕的核素如 D^2 和 He^3 ，其結合能很低，在相當大的質量數範圍內每核子結合能都接近於 8MeV 。



圖三 每核子結合能為穩定核質量數之函數

再詳細研究此曲線，可發現在質量數由 40 到 120 範圍內，核子結合能有最大值，接近於 8.5MeV ；質量數較高時，這個值會減少，如果是鈾，其每核子結合能降至 7.6MeV ，因此這類元素在裂變時會釋放出大量的能量。

核子結合能都在百萬電子伏特範圍，而化學反應所包含的電子結合能却只有幾個電子伏特，故此，在核子反應（包括核裂變）

過程所釋放的能量，將比同數量的物質發生化學反應的能量變化高百萬倍。

一般放射性元素都具有 β —放射性，但較輕的元素絕少有 α —放射性。這現象與核子結合能有關係。 α —粒子由兩個質子及兩個中子所組成，其總結合能為 28 MeV。如果由核中分出兩個中子和兩個質子所需的能量少於這個數值，在理論上就可以發生 α —蛻變。若該蛻變是以可見的速率進行的，其射出 α —粒子至少要具有 5 MeV 的動能才會有一定的穿透力，則只是由核中分出兩個質子及兩個中子所需的能量為 $28 \text{ MeV} - 5 \text{ MeV} = 23 \text{ MeV}$ 。在質量數由 209 到 238 範圍內，核子結合能增加 $10802 - 1640 = 162$ (MeV)，此數值再被 $(238 - 209) = 29$ 來除，其商為 5.6 MeV，即每增加一個核子的結合能。欲從原子核中分出兩個質子和兩個中子，所必須的能量為 22 MeV，比發射 α —微粒所需的能量值少，因此能够理解為什麼質量數超過 210 者才能具有 α —放射性。

核子結合能與飽和核子力

原子核內中子和質子相結合之力的性質，與我們所熟悉的萬有引力和靜電吸引力不同。小小原子核却有強大穩定性，顯示核子力是一種短程力，約在 10^{-13} 厘米之距離內起作用，相當於原子核半徑。如果有長程力，則總結合能可依照原子核中微粒數的平方而增加，但事實上，結合能差不多與核子組成的數目成正比。這就是核子力的飽和性 (Saturated character)，即每核子直接吸引鄰近核子而對其他核子則無作用。在這方面，可將核與液滴相比較：液滴中每個分子都吸引與之相接觸者，而不影響較遠的分子。液滴的總能量與體積則與所含的分子數成正比。原子核也是這樣，結合能與體積及質量數有正比關係。

照上面解釋，核子力的飽和性和它們的短程性，可以從原子核微粒數與微粒結合能的變化推論。因此，質子間之靜電斥力可略去。兩質子之間庫倫能量是簡單的 e^2/r ， e 為質子電荷，等於 4.8×10^{-10} esu， r 是質子間之距離。此能量之量值為：

$$\frac{e^2}{r} = \frac{(4.80)^2 \times 10^{-20}}{(3 \times 10^{-13})(1.60 \times 10^{-8})} \approx 0.5 \text{ MeV}$$

兩質子之間庫倫能量與每微粒平均結合能相比較極小，庫倫排斥對重核極為重要乃因為有飽和性核子力吸引之故。在庫倫顯示無飽和性時，庫倫作用的總能量是與在核中質子偶數成正比的，即 $\frac{1}{2}Z(Z-1)$ 。對於半徑為 R 、含 Z 個質子的核，其總庫倫能量是

$$W_e = -\frac{3}{5} \cdot \frac{Z(Z-1)}{R} e^2 = -\frac{3}{5} \cdot \frac{Z(Z-1)e^2}{1.35 \times 10^{-13} A^{1/3}} \quad (4)$$

R 是核子半徑， $R = 1.35 \times 10^{-13} A^{1/3}$ ，庫倫能量是 $A^{1/3}$ 的函數，但總結合能與 A 成正比。

核子穩定性與兩核子間之力

原子核中的中子和質子結合之力叫做核子力。質量數 A 約等於雙倍核子電荷 Z ，此種關係特別對輕核較為準確，對於重核， A 值則較 $2Z$ 大些。因為 A 是核中的微粒數，而 Z 則為質子數。在輕核中，中子數量約近等於質子數。但在重核中，中子數量比質子數量多，所以說輕核的中子和質子約相等，這是中子與質子相吸引的證明。像氦核具有的穩定性，就支持這種結論。

假如中子和質子有核子間相吸引之力，同樣的理由，也可假定兩中子之間與兩質子之間有引力存在。那麼，兩中子間之力是

否應等於兩質子間之力？兩中子之間相引力是否大於一中子和一質子之間的力，或兩質子之間的力？有些天然存在的穩定輕核有很高的豐度，這現象有助於說明上面的問題。這類核中所含的中子數多過質子，由此可推想兩質子之間相吸引的力不可能大於中子—質子之間的引力，也不會大於兩中子之間的引力。當原子序數增加時，原子核中的中子數與質子數同時增大，由此推想出兩中子間必有引力存在。當 Z 增加時，庫倫能量增大，中子數與質子數的比率也逐漸增加，例如，對於輕核的氫，其比率 = 1，到重核的鈾時，比率 = 1.6。這種增加表明核子間需要有互相吸引的力以克服靜電排斥的作用。

研究一些簡單的核就可以證明在質子—中子 ($p-n$)，質子—質子 ($p-p$) 和中子—中子 ($n-n$) 之間存在有吸引力。氦核 (D^2) 是由一個質子和一個中子組成的，它具有的相對穩定性表明 ($p-n$) 力的存在。如果加上一個中子，就組成氚核 (T^3)，若加上一個質子就構成氦核 (He^3)。在此過程中結合能有顯著增加，其中部分地是由於 ($n-n$) 力和 ($p-p$) 力的作用。氚核中有兩個中子和一個質子，故可認為存在有兩個 ($p-n$) 力和一個 ($n-n$) 力，而氦核中含有兩個質子及一個中子，則存在有兩個 ($p-n$) 力及一個 ($p-p$) 力。 T^3 的結合能為 8.48 MeV，而 He^3 核的結合能為 7.72 MeV，二者都比氦核的結合能 (2.25 MeV) 大許多。

T^3 和 He^3 中的力有所不同，前者中是 ($n-n$) 相互作用而後者則是 ($p-p$) 作用。由於 T^3 核之結合能比 He^3 的結合能大，可見 ($n-n$) 力是大於 ($p-p$) 力的。事實上，核子之間除了吸引力之外，兩個質子之間還有庫倫排斥力，考慮到這一事實，可以認為 ($n-n$) 力和 ($p-p$) 力基本是相等的。這就是核子力的電荷對稱性 (Charge symmetry of nuclear forces)。

由散射資料得到，中子與質子之間的核子力是等於兩個質子之間或兩個中子之間的核子力的，亦即是 $(n-p)$ ， $(p-p)$ 和 $(n-n)$ 力相等，不必去考慮兩個質子之間的庫倫排斥力。這就是核子力與電荷無關性原則 (Charge independence of nuclear forces)。

核子力之特性

核子力主要的特性首先是兩個核子之間相吸引的中心力，亦即沿着兩核子之間的連線相互作用的吸引力與相互距離有關，而與核子電荷無關。即對於三種核子偶： $(p-p)$ 、 $(n-n)$ 和 $(n-p)$ 來說是相等的。這是一種短程力，當距離大於 10^{-13} cm 時增加很快。兩核子間的中心力不同於其他中心力，如電場力或重力，其數值是依賴於核自旋的方向。

兩個核子間中心力的相關自旋有多種方式：一種是按氘核的形式總自旋為一單位，其中的中子和質子具有平行的自旋，而雙質子和雙中子的核子有反平行自旋的情形是不存在的。此外，研究質子和中子的散射，表明有兩種散射，即中子自旋平行於質子的自旋以及中子反自旋平行於質子的自旋。後者的特性發現較接近於察到的質子—質子散射；而鮑里不相容原理（見“原子構造”）只適應於反平行自旋。對於核子力自旋相關之討論乃是由於中子被正 (Ortho) 位與對 (para) 位組成的氫分子散射所引起的。氫分子包含兩原子，每個含有一質子和一電子；於正一氫的兩質子是平行自旋，於對一氫的是反平行自旋。兩種散射行為的差別指出中子和質子的相對自旋方向影響這些核子的相互作用。

另一種內核子力應屬於自旋和核子軌道角動量的相互作用。那種力可由此兩量的數值和它們方向之間的角度決定。自旋一軌

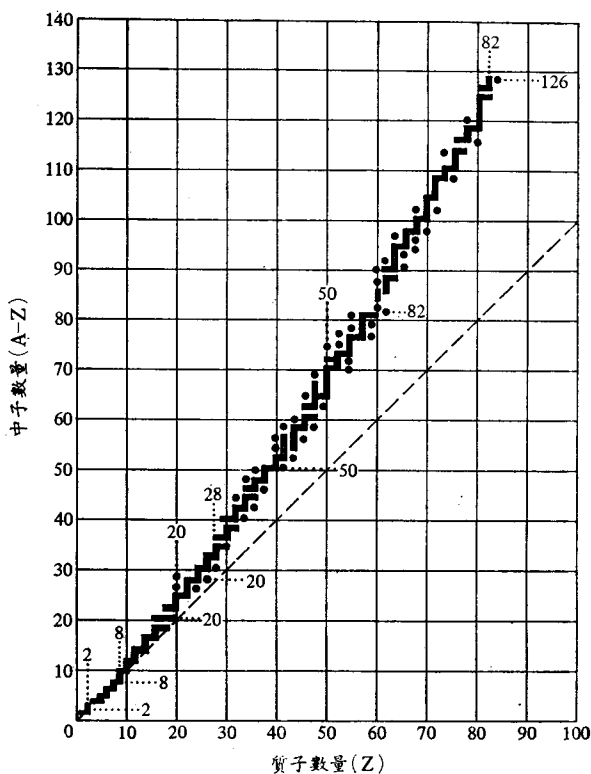
道力已由質子對質子的散射求得。每個質子自旋為 $\pm \frac{1}{2}$ 單位。在正常狀態，一質子柱應有相等數目正負自旋。因此看出在散射柱中有着正自旋的質子行經一方向，負自旋的質子有另一方向。質子變為極化（polarized）是由別的質子散射的效果。較清楚地解釋此現象是在質子自旋和質子—質子體系軌道角動量之間有相互作用。質子自旋在一種情況下平行，另一種情況下是反平行於軌道角動量矢量的方向。自旋軌道相互作用的可能性也可由原子核殼層或數種羣的核子作有系統排列看出。

第三種為核子—核子排斥力，假如核子之間只有相引力而無排斥力，則其總結合能或核子容積都不能與核子數成正比。換句話說，核子力並無所謂的飽和性。單只有吸引力會導致原子核崩潰，以使每個核子能夠處於另外的核子範圍內；結果，結合能將隨着質量數迅速地增大，進而核子體積迅速減少和保持不變，不管存在的核子數多寡。在此應注意到，液體飽和狀態與原子核相似，都是依賴於比吸引力更短範圍內起作用的排斥力。

中子—質子比率

回顧核子組成和各種核素的質量，就揭示了關於原子核穩定性的一些普遍規律。首先考慮一下，穩定核中的中子與質子的比率的變化引起的影響。

在圖四中用中子數（ $A - Z$ ）為縱坐標，質子數 Z 為橫坐標，若畫一條四十五度角的直線，則線上之各點象徵着核中含有的中子與質子數目相等。可以觀察到，對於低質量數的元素、穩定類的中子—質子比率近於一。事實上，具有質量數 20 以內的 18 種核素中，有 8 個是中子數與質子數相等的，其他 9 個之中



圖四 在穩定核質子和中子數量

只有一個不同。從圖四看出，當原子核中的質子數大於 20³，在穩定同位核的中子一質子比率常大於一，換句話說，欲保持核的穩定性，中子數應超過質子數。隨着原子序數增加，過剩中子數目也更要增多。對於最重的穩定同位核，像 $_{82}\text{Pb}^{208}$ 和 $_{83}\text{Bi}^{209}$ ，其中子一質子比率略大於 1.5。

質子之間的靜電力並不表示核力的飽和性，每個質子都要推

斥核中其他質子並同時受它們所排斥，結果，靜電排斥力隨原子序數的增加而迅速增加。原子核中的靜電排斥能量約略與 $\frac{Z^2}{R}$ 成正比，或者說，與 $\frac{Z^2}{A^{1/3}}$ 成正比。若同位核的原子序數增大，則需要大的中子比例，這樣才可克服質子的靜電排斥力。

$_{83}\text{Bi}^{209}$ 的質子排斥能量約為 $_{20}\text{Ca}^{40}$ 的十倍大，這 $_{20}\text{Ca}^{40}$ 是具有中子—質子比率為一的最重要的穩定核。

核子穩定性奇偶規則

應用質譜儀可分析天然存在的元素，也可鑒別有無同位素。原子序數為奇數的元素通常只有一穩定核，而有偶原子序數者通常有多於一個穩定同位核。

含有偶數個中子和偶數個質子的核比其他形式的核更為普遍；而具有奇數個質子和偶數個中子，或偶數個質子和奇數個中子的核同樣也很普遍，只有同時含有奇數個質子和奇數個中子的比較稀少。

		質 子 數	
		偶 (Even)	奇 (odd)
中 子 數	偶	166	53
	奇	57	8
同位素平均數		5.2	1.5

從上表中可看出包含質子和中子兩種都是偶數的核是最穩定的，而兩種都是奇數的核是最不穩定的。有六種偶—偶核素如 O^{16} , Mg^{24} , Si^{28} , Ca^{40} , Ti^{48} 和 Fe^{56} ，它們構成地殼的百分之八

十。含有相等數量的中子和質子的偶—偶核。即其質量數為 4 的倍數且其中子—質子比率為一者是最穩定的，其質子和中子有相同的空間坐標。值得注意的是有五種比較豐富的自然元素 ${}^4_2\text{He}$ ， ${}^{16}_8\text{O}$ ， ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ ， ${}^{28}_{14}\text{Si}$ ， ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ 都是屬於這一類。

按照前面所列的表，即質子和中子兩種都是奇數的，只限於輕同位核，只有四種奇—奇類型的穩定核，如 ${}^2_1\text{H}$ ， ${}^6_3\text{Li}$ ， ${}^{10}_5\text{B}$ ， ${}^{14}_7\text{N}$ ，其質量數不超過 14，那些超過此數的則是不穩定核。奇—奇核如 ${}^{40}_{21}\text{K}$ ， ${}^{50}_{23}\text{V}$ ， ${}^{138}_{55}\text{La}$ ， ${}^{176}_{71}\text{Lu}$ 和 ${}^{186}_{81}\text{Ta}$ ，是屬於天然放射性元素，是不穩定的，雖然它們有很長的半衰期。

偶—奇同位素，偶原子序數的元素通常有幾種偶數質量的穩定同位素。因而中子也是偶數的。此外，有着偶原子序數和奇數質量數的，即具有奇數的中子之穩定同位素並不普遍。少數此類型元素有兩種同位素，但只是錫有偶數原子序數 (50) 有三種奇數質量數的穩定同位素 (115, 117 和 119) 的元素。

核子模型

因為兩核子之間定量力難以解釋，科學上另創出模型以研究原子核的一些問題，通常原子模型或原子核模型是由實驗而得效果，並應用此模型解答一些基本問題，關連到核子結構的分析。

液滴模型

因為原子核的體積和結合能差不多與組成核子之數量成正比，並顯出核子力的飽和性，原子核的行為可以與液滴相比較。這種相似性使波耳氏導出原子核液滴模型 (liquid-drop model)。他將其作為核子反應複合核理論的基礎。按照液滴模型，在原子