

原子核反應堆理論基礎

薩末爾·格拉斯登

(美國原子能委員會顧問)

密爾頓·C·愛德崙

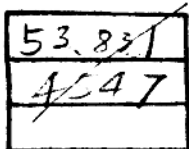
(橡樹嶺國立試驗所，物理學家)

合著

和平譯

康民校

1956



前 言

美國原子能委員會主席 戈登·J.

對於美國原子能發展計劃說來，再沒有比如何補充有訓練的科學家和工程師更為重要的問題了。過去當原子能委員會的計劃擴大時，就已經出現了對有訓練人員愈來愈多的需要。美國現有的教育機構曾經努力尋求各種方法來訓練當前願意學習原子核科學和工程的學員，但是教育工作者在某種程度上受到了缺乏適當參考資料的阻碍。

爲了在核反應堆理論這一重要領域內提供一本基本教材，原子能委員會約請了薩末爾·格拉斯頓博士——一位科學家、教育家、兼聲譽卓著的教科書作家——來協助將一切來源取得的資料（其中也包括我們原子能計劃所能提供的文件和材料）編纂成一本書籍。他在從事這一工作時參加了橡樹嶺反應堆技術學校的工作，並且和以講授這門課程的密爾頓·C·愛德崙爲首的一組人員合作。他們所編纂的教本經過了參與原子能計劃的許多科學家和工程師審閱。原子能委員會的既審局也審查了最後稿並認爲它的出版不會損害美國保密制度。自然，對於本書引用材料的科學估價和提出，完全是作者們本人的工作。

原子能委員會認爲，能够把這本書提供作爲進一步訓練原子核科學領域的人材之用，是我們的一種驕傲。

戈登·J.

493156

前 言

橡樹嶺國立試驗所研究主任 阿爾文·M·文保

在所有的物理理論中，原子核反應堆理論是唯一具有極重要實際意義、然而却還沒有用比較完整和系統形式寫出來的一個理論。這一理論有一部分曾經散見在幾本專集和書籍里，其中最著名的有蘇達克和甘貝爾的「反應堆理論基礎」，和麻省理工出版的「原子核動力的科學和工程問題」。然而，過去由於保密制度的限制，對於這個問題迄今還沒有能從統一的觀點給予比較完整的闡述。

格拉斯頓和愛德崙所寫的這本書，是企圖在比較完整的著作里把這個理論全面表達出來的第一次嘗試。這本書和蘇達克與甘貝爾的著作相似，因為兩者都是以橡樹嶺的反應堆理論課程為基礎的——老的一本根據蘇達克在前克林頓試驗所訓練學校中所用講義為基礎，而新的一本則根據愛德崙在改組後的橡樹嶺反應堆技術學校中所用的講義編著的。格拉斯頓——愛德崙一書的內容比較完整，這反映了新的學校中所培養的未來原子核工程師的知識眼界，比舊學校中更為廣闊。

看來反應堆技術將在工程領域中保持一個極為重要的地位，雖然目前要斷言這一點還為時過早。反應堆理論就是去理解這一領域的一個核心。因此，不僅僅下一代的原子核工程師們要深深感謝這兩位花費極大努力編寫本書的作者，而且對這個理論作出原始貢獻的許多科學家們也要對作者表示感謝。這些科學家們由於日常的工作重擔，一直沒有可能來整理這個理論，而格拉斯頓和愛德崙兩位先生却這樣出色地完成了這一任務。

序

這本書的目的是供給第一次參加反應堆工作的科學家、工程師或其他人員來研究核反應堆理論的一個引論。由於讀者的要求不同，在本書取材時所涉及範圍和難易程度上可能對他們說來會有很大出入。因此某些讀者在閱讀時會要略去其中某幾章，不過這樣做後一般還不會影響對這一問題的基本了解。

目前這本書是初稿的修正版，初稿是 1950 年根據 M.C. 愛德崙在橡樹嶺反應堆技術學校所用的講義編成的。作者願意在此表示對於許多科學家們的謝意，這本書中所論述的許多理論觀點都是由他們在曼哈坦計劃中的共同努力所發展起來的。特別值得提出的是 R. F. Christy, C. Eckart, E. Fermi, F. L. Friedman, L. W. Nordheim, P. Morrison, G. Placzek, L. Szilard, E. Teller, A. M. Weinberg, J. A. Wheeler, E. P. Wigner, 和 G. Young 等人的貢獻。

作者同時感謝許多審閱本書初稿的同仁們，特別要感謝 A.M. 文堡的有益建義和中肯的批評。

薩末爾·格拉斯頓

密爾頓·C·愛德崙

目 錄

	頁次
第一章 核的結構和穩定性.....	1
第二章 核反應.....	11
第三章 中子的產生和中子與核的反應.....	22
第四章 裂變過程.....	43
第五章 中子的擴散.....	62
第六章 中子的減速.....	101
第七章 無反射層的均勻熱中子反應堆（中子源由費米年齡理論決定）.....	144
第八章 帶反射層的均勻反應堆：分組擴散理論.....	173
第九章 非均勻（天然鈾）反應堆.....	193
第十章 無反射層熱中子反應堆的時間特性.....	225
第十一章 反應堆的控制.....	245
第十二章 均勻增殖系統的普遍理論.....	270
第十三章 微擾理論.....	293
第十四章 遷移理論與中子擴散.....	303

第一章

核的結構和穩定性*

原子核的特性

原子與中子

1.1. 核反應堆的工作依靠中子與原子核間種種不同的相互作用。爲了要了解這些反應的性質和特點，有必要簡單回顧一下核結構與核能量的某些基本問題。

1.2. 一個原子包含着一個帶正電的核，在它周圍有帶負電的電子，因此整個看來原子的電性是中和的。在反應堆產生原子能的過程中，只包含原子核之間的反應，而周圍的電子則不起作用。像燃燒油和煤所得到的化學能，是由於電子重新分配而引起的原子重新排列所產生的。但是所謂原子能却是核內粒子重新分配的結果。因此，用「核能」這個名詞比歷史上沿用的「原子能」名詞要更精確些。

1.3. 原子核由兩種基本粒子構成：質子和中子。由於它們是組成核的單元，並且還由於其他原因，質子和中子常常被同稱為核子。質子和中子都能在自由的狀態中存在，就是說，在原子核以外存在；因此可以研究它們個別的性質。

1.4. 質子帶着單位正電荷，電量等於電子電荷。這一粒子事實上就是氫的原子核，也就是不帶電子的氫原子。因此，質子的質量等於氫原子的質量減去電子的質量。於是，用原子質量單位** amu 來表示：

$$\text{氫原子質量} = 1.00813 \text{ amu}$$

$$\text{質子質量} = 1.00758 \text{ amu}$$

1.5. 中子是對釋放原子能有最重要關係的粒子，它不帶電荷，電性是中和的。因此，它與帶正電的粒子——質子不同，在接近帶正電的原子核時不受電的斥力。中子的質量比質子略大，而且比氫原子還大些：

$$\text{中子質量} = 1.00897 \text{ amu}$$

產生中子的方法和它與原子核的作用將在以後討論。

原子序數和質量數

1.6. 對某一元素說，核內的質子數目（也就等於它所帶的正電荷數目）叫做這一元素的原子序數。我們常用 Z 來表示它；而且除了少數例外，它等於按原子量排列的原子次序。這樣，

* 這些問題的普通參考書有：H. A. Bethe, "Elementary Nuclear Theory", John Wiley and Sons, Inc., 1947; D. Halliday, "Introductory Nuclear Physics", John Wiley and Sons, Inc., 1950. 比較基本的處理可參看 S. Glasstone, "Sourcebook on Atomic Energy", D. Van Nostrand Co., Inc., 1950.

** "原子質量單位"由氧的主要同位素 O^{16} 原子的質量定出。假定這種原子的質量恰好等於 16 個原子質量單位，即 16 amu。

氫的原子序數是 1，氦是 2，鋰是 3，一直到天然鈾是 92，這是自然界中天然存在着的最重元素。許多更重的元素已經用人工方法製造出來，其中包括對釋放原子能關係重大的鈾，原子序數為 94。

1.7. 在一個原子核里質子和中子的總數叫做這一元素的質量數，用 A 來表示。上面說過質子的數目是 Z ，因此這一原子核內中子的數目是 $A - Z$ 。由於質子和中子的質量用 amu 表示時都近於 1，顯然質量數就是最接近該元素原子量的整數。

同位素與核素

1.8. 元素的化學性質由原子序數也就是質子數決定，而不由原子量決定。這是由於化學性質取決於電子，而原子中的電子數目正等於原子序數。因此，凡核內包含同樣數目質子，也就是原子序數相同的原子，如果包括中子數目不同（也就是質量數不同）它們的化學性質基本上是一樣的；雖然他們在核的穩定性上表現出顯著的差異。這些具有相同原子序數但不同質量數的物質叫做同位素。

1.9. 自然界大多數元素都有着兩種或更多的穩定同位素，雖然它們的質量數和原子量不同，但實際上却不能用化學方法分開。在天然存在的元素中，已經發現一共約有 280 種穩定同位素，外加約 50 種不穩定的同位素。此外用人工方法通過各種不同的核反應得到了 700 種以上的不穩定同位素。為了區別某一元素的不同同位素，常常在這一元素的名稱或符號上同時標誌出它的質量數。這樣，質量數為 238 的鈾的同位素可以寫作鈾-238, $\text{U}-238$ 或 U^{238} 。

1.10. 目前在釋放核能中最重要的元素——鈾，在自然中存在着至少三種同位素，質量數為 234, 235 及 238。表 1.10 中給出天然鈾中存在的三種同位素的比例以及它們各自的重量（以 amu 為單位）。在表內可看出鈾-238 是最豐富的同位素，但所有天然鈾中也都含有略多於 0.7% 的鈾-235。鈾-234 的份量非常少，因而在研究核反應堆時一般可以把它忽略。

表 1.10. 天然鈾的同位素組成

質量數	百分比	同位素質量 (amu)
234	0.006	234.11
235	0.712	235.11
238	99.282	238.12

1.11. 雖然自然界中大多數元素都以同位素混合物的形態存在着，但也約有 20 種元素僅僅具有單一的形態。由於這種原因以及其他原因，有必要引入「核素」這個名詞。這名詞用來表示原子核成份完全相同的某種物質，即它們各原子核內的質子數和中子數都一樣。因此同位素就是質子數相同的兩種以上核素中的一個；也就是質子數相同而中子數不同的幾種核素中的一個。像氦這樣的元素，在自然界中只存在着一種形態，可以說它形成單一的穩定核素。

放 射 性

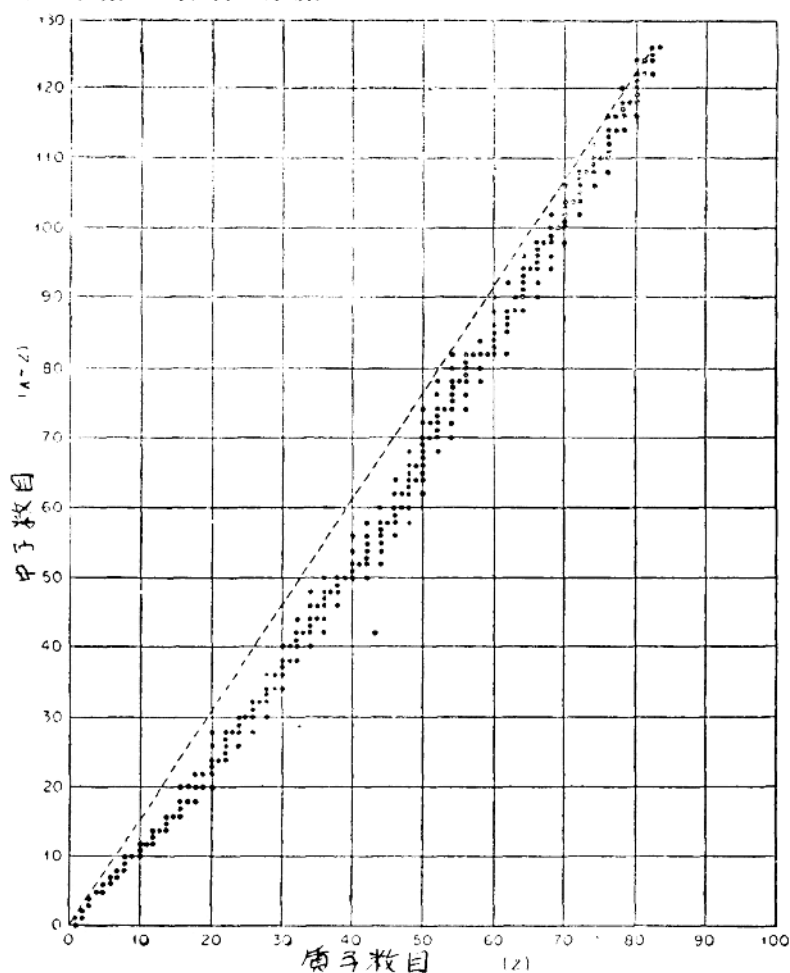
放射性同位素

1.12. 上面提到自然界中已發現許多不穩定同位素（或不穩定核素）。事實上天然存在的高原子量元素如鈾、釷、鐳和鈾全部是由不穩定同位素或「放射性同位素」組成的。這些物質都以一定速率自動變化着，這一般叫做放射性蛻變或衰變。發生蛻變時由原子核中放出一個帶

電的粒子，或者是甲種粒子(α -粒子)——即氦核，或者是乙種粒子(β -粒子)——即電子。這些元素經歷了一系列蛻變以後，就形成一種具有穩定核的元素。

1.13. 在許多情況下，當原子核經歷放射性蛻變後，所產生的核(或「子核」)往往並不處於它的最低能量狀態或基態中。換句話說，所產生的核具有高於基態的過剩能量，也就是處於激發態中。在極短的時間內，例如形成以後 10^{-16} 秒左右，激發核中過剩的(或激發的)能量就以幅射的形式放出，這叫做丙種射綫(γ -射綫)。這些射綫與 X 射綫性質相似；它們具有很高的穿透力，波長在 10^{-8} — 10^{-11} cm 之間，甚至於更短。核的激發能愈大，丙種射綫的波長就愈短。

1.14. 雖然原子序數最高的幾種元素(自原子序數 84 的鉍以上)只以不穩定的、放射性的形態存在；但鉈(81)、鉛(82)、鉍(83)在自然界中都主要以穩定同位素的形態存在着，同時其中也包含着少量不穩定同位素。在鉈以下的天然存在元素，除了少數很次要的例外，都是完全由穩定核素組成的。但是，在近年來已用人工方法通過各種不同的核反應造成了一切已知元素的不穩定同位素，即放射性同位素。

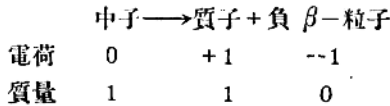


第 1.15 圖 穩定核內中子與質子的數目

1.15. 由於即將說明的原因（見後 §1.15），如果某種核素是穩定的，它的核內中子與質子比例必須在某一範圍之內。這可由圖 1.15 中看出，圖內繪出每一種已知的穩定原子核內的中子數目（縱座標）和質子數目（橫座標）之間的關係。可以清楚地看出這些點都聚集在一個相當狹的區域內，它相當於任一質量數（或原子序數）上的中子-質子比例的穩定界限。當質量數（即中子與質子的總數）向上增加時，穩定核的中子-質子比例由 1.00 一直增加到大約 1.56。對於每一質量數（或原子序數）說來，各種穩定核素的中子-質子比只能在很小範圍內變化。

放射性變化

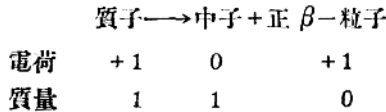
1.16. 當某種原子核內中子與質子數目的比例超出與質量數相應的穩定界限以外時，這種核將具有放射性。不穩定的核向着更穩定的方向自動變化。假如核含有較穩定性所要求的為多的中子，或者說過少的質子，其中一個中子將自動變為一個質子同時放出一個負電子，即負的 β -粒子；於是：



左邊中子的電荷與質量正等於右邊質子加負 β -粒子的電荷與質量。可以提一提，根據某些理由還要假設同時產生了另一個粒子，叫做中微子，它具有實際近於零的質量和零電荷，但卻帶走了放射性蛻變時發生的一些能量。

1.17. 上述變化的結果等於把一個中子換成了質子，因此雖然所產生元素（子元素）的質量數並沒有變化。原子序數却比母元素大一。換句話說，這種放射性蛻變（負 β 蛻變）產生了另一種元素的同位素，它的質量數與母元素相同。在這種新元素里中子-質子比例比在母元素里小，因為有一個中子變成質子就意味着在減少中子數目的同時還增加了質子數目。因此，一般說來，子核會比母核更穩定。然而，它不一定是完全穩定的；在這種情況下它仍然會有放射性，會再放出一個 β -粒子並且產生另一種元素的同位素。經過一次、兩次或更多次的變化，每一次都有一個中子變成質子並且放出一個負 β -粒子，最後就形成了穩定的物質。

1.18. 如果在某一質量數下，中子的數目比穩定界限所要求的更少，或者說質子的數目過多，這種核素也是不穩定的。但現在應該是有一個質子變成一個中子，同時放出一個正電子，即正 β -粒子；於是，



所產生的核原子序數將比母核少一，雖然它們的質量數是相同的。正如上面討論過的一樣，子核還可能是不穩定的，這樣它仍然會有放射性。無論如何，在一次或多次正 β 蛻變以後，將會形成中子-質子比在穩定界限以內的穩定核。

1.19. 中子-質子比較穩定性所要求數值為低的核素，還有另外兩種方法變成較為穩定。一種是放射 α -粒子（§1.12），另一種是核從原子外俘獲一個負電子，這正好和 §1.16 內所說的過程相反。任何一種情形都加大了中子-質子比。因為這兩種放射性蛻變的方式對於核反

應堆都不重要，這里毋需更詳細地加以討論。

放射性蛻變率

1.20. 對於任何一種放射性物質，每個核在單位時間內都有一定的蛻變幾率；這一幾率取決於核的種類而且等於常數，用任何人類已知方法都不能使它變化。在一切可能達到的溫度和壓力下不論元素的物理或化學狀態如何，蛻變常數仍然保持不變。對於某一種核，在每一時刻的蛻變率都正比於當時存在的放射性同位素原子數目。因此，如果 N 是在任一時刻 t 存在的某種放射性原子（或核）數目，那末蛻變率就由下式決定

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (1.20.1)$$

這里 λ 叫做這種放射物質的蛻變常數。現在由任意選取的時間零點（當時這種放射性核的數目是 N_0 ）到時間 t 積分（這時剩餘的放射性核的數目是 N ）就很容易求出

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.20.2)$$

1.21. 利用某一核素的「半壽期」來表示放射性蛻變率，是一種很方便的辦法。半壽期是放射性核的數目（或「活性」）蛻變到只剩下初始數值的一半所需的時間。這就是說，假定在（1.20.2）式中 N 等於 $\frac{1}{2} N_0$ ，相應的時間就是半壽期 T ；於是，

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}$$

或

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.6931}{\lambda}, \quad (1.21.1)$$

由此可見半壽期與蛻變常數成反比。已知的各種放射性物質的半壽期，由一秒的極小分數到幾十億年不等。

1.22. 蛻變常數的倒數，用 t_m 表示，是放射性物質的平均壽期；這樣，

$$t_m = \frac{1}{\lambda} \quad (1.22.1)$$

可以看出平均壽期等於在當時存在的各種放射性核壽命的平均數。

核 的 結 合 能

核 力

1.23. 在原子核問題中值得注意的事實還不是某些核表現了局部的不穩定性和放射性，而是它們是不是會有任何穩定性。在一開始考慮這一問題時，可能要想到一個象原子核那種密集的質子（帶正電）系統，將由於電荷的靜電斥力而飛散開來。因此，原子核的穩定性顯然是與中子和質子的同時存在有關的，至少也有一部分原因在此。

1.24. 穩定氦核（氦的質量數為 2 的同位素）包含着一個中子和一個質子，它的存在表明中子-質子間有吸力存在。此外，也有根據可以說明在原子核內那樣近的距離下，質子之間和中子之間也都有吸力存在。例如，氦-3 核含有一個中子和兩個質子，它具有一定的穩定性，表明在這個原子核中有質子-質子吸力的存在。然而，盡管承認中子-中子，質子-質子和中

子-質子間吸力的存在，我們對於這些力的性質了解得還極少。核穩定性的問題目前還不能從理論的觀點進行完滿的處理；因此，這裡將利用以核的質量為基礎的半經驗公式來進行討論。

質量虧損與結合能

1.25. 如果沒有由核力作用而產生的能量變化，核的質量就應該等於組成它的粒子的總和，即 Z 個質子與 $A-Z$ 個中子質量的總和（1.17）。整個原子的質量也將等於這些數量與 Z 個電子質量的和。由於一個質子與一個電子構成一個氫原子，可以假定任何一種質量數為 A 原子序數為 Z 的核素的原子量，將等於 Z 個氫原子的質量加上 $A-Z$ 個中子的質量，即等於 $Zm_H + (A-Z)m_n$ ，這裡 m_H 和 m_n 分別代表氫原子和中子的質量。

1.26. 實際測定各個原子質量，表明它們總是比上面那樣計算出來的數值小。計算質量與實驗質量 M 的差，叫做質量虧損，由下式表示：

$$\text{質量虧損} = Zm_H + (A-Z)m_n - M \quad (1.26.1)$$

這一質量虧損表示，在一定數量的電子、質子和中子組合成為某一原子的假想過程中，有這麼多質量表現成為能量的形式了。自然，如果要把原子分解成為組成它的全部粒子，也就需要供給同樣的能量。因此，與真實質量虧損相當的能量就用來作為某種原子結合能的一種量度。

1.27. 為了求得相應於質量虧損的能量大小，用愛因斯坦質量-能量關式

$$E = mc^2, \quad (1.27.1)$$

其中 E 是相當於質量 m 的能量， c 是光速。如 m 用克為單位， c 用每秒厘米，即 3×10^{10} cm/sec，則 E 的單位是爾格。為了當前便利起見， m 最好用原子質量單位表示，而 $1\text{amu} = 1.67 \times 10^{-24}$ 克*；於是方程 (1.27.1) 變成

$$E(\text{ergs}) = m(\text{amu}) \times 1.49 \times 10^{-8}. \quad (1.27.2)$$

1.28. 在研究原子時習慣上用電子伏單位表示能量。一電子伏，即 1ev ，是任一帶單位（電子的）電荷的粒子，不受阻碍地通過一伏特電勢差時所獲得的能量。由已知的電子電荷大小可以求出

$$1\text{ev} = 1.60 \times 10^{-12} \text{ erg}. \quad (1.28.1)$$

因此，(1.27.2) 式可以寫作

$$E(\text{ev}) = m(\text{amu}) \times 9.31 \times 10^5.$$

實際上電子伏單位在任何情況下都嫌太小，因此常常用兆電子伏的單位，即 10^6ev ，縮寫為 Mev ；於是

$$E(\text{Mev}) = m(\text{amu}) \times 931, \quad (1.28.2)$$

這樣，一原子質量單位相當於 931Mev 。

1.29. 回到表示質量虧損的方程 (1.26.1)，根據以上的討論結果，結合能可以表示成

$$\text{結合能 (Mev)} = 931 [Zm_H + (A-Z)m_n - M] \quad (1.29.1)$$

* 這是以克為單位時 ^{16}O 原子實際重量的十六分之一。

這裡 m_H 是 1.00813 amu , m_n 是 1.00897 amu , M 是以 amu 為單位的同位素質量。在推導過程中略去了電子對核的結合能，或者，更精確一些，可以認為已經包含在 Zm_H 一項里了。無論如何，電子的結合能只佔全部結合能的極小部分。因此，(1.29.1) 式可以定出組成該原子核的核子（即質子與中子）淨結合能的大小。

1.30. 所有已經較精確地測定了同位素質量的核素，它們的結合能都已利用 (1.29.1) 式計算出來了。如果用質量數（即核內核子的總數）去除結合能，就可以得到這種核素每一核子的平均結合能。這一結果已經在圖 1.30 中對相應的質量數座標繪出。可以看到除了幾個輕核以外，其他數值都在（或極接近）一根單獨曲線上。質量較小的元素每一核子平均結合能較低，但是在其他很大範圍內這一數值都接近 8 Mev 。因此總結合能幾乎與質量數成正比，也就是與核內核子總數成正比。

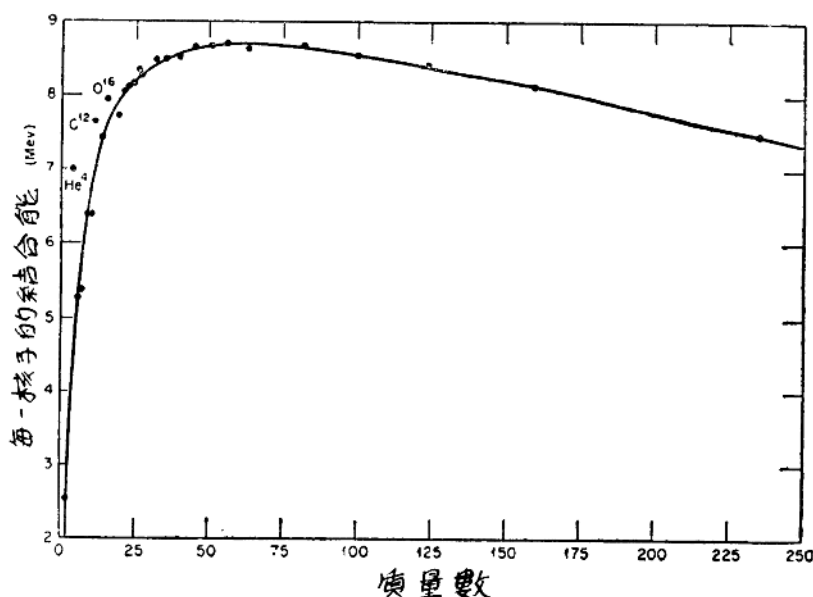


圖 1.30. 穩定核素的每一核子結合能

核的液滴模型

1.31. 如果把一個原子核看作與一滴不可壓縮液體的性質有某種相似，在有些情況下是有用的。正象表面張力趨向於維持液滴成為球形來反抗扭曲一樣，我們相信核力對於核也發生同樣的作用。這一觀點對於研究核的裂變特別有價值。

1.32. 在液體中分子間的作用力是短程力；那就是說，它們僅僅作用於某一分子與直接相鄰的其他分子間。因此，在液體內距離較遠的分子之間沒有明顯的相互作用。這種論點對於原子核內核子間的作用顯然是同樣適用的。這一觀點可以由上面得到的結合能數據加以證實。假如核力是遠程力，那末每一核子都將與其他所有核子起作用，總結合能大體上將隨核子數的平方增加。事實上，總結合能却象 § 1.30 里所說的那樣差不多與核子數目成正比。

1.33. 核半徑的測定進一步證明了核力是短程力。這時可以採用三種方法來測定。第一種方法適用於放射 α -粒子的高質量數放射性核素，就是去測量它們的蛻變率 and 放出的 α -粒子

能量。第二種方法是根據覓核的結合能的差數，所謂覓核就是一對核，第一種核的中子數和質子數恰好分別等於第二種核的質子數和中子數。最後一種方法是對任何種類的核至少在原則上都可以應用的方法，它與核的穩定性或質量數無關，這就是測量快中子散射截面的方法（見後 § 3.38）。

1.34. 用不同方法測量同一種核素所得到的結果，一般能很好地相互符合。除了質量數最低的元素外，這些結果可以近似地用下式表示

$$R = 1.5 \times 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ cm}, \quad (1.34.1)$$

這裡 R 是質量數為 A 的核的半徑。核半徑大致與質量數的立方根成正比的事實是具有很大意義的。這樣一來核的體積就與質量數（也就是核的質量）成正比。這意味着包含同樣成分（中子與質子）的核，它們的密度基本上是相同的。核密度既是常數而與核子數目無關，正說明了原子核好象一種液體一樣，在組成它的粒子間只有短程力作用。

結合能的半經驗公式

1.35. 在缺乏關於核力的完整理論時，可以用原子核的液滴模型來導出結合能的半經驗公式。這是在一種極度簡化的情況下，研究對核的結合能有關係的各種因子而得到的。這些因子前面的適當權重常數，當有可能時就由理論推出，而在理論還不適用時則由實驗數據定出。

1.36. 如果核內的力像液滴內的力一樣，那麼每一個核子首先將被它的直接鄰近核子所強烈吸引，而不受其他核子的影響。這就產生了結合能中正比於核內核子數目的吸力部分。這樣，吸力能一項隨質量數 A 而變化，因此可以表示為

$$\text{吸力能} = a_1 A, \quad (1.36.1)$$

這裡 a_1 是常數。

1.37. 在說明吸力能正比於質量數時，等於默認了每一個核子與其他核子的關係完全是一樣的。但實際上，在表面的核子比在內部的核子結合得松些，因而由 (1.36.1) 給出的吸力能是過高的，高出的數量取決於核的表面面積。表面面積愈大，那些不受其他核子完全包圍的核子數目愈多。因此吸力能中過高估計的部分可以認為與核的表面面積成正比。這通常叫做表面張力效應，因為它和液體表面張力的效應是相似的。由於按 (1.34.1) 求出核的半徑正比於 $A^{\frac{1}{3}}$ ，核的表面面積就正比於 $A^{\frac{2}{3}}$ ，因此

$$\text{表面張力效應} = -a_2 A^{\frac{2}{3}}, \quad (1.37.1)$$

這裡 a_2 是常數。

1.38. 在穩定核內有形成中子-質子對的趨勢。例如，最穩定的物質，象 He^4 , C^{12} , 和 O^{16} （見圖 1.30），都是包含相等數目的中子與質子的。但多數的核，特別是重核，包含的中子比質子多。這種中子過剩是必要的，它可以產生中子-中子引力及中子-質子引力來抵消質子間的靜電斥力。但是同時它也引起了一定程度的不穩定性，因為過剩的中子佔據着若干不含質子的核能級。核內中子比質子更多就意味着 (1.36.1) 所估計的吸力能過大。因此要加一個「成分項」來進行適當修正，這可以表示成

$$\text{成分項} = -a_3 \frac{(A-2Z)^2}{A} \quad (1.38.1)$$

這裏 a_3 是常數， $(A-2Z)$ 是核內中子超過質子的數目*。

1.39. 上面所導出三項的和大致能表示出核內的淨吸引能。現在有必要來討論由質子間相互靜電斥力而產生的排斥能。一個均勻荷電球的位能正比於 Z^2/R ，這裏 Z 是電荷單位（這兒是原子序數）， R 是球的半徑。應用到核的結合能問題上，靜電排斥能可以表示為

$$\text{排斥能} = -a_4 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}, \quad (1.39.1)$$

這裏核半徑 R 已用 $A^{\frac{1}{3}}$ 代替，它們是成比例的； a_4 與前面同樣是一個常數。

1.40. 最後，要考慮到質子與中子數目是奇數或偶數的影響。當它們都是偶數時（即偶-偶型），核特別穩定；當它們都是奇數時，（即奇-奇型），核特別不穩定。這可能是由於核子自旋成對時有穩定作用，而這一作用只有當中子質子數目都是偶數時才會產生。因此，在一個偶-偶核內結合能會有一個正的附加量，而在一個奇-奇核內中子和質子自旋都不成對，就有一個相應的負（或排斥）效應。根據由同位素質量計算結合能的 (1.29.1) 式進行純粹經驗分析，證明自旋效應的結果可以表示成

$$\text{自旋效應} = \pm \frac{a_5}{A^{\frac{3}{4}}} \quad (1.40.1)$$

這裏偶-偶核取正號，奇-奇核取負號。而奇-偶核（或偶-奇核）的自旋項為零。

1.41. 綜合以上各節所求出的對結合能有關各項，可以得到核的總結合能 (B.E.) 的表示式

$$\text{B.E.} = a_1 A - a_2 A^{\frac{2}{3}} - a_3 \frac{(A-2Z)^2}{A} - a_4 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \pm \frac{a_5}{A^{\frac{3}{4}}}, \quad (1.41.1)$$

這裏 a_5 在奇-偶核中為零。式中五個常數，只有 a_5 可由靜電理論算出，但其他的要求用以下經驗方法求出。

1.42. 將 (1.41.1) 式對 Z 微分，令 A 為常數，得到

$$\frac{d(\text{B.E.})}{dZ} = 4a_3 \frac{A-2Z}{A} - 2a_4 \frac{Z}{A^{\frac{1}{3}}},$$

以及由此可知最大結合能發生在

$$4a_3 \frac{A-2Z}{A} = 2a_4 \frac{Z}{A^{\frac{1}{3}}} \quad \text{處。} \quad (1.42.1)$$

這個方程表示最穩定核的質量數 A 與原子序數 Z 之間的關係，因為這些最穩定核必然在每一質量數下具有最大的結合能。由於 a_1 象上面所說是已知的，因而 a_3 可以取適當的值，使得 (1.42.1) 對 A 及 Z 繪出的曲線符合天然存在量最豐富的核素的曲線。實際上不可能求出一個單一的常數來適應整個質量數的範圍，因此在 (1.42.1) 中決定最恰當的 a_3 值時，需要用折中的數值。

1.43. 在已知 a_3 和 a_4 以後，可以由任何兩個奇偶核（因 a_5 為零）的質量所定出的結合能數值，來求出 a_1 和 a_2 的值。最後，由偶-偶核的結合能定出 a_5 的值；用偶-偶核而不用奇-奇核是因為穩定的奇-奇核存在得很少，而且存在的也只是質量數很低的核。

* 見 E. Fermi, "Nuclear Physics," 22 頁, University of Chicago Press, Chicago, 1950.

1.44. 將前述方法求出的各個常數代入以後，結合能的 (1.41.1) 式變成 (以 Mev 為單位)

$$B.E.(\text{Mev}) = 14.0A - 13.0A^{\frac{2}{3}} - 19.3 \frac{(A-2Z)^2}{A} - 0.585 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \pm \frac{33}{A^{\frac{1}{2}}} \quad (1.44.1)$$

其中各項對於總結合能影響的相對大小，可以通過低的、中等的及高的質量數核素的計算結果很明顯地看出。 ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ ， ${}_{47}\text{Ag}^{107}$ 和 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 的計算結果列在表 1.44 里；同時列出由已知同位素質量定出的總結合能實驗數據作為比較。計算和觀察數據的符合是令人滿意的，因為 (1.44.1) 中的各常數只准到三位有效數字。

第 1.44 表. 結合能的計算

	${}_{20}\text{Ca}^{40}$	${}_{47}\text{Ag}^{107}$	${}_{92}\text{U}^{238}$
核子的吸引	560	1500	3330
表面效應	-152	-293	-501
成分效應	0	-30.6	-236
靜電排斥	-68.4	-272	-799
自旋效應	3.2	0	0.5
計算的結合能	343	904	1790
實驗的結合能	341	907	1785
每一核子的結合能	8.5	8.4	7.5

核力與穩定性

1.45. 前面得到的推導結果可以對這個事實做出定性的解釋：對於任一質量數（或原子序數）中子-質子比有一個有限的穩定範圍 (§1.15)。前面已經說過，這個比值的實際數值由低質量數元素的 1.00 增加到高質量數元素的 1.56。因為中子-中子，質子-質子，和中子-質子間的引力大致相等，所以對穩定性說來要求中子-質子比近於一；這在低質量數的核內就是如此。但是，當原子序數增加時，質子間的靜電排斥開始產生更重要的影響。靜電力的性質是遠程力，每一質量都排斥所有其他質子，並且受到它們的排斥。由 §1.39 里看到排斥能隨 $Z^2/A^{\frac{1}{3}}$ 而變，因此它隨原子序數的增大而急驟增加。

1.46. 為了抵消較重元素核內質子間增大的斥力並維持核的穩定性，核內必須包含比較多的中子。由此附加的中子-中子吸力可以部分抵消加大的質子-質子斥力。這樣，在穩定的重核內中子-質子比應大於一。

1.47. 但是，對於一定質量數（或原子序數）的穩定系列，核內的中子數目有一個限度，這是由於 §1.38 里所說的成分項（即中子比質子過剩項）引入了一些不穩定性。這一事實決定了中子-質子比的穩定性上限。至於下限，則是由於質子數加多而引起靜電排斥加大的不穩定性而決定的。中子-質子比的穩定範圍較小的事實可以這樣來理解。

第二章

核反應*

核反應率

核反應與化學反應的比較

2.1. 在適當的實驗室條件下，可以使一種原子核與其他核發生反應，特別是輕元素如氫（質子）、氦（氦核）和氦（ α -粒子）更是如此。原子核也與中子、電子和 γ -射線發生反應。但是，在常溫下的核反應率，即一定時間一定容積內發生反應的核數目，和原子與分子的化學反應率比起來要小得很多。化學反應過程與核反應過程速率的顯著差異主要是由於兩個原因。

2.2. 首先，核的形狀很小，直徑在 10^{-12} cm 數量級，比起整個原子或分子直徑在 10^{-7} 或 10^{-8} cm 數量級要小得多。這就表示核的碰撞或相遇比起原子（或分子）碰撞少得多。只有在下面將提到的特殊情況下，核或低質量低能量的核粒子在反應中才顯出好象具有與整個原子相同的直徑一樣。這時核反應率大大超出尋常的數值。

2.3. 一個核與其他核反應率相當低的另一個因素是它們之間存在着由正電荷所產生的庫倫排斥。排斥能正比於 $Z_1 Z_2 / R$ ，這裡 Z_1 和 Z_2 是參加反應各核的電荷，即原子序數，而 R 是它們中間的距離。因為兩個核在能夠發生反應前要相互接近到 10^{-12} cm 的距離以內，它們必須克服的排斥能是巨大的，特別對於高原子序數的核更是如此。甚至低原子序數的核，即氫和氦，庫倫能也達到幾百萬電子伏的數量級。

2.4. 另一方面，為產生化學反應需要使電子場發生相互作用的能量，只不過幾個電子伏。在常溫下，一對互相碰撞的原子或分子具有這樣數量動能的幾率是相當大的。因此所發生的反應率很容易測出。然而在常溫下一對碰撞核要具有幾百萬電子伏動能的幾率却是極小的。因此，不僅核之間碰撞的次數比分子或原子少，而且碰撞時發生反應的幾率也小得多。這樣一來核反應率比起分子或原子間的化學反應率就小得非常多了。

2.5. 有兩個方法可以使核反應發生得更迅速。第一，把溫度提高到幾百萬度，參加反應的核就可以得到足夠的動能來克服相互間靜電排斥或庫倫壁壘。這種核反應過程，叫做熱核反應，發生在太陽與地球上，它是這些天體能量的來源。第二，在實驗室中，可以用加速到動能接近幾百萬電子伏**或更高能量的輕核（如質子、氦核、或 α -粒子）來打擊各種物質，以便研究原子核的反應。迴旋加速器或其他裝置都用於這個目的。原子核與高速電子、與 γ -射線

* 參看第一章的普通參考書。此外還可參看 H. A. Bethe, Rev. Mod. Physics, 9, 69 (1937); E. P. Wigner, Amer. J. Physics, 17, 3 (1949); 和教科書內的其他參考資料。

** 相當於 1 Mev 動能的溫度大約是 8×10^9 度。

和高能 X-射線的反應也已經實現了。

中子與核的相互作用

2.6. 雖然前面所說的那些核反應都是很有興趣的，但它們對於當前核反應堆的研究並不重要。正如前面提到，這些反應堆里利用的是中子與原子核的相互作用，這種反應與前面所說的有一個主要的不同。因為中子沒有電荷，它在接近原子核時毋需克服任何明顯的排斥力。因此，即使是所謂「慢」中子，只具有與平常氣體一樣的動能（即在常溫下約 0.03 ev）也能够迅速地與原子核發生反應。

2.7. 實際上慢中子與原子核的反應幾率常常大於能量為幾千或更高電子伏的快中子。用古典的語言說，這個事實的解釋可能是：在遇到一個核時，慢中子在核附近逗留的平均時間比快中子時間長。這就可以預料到前者發生反應的機會比後者大。但是，在量子力學里中子與核的碰撞被看作是中子波與核的相互作用。下面就要表明，中子的有效波長與它的速度成反比。因此慢中子的波長大於快中子，與核作用的幾率也就相應地增大了。

中子波長

2.8. 根據物質的波動理論，所有的粒子都伴隨著波，叫做物質波或德布洛依波，波長 λ 由下式決定

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (2.8.1)$$

這裏 h 是普朗克量子論常數，即 6.62×10^{-27} erg sec， m 是粒子的質量， v 是它的速度。設 E 是粒子的動能，則 $E = \frac{1}{2}mv^2$ ，而 (2.8.1) 可以寫作

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (2.8.2)$$

如 m 用克表示， E 用 erg 表示， h 用 erg-sec 表示，則波長單位是 cm。如果 m 用 amu 單位，它等於 1.67×10^{-24} gm (§ 1.27)，而 E 用電子伏單位表示，即 1.60×10^{-12} erg，則 (2.8.2) 變為

$$\lambda = \frac{4.05 \times 10^{-9}}{\sqrt{2mE}} \text{cm} \quad (2.8.3)$$

2.9. 對於中子，這是我們特別感興趣的粒子，它的 m 接近於 1 個 amu，因此中子波長的表示式變成

$$\lambda = \frac{2.86 \times 10^{-9}}{\sqrt{E}} \text{cm}. \quad (2.9.1)$$

這裏 E 是中子能量，以電子伏計。對能量大約 1 Mev 的快中子，由 (2.9.1) 可看出波長大約在 10^{-12} cm 數量級，這和核的直徑大小相當。如果中子能量大約是 0.03 ev，那末可求出 λ 大約等於 1.7×10^{-8} cm。這樣，一個慢中子可以有接近整個原子大小的有效半徑*。即使能量達到 1000 ev，中子波長（或有效直徑）仍然在 10^{-10} cm 數量級；這比起核的直徑還大

* 由於慢中子的等價波長數量級為 10^{-8} cm，因此它象 X 射線一樣，可以被晶体散射。