

原子核结构

L. 艾森卜特 E. 維格納著 許国保譯

上海科学技术出版社

原子核結構

L. 艾森卜特 E. 維格納 著

許 國 保 譯

上海科學技術出版社

內 容 提 要

本书系根据美国普林斯顿大学出版社 (Princeton University Press) 和英国牛津大学出版社 (Oxford University Press) 联合出版的 Leonard Eisenbud 和 Eugene P. Wigner 著“原子核结构”(Nuclear Structure) 1958 年第一版,并参照苏联外国文献出版社 (Издательство иностранной литературы) 1959 年出版的俄文译本“Структура Ядра”译出的。

本书的主要目的是使读者熟悉有关核结构的现代观念,共分十二章:第一至第五章一般地讨论原子核的性质、核反应和核力;第六至第八章叙述各种核模型;第九至第十二章叙述核反应。可供已掌握量子力学并读过原子核物理学的读者阅读。

NUCLEAR STRUCTURE

Leonard Eisenbud

Eugene P. Wigner

原 子 核 结 构

許 國 保 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

上海洪兴印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 4 23/32 排版字数 107,000

1962 年 2 月第 1 版 1965 年 5 月第 8 次印刷

印数 6,501—7,800

统一书号 13119·451 定价(科六) 0.60 元

作者序

理論原子核物理学目前还呈现出很不完善的性质，不过它正在迅速发展中，我們希望可以希望它不久将会达到相当完整的境界。

現代核理論的不完善性是不难理解的。核子之間的作用力尚未充分明了而且显然具有复杂的性质。对数目很多而又不是无限多的粒子所組成的体系來說，即使相互作用形式簡單，也不易求得結果。因此，人們在原子核的簡單模型的探索方面費了很大力量，企图依靠这些模型来理解核性质的很多規律性。这种探索曾引起許多有益的、但仅有部分成就的模型的建立，它們对核結構观念的进一步发展及对实验研究的促进，帮助不少。可能希望以后的研究将闡明这些模型的局限性，并理解到为什么不同的模型分別适用于各組不同現象。

核理論的詳尽分析需要很大的篇幅。我們不打算把本书写得可以比得上 Blatt-Weisskopf 的“理論原子核物理学”或 Sachs 的“原子核理論”那样的标准和篇幅，而只准备为讀者介紹那些照我們看来对大部分核現象的分析都有用而重要的各种观点，在这些观点中讀者可以按自願選擇一种或几种作深入的钻研。但是，本书既沒有充分发展各种观点的数学基础，也沒有詳尽地列举支持这些观点的实验事实。甚至詳細的文献索引所要占据的篇幅也将超越本书現有的全部篇幅，因此我們必須請一些作者原諒，本书因篇幅限制，他們的著作或者未經提及，或者未曾恰当指出。本书的重点在于描述和

比較各种理論的原始假設,并对这些假設的少数結果作討論。本书大部分是非数学性的討論。

由于原子核物理学发展得很快,所以,这方面的著作必須迅速出版,才能对讀者有所助益。我們感謝普林斯頓大学出版社为迅速出版本书所作的努力。本书的資料最初是作为 Condon 所主編的大型“物理学手册”中的一章而編写的。这本手册的出版显然需要較长的時間,因此本书似乎有单独出版的需要。

俄譯本序

目前在原子核理論方面已有不少專門著作，但在所有這些著作中本書無疑占有獨特的地位。本書作者承擔了一個困難的任務：要根據最重要的實驗事實來簡短地敘述和分析原子核結構理論的基本假設。要知道，在短短的篇幅中，當然既不能提供原子核理論的數學基礎，也不能對支持各種討論到的核結構觀念的廣泛實驗資料作詳細的分析，又不容許列出詳盡的參考文獻。但是，這些方面並不在作者的任務之中。

本書的主要目的是使讀者熟悉有關核結構的現代觀念。資料的選擇和敘述的方法富有創造性；並大部分反映了美國物理學家 E. Wigner 的觀點，他是核理論中一系列主要論文的作者。因此本書就被選作翻譯的對象。

特別應當指出本書對各種核模型的良好分析。作者能夠很直觀地闡明各種核模型觀念與各種實驗數據相互對應的原因。對核反應一般理論的敘述也是很獨創的。

β 衰變理論和原子核電磁躍遷的理論僅從核結構觀點敘述。因此，最近發現在弱相互作用中的宇稱不守恆性所引起的 β 衰變理論的修正，對本書所討論的材料並無重大影響。

從書末參考文獻中所作的說明可以看出，作者在編寫本書時已經知道有關 β 衰變的最新重要結果。然而作者在正文中並未提及^①。這可能是因為本書對核理論的中心問題——核力和兩核子問題——所留的篇幅太少之故。

^① β 衰變理論的目前狀況，見總結性論文：Н. А. Смородинский, Усп. Физич. наук, 17, 1, 43 (1959)。

依据以上所指本书的特点，我們在俄文版的譯述中仅限于少数翻譯上的注釋和一些印刷錯誤的修正。任何对正文的重大补充或对参考文献的增添，并无意义^①。注釋方面基本上只涉及那些在英文版出书以后已經迅速变为陈旧的說法，主要是关于 β 衰变理論方面。

本书无疑将对广大物理学者是非常有益的，特别是高等学校的教师們，他們在材料丰富的核物理科目中要作适当的讲演已經历了不少的困难。本书可供已掌握量子力学并曾学过原子核物理学的讀者閱讀。

А. Бадин.

① 对願意更詳細研究本书所論各問題的讀者，可推荐 А. С. Давыдов 的书 (Теория ядра, Москва, 1958)，該书也有詳細参考文献。(此书我社亦在翻譯中，不久即可出版。——出版社注)

目 录

作者序

俄譯本序

第 一 章 原子核的基本特性	1
一、原子核的組成	1
二、核质量和結合能	3
三、不穩核的类型:天然和人为变化	5
第 二 章 穩定核的系統性;結合能面	12
第 三 章 原子核状态的性质;基态	18
一、自旋和核矩	18
二、核的尺度	22
第 四 章 核反应概要	26
一、核反应类型,截面,激发函数	26
二、共振过程	28
三、直接过程	31
四、最重要反应的表	32
第 五 章 两物体系統;核子間的相互作用	35
一、作用于核子間的力	35
二、飽和性和作用于核子間的力	39
三、核力与电荷的无关性;同位旋或同质旋的量子数	40
第 六 章 核模型 I: 均匀模型	45
一、一般說明	45
二、粉末模型与壳层模型	46
三、超多重項理論	47
第 七 章 核模型 II: 独立粒子模型	54
一、独立粒子模型或壳层模型的基本特性	54
二、 L - S 配合壳层模型	56

三、 $L-S$ 和 $j-j$ 壳层模型的比較	58
四、 $j-j$ 配合壳层模型	61
五、 $j-j$ 模型的配合法則	65
六、基态和低激发态	67
七、磁矩和四极矩	70
八、 $j-j$ 模型中存在的問題	72
第八章 核模型 III: 多粒子模型	77
一、 α 粒子模型	77
二、集体模型	78
三、 $j-j$ 模型与集体模型的比較	81
第九章 核反应 I: 近碰撞	84
一、碰撞矩陣	84
二、共振現象的定性討論	89
三、共振公式的推导	92
四、参数与內区尺度的关系	95
五、放射性	97
六、半透明晶球模型	98
七、中等耦合或寬共振模型	100
第十章 核反应 II: 表面反应	105
一、剝裂反应的角分布	106
二、电激发	111
第十一章 通过电子-中微子場的相互作用	114
一、 β 衰变理論	114
二、容許跃迁和禁戒跃迁	118
三、能譜的形状	120
四、总跃迁几率	121
第十二章 复核的电磁跃迁	124
一、引言	124
二、輻射跃迁	125
三、单粒子矩陣元素	129
参考文献	132

第一章

原子核的基本特性

一、原子核的組成

原子中存在有原子核的概念首先是由卢瑟福于1911年提出的。他指出，原子的正电荷和它除极小部分外的全部质量結集在半徑約为原子半徑的 10^{-5} 的核心中。不久又知道原子核的电荷 Ze 是电子电荷(电子的电荷为 $-e$) 的整数倍，而整数 Z 指定原子在周期表中的位置。湯姆孙(J. J. Thomson)指出(1913年)，原子核的质量并不由它的电荷确定；电荷相同而质量不同的原子核叫做同位素。設在质量的标度上使自然界分布最广的氧同位素原子质量等于16，則一切原子核的质量接近于整数。在这种标度上最接近于一个原子核的质量的整数 A 叫做这原子核的质量数。

原子核結構現代理論的起点是恰特維克(Chadwick)于1932年对中子的发现，以及此后立即由海森伯提出的关于原子核由中子和质子組成的假定^①。中子是不帶电的粒子，它的质量近似地等于氫原子的质量(质量数等于1)。具有电荷数 Z 与质量数 A 的原子核由 Z 个质子和 $N=A-Z$ 个中子組成。同位素就是质子数目 Z 相同而中子数目 N 不同的原子核。凡是原子核是同位素的原子实际上具有相同的化学性

① 关于原子核由中子和质子組成的假設亦由苏联物理学家 Д. Д. 伊凡宁科独立提出。——俄譯本注

质。中子数目相同而质子数目不同的原子核叫做“同中素”。組成原子核的基本粒子常籠統地称为核子。原子核中的核子数就是它的质量数,具有相同核子数(相同 A) 的原子核叫做同质素。我們有很多根据可以假定,原子核內的中子和质子性质大体上相同。因此同质素在核物理学中与同位素在原子物理学中具有同样重要的地位。为了在具有一定 A 的同质素中指出某一特殊的核,把 $T_z = \frac{1}{2}(N-Z)$ 这个数字用来估計原子核中中子多于质子的数目,这数字在理論工作上用处很大。

用来表征原子核的組成,显然只要取四个数字 A, Z, N, T_z 中的任何两个数字。一般采用 Z 和 A 作为符号;数字 Z 用元素的化学符号来表示,而数字 A 則記为上指标。例如 $Z=79, A=197$ 的原子核由符号 Au^{197} 表示。有时也把电荷数記作下指标: Au_{79}^{197} 。

对已知的原子核來說, Z 和 A 的数值范围是 Z 从 $Z=0$ (中子) 扩展到 $Z=101$; 而 A 从 $A=1$ (质子, 中子) 扩展到 $A=256$ 。

在表 1 中举出核子的一些特性:

【表 1】

粒 子	质 量	电 荷	自 旋	磁矩(核磁子数)	統 計
中 子	1.00898	0	1/2	-1.9135	費 米
质 子	1.00759	e	1/2	2.7928	費 米

质量以 $O^{16}=16$ 为标度。磁矩以核磁子数 ($eh/2M_p c$, 此处 M_p 为质子的质量) 表示。在普通的原子量表中的原子质量用原子的通常质量表示,就是原子核的质量加 Z 个电子的质量或 $548 \times 10^{-6} Z$ 。

已知的稳定原子核的数值 Z, N 在塞格尔 (Segre) 图上 (图 3) 表出。在此图中, 同位素并列在横平綫上, 而同中素則并列在豎直綫上。我們將在第二章中再討論图中結構的意义。

二、核质量和結合能

把原子核分裂为組成它的各个核子所需的能量叫做核的結合能, 并用 B 表示。依据爱因斯坦的质能关系式, 結合能可以表示为核质量和組成它的核子的质量总和之間的差額。如果把這個质量差額 (所謂核的质量亏损) 表示为 ΔM , 則 $B = \Delta M \cdot c^2$ (此处 c 为光速)。因此, 如果我們用 $M(Z, N)$ 表示具有 Z 个质子和 N 个中子的中性原子的质量, 而用 M_H 和 M_n 分別表示中性氢原子和中子的质量, 則結合能可用下列式子表示:

$$B(Z, N) = [M_H Z + M_n N - M(Z, N)] c^2.$$

在这关系式中, 我們不用质子的质量而用中性氢原子的质量 M_H , 由此也估計到中性原子质量中的电子质量。 B 的数值通常用兆电子伏 Mev ($1Mev = 10^6 ev$) 为单位来度量。在 O^{16} 标度下的质量单位与以 Mev 为单位的能量之間的关系为:

$$1 \text{ 质量单位} = 931 \text{ } Mev.$$

在图 1 中作出对稳定核的每个核子的結合能 B/A 与数字 A 的关系图示。对中間核和重核來說, 每个核子的結合能近似地不变并且約为 $8 \text{ } Mev$ 。这种情况与每一电子在原子中的結合能有截然的不同, 每个电子的結合能随着中性原子中电子数目的增大而不規則地增加。对核的結合能來說, 情况有些象固体或液体, 它們对汽化所需的热量与被汽化的质量成正比。

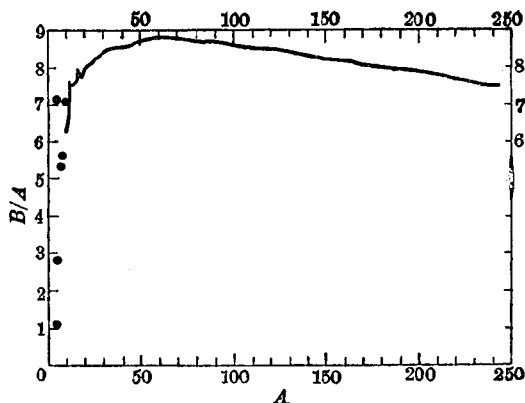


图1 稳定原子核的结合能。纵坐标为每个核子的结合能，以 MeV 为单位，横坐标为核子数 A 。

除了结合能 B 或每个核子的结合能 B/A 外，还可以引入一个有用的特性：所谓核子（中子 n 或质子 p ）或复合核粒子（氦核 He_1^2 ， α 粒子 He_2^4 等）从原子核中分裂出来的“脱出”能。粒子 b （核子或任何核粒子）的“脱出”能等于使原子核分裂为两部分，其中之一为粒子 b ，所需的最小能量。如果用指标 r 表示分裂后所得的原子核，那么脱出能可以写出如下：

$$S_b = [M_b + M_r - M(N, Z)]c^2.$$

脱出能表达出原子核对于放射核子或核粒子的变化的相对稳定性。

中子和质子的脱出能 S_n 与 S_p 在数量级上与稳定核每个核子的结合能相同。 α 粒子 (He_2^4) 的脱出能 S_α 对中等质量数 A 的原子核来说约为 5 MeV 。对不稳定的 α 放射性原子核，量 S_α 是负的（参阅第三节）。

上文提出，量 B/A 随着 A 的变化不大，因而可以假设原子核的性质类似于液体或固体的性质。但是，量 S_b 的起伏指

出这种比拟的不完全性。詳細考察稳定核的脫出能 S_p 和 S_n 对 Z 和 N 的函数关系,可以发现一些不規則性,和稳定原子的电子脫出能(电离能)所有的情况相似。例如中子从 Si^{28} 的脫出能等于 17.2 Mev ; 质子从 N^{13} 的脫出能等于 1.95 Mev 。不过这两种情况是例外的;总的說来,脫出能 S_p 和 S_n 的起伏沒有原子电离能的起伏那样显著(參閱第二和第七章)。脫出能 S_p 和 S_n 的最大数值 (20 Mev) 是对 α 粒子 (He_2^4) 观察得到的;因此核 He_2^4 十分稳定。

三、不稳核的类型: 天然和人为变化

某些在自然界中遇到的原子核經歷天然的变化。例如 $Z > 82 (\text{Pb})$ 的天然放射性物质放射 α 粒子、电子或电磁輻射 (γ 射綫) 而經歷变化。这些过程通常分別称为 α 、 β 和 γ 衰变。天然变化不仅为重原子核所具有。例如 K^{40} 也放射电子; 这个原子核还可能用吸收軌道电子—— K 俘获过程 (由于是原子的一个 K 电子被吸收)——的方式来发生变化。

在核反应中也可能形成不稳原子核。这里可能产生这样的核,它随后經歷变化,陪随着放射正电子或負电子或俘获軌道电子。在碰撞过程中也可能形成激发原子核,它随后放射 γ 射綫。此外还可能实现这样的原子核状态 (生命期一般很短,参考后文),它以放射中子、质子或 α 粒子为特征。

所有以上叙述的变化类型可以用一种变化几率或衰变几率来标志,这几率就是体系在单位時間內由始态变到終态的几率。这几率的倒数确定了始态的生命期。生命期的意义是: 在这时期內始态的存在数目减小到它的原先存在数目的 $1/e$ (e 为自然对数的基)。放射几率 λ 通常不用生命期的倒数来表示而是用能級寬度表示; 能級寬度 Γ 可以看作不稳态的

能量所具有的不确定性，它与平均生命期 $\bar{\tau} = \lambda^{-1}$ 之間由海森伯的测不准关系 $\lambda = \Gamma / \hbar$ 联系。 Γ (以 ev 为单位) 与 λ (以秒⁻¹ 为单位) 之間的关系式是 $\Gamma = 0.65 \times 10^{-15} \lambda$ 。始态物质的量衰变到半数所经历的时间叫做半衰期；它是 $\tau_{\frac{1}{2}} = \bar{\tau} \ln 2 = 0.693 \bar{\tau}$ 。下文将讨论原子核各种衰变类型的基本特性。

1. 天然 α 放射性；裂变

α 衰变的生命期具有很广的范围。生命期与放射的 α 粒子的能量有重要关系。例如 Th^{232} 在 α 粒子能量为 4 Mev 时的生命期约为 10^{10} 年；而 Po^{212} 的对应数值却为 9 Mev 和 3×10^{-7} 秒。

生命期与能量之間的关系不难依据穿透势垒的概念来说明。我們考察 α 粒子的势能作为离衰变后余下的原子核中心的距离 r 之函数。在远距离处，势能起源于静电作用。当 r 减小时，势能按照 r^{-1} 的规律增加。在数量级相当于 (或小于) 原子核半径的距离下，相互作用不再是纯粹静电性。严格地说，在这样小距离下，关于粒子势能的概念一般失去意义，因为在原子核里面， α 粒子不再保持它的独立性和结构。然而我們仍将认为 α 粒子即使在余下的原子核里面也在某种有效势场中运动。在某一距离下，吸引性的核力开始掩盖静电力，这时有效势能将具有如图 2 所示的形状。要从原子核中脱出， α 粒子必须通过静电势垒，就是说，它一定要经过势能大于 α 粒子总能量的区域。依据穿透势垒的理论，不难理解 α 粒子的能量与不稳原子核的生命期之間的关系 (第九章，第五节)。

上述静电势垒的高度和宽度与假定的原子核半径数值大有关系。这半径也就是静电力被作用于核内的核力所掩盖的尺度，它又强烈地影响到穿透势垒几率的理论计算结果。因

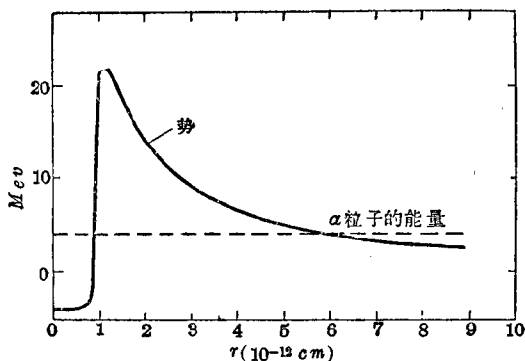


图2 α 粒子的势能与离原子核中心的距离之间的函数关系(示意图)。势能以 Mev 为单位; 所示 α 粒子的能量是一个典型蜕变能的例子。

此, 比較生命期的理論預測数值及实际观察数值, 可以确定 α 放射性核的半徑。

还应注意的, 許多重元素的 α 粒子脫出能是負值, 但不表現 α 放射性。原因是当可以射出的 α 粒子能量很低时, 势垒的作用十分有效, 以致衰变几率小到这种过程不能察見的程度。

每一核子的結合能曲綫还指出重原子核的另一种不穩类型。这种原子核的质量大于它被分裂为两部分时所得的两原子核的质量总和。因此, 可能有重核的裂变过程, 就是說, 它分裂为近似相等的两部分, 同时放出巨大的能量 (約 $200 Mev$)。但是, 阻碍这种过程的势垒极高, 所以分裂的衰变几率很小。对于最重的原子核来說, 在几个 Mev 能量的激发下, 原子核就可轉变到高于势垒的状态, 而裂变在极短時間內发生。

2. γ 輻射; 粒子的发射

如果稳定原子核处于激发态, 但激发能不足以放射粒子,

則它以发出电磁輻射的方式回到正常态。这种过程的生命期对从始态跃迁到終态时的自旋变化十分敏感(对能量的关系在这里不很重要,不过能量变化較大的跃迁要容易一些)。設自旋 J 在跃迁中变化不大,就是說, $\Delta J \leq 2$, 則 γ 輻射的生命期数值約从 10^{-17} 到 10^{-10} 秒。对于具有小能量和大自旋变化的跃迁,生命期可能异常巨大。对 $\Delta J = 4$ 而跃迁能量約为 0.1 Mev 的情形,生命期可以达到数年。如果原子核的第一激发能級的生命期很长,那么原子核的这种激发态叫做異能态。

仅对放射 γ 射綫不穩的状态与兼对放射粒子不穩的状态之間作出区别,在实际上十分重要。从理論上來說,两种过程都有可能性,各有各的几率而已。对輕元素來說,粒子的放射如果在能量上可能的話,几率常远大于放射 γ 射綫而后者可以略去。这种情况也适用于較重元素的放射中子,除非中子放射只是处于“仅仅可能”的情形,就是說射出中子的能量小于数千电子伏。但是,从重原子核放射“小能量”带电粒子,由于势垒的存在而很不可能,以致放射 γ 射綫一般是更为可能的过程。

现在把衰变的总几率規定为原子核对各种衰变过程 (γ 輻射,各种粒子的放射)的衰变几率总和;那么状态的总寬度等于各种过程的分寬度的总和(第九章)。

作为对放射粒子的不穩原子核的例子(天然放射性元素除外),可以举 Be^8 , 它衰变为两个 α 粒子,或 He^3 和 Li^5 , 它們分別衰变为 α 粒子与中子和 α 粒子与质子。并且对每一原子核來說,也存在有激发能足够大的那种激发态,这时可能从原子核中放射出它的某些組成部分。

3. β 衰变

在理論上和实验上最重要的原子核不穩性类型,无疑是