

原子核理论 导引

[英] L. R. B. 爱尔顿 著

上海科学技术出版社

53.83
484

原子核理論導引

〔英〕L. R. B. 愛爾頓 著

華東師範大學原子核理論教學小組 譯

許國保校

215.83/0.8

上海科學技術出版社

內 容 提 要

本书在較淺的数理基础上叙述了原子核理論的概况。第一、二章論証原子核的主要事实及一般性质,第三、四章討論核力,第五章討論核模型,第六至第九章討論各种核反应和核蜕变的理論,最后第十章略述核力的介子理論。本书对量子力学的計算方法叙述頗詳,所以具有初步量子力学知識的讀者,不难理解本书。每章附有习题可供讀者进一步思考以巩固所学习的内容。

本书由华东师范大学物理学原子核理論教学小組譯出,其中袁运开譯第一、五章,潘植鏞譯第二、三、四、九章,黃宇权譯第六、七、八章,戎象春譯第十章,最后由許国保先生校閱全文并补譯正文外其余篇章。

INTRODUCTORY NUCLEAR THEORY

L. R. B. Elton

Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., 1959

原 子 核 理 論 导 引

华东师范大学原子核理論教学小組 譯

許 国 保 校

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許可証出 093 号

上海洪兴印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印張 9 16/32 排版字数 250,000

1965 年 12 月第 1 版 1965 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—1,600

統一书号 13119·685 定价(科六) 1.40 元

作 者 序

原子核物理学的困难在于它不是一门依据逻辑发展的学科，而是许多问题的集合。因而不可能从一些基本原理出发来推导全部知识。这使得它成为一门既难教又难学的科目。

本书起源于作者八年来在伦敦金斯学院 (King's College) 对物理研究生所作的讲稿。我曾企图克服一些在讲授中所遇到的难点，特别企图尽量少用象“不难证明”那样使人迷惑的成语。我未能完全避免这一成语，但一般都指出不难查阅的参考资料。我在一个时期曾想把一些较长的数学计算放入附录，但是没有这样做，因为很少读者会去阅读附录，而且按照我的经验不通过数学工作是难以理解物理内容的。我对原始文献的参考所举不多。以前的一些重要著述列于书后，这是每一读者应该知道的；但是，除此以外，我主要举一些指出本书所引数据的实验性论文以及极少数扩充理论观点的论文。在本书最后一页所举的一些书籍和综合性评述中有对原始文献的详细参考表。

L. R. B. E. 倫敦, 1958

基 本 常 数

现代物理学中的四个基本常数将在本书中始终用同样符号表示,它们是:

电子质量, $m_e = 9.109 \times 10^{-28}$ 克

质子电荷, $e = 4.803 \times 10^{-10}$ 静电单位

光速, $c = 2.998 \times 10^{10}$ 厘米/秒

普朗克常数除以 2π , $\hbar = 1.054 \times 10^{-27}$ 尔格·秒.

目 录

作者序

基本常数

引言1

第一章 原子核的定性事实3

1.1 基本粒子3

1.2 原子核的大小、质量和电荷5

1.3 结合能7

1.4 稳定性9

1.5 核反应10

1.6 不稳定核12

1.7 核力16

1.8 介子18

1.9 粒子与反粒子18

1.10 习题20

第二章 原子核的一般性质21

2.1 结合能21

2.2 核的半径24

2.3 角动量和磁矩29

2.4 电四极矩34

2.5 全同粒子36

2.6 宇称41

2.7 自旋算符42

2.8 同质旋45

2.9 习题48

第三章 低能双核子系统50

3.1 引言50

3.2 质心坐标系和实验室坐标系	50
3.3 粒子束在有心力场中的散射	54
3.4 氘核的基态	59
3.5 中子被自由质子所散射	65
3.6 氘核的单重态	69
3.7 束缚在分子中的质子对中子的相干散射	71
3.8 质子-质子散射	75
3.9 核势的形状无关性	78
3.10 习题	81
第四章 核力	83
4.1 中心力和非中心力	83
4.2 氘核在非中心力作用下的基态	86
4.3 与同质旋有关的力	90
4.4 交换力	92
4.5 高能二体散射	95
4.6 多体力	100
4.7 习题	102
第五章 核模型	104
5.1 引言	104
5.2 退化气体模型	104
5.3 半经验质量公式	108
5.4 液滴模型	114
5.5 α 粒子模型	116
5.6 壳层模型	119
5.7 集体模型	130
5.8 习题	131
第六章 核反应	133
6.1 引言	133
6.2 最大截面	134
6.3 逆过程	136
6.4 复核	138

6.5 具有明确界面的核	140
6.6 共振散射	141
6.7 連續理論	148
6.8 光学模型	151
6.9 极高能量的吸收截面	156
6.10 习题	158
第七章 核蜕变	159
7.1 核的不稳定性	159
7.2 杰夫累斯的近似法	161
7.3 穿透矩形势垒的問題	163
7.4 α 蜕变	169
7.5 裂变	173
7.6 习题	174
第八章 核与电磁場的相互作用	176
8.1 依赖于时间的微扰理論	176
8.2 輻射的吸收和发射	185
8.3 多极跃迁	190
8.4 选择定則	198
8.5 氘核的光致蜕变	200
8.6 质子对中子的輻射俘获	206
8.7 习题	208
第九章 β 衰变	210
9.1 相对論波动方程	210
9.2 β 衰变 (描述性的)	216
9.3 允許跃迁的能譜形状	222
9.4 宇称不守恒	228
9.5 允許跃迁的选择定則	230
9.6 禁戒跃迁	235
9.7 耦合常数	236
9.8 习题	238

第十章 核力的介子理論	240
10.1 湯川理論	240
10.2 π 介子的性质	248
10.3 質标量介子理論	254
10.4 习题	260
原子核常数表	262
参考文献	295
进修讀物	296

引 言

原子核物理学虽可看作原子外圍物理学的一种邏輯推广，但在两个极重要方面与后者不同。第一不同点在于这两組現象所包含的距离和能量各有十分巨大的差异。核物理学所討論的距离仅及原子物理学中的距离的百万分之一而前者的能量又为后者的能量的百万倍。既然量子力学已經指出，从描写宏观現象，也就是大尺度現象，十分成功的經典物理学导出的概念和模型，即使在原子物理中常常不起作用或甚至引入迷途。在核物理学的領域中，我們的想象力和直观能力归根到底要把新現象联系到已經熟知的現象来理解，可能这将是更不可靠的向导。学习現代物理的巨大困难之一，是当我们第一次遇到这门学科时，我們的思想，不仅在教室和實驗室中，而也在日常生活中，已經約有二十年受到經典物理学观念的制約。从我們开始感觉到我們的周圍而把我們的宏观指头塞到我們的宏观嘴里的时刻起，我們一直与經典物理学賴以构成的大多数“柱石”有直接的物理接触。另一方面原子和原子核世界却是我們的感覺所不能直接觉察的，而我們从观察推得的物理事实，一般在邏輯思維上要比經典物理学的情况远离观察好几步。所以虽然十九世紀的物理学主要以工程概念为依据，而二十世紀的物理学却依据数学观念，是不足为奇的。这些数学观念在其本性上并非經驗的直接产物。如果这在原子物理上已經正确的話，它在原子核物理学中将更正确多少呢！

核物理学与原子物理学不同的第二个方面在于物理工作者而不在物理学本身，因而可以希望由此发生的一些困难将有消除的一天。在能够建立起描写一組物理現象的合理綱領之前，必須先知道控制这些現象的規律。建立这样一个綱領的三个阶段很好地由万有引力定律的发现表明。帝谷·布拉赫收集了关于行星运动

个别观察的大量数据，而开普勒整理了这些数据并从它们导出他的三个定律。但是直到牛顿才提出了他的万有引力定律然后能建立起合理的纲领。这定律不象开普勒定律那样是从实验推出的而实际上是感悟的推测。

现在，在原子外围的物理学中，一切基础已经知晓。粒子间的力是通常的静电库仑力，规律是量子力学的定律。在核物理学领域中情况很不相同。在这里我们不知道力的规律，而只能假定（虽然也可能不错）量子力学的定律适用，事实上，我们几乎比帝谷·布拉赫阶段没有进展多少。第二阶段，就是企图用经验定律来统一一系列实验数据并从而推出理论，现今被称为唯象方法，而且正在活跃进行并已有许多成就。第三阶段，用感悟的推测来发现核力的定律，引到介子理论。这一理论如此复杂，以致很难获得定量的预言；虽然与实验结果的定性符合往往是很好的。因此，这理论的正确性现在尚未能够断言。

本书几乎完全采取唯象的描述方法，所以我们将要一再参考实验结果而只是在最后一章中略述纯粹理论的方法。事实上，我们的理论“大厦”，如果不在许多地方由实验“柱子”和“掌杆”来支持的话，是完全不能站立的。假如我们采用了纯粹理论方法，我们有可能成功地建立起一所能够自立的建筑物。但是当我们将退后几步来欣赏它的时候，我们将看不见多少。它将笼罩在核物理的云雾中，这云雾可能还要等待许多时间才能消散。

第一章将对以后各章所要更深入讨论的各方面先作一鸟瞰。因为在唯象方法中，为了理解核物理的任何一部分，必须具备全部分的一些知识，而我们希望这一方法使有可能避免在书的前文中作许多对后文的参考。

第一章 原子核的定性事实

1.1 基本粒子

某些粒子, 如果不需要考虑其内部结构, 而可以把它看作具有某些固定的物理性质(如质量和电荷)的几何点, 我们就认为这些粒子是基本的。按此定义, 经典力学的基本粒子是分子, 经典化学的基本粒子就是原子。

在原子核物理中, 基本粒子按照质量的大小可以分为三组, 虽然这种分法初看起来好象是基本的, 但实际并不如此。

(a) 轻粒子, 称为轻子。这里我们有正电子和负电子, 它们的质量都是 m_e , 分别具有 $+e$ 和 $-e$ 的电荷; 而中微子是质量远小于 m_e 并且可能为零的中性粒子。这里还有光子, 它是电磁场的量子, 既没有静止质量, 也没有电荷。

(b) 重粒子, 称为重子。其中最轻而我们将在以后讨论的是质子与中子, 它们的质量并不完全相等, 中子质量稍大, 但在数量上都约为 $1840 m_e$, 质子的电荷是 $+e$, 中子是中性的。其他我们在后面没有讨论到的是那些很不稳定而易于迅速衰变为质子或中子的重子。

(c) 质量介于这两者之间的是介子。这里有好几种, 我们将限于只讨论最熟知和研究最详的二种: μ 介子和 π 介子。它们可以具有电荷 $+e$ 或 $-e$, 也有中性的 π 介子。中性 μ 介子的存在还没有确定, 它也许并不存在。应当指出, μ 介子除质量外, 在性质上更接近于电子而不接近于 π 介子, 由于这个原因, 它也常被列入轻子一类。

除质量和电荷外, 基本粒子还有两种很重要的性质: 自旋角动量和磁矩。但是我们必须防止作出草率的结论: 由于一个基本粒子具有自旋, 我们就必须认为它围绕自身的一个轴旋转, 而且必然

具有一定的半径,因为一点围绕自己而旋转是一个无意义的概念. 这样的结论是我们宏观概念的一个不可靠的推广. 我们必须简单地接收这样的事实,就是某些实验只有在基本粒子具有自旋与磁矩的假定下才能说明.

对负电子来说,这些事实来自光谱线的一些观察,特别来自双线的存在,例如钠的 D 双线,以及反常塞曼效应的存在. 这些事实表明负电子具有大小为 $\hbar/2$ 单位的自旋角动量和 $\mu_e = -e\hbar/2m_e c$ 的磁矩. 量 $e\hbar/2m_e c$ 称为玻尔磁子. 负号表明自旋矢量与磁矩矢量的方向相反. 这些事实也是电子的狄拉克(Dirac)相对论方程的必要结论.

相似的实验导致质子与中子也有内禀自旋 $\hbar/2$ 的结论,但是它们的磁矩却与所期望的数值 $\mu_p = e\hbar/2M_p c$ 和 $\mu_n = 0$ 不同. 它们的实验数值是

$$\mu_p = +2.7927 \text{ 核磁子,}$$

$$\mu_n = -1.9131 \text{ 核磁子,}$$

这里一个核磁子是 $e\hbar/2M_p c$. 所以当自旋指示核子可能服从狄拉克方程时,其磁矩则表明它们不可能是象负电子一样的简单粒子.

关于其他基本粒子的自旋和磁矩的问题,不能在此讨论,但为了完整起见,将自旋和基本粒子的其他性质一起列于表 1.1.

表 1.1 基本粒子

名 称	记 号	质 量 (以 m_e 为单位)	电 荷 (以 e 为单位)	自 旋 (以 $\hbar$ 为单位)
光 子	γ	0	0	1
中 微 子	ν	<0.002	0	$1/2$
电 子	$e^\pm$	1	+1或-1	$1/2$
μ 介 子	$\mu^\pm$	207	+1或-1	$1/2$
π 介 子	$\pi^\pm$	273	+1或-1	0
中性 π 介子	π^0	264	0	0
质 子	p	1836	1	$1/2$
中 子	n	1838	0	$1/2$

1.2 原子核的大小、质量和电荷

在原子中心存在一个尺度很小、质量大而荷正电的原子核是首先由卢瑟福(1911)证实的。他用 α 粒子轰击薄金属层,并观察 α 粒子由于薄层散射而偏转的角度, α 粒子就是他以前曾经指出的经过两次电离的氦原子。他发现有效的偏转力是库仑斥力 $2Ze^2/r^2$,此处 Z 是散射元素在周期表中的序数。并且一些散射角指出 α 粒子曾经穿入距原子中心约 10^{-12} 厘米处。这表明它们曾经对直穿过了半径约为 10^{-8} 厘米的原子。另一方面,对于差不多是正面碰撞的情况,这时接近原子核的距离,甚至小于 10^{-12} 厘米,那么就可观察到对库仑定律的偏离。因此,原子核具有一定大小,并且必须包含原子的几乎全部的质量,否则 α 粒子将为原子的外部区域所偏转。最后整个原子是中性的,由于原子核具有电荷 $+Ze$,因此它由 Z 个负电子在半径为 10^{-8} 厘米数量级的范围内环绕着。原子内部的空虚程度几乎是不可想象的。原子常被比作行星系统;但是,如果将原子核的质量与大小放大到象太阳一样,则电子的质量将象地球的质量,而电子至原子核的距离将十倍于最远行星与太阳间的距离。因此,在原子中密度随距离的变化将远较在太阳系中为大。

其次, J. J. 汤姆孙(J. J. Thomson 1913)发现,虽然大体上原子核的质量随着电荷的增加而增加,但是原子核的质量并不由它的电荷单值地确定,常有几种不同质量相当于同一电荷。这样一些原子核的周围当然有相同数目的电子。因为轨道电子使两个原子的核不能相互接近,原子核并不参与原子间的相互作用,因此一个原子的化学性质完全决定于其电子数目,即决定于电荷数 Z 。这样汤姆孙发现,构成一种元素的化学纯物质,其原子并不全具有相同的质量,这样的原子称为同位素。正如相同形式的原子被称为属于相同元素一样,属于相同形式的原子核也称为属于同一核素。

任何同位素的质量很接近于质子(它是氢原子的核)质量的整

数倍(实际上质量的原子单位并非取质子质量,而是取质量差不多等于质子质量 16 倍的氧同位素质量的 $1/16$, 这样, 整数倍規則更近似正确. 至于为什么要另选质量单位的理由将在 2.1 节中說明). 因此, 核素由质量数 A 与电荷数 Z 标明, A 是核的质量以原子单位来量度时的最近整数. 原先曾設想一个原子核含有 A 个质子, 以給出它的正确质量; 并有 $(A-Z)$ 个負电子, 以給出它的正确电荷. 但是我們現在知道原子核中不能存在負电子而核含有 Z 个质子, $N=A-Z$ 个中子. 一种化学元素 X 的核素, 如果其质量数与电荷数分別为 A 及 Z , 則可用記号 ${}^AX^Z$ 表示, 例如氫(超重氫: $A=3, Z=1$) 可表示为 ${}^3\text{H}^1$. 通常左边的数字可以省去, 因为事实上核已完全由記号 X^A 决定. 质子与中子在不需要区别时統称核子.

在一个輕核, A 差不多等于 Z 的两倍, 因此质子和中子的数目近于相等, 但当 Z 增加时, 比值 A/Z 也增加, 以致在重核中这比值超过 2.5. 这表明中子超过质子, 我們將看到, 这一原因是由于质子带电, 它們将相互排斥; 而中子是中性的, 不相互排斥, 因而較质子更牢固地受到使原子核結合起来的核力的束縛. 核力的性质将为本书的主要研究内容之一.

我們已經讲到同位素的存在, 它們是具有相同的 Z 和不同的 N 的核素. 具有相同 N , 但 Z 不同的核素称同中素(同中子异荷素)(等质子——同位素, 等中子——同中素). 具有相同 A , 不同 N 及 Z 的核素是同質素(同量异位素). 从原子核物理学的观点来看, 它們相互間是很相似的, 因为它們都具有相同数目的核子, 但从化学观点来看, 同位素是彼此相似的. 最后, 我們可以有相同的 A , N 和 Z , 但它們的內能彼此不同. 它們和受激原子相似, 在受激原子中一个或更多的电子具有过剩的能量, 在回复到它們的非激发态时, 作为光量子放出(观察为光譜綫). 同样, 受激原子核是不穩的, 在轉变到稳定态时放出一个光量子, 我們知道在这种关系中它就是 γ 射綫. 然而, 原子不能在任何可察見的時間內处于激发态, 而一些受激核素則具有好几小时的寿命. 处在激发态的原子核 X

用 X^* 表示, 而长寿命的激发态称为异能素。

1.3 結 合 能

組成一个稳定核的粒子受强吸引力的作用而結合在一起, 因而要使它們彼此分开, 直至相隔很大的距离, 必須作功。換句話說, 要使原子核分离为它的各个組成部分, 必須对原子核供应能量, 因此当組成部分相隔很大距离时, 其总能量大于它們形成原子核以后的能量。問題是这能量将采取什么形式。

回答这問題的綫索在于狭义相对論中的质能关系式:

$$E = Mc^2 \quad (1.1)$$

此处 E 和 M 分别为一个粒子的能量和质量, 而 c 是真空中光速。这表明质量是能量的一种形式(此处正确的理解是: 物质具有一定的质量也就具有与此一定质量相应的能量——譯者注)。因此我們預料到原子核的总质量小于組成部分的质量之和, 事实确实如此, 有关原子核的實驗已經很精确地証实了(1.1)式。

原子核的质量 M 和它的組成部分分离时总质量之差称为质量亏损, 或者如果用(1.1)式将它轉換为由能量表示, 就称为原子核的結合能。

$$B = (NM_n + ZM_p - M)c^2 \quad (1.2)$$

式中 M_p 是质子的质量, 而 M_n 是中子的质量。由于原子核被无穷远分散时的状态作为能量的零点, 因此原子核的总能量应为 $-B$ 。

結合能与质量亏损当然不仅为原子核所特有, 原子中的电子, 分子中的原子, 晶格中的分子都具有結合能, 但是这些能量都很小, 以致它們的质量当量不能由实验来验证。

我們現在必須回到质量与能量的单位問題上。原子质量单位 Mu 規定为氧的中性同位素 O^{16} 的质量的 $1/16$ 。它略不同于化学上的定义, 在那里是以出现在自然界中稍混杂有 O^{17} 和 O^{18} 的氧为基础的。因此, 化学原子质量单位是物理原子质量单位的 1.000272 倍。

认清质量标准不是原子核 O^{16} , 而系中性原子 O^{16} , 即核与圍繞它的八个电子, 是很重要的。理由当然由于要决定一个被剥去

电子的氧核的质量是不可能的。由于电荷守恒定律，描写核反应的方程式两边电子的数目是相同的，因此它们的质量相消，而在引用中性 O^{16} 作标准时，并不会带来什么麻烦。例如在(1.2)式中 M 采取中性原子的质量，而 M_e 则系中性氢的质量。这里有一个例外，就是那些包含正电子的方程，由于加一正电子和负电子于方程式的一边时，质量有改变而电荷却不改变(参看 9.2 节)。此处我们略去负电子在不同原子中的结合能的差异，但当其转换为质量亏损时，这差异将小到远在实验误差范围之外。

能量的原子单位是电子伏(eV)，它是一个电子由 1 伏特电势差加速时所得的能量，此单位的倍数是

$$\begin{aligned} 1 \text{ keV ("千电子伏")} &= 10^3 \text{ eV} \\ 1 \text{ MeV ("兆电子伏")} &= 10^6 \text{ eV} \\ 1 \text{ GeV ("千兆电子伏")} &= 10^9 \text{ eV}. \end{aligned}$$

在美国一个“billion”是 10^9 ，GeV 写为 BeV。

原子单位和 c. g. s. 制的关系可从阿伏伽德罗常数， $N = 6.025 \times 10^{23}$ 每克分子，电子电荷 $e = 4.803 \times 10^{-10}$ 静电单位，和光速 $c = 2.998 \times 10^{10}$ 厘米/秒的知识来计算。原子质量单位以克表示时系阿伏伽德罗常数的倒数：

$$1 \text{ 原子质量单位 (Mu)} = 1.660 \times 10^{-24} \text{ 克},$$

$$\text{又因} \quad 1 \text{ 伏特} = 1/300 \text{ 静电单位},$$

$$\text{所以} \quad 1 \text{ eV} = 1.601 \times 10^{-12} \text{ 尔格}.$$

由(1.1)式得出 1 Mu 的能量当量：

$$1 \text{ Mu} = 1.49 \times 10^{-3} \text{ 尔格} = 931 \text{ MeV}.$$

在这些单位中电子的质量是 0.000549 Mu，它相当于 0.511 MeV。

我们现在可以描述一个能够证明(1.1)式的反应。如果锂受到慢质子的碰撞，它按照下列反应：



蜕变为两个动能各为 8.6 MeV 的 α 粒子。这些原子核的质量用 Mu 作单位是

$$\text{Li}^7 = 7.01822, \text{H}^1 = 1.00814, \text{He}^4 = 4.00387.$$