

原子物理学

殷传宗 主编
莫敦庸

下 册



YUANZI WULI XUE

广西师范大学出版社

原子物理学

殷传宗 莫敦庸 主编

韦快乐 肖源金 莫树春 杨永柏

柳继锋 赵政鸿 刁纯钰 编

广西师范大学出版社

原子物理学

(全二册)下册

殷传宗 莫敦庸主编

☆

广西师范大学出版社 出版

(广西桂林市三里店)

广西新华书店发行

广西师范大学印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 9.0625 字数: 194千字

1987年6月第1版 1987年6月第1次印刷

印数: 1—7,550册

ISBN 7-5633-0002-3/O·002

统一书号: 13502·002 定价: 1.50元

目 录

(下册)

第五章 原子核的基本性质	(1)
§ 5.1 原子核的电荷、质量、大小.....	(1)
§ 5.2 原子核的角动量和磁矩.....	(5)
§ 5.3 原子核的组成 同位素.....	(10)
§ 5.4 原子核的电四极矩, 宇称和统计性质.....	(15)
§ 5.5 原子核的结合能.....	(21)
§ 5.6 核力的性质.....	(24)
小 结.....	(28)
思考题.....	(29)
习 题.....	(30)
第六章 原子核的衰变	(32)
§ 6.1 原子核的衰变规律.....	(33)
§ 6.2 α 衰变.....	(41)
§ 6.3 β 衰变.....	(49)
§ 6.4 γ 衰变.....	(59)
§ 6.5 穆斯堡尔效应.....	(62)
§ 6.6 射线的探测方法.....	(67)
§ 6.7 放射性同位素的应用.....	(76)

小 结	(79)
附 录 四个放射系表	(80)
思考题	(85)
习 题	(85)
第七章 原子核的结构模型	(87)
§ 7.1核液滴模型	(87)
§ 7.2原子核的壳层模型	(92)
§ 7.3原子核的综合模型	(103)
小 结	(107)
思考题	(108)
习 题	(109)
第八章 原子核反应和原子核能	(110)
§ 8.1核反应的守恒定律和分类	(110)
§ 8.2核反应中的能量	(115)
§ 8.3核反应截面	(125)
§ 8.4核反应的机制	(130)
§ 8.5原子核裂变	(137)
§ 8.6原子核聚变	(154)
§ 8.7粒子加速器	(169)
小 结	(181)
思考题	(184)
习 题	(185)
第九章 粒子物理	(188)
§ 9.1宇宙射线	(189)

§ 9.2基本粒子的相互作用和分类·····	(192)
§ 9.3基本粒子的性质·····	(205)
§ 9.4对称性原理和守恒定律·····	(208)
§ 9.5强子结构的层子模型·····	(216)
§ 9.6相互作用的统一·····	(223)
小 结·····	(228)
思考题·····	(230)
习 题·····	(231)
习题答案·····	(232)
附录I 核素常用数据表·····	(235)
附录II 常用物理常数·····	(274)
附录III 动量守恒定律在微观领域中的应用···	(276)

第五章 原子核的基本性质

前几章主要讨论原子中电子的分佈及其运动规律，成功地解释了原子和分子光谱。从本章开始，介绍下一个层次原子核的性质、结构、变化规律，并简要介绍粒子物理的一些基本知识。

作为原子核物理学的开始，我们首先介绍原子核处于静态时的一些基本性质。例如：核电荷、核质量、原子核的角动量和磁距、原子核的结合能和核力等等。原子核的这些性质，与原子核的结构有着密切的关系，它是学习以后几章的基础。我们应当牢记它们。

§5.1 原子核的电荷，质量，大小

一、原子核的电荷

原子核的一个重要特征是它的电荷。由于原子是电中性的，根据卢瑟福的原子模型可知原子核是带正电荷的，其电荷总量必等于核外电子的总电量，即

$$q = Ze \quad (5.1.1)$$

其中 Z 为元素的原子序数； e 是基本电荷，其数值为一电子电量的绝对值。当用 e 作电荷的单位时，原子核的电荷为 Z ，所以 Z 又叫做核的电荷数。它是原子核的重要参数之一。

原子核的电荷数可以用不同方法测定，其中较为精确的方法是莫塞莱于1913年提出的。他发现元素所放出的特征X

射线的频率 ν 与原子序数 Z 之间有下列关系:

$$\nu^{\frac{1}{2}} = (AZ - B) \quad (5.1.2)$$

式中 A 、 B 是常数,在一定范围内它们不随元素的 Z 不同而异,因此,只要测得元素的特征X射线的频率 ν ,由(5.1.2)式可算得原子序数 Z ,即原子核的电荷数。

除 $Z=43, 61, 93$ 的元素是人工制造的以外,从 $Z=1$

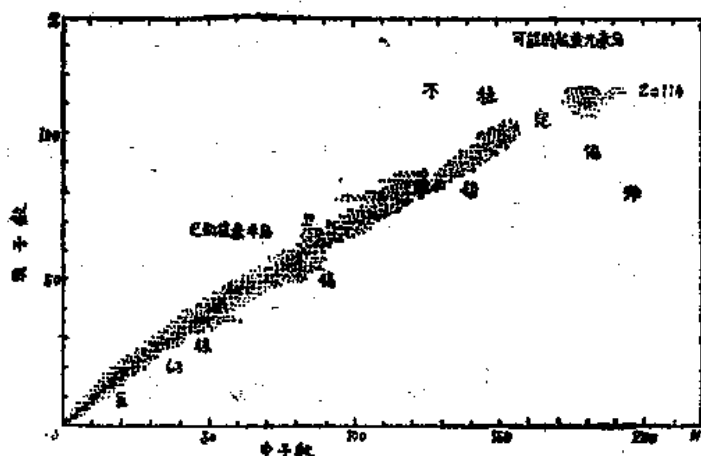


图 5—1 核素图

到 $Z=94$ 的元素自然界中均存在。用人工方法还获得从 $Z=95$ 到 $Z=109$ 的元素。 $Z>92$ 的元素叫做超重元素。本世纪六十年代末,理论上予測有可能在 $Z=114$ 附近存在一批超重元素,它们形成所谓“稳定岛”。如图5—1所示。近来,人们试图用人工合成法或在自然界中发现它们。

二、原子核的质量

在忽略核外电子的结合能时,原子核的质量等于原子质

量与核外电子质量之差，即

$$m = m_A - Z m_e \quad (5.1.3)$$

式中 m 、 m_A 和 m_e 分别为原子核、原子和电子的静止质量。

原子核的质量不便直接测量，通常都是通过测定原子质量（确切地说是离子质量）来推算原子核的质量。在实际应用中，例如，计算结合能一般不必算出核质量，只要利用原子质量就行了，这是因为在核的变化过程中电子的数目是不变的。

大家知道，1 摩尔的任何元素包含有 $N_0 = 6.022045 \times 10^{23}$ 个原子。因而一个原子的质量是极其微小的。通常不以克或千克作单位，而是采用原子质量单位。以 u 表之，其定义为：

$$1u = \frac{1}{12} \times {}^{12}\text{C} \text{ 原子质量}$$

由此，可得原子质量单位与克、千克间的关系为

$$\begin{aligned} 1u &= \frac{12}{N_0} \cdot \frac{1}{12} = 1.6605655(86) \times 10^{-24} \text{ 克} \\ &= 1.6605655(86) \times 10^{-27} \text{ 千克} \end{aligned}$$

在原子核物理学中，常采用电子伏特 (eV) 作质量单位，且有：

$$\begin{aligned} 1u &= 1.6605655(86) \times 10^{-27} \text{ 千克} \\ &= 931.502 \text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

式中 c 为真空中的光速。

表 (5-1) 中列出了由实验测得的一些原子的质量。由表可见，原子质量以 u 为单位其值都接近一个整数，此整数叫做原子核的质量数，以 A 表示之。例 ${}^4\text{He}$ ， ${}^{12}\text{C}$ ， ${}^{16}\text{O}$ ， ${}^{235}\text{U}$ 等的质量数 A 分别等于 4，12，16，235 等。

三、原子核的大小

实验表明，原子核是接近于球形的，因此通常用核半径来表示原子核的大小。由 α 粒子的散射理论估计原子核的半径约在 10^{-14} 到 10^{-15} 米范围内。

核半径的大小不是直接测量的，而是通过原子核与其他粒子相互作用间接测量的。由 α 粒子散射实验发现，在 α 粒子能量足够高的情况下，它与原子核的作用如图 5—2 所示，

由图看出：当 $r > R$ 时， α 粒子与核之间的作用为库仑作用，当 $r < R$ 时，是极强的吸引力作用，这种引力称之为核力。当 $r = R$ 时核力为零。我们定义：核力为零时的 R 为原子核的半径。实验表

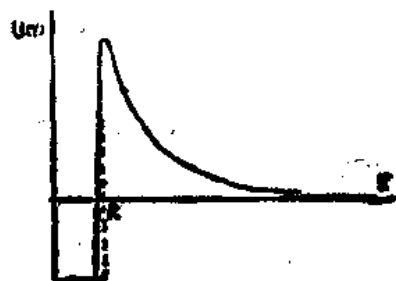


图 5—2

明，核半径与质量数之间有如下近似关系：

$$R \approx r_0 A^{1/3} \quad (5.1.4)$$

式中 $r_0 = (1.4 \sim 1.5) \times 10^{-15}$ 米。

由此，我们可以得到，原子核的体积近似地与质量数成正比，即

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \approx \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

由原子核的质量和原子核的体积可求出原子核的密度 ρ 为

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{Au}{V} = \frac{3}{4} \frac{u}{\pi r_0^3} \quad (5.1.5)$$

由于式中 u ， r_0 都是常量，这表明各种原子核的密度是相同的。取 $u = 1.66 \times 10^{-27}$ 千克， $r_0 = 1.4 \times 10^{-15}$ 米，则由(5.1.5)

式可计得核密度为

$$\rho \approx 10^{17} \text{ 千克/米}^3 = 10^{14} \text{ 吨/米}^3$$

它比水的密度 1 吨/米^3 大 10^{14} 倍, 可见核物质的密度是大得惊人的!

表 5-1 一些原子的质量

原子名称	原子质量(u)	原子名称	原子质量(u)
^1H	1.007825	^7Li	7.016005
^2H	2.014102	^{12}C	12.000000
^3H	3.016050	^{16}O	15.994915
^4He	4.002603	^{235}U	235.043944
^6Li	6.015123	^{238}U	238.050816

§ 5.2 原子核的角动量和磁矩

一、原子核的角动量

1. 原子光谱的超精细结构 在第二章中, 我们已经了解到, 钠原子的价电子从 3P 能级跃迁到 3S 能级时发出的 D 线 ($\lambda_D =$

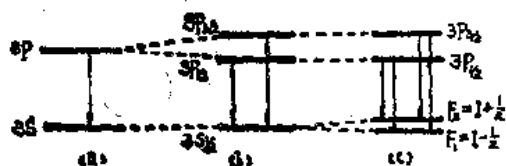


图 5-3 Na D 线的精细和超精细结构

5893 Å), 是由波长相差6 Å的D₁线($\lambda_1 = 5895.93 \text{ Å}$)和D₂线($\lambda_2 = 5889.96 \text{ Å}$)所构成的。这叫做钠D线的精细结构。精细结构是由于电子的自旋与轨道运动相互作用使3P能级分裂而产生的。当光谱仪的分辨本领提高后, 发现D₁线又由相距为0.023 Å的两条线组成, D₂线由相距0.021 Å的两条线组成。如图5—3所示。这就是原子光谱的超精细结构。原子光谱为什么会有超精细结构呢? 下面我们来讨论这个问题。

2、原子核的角动量 早在1924年泡利为了解释原子光谱的超精细结构, 提出原子核作为一个整体必须有自旋的假设。到了1932年查德维克发现中子以后, 人们才理解自旋的起源。原子核是由中子和质子组成的。(这个问题下一节还要的作较深入的讨论)。实验发现, 中子和质子是具有自旋为1/2粒子, 它们除自旋外, 还在核内作复杂的相对运动, 因而具有相应的轨道角动量, 通常称为原子核的自旋。它是核的内部运动所具有的, 与整个核外部运动无关。

由量子力学知, 原子核自旋角动量 $\vec{P}_I$ 的大小为:

$$P_I = \sqrt{I(I+1)} \hbar, \quad (5.2.1)$$

式中 I 为整数或半整数, 称为核的自旋量子数。 $\vec{P}_I$ 也是量子化的, 它在给定Z方向的投影为

$$P_{Iz} = m_I \hbar \quad (5.2.2)$$

式中 m_I 称为磁量子数, 它可以有 $2I+1$ 个取值:

$$m_I = I, I-1, \dots, -I+1, -I.$$

实际上, 自旋量子数 I 是自旋角动量 $\vec{P}_I$ 在Z方向投射的最大值(以 $\hbar$ 为单位)。通常用自旋量子数 I 表示核自旋的大小。

例: ${}^9\text{Be}$ 的自旋为 $\frac{3}{2}$, 是指它的 $I = \frac{3}{2}$ 。

3、原子光谱超精细结构的解释 如果核自旋 $\vec{P}_I$ 与电子的角动量 $\vec{P}_J$ 耦合而成原子的总角动量 $\vec{P}_F$ ，即

$$\vec{P}_F = \vec{P}_I + \vec{P}_J \quad (5.2.3)$$

$$P_F \text{ 的大小为: } P_F = \sqrt{F(F+1)} \hbar \quad (5.2.4)$$

$$F = I + j, I + j - 1, \dots, |I - j|.$$

如果 $j \geq I$, F 有 $2I + 1$ 个值; 如果 $I \geq j$, F 有 $2j + 1$ 个值。不同 F 的状态具有不同能量, 于是原来 F 为定值的能级又分裂成 $2I + 1$ (或 $2j + 1$) 个子能级。对于钠的 $3S$ 壳层, 最靠近原子核, 受核自旋影响最大, 又由于该壳层电子的 $j = \frac{1}{2}$, 则 F 可取 $F_1 = I - \frac{1}{2}$, $F_2 = I + \frac{1}{2}$ 。因此, $3S$ 能级分裂为两个能级: $3P_{\frac{1}{2}}$ 和 $3P_{\frac{3}{2}}$, 这两个能级也将分裂, 但它们分裂的间距非常小,

可暂不考虑, 如图 5-3 所示。由于核自旋比电子自旋的影响小很多, 能级分裂比精细结构情形小很多, 因此, 构成 D_1 线或 D_2 线两条线的间距比 D_1 线和 D_2 线 (精细结构中的) 间距小大约 300 倍。这就解释了原子光谱的超精细结构。同时, 原子核具有自旋也有了坚实的实验基础。

4、原子核自旋的测定 由上可知, 原子核的自旋可以通过原子光谱的超精细结构来测得。

< 1 > 当 $j > I$ 时, 能级分裂为 $2I + 1$ 个子能级, 可由超精细结构的子能级数目求出 I 。

< 2 > 当 $I < j$ 时, 能级分裂成 $2j + 1$ 个子能级, 因而无法由实验确定 I , 但可采用间距法。

从量子力学知道, $\vec{P}_I$ 和 $\vec{P}_J$ 的相互作用能为

$$E = A \cdot \vec{P}_I \cdot \vec{P}_J \quad (5.2.5)$$

式中A为常数，利用(5.2.3)式得：

$$E = \frac{A}{2} [F(E+1) - I(I+1) - j(j+1)] \hbar^2 \quad (5.2.6)$$

取不同的相互作用能。由(5.2.6)式可算得两相邻能级的间距 ΔE 为：

$$\Delta E = E_1 - E_2 = A \hbar^2 (I+j) ,$$

$$\Delta E_2 = E_2 - E_3 = A \hbar^2 (I+j-1) ,$$

$$\Delta E_3 = E_3 - E_4 = A \hbar^2 (I+j-2) ,$$

.....

故有： $\Delta E_1 : \Delta E_2 : \Delta E_3 : \dots = (I+j) : (I+j-1) :$

$$(I+j-2) : \dots \quad (2.5.7)$$

若由实验测得这些能级间距比值，即可由上式定出核自旋I。

< 3 > 当上二方法都不能适用时，可利用超精细结构谱线相对强度来测定I。这是由于超精细结构谱线强度正比于 $(2F_1+1)$ 之故。事实上，设 R_1 和 R_2 分别是谱线 $F_1=I+j$ 和 $F_2=I+j-1$ 的相对强度，则：

$$R_1/R_2 = \frac{(2F_1+1)}{(2F_2+1)} = \frac{2(I+j)+1}{2(I+j)-1} \quad (5.2.8)$$

表5-2列出了一些原子核的自旋实验值。从表中所列数据我们发现所有基态原子核的自旋有如下规律：凡中子和质子数均为偶数的原子核（即偶偶核）的自旋都是零；凡奇偶核（中子和质子数中有一个为奇数）的自旋都是半整数；凡奇奇核的自旋都是非零的整数。

二、原子核的磁矩

原子核是一带电体系，而且具有自旋。因此，可以推测出它应该具有磁矩。实验表明，核子都具有磁矩分别为：

$$\vec{\mu}_p = g_p \left(\frac{e}{2m_p c} \right) \vec{p}_s ; \quad \vec{\mu}_n = g_n \left(\frac{e}{2m_n c} \right) \vec{p}_n$$

其中 g_p 和 g_n , m_p 和 m_n 分别为质子和中子的迴旋磁比率和质量。由狄拉克理论 $g_p = +2$, 因中子不带电, 应该具有 $g_n = 0$ 。但实验证明, $g_p = 5.58$ 和 $g_n = -3.826$ 。因此通常称质子和中子具有反常磁矩。

与原子核自旋 $\vec{p}_I$ 相应的核磁矩 $\vec{\mu}_I$ 为

$$\vec{\mu}_I = g_I \left(\frac{e}{2m_p c} \right) \vec{p}_I \quad (5.2.9)$$

式中 g_I 称为核的 g 因子, 其数值一般由实验测得, 且有正有负。

$\vec{\mu}_I$ 的大小为

$$\begin{aligned} \mu_I &= g_I \sqrt{I(I+1)} \cdot \left(\frac{e\hbar}{2m_p c} \right) \\ &= g_I \sqrt{I(I+1)} \cdot \beta \end{aligned} \quad (5.2.10)$$

其中 $\beta = e\hbar/2m_p c = 5.0508 \times 10^{-27}$ 焦耳/特斯拉, 称为核的玻尔磁子, 简称为核磁子。因为 $m_p/m_e = 1836$, 故 $\mu_B/\beta = 1836$ 。在原子核物理中常以 β 作为核磁矩的单位。

$\vec{\mu}_I$ 也是空间量子化的, 它在给定 Z 方向的投影为

$$\mu_{Iz} = g_I \left(\frac{e\hbar}{2m_p c} \right) m_I = g_I m_I \beta \quad (5.2.11)$$

其中 $m_I = I, I-1, \dots, -I+1, -I$ 。在 Z 方向最大投影

$$\mu_I' = g_I \cdot I \cdot \beta \quad (5.2.12)$$

通常用核磁矩在给定 Z 方向投影的最大值 μ_I' 来衡量核磁矩的大小, 若以 β 为单位, 则核磁矩的大小为 $I g_I$ 。

核磁矩可用核磁共振等方法测定。(参阅卢希庭, 原子核物理 P15)。表 5-2 中列出一些原子核的磁矩值。

表 5—2 一些核的自旋、磁矩

核	自旋 I	矩磁 μ_I'	核	自旋 I	矩磁 μ_I'
^1_0n	$\frac{1}{2}$	-1.9131	$^{40}_{19}\text{K}$	4	-1.2981
^1_1H	$\frac{1}{2}$	2.79278	$^{55}_{25}\text{Mn}$	$\frac{5}{2}$	3.444
^3_2He	$\frac{1}{2}$	-2.1276	$^{81}_{35}\text{Br}$	$\frac{3}{2}$	2.270
^4_2He	0	0	$^{99}_{43}\text{Tc}$	$\frac{9}{2}$	5.68
^7_3Li	$\frac{3}{2}$	3.2563	$^{127}_{53}\text{I}$	$\frac{5}{2}$	2.808
$^{10}_5\text{B}$	3	1.8007	$^{157}_{63}\text{Eu}$	$\frac{5}{2}$	1.530
$^{14}_7\text{N}$	1	0.40365	$^{176}_{71}\text{Lu}$	7	3.18
$^{25}_{12}\text{Mg}$	$\frac{5}{2}$	-0.8551	$^{197}_{79}\text{Au}$	$\frac{3}{2}$	0.14486
$^{39}_{19}\text{K}$	$\frac{3}{2}$	0.3914	$^{235}_{92}\text{U}$	$\frac{7}{2}$	-0.35

§ 5.3 原子核的组成 同位素

到目前,我们对原子核的成分还没有一个清楚的认识,虽然前面已提到原子核是由质子和中子组成。但在1931年以前,各种原子核模型均以质子与电子作为核的基本成份。这个假设的依据是原子核发生 β 衰变时发出电子。假设电子数为 A ,电荷数为 Z 的原子核,包含有 A 个质子, $(A-Z)$ 个电子,电子质量非常小,即使 Z 个电子的质量也不会明显地影响原子核的质量。所以可以用这个假设来说明原子核的电荷与质量,但这个假设却存在着严重的困难。

一、质子—电子假设的困难

1、关于核自旋 如果原子核是由质子和电子组成，按此模型推得的结论与实验结果不符。例如： ^{14}N ，按质子—电子模型，它有14个质子和7个电子，质子和电子的自旋都是 $\frac{1}{2}$ ，那么 ^{14}N 的自旋应该是半整数，但实验结果， ^{14}N 的自旋是整数且等于1，见表5—2。

2、关于核磁矩 我们知道，核磁子要比玻尔磁子小三个数量级（ $\mu_B : \beta = 1836$ ），如果核内有电子，则核磁矩至少要与玻尔磁子 μ_B 同数量级，但实际上核的磁矩最大的也不过是几个核磁子。这是质子—电子假设的第二个困难。

3、关于微观粒子的波动性 如果核内有电子存在，则电子的德布罗意波长 λ 和核半径 R 应有下列关系：

$$\lambda \leq 2\pi R \quad \text{或} \quad \frac{\lambda}{2\pi} \leq R \quad (5.3.1)$$

其中 $\lambda = h/p$ ， h 为普朗克常数， p 为电子的动量。由相对论的能量和动量的联系公式，通过简单的计算，可得：

$$c^2 p^2 = E_k(E_k + 2m_0 c^2) \quad (5.3.2)$$

其中 m_0 为电子静止质量， E_k 为电子在核内的动能， c 为真空中的光速。当 $E_k \gg 2m_0 c^2 \approx 1\text{MeV}$ 时，则（5.3.2）式可写成

$$c^2 p^2 = E_k^2 \quad \text{即} \quad p = E_k / c \quad (5.3.3)$$

将（5.3.3）式代入 $\lambda = h/p$ 中，再由（5.3.1）式可得：

$$E_k \geq ch / 2\pi R = \frac{c}{R} \hbar \quad (5.3.4)$$

例如：设一个原子核的质量数 $A=120$ ，则由（5.1.4）式