

原子物理学

谢 劲 编
易 沅 陵

湖北科学技术出版社

内 容 提 要

本书是按师范学院教学大纲的要求，并参照教育学院大纲编写成的。按照少而精的原则，着重讲清物理概念和规律的物理意义。原子物理部分以原子结构为中心，以氢原子为重点，从光谱实验归纳出原子结构的规律，最后汇总到元素周期表。原子核物理部分以各种核反应为中心，用爱因斯坦质能关系统一计算结合能、衰变能、嬗变能、裂变能与聚变能。对分子光谱和结构以及粒子物理也作了初步介绍。每章都有一定数量的习题。

本书可作为师范院校和教育学院物理系本科和专科的试用教材或参考书，同样可供广大青年自学和中学物理教师参考。

前 言

本书是按照现行师范学院物理系《原子物理学》教学大纲的要求，并参照教育学院的大纲，由近几年我们讲课的讲稿整理而成的。在编写过程中，我们注意加强基础理论，坚持理论联系实际的原则，着重于物理概念和思维方法的阐述，着重培养学生的能力；对于理论和公式，着重讲清它的物理意义和使用条件，以利于学生深刻理解和灵活运用；同时我们还特别注意贯彻少而精的原则，抓住精华，突出重点。我们在系统讲述基本概念和理论的同时，还讨论典型的例题，以提高学生分析问题和解决问题的能力。每章都有足够数量的习题。

本书分原子物理、分子结构、原子核物理与粒子物理四部分。原子物理以原子结构为中心，以氢原子和玻尔理论为重点，按氢原子、多电子原子、磁场中的原子和X射线的体系循序渐进地层层深入，从各种原子光谱实验总结出原子结构规律，最后归结到元素周期表中所有元素的电子组态与原子基态。关于由电子组态确定原子基态及其相反的问题，本书作了一点新的尝试。

原子核物理以各种原子核反应为线索，按原子核的结合、衰变、嬗变、裂变与聚变的顺序展开，最后讨论核力与核结构。同时，以爱因斯坦质能关系贯彻始终，用以计算结合能、衰变能、嬗变能、裂变能和聚变能。对分子结构和光谱

以及粒子物理也作了一些初步的介绍。本书采用国际单位制。

本书是按大纲规定，以讲课72学时的要求写的，根据我们的实践，内容大体可以讲完。对极少数选讲内容，加上星号（*）以示区别。

武汉大学梁家宝副教授，武汉工学院宋世榕副教授与湖北省教育学院物理系彭志诚副主任精心审阅了初稿并提出了很多修改意见，特在此致谢。

本书的分子结构和分子光谱与粒子物理两章由易沅陵编写，其余各章由谢劲编写。由于我们水平不高，编写的时间也比较仓促，所以书中一定有不少缺点和错误，诚恳地希望广大读者批评指正。

编 者

1984.12 武汉

目 录

第一章 氢原子.....	5
§ 1 原子的质量和大小.....	5
§ 2 原子的核式结构.....	7
§ 3 氢光谱.....	17
§ 4 玻尔的氢原子理论.....	24
§ 5 类氢离子光谱.....	35
§ 6 椭圆轨道.....	43
§ 7 空间量子化.....	53
§ 8 玻尔理论简评.....	57
§ 9 微粒子的波粒二象性.....	59
§ 10 测不准关系式.....	62
练习一.....	67
第二章 多电子原子.....	70
§ 1 碱金属原子光谱.....	70
§ 2 原子核的极化与轨道的贯穿.....	75
§ 3 精细结构.....	79
§ 4 电子自旋.....	82
§ 5 氦和碱土金属原子光谱.....	92
§ 6 多电子原子.....	96
练习二.....	105

第三章	磁场中的原子	108
§ 1	原子的磁矩	108
§ 2	磁场对原子的作用	11
§ 3	史特恩—盖拉赫实验	116
§ 4	塞曼效应	119
	练习三	125
第四章	元素周期系与 X 射线	127
§ 1	元素性质的周期性变化	127
§ 2	原子的电子壳层结构	13
§ 3	原子基态的电子组态	133
§ 4	X 射线的产生	150
§ 5	连续 X 射线谱	154
§ 6	标识 X 射线谱	156
	练习四	161
第五章	分子结构和分子光谱	163
§ 1	分子的结构	163
§ 2	分子光谱	168
§ 3	双原子分子的电子组态	171
§ 4	双原子分子的振动和转动能级	175
§ 5	拉曼效应与多原子分子	183
	练习五	188
第六章	原子核基础	190
§ 1	原子核的基本量	190

§ 2	原子核的自旋与磁矩	192
§ 3	质量亏损与结合能	197
§ 4	射线的观测方法	201
§ 5	加速器	209
§ 6	核力	212
§ 7	原子核结构模型	220
	练习六	229
第七章 原子核的衰变		231
§ 1	衰变规律	231
§ 2	位移定则与放射系	236
§ 3	α 衰变	243
§ 4	β 衰变	251
§ 5	γ 衰变	260
	练习七	268
第八章 原子核反应		270
§ 1	原子核反应	270
§ 2	核反应方程与反应能	275
§ 3	中子与正电子	278
§ 4	人工放射性	283
§ 5	超铀元素	286
§ 6	放射性的应用	289
	练习八	294
第九章 核的裂变与聚变		296
§ 1	核裂变	296

§ 2	链式反应与原子能的应用	303
§ 3	核聚变	309
§ 4	太阳能和氢弹	312
§ 5	可控热核反应	315
	练习九	323
第十章 粒子物理		324
§ 1	宇宙射线	324
§ 2	基本粒子的特性与分类	327
§ 3	对称性与守恒定律	333
§ 4	共振态	338
§ 5	基本粒子的相互作用	343
§ 6	层子模型	350
	练习十	356
	基本物理常数	35

目 录

第一章 氢原子.....	5
§ 1 原子的质量和大小.....	5
§ 2 原子的核式结构.....	7
§ 3 氢光谱.....	17
§ 4 玻尔的氢原子理论.....	24
§ 5 类氢离子光谱.....	35
§ 6 椭圆轨道.....	43
§ 7 空间量子化.....	53
§ 8 玻尔理论简评.....	57
§ 9 微粒子的波粒二象性.....	59
§ 10 测不准关系式.....	62
练习一.....	67
第二章 多电子原子.....	70
§ 1 碱金属原子光谱.....	70
§ 2 原子核的极化与轨道的贯穿.....	75
§ 3 精细结构.....	79
§ 4 电子自旋.....	82
§ 5 氦和碱土金属原子光谱.....	92
§ 6 多电子原子.....	96
练习二.....	105

第三章	磁场中的原子	108
§ 1	原子的磁矩	108
§ 2	磁场对原子的作用	11
§ 3	史特恩—盖拉赫实验	116
§ 4	塞曼效应	119
	练习三	125
第四章	元素周期系与 X 射线	127
§ 1	元素性质的周期性变化	127
§ 2	原子的电子壳层结构	13
§ 3	原子基态的电子组态	133
§ 4	X 射线的产生	150
§ 5	连续 X 射线谱	154
§ 6	标识 X 射线谱	156
	练习四	161
第五章	分子结构和分子光谱	163
§ 1	分子的结构	163
§ 2	分子光谱	168
§ 3	双原子分子的电子组态	171
§ 4	双原子分子的振动和转动能级	175
§ 5	拉曼效应与多原子分子	183
	练习五	188
第六章	原子核基础	190
§ 1	原子核的基本量	190

§ 2	原子核的自旋与磁矩	192
§ 3	质量亏损与结合能	197
§ 4	射线的观测方法	201
§ 5	加速器	209
§ 6	核力	212
§ 7	原子核结构模型	220
	练习六	229
第七章 原子核的衰变		231
§ 1	衰变规律	231
§ 2	位移定则与放射系	236
§ 3	α 衰变	243
§ 4	β 衰变	251
§ 5	γ 衰变	260
	练习七	268
第八章 原子核反应		270
§ 1	原子核反应	270
§ 2	核反应方程与反应能	275
§ 3	中子与正电子	278
§ 4	人工放射性	283
§ 5	超铀元素	286
§ 6	放射性的应用	289
	练习八	294
第九章 核的裂变与聚变		296
§ 1	核裂变	296

§ 2	链式反应与原子能的应用	303
§ 3	核聚变	309
§ 4	太阳能和氢弹	312
§ 5	可控热核反应	315
	练习九	323
第十章	粒子物理	324
§ 1	宇宙射线	324
§ 2	基本粒子的特性与分类	327
§ 3	对称性与守恒定律	333
§ 4	共振态	338
§ 5	基本粒子的相互作用	343
§ 6	层子模型	350
	练习十	356
	基本物理常数	357

第一章 氢原子

物质是由什么组成的呢？长期以来，这个问题一直是人们注意和研究的中心。我们早就知道物质是由分子组成的，而分子又是由原子组成。但是，原子又是由什么组成的呢？从古代的希腊和罗马开始，在很长一段时间里，人们一直把原子看成是组成物质的最小单位，是一个不可分割的整体。直到十九世纪末叶，发现了电子，人们才逐步认识到原子并不是不可分的，原子也有它自己的结构和运动规律。研究原子和原子核的结构以及它们的运动规律，就是原子物理学的任务。

作为原子物理学的基础，这一章我们首先介绍一下原子的基本情况。

§ 1. 原子的质量和大小

不同的原子，首先在于它们的质量和大小不同。在物理学和化学中常用它们质量的相对值。现在是把碳在自然界最多的一种同位素 ^{12}C 的质量规定为12.000000原子质量单位作为标准，其它原子的质量同 ^{12}C 比较，定出它的质量值，称为原子量。例如氢的原子量是 $A = 1.0079$ ，碳的原子量 $A = 12.011$ ，铀的原子量 $A = 238.029$ ，原子量可以用物理学和化学的方法测定。

我们规定 ^{12}C 的原子量 $A = 12.000000$ ，那么它的十二分之一就称为原子质量单位 u ，其质量是：

$$1u = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{kg}$$

以这个原子质量单位 $1u$ 为准, 只要知道原子量, 我们就可以很快的求出这个原子或这种元素的同位素的质量, 即原子质量等于原子量与原子质量单位的乘积:

$$M = A \cdot u$$

例如, 氢元素的质量是:

$$\begin{aligned} M &= A \cdot u = 1.0079 \times 1.66056 \times 10^{-27} \text{kg} \\ &= 1.6737 \times 10^{-27} \text{kg} \end{aligned}$$

铀元素的质量是:

$$\begin{aligned} M &= A \cdot u = 238.029 \times 1.66056 \times 10^{-27} \text{kg} \\ &= 395.261 \times 10^{-27} \text{kg} \end{aligned}$$

本世纪初人们又发现, 同一种原子, 原子量也不一定相同。例如, 氢原子又分为 ^1H 、 ^2H 与 ^3H , 它们的原子量分别是:

$$A_1 = 1.007825, A_2 = 2.014102, A_3 = 3.016049,$$

于是我们把这种有同一元素名称, 有同样的化学性质, 在元素周期表中处于同一位置的元素称为同位素。如上述的 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 都是氢的同位素, ^{238}U 、 ^{235}U , 等等又都是铀的同位素。各种同位素的质量和它们在自然界的相对含量均可由光谱学的方法测定, 也可以由质谱仪和质谱计来测定。

前面我们谈到, 每一种元素一般有好几种同位素, 那么元素的原子量和它的几种同位素的原子量是什么关系呢? 我们说, 元素的原子量是它的各种同位素的原子量按它们在自然界的相对含量所取的平均值。

原子的大小可以这样来估计: 对于液体和固体, 原子间

的距离和原子的半径有相同的数量级。于是某种物质的一个原子的质量和它的密度的比值，实际上是一个原子的体积，它的立方根就是原子的大小，即原子半径的数量级了。

另外，由气体分子运动论和范德瓦尔斯 (Vander Waals) 方程也可以测得原子的大小。用上述不同方法测得的值虽不完全相同，不同的原子的大小也各不相同，但是有相同的数量级，即都是 10^{-10} 米。

§ 2 原子的核式结构

十九世纪末叶，通过金属导电、电解与电离、热电子发射和光电效应等现象，人们逐渐认识到，电子是一切原子的组成部分。1897年汤姆逊 (J. Thomson) 发现电子并测得其电量与质量的比值。现在我们已经准确的知道：

电子是带负电的，它的电量是：

$$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$$

电子的质量是：

$$m = 9.109534 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

大约等于氢原子质量的1837分之一。

但是通常原子是中性的，带负电的电子又是它的组成部分，那么原子的另一部分一定带正电。又因电子质量比原子的质量小得多，因而带正电部分的质量几乎等于原子的质量。这就表明，原子是一个复杂的带电系统。也就是说，原子的结构，是一个应该深入研究的问题。在研究原子结构时，首先要解决原子中带正电的那一部分的分布情况。

1903年，汤姆逊首先提出一种原子结构模型。他认为带正电部分的大小就等于原子的大小；正电荷均匀分布于这个球体内；是一个弹性的冻胶状的小球；在球内或球上有电子

嵌入其间。这些电子在它的平衡位置振动，观察到的原子发射的频率不同的光，就是电子振动时发射的。汤姆逊模型与当时实验结果可以是一致的，但后来 α 粒子散射实验否定了汤姆逊模型。

由于原子极小，就是现在也还很难直接观察到。所以，为了研究原子结构，人们就要用高能粒子，如 α 射线和 β 射线等，去射击原子，与原子发生相互作用，从而引起可以观察的现象，这就是散射实验。分析和归纳散射实验的结果，就可以使我们逐步认清原子的结构，首先，我们就可以用这种方法来检验某种模型是否正确。

我们知道， α 射线是高速氦核流，卢瑟福（Rutherford）的学生盖革（Geiger）和马斯顿（Marsden）继续卢瑟福开始进行的 α 粒子散射实验。1909年观察到的实验结果是， α 粒子射到金属薄膜上，经薄膜散射后，绝大多数 α 粒子平均只偏转 2° — 3° ，但有极少数 α 粒子偏转角度很大，约有 $1/8000$ 的 α 粒子的偏转角，即散射角大于 90° ，有的几乎达到 180° 。

他们所用的仪器布置大致如图1.1所示。R为被一铅块

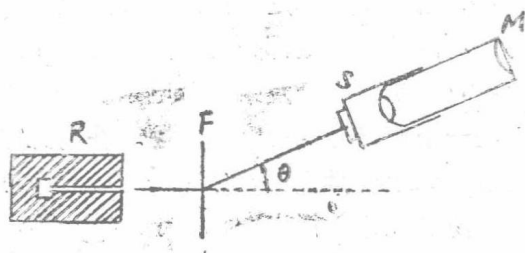


图1.1 α 粒子散射实验

包围的 α 粒子源，发射的 α 粒子经一细长通道后，形成一束射线，射在金属薄膜F上，有一放大 镜 M，附有一片荧光屏S，可以从不同的角度观察 α 粒子的散射。当被 散射的 α 粒子打在荧光屏S上时，S就发光，用放大 镜观察 闪光，就可以记下某一时间在散射角为 θ 的方向上的粒子数。从 α 粒子源到荧光屏这一部分都放在真空系统中。

上述实验结果对汤姆逊模型意味着什么呢？首先，按汤姆逊模型，把原子设想为中性弹性小球，那么很明显，应该是小角散射极少，绝大多数的散射角 θ 近于 180° 。其次仍按汤姆逊模型，即正电荷均匀分布在原子内，电子的作用不计（下面的分析表明），则大角散射又根本不可能产生。所以 α 粒子散射实验的结果明白无误的否定了汤姆逊模型。

在 α 粒子散射实验的基础上，1911年卢瑟福提出了原子的核式模型：一切原子都由一个原子核和若干核外 电子 组成；原子核半径的数量级虽然只有 10^{-14} — 10^{-15} 米，但它的质量却几乎是原子质量的全部；原子序数为Z的原子，核所带电量为 $+Ze$ ，在正常情况下，核外有Z个电子绕核运动。

在上述核式模型的基础上，卢瑟福提出了下面的 α 粒子散射理论，把这理论导出的关系和实验结果相比较，可以直接验证卢瑟福模型的正确性。

如图 1.2，当一个 α 粒子射到一个原子附近时，因为电

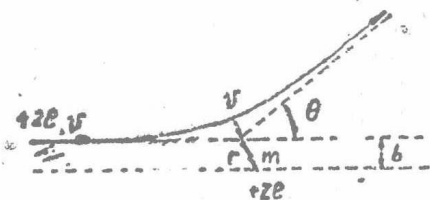


图 1.2 α 粒子散射原理