

原子物理学

谢 劲 编
易沅陵

封面封计：易云生

原子物理学
谢劲 易沅陵 编

湖北科学技术出版社出版 武汉市新华书店发行
孝感市印刷一厂印刷

787×1092毫米 32开本 11.5印张 238,000字
1985年8月第1版 1985年8月第一次印刷
印数 4,000

统一书号：15304.94

定价：2.15元

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	63
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 氢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.....	11
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.....	14
§ 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

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 $2^\circ - 3^\circ$ ，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

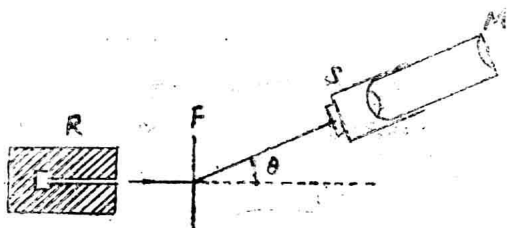


图1.1 α 粒子散射实验

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，用放大镜检查闪光，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

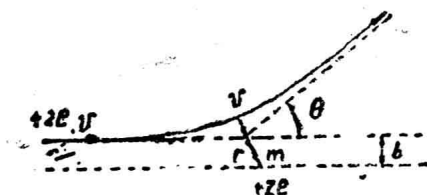


图1.2 α 粒子散射原理

子的质量很小，可以略去它对 α 粒子的作用。因此，可以把 α 粒子与原子核当作两个点电荷，它们之间的库仑斥力是：

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2}$$

在原子核的质量比 α 粒子的质量大得多的情况下，可以认为核不动， α 粒子因受核的库仑斥力的作用而改变运动方向。图中 v 是 α 粒子原来的速度， b 是原子核离 α 粒子原来运动方向的延线的距离，称为瞄准距离； θ 是偏转角，称散射角。我们可以证明， α 粒子的轨迹是一条双曲线，瞄准距离 b 与散射角 θ 之间有如下关系：

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{bE_k} \quad (1)$$

式中 E_k 为 α 粒子原来的动能。由 (1) 式可见：

1、 b 越大 θ 就越小，而 b 越小 θ 就越大；当 $b \gg R$ （核半径）时 $\theta = 0$ ，而当 $b = 0$ 时 $\theta = \pi$ 。这就说明了核式模型可以产生大角散射，只不过几率较小而已；

2、 E_k 越大 θ 越小， E_k 越小 θ 就越大，这可以理解为， α 粒子动能越大，改变方向就越困难，所以散射角就越小；

3、 Z 越小 θ 也越小， Z 大 θ 也大，这是因为 Z 越大斥力越大的缘故。

总之，(1) 式已经表明，原子的核式模型是正确的。即它与以小角散射为主，但也存在大角散射的可能性这一实验事实是一致的。

例：如 α 粒子的动能 $E_k = 10^6$ 电子伏，金属膜 $Z = 80$ 瞄准距离 $b = 10^{-10}$ 米，求散射角 θ 。

解：由 (1) 式有

$$\begin{aligned}
\tan \frac{\theta}{2} &= \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 b E_k} \\
&= \frac{80 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{4 \times 3.14 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 10^{-10} \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19}} \\
&= 0.0115 \\
\therefore \frac{\theta}{2} &= 40', \quad \theta = 1^\circ 20'
\end{aligned}$$

同时，我们还可以用(1)式分析证明，汤姆逊模型为什么不正确。由电磁学可知，按照汤姆逊模型，正电部分对 α 粒子的斥力，当 $b > r_0 = 10^{-10}$ 米(原子半径)时，情况与模式模型一致；当 α 粒子进入原子后，即当 $b < r_0$ 时，由于在它之外的球壳上的电荷对它不产生斥力，而产生斥力的球体内的电荷 Q 满足关系： $Q/ze = b^3/r_0^3$ ，即

$$Q = Ze \frac{b^3}{r_0^3}$$

这表明斥力随 b 的减小而急剧减小，这时有

$$\begin{aligned}
\tan \frac{\theta}{2} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{b E_k} Q \\
&= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_0 E_k} \left(\frac{b}{r_0}\right)^2 \\
&= \tan \frac{\theta_0}{2} \left(\frac{b}{r_0}\right)^2 \quad (2)
\end{aligned}$$

由上式可见，当 $b = r_0$ 时 $\theta = \theta_0$ ，即散射角有极大值 θ_0 ， b 越小 θ 越小，当 $b = 0$ 时 $\theta = 0$ 为极小值。即根本不可能产生大角散射。也就是说，理论分析证明汤姆逊模型是错误的。

虽然(1)式能定性的判明卢瑟福模型是正确的，但(1)式还不能和实验观测结果直接进行定量的比较。进一

步还可以导出一个关系式，这关系式可以直接和实验结果进行定量的比较，对比的结果证实理论与实验是一致的。这就进一步证明了卢瑟福原子核式模型的正确性。详细情况这里就不多讲了。

既然 α 粒子散射理论与实验结果一致，这就表明 α 粒子的确是在原子的全部正电荷的库仑场中运动，也就是说 α 粒子始终在原子核之外，这就可以按散射理论来分析 α 粒子与原子核的最小距离 R ，这 R 也就是核半径的最大可能的值。设动能为 E_k 的 α 粒子，以瞄准距离 $b = 0$ 射向原子核，当它逐渐接近原子核时动能也逐渐转变成势能，当它的速度减为零时，动能全部转化为势能，这时它与核的距离有极小值 R ， R 可估计为核半径。由能量守恒定律，可得以下等式：

$$E_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{R}$$

$$\text{即} \quad R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{E_k} \quad (3)$$

由能量与动量守恒定律和 (1) 式，并令 $\theta = \pi$ ，也可得到上式。由 (3) 式可见， α 粒子的动能 E_k 越大， R 越小。选用高能 α 粒子，并对各种金属薄膜进行实验，结果表明 R 的数量级在 10^{-14} 米以下。这与用其它方法测得的核半径的数量级为 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 米的结果是一致的。前面讲过，原子半径的数量级是 10^{-10} 米，可见和原子半径相比，核的半径是很小的，一般在原子半径的万分之一以下。

• α 粒子散射理论几个公式的推导。

前已讲过，把 α 粒子和与它碰撞的原子核看作两个点电荷，那么它们之间的库仑斥力为：

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2}$$

这里的“碰撞”过程的物理意义是：在不动的原子核的库仑场中， α 粒子的运动方向发生偏转的过程。图 1.3 就是

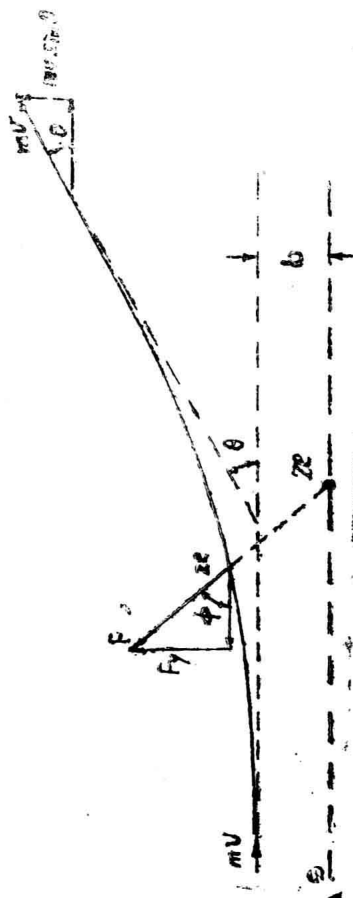


图 1.3 碰撞过程