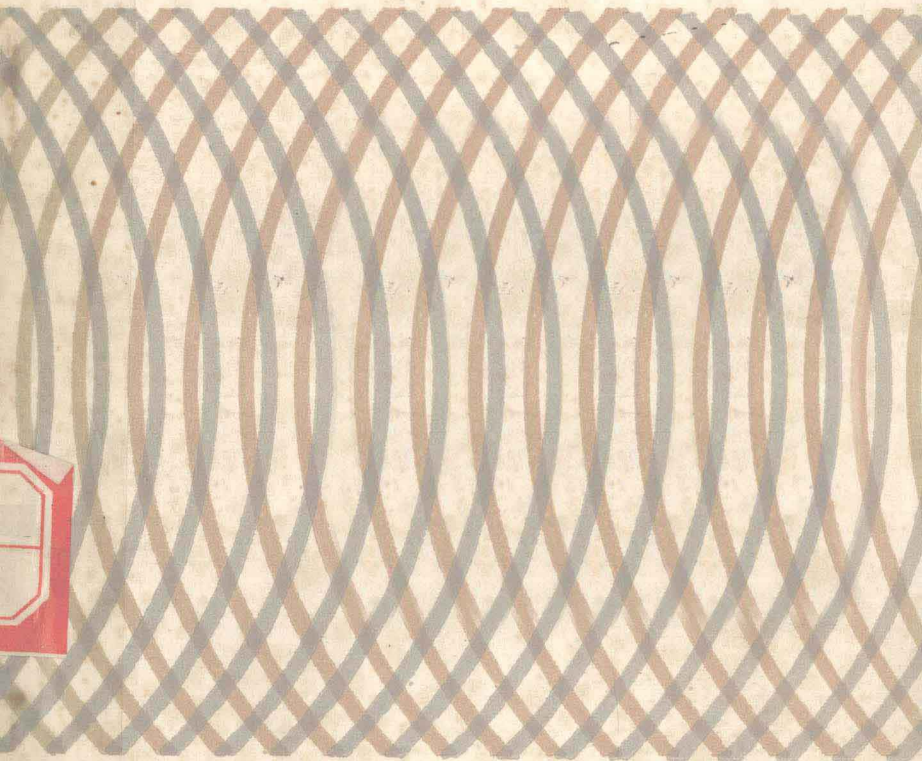


高等专科学校试用教材

原子物理学和原子核物理学



湖北教育出版社

高等专科学校试用教材

原子物理学和原子核物理学

王正清 朱 江 李光惠 顿济兰

黄伯球 彭华林 李 森 编

湖北教育出版社

内 容 提 要

本书是按照1983年教育部颁布的师范专科学校《原子物理学和原子核物理学教学大纲》的要求编写的。全书共二篇，第一篇是原子物理学，包括原子模型、氢原子、碱金属原子、多电子原子及X射线等内容。第二篇是原子核物理学，包括核的性质、放射性、核模型及核反应等内容。还简练地介绍了宇宙射线和粒子物理学的主要内容。

书中突出师专教学特点，语言精炼，物理概念清晰。每节末有思考题和练习题，每章末有小结和习题。并附有一定数量的选读材料以供查阅。

本书除作师专物理专业和培训中学物理师资的教材外，亦可供电大、职大、函大有关专业的教师和学生参考。

原 子 物 理 学 和 原 子 核 物 理 学

王正清 朱 江 李光惠 彭华林
顿济兰 黄伯球 李 森 编

•

湖北教育出版社出版、发行

通城县印刷厂印刷

787×1092毫米32开本 10.25印张 226,000字

1985年9月第1版 1985年9月第1次印刷

印数：1—5,500

统一书号，7306·325 定价，2.10元

前 言

本书是参照1983年教育部颁布的高等师范专科学校物理专业《原子物理学和原子核物理学》教学大纲编写的。本书经全国师专物理教学研究会推荐，湖北省教育厅确定作为高等师范专科学校物理专业原子物理课程的试用教材。

全书分两篇，第一篇为原子物理学，第二篇为原子核物理学和基本粒子简介。

本书力求以简洁的语言、清晰的概念、合乎逻辑地阐述原子物理学和原子核物理学的主要内容，并适当地编写了若干选读材料，提供了某些数学推导和历史背景以及少数较高、深的课题介绍，以有助于读者更好地掌握基本内容和扩大知识面。

为了帮助读者巩固所学知识，每章末有适量的习题，在一些章节之后还附有练习与思考题，可供读者边读边练。在每章末还列出了本章提要，可作为学习后的复习提纲，也有助于读者抓住重点，把握学习要求。

本书不仅适合以培养中学物理师资为目的的师范院校的需要，还可作为各类职工大学、电视大学、函授大学学生普通物理的参考读物。此书曾在湖北省内几所师范专科学校作为教材试用了一年，后经全国师专物理教学研究会审阅。这次在原来的基础上又作了修改和补充，并经华中师范大学刘连寿教授审阅。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

一九八五年四月

目 录

第一篇 原子物理学

第一章 原子的结构模型	(3)
§ 1.1 汤姆逊原子结构模型	(3)
§ 1.2 原子的核式模型	(5)
§ 1.3 原子和原子核大小的估算	(16)
选读材料 式(1—5)的推导	(18)
本章提要	(19)
习题	(20)
第二章 氢原子	(22)
§ 2.1 光谱	(22)
§ 2.2 氢原子光谱的实验规律	(25)
§ 2.3 玻尔的氢原子理论	(29)
选读材料(一) 尼尔斯·玻尔	(41)
选读材料(二) 对应原理与角动量量子化条件	(42)
§ 2.4 类氢离子	(43)
§ 2.5 夫兰克——赫兹实验	(50)
§ 2.6 电子的椭圆轨道	(54)
选读材料(三) 式(2—45)的推导	(60)
§ 2.7 角动量取向的空间量子化	(62)
§ 2.8 原子磁矩与斯特恩——盖拉赫实验	(66)
§ 2.9 玻尔理论的历史作用和量子力学对 玻尔理论的修正	(72)
本章提要	(76)

习题	(78)
第三章 碱金属原子和电子自旋	(80)
§ 3.1 碱金属原子的光谱和能级	(80)
§ 3.2 原子实的极化和轨道贯穿	(86)
§ 3.3 碱金属原子光谱的精细结构	(90)
§ 3.4 电子自旋同轨道的相互作用	(93)
选读材料(一) 自旋轨道耦合能	(102)
§ 3.5 塞曼效应	(104)
选读材料(二) 氢原子的精细结构	(116)
本章提要	(119)
习题	(122)
第四章 多价原子	(124)
§ 4.1 二价原子的光谱和能级	(124)
§ 4.2 具有两个价电子的原子态	(125)
§ 4.3 氦氖激光器	(135)
选读材料(一) 氦原子能级的 $j-K$ 耦合	(138)
§ 4.4 元素性质的周期变化	(142)
§ 4.5 泡利原理 电子的壳层排列	(144)
§ 4.6 电子壳层的填充	(147)
选读材料(二) 确定原子基态的方法	(156)
本章提要	(159)
习题	(161)
第五章 X射线	(164)
§ 5.1 X射线的产生	(164)
§ 5.2 X射线连续谱	(165)
§ 5.3 X射线线状谱	(168)
选读材料 威廉·康瑞德·伦琴	(173)
本章提要	(174)
习题	(175)

第二篇 原子核物理学

第六章 原子核的基本性质	(177)
§ 6.1 原子核的电荷、质量和大小	(177)
§ 6.2 原子核的结合能	(181)
§ 6.3 核力	(187)
§ 6.4 原子核的自旋和磁矩	(191)
§ 6.5 原子核的其他性质	(196)
本章提要	(200)
习题	(202)
第七章 放射性	(203)
§ 7.1 放射性衰变的规律	(203)
§ 7.2 α 衰变	(213)
§ 7.3 β 衰变	(216)
§ 7.4 γ 衰变和内转换	(221)
选读材料 穆斯鲍尔效应	(223)
§ 7.5 放射性射线的探测	(224)
§ 7.6 放射性的应用和防护	(227)
本章提要	(230)
习题	(231)
第八章 原子核的结构模型	(233)
§ 8.1 核的液滴模型	(233)
§ 8.2 核壳层模型	(237)
§ 8.3 核的集体运动模型	(242)
本章提要	(244)
习题	(244)
第九章 原子核反应	(246)
§ 9.1 核反应及其遵循的规律	(246)
§ 9.2 核反应的类型	(250)
§ 9.3 反应能和阈能	(253)

§ 9·4	原子核的反应截面	(259)
§ 9·5	原子核反应的机制	(263)
§ 9·6	粒子加速器	(268)
	本章提要	(273)
	习题	(275)
第十章	原子能	(277)
§ 10·1	原子核裂变	(277)
§ 10·2	链式反应和裂变能的利用	(281)
§ 10·3	核聚变	(285)
	本章提要	(292)
	习题	(292)
第十一章	宇宙射线和基本粒子	(294)
§ 11·1	宇宙射线	(294)
§ 11·2	基本粒子分类及其性质	(299)
§ 11·3	基本粒子的相互作用和守恒定律	(305)
§ 11·4	强子的结构模型	(314)
	本章提要	(318)
	习题	(319)
物理常数表	(320)

第一篇 原子物理学

人类探索物质结构的奥秘走过了漫长而曲折的道路。早在三千多年前，在我国就提出了“五行”学说，认为万物是由金、木、水、火、土五种元素所形成。此后，约在公元前六世纪，古希腊的哲学家提出自然界的物质是由水、土、火、气四种元素结合而成。到公元前四百多年，希腊哲学家留基伯和他的学生德谟克利特认为宇宙间万物都是由数不清的，小到人眼无法看到的物质微粒所组成，他们把这种微粒叫做原子。在希腊语中原子(ἄτομος)就是“不可分割”的意思。这种原子学说在当时只是从某些观察而推得的主观臆测，限于当时的生产水平和科学水平，人们不可能对物质结构进行更深入的研究。同时，这种朴素的原子论也受到宗教和神学的压抑，因而没有得到发展。

十五、十六世纪，人们对大量的物理现象和化学现象进行了较深入的研究，促使原子学说又重新传播开来，并逐步得到发展。到十九世纪，原子学说取得了重大进展。1808年，美国的一位中学教师道尔顿(J. Dalton 1766—1844)，在阐明化学上的定比定律和倍比定律时，提出了科学的原子学说，他认为物质是由许多不同的单质元素所组成，这些元素又由各自的原子所组成。任何一种元素的原子，其大小、质量和性质都彼此相同。但不同元素的原子是彼此不同的。这幅“原子世界图景”虽然使人们开始了解原子的多样性，但由于认为原子是不可分割的最小微粒，就堵绝了对原子更

深入一层认识的可能性。1895年伦琴(W. Röntgen 1845—1923)发现X射线,紧接着1896年贝克勒尔(A. Becquerel 1852—1908)发现了天然放射性,1897年汤姆逊(J. Thomson 1856—1940)发现了电子,1898年居里夫妇(P. Curie 1859—1906, M. Skłodowska Curie 1867—1934)从铀矿石中发现镭和钋。这一系列发现无可置疑地证明原子不是不可分的,原子也有内部结构,原子只是物质微观结构中的一个层次,促使了物理学家对原子结构问题的研究。

1911年,卢瑟福(E. Rutherford 1871—1937)提出了原子的行星模型,证实了原子核的存在。启发人们从两个方面分别对原子结构问题进行研究。一方面是研究核外电子的排列及运动规律;另一方面研究原子核的构成和运动规律。这两者分别形成原子物理学和原子核物理学两门学科。

在原子物理学的发展中,玻尔(N. Bohr 1885—1962)于1913年提出的氢原子理论是有重要意义的。这个理论成功地解释了氢原子光谱的实验规律,提出了一些新概念,为建立微观体系的新理论——量子力学奠定了基础。1924年,为了解释碱金属原子的精细结构等现象,人们认识到电子具有自旋并遵从泡利(W. Pauli 1900—1958)原理,从而了解到核外电子的壳层排列,成功地解释了元素周期表。

无论在理论上和实际中原子物理学都有重要作用。许多宏观现象,例如物体发光是怎么回事?为什么会有导体、半导体和绝缘体之分?为什么电导率高的物体导热率也高?这些问题都只有在揭示物质微观结构之后才能更深刻的理解。在科学技术方面,半导体和集成电路的采用,激光的发现,计算机的应用以及各种材料的研制都要用到原子物理学的知识。所以,原子物理学是物理学中重要的基础课之一。

第一章 原子的结构模型

十九世纪末和二十世纪初的一系列发现表明，原子不是不可分割的最小的物质微粒。从此人们开始进一步探究原子的内部结构。在本章中首先介绍汤姆逊的原子结构模型，而后着重说明卢瑟福的原子核式模型的实验基础及 α 散射理论。最后估算一下原子及原子核的大小。

§ 1.1 汤姆逊原子结构模型

从公元前四世纪到十九世纪末，人们一直认为原子是坚硬的，不可再分的微粒。这个信念在二十世纪初受到了挑战，1897年汤姆逊发现电子，此后，大量事实表明，原子内有等量的正电荷和负电荷。这就提出了一个问题：正、负电荷在原子内是怎样分布的呢？

1903年，汤姆逊提出了原子结构模型。他认为原子是球形的，正电荷均匀分布在半径为 R 的球内，微小的带负电荷的电子则松散的散布在它里面，就好比蛋糕中嵌进葡萄干一样〔图1-1 (a)〕，人们称汤姆逊模型为“葡萄干蛋糕模型”。按照这一模型，在静电力作用下，电子被正电荷吸引趋向中心。但电子之间又互相排斥，因而电子在其平衡位置附近作简谐振动，并发出电磁辐射。

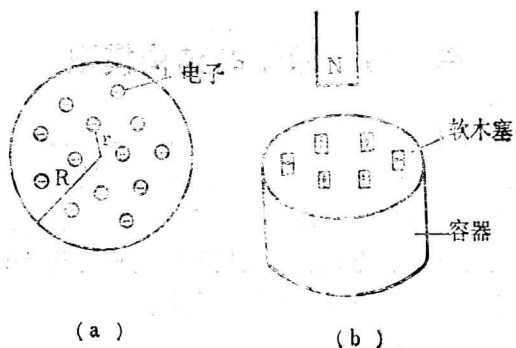


图 1-1 汤姆逊原子结构模型

为了验证这个模型的正确性，汤姆逊还进行了如下的实验。实验装置如图1-1(b)所示。图中盛放着液体的容器代表原子，液面上飘浮着的软木塞代表电子，每个软木塞上又放一小磁针，磁针之间的作用力相当于电子间的静电力。在容器的正上方放一块大磁铁以使软木塞向中心会聚，其效果相当于正电荷对电子的吸引作用。在软木塞飘向中心的同时，小磁针间的排斥力却阻碍它们完全靠拢，这相当于电子间的排斥作用。汤姆逊用这种办法，得出了与门捷列夫(Д.Е. Менделеев 1834—1907)周期律颇为类似的电子排列规律。因此，在一段时间内，汤姆逊原子模型被广泛的承认。

进一步的分析发现，根据这样的模型算得原子光谱频率与早已发现的线状原子光谱的频率不一致。以最简单的氢原子为例，设正电荷 $+e$ 分布在半径 $R \approx 10^{-10}$ 米的球内，电荷

密度 $\rho = \frac{e}{\frac{4}{3}\pi R^3}$ ，电子的平衡位置在距球心 r 处，由电磁学

理论知道， r 处的电场强度的大小为 $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho \right)$ ，

方向沿径向指向球心。所以电子受到静电力

$$F = -eE = -\frac{\rho e}{3\epsilon_0} r \quad (1-1)$$

这个力具有简谐力 $F = -kr$ 的形式，且

$$k = \frac{\rho e}{3\epsilon_0} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} = 2.3 \times 10^2 \text{ 牛顿/米}, \quad (1-2)$$

在此简谐力的作用下，电子的振荡频率为：

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 2.5 \times 10^{16} \text{ 秒}^{-1}.$$

这个频率就是汤姆逊原子的辐射频率。它在电磁波的紫外区，且与电子的平衡位置 r 无关。但是，人们早就观察到氢原子具有多条线状可见光谱。因此，汤姆逊模型与光谱实验结果是矛盾的。

练习与思考

若汤姆逊模型的原子辐射波长 $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ 的光谱线，则其半径多大？

§ 1.2 原子的核式模型

在本世纪初，卢瑟福对物质的放射性进行了大量研究，确定了 α 粒子所带电荷为电子电荷绝对值的两倍，质量为电子质量的 7300 倍左右。卢瑟福还指出，具有一定能量的 α 粒子可以作为一种探测粒子，用来研究其它原子的结构。因此，他要求盖格 (H. Geiger 1882—1925) 指导研究生马

斯顿 (E. Marsden 1889—1970) 进行 α 粒子被金属箔散射的实验, 探测原子的结构, 判断汤姆逊模型的正确性。

一、 α 粒子散射实验

图1—2是 α 粒子散射实验装置的示意图。将 α 粒子源放在铅盒B内, 发射出的 α 粒子经过一细长的通道形成一窄束, 射向放在真空室中的一块很薄的金属箔上。 α 粒子受到靶箔中原子的库仑力的作用, 偏离原来的入射方向, 沿一定角度

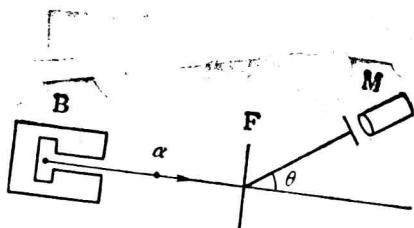


图 1—2 α 粒子散射实验装置

θ 散射出去, 打在涂有硫化锌的观察屏S上, 把放大镜M调好对准观察屏, 可以看到一点一点闪烁的亮光, 这就可以计算出散射在这个方向上的 α 粒子数。转动观察屏和放大镜则可观察到射到不同方向上的 α 粒子数。1909年, 盖格和马斯顿观察到一个完全出乎意料的现象: 有 $\frac{1}{8000}$ 的 α 粒子的偏转

角大于 90° , 有的偏转角甚至接近 180° 。然而按照汤姆逊模型的估计, α 粒子只能偏转一个很小的角度, 所以这是一个非常奇怪的结果。用卢瑟福自己的话来说: “这是我一生中最难以置信的事件。它的难以置信就象你发射一颗15英吋的炮弹打在一张薄纸上, 结果却被反射回来打中你自己一样。”

二、汤姆逊模型的困难

下面根据汤姆逊模型来估算一下 α 粒子散射的偏转角。

当 α 粒子从原子外边通过时，中性原子对它不起作用， α 粒子不会发生偏转。只有当 α 粒子进入原子后，才与电子和正电荷相互作用。但由于 α 粒子的质量比电子质量大7300倍，根据动量守恒定律可以估计（见练习题），电子对 α 粒子的影响是微不足道的，所以只需考虑正电荷的作用。

由电磁学知道，电量为 Q 的均匀带电球体，对位于球内 r 处的点电荷 q 的作用力的大小为 $F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)$ 。由此可见，在 $r = R$ 处作用力最大，即当 α 粒子从原来表面 A 点擦过受到的斥力最大。如果考虑 α 粒子被原子序数为 Z 的原子散射，则此合力的大小为

$$F_M = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{R^2} \quad (1-3)$$

其方向与入射方向垂直。由图1—3还可看出，在散射过程中，沿入射方向（图1—3中水平方向）粒子所受合力的平均值近似为零。假若垂直方向的力总是 F_M ，且认为 α 粒子只在原子大小范围内受到力的作用，即力的作用时间为 $\Delta t = \frac{2R}{v}$ 。这

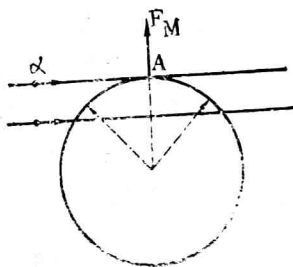


图 1—3 α 粒子被汤姆逊原子散射

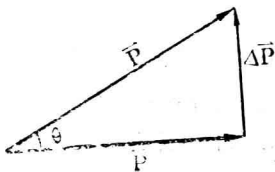


图 1—4 α 粒子动量的改变

里 v 是入射 α 粒子的速度。则 α 粒子动量的改变量 $\Delta\vec{P} = \vec{P}' - \vec{P}$ 的大小为

$$\Delta P = F_M \Delta t = \frac{4Ze^2}{4\pi\epsilon_0 Rv}$$

方向垂直于原有动量 \vec{P} ，如图1—4所示。由此可得 α 粒子的最大偏转角 θ 的正切为

$$\operatorname{tg}\theta \approx \frac{\Delta P}{P} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{4Z}{mv^2 R} \quad (1-4)$$

若入射 α 粒子的能量为 5 Mev ，则(注)

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\theta &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Z}{(\frac{1}{2}mv^2)R} \\ &= \frac{14.4 \times 2 \times 79}{5 \times 10^6 \times 1} \\ &= 4.55 \times 10^{-4}, \end{aligned}$$

所以，最大散射角为

$$\theta \approx \operatorname{tg}\theta \approx 0.026^\circ$$

由此可见，用汤姆逊原子模型不可能解释大角度散射这个事实。

怎样才能解释大角度散射呢？ α 粒子被汤姆逊原子散射时不可能产生大角度散射的原因是： α 粒子受力太小，如果设想原子中的正电荷不是均匀分布在 $R \approx 10^{-10}$ 米的球内，而是集中在一个很小的区域里，则由(1—3)式可见，只要 R 足够小，力 F_M 就会很大，便可产生大角度偏转。例如，要

注 在后面的计算中常出现因子 $e^2/4\pi\epsilon_0$ ，为方便起见，用能量乘长度的量纲来表示 $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = (1.9 \times 10^{19} \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑})^2$
 $= 1.44 \times 10^{-9} \text{ 电子伏} \cdot \text{米}$
 $= 14.4 \text{ 电子伏} \cdot \text{埃}。$