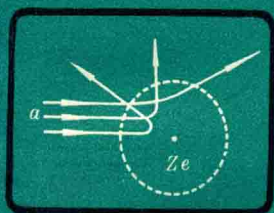


中学物理教学参考丛书

原子结构和玻尔理论



上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

原子结构和玻尔理论

王贤德 史玉昌

上海教育出版社

中学物理教学参考丛书

原子结构和玻尔理论

王贤德 史玉昌

上海教育出版社出版

(上海永福路123号)

新华书店上海发行所发行 上海崇明印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 2.75 字数 57,000

1986年6月第1版 1986年6月第1次印刷

印数 1—1,800本

统一书号: 7150·3507 定价: 0.37元

编 者 的 话

本书是中学物理教学参考丛书之一，主要供中学物理教师参考。全套丛书共有十七本，将陆续出版。

《原子结构和玻尔理论》的主要内容是论述有关原子结构和玻尔理论的基础知识。

全书共分四章：第一章论述了原子结构的模型及其实验验证，第二章阐述了氢原子光谱的规律性，第三章运用玻尔理论讨论了氢原子的能级和结构问题，第四章论述了对玻尔理论的推广，并简单地介绍了量子力学对氢原子问题的讨论。

限于编者的业务水平，书中难免有错误和不妥当的地方，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 原子的模型	1
一、汤姆孙原子模型	1
(一)原子的由来	1
(二)汤姆孙发现电子	3
(三)汤姆孙的原子模型	4
(四) α 粒子散射实验	5
二、卢瑟福原子核式结构模型	10
(一) α 粒子散射理论	11
(二)实验验证	15
第二章 氢原子光谱	22
一、光谱	22
(一)光谱仪	23
(二)发射光谱	23
(三)吸收光谱	26
二、光谱规律	27
(一)频率、波长和能量	27
(二)氢原子的光谱规律	28
(三)氢原子光谱的其他线系	30
第三章 氢原子的定态和能级	36
一、经典物理的困难	36
二、玻尔假设	39
三、氢原子的定态	42
(一)氢原子中电子定态运动	42

(二)氢原子光谱的线系公式	46
四、氢原子的能级	50
(一)氢原子的能量和它的电子状态	51
(二)氢原子的能级图和线系公式	52
第四章 玻尔理论的推广及其局限性	60
一、玻尔理论的推广——质量修正	60
(一)原子核运动引起的效应	60
(二)氢的同位素的发现	64
二、玻尔理论的推广——类氢离子	66
三、玻尔理论的地位和局限性	68
四、量子力学对氢原子的解释	70
(一)微粒的二象性	71
(二)波函数 波动方程	73
(三)量子力学对氢原子的解释	74
习题	79
习题答案	81

第一章 原子的模型

十九世纪末到二十世纪初的这段时期，物理学家进行了若干实验和探索，知道电子是带负电的粒子，它是一切原子的组成部分，但原子通常是中性的，因此在原子内部必定要存在着带正电的部分。人们自然会问，原子内部的结构是怎样的？这是个研究微观世界首先要碰到的问题。关于原子内部的结构，物理学家们曾经提出过各种模型，其中比较有代表性的是汤姆孙模型和卢瑟福的原子核式结构模型，本章将环绕这两个模型展开讨论。

一、汤姆孙原子模型

物理学是一门实验性很强的科学，物理定律是物理学家经过无数次的实验、分析、归纳总结出来的。因此任何一个物理模型的提出，必定有它广泛的实验基础，并能用它来解释或预言一些新的实验事实，这样提出的物理模型才会被人们所接受。从各种原子模型的提出，最后到卢瑟福原子核式结构模型的确立，正是遵循着这一规律。回顾这段历史，可以看到物理学家思想活跃勇于探索，而又严肃认真尊重客观规律的科学精神。

(一) 原子的由来

“原子”这个概念，我国战国初期的墨子（名翟，公元前480

—公元前 420 年)认为:世界千变万化的各种不同的物质,都是由一种不可分割的东西所构成的,其名叫做“端”。“端”按现在的观点就是“原子”。

“原子”这个名词,是古希腊的哲学家最早使用,英语中的“atom”来源于希腊语“ατομξ”,其涵义是不可分割的意思,古希腊的“原子唯物论”者相信宇宙间万物都是由不可分割的基本单元——“原子”所构成的,宇宙间有无数的原子,并在一个无限“虚空”中永远运动着,它们从古以来就已经存在着,并且它们既不能被产生,也不能被消灭,宇宙间各种客观现象都是原子及其运动的表现。

古代哲学家的臆想,当然不能作为科学的真理,二千多年来的这种臆想,由于缺乏实验的依据,没有得到进一步的发展。到了十七世纪的牛顿力学时代,“原子”的概念又开始得到重视,英国的科学家胡克、波意耳和牛顿等人,都曾作过物质是由许多不连续的质点所构成的结论。1808 年英国化学家道尔顿将古代原子学说运用到化学中去阐明化学中的定比定律和倍比定律时,他认为:物质是由原子组成的,原子是不能再分的最小微粒,同种原子在重量、大小和其他性质上都相同,一切原子都处在不停的运动状态。1896 年俄国科学家门捷列夫发现了元素周期律,进一步指出:化学元素的性质是随着它们的原子量大小而作周期性的规律变化。

从古代哲学家对“原子”概念的预言,到十九世纪中期科学家们由一些实验说明原子是不可再分的最小物质微粒,这对于化学变化是成立的,对于气体分子运动论中所处理的原子跟其他原子之间的碰撞也是成立的,到此时“原子”的概念才算初步地确立下来。但是随着科学技术的进一步发展,到了十九世纪末期,人们又发现原子并不是组成物质的最小微

粒,原子是由比它更小的物质组成的,因而原子不再是一种不可分割的微粒,而是有着更复杂的内部结构。化学研究已经阐明各种物体是由元素构成的,原子是元素的最小单元。各种元素的原子结构是有差异的,例如氢和氧都是元素,它们的最小单元就是氢原子和氧原子,这两种原子的结构是不同的。原子物理学主要研究原子内部的结构及其运动。从十九世纪末期开始迅速发展。

(二) 汤姆孙发现电子

对于原子内部结构的研究,似乎是从一个与它关系不大的阴极射线的研究开始的,于1897年英国物理学家汤姆孙完成了他有名的实验,测定了阴极射线是一种粒子流,并且测定了此粒子流中每一个粒子的电荷和质量之比 e/m ,从而确定了电子的存在。图1-1是汤姆孙所用的阴极射线管(又称克鲁克斯管),从阴极C发出的阴极射线,穿过用来将阴极射线限制成为细束的狭缝A和B,然后再穿过D和E之间的空间,最后在管子右端带有标尺涂有荧光物质的屏上出现光点。将D和E两个板极充电,可以引起阴极射线细束向上或向下偏转,从细束的偏转方向可以证明它是由带负电的粒子组成的粒子流,然后再在D和E之间加上一个与纸面垂直的匀强磁场,可以观察到磁场也能使细束发生向上或向下的偏转,从磁场使它的偏转也可以证明它是由带负电的粒子组成的粒子

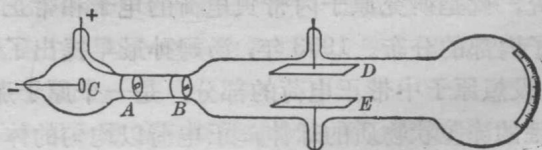


图 1-1 阴极射线管

流。调节磁场的强弱,可以使亮点回到初始位置,这时阴极射线中的粒子受到的电场力与磁场力平衡,由此可以求出粒子的速度,然后再利用电场或磁场单独对它作用产生的偏转幅度,可以计算出细束中粒子的电荷和质量的比值 e/m 。

汤姆孙测得了阴极射线的 e/m , 又用其他方法测量了氢离子的荷质比 e/M , 它只有阴极射线粒子 e/m 的二千分之一左右, 汤姆孙认为阴极射线是由质量比氢离子小得多的粒子所组成, 他称这些粒子为“微粒”, 并称“微粒”所带的电荷为电子——代表电荷的基本单元。现在我们通常称阴极射线为电子流, 电子具有质量并带有负电荷, 电子的质量 $m_e = 0.91 \times 10^{-30}$ 千克, 电子的电量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑。

汤姆孙在对阴极射线作了仔细研究后, 又指出用不同物质作阴极时, 都能产生阴极射线, 它们都是高速运动的电子流。既然用任何物质作阴极都能产生阴极射线, 这就表明任何元素的原子中都有电子存在, 并且很容易地从原子中释放出来, 因此原子不可能是不可分割的最小单元了, 这就揭开了要求探索原子内部结构的序幕。

(三) 汤姆孙的原子模型

自从发现电子后, 人们逐渐认识到电子是各种元素的原子的共同组成部分, 原子又是一个相当稳定的中性体, 那末原子内部必然还有带正电荷的物质存在。因此对于原子内部结构的研究, 就是研究原子内带负电荷的电子和带正电荷的部分在原子内部的分布。1903 年, 汤姆孙最早提出了一个原子模型, 他设想原子中带正电荷的部分, 是一个原子那末大小、具有弹性的冻胶状物质的球体, 正电荷以均匀的体密度分布在整个球体内, 而带负电的电子则分布在球内一定的平衡位

置上,并在此平衡位置附近作简谐振动。有人称这一原子模型为“葡萄干蛋糕”模型,葡萄干好比电子,而蛋糕就好比是由正电荷组成的球体。

为了检验汤姆孙原子模型的正确性,可以从两个方面来进行。一个是计算出电子在作简谐振动时的频率值,再用它来与原子所发射光谱的频率值进行比较。另一个是利用碰撞的办法实地考察一下原子内幕,从入射粒子的散射情况来推断原子内部的结构情况。有关简谐振动频率的计算,作为例题附在本章的最后部分,利用此模型计算得到的结论不能正确地解释原子发出的线光谱,并且也不能解释下面所要讲的 α 粒子散射实验,因此该模型很快地被人们舍弃了。

(四) α 粒子散射实验

汤姆孙的学生卢瑟福为了验证汤姆孙原子模型的正确性,从1906年起做了有名的 α 粒子散射实验,实验的目的原是想证实汤姆孙原子模型的正确性,但是实验的结果却成了否定汤姆孙原子模型的有力证据,并在此基础上卢瑟福提出了原子的核式结构模型。

二十世纪初,人们通过一系列的实验已经知道原子是一个直径约为 10^{-10} 米大小的球体,为了要考察原子内部的结构,必须寻找一个能进入到原子内部去的粒子,并能与原子发生相互作用,这种粒子就是从天然放射性物质中放射出来的 α 粒子,它带有两个单位的正电荷,质量约为氢原子质量的四倍,它就是失去两个电子的氦原子。图1-2就是有关这个实验装置的示意图。

在一个铅盒里放有少量的放射性元素钋,作为 α 粒子源,它发出的 α 粒子从铅盒的小孔射出,形成一束很细的射线射

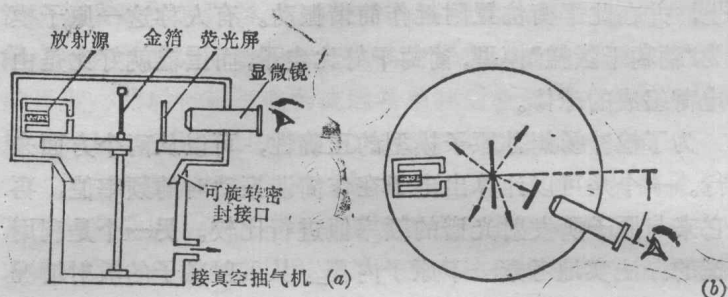


图 1-2 α 粒子散射实验装置

到金属箔上,受到金属箔中的原子对它的作用,当 α 粒子穿过金属箔后,射到荧光屏上产生一个闪光,这些闪光可用显微镜观察到,记下这些闪光数,就可以表示到达这个范围内的 α 粒子数。整个装置是放在一个抽成真空的容器里,以避免 α 粒子和空气中的原子碰撞而影响实验的进行。荧光屏和显微镜能够围绕金属箔在一个圆周上转动,因而能够测量不同偏转角的 α 粒子数。实验结果告诉我们,绝大多数的 α 粒子穿过金属箔后仍沿着原来方向前进,有少数发生了偏转,并发现占总数 $1/8000$ 的粒子其偏转角超过 90° ,甚至有的被反弹回来,偏转角几乎达到 180° 。这种现象叫做 α 粒子的散射。

从汤姆孙的原子模型来看,由于 α 粒子是带两个单位正电荷的高能粒子,它与原子中的电子和带正电荷的球体都有库仑力的作用。先考虑 α 粒子和电子之间的相互作用,根据力学中的碰撞理论,两个粒子碰撞后动量改变的大小应是相等的。由于 α 粒子的质量是电子质量的七千多倍,所以当 α 粒子与电子相碰后,对 α 粒子的运动不会产生显著的影响。因此, α 粒子与金属箔中的原子碰撞时,仅需考虑 α 粒子与原子中带正电荷的部分之间的相互作用就可以了。设原子的半径

为 R , 正电荷 Ze 均匀地分布在球体内 (Z 是金属箔的原子序数), α 粒子带 $+2e$ 的电荷, r 为 α 粒子离开原子球心的距离, 先分析一下它们之间的库仑斥力的大小:

当 $r > R$ 时, 即 α 粒子尚未接触到原子时, α 粒子受到原子对它的库仑斥力

$$F_1 = K \frac{2Ze^2}{r^2} \quad (1)$$

当 $r = R$ 时, 即 α 粒子刚接触到原子的边缘时, 它所受到的库仑斥力

$$F_2 = K \frac{2Ze^2}{R^2} \quad (2)$$

当 $r < R$ 时, 即 α 粒子进入到原子内部时, 它受到的库仑斥力为

$$F_3 = K \frac{2e \cdot q}{r^2}。$$

式中的 q 是以 r 为半径的球体内的电量, 由于汤姆孙原子模型中假设正电荷是以均匀的体密度分布在原子内, 所以电量 q 应是

$$q = \rho V = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3} \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{Zer^3}{R^3}。$$

代入上式最后可得

$$F_3 = K \frac{2Ze^2}{R^3} r \quad (3)$$

比较 F_1 、 F_2 和 F_3 的数值, 可知 F_2 的数值最大, 即 α 粒子接触到球面时所受到的作用力最大。我们可以估计一下 α 粒子受到最大的库仑力 F_2 的大小, 设金属箔的原子序数 $Z = 50$, 原子的半径 $R = 10^{-10}$ 米, 现根据 (2) 式

$$F_2 = K \frac{2Ze^2}{R^2}$$

$$= \frac{9.0 \times 10^9 \text{ 牛顿} \cdot \text{米}^2 / \text{库仑}^2 \times 2 \times 50 \times (1.60 \times 10^{-19} \text{ 库仑})^2}{(10^{-10} \text{ 米})^2}$$

$$= 2.3 \times 10^{-6} \text{ 牛顿}。$$

当 α 粒子在原子外或原子内时, 库仑斥力都比此值要小, 由式 (3) 可知, 当 α 粒子离原子中心愈近时所受到的斥力愈小, 当 α 粒子通过原子中心时 $r=0$, 它所受到的斥力为零。

另外, 我们可以估计 α 粒子通过汤姆孙原子时, 克服库仑斥力所作的功, 粗略地估计其数量级时, 其作用力可用 F_2 来替代, 路程用其半径 R , 故可得

$$A = F_2 \cdot R = K \frac{2Ze^2}{R^2} \cdot R = K \frac{2Ze^2}{R} \quad (4)$$

(实际过程中库仑斥力 F_2 是一个变力, 严格地计算可得出 α 粒子通过汤姆孙原子时库仑斥力所作的功 $A' = K \frac{3Ze^2}{R}$), 其

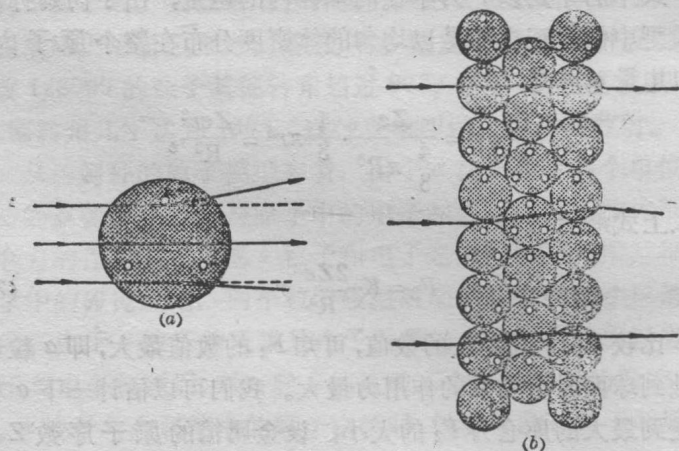


图 1-3 α 粒子在汤姆孙原子模型中的散射

数量级为 10^3 eV。这个值远小于天然放射性物质中放射出来的 α 粒子的动能。实验中常用的 α 粒子的速度为 10^7 米/秒，其能量约为 2×10^6 eV，因此 α 粒子很容易通过汤姆孙原子，如图 1-3 所示。所以 α 粒子通过汤姆孙原子时，只能产生小角度散射，而无法说明实验中出现的大角度散射。

有人会提出这样的问题，金属箔总是有一定的厚度， α 粒子通过金属箔时并不是只与一个原子相碰撞，而是与很多原子相碰撞，它的累计结果会使 α 粒子产生大角度散射。由于金属箔中原子的排列是杂乱无章的， α 粒子穿过金属箔时，受到这个原子的作用向这个方向偏转一些，以后又受到另一个原子的作用向另一个方向偏转一些。利用统计理论可以证明，在金属箔较薄的情况下，只有比 1% 少得多的 α 粒子的散射角大于 3° ，而散射角在 90° 或 90° 以上（有时称它为反向散射）的粒子数约是总数的 10^{3500} 分之一，这是一个比实验结果 $1/8000$ 要小得多的值，因此，即使考虑多次散射，利用汤姆孙的原子模型无论如何总不能解释 α 粒子散射实验中出现的大角度散射。

卢瑟福原先想通过 α 粒子散射实验来证明他的老师提出的汤姆孙原子模型的正确性，想不到实验结果会出现八千分之一的反向散射，卢瑟福对此大为惊讶地说：“这是我一生中从未有过的最难以置信的事件，它的难以置信好比你对一张纸射出一发 15 英寸的炮弹，结果却被顶了回来而打在自己身上，经过思考我认为反向散射必定是单次碰撞的结果，而当我作出计算时看到，除非采用取一个原子的大部分质量集中在一个微小的核内系统，是无法得到这种数量级的任何结果的，这就是我后来提出的原子具有很小而质量很大的核的想法。”卢瑟福很有洞察力，他不但不盲目崇拜别人提出的原子模型，

而是面对实验事实,感到汤姆孙原子模型之所以不能解释 α 粒子的大角度散射,关键在于“正电荷均匀地分布在整個球体内”这一假设的不正确,随后卢瑟福就提出自己的原子模型。

二、卢瑟福原子核式结构模型

卢瑟福看到汤姆孙原子模型解释不了 α 粒子散射实验,在1911年提出了一个新的模型,他假设原子的结构与太阳系的结构相似,原子的质量几乎全部集中在一个称为原子核的小体积内,原子核带正电,带负电荷的电子则环绕着原子核旋转着,对正常的中性原子来说,原子核所带的正电荷与各电子所带的负电荷之和相等。因为在这个模型中心有一个核,所以有时又称为卢瑟福的原子核式结构模型。利用卢瑟福的原子核式结构模型又如何解释 α 粒子的大角度散射呢?首先分析一下在这个模型下 α 粒子和原子中的带正电荷部分之间的

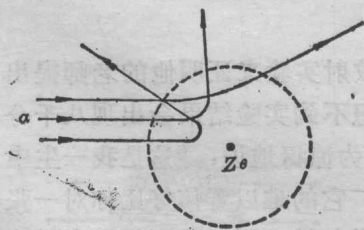


图 1-4 α 粒子在原子核式结构模型中的散射

库仑相互作用力,当 α 粒子和原子核的距离大于或等于原子半径(即 $r \geq R$ 时), α 粒子所受到的力与利用汤姆孙模型时完全一样,但当 α 粒子进入原子内部,即当 $r < R$ 时, α 粒子此时受到的库仑

斥力 $F = \frac{K2Ze^2}{r^2}$, 从此式可

以看到,当 r 愈小时 α 粒子受到的库仑斥力愈大,因此就有可能发生大角度散射,如图 1-4 所示。

卢瑟福不仅提出了原子的核式结构模型,还根据这个模

型计算了沿着一定的偏转角散射的 α 粒子和偏转角之间的关系,这就是 α 粒子散射理论。1913年,他的学生盖革和马斯顿又仔细地做了 α 粒子散射实验,实验结果完全符合由卢瑟福原子核式结构模型计算的结果,于是卢瑟福提出的核式结构模型才正式被人们公认。

(一) α 粒子散射理论

在进行推导之前,先忽略一些次要因素,首先假设金属箔中的原子在碰撞过程中没有反冲现象,即认为被碰撞的原子始终处于静止状态,其次假设 α 粒子垂直入射金属箔。有了这两个假设以后推导起来就比较方便了。另外,前面已经说明 α 粒子碰撞原子时,电子对 α 粒子的运动影响可以略去不计,只需考虑带正电部分的物体对 α 粒子的作用就可以了。

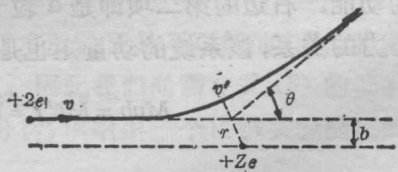
散射理论大致可以分成下面两个步骤来研究:

1. 考虑一个入射的 α 粒子和金属箔中一个原子的碰撞,计算 α 粒子的运动轨道。

2. 为了能够与得到的实验结果相比较,需要对大量的入射 α 粒子与金属箔中的大量原子作统计分析,并且要解决 α 粒子的散射是向整个空间的,而实验观察只能局限在荧光屏上一个小范围内进行的矛盾。

(1) α 粒子的散射轨道

考虑一个入射的 α 粒子和金属箔中一个原子核的作用,如图1-5所示。



设 α 粒子的初速为 v , 图1-5 α 粒子与原子核之间的散射质量为 M , 自左向右射向金属箔。为了不考虑碰撞过程中金