

原子物理学

殷传宗 主编
莫敦庸

上册



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)上册

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: 11.125 字数: 241千字

1987年4月第1版 1987年4月第1次印刷

印数: 1—7,550册

ISBN 7—5633—0002 —3/0·002

统一书号: 13502·002 定价: 2.05元

说 明

长期以来，高等师范院校（包括师专及教育学院）一直没有一本合适的《原子物理学》教材。为此，西南、中南地区的西南师大、广西师大，湖北大学、南充师院、云南师大和重庆师院等六所院校主讲该课程的教师，遵循原教育部颁发的教学大纲和当前的教改精神，参考了现行的有关教材，结合各自多年来的教学经验，经过多次讨论、修改、编成这本《原子物理学》，本书共九章，计划课内学时数约72。

原子物理学是研究物质微观结构的一门学科，属普通物理学范畴，是电磁学和光学的后继课程；着重从物理实验规律出发，引进量子化概念，探讨原子、分子、原子核与基本粒子的结构和某些运动规律，解释它们的表观性质。本书强调物理实验的分析、物理概念和物理图象的建立，使学生初步了解微观世界中三个递深的结构层次，使学生具有分析和处理有关原子物理的能力，并为以后继续学习量子力学和有关课程打下基础。

本书在内容的安排和取舍上注意体现了师范性。前三章以阐述原子结构为中心内容，第一章的后半部分简要地介绍了量子力学的基本概念和对氢原子的描述，并与玻尔氢原子理论加以比较，以此说明量子力学处理问题的方法。这样做不仅可以使学生理解玻尔氢原子理论的局限性，量子力学产生并取代旧量子论的必然性；同时在以后各章的论述中，能

引用量子力学的概念及其对一些具体问题的结论，使讨论更加切合微观体系的规律。第三章的后半部分除介绍X射线的基本知识外，主要是作为证实原子壳层理论的实在性而安排的。为加强原子核物理的知识，我们将其内容分编成第五、六、七和八共四章，第九章对粒子物理作了简要的介绍。为了丰富读者的知识，书中我们又还搜集了一些有价值的资料，作为附录，以供读者参考。

此外，各章均有小结、思考题、例题和习题（并附有答案），这对于学生掌握知识，提高分析问题解决问题的能力以及应用于中学物理教学也是有益的。

参加本书编写的有：湖北大学的韦快乐（第一章），南充师院的肖源金（第二章），广西师大的莫树春（第三、四章），云南师大的杨永柏、赵政鸿（第五、六章），广西师大的柳继锋（第八章），重庆师院的刁纯钰（第七、九章），西南师大的殷传宗、（附录）。复旦大学的陆汉忠审阅了本书的第一、二、三、四、六、九章及附录。最后全书由主编西南师大的殷传宗和广西师大的莫敦庸审定。

在本书的出版过程中，得到了广西人民出版社的谭文智、广西师大的陆明天、廖丽星的多方协助和大力支持，广西师大物理系和重庆师院物理系为本书的编写和审定提供了不少帮助，有关院校的张运莲（湖北大学）、漆长林（南充师院）、成芸德（西南师大）等同志协助绘制图稿和整理等工作，为此，我们对上述的有关单位及同志们表示衷心的感谢！

由于我们学识有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者和同行们批评指正。

编 者

1987年元月

目 录

(上册)

绪 论	(1)
第一章 氢原子	(3)
§1.1原子的有核模型	(3)
§1.2玻尔的氢原子理论	(20)
§1.3原子能级的实验验证	
——夫兰克—赫兹实验	(44)
§1.4索末菲对玻尔理论的发展	(49)
§1.5空间量子化理论	(63)
§1.6量子力学对氢原子的描述	(71)
小 结	(107)
思考题	(110)
习 题	(112)
第二章 多电子原子	(117)
§2.1碱金属原子的光谱	(117)
§2.2碱金属原子光谱的精细结构	(131)
§2.3氢原子光谱的精细结构	(145)
§2.4原子的矢量耦合模型	(151)
§2.5氦及第二族元素的光谱和能级,	
泡利原理	(165)
§2.6多电子原子光谱的一般规律	(173)
§2.7多电子原子跃迁实例及激光器结构	(183)

§2.8原子的磁矩及外磁场对原子的作用·····	(193)
§2.9塞曼效应及帕邢—巴克效应·····	(206)
小 结·····	(215)
附录 A. 顺磁共振和核磁共振·····	(218)
附录 B. 光谱线的宽度及激光光谱学·····	(225)
思考题·····	(236)
习 题·····	(238)
第三章 原子的壳层结构 ·····	(243)
§3.1元素性质的周期性变化·····	(243)
§3.2原子的电子壳层结构·····	(249)
§3.3原子的电子壳层的填充·····	(254)
§3.4原子基态光谱项的确定·····	(266)
§3.5X射线与内层电子的跃迁·····	(272)
小结·····	(293)
附录 洪特规则·····	(295)
思考题·····	(298)
习 题·····	(299)
第四章 分子结构与分子光谱 ·····	(301)
§4.1分子结构与分子光谱·····	(301)
§4.2双原子分子的转动光谱·····	(306)
§4.3双原子分子的振动光谱·····	(313)
§4.4双原子分子的振动转动光谱·····	(320)
§4.5双原子分子的电子振动转动光谱·····	(325)
§4.6腊曼效应·····	(336)
小 结·····	(343)
思考题·····	(347)
习 题·····	(348)
习题答案·····	(349)

绪 论

人们很早就发现，一个物体可分成许多小块，小块又可分成更小的碎粒，于是就会提出这样的问题，如此继续分下去，将会怎样呢？古希腊德谟克利特（公元前460—370年）提出了物质的原子论，认为物质存在有最底层的基本成元

“原子”。而物质就是由这种最小的单元——原子所组成。我国的庄周（公元前四世纪）在《天下篇》中有“一尺之捶”日取其中，万世不竭”。都提出了物质的原子结构思想。但这些只是哲学的设想，在未得到实验的验证时，还不能把它看成是科学的真理。直到十九世纪，大量的实验才使原子论由哲学的设想变成科学的真理。如1808年道尔顿的定比定律和倍比定律1885年巴尔末发现氢光谱的规律，1895年伦琴发现X射线。汤姆逊(J.J. Thomson)(1897年)测定阴极射线粒子的电荷和质量之比 $e/m \approx 1.7 \times 10^8$ 库仑/克，密尔根用油滴法测定出电子的电荷，1896年贝克勒尔(H. Becquerel)发现铀的天然放射，1898年居里(Curie)夫人发现镭和钋的天然放射，1911年卢瑟福(Rutherford)的 α 粒子散射实验发现有少量 α 粒子产生大角偏转，证实了原子的核式结构。在此基础上，1913年玻尔提出了他的两个假定，才初步形成原子结构的理论，但玻尔理论是和经典电磁理论矛盾的，在光电效应和康普顿效应得出光的波粒二象性的启发下，1924年德布洛意提出微观粒子具有波粒二象性，戴维孙和革末于1927年电子衍射的实验中得到证实，于是微观体系的理论——量

子力学建立起来，原子物理学得到进一步的发展。

一般来说，原子物理学的内容是指原子核外和原子核两部分，不过为了对原子核的了解，还要对物质结构的更深层次：粒子——层子（夸克）进行研究，但重点是核外和核。

不管是整个原子或者核外的电子及核，都是看不见、摸不着的，属微观的范畴，它们的运动变化规律也是和宏观粒子不同的，因此，可以说是内容抽象、概念全新，理论和规律也与经典理论规律不全相同。这就带来了学习上的困难。特别是作为《普通物理》的一部分，不可能讲深讲透，再加上原子物理学还在飞速发展，许多问题还没弄清，更增加理解的困难。但是只要我们重视实验事实，尊重实验事实，本着理论联系实际的原则，在实验的基础上，进行细致的分析，抓住它的波粒二象性和量子性（不连续性）的特点，不难弄清概念，找出规律，理解理论的，进而开动脑筋，大胆实验，完善理论，推动原子物理学的发展也是可望的。

第一章 氢原子

十九世纪末和二十世纪初，化学分析指出：物质是由元素构成的，而元素又是由同种原子组成的。原子虽是组成元素的最小单元，但它并不像古代哲学家和中世纪人所想像的那样，是不可分割的物质“基元”。原子内部还有它自己复杂的结构。在本章中我们将从著名的卢瑟福的 α 粒子散射实验入手，介绍原子的核式结构，进而学习玻尔—索末菲的氢原子理论；最后初步了解用近代的量子理论所描述的氢原子。本章的内容是整个原子物理的重要基础。

§1.1 原子的有核模型

1897年，汤姆逊(J·J·Thomson)确认电子存在后，人们普遍认为电子是一切原子的组成部分。但在正常情况下原子又是呈电中性的，可见原子中必有带正电的部分；另从电子的荷质比(e/m)的测量中可知，电子的质量比起整个原子的质量来要小得多，一个电子的质量约相当于氢原子质量的二千分之一。这些实验事实给人们提出一个重要的问题：原子内部的电荷和质量是怎么分布的？原子内部会有什么样的结构呢？

(一) 汤姆逊原子模型

关于原子结构问题，在十九世纪末和二十世纪初曾有许多

多设想，其中最引人注意的，有1898年汤姆逊提出的“葡萄干面包”式原子模型。他设想原子中带正电的部分以均匀的体密度分布在一个大小等于整个原子的球体内，而电子则一粒一粒地嵌在这个球内的不同位置上如图1-1。原子处在最低能态时，电子则固定在平衡位置上；原子处在高能态时，电子则在平衡位置附近振动。人们观察到原子光谱的各种频率，就是电子振动的频率。为了解释元素的周期性，汤姆逊还假设电子分布在一个个同心环上，并且指出各环上只能安置有限的电子数等。

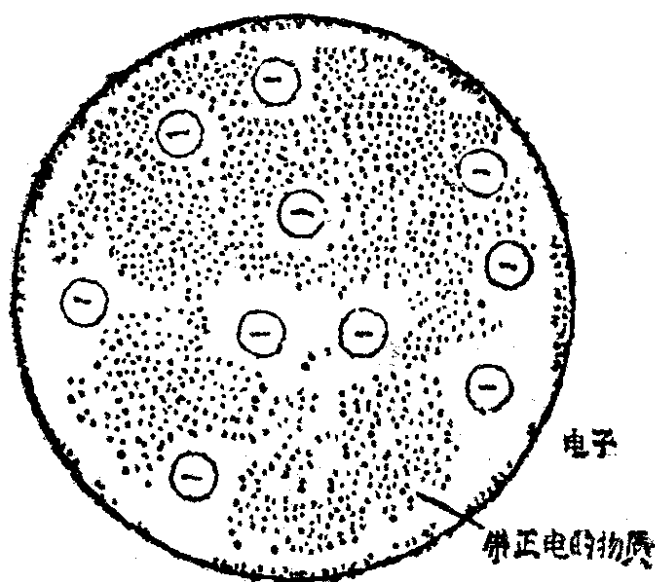


图 1-1 汤姆逊模型

汤姆逊模型能够把当时已知的实验事实概括进去，并在解释元素周期性方面确实取得了一定的成功，所以在一段时间内为人们所接受。

1903年，勒纳特 (P. Lenard) 用电子在金属膜上做散射实验时，发现较高速的电子很容易穿透原子，整个原子并不象汤姆逊模型指出的那样：是一个半径为 10^{-10} 米那样的

实体球，中间有很大的空隙。这样汤姆逊模型受到了严重的挑战。

（二）卢瑟福的核式结构

彻底否定汤姆逊模型的是卢瑟福（E. Rutherford）的 α 粒子散射实验。1909年卢瑟福的学生盖革（H. Geiger）和马斯顿（E. Marsden）在继续卢瑟福开始的 α 粒子散射实验中，发现 α 粒子在轰击原子时，有大约 $1/8000$ 的粒子被反射回来。卢瑟福感到：“就像一枚15英寸的炮弹打在一张纸上又被反射回来一样”不可思议。但是，卢瑟福充分尊重实验事实，经过严谨的理论分析，于1911年提出著名的原子核式结构模型。为了掌握核式结构理论，首先必须了解其实验基础— α 粒子散射实验。

1、 α 粒子的散射实验。

α 粒子散射实验的基本思想是：用一束具有一定能量的 α 粒子去碰撞“靶”原子，使其与靶原子发生相互作用，并引起可以观察到的散射现象，分析和概括这些观察到的散射现象，达到探索被碰撞的原子内部结构的目的。这是一种研究物质结构的有效方法，特别是近一、二十年随着离子注入技术的发展，人们需要知道注入粒子浓度的分布和迁移的规律，以及材料辐射损伤和杂质结晶学位置等，都要借助粒子散射实验的原理，现已发展成为所谓的“卢瑟福背散射技术”，并获得了广泛的应用。

α 粒子散射实验的整个装置如图1—2所示，R为放射源镭C(RaC)，其放射出的 α 粒子是氦原子核(He^{+2})，带有 $+2e$ 的电荷，质量约为电子质量的7300倍，经一细的通道后成为一束狭窄的粒子束射向“靶”膜F上，F通常是用重

金属展成极薄的箔(厚度约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 米), 作为 α 粒子的

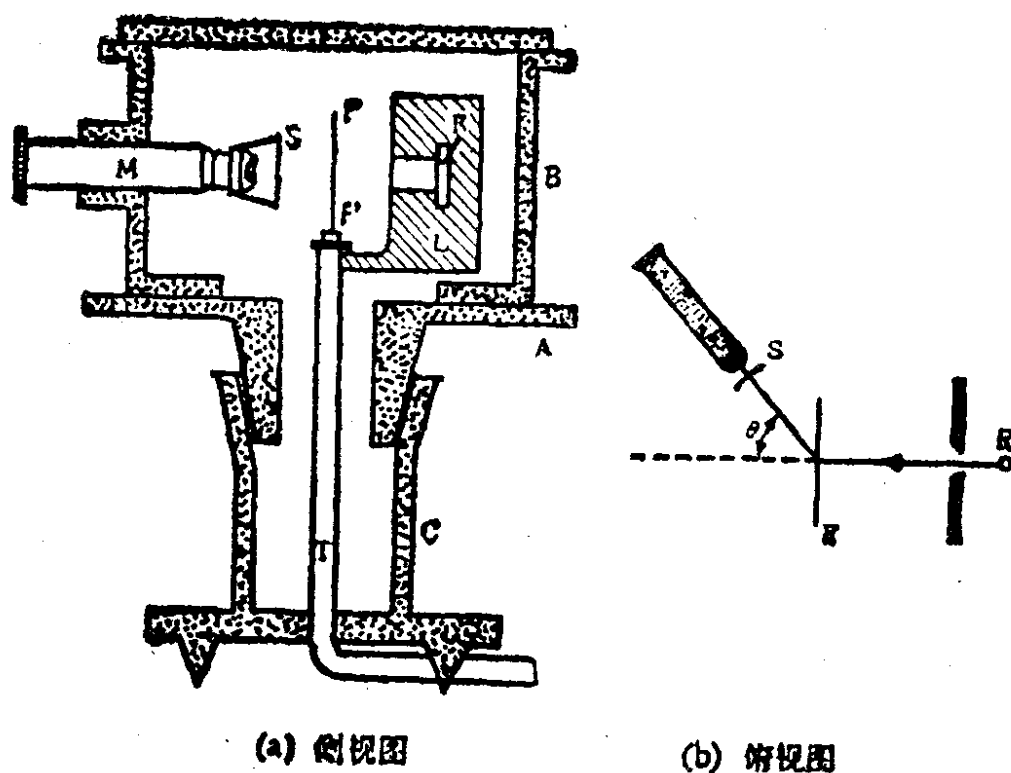


图1-2 α 粒子散射实验装置及观察 α 粒子散射的示意图

散射物, S为玻片上涂有硫化锌(ZnS) 荧光物质做成的屏, 用以接收经F散射到各个方向上的 α 粒子, 当 α 粒子打在荧光屏上, 就会发出微弱的闪光。通过荧光屏后面的放大镜M观察闪光, 就可记录在某一段时间内散射到某一个 θ 方向的 α 粒子数。为了避免 α 粒子与空气分子的碰撞, 整个装置通过T管并抽成真空。

实验发现: 绝大多数 α 粒子平均只有2—3度的偏转, 但有 $1/8000$ 的 α 粒子的散射角 θ 大于 90° , 有的甚至接近 180° , 这个现象引起卢瑟福等人的疑惑和重视。

2、对 α 粒子散射实验的分析

为什么 α 粒子会有大角甚至有大于 90° 的散射呢?这在汤姆逊模型中可能发生吗?经过简单的分析可知,在汤姆逊模型中是不会发生这现象的。因为当 α 粒子接近原子或进入原子“实体”时,那些只有 α 粒子质量 $1/7300$ 的电子是不可能改变高速飞行的 α 粒子的方向,倒是有可能受 α 粒子的作用而飞离开去,正像快速飞行的足球是不可被乒乓球碰撞而明显的改变方向,而迅速飞离的倒是乒乓球。这里我们为了突出主要矛盾和讨论问题的方便,可以假设 α 粒子只与原子中带正电的部分相互作用,当 α 粒子在原子核外边时($r > R$ 原子半径),它所受到原子正电荷的库仑斥力为

$$F_{\text{外}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Ze^2}{r^2}$$

即 $F_{\text{外}} \propto \frac{1}{r^2},$

到达“球面”时($r = R$),则

$$F_{\text{面}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Ze^2}{R^2},$$

进入“球内”时($r \leq R$),对 α 粒子起作用的电荷只是以 r 为半径的那样一个球体的正电荷 $Q = \frac{Zer^3}{R^3}$, α 粒子所受到的力

$$F_{\text{内}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Ze^2}{R^3} \cdot r,$$

按这个分析 α 粒子在离原子中心不同位置(r)处,所受的力 $F(r)$ 将如图1-3所示。由图可见,在汤姆逊模型中 α 粒子到达原子表面时受静电斥力 $F_{\text{面}}$ 最大,即使这样,汤姆逊模

型仍不可能使 α 粒子产生大角散射。

〔例〕设有能量为 10^6 电子伏的 α 粒子,射向半径为 10^{-10} 米, $Z=82$ 的汤姆逊原子,试计算 α 粒子最大的散射角。

〔解〕汤姆逊原子正电荷均匀分布在 10^{-10} 米范围内,假设原子中负

电荷全部去掉,留下正电荷与 α 粒子发生相互作用。当入射的 α 粒子与汤姆逊原子横向距离为 R (原子半径)时,它们的作用力最大,其值为

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

它们相互作用时间的数量级为

$$\Delta t \sim R/v$$

故 α 粒子的动量变化为

$$\begin{aligned} m\Delta v &= F\Delta t \\ &\sim \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Ze^2}{Rv} \end{aligned}$$

所以 α 粒子最大的散射角 θ 为

$$\theta = \frac{\Delta v}{v} \sim \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2Ze^2}{mRv^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{RE_K}$$

$$= 1.18 \times 10^{-3} \text{ (弧度)} = 1.03^\circ$$

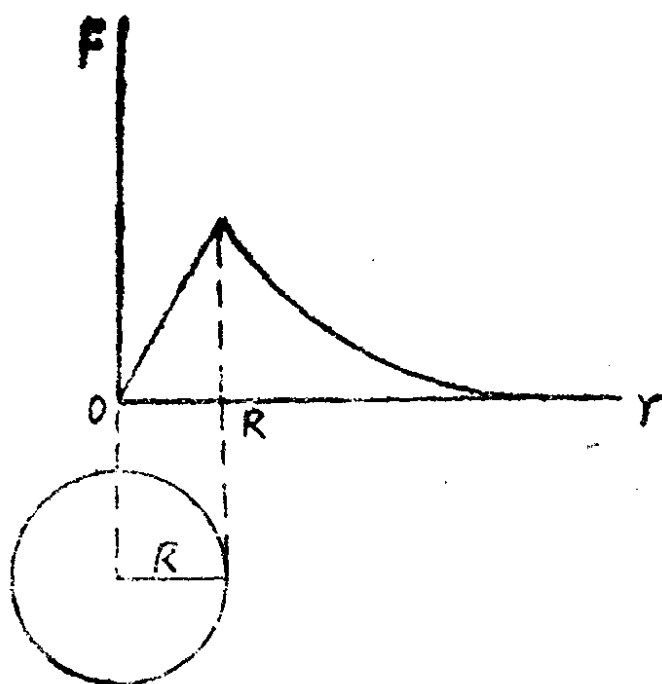


图1-3 α 粒子受电荷排斥力随 r 的变化

3. 卢瑟福的设想

鉴于上述情况，卢瑟福设想原子中几乎全部的质量和全部的正电荷都集中在原子中心一个很小的部分，称为原子核；而电子则分布在原子核的周围，原子的体积实际是电子分布的范围。这就是卢瑟福的“有核模型”。由于原子核很小， α 粒子虽然进入到原子区域，但它仍在核心外受到整个正电荷的作用，其所受力 F 为：

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

由于 r 很小，所以 $F(r)$ 可以很大，因此就有可能产生大角散射，如图 1—4

所示。卢瑟福在此设想的基础上提出可以由实验验证的理论—— α 粒子散射理论，它既可解释 α 粒子的大角散射，又可推算出原子核的大小，使他的“核式模型”建立在坚实的实验和理论的基础上。

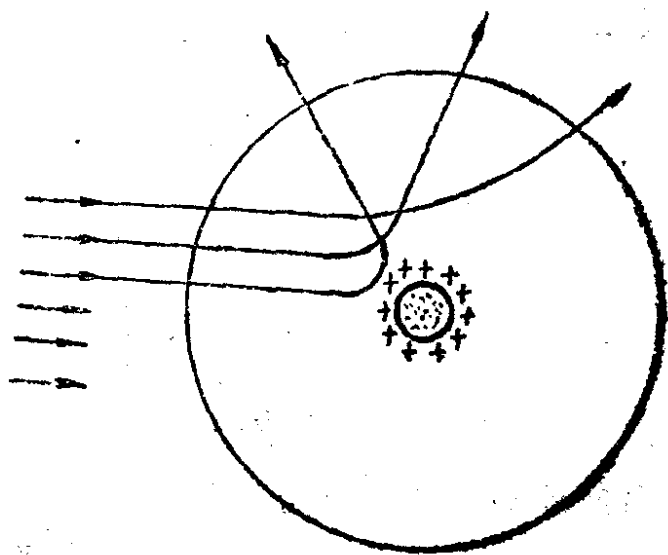


图1-4 α 粒子在核式模型中的散射

4. 卢瑟福的 α 粒子散射理论

首先考虑单个靶核对一个 α 粒子的散射作用。设有一个 α 粒子射到一个原子附近，它与原子核之间有库仑斥力，在

靶核的质量比起 α 粒子的质量大得多的情况下，可以认为靶核不动，而 α 粒子受库仑力的作用却改变了方向，如图 1-5 所示。图中 v 是 α 粒子入射时的速度， b 是 α 粒子入射方向与靶核之间的垂直距离，称为瞄准距离或碰撞参数。

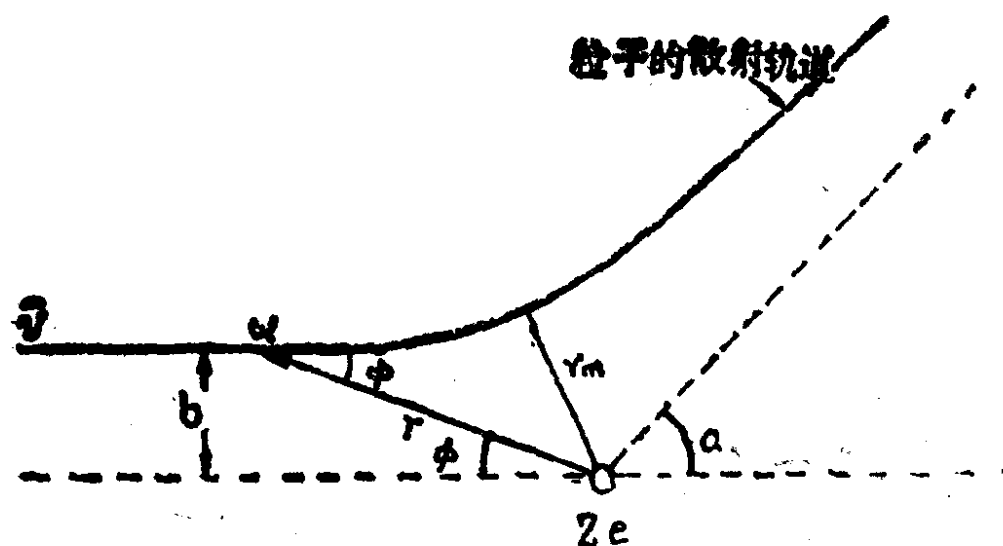


图 1-5 α 粒子在原子核的库仑场中的径迹

由力学原理可以证明*： α 粒子的径迹是以原子核为外焦点的双曲线，虚线是双曲线的渐近线，渐近线与 α 粒子入射方向之间的夹角 θ 称为散射角， θ 与 b 之间满足如下关系：

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = 4\pi\epsilon_0 \cdot \frac{Mu^2}{2Ze^2} b \quad (1.1.1)$$

式中 M 是 α 粒子的质量。

由(1.1.1)式可见， θ 与 b 有对应关系： b 大则 θ 小； b 小则 θ 大，当 $b \rightarrow 0$ 时，则 $\theta \rightarrow 180^\circ$ ，所以只要瞄准距离 b 足够小，就有可能使 α 粒子发生大角度的散射或背散射。

公式(1.1.1)在理论上是很重要的，但却无法用实验

*证明可见于多种理论力学教程，如周衍柏先生的《理论力学》教程。