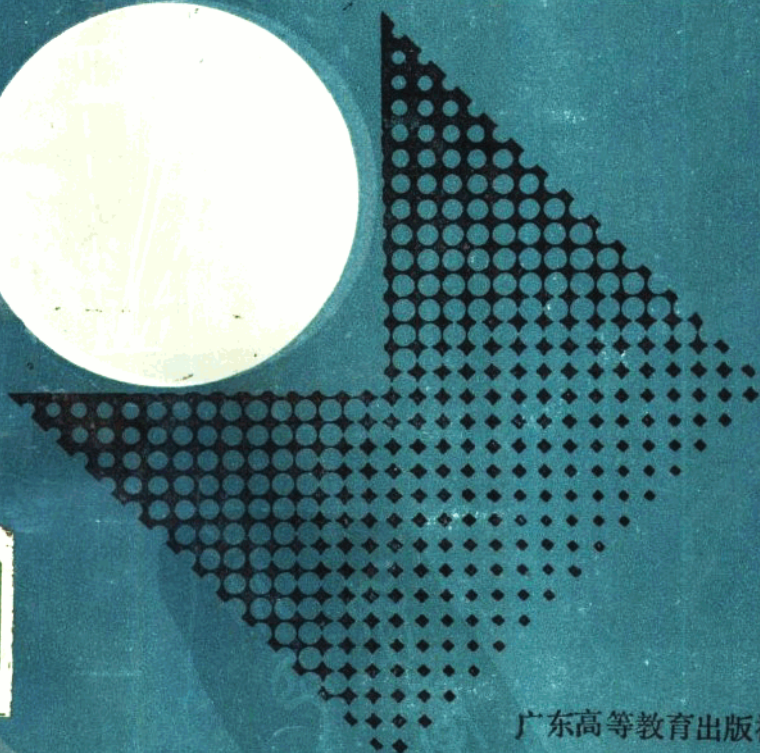
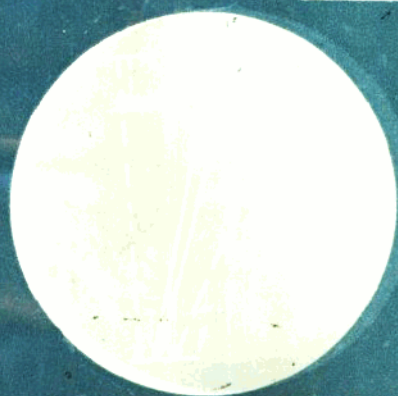


GAODENGXUEXIAO
HANSHOUSHIYONGJIAOCAI

高等学校函授试用教材

原子物理学

王开发 彭志成 主编



广东高等教育出版社

高等学校函授试用教材

原子物理学

王开发 彭志成 主编

王开发 彭志成 刘洪 编写
饶宜贤 米新宾 冯志通

广东高等教育出版社

内 容 提 要

本书系根据1984年原教育部颁发试行的《中学教师进修高等师范本科物理专业教学大纲》编写的。内容包括 原子结构及其初期量子理论、量子力学对氢原子的描述、多电子原子 分子结构与分子光谱、原子核物理基础和粒子物理等六章，每章有内容提要、小结、思考题和习题，书末附有各章习题答案。全书内容约需面授40学时。

本书可作为高等师范院校物理专业函授和中学物理教师进修的教材，也可作为夜大学等其他形式成人教育和自学用书。

高等学校函授试用教材

原子物理学

王开发 彭志成 主编

广东高等教育出版社出版发行

广东省惠东县印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张11.625 插页2 字数315千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数1—6130

ISBN 7-5361-0182-1/O·14 定价：3.10元

前 言

随着函授等成人教育事业的蓬勃发展,迫切需要能保证教育质量、体现函授等成人教育特点,适合于自学的教材。华中师范大学、华南师范大学、陕西师范大学、广西师范大学、湖南师范大学、湖北大学、河南大学、河南师范大学、陕西教育学院和湖北教育学院十所高等学校,根据原教育部颁发试行的《中学教师进修高等师范本科物理专业教学大纲》,结合各校多年来举办函授和中学教师进修的实践,合编了物理专业函授教材十七门。本书是该系列教材之一。

在编写过程中,我们力图使教材符合培养规格,保证教学质量,达到全日制高师本科物理专业的科学水平。为了使教材体现函授等成人教育的特点,适合于自学,除每章有内容提要、小结、思考题、习题和书末附有答案外,选择的例题较典型而全面,公式的推导较详细,注意突破难点和适当联系中学物理教学实际。

本书由华南师范大学王开发副教授和湖北教育学院彭志成副教授担任主编,参加编写的有王开发(绪论、第五章 §1 至 §8、附录)、彭志成(第一章)、陕西教育学院刘洪讲师(第二章)、河南大学米新宾副教授(第三章 §1 至 §6)、陕西师范大学郇宜贤副教授(第三章 §7 至 §9、第四章)、华南师范大学冯志通副教授(第五章 §9 至 §12、第六章)。

由于我们编写函授教材的经验不足,水平有限,加之时间仓促,书中难免有不少缺点和错误,诚恳希望使用本书的教师和读者批评指正。

十校物理专业函授教材编写组

一九八八年七月

绪 论

物理学是研究物质运动的最一般规律和物质基本结构的科学。原子物理学，则是物理学的一个重要的分支学科。现在人们已经知道，原子是由原子核和核外电子组成的；原子核又是由质子和中子所组成；质子、中子还有自身的结构。过去，人们一般认为，原子物理学，只研究原子核外的物质微观结构，而不涉及原子核内部的问题。但从现行教科书来看，从广义的角度来理解，原子物理学包括了原子物理、原子核物理、粒子物理三个部分，这正是本书重要的和基本的内容。

原子物理主要研究原子的结构，即研究原子核外电子的运动规律及其各种原子现象的应用等；原子核物理主要研究原子核的内部结构、核的运动变化（核衰变、核反应等）规律，核内核子之间的相互作用以及原子能的利用等；粒子物理主要是研究电子、光子、质子、中子等各种粒子的相互作用、相互转化以及它们的内部结构等。可见《原子物理学》是研究物质微观结构的科学，它的内容非常丰富，而且许多问题是当代物理学研究的重点和前沿，它的深入研究和发 展，将使人们对物质世界的认识更加深化，更加全面，更加接近客观真理，并将影响到物理学的各个领域；此外，原子物理学在生产上也起着重要作用，例如，发射电子材料的研究、发光材料、磁性材料、半导体材料和各种金属材料的研究，激光技术、X射线的应用等等，都与原子物理学有密切关系；原子核能和放射性同位素的应用，将对科学技术和生产的发展起着深远的影响。

人类社会的生产活动，是由低级向高级发展的，人类对社会方面和对自然界方面的认识也是由低级向高级逐步发展的，物理学的发展也是如此。所以，人类对物质世界的认识，是由初级到

高级，由粗浅到深入，由宏观到微观的一步一步发展的过程。

早在远古时期，人们就已猜测物质世界具有最小的组成单元，在我国殷周之际，就已经提出了宇宙万物皆由金、木、水、火、土这些“元素”构成的朴素的元素论思想，称之为中国的“五行”学说。到了公元前四至五世纪，我国的墨子进一步提出了“端”的概念。在“墨经”中有记载：“端：体之无序（厚）最前者也”。其意思是说，“端”就是组成物体（“体”）的一种体积极小（“无厚”）的最原始的微粒（“最前者”）。《经说》还解释说：“端：是无同（间）也”，其意思是说，在一个“端”里，没有共合的东西，是不可分割的。后来一个叫施惠的人曾说过，“其小无内，谓之小一”，意思是说“小一”这东西，不再有内，有就无法再分割了。可见，我国古代提出的“端”，就是原子的概念。到了战国时期，以公孙龙为代表，主张物质是可以无限分割的，他有一句名言：“一尺之棰，日取其半，万世不竭”。几千年前公孙龙的臆想，不断地得到现代科学的支持。

与墨子同时代的古希腊人德谟克利特（Democritus）学派也提出了“原子”的概念，认为一切物体都是由一些所谓“原子（Atoms）”构成的，“原子”是组成物体的最小单元，是不可再分的。

古人对物质世界的这种种猜想尽管属于臆测，没有科学实验为依据和证明，然而这种朴素的原子论，对于人类认识世界，对于科学的发展，都是一种重要的贡献。

到十七世纪，贾生第（P. Gassend）等人先后应用“原子假说”于分子运动论，提出了气体是由分子组成的，于是“原子”的概念又得到重视和发展。至于原子学说则是1808年道尔顿（J. Dalton）正式创立的，他认为一切元素都是由一些极其微小的粒子构成，这些粒子叫做原子。一切元素都有与之相对应的原子，这些原子互相结合可以构成无穷多类的分子。然而原子物

理学早期发展的重要时期是在十九世纪，这个时期，发现了大量的新的实验现象，早在1666年牛顿（I. Newton）利用棱镜分析，得到太阳光谱，1895年伦琴发现X射线，1908年发现X射线标识谱的K、L线系，进一步把X射线的结构与物质的内部结构联系起来。

大量实验现象的发现，推动了理论的发展，1911年卢瑟福在 α 粒子散射实验基础上，提出了原子的核式结构模型；1913年玻尔提出了关于氢原子的理论，指出氢原子能量是量子化的，并推算出电子绕原子核运动的轨道半径也是量子化的，成功地解释了氢原子光谱的规律性，从而创立了量子论，这是量子论对原子结构问题的重要贡献。后来，光电效应、康普顿效应等实验现象又进一步推动量子论的发展。1925年薛定谔、海森伯等人建立了量子力学，1928年，狄拉克（P. A. M. Dirac）提出了相对论性量子力学，从理论上推出电子自旋，预言了正电子的存在。量子力学的建立和发展，对人们研究原子结构起了巨大的推动作用。

原子核物理起源于十九世纪末，1895年发现X射线，1896年贝克勒尔发现铀具有放射性，1897年汤姆逊发现电子，1898年居里夫妇发现镭、钋具有比铀更强的放射性。这些发现，表明了原子是具有内部结构的；二十世纪初，卢瑟福 α 粒子散射实验证明了原子核的存在，1919年卢瑟福又第一次实现了人工核反应，并发现了质子，这表明原子核本身也是有结构的，从此开始了对原子核的研究。二十世纪三十年代是原子核物理研究取得重大成就的时期，1932年查德威克（J. Chadwick）发现中子，同年伊万宁科和海森伯分别提出原子核是由质子、中子组成的；1934年发现人为放射性并用于生产、医疗和科学研究，核反应的研究也得到广泛的开展。与此同时，回旋加速器的建成运转，又大大推动了对原子核的深入研究。1938年哈恩（O. Hahn）和斯特拉斯曼（F. Strassmann）发现了重核裂变，1942年费米（E. Fermi）等人建成了第一个原子反应堆，揭示了原子能的应用，开创了科

学技术的原子能新时代。二十世纪五十年代之后，核结构、核衰变、核反应、核技术的研究发展更加迅速，并不断取得新的成果。

粒子物理的研究也在不断深入，第一个粒子——电子发现后，1905年爱因斯坦（A. Einstein）发现光子，1928年狄拉克预言正电子，1932年实验证实了正电子的存在，后来又发现了中子、 μ 子、 π 介子、反质子、反中子等等，现在人们已经知道的粒子就有700多种，人们对粒子的互相作用、粒子的性质和结构的研究，已经获得了可喜的成果。

但是，应该指出，核物理、粒子物理是正在发展的年青的学科，许多问题有待于人们进一步深入研究和解决。

原子物理学的发展也同物理学各学科领域的发展过程一样，都是经过实践——理论——实践的反复过程的，这就是在自然界中、在生产过程和科学实验中观察到一些现象，并对这些现象进行分析和研究，提出一些假说来解释实验事实，然后再通过实验来验证这些假说。若实验结果与理论相符合，则说明理论是正确的；若不相符合，则要考虑修改或放弃理论，或继续进行实验，并继续进行比较和检验理论。因此原子物理学是在生产实践和科学实验的基础上建立和发展起来的，是从实践到理论，又把理论应用于实践的反复过程。实验是检验科学理论的标准，在学习原子物理学过程中，必须树立这样的辩证唯物论的基本观点。

原子物理学是研究微观体系的物理过程，其研究对象是极其微小的，原子核和“基本”粒子这样的微观物体，一般都不能直接观察它们的结构和运动情况，但是，可以从反映这些微观体系的运动情况的宏观现象中去推研，并逐步认识和总结出微观体系的运动规律。因此，原子物理学的理论，是逐步完善和发展的，不可能要求这门学科在发展过程中所提出的理论十分完善、十分周密，我们在学习原子物理过程中，既要认识理论的成功方面，又要注意某些理论的局限性及其矛盾。

原子物理学既然是研究微观体系的科学，微观体系又具有

自己的运动规律，经典物理学的规律不一定都适用于微观体系。因此，在学习本门课程时，不应当受到经典理论的束缚，不能要求想象出一幅直观清楚的类似于经典的图象；而是应当善于推研，善于借助某些经典的概念或图象，总结出微观体系的运动规律。当然，这里要指出，原子物理学并不完全否定所有的经典规律，有一部分经典规律仍然可以在原子物理学中应用。

目 录

绪论

第一章 原子结构及初期量子理论..... (1)

- § 1-1 原子的质量和大小..... (1)
- § 1-2 α 粒子散射实验和原子核式结构 (3)
- § 1-3 氢原子光谱的规律性..... (13)
- § 1-4 玻尔的氢原子理论..... (17)
- § 1-5 夫兰克-赫兹实验与原子能级 (28)
- § 1-6 类氢离子的光谱 里德伯常数修正..... (31)
- § 1-7 索末菲量子化通则和电子椭圆轨道..... (37)
- § 1-8 史特恩-盖拉赫实验与原子空间取向量子化 (45)
- § 1-9 对应原理与玻尔理论的局限性..... (51)
- 小 结..... (54)
- 思考题 .. (57)
- 习 题..... (58)

第二章 量子力学对氢原子的描述..... (60)

- § 2-1 粒子的波动性..... (60)
- § 2-2 波函数的物理意义..... (68)
- § 2-3 测不准关系..... (74)
- § 2-4 薛定谔方程..... (79)
- § 2-5 量子力学对氢原子的处理 (84)
- 小 结 (95)
- 思考题 (97)
- 习 题 (98)

第三章 多电子原子..... (99)

- § 3-1 碱金属原子的光谱..... (99)
- § 3-2 原子实的极化和轨道的贯穿 (106)
- § 3-3 碱金属原子光谱的精细结构 (111)
- § 3-4 电子自旋与轨道运动的相互作用 原子态符号 (114)

§ 3-5	氢原子光谱	(126)
§ 3-6	具有两个价电子的原子态	(129)
§ 3-7	塞曼效应	(139)
§ 3-8	元素周期表 原子的壳层结构	(149)
§ 3-9	X射线与内层电子的跃迁	(164)
小结		(175)
思考题		(181)
习题		(182)
第四章	分子结构与分子光谱	(185)
§ 4-1	分子的键联	(185)
§ 4-2	分子光谱和分子能级	(187)
§ 4-3	双原子分子的转动、振动能级及光谱	(190)
§ 4-4	双原子分子的电子态	(195)
§ 4-5	多原子分子简述	(200)
小结		(202)
思考题		(204)
习题		(204)
第五章	原子核物理基础	(205)
§ 5-1	原子核的基本性质	(205)
§ 5-2	核力	(215)
§ 5-3	原子核结构模型	(220)
§ 5-4	原子核的衰变和衰变规律	(230)
§ 5-5	α 衰变	(243)
§ 5-6	β 衰变	(249)
§ 5-7	γ 跃迁	(259)
§ 5-8	放射性同位素的应用	(263)
§ 5-9	原子核反应	(265)
§ 5-10	重核裂变	(275)
§ 5-11	聚变和热核反应	(283)
§ 5-12	探测器和加速器	(291)
小结		(296)
思考题		(304)

习题.....	(305)
第六章 粒子物理	(308)
§ 6-1 宇宙射线	(308)
§ 6-2 粒子的性质和分类	(310)
§ 6-3 共振态	(316)
§ 6-4 粒子间的相互作用	(317)
§ 6-5 对称性和守恒定律	(319)
§ 6-6 强子的内部结构 —— 层子模型	(325)
小结	(330)
思考题	(332)
习题	(332)
附录 I 量子化条件 $\oint P_i dr = n_i h$ 的积分计算	
附录 II 一些常用物理常数及单位换算	(336)
附录 III 原子质量、半衰期、核子平均结合能	(338)
习题答案	(353)

第一章 原子结构及初期量子理论

卢瑟福 (E. Rutherford) α 粒子散射实验, 是建立原子的核式结构模型的实验基础, 但氢原子光谱规律的研究, 使卢瑟福原子模型遇到严重困难。结合卢瑟福原子模型、氢光谱的规律和普朗克的量子概念等, 玻尔 (N. Bohr) 提出了氢原子结构理论, 而后索末菲推广了玻尔理论, 并运用它解释类氢离子光谱的规律、原子磁矩、空间量子化等。玻尔理论虽然比较粗糙, 有其严重的局限性, 但他提出的能级、跃迁、分立定态等概念至今仍然是正确的, 同时玻尔理论简单、直观, 对氢原子现象作近似讨论时仍然有用。因此本章着重介绍卢瑟福原子核式结构模型和玻尔的氢原子理论。

§ 1 - 1 原子的质量和大小

不同的原子, 首先是它们的质量和大小不相同。在化学和物理学中常用它们的质量的相对值。现在把碳在自然界中最丰富的一种同位素 ^{12}C 的质量定为 12.0000 个单位作为原子量的标准, 其他原子的质量同碳 12 (^{12}C) 比较, 定出它们的质量值, 称为原子量。例如, 氢的原子量 $A = 1.0079$, 碳的原子量 $A = 12.011$, 氧的原子量 $A = 15.999$, 铀的原子量 $A = 238.029$, 原子量可以用化学和物理学的方法测定。

如果知道了原子量, 就可求出原子质量的绝对值。根据阿伏伽德罗 (Avogadro) 定律, 一摩尔原子的物质中, 不论哪种元素, 都含有同一数量的原子, 这个数称为阿伏伽德罗常数。以 A 代表原子量, N_0 代表阿伏伽德罗常数, M_A 代表一个原子的质量绝对值, 则

$$M_A = \frac{A}{N_0}$$

上式中原子量 A 代表一摩尔的原子以克为单位的质量数。只要知道 N_0 , M_A 就可算出来。 N_0 可以通过实验测得, 目前最精密测得的 N_0 值为

$$N_0 = 6.022169 \times 10^{23} \text{ (摩尔)}^{-1}$$

由上可算得氢原子的质量是

$$M_H = \frac{A}{N_0} = 1.67367 \times 10^{-24} \text{ 克}$$

其他原子质量的绝对值也同样可以算出来, 最大的原子质量是这个数值的二百多倍。

原子的大小可以进行估计:

晶体中原子按一定的规律排列, 由晶体的密度和一个原子的质量, 就可求出单位体积中的原子数。单位体积中的原子数的倒数就近似是每个原子的体积, 其立方根的数值就是原子线度大小的数量级。

由气体分子运动论也可以估计原子的大小。气体分子的平均自由程为

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2} N \pi r^2}$$

式中 N 是单位体积中分子数, r 是分子的半径 (假定分子是球形的)。若 λ 和 N 由实验求得, 那么分子的半径 r 可由上式算出来。简单分子的半径的数量级与组成这分子的原子的半径数量级相同。对于单原子的分子, 其半径 r 也就是原子的半径。

另外, 从范德瓦尔斯 (Van der Waals) 方程

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

也可测定分子的半径, 其数量级和原子半径相同。

从上述不同的方法测定和计算出各种原子的半径, 其数值虽

不完全相同，但都具有相同数量级，即都是 10^{-10} 米。

§ 1 - 2 α 粒子散射实验和原子核式结构

1897年汤姆逊(J. J. Thomson)发现电子并测得其电量与质量的比值(荷质比)，尔后，从实验事实知道，电子是一切原子的组成部分。原子在一般情况下又是中性的，可见原子中必然还有带正电的部分。研究原子中正电荷的分布情况，就能够对原子本身的结构和原子内部规律得到了解。

汤姆逊原子结构模型

1903年汤姆逊最早提出了一个原子结构模型，他设想原子是一个实心球体，正电荷均匀分布在原子球体内，带负电的电子则一粒一粒散布在球体内或球上，这些电子在各自的平衡位置附近作简谐振动，观察到的原子所发射的光谱的频率就相当于这些简谐振动的频率。由于原子中正负电荷紧密地混合，原子中任一部分几乎都是中性的。汤姆逊模型虽可说明原子是中性的等一些现象，但它被 α 粒子散射实验所否定。

1903年勒纳特(P. Lenard)用一束电子射向金属薄片，他发现大部分电子都直接穿过薄片而不偏转，这表明“原子是十分空虚的”，他由此得出结论，汤姆逊模型是错误的，而后长冈半太郎(Hantaro Nagaoka)于1904年提出原子的行星模型，认为原子的大部分空间是很空的，原子的大部分质量和全部正电荷集中在带正电的很小的集合体上，而电子绕正电荷集中的中心运动。但他没有深入研究下去。

勒纳特的实验引起卢瑟福的重视，他与他的学生盖革(H. Geiger)和马斯顿(E. Marsden)设计并进行了更精确的实验研究，他们的实验装置如图1-1所示， R 是被一铅块包围的 α 粒子源， α 粒子是由放射性原子核发射出来的，它带两个单位正电荷，质量为电子质量的七千多倍，它实质上就是氦的原子核。 α 粒子经过一细窄的通道，形成一束很细的射线束，并以

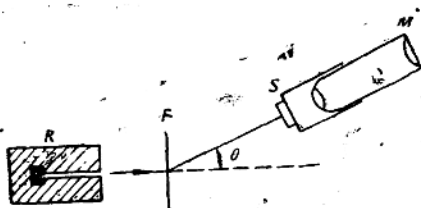


图 1-1 α 粒子散射实验

很大的速度打击在金箔 F 上，穿过 F 的 α 粒子由于金箔内原子的作用，将沿不同的方向散射；放大镜 M 带有一片荧光屏 S ，可以沿着以 F 为中心的圆弧转动；被散射的 α 粒子打在荧光屏 S 上，就会产生微弱的闪光，通过放大镜观察闪光，可以把单位时间内在某一方向散射的 α 粒子记录下来。为了避免空气分子的影响，除放大镜 M 外，整个装置都放置在真空腔内。用此方法可以研究 α 粒子通过金箔后按不同散射角 θ 分布的情况。用金箔做靶子有两个优点：一是容易制得很薄；二是金原子很重，与比它轻很多的 α 粒子碰撞时几乎保持不动。

1909年盖革和马斯顿在做上述实验时，观察到一个很重要的现象，发现大多数 α 粒子穿过金箔后偏转角度不大，平均只有 $2^\circ \sim 3^\circ$ ，但约有 $1/8000$ 的 α 粒子偏转角大于 90° ，有的甚至接近 180° ，这就是所谓大角度散射。

原子核式结构模型

上述实验结果对汤姆逊模型意味着什么呢？怎样来理解大角度散射呢？首先，我们可以肯定， α 粒子偏转不是原子中电子所散射的，这是因为 α 粒子速度很高（可达光速的 $1/15$ ），其质量为电子质量的 7400 倍，因此电子对 α 粒子的影响是微不足道的，这时电子甚至离开原位而去。因此，可以只考虑原子内正电荷部分对 α 粒子的作用。其次，大角度散射也不可能是偶然性的多次

小角度散射积累的结果，因为原子对 α 粒子的散射可以是任意的（正象布朗分子运动的无规则性），要恰好由多次散射积累而得到大角度散射的可能性当然是很小的。况且金箔非常薄，要使 α 粒子受到多次散射的可能性也是极小的。

假定 α 粒子无论是在原子的外边或是打入到原子的内部，它与原子的正电荷部分相互作用都遵守库仑定律，那么 α 粒子的大角度散射是受原子的一次散射造成的。

按照汤姆逊模型，设原子的半径为 R ，正电荷 Ze 均匀地分布在这个球中， α 粒子带有 $2e$ 正电荷，当 α 粒子在原子球外边，即 $r > R$ 时，受到的库仑力 $\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ； α 粒子达到原子球面时，即 $r = R$ 时，受到的库仑力是 $\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R^2}$ ；当 α 粒子进入球内，达到距原子球心为 r 处时，对 α 粒子起作用的电荷是以 r 为半径的那个球所含的正电荷，此电荷为

$$Q = \left[Ze \left| \frac{4}{3} \pi R^3 \right| \right] \times \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{Zer^3}{R^3}$$

因此， α 粒子此时所受的力是

$$\frac{2e \cdot Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{2e}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{Zer^3}{R^3} = \frac{2Ze^2 r}{4\pi\epsilon_0 R^3} = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} \cdot \frac{r}{R}$$

这个力比在球面上所受的力还要小（因为 $R > r$ ），而且距原子球心越近所受的力越小。在汤姆逊模型中， α 粒子受原子正电部分力最大是 α 粒子达到原子球面的时候，根据计算可知， α 粒子通过原子时，不可能产生大角度散射，只能产生小角度散射，如图 1

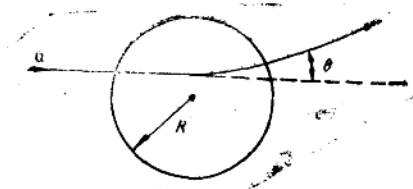


图 1-2 α 粒子在原子的汤姆逊模型中的散射