

# 最初的电子-原子散射实验为何未能得到有关原子核式结构的信息

赵 坚

现代物理学的一个重要里程碑无疑是通过 $\alpha$ 粒子散射实验所建立起的原子的核式结构。这一发现不仅导致了我们对微观物质世界的看法的革命性的改变,同时也为早期量子论的建立奠定了坚实的基础。特别是核物质以高密度的形态集中于很小的空间,即原子核的实验证据,更成为了随后的关于强相互作用问题研究的出发点。在随后的约一个世纪,有关核物质的研究丰富了我们对于物质世界的认识,并最终导致了量子色动力学(QCD)的发现。

然而,由于 $\alpha$ 粒子散射的结果首先是卢瑟福(E. Rutherford)在经典力学的框架下给出的解释,这一准经典的过程对早期量子物理发展的影响更多地是在玻尔(Bohr)的氢原子光谱理论中被提及。回顾上世纪初有关原子核结构的实验研究,我们可以发现正是经典力学对电子-原子散射解释的失败,以及其对 $\alpha$ -原子散射的成功解释,在某种程度上揭示了一种全新的动力学——量子力学的存在。有趣的是,电子在1897年就已为J. J. 汤姆孙(J. J. Thomson)所“发现”,并且在随后的实验研究中,人们积累的对电子性质的了解,要远比 $\alpha$ 射线全面得多。而 $\alpha$ 射线的性质直到1909年才被卢瑟福所确定。有了这些了解,我们现在自然不会奇怪,早在盖革(H. Geiger)和马斯登(E. Marsden)的 $\alpha$ 散射实验(1909年)之前,德国的科学家勒纳德(P. E. A. Von Lenard)于1903年就已经开展了电子-原子的散射实验。勒纳德的实验结果颇让人费解,他发现入射电子动量很高的情况下原子很容易被穿过,所以原子不像是原先推断的半径约为 $1\text{ \AA}$ 的实体,相反“原子是十分空虚的”。

本文将通过分析这两个散射过程,理解“为何人们未能从最初的电子-原子散射实验得到关于原子核式结构的信息”,从而加深对量子力学基本原理的理解,特别是在经典物理和量子力学相联系的领域。

如果描述入射粒的量子波包沿着经典的轨迹运动,其中波包尺度较小,并不显著地发散,且在波包范围内作用于粒子的外力近似为常量,则我们预期

量子 and 经典理论可以达到统一的结果。

根据量子理论,波包沿经典轨迹运动且无显著发散的条件在于,在一很小的时段 $t = d/v$ ,其中 $d$ 是波包在空间的位移, $v$ 是波包的运动速度,波包的扩展速度应当显著小于 $v$ 。在当时的条件下卢瑟福的分析使用经典力学,而恰巧经典力学对 $\alpha$ 粒子散射是近似适用的。这涉及两个条件:轨道概念近似适用的条件和牛顿方程近似适用的条件。

如果在运动过程中粒子坐标和动量取测不准关系所容许的近似值而其误差可以忽略,轨道概念就近似适用。对 $\alpha$ 粒子散射情形, $\Delta x$ 应小于原子半径 $r$ , $\Delta p$ 应小于 $\alpha$ 粒子在原子核正电荷作用下动量的改变,故: $\Delta x \cdot \Delta p < r \cdot \frac{Z Z_A e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \frac{r}{v} = \frac{Z Z_A e^2}{4\pi\epsilon_0 v}$ ,其中 $Z$ 为 $\alpha$ 粒子电荷; $Z_A$ 是原子电荷, $v$ 是 $\alpha$ 粒子速度。代入测不准关系 $\hbar/2 < \Delta x \cdot \Delta p$ ,并用 $\alpha$ 粒子动能 $E$ 来表示 $v$ ,即 $v = \sqrt{2E/m}$ ,则 $\alpha$ 粒子散射中轨道概念近似适用的条件为:

$$E < (Z Z_A \alpha_e)^2 \cdot 2mc^2, \quad (1)$$

其中 $m$ 是入射粒子的质量; $\alpha_e = e^2/4\pi\epsilon_0$ 是电磁精细结构常数, $c$ 是真空中光速。

另一方面,用入射粒子束作为探针探测原子内部结构,探针的分辨率将取决于入射粒子的德布罗意波长。原则上,为了“看清”原子的内部,粒子的德布罗意波长应当与原子核的尺度大小相当( $\lambda_0 \approx 10^{-5}\text{ \AA}$ ),这要求入射粒子的波长为

$$\lambda = h/P = h/\sqrt{2mE} < 10^{-5}\text{ \AA} \quad (2)$$

其中 $h$ 是普朗克常数。换言之,适合于探测原子核结构的入射粒子动能应当满足

$$E > \hbar^2/[2m(10^{-5}\text{ \AA})^2]. \quad (3)$$

注意到(1)式和(3)式对入射粒子动能的限制是正好相反的。为了满足经典轨迹近似,(1)式表明,入射粒子的动能应当足够小。然而,为了使入射粒子束具有足够的分辨率,(3)式表明入射粒子动能应当大于一定的下限。简而言之,为了既能探测原子的内部结构,又能在经典力学的框架下解释测量结果,入

射粒子的动能应当同时满足式(1)和(3)。对于特定的散射过程,例如探测金原子 $^{197}\text{Au}$ 的结构,式(1)和(3)的能量限制会取决于入射粒子的质量和电荷。我们将在下面分别讨论并比较电子-金核和 $\alpha$ -金核散射的结果。

**电子-金核散射** 对于电子-金核散射,如果我们期望实验结果能够被经典力学解释,则式(1)必须得到满足。将  $Z_e = 1$ ,  $m_e c^2 = 0.51\text{MeV}$  和  $Z_A = 79$  代入(1)式,我们得到对入射电子动能的限制:

$$E_e^a < 2m_e c^2 (Z_e Z_A \alpha_e)^2 = 0.34\text{MeV}。 \quad (4)$$

而为了能“看清”金核内部尺度大小约  $7 \times 10^{-5} \text{ \AA}$  的核结构,电子的动能必须满足(3)式:

$$E_e^b > h^2 / [2m_e \times (7 \times 10^{-5} \text{ \AA})^2] = 3.08 \times 10^4 \text{ MeV}。 \quad (5)$$

比较这两个对电子能量的限制,我们看到对经典力学适用的能量上限仅是适合的电子波长对应能量下限的大约  $10^{-5}$ 。换言之,在电子散射中,没有任何能区能同时满足上述的两个限制。

这一结果解释了为何勒纳德基于经典力学很难对其实验作出解释:如果较高能量的电子束被用来探测较小尺度的原子内部结构,将超出经典力学所能适用的能区。而如果使用低能电子束,例如  $E_e \approx 0.34\text{MeV}$ ,则对应的电子波长变为

$$\lambda_e \approx h / \sqrt{2m_e E_e} = 2.10 \times 10^{-2} \text{ \AA} \quad (6)$$

这样长的波长几乎不可能穿透原子外围的电子云区域,更不用说提供原子核结构的信息。

**$\alpha$ -金核散射** 我们可以对 $\alpha$ -金核散射进行相似的分析。将  $Z_\alpha = 2$ ,  $m_\alpha c^2 = 3.74 \times 10^3 \text{ MeV}$  和  $Z_A = 79$  代入(1)式,可得经典理论适用的能量条件:

$$E_\alpha^a < 2m_\alpha c^2 (Z_\alpha Z_A \alpha_\alpha)^2 \approx 10^4 \text{ MeV}。 \quad (7)$$

在1909年,当盖革和马斯登在卡文迪什进行实验时,主要的 $\alpha$ 粒子束来自于天然放射性元素的 $\alpha$ 衰变。 $\alpha$ 粒子束的能量大约仅为  $E_\alpha = 5\text{MeV}$ ,这保证了经典轨道近似的有效性,如同后来卢瑟福所发现的结果。

另外,为了“看清”尺度约为  $7 \times 10^{-5} \text{ \AA}$  的金核结构,分辨率需要其动能满足

$$E_\alpha^b > h^2 / [2m_\alpha \times (7 \times 10^{-5} \text{ \AA})^2] = 4.22\text{MeV}。 \quad (8)$$

当时在无高能粒子加速器的情况下,从天然放射性元素放射出的电子束,动能最大的也没有超过  $5\text{MeV}$  的,同时,受轨道概念近似适用条件的约束,电子动能不能超过  $0.34\text{MeV}$ ,因此,可以想见,就勒

纳德当年的实验讲,要想“看清”原子核的结构,必须提高用来“照射”的粒子的能量,这样,不能满足轨道概念近似适用条件,牛顿方程近似适用条件自然也无法满足。

对于  $E_\alpha = 5\text{MeV}$ ,可以看到其同时满足上述两个条件。事实上,这一能量对应的 $\alpha$ 粒子德布罗意波长约为  $\lambda_\alpha = h / \sqrt{2m_\alpha E_\alpha} = 6.43 \times 10^{-5} \text{ \AA}$  大约只是普通原子大小的万分之一。由上所述, $\alpha$ 粒子入射束的确能够分辨原子的核式结构,且实验结果能够在经典力学框架下得到很好的解释。这一分析也论证了卢瑟福理论的正确性。

历史上,电子-原子和 $\alpha$ 粒子-原子散射的实验结果曾给人们原子结构的理解带来很多迷惑。回顾当时的实验和理论状态,那些迷惑主要是源于那时人们对微观量子动力学缺乏了解,并且试图在经典力学的框架下解释量子现象。通过对这两个不同的散射过程的分析,我们归纳出对它们做经典近似所必须满足的限制条件。这一条件碰巧可以满足 $\alpha$ -原子散射,却不能满足电子-原子散射。这从理论上回答了在当时的实验条件下为何不能从电子-原子散射得到原子核结构信息的疑问。正如我们所知,卢瑟福对原子核结构的成功解释导致了人们对物质世界认识的革命性改变。它也直接导致了1913年玻尔关于原子核的电磁跃迁理论的诞生。

值得一提的是,电子-原子散射实验的结果在卢瑟福理论提出后的相当一段时间内没有引起人们的足够重视。这一实验结果的最终成功解释已是量子力学理论充分建立和发展(1923~1927年)之后。不仅如此,利用高能电子束作为探针来探测物质的微观结构也成为现代实验物理科学的重要研究手段之一。当然,没有人再试图用经典力学的图像来理解高能电子散射中丰富多彩的量子现象了。

(云南昆明市第十四中学 650106)

