

α 射线在磁场和电场中偏转的早期实验¹⁾

杨懋沧 杜晓红

(包头钢铁学院物理教研室)

对放射性物质所发出的 α 射线的本质所进行的探索大约经历了 10 年 (1898—1908) 的漫长历程。其中, 关键而又首要的一步是 α 射线的粒子性的证实。它是通过卢瑟福 (Ernest Rutherford 1871—1937) 在 1902 年秋天所作的 α 射线在磁场和电场中偏转的实验所完成的。这些实验曾被 N·费瑟 (Normann Feather) 誉为整个科学史上最惊人的实验之一^[1]。

卢瑟福于 1902—1903 年期间, 对放射性的本质和起因进行了实验上的研究和理论上的探索, 与索迪 (F. Soddy) 合作发现了放射性衰变规律。这一蜕变理论又开拓了两个新的领域: 不同放射性物质之间本质的联系和放射性变化中所发出辐射的本质问题。由于 α 射线具有很高的能量, 卢瑟福意识到它可能是建立完整的放射性理论的关键, 故对 α 射线很感兴趣, 并将 α 射线作为其研究的重要方向。

在基塞尔 (F. O. Gissel)、贝克勒耳 (H. Becquerel) 皮·居里 (Pierre Curie)、圣·迈耶 (Stefan Mayer Alfred) 和薛魏德莱尔 (F. U. Schweidler) 所做的实验结果中, 已经表明镭发出的辐射中有一些是能被磁场所偏转的。卢瑟福于 1902 年 5 月, 对于从铀、镭、钷的化合物及由于钷的受激放射性所发射出的一些辐射进行了磁偏转实验, 实验结果没有发现 α 射线在磁场中受到偏转。他写道: “为了简洁和方便起见, 我们将称所有放射性物质发出的不能偏转的射线为 α 射线, 而能偏转的射线为 β 射线”^[2]。这一实验的负结果导致了他对辐射的重新分类和对 α 射线本质的不正确的分析。但是, 由于“大量的直接证据, 使我最近得出这样一个观点, α 射线实际上是以很大速度发射的

带电物体。……斯特拉特 (Strutt) 已经提出 α 射线是带正电物体的观点, 这一观点也为克鲁克斯 (W. Crooks) 先生最近的一篇论文进一步指出”^[3]。他意识到以前所做的 α 射线在磁场中偏转实验得到负结果的原因在于, 即使是在很强的磁场的作用下, α 射线的偏转量也太小 (在 10000CGS 单位的磁场中, 从镭射出的并与磁场方向成直角的 α 射线画出半径为 39 cm 的弧, 而真空管中的阴极射线应能画出半径为 0.01cm 的圆)。因此, 必须采用特殊的实验方法才能检验并测量出 α 射线在磁场和电场中的偏转^[4]。

1902 年秋, 他自己动手设计、制造了一整套新的实验装置, 这些装置本质上是简单的、巧妙的, 充分体现了卢瑟福的风格。发表于 1903 年第 2 期 “Phil Mag” 上的题为《镭射出的容易吸收的射线的磁和电偏转》的论文, 以长达 10 页的篇幅详细地记述了 α 射线在磁场和电场中偏转的早期实验。

卢瑟福的这一早期实验是采用电离法来检测射线在磁场和电场中的偏转效应的。电离法是卢瑟福在麦基尔大学工作期间常用的实验方法, 它是以射线对气体导电性的影响为依据的。通常是先使静电计 (或验电器) 带电。当与静电计相连的电离室里由于从窄缝通过的射线使气体电离而产生了大量的带电离子时, 静电计放电 (指针下落), 观察静电计的放电速率 (即电离室里离子产生的速率) 就可以测量出通过窄缝发出的射线的强度。当加有磁 (或电) 场时, 通过窄缝发出的射线的径迹如果发生偏斜, 就会

1) 此文属内蒙古自然科学基金科研项目。

使放电速率减小,对有磁(或电)场和没有磁(或电)场的情况下静电计放电速率的变化进行比较,可以验证射线在磁(或电)场中的偏转,并能通过实验数据的测定和计算得出定量的结果.实验原理如图 1 所示.

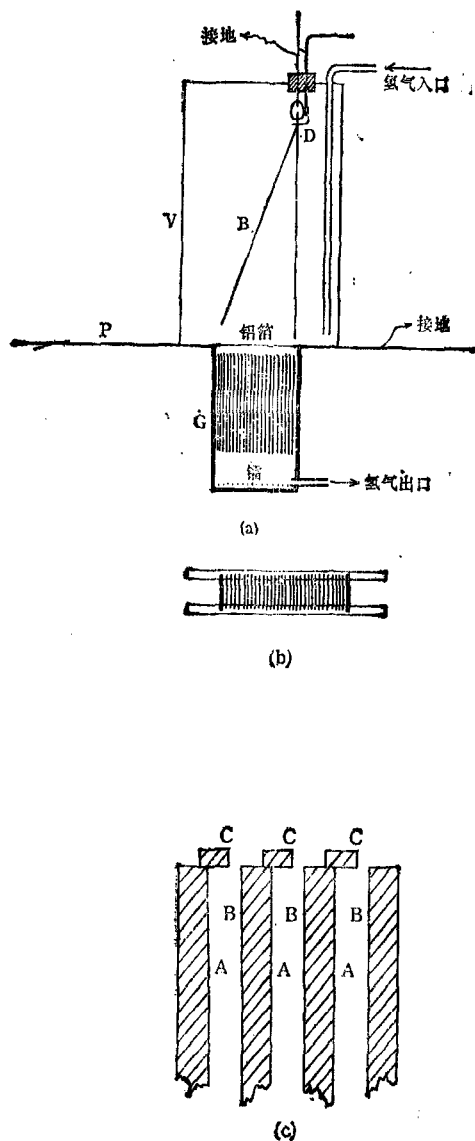


图 1 实验原理图

P为铅板; B为金属箔验电器; G为偏转室(窄缝系统); D为与可动金属线相连的金属丝; V为检测器

卢瑟福首先花费了大约两周时间准备实验所必需的装置.他先制作了几个小的偏转室.由长为 3.70cm、宽约 0.70cm 的 25 块平行铝片做隔板构成狭缝,相邻隔板之间形成 0.042—

0.1cm (视不同的偏转实验而定)的空隙,并将镭放射源置于板下方约 0.85—1.4cm. 整个装置不到 5.3cm 高,十分简单和精巧.为了获得足够强的磁场,他从欧文斯 (R. B. Owens) 那里借来了 30kW 电机上的电磁铁,当满载电流 (12A) 时,可获得高达 8400G 的均匀强磁场;为了克服放射源的辐射强度较弱的困难,他使用了从居里夫妇那里得到的镭制品,其强度约为铀的 20000 倍.他还用经过改进的金箔验电器来代替静电计,可以检测 10^{-15} — 10^{-17} A 的微弱电流.他使用了一个大视场、放大倍数为 10 倍的显微望远镜,其目镜带有约 30 个刻度的标尺(每一刻度约为 0.1mm),从而使实验的观测更加清晰和精确.

文献 [4] 中记述了实验的程序.从放射源镭薄层辐射出的射线向上通过 20—25 个等宽的并排的窄缝系统 G 后,再通过一个厚约为 0.00034cm 的铝箔片而进入检测容器 V,射线在检测器 V 中产生的电离应用金箔验电器 B 的一个箔片的移动速率来测量,箔片上方连接金属丝 D, D 与可动金属线相连以便带电.在检测器的小石英窗上通过显微望远镜来观察金箔下落的速率,检测器和狭缝系统用铅板 P 密封,以便使射线仅从铝箔处进入检测器.在实验过程中,装置内自上而下地通过干燥的氢气,以驱除镭射气(氦)并减少对 α 射线的吸收,使用氢气而不是空气,可以大大增强 α 射线的强度又能极大地减少由 β 和 γ 射线所引起的电离作用,简化了实验.同时,在实验时,他利用 0.01cm 厚的石英板将 α 射线完全吸收,但石英板对 β 和 γ 射线却无明显的吸收.这样就可将未加石英薄片所测数据 (α , β , γ 射线均未被吸收)与加有石英薄片测得的数据(只有 β , γ 射线通过)相减,即可消除 β 和 γ 射线的影响,从由此得到 α 射线单独起作用的实验数据.在进行磁偏转实验时,他加上垂直于图面并与窄缝的平面平行的磁场,在一次实验中,可使 89% 的 α 射线偏斜,后一次实验使用了更强的磁场和稍宽一些的狭缝,可使 α 射线达到 100% 的偏斜.文献 [4] 中的图线表明, α 射线的偏斜量近

似地与磁场强度成正比。为了确定 α 射线的偏斜方向，卢瑟福在隔板上端加了一排黄铜条C（见图1(c)，三个窄缝中，用C遮住了A与B构成的缝的一半）遮住了狭缝宽度的一半。如果所加的磁场不足以偏斜全部射线，而且射线的偏斜方向是从A到B时，在检测器上测得的放电速率远大于磁场反向时偏斜方向从B到A时的速率，即看哪一个方向使 α 射线对检测器中气体电离的影响最小，结果发现 α 射线偏斜的方向与阴极射线相反，即 α 射线是由带正电的粒子组成的。为了进行静电偏转，他将装置进行了改装，用硬橡胶代替黄铜条，将铝隔板互相绝缘并在相邻板上加上电压（约600V），实验中观察到在加上电场时约有7%的 α 射线发生了偏斜。不过在论文的附注上说明：“在后一个还没有完成的实验里，我能在强电场中将 α 射线的45%偏斜。”这一实验大致是在1903年12月11日和12日完成的，卢瑟福使用他设计的一种“特殊的仪器”大概是一个简单的电容器，间距约为0.01cm，可加上1450V的电压而没有发生电火花^[5]。在12月末，在他写给J. J. 汤姆孙（J. J. Thomson）的信中说：“得到（静）电偏转是非常困难的，虽然达到了所有方面的测量极限，我已经用磁场全部偏转了 α 射线，用电场偏转了大约45%……，这是我在这一段时间里所处理的最困难的工作，我的镭（放射性强度为19000单位）的辐射强度几乎不能满足这一工作的需要”^[6]。后来，他又利用电偏转的装置，同时加上磁场和电场进行实验，利用所得的数据计算 α 粒子的速度和荷质比，初步得到 α 粒子的速度约为 2.5×10^9 cm/s，荷质比(e/m)为 6×10^8 CGS单位。正如卢瑟福所指出：“这些结果仅仅是粗略近似的，只是确定了这些数值‘的数量级’”。^[4]在以后几年里，他改进了实验的装置和方法，终于测得了较为准确的数值。但是，他在麦基尔做的这一工作被忽略，因为以后在曼彻斯特由他及其他人所做的更好的实验得出了更精确的结果^[7]。

卢瑟福的这一早期实验，不仅在实验的构想和安排上极为巧妙，实验的装置也十分简单、

灵活，适宜于多种用途，而且在实验数据的处理和计算中也充分体现出他的创造才能和超人的直觉。从卢瑟福的实验室笔记的手迹可以大致看到他计算的主要思路 and 过程。

卢瑟福参考并使用了J. J. 汤姆孙对于电子的同样方法来计算 α 粒子的运动速度和荷质比。他基于相互垂直的电场和磁场使粒子受力平衡的构想，指出“当电场和磁场作用于同样板长的装置得到同样的电磁偏转时， $v = \frac{X}{H}$ ”^[8]，

其中 v 是速度， X 是电势梯度， H 是磁感应强度。他根据 α 射线发生30%的磁偏转时的磁感应强度是1900G，用外推法得出与静电偏转7%相同的磁偏转量为 $\frac{7}{30} \times 1900 = 430$ ，并经

过单位换算而计算出 $v = 2.5 \times 10^9$ cm/s。在使用公式

$$Hev = \frac{mv^2}{\rho}$$

计算荷质比

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{H\rho}$$

时，他由磁偏转室和电偏转室的两个实验装置分别计算出 $H\rho$ 的值，取平均值得到最后数值。首先，他提出当一个粒子通过距离为 l 的均匀磁场，从它最初方向偏离微小距离 d 时，关系 $2\rho d = l^2$ 成立。然后，将此关系应用于缝宽 D 为0.042cm和均匀磁场作用的3.3cm的路径上，并用外推法算出在磁偏转量为100%时的磁感应强度为9600（单位），但算出的 ρ 值很大，已超过1m， $H\rho$ 的值为1136000，在 10^6 （单位）以上。他凭直觉知道这个数值太大，数量级不正确，故放弃了这一数值。他对缝进行了几何学的考虑，巧妙地引入了“放大因子”，即在磁偏转实验中，射线通过的总路径的长度约为5cm，但仅有3.3cm的路径为均匀磁场，此二值之差约为1.65cm，他取了 $3.3/1.65 = 2$ 作为放大因子，此时的 $d = D + (3.3/1.65) = 3D = 3 \times 0.042\text{cm} = 0.126\text{cm}$ ，从而算出 α 粒子的曲率半径 ρ 减少到43cm， $H\rho$ 的值减少到415000单

位,但他却由于运算的错误得到了 $H\rho=378000$ 单位. 在静电偏转实验中,缝宽 $D=0.055\text{cm}$, 类似地,他取 $4.5/0.9$ 作为放大因子, $d=6D=0.33\text{cm}$, 算出 ρ 值本应为 30.68cm , 但又因运算失误而得到了 60cm , 由此算出的 $H\rho=396000$ 单位, 然后将 378000 和 396000 取平均值后即得论文中发表的 390000 的数值, 从而得到 $\frac{e}{m}=6\times 10^3$ 单位的结果. 若卢瑟福没有一系

列的运算失误, 他应该得到的 $H\rho$ 值分别是 413000 和 198000 , 平均值应为 306000 , 可以得到的 $e/m=2.5\times 10^9/306000=8.2\times 10^3$ 单位, 它与大约为 4.8×10^3 的正确值相比显然是一个太大的值了. 如果卢瑟福单独用磁偏转的实验数据得到的 $H\rho$ 值, 则可算出 $e/m=6.02\times 10^3$ 单位, 这个值与他利用两个偏转实验装置联合得到的数值(但又有了不同的运算错误)几乎相同. 可以设想, 假若卢瑟福注意到了他在运算中的不在意的错误, 他有可能只根据磁偏转装置的单一情况的计算结果, 也可能引入另外一个合理的“因子”, 直到获得所希望的关系. 正如特莱恩 (T. J. Trewn) 所指出: “众所周知, 卢瑟福具有一种对于正确数量级应为多少的离奇直觉的天资, 而且这一点贯穿在他的实验生涯中的大量物理问题之中”^[8]. 卢瑟福的传记作者也多次提到这一点, 而在这一实验中也充分体现出他在长期的实验活动中, 积累了大量的经验及深刻的感觉, 从而形成了超乎寻常的直觉. 从当时的实验条件来看, 由于使用的放射源是具有一定厚度的镭制品, 由处于平衡的四种产物——镭、镭射气(氦)、镭 A(^{218}Po)和镭 C(^{214}Bi)发出的具有不同初速度的 α 粒子进行实验, 因为 α 粒子的速度并不具有单一的数值, 而是有一定的范围, 因而当时的早期实验也只能给出正确的数量级. 这样卢瑟福关于数量级的正确直觉也就显得格外重要了. 1906年, 他改进了装置, 通过实验证实, 不同的放射性物质所发出的 α 粒子的速度不同, 但 α 粒子的荷质比却与发射物质无关, 其值约为氢的荷质比的 $1/2^9, 10^3$.

卢瑟福从1903年10月6日的预备性实验到11月10—11日论文的最后完成, 在一个多月的时间里, 他紧张而又连续地进行了多次实验, 取得了他所需要的所有数据, 绘出图表, 作出计算, 并尽快地将结果予以发表. 这既说明了他对这一实验的重要意义的重视, 也充分体现了他的实验风格和工作作风. 正如威尔孙 (D. Wilson) 所指出的: “一个问题, 通常是一个反常的结果被他抓住, 他的思想颇为缓慢但又极为强烈地被困扰着, 直到出现一个解答. 然后, 在暴风雨般紧张的实验室工作里, 这位本世纪公认的最伟大的实验科学家, 摒弃了其他每一种可能的解释, 以不可辩驳的证据把他的“直觉”摆在其他科学家面前使之信服. 通常还利用一些易懂的数学关系提供了过程所遵从的定律或理论, 并且总有一些可达一级精确(度)的清晰的测量数据, 至少定量地给出所描述效应的数量级”.^[11]

卢瑟福通过这一实验, 成功地实现了 α 射线在磁场中和在电场中的偏转, 粗略地计算了 α 粒子的速度和荷质比 (e/m), 给出了正确的数量级, 第一次用实验证实了 α 射线的粒子性. “从铀、钍、镭发出的辐射以及从射气和受激辐射的物体发出的辐射都包含有大部分的 α 射线. 这些 α 射线在穿透能力上并无区别, 在所有情况下, 都是以高速发出的带电粒子”^[4]. α 射线粒子性的实验验证, 成为自1898年到1908年人们在探索 α 射线的本质的努力中所迈出的极为艰难而又十分关键的一步.

放射性物质所辐射出的 α 射线的总能量约为 β 射线的10000倍. 它标志着组成 α 射线的比电子质量大得多的物体 (α 粒子) 必然会以很高的速度(数量级为 10^9cm/s) 射出. 从放射性物质衰变现象中发现, “在放射性物质的一系列变化中, 几乎总是以辐射 α 射线开始, 即发射出具有较大质量的带正电的 (α) 粒子, 剩余的部分是不稳定的物质, 还要经历进一步的化学变化, 这些变化可伴随着 α 射线的发射, 在某些情况下也可有 β 射线发出”.^[4] 在这一偏转实验之后, 卢瑟福也认识到了“放射性物质发射的 β 射

线是一个次级现象，而 α 射线在放射性物质中发生的变化中则起着突出的作用”^[4]。由于这一工作，对 α 射线本质的深入认识，大大推进了当时他与索迪共同进行的放射性理论的研究，而 α 粒子成为原子物理、原子核物理发展和研究中极为令人关注的对象。

值得注意的是，卢瑟福指出：“放射性物质具有明显地自发地发射具有很高速度的大质量的物体的能力，这一现象支持着这样一种观点，即这些放射性物质是(至少部分地)由比电子大得多的迅速转动或振动的很重的带电物体系统所构成。这些物体从它们的轨道上突然地离去，是由于我们目前尚不知道的内力或外力的作用所致。”^[4]他的这一构想，是由于早期实验结果的启发而萌发出的对物质结构的初步的探讨，这对于尔后(1911年)他根据 α 粒子的散射实验所提出的原子有核模型的结构也打下了一定的基础。

综上所述， α 射线在磁场中和电场中偏转的早期实验不仅由于它成功地证实了 α 射线的粒子性而在科学史上引人注目，而且对卢瑟福的实验科学水平和研究工作也有着深远的影响。卢瑟福的传记作者伊夫(A. E. Eve)指出：“……射线在磁场和电场中的偏转是他的最伟大的成果之一。……实际进行的实验，即使对卢瑟福本人来说也是极其精巧、富有创造才能的。”^[12]威尔逊(D. Wilson)说：“此时，他形成了他的最伟大的实验技能。”^[13]后来，在这一实验的基础上，为了进一步搞清 α 粒子的性质，他精确地测量了 α 粒子的速度和荷质比，计算了 α 粒子的质量，最终在1908年与罗伊兹(T.

Royds)合作，利用光谱法得到了 α 粒子是氦离子的确凿证据。正如卢瑟福所说：“解决这一问题一直是最近几年在放射性方面的最重要的问题。 α 粒子是氦离子的证实带来了一系列无数的最重要的结果”^[14]。而他的 α 粒子从来没有背叛过他，卢瑟福一生中的所有重大的科学发现都与他心爱的 α 粒子紧密相连，作为证实 α 射线的粒子性的这一早期实验以“整个科学史上最惊人的实验之一”的美名而载入史册。

本文承蒙王锦光、解俊民、潘永祥、戴念祖、郭奕玲、陶康年等诸位先生的支持和关心，并热情地提供了部分资料，在此表示诚挚的谢意。

- [1] N. Feather, Proceedings of the Royal Society, The Royal Society, London (1977), 118.
- [2] E. Rutherford and A. G. Geiger, *Phil. Mag.*, 9(1902), 315—330.
- [3] J. Chadwick, The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson, George Allen and Unwin Ltd, Vol. I, London, (1963), 529—548.
- [4] E. Rutherford, *Phil. Mag.*, 5(1903), 177—187.
- [5] E. Rutherford, Radioactivity, Cambridge University Press, Cambridge, (1904), 121.
- [6] M. Bunge and W. R. Shea, Rutherford and Physics at the Turn of the Century, Dawson and Science History Publications, New York, (1979), 93.
- [7] A. S. Eve, Rutherford, Cambridge University Press, Cambridge (1939), 90.
- [8] in ref [6], 105.
- [9] E. Rutherford, *Phil. Mag.*, 1(1906), 166—176.
- [10] E. Rutherford, *Phys. Rev.*, 22(1906), 122.
- [11] D. Wilson, Rutherford—Simple Genius, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, (1983), 137.
- [12] in ref [7], 91.
- [13] in ref [7], 161.
- [14] I. B. N. Evans, Man of Power, The Scientific Book Club, London, (1939), 62—63.

(上接第383页)

用同一个晶体管发射超声单脉冲和调制波的声速仪在对媒质的声速进行精密测量时，可以十分方便地判断回波的正确重合。其步骤是：首先将声速仪置于单脉冲发射状态，若发现脉冲尚未重合[图2(a)]，便可调节声速仪的扫描频率，使两次回波的极大值对齐[图2(b)]，然后再将声速仪置于调制波发射状态，通

过声速仪的频率微调，使两次回波的每一周期都正确重合[图2(c)]。这样，既大大地提高了声速的测量速度，又保证了测量的精度。

目前该声速仪已用于测量金属材料的弹性常数、作用应力和超声延迟线材料的声学特性等。

(同济大学声学研究所 王寅观

魏墨鑫 邵良华 卢杰)