

The title is written in a large, bold, black font, slanted upwards from left to right. The text reads '卢瑟福散射实验' (Rutherford Scattering Experiment) on the top line and '与有核原子模型' (and the nuclear atom model) on the bottom line. The title is surrounded by several hand-drawn diagrams of atomic models, showing a central nucleus with protons and neutrons, and electrons orbiting in elliptical paths.

卢瑟福散射实验 与有核原子模型

郭奕玲 沈慧君

电子发现之后,人们开始认识到,电子是比原子更基本的物质组成单元,各种不同元素的原子都含有数量不等的电子.然而原子中电子数 n 决定于哪些因素?与原子量 A 有什么关系?这些电子是怎样分布的?原子既然是中性的,必有正电荷在其中,而正电荷又是怎样分布的?正负电荷之间的相互作用力有什么性质?怎样才能保持原子的稳定性?怎样解释原子光谱?怎样解释放射性?怎样解释元素的周期性?等等.这些都是些极待解决的问题.

面对这些问题,物理学家根据自己的实践和见解从不同的角度提出各种不同的原子模型,例如,1902年开尔文和1904年J. J. 汤姆逊的实心带电球模型,1902年勒纳德的中性微粒——动力子模型,1904年长岗半太郎的土星模型,1908年里兹的磁原子模型.这

些模型都未曾得到进一步发展.而1911年卢瑟福根据大角度 α 散射提出的有核原子模型却取得了重大成果,为进一步研究原子结构奠定了基础.

这是卢瑟福对科学的不朽贡献中最重大的一项.本文试图追溯卢瑟福和他的学生们进行 α 散射实验的前后经历,说明他提出有核原子模型的历史背景,并对他的发现作些分析,以便从中吸取教益.

1. J. J. 汤姆逊的散射理论

J. J. 汤姆逊的荷质比实验提供了电子性质的最基本依据.他根据电子质荷比小于氢离子 1836 倍的事实,假设正负电荷对称,猜想氢原子中约有 1000 个左右的电子,即 $n \approx 1000 A$ 这个数量是如此之大,以致于连他自己也觉得难以置信.于是他就带领他的学生进行大量实验,以探求原子结构的信息.这是汤姆逊为

原子科学的发展作出的又一先驱性工作。

1906年, J. J. 汤姆逊根据他的实心正电球原子模型建立了一个散射理论, 他的目的是要从X射线散射、气体对光的色散以及 β 射线的吸收来估计原子中的电子数 n 值。这件工作获得了重要成果。根据X射线散射和光的色散, 汤姆逊推得 n 不是 A 的千倍, 而是略大于 A ; 而根据 β 吸收, 推得 $n \approx 0.2A$, 由此他断定 n 与 A 同数量级。然而, 从元素的原子量和电子荷质比, 必将得出正电荷的载体要远重于负电荷载体的结论, 呈现了新的矛盾。这就促使汤姆逊和他的学生们进一步通过散射实验来确定 n 与 A 的关系。他的学生和助手克劳瑟(J. A. Crowther)在这方面作了很多工作。1907—1908年, 克劳瑟研究 β 射线的散射, 得出 $n \approx A$ 。1910年, J. J. 汤姆逊提出多次散射理论, 这个理论可以解释 β 散射, 把大角度散射看成是 β 粒子与原子中电子多次碰撞的结果。同年, 克劳瑟宣布实验证实这一理论, 并推出 $n = 3A$ 。

这时, 卢瑟福正在从事 α 散射的研究, 汤姆逊和克劳瑟的工作引起了他的注意, 使他把 α 散射问题和原子结构问题结合在一起。卢瑟福也曾是J. J. 汤姆逊的学生, 不过学生比先生高明, 高明之处在于从事的不是 β 射线, 而是能穿透原子的 α 射线。卢瑟福根据 α 散射的实验结果推得精确的关系: $n = \frac{1}{2}A$, 并且否定了J. J. 汤姆逊的原子模型。J. J. 汤姆逊的理论虽然终被取代, 但它的历史作用不应抹杀。

2. 卢瑟福初次 α 散射实验

α 射线是1898年卢瑟福在做放射性吸收实验时发现的。随后, 他一直对 α 射线的本性进行实验研究。1906年他首先实现 α 射线的散射, 纠正了当时误认为 α 射线不会产生散射的观念。

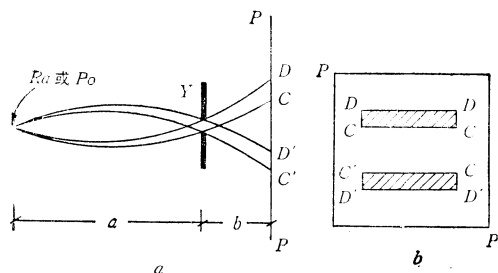


图1 贝克勒尔的磁偏转实验(1903年)

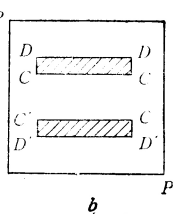


图2 底片上的像

这还要从1903年贝克勒尔(H. Becquerel)的实验说起。贝克勒尔在 α 射线的磁偏转实验中, 将一狭缝Y置于 α 源与照像底片之间(如图1)。磁场垂直于纸面, 并不断改换方向。穿过Y的 α 粒子以一定曲率投向底片, 形成两条边缘清晰的长方形像CD与C'D', 如图2。改变距离a、b, 像间距随之按一定比例改变,

表明从放射性物质中抛射出来的 α 粒子速度是确定的, 丝毫没有分散性。

针对贝克勒尔的实验, W. H. 布拉格(W. H. Bragg)在1904年解释说: α 射线是原子, 而 β 射线是电子, 它们之间有本质上的不同, 所以 α 粒子不会像 β 辐射那样受到散射。

然而, 当卢瑟福以更细致的方法重复贝克勒尔的实验时, 他发现 α 粒子还是会产生散射现象。他在题为“ α 粒子穿过物质时的减速”一文中, 详细描述了他采用的方法, 装置如图3。

放射源置于A槽中, 支架上的活动台B、C分别安置狭缝B和底片C。外面罩以两头封严的铜管, 活门供抽气用, L为均匀磁场区, 底片曝光两小时, 磁场每隔10分钟换一次向。

放射源是一根涂有镭C的铜丝, 从放射源到底片的空间用云母屏隔成两部分。狭缝的一半盖有云母片, 另一半让 α 粒子直接投射到底片上, 借以比较这两部分的曝光情

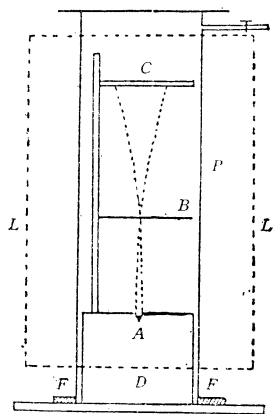


图3 卢瑟福的 α 散射实验(1906年)

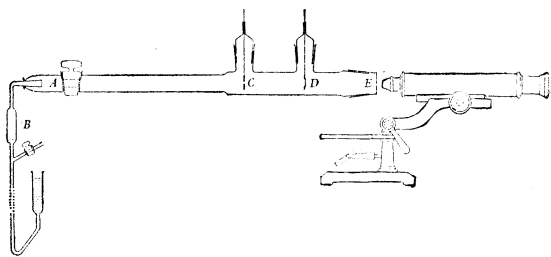


图4 用闪烁法观测 α 散射

况。底片上两条影迹之间的距离相当于 α 粒子在磁场中偏转的两倍。从中可以清晰地看到, α 粒子穿过云母片时明显地产生了散射现象, 使底片的条纹变宽, 边缘变得模糊, 而另一半的影迹仍保持边缘尖锐。卢瑟福写道:

“根据散射 α 射线条纹宽度的测量, 可以很容易地表明, α 射线中的一部分在穿过云母时从其轨道上偏折了大约 2° 角, 也许还会有一部分偏折的角度大得多, 但即使有, 也会由于感光作用太弱以致无法从底片上检测到”。卢瑟福进一步推断说:

“ α 粒子散射的增加伴随其速度的减小, (这个事

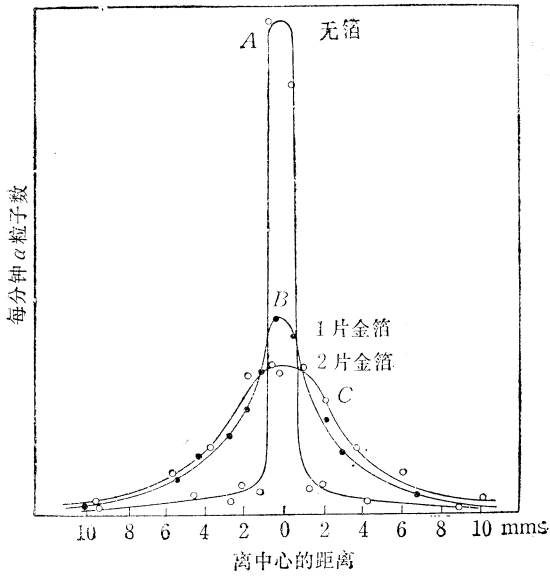


图5 盖革的 α 散射曲线

实)与我们的期望是一致的。从 α 粒子的荷质比 e/m 和速度 V ,可以很容易计算出,当 α 粒子穿过厚度为 0.003cm 的云母时,要使它的运动方向改变 2° ,应要求在那段距离内有一平均为 $1\text{亿}(10^8)$ 伏/cm的横向电场。这一结果明显地说明了如下事实:物质的原子一定是处在电力非常强的位置上——这是与物质的电子论相一致的推论”。

后面加的一句话值得注意,说明卢瑟福当时完全站在经典的物质电子论一边,并没有意识到要对原子结构的图象来一番改造。

此外,卢瑟福还发现在容器抽成真空时条纹边缘要比容器充有空气时清晰得多,他断定这是由于 α 粒子受到了空气散射。

对于卢瑟福来说, α 散射的发现似乎是一场遭遇战,是在研究 α 射线的减速问题时碰到的枝节问题,他并没有专门下功夫去研究。只是到了1908年,当 α 射线的散射效应已经成了卢瑟福和他的助手盖革(H. Geiger, 德, 1882—1945)研制计数器(经放电管放电对 α 粒子计数的方法)的障碍时,他才让盖革把 α 散射当作一个专题进行研究。

3. 盖革用闪烁法观测 α 散射

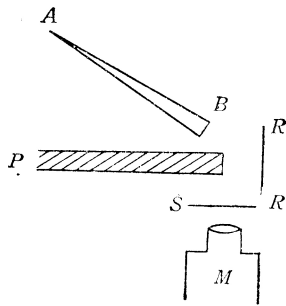


图6 盖革和马斯登(1909年)用一金属板反射观测到了 α 大角度散射

图4是卢瑟福和他的学生们早年采用于观测 α 散射的设备。镭射气(放射性元素氡)被引向锥形管A,前面有薄云母片封口,几小时后,将射气引回到B管,而衰变产物镭C已覆盖在器壁上,并不断放射出 α 粒子。 α 粒子束经狭缝C,穿越D处的金属箔。每个 α 粒子打到硫化锌屏E上,产生一个闪烁,观察者用肉眼经显微镜读取闪烁数。

1908年,盖革发表了他用闪烁法测得的 α 粒子散射曲线,如图5。曲线A是真空状态下所得,曲线B是覆以一片金箔的结果,而曲线C是覆以两片金箔的结果。这些曲线比两年前卢瑟福的 α 散射照片要明显多了。尽管计算表明,偏角不超过 1° ,但却提供了 α 散射的明确证据。用闪烁法直接计数比照像法有很大优点:直观、简便、精确度大大提高,只是观测者十分辛苦,在整个实验过程中,都要守在暗室里,全神贯注,眼睛通过显微镜紧盯硫化锌屏,一个一个地计闪烁数。这个方法虽然不是卢瑟福首先创造的(大概是从德国人勒根纳(Regener)处学来的),但卢瑟福和他的学生们充分发挥了这种方法的特点,这是导致他们发现 α 射线大角度散射的重要前提。

4. 盖革和马斯登的 α 大角度散射

关于盖革和马斯登(E. Marsden)发现 α 大角度散射的起因,说法不一。卢瑟福晚年回忆往事时,把这件事说成是偶然的,他自己原来并不相信能够观测到大角度散射,故意把这个做不出来的题目交给正在跟盖革实习的大学生马斯登去试试。但据马斯登回忆,整个实验是在卢瑟福的指导下作出的。事情还要从盖革的 α 散射实验说起。在1908年的 α 散射实验中,盖革用的是一根近两米长的真空玻璃管,可观测的硫化锌屏范围只有 ± 10 毫米, α 粒子的偏角充其量只有 1° 而已,所以没有可能观测到大角度散射。实验者也从未想到要去观测大角度散射。在盖革的实验中,他发现用金箔代替铝箔可以使 α 粒子的散射现象更为明显,于是就在马斯登的协助下系统地研究不同物质的散射作用,希望“对这些物质在散射能力和遏止能力之间建立某种联系”。

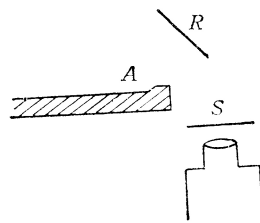


图7 盖革和马斯登(1909年)的改进装置

但后来盖革和马斯登的工作一直不很顺利,因为在研究过程中很难得到尖锐的 α 射线束。计数总不精确,没有重复性,为了得到尖锐的 α 射线束,他们只好把发射 α 射线的“枪管”加长,长到超过了4米,却仍解决不了问题。据后来分析,这是由于散射的 α 粒子经管壁反射使闪烁屏出现不正常的闪光,但当时盖革和

马斯登并没有意识到这一点。

卢瑟福很了解他们面临的困境。据马斯登回忆说，有一天卢瑟福来到他们的实验室，对马斯登说“你是不是试试让 α 粒子从金属表面直接反射，看看有什么效果”。卢瑟福的提示指引马斯登作出 α 大角度散射的重要发现。

在盖革的帮助下，年青的学生马斯登十分认真地进行观测，出乎意料地得到了惊人的实验结果。1909年，他们报导说：“ α 粒子的漫反射取得了判决性证据。一部分落到金属板上的 α 粒子方向改变到这样的地步，以致于重现在入射的一边”。

他们的装置非常简单，如图6。“玻璃管AB充有镭射气(α 源)，锥形口向下，封以云母片，”“硫化锌屏置于铅板P后面， α 粒子无法直接打到。当一反射片放在距离管口1厘米的RR'处时，闪烁立即观察到了。”

他们进一步测出了反射粒子的总数。把放射源换成镭C。“装置草图如图7， α 粒子从A板投向铂反射器R，R的面积约为1平方厘米，平均角度成 90° 。在屏S上不同的位置统计反射粒子数。”

α 源的发射总数则是根据镭C的质量折算得出的。经过比较，他们得出了结论：“三组不同的测量表明，在上述条件下，入射的 α 粒子中每8000个粒子有一个要反射回来”。

八千分之一！当卢瑟福知道这个结果时，觉得实在是难以置信。他在晚年的演讲中描述了他知道这个结果时的反应，他说：“我记得两三天后盖革非常激动地来到我这里，说：‘我们得到了一些反射回来的 α 粒子……’，这是我一生中不可思议的事件。这就像你对着卷烟纸射出一颗15英寸的炮弹，却被反射回来的炮弹击中一样地不可思议。经过思考之后，我认识到这种反向散射只能是单次碰撞的结果。经过计算我看到，如果不考虑原子质量绝大部分都集中在一个很小的核中，那是不可能得到这个数量级的。……”

5. 卢瑟福提出有核原子模型

然而，事情并不像想像的那样简单，也不像卢瑟福回忆往事时说的那么轻松。他经过长时间的思考，进行了严格的数学推导并证明理论结果与实验基本相符之后才作出判断。本来他和他的学生们都是用J.J.汤姆逊的实心带电球原子模型和带电粒子散射理论解释 α 散射现象，对于小角度散射，看不出矛盾，对于大角度的 α 散射，即使用J.J.汤姆逊的多次散射理论也无法解释，因为 α 射线是由能量巨大，质量比电子大得多的原子组成，多次反射的几率太小了，与盖革、马斯登所得大于 90° 的 α 粒子占八千分之一的结果相差太远。卢瑟福对于J.J.汤姆逊理论不能解释 α 散射感到很不满意。他想，一个带电粒子散射理论应该不仅适于 β 射线，也要适于 α 射线，问题在于怎样考虑粒子与原子的相互作用力。卢瑟福是一位实验物理学家，在

工作中很少运用数学工具，这时决心自己来推导有关的理论。开始他还是以J.J.汤姆逊的原于模型为出发点。直到1910年底，马斯登的实验已经完成一年多了，他终于作出决断，认为“只有假设正电球的直径小于原子作用球的直径， α 粒子穿越单个原子时，(才有可能)产生大角度散射。”

他的论文题目为：“物质对 α 与 β 粒子的散射及原子结构。”他在论文开头写道：

“众所周知， α 、 β 粒子与物质原子碰撞之后将从其直线运动偏折。对于 β 粒子，要比 α 粒子散射得更厉害，因为 β 粒子的动量和能量小得多。这些快速运动粒子的轨道会穿越原子，并且观测到的偏折是由于原子系统中存在着强电场，这两点似已无疑问。一般都假设， α 、 β 射线在穿过物质薄片时遭到的散射是由于物质原子多次微弱散射的结果。但是盖革和马斯登的 α 射线散射观测却表明 α 射线有一部分经单次碰撞必定会遭到大于直角的偏折。例如他们发现，入射 α 射线的一小部分，大约20,000分之一，在穿过约0.00004厘米厚的金箔时发生了平均为 90° 的偏折。盖革随后证明， α 射线束穿过这样厚的金箔，其偏折角的最可几值约为 0.87° 。根据概率论作一简单计算，表明 α 粒子偏折到 90° 的机会是极小的。另外，可以看到，如果把大角度偏折看成是多次小偏折造成的，则 α 粒子的大角度偏折应按期待的概率规律有一定分布，(但实际上)并不服从这个概率规律。似乎有理由假设，大角度偏折是由于单个原子碰撞，因为第二次碰撞能产生大角度偏折的机会在大多数情况下是极为微小的。简单的计算表明，原子一定是处于强大电场的位置中，以致于一次碰撞竟能产生这样大的偏折。”

卢瑟福接着说：“由于 α 、 β 粒子穿越原子应有可能是从周密研究偏折的性质中，形成原子结构的某些概念，正是这种结构产生出上述效应。实际上，高速带电粒子受物质原子的散射是解决这个问题的最适宜的方法之一。统计单个 α 粒子的闪烁法的发展，给探讨工作带来难得的好处，而盖革用这一方法的研究已经给我们增添了许多 α 射线受物质散射的知识”。

卢瑟福提出有核原子模型是经过深思熟虑的。他清楚地知道，这个模型面临与经典理论相矛盾的危险，因为正负电荷之间的电场力无法满足稳定性要求。卢瑟福在论文最后特别提到：“长岗曾从数学上考虑过‘土星’原子的性质”，他肯定知道长岗的土星模型和佩兰1901年提过的核模型都因上述困难而未获成功。但他却大胆地坚决地站在他们这一边，勇敢地向经典理论挑战，因为他有大角度 α 散射的实验事实作为依据，他相信自己的散射理论要比J.J.汤姆逊的散射理论更具有普遍性，既能解释 α 大角度散射，又能解释 β 散射，是经得起实践检验的。不过，在论文中他的提法很慎重，只是确认“正电荷集中在原子中心”这一点，没有

作更多的推断。至于稳定性问题,他并不讳言,在论文一开始,就申明:“在现阶段,不必考虑所提原子的稳定性,因为显然这将取决于原子的微细结构和带电的组成部分的运动。”

卢瑟福有自知之明,知道自己的原子模型还很不完善。1911年4月11日在给友人波尔特武德(Boltwood)的信中,说“希望在一、二年内能对原子构造说出一些更明确的见解。”

卢瑟福严谨的科学态度,从他的著作中也可看出一二,不论是1911年的论文,还是1913年的专著都没有“核”这个词。在那本700页的专著中,只有4页介绍这个重要问题。不过他很中肯地指出:

“从原子内部结构获取信息的最有力的方法之一,在于研究高速粒子穿过物质中的散射,例如 α 和 β 粒子。由于它们的巨大运动能量,高速 α 或 β 粒子一定会穿过挡在其路途中的原子。原子碰撞的结果就使带电粒子偏离其直线轨道,这就可以搞清楚原子中造成偏折的电力强度和分布。”

卢瑟福的方法和理论开辟了一条正确研究原子结构的途径,为原子科学的发展树立了不朽的功勋。然而在它提出之初,竟遭到了为时不短的冷遇。例如,1911年第一届索尔威国际物理讨论会,卢瑟福参加了,但在会议记录中竟没有提到卢瑟福的新近工作。1913年,J. J. 汤姆逊在作原子模型系列讲座时,也没有提到有人查过当年的报刊文献,对卢瑟福的原子模型理论几乎没有任何反响。也许当时人们觉得卢瑟福的理论过于粗糙,把它置于形形式式的假说和猜想之列,认为它无非是一种说法而已,所以不值得一提。

然而,以卢瑟福为中心的曼彻斯特大学物理实验室的同事们继续坚定地走下去。盖革和马斯登为检验卢瑟福散射理论进行了系统实验研究,全面肯定了这个理论的正确性,从丹麦来的玻尔(Niels Bohr)十分敬佩卢瑟福和他的学说。玻尔把放射现象解释为核的反应;将量子学说应用于核模型,并且成功地解释了氢原子光谱;依万斯(E. J. Evans)的氢光谱实验证实了玻尔关于匹克灵(Pickering)谱系的预见。莫塞莱(H. G. J. Moseley, 英, 1887—1915)测定各种元素的X射线特征谱线,证明它们具有确定的规律性,为卢瑟福和玻尔的原子理论提供了有力证据。到1914—5年,这个理论终于得到了世人的公认。

6. 结束语

从以上介绍的历史可以看出,卢瑟福用 α 散射探测原子结构的工作经历了一个从不自觉到自觉的发展过程。他本来是要通过 α 射线和物质的相互作用来了解 α 射线的特性,但一旦发现 α 散射能提供这种相互作用的重要信息时,就敏锐地抓住了它,指导他的学生对这一现象进行了充分的研究,在研究过程中将 β 散

射的实验方法发展为 α 散射的实验方法,使之成为探测原子结构的重要手段。更为可贵的是,作为一位实验物理学家,卢瑟福不仅限于研究实验规律,而且以无可辩驳的论据创建 α 散射理论,冲破了经典理论的束缚,使有核原子模型第一次建立在坚实的实验事实的基础之上。一切从事实出发,善于继承又敢于创新,这就是卢瑟福为我们留下的宝贵经验。

α 散射实验作为探测原子结构的重要手段,在本世纪初发挥过巨大威力。直到廿年代初,还用这一方法确定原子核的电荷和核力的性质,三十年代以后,原子核实验技术飞速发展。由加速器提供的高能粒子代替了天然放射性发出的粒子;检测方法也不再是用肉眼观察硫化锌屏上的闪烁,而代之以各种自动检测仪器。人们在探测微观世界的征途上越走越深入,然而,卢瑟福开创的用高能粒子作为探测武器打入原子内部以获取信息的实验方法仍然照亮着原子核物理学和高能物理学前进的道路。