

原子有核模型的提出¹⁾

——纪念卢瑟福诞生 120 周年

杨 懋 沧

(包头钢铁学院高等教育研究室, 包头 014010)

卢瑟福是举世闻名的科学家, 他的科学生涯经历了现代科学革命的重要阶段, 为现代科学的发展做出了不朽的贡献。80 年前 (1911 年) 他提出了原子有核模型理论和著名的散射定律, 历经了近一个世纪的科学实践的考验, 这一重大成果仍以“科学史上最杰出的里程碑”矗立着。现在, 让我们沿着卢瑟福探索的足迹, 追溯他思想的脉络, 展现他卓越的科学方法, 必定会得到有益的启示。

—

原子有核模型理论是科学发展的必然产物, 是卢瑟福所说的“20 世纪是物理学的英雄时代”的时代的产物。卢瑟福的研究工作及其卓越的才能则为这一重大发现奠定了基础。

19 世纪末至 20 世纪初物理学上的三大重要发现: X 射线、放射性和电子的发现, 动摇了人们关于原子不可分、质量不可变的传统观念, 开创了物理学的新纪元。诸如气体放电、热离子发射、阴极射线、塞曼效应和电解现象等实验事实和相应规律的研究证实了原子-分子假说, 推测出原子的大小和原子内含有呈某种分布的正电粒子, 从而揭示了原子的电本质, 构成了近代有关原子结构理论基础的基本事实。为了深入研究原子的内部结构, 并能科学地解释元素的物理及化学性质, 说明原子光谱的规律性及其他实验现象, 韦伯、佩林、勒纳、开尔文勋爵、J.J. 汤姆孙和长岗半太郎 (Hantao Nagaok) 等科学家先后提出了一些不同的原子模型, 其

物理

中勒纳关于原子内大部分是空无所有的思想和 J.J. 汤姆孙的“葡萄干加布丁”的原子模型对于卢瑟福的理论有一些不同程度的影响。

卢瑟福正是在伦琴发现 X 射线的 1895 年到了卡文迪什实验室, 并在 J.J. 汤姆孙的指导下从事放射性辐射和阴极射线对气体导电性影响的研究工作。在放射性元素自发衰变规律的研究中, 他和索迪提出了放射性变化定律和第一个放射性元素衰变的图谱。以确凿的实验事实和客观规律冲破了旧原子论关于元素不变的传统观念, 指出了放射性元素的自发衰变是一种原子现象并提供了原子内部过程的信息, 认为原子是一个复杂的聚合物, “在不久的将来将会深刻地修改我们的物质组成的思想”^[1]。他深入研究了三种辐射, 不仅区分了 α 和 β 两种射线, 并在罗伊兹 (T.D. Royds)、玻特伍德 (B. B. Boltwood) 和盖革的参与下对 α 粒子的电荷、本质和计数进行了卓有成效的研究^[2]。卢瑟福和盖革在 1908 年初成功地用计数器观察到了单个的 α 粒子, 是有史以来第一次以直接的证据证实了原子的存在。值得提到的是, 卢瑟福早在 1907 年的大英科学促进会上就谈到了原子的构成, 与开尔文等人的观点相反, 他认为原子里的电子不是处于静止状态, 而是以某种方式在原子中运动着。^[3] 可见, 卢瑟福在研究工作中, 始终将原子的存在、原子的构成和原子的变化放在重要的地位并作为研究的目标, 他在早期关于放射性的研究, 为原子有核模型的提出

1) 本工作属内蒙古自治区自然科学基金科研项目

准备了必要的条件。

1908年,卢瑟福荣获了诺贝尔化学奖,他以自己朴素的唯物论的科学思想,深邃的洞察力,非凡的直觉,精湛的实验才能和卓著的研究成果闻名于世界,他的高尚品格和治学精神吸引了一大批富有才华的优秀青年科学家,组成了一支团结友爱富有创造力的朝气蓬勃的科研队伍;他还经常与处在科学前沿的各国科学家保持着密切的联系,坦诚地交流信息,切磋研究问题。所有这一切都为卢瑟福摘取原子有核模型这一“王冠”式成就做好了准备。居里夫人在1913年举行的大英科学促进会年会上说:“卢瑟福是一位在世的人,他有希望赐给人类以不可估量的赠品,作为发现镭的一个结果。我劝告英国重视卢瑟福,他在放射性上的工作使我极其惊讶。不久,重大的发展好像就要发生。对此,镭的发现只是一个序曲。”^[4]

二

卢瑟福是如何提出原子有核模型的呢?

查德威克 (James Chadwick) 说:“卢瑟福以其天才利用了一个表面上并不重要的细节,把它变为解决原子结构问题的线索。在同一年他以令人惊叹的完整形式发表了原子的有核理论 [*Phil. Mag.*, (1911), 21, p. 669]。起初,这一理论是由盖革的关于散射随角度变化的早期实验所支持,在后几个月里,通过一系列完善的精确的定量的检验证实了理论的最微小的细节”^[5]。因此,我们可以从以下几个阶段来分析原子有核模型的提出。

1. α 粒子通过物质的散射现象

卢瑟福和布拉格各自在1904年—1905年间的许多实验中发现了 α 射线通过不同厚度的空气和金属薄片后速度减慢,在磁场中的曲率半径不是变大而是变小了,卢瑟福发现易于显示出通过云母的某些射线已经从它们的途径约偏斜 2° ,有一些 α 射线通过大得多的角度偏斜是可能的^[6]。他认为这是 α 射线散射的证据,并发现在其射程末端的散射现象十分严重,1906

年11月4日在给布拉格的信中提到他要精确测定 α 粒子使气体离子化的临界速度,“ α 粒子在这个速度时会进入原子系统——一种构成新原子的可能方法”。1908年,盖革用闪烁法对散射的 α 粒子仔细计数后发现,通过给定角度偏离直线路径的 α 粒子数随角度增大而迅速地减少,随着金属箔的厚度和金属的原子量的增加 α 粒子的散射量增加,在实验中观察到的最好角度仅仅是几度。此时,卢瑟福已经发现了 α 粒子的小角散射,他紧紧地抓住这一实验中易被人忽视的细节,意识到 α 粒子的散射问题要比预料中更为重要,并预见到较大散射的可能性,在 α 粒子大于其临界速度时即可由其散射和所引起的原子内部电场的反应来探索原子内部的结构,从而促使他下决心在与盖革研制粒子计数器的实验完成之前,转向 α 粒子散射问题的研究,将具有巨大能量的 α 粒子作为“探针”来探索原子的奥秘。这也体现了卢瑟福天才的直觉和洞察力。

2. α 粒子的大角散射

1908年,当卢瑟福同意盖革让研究生马斯顿(Ernest Marsden)参加 α 粒子散射实验时说:“为什么不让他看一下是否会有 α 粒子被大角散射呢?”这时他自己也并不相信一定会观察到 α 粒子的大角散射。1909年3月,盖革与马斯顿在实验中发现金箔对 α 粒子的遏止能力相当于2mm厚的空气时,有一半的 α 粒子被反射,有的粒子的反射角等于甚至大于 90° ,当采用 1cm^2 的铂箔作为反射物时,绝大多数粒子平均偏转 $2-3^\circ$,约有 $1/8000$ 的入射 α 粒子被反射,平均反射角约为 90° ,其中有的竟接近 180° 。 α 粒子的这种漫散射现象使卢瑟福非常惊讶。当盖革以极其激动的情绪告诉他“我们已经得到一些 α 粒子能够反弹回来”的结果时,他感到这是他所遇到的最难以置信的事件,“正像你^[7]将15in的炮弹射在一张纸上,而它却反弹回来并击中你”^[7]。这说明了尽管卢瑟福预见到了大角散射并让盖革和马斯顿进行实验观察,但因为受到J.J.汤姆孙模型的影响,无法用小角散射的积累(复合散射)予以解释而感到迷惑不解。

但是,在1910年10月,这件工作停了下来。据盖革后来回忆说:“我们全然不能理解它,”故又回到了小角散射的研究,并写出了两篇论文:“ α 粒子分布的几率变化”和“ α 粒子被物质的散射”。据菲塞分析,对于这两篇论文中出現了一些模糊评论的唯一解释是“如果卢瑟福受到阻难,必定是因为没有适宜的机会与别人来讨论这些(实验)事实的意义”。^[18]尽管如此,卢瑟福没有轻易放过这一尚未深入理解的反常现象,而是把它当作探索原子内部结构和内部电场的重要线索,正如他所说的:“原子处于一个强电场中的结论是不可避免的,否则 α 粒子通过一个分子直径这样小的距离改变方向是不可能的。”“这一结果对于了解原子周围或原子内部的电场,带来了巨大的光明”。^[19]他以此为重要线索,深入思考,努力探究 α 粒子大角散射的原因和规律,逐步构想出原子的有核模型。

3. “知道了原子是什么样的”

为了解决大角散射的数学问题,卢瑟福于1909年上半年注册参加了由兰姆教授主讲的概率论初等讲座并做了大量笔记^[20]。从现存的关于这一问题的手迹——标题为“原子的结构”的35页的手稿中可以看到,他是用不同的笔写在不同的纸(甚至是在麦吉尔时期的笔记本)^[21]上的,这说明了从 α 粒子大角散射实验到1911年初的这段时间里,他在从事其他研究工作和撰写著作的同时,一有合适的机会就思考这个问题,并随时把自己的想法记在手头的纸或笔记本上。在这一问题的思考中,卢瑟福也可能受到了牛顿的影响。

在卢瑟福夫人送给菲塞的一本牛顿著的《原理》(第一卷)的220页上,卢瑟福标注了很多文字和公式,菲塞认为“年青的卢瑟福在这儿评注了以椭圆或双曲线轨道运动的物体受到来自焦点的按平方反比定律的作用力,在15年之后,他从数学上构思出(α 粒子)大角散射所遵从的定律”。菲塞还将卢瑟福在1936年(64岁)时对有核原子模型提出的回忆与牛顿(73岁)关于万有引力定律发现的著名回忆进行了逐句

的对照,发现了惊人的相似,认为在牛顿与卢瑟福之间存在一些联系^[22],即卢瑟福在思想上必定受到牛顿的一些影响和启发。

卢瑟福反复地思考,一个偶然的 α 粒子为什么会偏转呢? α 粒子的大角散射实验为何不能用大量小角散射的积累来解释呢?他仔细地测量了 α 粒子散射的角度,反复计算散射的结果,并批判了作为支持J.J. 汤姆孙的判决实验——克劳瑟(Crother)的论文,指出大角散射实验若用偶然的小角散射的积累来解释所得到的可能性要比1/8000小得多。因此,绝大多数的大角散射应为一次碰撞的结果,他选用了“单独”的(single)散射来代替“简单”的(simple)散射以避免混淆,从而准确地描述了解决原子有核模型问题里的一个关键点——整个的偏转必须是单独的一次完成的操作,因此就必须假定在原子内部有强电场的存在,原子有核模型可以提供这样一个强电场。

对于原子的核心(后称为核)的电荷符号问题,开始他考虑可能是负电荷,以便使 α 粒子被吸引以维持椭圆或双曲线运动,但是怎样才能将电子维持在原子核里呢? α 粒子是怎样接近核心的呢?伊夫(A.S.Eve)说:“他(卢瑟福)或许已经想到绕太阳快速运动的彗星被万有引力所吸引并以双曲线的轨道运动,因此负电荷吸引带正电的 α 粒子,他慢慢地看到必须有一个带正电的核,以便使 α 粒子尔后被排斥,而且轨道仍为双曲线”。^[22]反复考虑后,进一步将实验所得到的证据进行了整理和归纳,他想到在大多数情况下,古老的格言——两个物体不能同时占据同一空间——无疑是正确的,但是对于以足够高速运动的物质原子来说,它就不再正确了,两个原子在同一瞬时可以处在同一地点,按照通常设想的原子大小,碰撞的原子并非是彼此互不穿透的。 α 粒子在散射时偶然地(随机地)从直线路径上偏离,其方向的改变必定是突然的、急剧的,就像一个太阳系掠过另一个太阳系时,只有当两个中心的太阳靠的很近时才能离开其原来的路径,偏转到旁边去。卢瑟福运用了类比的科学方法,他认为原子的结

构不是一个实心的球,而是一个微型的太阳系,这个微小的“太阳”必定是一个带正电的核心,它几乎包含了原子的全部的质量^[43]。

1911年12月4日卢瑟福在写给玻特伍德的信中说:“为了解释 α 和 β 粒子的遏止现象,我认为我能够构思出一个比J.J.汤姆孙的更好的一个原子,同时我认为它将与实验数据符合得很好。考虑到盖革所观察到的反射的 α 粒子,总的来说,我认为我可以做出一个更好的可以实用的假说。总而言之,我确信,我们从散射所得到的有关原子的信息要比另外的其他研究方法所得到的要多。”据盖革后来回忆说:“一天(1911年),卢瑟福以明显好的情绪走进我的工作室并告诉我,现在他已经知道原子是什么样的以及如何解释 α 粒子的大角散射。就在同一天,我开始用实验来验证卢瑟福所预期的散射粒子数与散射角之间的关系”。^[44]

可以认为,到1911年初,卢瑟福已经基本上构思出他的原子有核模型的理论,由盖革对其一系列的结果进行验证,并着手发表这一研究成果。

4. 提出原子有核理论和散射定律

1911年3月7日,卢瑟福在曼彻斯特文学与哲学协会上第一次简短地发表了理论,他指出,为了解释实验结果,需要一个强电场,它是由“集中于一点的中心电荷和围绕它的均匀分布在球上、带等值异号电荷所组成的原子”^[45]来实现的。同年5月,他在哲学杂志上发表了题为“ α 和 β 粒子被物质散射和原子的结构”的长篇文章^[46],系统、完整地提出了原子有核模型理论和散射定律,并作为经典论文载入史册。它主要有如下几个特点:

(1) 思路清晰、结构完整。论文从分析一系列实验事实开始,建立了原子有核模型的理论,以熟悉的“牛顿风格”计算了碰撞的散射角和一次偏转中粒子的几率,推导出散射定律,进而比较了单独一次散射的几率与复合散射的几率,赋予散射定律更深刻的意义,将理论与实验进行了对照,并指出有待实验进一步验证的内容,最后还就核外电子对散射的影响、长崗的模

型、中心电荷符号的确定等问题作了说明。卢瑟福以可靠的实验事实(α 粒子的散射)为依据,通过分析、类比、判断和构思出物理图象,定量推导出理论,并指出尚待实验最后给予证实(盖革和马斯顿于1912年对该理论从五个方面成功地进行了验证)。充分体现了卢瑟福继承和发扬了牛顿和法拉第的扎实实验、严格推理的治学精神和他的唯物主义的认识论和科学方法论的指导思想,他无愧于“自法拉第以来最伟大的实验物理学家”的赞誉。

(2) 推证精巧,影响深远:论文的推导运用了经典力学的方法,即在分析受力和能量关系之后,巧妙的引入了参量 P (碰撞距离),借助 P 利用动量守恒定律推出偏转角 ϕ 与 P 的关系,列表对照 ϕ 与 P/b 的数值(b 是最接近核的距离,可以估算出在金原子的情况下约为 $3.4 \times 10^{-12}\text{cm}$)。又用偏转角 ϕ 为参量计算散射几率,推出散射定律。在比较单独散射和复合散射时,又引入了对应的几率 p_1 和 p_2 ,采用了近似方法,最后得到结果。他所表现出的数学才能使数学家C.G.达尔文“为卢瑟福解决这一问题的方式所惊讶”。对于次要的枝节问题,虽在推导中予以忽略,但均在后面(或脚注)作了说明,从而使论文重点突出,结构紧凑,脉络清晰,科学性很强。

卢瑟福曾多次谈到 α 粒子的高速高能给他留下了深刻的印象,他用经典力学计算出来的 α 粒子散射公式能与实验很好符合,不仅证实了理论的正确,也首次证明了微观粒子遵从能量守恒和动量守恒定律。量子力学^[47]指出,微观粒子可以用经典力学规律描述的条件是粒子的动能很大,而力场变化很慢。当时,卢瑟福未必能够意识到高能 α 粒子在原子力场中能满足这一条件,超人的直觉又一次将他引向了正确的结论。80年来,中外各版本的《原子物理学》均将卢瑟福的原子有核模型列为重要内容,散射定律的推导基本上采用了类似的思路和方法,卢瑟福的原子理论、散射定律以及他的放射性理论和以后的核蜕变理论已构成原子物理和核物理的基础,卢瑟福被公认为原子物理和核

物理的奠基人。

(3) 深邃的洞察力、坚定的信念: 论文中虽未从理论上对原子的稳定性问题作出圆满地解决, 但他坚信为实验所支持的原子有核模型的正确, 他指出“原子稳定性的问题, 在目前阶段不需要考虑, 因为这显然依赖于原子的细微的结构和组成原子各部分的运动”。后来, 他又指出“对所有原子理论而言, 稳定性的困难是共同的, 但是要指出的不是原子理论而是电磁辐射的理论存在着某些问题”, 充分反映了他的科学预见能力和科研工作中的胆识。关于中心电荷的符号问题, 他在论文中也多次提到。虽然他在叙述中说“目前尚无可能有确切的证据去确定中心电荷的正负……。”但是, 他“为了方便, 假定为正”, 附图上的中心电荷标为“+”号, 论文最后谈到也许可以用测量 β 粒子的吸收定律的差异来解决, 他设想“假若中心电荷为正, 容易看到, 若从重的原子中心释放出带正电的质量, 在通过(中心)电场时, 它将获得非常大的速度, 或许可以用这种方式来解释 α 粒子发射时的高速度。而不必假定最初是处于快速运动着的原子里。”可见, 卢瑟福已基本上采取正电中心的观点, 这也与阎康年先生的分析一致^[18]。但是, 作为一位相信真实性的治学严谨的科学家, 在其论文中措词审慎, 力求严格准确, 也是值得学习的。

三

卢瑟福的理论提出后, 由盖革和马斯顿全面地进行了实验检验并得到证实。紧接着出现了一系列的重要的科学发现, 使原子理论的研究进入了一个新阶段。这些工作都是在卢瑟福及其领导下的曼彻斯特小组的直接参加和影响

之下进行的, 并经受住了现代物理学革命发展的考验, 已成为人类认识物质世界的宝贵的知识财富。

正如玻尔所说: “以原子核的发现为王冠性的成就, 已经引起了物理学和化学上这样未料想到的发展。他一直了解怎样利用一些对别人来说无关紧要的新现象, 作为进一步发展的关键”。通过我们对卢瑟福这一重大科学贡献的回顾和分析, 可以获得宝贵的启迪和奋进的激励。正如哈恩 (Otto Hahn) 和迈特纳 (L. Meitner) 在祝贺卢瑟福 60 寿辰的文章中所指出的: “最高的科学奖赏和荣誉应归之于卢瑟福教授, 他在他的学生的思想上和谢意中, 已经建立了最美好的纪念碑”。

- [1] J. Chadwick, The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson, George Allen and Unwin Ltd, Vol. 1, London (1963), 402.
- [2] 杨懋沧, 杜晓红, 物理, 18(1989), 375.
- [3] A. S. Eve, Rutherford, Cambridge University Press, Cambridge, (1939), 79.
- [4] ref [3], 224.
- [5] ref [3], 198.
- [6] ref [1], 867.
- [7] D. Wilson, Rutherford: Simple Genius, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, (1983), 291
- [8] ref [7], 292.
- [9] 阎康年, 卢瑟福与现代科学的发展, 科学技术文献出版社, (1987), 119.
- [10] ref [7], 290.
- [11] N. Feather, Notes and Records of the Royal Society of London, 27-1(1972), 45.
- [12] ref [5], 197.
- [13] ref [3], 90.
- [14] ref [4], 114.
- [15] J. Chadwick. The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson, George Allen and Unwin Ltd, Vol. II, London, 2(1963), 212.
- [16] ref [15], 238.
- [17] 周世勋, 量子力学, 科学技术出版社, (1961), 143 .
- [18] ref [9], 133.