

卢瑟福在麦吉尔大学

蓝志成[†]

(加拿大麦吉尔大学 蒙特利尔 H3A0G4)

2024-12-11 收到

[†] email: Lam@hep.physics.mcgill.ca

DOI: 10.7693/wl20250314

CSTR: 32040.14.wl20250314

欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937)是20世纪最伟大的物理学家之一,因1911年发现原子核和原子结构而闻名。那之前,他得到了1908年的诺贝尔奖,已经很有名气了。他获得的是化学奖,以表彰他在化学元素嬗变的工作,不是物理学奖。在诺贝尔奖晚宴上,卢瑟福幽默地说道:“我研究过许多不同的转变过程,它们有不同的转变周期,但最快的一次还是我本人——从物理学家瞬间转变为化学家。”

关于为什么该奖项是化学奖而不是物理学奖,又为什么他后来的原子核发现没有带来另一次诺贝尔奖,是一个引人入胜的故事,直到2008年才揭晓^[1]。揭露者塞西莉亚·雅诗阁(Cecilia Jarlskog)是1989年至2000年期间诺贝尔物理学奖委员会的成员,有兴趣的读者可以参考这篇文章找出原由。

卢瑟福获诺奖的工作是在1898年至1907年间在加拿大蒙特利尔的

麦吉尔大学(McGill University)完成的。本文将集中讨论这一时期,原因有二。首先,正如汤姆孙爵士(Sir J. J. Thomson)在1937年所说的,“卢瑟福在蒙特利尔达到了他科研的顶峰”。他随后的研究依赖于他在麦吉尔发现的 α 粒子,成就也和麦吉尔时期的工作密不可分。第二个原因是我在麦吉尔大学读本科和教学的39年中,听到不少关于他的故事,对那段时期比较熟悉。尽管如此,我仍会讨论一些他离开麦吉尔后,可为他赢得第二个诺贝尔奖的重要工作。从他的工作,我们可以看到原子物理、核子物理,甚至高能物理,是怎样一步步的在二十世纪初期诞生的。

麦吉尔大学建于1821年,其自然哲学(物理)与数学系成立于1854年,物理系于1891年独立分系。当时,烟草大亨威廉·麦克唐纳爵士(Sir William Macdonald)捐赠给了学校一座物理大楼,于1893年建成开放。他还捐赠了一个麦克唐纳讲座教授席位(Macdonald Professorship),由约翰·考克斯(John Cox)担任。考克斯就是在1898年把卢瑟福带到麦吉尔大学的人。

麦克唐纳物理大楼(图1)是当时北美最好的物理实验室,卢瑟福后来也说它是世界上最好

的实验室之一。整个建筑只使用木材、砖石和用铜、青铜、黄铜作为钉子的固定装置。没有铁或钢,以尽量降低磁性干扰。这么一个完美的实验室,开始时却缺少了一位一流的学者。后来由卢瑟福来填补,的确十分恰当。

为了研究新现象,卢瑟福必须自己建造出所需的仪器。这些仪器后来放进了只有一个房间的卢瑟福陈列馆里^[2],在1967年对外开放,供大众参观。

20世纪50年代末,我在这栋楼里上课,教室正是卢瑟福曾经授课的地方。1976年,当我成为系主任时,办公室也设在这栋楼里,紧邻卢瑟福陈列馆。可惜那时这座房子已经太小,无法容纳整个物理系,因此物理系在1977年搬进另一所新建的房子。为了纪念卢瑟福,这座新建筑被命名为卢瑟福物理大楼。当时卢瑟福陈列馆的馆长拒绝搬迁,认为陈列馆必须留在卢瑟福工作的楼内,所以直到他过世后,陈列馆才搬进了卢瑟福物理楼。学校在1955年也设立了一个卢瑟福讲座教授席位(Rutherford Professorship),由约翰·福斯特(John Foster)担任。福斯特以斯塔克效应研究著名,后来他又为麦吉尔大学建造了加拿大的第一台回旋加速器,是当时比较有名的教授。

麦克唐纳物理大楼随后进行翻修,成为大学的科学与工程图书馆。在装修过程中,我看到地上堆满了旧木梁和钉子。这些钉子应该



图1 麦克唐纳物理大楼

都是铜制的，可是我不敢保证。随后我发觉，这座建筑在1924年发生过火灾，并在1946年添加了一层，所以如果我看到的那堆废料中有铁钉子的话，那一定是卢瑟福离开后翻修过程时加进去的。

慈善家威廉·麦克唐纳爵士靠贩卖烟草发家致富，但却很讨厌人家吸烟，尤其是在他的建筑物内。那时没有汽车，靠马车出行，如图2所示。麦克唐纳不时会不请自来去视察他的建筑物，每当远远看到麦克唐纳的马车前来，所有人都马上紧张起来，尤其是烟抽不停的卢瑟福。他们不仅马上停烟，还必须在麦克唐纳爵士到达之前赶紧打开所有窗户，把烟通通赶走。

当麦克唐纳物理大楼1893年开放时，学校设立了第二个麦克唐纳教授的席位，由休·卡伦德(Hugh Callendar)担任。后来卡伦德辞职返回英国，寻找继任者的任务就落到了考克斯身上。当时北美少有杰出的研究人员，所以他决定去英国寻找。于是找到了卢瑟福，他在1898年秋天来到蒙特利尔。

卢瑟福于1871年出生在新西兰纳尔逊市附近的小镇布莱瓦特，后来在基督城的坎特伯雷学院主修数学和物理，1892年获得理学学士学位，1893年获得硕士学位。在接下来的两年里，他对铁在高频下的磁化以及无线电波的传播进行了研究。1895年，24岁的他获得了英国剑桥大学的奖学金，成为卡文迪什物理学教授约瑟夫·约翰·汤姆孙(Joseph John Thomson)的第一个研究生。汤姆孙是一位杰出的物理学家，精通理论和实验物理，是卡文迪什实验室的第三任教授。第一任

卡文迪什教授是詹姆斯·麦克斯韦(James Maxwell)，第二任是约翰·威廉·斯特雷特(John William Strutt)，即瑞利勋爵(Lord Raleigh)。汤姆孙本人于1897年发现电子，并于1906年获得诺贝尔物理学奖。这些世界著名的物理学家使得卡文迪什实验室成为当时

物理学的圣地，这也是考克斯来这里寻找麦克唐纳讲座教授替代者的原因。

在剑桥初期，卢瑟福继续他的无线电波实验，改进设备以产生更强的电磁波，最终得到一个可以穿透石头和砖砌的建筑后，仍可以在半英里外测到的信号，在当时这是一项卓越的成就。随后，欧洲大陆的新物理发现彻底改变了他的研究方向和人生轨迹。

1895年，即卢瑟福抵达剑桥那年，伦琴发现了X射线。1896年，巴黎的贝克勒尔发现铀有放射性，可以使有黑纸保护的底片曝光。接着，施密特于1898年发现钍也具有放射性，比居里夫人的发现早了两个月。居里夫人把当时所有已知的元素进行了搜索，发现只有铀和钍具有放射性。可是，同在1898年，居里夫妇(Marie and Pierre Curie)却成功的从沥青铀矿中提取出两种新的放射性元素——镭和钋。翌年，居里小组的安德烈·德比尔内(André Debierne)又从铀残留物中发现了另一种放射性元素——钷。突然间，市场上出现了许多新的玩



图2 1897年，物理楼前的马拉雪橇

具，其性质完全不明。这为研究者提供了肥沃的土壤和一个不同寻常的机会。卢瑟福马上抓住这个机会投入研究。这些天时、地利、人和的因素大大有助于他日后的成就。我们稍后会看到，他发现原子核也有幸运的因素在内。虽然幸运有加，但如果没有卢瑟福的聪明才智和勤奋，那么什么机会、什么幸运都是无用的。

1895年11月，汤姆孙邀请卢瑟福参加一项由X射线引起气体电离的研究项目，后来他们也研究了铀辐射带来的电离。在麦吉尔大学，卢瑟福倒转了方向，巧妙的利用电离来研究放射性辐射的未知特性。

正在这个关键时刻，考克斯出现在卡文迪什实验室，请求汤姆孙推荐一个人去填补麦吉尔大学空缺的麦克唐纳教授职位。汤姆孙高度推荐了他26岁的学生，说：“我从来没有一个学生比卢瑟福对原创性研究更有热情或能力。我相信如果当选，他将在蒙特利尔建立一所杰出的物理学院”。在得到麦吉尔大学校长批准后，考克斯就邀请卢瑟福成为第二位麦克唐纳教授¹⁾。

1) 在目前的学术体制下，要受到聘请，必须具有大量出版物、博士学位、丰富经验和经过许多委员会的审评。我认为一个26岁、只有硕士学位的人，现在不再可能被任命为讲座教授。同样的，我也不相信陈寅恪今日再可以被聘为清华国学四大导师之一。

考克斯在年轻的卢瑟福身上下的赌注获得了十分丰厚的回报。威廉·麦克唐纳爵士(不仅向麦吉尔大学捐赠了物理楼,还捐赠了化学和工程楼,和以他名字命名的讲座教授职位)说,有了卢瑟福和索迪(见下文),他向大学捐赠的所有钱都完全值得了。

就卢瑟福而言,他犹豫是否应该接受这个聘请。他意识到要留在欧洲,必须辛勤工作多年才能获得如此高级的职位,而且他打算近期结婚,每年2500加元的丰厚薪金也很有魅力。还有,大部分教学任务将由考克斯承担,他可以把时间集中在研究上。可是,加拿大是一个闭塞、科学落后的地方,去了那里,他会错失欧洲的先进科学活动和讨论。

最终,正如我们所知,他决定来蒙特利尔,也决定在1900年回到新西兰与玛丽·牛顿(Mary Newton)成婚。

要理解卢瑟福工作的重要性,必须回顾19世纪末人们对物质世界的浅薄认识。当时包含许多化学元素的周期表已被发现,包括铀和钍等元素,也知道了分子是由原子组成的。而原子,除了被认为永远不可毁灭和分裂外,对它的性质一无所知。汤姆孙在1897年发现了电子,并且X射线和放射性也刚发现不久。

放射性物质来自铀和钍矿石及其衍生物,能够导致照片变暗,空气电离。矿石的外观取决于其分子结构。例如,铀化合物沥青铀矿(UO_2)呈灰黑色,钙铀榴石($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{8-12}$)呈黄绿色,而铜铀榴石($\text{Cu}[(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)]_2(\text{H}_2\text{O})_{12}$)则呈绿色。然而,居里和卢瑟福分别发现,释放的辐射量只取决于样

品中放射性原子的数量,与其分子结构及矿石来源无关。这强烈表明了放射性化合物的辐射完全来自放射性原子,而不是其他的分子部分。除了这个重要发现之外,辐射的来源和性质还完全是个谜。

卢瑟福一生发表了不少文章。有趣的是,仅看他文章里的署名方式,就可以看到他在不同时期的科学成就和社会地位。起初,是E. Rutherford, MA, B.Sc., 名字后加上了硕士学位(MA)和学士学位(B.Sc.)的衔头。到了1902年,变成了MA, D.Sc., 显然他的工作已有成就,获得了个博士学位(D.Sc.)。在1904年变成了F.R.S., 他已被选为著名的英国皇家学会会员(Fellow of the Royal Society), 一切学位都不需要再提了。1914年,他被封为爵士后,名字前加上了爵士(Sir)一衔。1925年,他获得了大英帝国功绩勋章,名字后又加上了O.M. (Order of Merit)。到1927年,名字后的F.R.S.变了P.R.S. (President of the Royal Society), 因为他当了皇家学会的会长。1931年,他被提升为贵族,纳尔逊男爵(Baron Nelson)为他而设。1937年他去世后,骨灰被安葬在威斯敏斯特大教堂,靠近牛顿、法拉第、达尔文等杰出人物,这是一种极高的荣誉。

下面我将介绍卢瑟福在麦吉尔大学的工作。要谈他的发现和成就,不是他的实验设备。这些设备由他亲手设计,在机械车间利用可以找到的材料制成,虽然有时比较简陋,但十分实用,让他取得了许多重要的发现。这些仪器已经被保存超过一百年,非常珍贵。感兴趣的读者可以在麦吉尔卢瑟福陈列馆的网站^[2]上一睹这些装置及其工作原理。

1899年,他发表了一篇长达55页的论文^[3],研究铀和钍辐射的性质。首先,他想知道放射辐射是否为电磁辐射。他试图测量折射和极化,得到了否定的结果,因此放射辐射不是电磁波。他发现铀和钍的辐射至少含有两种成分:一种渗透性较低的成分,他称之为 α , 另一种渗透性强的成分,他称之为 β 。在测试的所有铀和钍化合物中,这两种射线都会出现。通过铝板,铀的 β 穿透力比 α 强一百倍。通过其他金属、气体或液体, β 的穿透力也总是比较强。不透明度取决于通过材料的量,服从指数定律。他还在钍辐射中发现了一种更具穿透力的成分,保罗·维拉德(Paul Villard)后来将其命名为 γ 。

大约在同一时间,他的同事欧文斯(R. B. Owens)在钍辐射中发现了一个非常奇怪的现象。欧文斯是电工系的麦克唐纳教授,与卢瑟福同年来到麦吉尔大学。他发现,一股气流,例如用力打开房门产生的,会导致验电器的辐射读数减少三分之二。卢瑟福的结论是,钍辐射必定含有第三种可以被吹走的成分。由于不确定这是气体还是粒子云,就称它为“钍放射”(thorium emanation)。欧洲物理学家很快发现镭和锕辐射中也存在这种放射,但铀中没有。钍放射本身具有放射性,半衰期约为一分钟。当它落在固体基质上时,基质的表面也变得带有放射性。他称这后者为“受激放射”(excited radioactivity)^[4, 5]。

“钍放射”和“受激放射”都具有放射性,但两者不同。前者是中性的,后者带有正电荷。但在1903年,他发现受激放射是由剥离负电荷后的钍放射沉积引起的^[6],可是受激放射本身不能是钍放射。把钍

放射拿开后，受激辐射还会在接下来的几个小时内增加到初始值的三四倍，然后再次衰变，半衰期为11小时。这证明了受激放射不可能是半衰期约为一分钟的钷放射。

显然这时候他已经知道放射性随时间呈指数递减的规律。铀和钷的辐射似乎可以永远不变，那必定是因为它们的半衰期很长。

同年晚些时候，使用威廉·麦克唐纳爵士捐赠的一台液态空气机，他和弗雷德里克·索迪(Frederick Soddy)发现^[7]“钷放射”是一种气体，在-120℃下冷凝，而不是一团粒子。因此，后来也把它称作“钷射气”。

那么这个弗雷德里克·索迪到底又是谁呢？

索迪是一位化学家，1877年出生于英国，1898年毕业于牛津大学，获得学士学位。1900年，因听说加拿大多伦多大学有个职位空缺，于是他便乘船横渡大洋，希望获得这份工作。不幸的是，当到达多伦多时，这个职位已经有人选了。他想回英国，但又缺乏旅费。他听说麦吉尔大学化学系有一个演示员(demonstrator)的职位(演示员是一个相当低微的职位，有点像讲师的助理)，但他别无选择，只好前往蒙特利尔接受了这份工作。这个偶然、被迫，却又幸运的决定使得卢瑟福和他自己后来都分别获得了诺贝尔奖。卢瑟福是位杰出的物理学家，但对化学知之甚少，的确十分幸运能够有一位化学家送上门来。没有化学的帮助，以后就不容易说服人们去相信他关于化学元素嬗变的激进理论。

索迪是在麦吉尔大学碰到卢瑟

福的，麦克唐纳化学大楼就在物理大楼旁边。在物理学会的一次演讲中，卢瑟福阐述了他的观点，放射性是由一种化学元素变成另一种元素引起的。这个观点遭到索迪的强烈反对，因为这违反了化学中的金科玉律，一个原子永远不能变成另一个原子(道尔顿定律)。他们展开了一场激烈的争论，所有这些都记录在物理学会的会议纪要中，现在还保存在麦吉尔大学的档案馆里²⁾。后来，索迪被卢瑟福说服共同合作。他们的结果发表在1902年的两篇文章中^[8, 9]，为卢瑟福赢得了1908年的诺贝尔奖。索迪没有分到这个诺贝尔奖^[1]，但他在1921年获得了另一个诺贝尔奖。

卢瑟福和索迪注意到^[8, 9]，用氨从硝酸钷的稀溶液中沉淀出的氢氧化钷具有异常低的发射能力。滤液本身应不含钷，但具有放射性。如果将滤液蒸发至干燥，并通过点火去除掉铵盐，所得残留物的放射性会比同等重量钷的要高出数百倍，在某些情况下甚至超过一千倍，而由此获得的氢氧化钷的放射性却不到同等重量钷的一半。他们称这种新的放射性物质为ThX。它溶于氨，而钷不溶。ThX给出的放射和“钷放射”相同，也能诱发“受激放射”。ThX在大约四天内失去一半的放射性，低放射性的氢氧化钷也将以相同的速度恢复到正常的放射性。

他们还尝试用不同的化学方法来提取ThX，都得到了类似的结果。从这些实验中，他们断定，钷的放射性主要来自钷自发产生的ThX。如前所述，那时大多数人已经相信放射性来自原子本身，而不是其他分子的其他部分。由于ThX的化学

性质与钷(Th)不同，它应该是一个不同的原子，由Th原子产生的一个不同的原子。根据化学反应的普通规则，这种变化是绝对不允许的(道尔顿定律)。因此，他们得出下面这个十分重要的结论：

“很明显，我们正在处理已知原子力范围之外的现象。因此，放射性可以被视为亚原子化学变化的表现。”

威廉·克鲁克斯(William Crookes)在1900年发现，从铀中同样可以提取出一种新物质UrX。卢瑟福和索迪重复了这个实验，发觉(U, UrX)的相对关系和(Th, ThX)相似。因此，钷的这种亚原子变化也应该适用于铀，可能也适用于其他放射性物质。事实上，后来他们对铀^[10]和镭^[11]的研究证实了这一猜测。

这是一个革命性的大胆结论！他们连原子的结构都不知道，就敢去谈论“亚原子的化学变化”。当然他们是对的。虽然那时原子核还没被直接发现，其实亚原子就是原子核。可是，原子核的变化现在已经不再被称为“化学变化”了。

贝克勒尔、居里和其他放射性研究的前驱都从未想到过如此大胆的解释。居里夫妇当时的观点在*Comptes Rendus*, cxxxiv, 1902年，第85页中提出。他们承认放射性是一种原子状态，但认为辐射所需的能量可能来自原子本身的势能，也可能以某种未知的方式从周围的空气中借用。

卢瑟福和索迪这个观点，一种化学元素可以转化为另一种化学元素，违反了道尔顿定律，遭到当时许多人反对，他们被指责为现代的炼金术士。随着时间的推移，更多

2) 时至今日，麦吉尔大学物理系的学术讨论会仍然被称为物理学会学术讨论会，虽然实际上已经没有物理学会，会议也不再被记录和保存了。

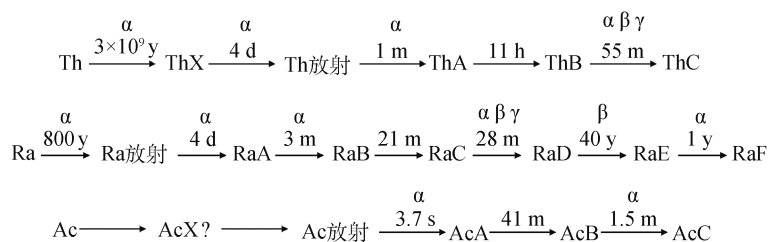


图3 钍、镭和锕的衰变链、半衰期和放射线

表1 钍衰变链的现代版本*

化学元素	简写	名称	辐射种类	寿命
^{232}Th	Th	Thorium	α	$1.405 \times 10^{10} \text{ a}$
^{228}Ra	MsTh ₁	Mesothorium 1	β^-	5.75 a
^{228}Ac	MsTh ₂	Mesothorium 2	β^-	6.25 h
^{228}Th	RdTh	Radiothorium	α	1.9116 a
^{224}Ra	ThX	Thorium X	α	3.6319 d
^{220}Rn	Tn	Thoron, Thorium Emanation	α	55.6 s
^{216}Po	ThA	Thorium A	β^-	0.145 s
^{212}Pb	ThB	Thorium B	β^-	10.64 h
^{212}Bi	ThC	Thorium C	β^- , 64.06% α , 35.94%	60.55 min

* 表中a表示年(annum), d是日(day), h是小时(hour)。

的实验和更多的数据积累,使他们的观点逐渐被接受,最终卢瑟福在1908年因这项工作获得了诺贝尔化学奖。

卢瑟福和索迪之间的圆满合作只持续了18个月,从1901年10月到1903年3月,之后索迪离开麦吉尔大学前往英国工作。

索迪离开后,卢瑟福继续研究放射性。研究的结论,在1904年的贝克里安讲座(Bakerian lecture)^[12]和1908年的诺贝尔奖演讲^[13]中,他做了一个很好的总结。

索迪离开时,已经知道钍(Th)衰变为ThX,后者给出气态的“钍放射”。ThX的半衰期为4天,钍放射的半衰期为1分钟。当钍放射沉积在固体表面上时,它会产生固态的“受激放射”。镭(Ra)也会产生镭放射和镭的受激放射,但没有中间产物RaX。铀(U)衰变为UrX,可是没有发现铀放射。

不同放射性物质的物理和化学性质各不相同。ThX可溶于氨,但Th不能。钍放射是一种在-120℃下冷凝的气体。钍的受激放射是一种易溶于硫酸和盐酸的固体,仅微溶于氨。因此,这些不同性质的放射性物质很可能是不同的化学元素。

“受激放射”衰变的时间依赖非常复杂,特别是镭。卢瑟福意识到,这是因为受激放射导致了一系列的衰变。每个衰变遵循指数定律,当组合在一起时,时间变化就会异常复杂。为了要抽丝剥茧,他仔细测量了各种物质在发射 α 、 β 或 γ 射线时的时间依赖。然后,他用指数的叠加来拟合每种情况下的复杂时间变化,从而计算出衰变序列、它们的寿命以及它们在衰变过程中发出的辐射。他按字母A、B、C等顺序区分不同的衰变产物。例如,镭A是镭放射的女儿,也是镭B的母亲。

对于铀,他无法测量到UrX之外的任何东西。对于钍、镭和铀,它们的结果总结在图3中,辐射类型和半衰期放在箭头上。“放射”(emanation)后的一切都是“受激放射”的衰变产物。

这些新的衰变产物具有不同的物理和化学性质,所以它们很可能都是新的化学元素。然而,随着更多放射性物质的发现,数目已经多到无法全部放入周期表内。这促使索迪在1913年提出了同位素的概念,来代表具有相同化学性质但不同放射性的物质。这样,几种不同的放射性产物可以属于同一元素,从而缓解了元素周期表的过度拥挤。这个建议让索迪获得了1921年的诺贝尔化学奖。尽管如此,在澄清 α 粒子和 β 粒子性质之前,人们对这些新物质仍然知之甚少。

为了要探索这些粒子的性质,卢瑟福在放射中加上了磁场和电场。 β 粒子对电磁场的反应和阴极射线管里粒子的反应相同,因此 β 粒子就是带负电荷的电子。可是 α 就难得多了。它的 e/m (电荷/质量)很小,用磁场下的弯曲去探测困难的多。经过多次实验,有些稍后再述,最终他可以断定,不同放射性物质释放的 α 粒子的 e/m 完全相同,因此无论来自哪种放射性物质,它们都是相同的粒子。每个 α 带有两个单位的正电荷,是被剥离了两个电子的氦原子。这个发现对新物质带来了更深一层的了解。

在卢瑟福和索迪论文中^[8, 9]讲到的“亚原子”实际上就是原子核。原子核由两个数字来区分,原子量和原子序数。原子量是以氢重量为单位的原子重量,因为电子非常轻,这基本上就是它原子核的重量。原子序数是根据化学元素在周

期表中的位置分配给出的数字。受到莫斯利在X射线工作的启发，卢瑟福意识到^[14]原子序数就是原子核中正电荷的量，这一猜想后来得到实验证实。由于 α 带有两个正电荷，原子量是4，通过 α 发射获得的子物质的原子量就必须比母物质小四个单位，并且必须对应于元素周期表中前两个位置的化学元素，少了两个正电荷。对于 β 发射，因为电子很轻，原子量基本不变，但原子序数会增1。 γ 的发射既不会改变原子量，也不会改变原子序数。有了这些规则，衰变链里的任何一种新物质的原子量和原子序数就能从原物质的原子量和原子序数，以及中间排出的 α 和 β 的数目，推算出来。

可是，如果我们错过了衰变链的一些中间成员，或者我们无法确定衰变过程中发射了哪种辐射，那么这些规则就毫无用处了。不幸的是，图3中列出的衰变链就是这种情况。

表1、表2和表3是图3的现代版本^[15]，从中可以看到母女链之间的关系遵从上述规则。在表1、表2、表3中，衰变链垂直排列，并非如图3那样水平排列。在三个链中的每一个，第1列是化学元素的名称，原子量显示于左上角。²³²Th是钍最常见的同位素，自然也是那时实验中使用的同位素。居里夫妇之所以可以从铀矿石中提取镭，是因为²²⁶Ra是铀矿石中最丰富的铀同位素²³⁸U的衰变产物。有趣的是，德比尔内从铀矿石提取的钋却是比较少见的同位素²³⁵U的衰变产物。

第2列和第3列是该物质的历史名称，也是卢瑟福和其他人使用的

名称。第4列是衰变过程中的辐射种类，第5列是寿命。

将表1与图3进行对比，可以发现，卢瑟福遗漏了Th和ThX之间的三个中间衰变。其实，radiothorium在1904年已被奥托·哈恩(Otto Hahn)发现，但直到1905年哈恩来麦吉尔时卢瑟福才晓得。此外，卢瑟福还把ThA、ThB和ThC的细节搞混了。表2、表3和图3之间的类似比较也表明，他也错过了镭和锕系中的一些细节。尽管如此，他在120年前就能发现了如此繁多的新物质，并获得了如此接近真相的衰变链，确实是个了不起的成就。

奥托·哈恩³⁾于1905年9月至1906年夏天间访问麦吉尔大学，并带来了他在英国发现的一种新放射性元素。他称之为“放射性钍”(radiothorium)，也证明了它是ThX的前体，应该置于图3的Th和ThX之间。放射性钍是个强 α 源，他和卢瑟福利用它来测量 α 的性质^[16]。

虽然访问时间很短，但哈恩却留下了两件有趣的纪念品：一张他移动袖口的照片和一张放射性的办公桌。

图4是卢瑟福在

麦克唐纳物理大楼地窖的照片，由一位横渡大洋来采访他的《自然》杂志的记者在1905年拍摄。卢瑟福事先没有得到他来访的通知，未穿上比较正式的衣服，缺少有袖口的长袖衬衫让记者拍摄。哈恩是个德国人，平日穿着比较正经，衬衫外常戴有可以移动的袖口，他就把这移动袖口借给卢瑟福来拍照。可以在照片中看到卢瑟福左手上哈恩的

表2 镭衰变链的现代版本

化学元素	简写	名称	辐射种类	寿命
²²⁶ Ra	Ra	Radium	α	1600 a
²²² Rn	Rn	Radon, Radium Emanation	α	3.8235 d
²¹⁸ Po	RaA	Radium A	α , 99.980% β^- , 0.020%	3.098 min
²¹⁸ At			α , 99.9% β^- , 0.1%	1.5 s
²¹⁸ Rn			α	35 ms
²¹⁴ Pb	RaB	Radium B	β^-	26.8 min
²¹⁴ Bi	RaC	Radium C	β^- , 99.979% α , 0.021%	19.9 min
²¹⁴ Po	RaC'	Radium C'	α	164.3 μ s
²¹⁰ Tl	RaC''	Radium C''	β^-	1.3 min
²¹⁰ Pb	RaD	Radium D	β^- , 100% α , $1.9\times10^{-6}\%$	22.20 a
²¹⁰ Bi	RaE	Radium E	β^- , 100% α , $1.32\times10^{-4}\%$	5.012 d
²¹⁰ Po	RaF	Radium F	α	138.376d

表3 锕衰变链的现代版本

化学元素	简写	名称	辐射种类	寿命
²²⁷ Ac	Ac	Actinium	β^- , 98.62% α , 1.38%	21.772 a
²²⁷ Th	RdAc	Radioactinium	α	18.68 d
²²³ Fr	AcK	Actinium K	β^- , 99.994% α , 0.006%	22.00 min
²²³ Ra	AcX	Actinium X	α	11.43 d
²¹⁹ At			α , 97.00% β^- , 3.00%	56 s
²¹⁹ Rn	An	Actinon, Actinium Emanation	α	3.96 s
²¹⁵ Bi			β^-	7.6 min
²¹⁵ Po	AcA	Actinium A	α , 99.99977% β^- , 0.00023%	1.781 ms
²¹⁵ At			α	0.1 ms
²¹¹ Pb	AcB	Actinium B	β^-	36.1 min
²¹¹ Bi	AcC	Actinium C	α , 99.724% β^- , 0.276%	2.14 min

3) 哈恩是生于1879的一位德国化学家，后来和Fritz Strassmann, Lise Meitner, Otto Frisch 一同发现核子裂变，获得1944年诺贝尔化学奖。

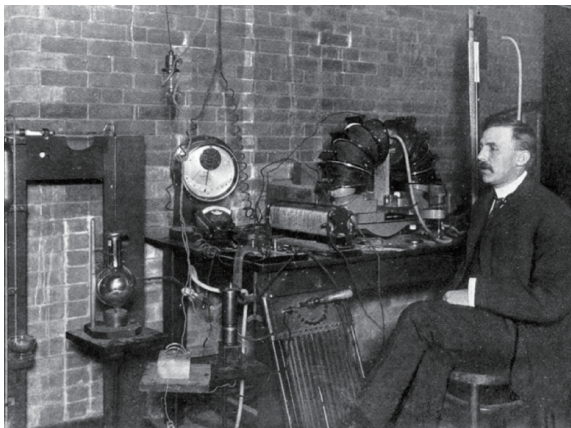


图4 卢瑟福戴上了哈恩的移动袖口(1905年)

白色移动袖口，但无人可知，他隐藏在照片之外的右手上是否也戴上了哈恩的袖口。

有一天，哈恩不小心把一些放射性物质洒在桌子上，之后就简单的把它抹掉了。后来，人们发现这张桌子有很强的放射性，于是砍掉桌子被洒上的一角，再补上了一块新的。我早期在麦吉尔大学时曾见过那张修好的放射桌子，后来那张桌子就不知所踪了。

在那段日子里，人们对放射性物质的处理漫不经心，可能是因为没有意识到它对健康的危害。这件事可以用关于利斯·迈特纳(Lise Meitner)的一个故事说明。迈特纳是哈恩的长期合作者，也是核子裂变的共同发现者。有一天，她在实验室里看到邮差从路上走过来，马上知道卢瑟福教授给她写了一封信。这封信的放射性很强，尽管邮差还在很远的路上，她的仪器已经探测到信件中的放射信号了。

1972年，我在剑桥大学学术休假期间，还听到另外一个故事。卢瑟福去世后，他的房子最初被用为学生宿舍。后来人们发现房子的放射性很强后，才不得不让所有人搬出去。

尽管如此，值得一提的是，虽然卢瑟福一生暴露在如此多的放射性环境之中，烟瘾也很大，但他却并非死于癌症。

现在让我们回到 α 粒子的话题。从它的电荷/质量比，可以断言，如果电荷为1，其质量是氢的两倍。如果电荷为2，

质量则是氢的四倍，即氦的质量。所以要知道它的质量，可以先测量它的电荷。它的电荷是在一个 α 发射中总电荷和粒子总数之商。总电荷不难量到，但粒子总数却比较困难。卢瑟福和盖革使用了一个电气的新方法^[17]，制造了一个相当于现代盖革计数器前身的电仪器去测量粒子数目。通过这种方式，他们确定 α 的电荷为2，所以质量为4。

而老方法利用人工去数硫化锌屏幕上 α 击中的闪烁次数，这是当时许多其他实验常用的方法。1957年，我在麦吉尔大学读本科时，修了一门“放射性”的课程，老师是剑桥大学时卢瑟福的研究生。他让我们在黑暗的房间里，单眼经过目镜去数闪烁次数，持续大约一小时。20分钟后，我开始觉得头昏脑涨，无论有无 α 出现，眼前尽是闪光。那个实验简直是一种折磨，让我意识到我绝对不可能成为一名实验物理学家。有趣的是，那个房间的一部分后来被改建为系主任办公室，所以20年后，我有机会再次回到我的酷刑室，但这次把所有的窗帘完全打开了。

既然 α 具有氦原子的质量，带两个正电荷，顺理成章它很可能

就是双电离的氦原子。但在当时没有原子理论的情况下，这种猜测必须通过实验来证明， α 粒子的确可以通过捕获电子而转化为氦气。卢瑟福和罗伊兹(T. Royds)做了这样一个实验，证明了猜测是正确的^[18]。

氦于1868年从太阳的一条新光谱线中首次被发现。在地球上，它通常与放射性矿石一起并存。 α 粒子被确定为氦核后，很显然这些矿石中氦的来源就是放射衰变中发射的 α 射线的积累。

卢瑟福及其合作者还通过施加电场和磁场测量了 α 和 β 粒子的速度。在不同衰变中，它们的速度各不相同，但通常会很高，接近光速。由于 α 粒子质量大得多，辐射中的大部分能量都由其携带，能量通常在MeV范围内^[15]。卢瑟福计算得到，一公斤镭一天可以产生8万匹马力，约59兆瓦，大约是化学能的一百万倍。所以在发现原子核之前，核能的巨大威力就已经被认知了！

由此，他估计地球内部放射性衰变产生的热量是巨大的，对保持地球温暖至关重要。事实上，虽然当时他还不知道，放射性还可以用另一种方式让地球保暖。放射性元素为地球板块构造运动和火山爆发也提供了能量。地球构造运动和火山爆发会释放出大量二氧化碳，二氧化碳通过温室效应可使地球暖化。在晚白垩纪时期九千万年前的恐龙时代，剧烈的板块运动和火山爆发使到当时空气中的二氧化碳含量是现在的三倍半，因而导致地球平均温度比现在高出14℃之多。

卢瑟福甚至一度认为放射性可以为太阳提供能量，但事实证明这点能量太少了。

不久之后，他开始用 α 粒子去探测原子，从而发现了原子核。 α 的能量远大于当时用任何其他办法可以得到的能量，所以我们可以将此视为高能物理的开端。放射性物质是当时的高能加速器，照相板和闪烁屏幕是初期的探测器， α 的能量由它在空气中的射程来衡量。这样简陋的装置比今天高能实验的设备差的远了，但即便如此，卢瑟福在这些开创性的高能实验中仍然取得了惊人的成果。

α 射线在放射过程中普遍出现， α 又是个氦核子，这引致卢瑟福说^[13]：“因此，我们得出的结论是，铀和钍等主要放射性元素的原子必须至少部分由氦原子构成”。这就是现代核物理的 α 模型，在原子核被发现之前就被提出了。他还敏锐的观察到了，“像氦这样的化学惰性元素，居然在铀、钍和镭的原子系统构成中起着如此重要的作用，真是非常了不起的”。“了不起的原因”现在亦已知晓。氦的两个电子形成一个封闭的 s 壳，导致其化学惰性。其原子核中的两个质子和两个中子也形成了封闭的壳层，使它结合紧密，更容易被整体弹出。

就这样，在原子核真正发现之前，放射性的研究已经奠定了核的存在。虽然当时被称为“亚原子”的核子大小尚不清楚，但已经知道原子核内会另有氦核的亚结构。虽然质子和中子还没被发现，可是已经知道了同位素的存在。简而言之，在原子核被发现之前，放射性的研究已经创造出一个核物理的粗略框架。

卢瑟福在麦吉尔大学的生活，

可以从哈恩的话中^[19]看到一些：“卢瑟福实验室的气氛和精神都非常愉快。他的研究生人数还不多，所以几乎每天都能对每个人给予单独的关注。这些学生都为放射性这一新学科快速发展做出了贡献。”

卢瑟福对别人的工作十分慷慨，经常公开褒扬他人的贡献。他常会对别人的工作提供宝贵意见和建议，但除非直接参与工作，否则他不会在论文上署名。在竞争激烈的今日社会，这种美德已经不是常见的了。

卢瑟福于1908年离开麦吉尔大学，到英国曼彻斯特大学担任朗沃西教席(Langworthy Chair)。他使得麦吉尔大学举世闻名，但也留下了不良的后果。他不喜欢理论物理学家，认为他们是应用数学家，在专门研究自然现象的物理系内是没有地位的。因此，麦吉尔大学的理论物理组在1946年至1963年间被归入数学系。理论物理组的创始人菲利普·华莱士(Philip R. Wallace)^[4]，和1950年至1957年该小组的成员——著名经典电动力学教科书^[20]的作者约翰·大卫·杰克逊(John David Jackson)，都陈述了这种情况^[21, 22]。近年来，这种态度发生了巨大的转变，钟摆已经摆到了另一端。在全世界的物理系里，对数学物理的理论感兴趣，而与实验完全无关的研究，已经不再罕见了。

再回到 α 粒子。 α 粒子和 β 粒子在空气中传播，其强度会随距离的增加而减弱。威廉·布拉格(William Bragg)在1904年提出^[23]， α 粒子的能量主要消耗于电离空气。至于 β 粒子，因为质量小，散射是导致能

量损失的主要原因。这一理论得到了许多实验支持，但卢瑟福在1906年指出^[24]，即使是 α ，也必须具有少量的散射。他看到，一条狭缝被薄云母片覆盖后，照相板上 α 射线的狭缝图像就会变宽，而在真空中未覆盖的狭缝则获得了清晰的图像，因此可知云母片引致散射。1908年，汉斯·盖革(Hans Geiger)用比较精密的仪器重复了这项实验^[25]，用金箔或铝箔覆盖狭缝。从闪烁屏可以看到清晰的散射分布，两个金箔的散射比一个的宽，金的散射也比铝的宽。随后，盖革和欧内斯特·马斯登(Ernest Marsden)在1909年进行了另一项实验^[26]。他们看到 α 粒子不只向前散射，少数粒子甚至可以向后反弹！卢瑟福拒绝相信这个结果。 α 粒子的能量在MeV范围内，而已知的化学结合能只有eV(电子伏特)的数量级，这个结果就像是说向一张薄纸发射的炮弹可以遭到反弹。这种行为绝对无法用当时流行的、1904年汤姆孙提出的原子模型来解释。

经过两年的深思熟虑，他终于想到一个去解释这种现象的办法。若要向旁边或向后推动一个高能 α 粒子，箔中的原子必须提供非常强的电场。汤姆孙原子模型内的正负电荷均匀分布，它的电场不会很强。可是，假如原子中的所有正电荷都集中在一个非常小的区域，那么当 α 粒子逼近这个区域时，它就会感受到很强的电场。一个简单的估计^[5]表明，对于黄金来说，这个区域必须小于 10^{-14} m左右，比当时已知约为 10^{-10} m的原子大小要小得多。这个小区域就是原子核。

4) 菲利普·华莱士最著名的文章是：The band theory of graphite. *Phys. Rev.*, 1947, 71: 622. 文中初次提出石墨烯的理论，比石墨烯的实验发现约早了六十年。当 Andre Geim 和 Kostya Novoselov 因为这个发现拿到了2010的诺贝尔奖时，华莱士的远见文章也变得十分出名，但可惜华莱士在2006年去世，已经看不到了。

有了这个想法,他便在1911年推导出了著名的卢瑟福散射公式^[27]。图5是他当时笔记本上的一页计算。

盖革和马斯登后来进行了仔细实验^[28],证明卢瑟福的散射理论是完全正确的。

对于原子内部这么小的物体,量子效应非常重要,必须包含在散射公式的推导中。当然,量子力学在1911年并不存在。在这方面,卢瑟福的确非常幸运,因为后来使用量子力学推导出的散射公式与卢瑟福使用经典力学推导的公式完全相同。否则,原子核就不可能被发现,至少当时他是不会发现的。

随着实验验证了他的散射公式,原子的行星模型就诞生了^[29]。

根据这一模型,原子内有个带正电的小原子核,周围伴有许多绕着原子核转动的电子,就好像行星绕着太阳运转那样。然而,这个模型当时并不受到关注,因为这种原子根本不可能是稳定的。循环电子的辐射会导致它们失去能量,迅速螺旋式地进入原子核,使到原子最终的大小只能大约是 10^{-14} m,或者更小,而不是当时已知的 10^{-10} m。

尼尔斯·玻尔(Niels Bohr)进一步挽救了这个模型。1912年夏天,他在卢瑟福的实验室待了几个月,想出了如何利用量子效应来稳定电子的轨道,从而防止它们螺旋式地进入原子核。这就是著名的玻尔原子模型^[30],发表于1913年。有了这

个稳定机制,卢瑟福的原子模型就被大众接受了。

将卢瑟福原子从遗忘中拯救出来的玻尔模型有个鲜为人知的故事。玻尔使用氢光谱去证明这个模型的正确性,但在那个年代根本没有人会想到氢光谱能够来自一个独立的氢原子^[31]。玻尔的伟大就是因为他能够跳出当时常规思维的框架。

如前所述,卢瑟福提议原子核的电荷就是它的原子序数^[14]。这样每种元素

的卢瑟福散射角分布就可以计算出来,越近原子核的散射角偏转会越大。卢瑟福散射公式是在假设库仑力有效的情况下推导出来的。通过理论计算与实验数据在不同角度的对比,库仑力在不同距离的正确性就可以得到验证。像金这样的重元素,在 36×10^{-14} m到 3×10^{-14} m之间的距离,实验与理论非常吻合^[14]。要检验库仑定律在更小距离下是否准确,就需要更轻的元素或者更高能量的 α 粒子,好让 α 可以更接近原子核。

没有什么比氢更轻的了,所以马斯登就用它做了一个实验。从 α 与氢气的碰撞中^[32],他发现硫化锌屏幕上有超出 α 在空气中射程的远程闪烁,因此这种闪烁不能由 α 引起。卢瑟福^[33, 34]认为这种远程闪烁是由单电荷氢核引起的,并进行了额外的实验来证实这一解释。就这样,他发现了质子。在实验中能够最接近的 3×10^{-15} m处,氢闪烁的数量远远大于卢瑟福散射公式^[6]预测的数量。他意识到这可能出于 α 粒子本身的大小,也可能因为有另一种短程强力的存在。这是短程核力迹象的首次发现。

当时电子的存在已被公认。随着质子的发现,卢瑟福提出原子核是由质子和电子共同组成的^[14]。一个原子序数为 Z ,原子质量为 A 的原子核,应该包含 A 个质子和 $A-Z$ 个电子。同位素是具有相同 Z 但不同 A 的元素。要使这个模型成立,他知道质子之间必须具有很强的吸引力来抵消它们之间的静电排

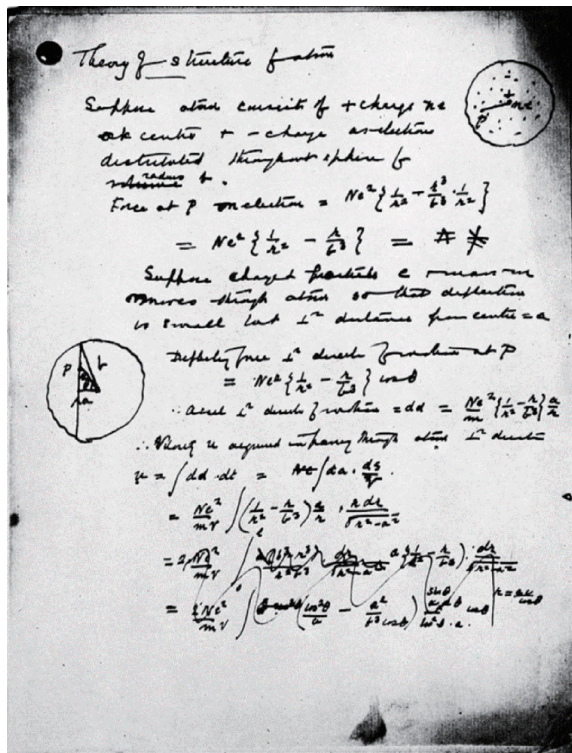


图5 卢瑟福笔记本的一页

5) 如果原子和 α 粒子间的静电相斥强到可以使高能 α 粒子停下,然后再向旁边或向后推出,那么两者之间的距离就不难估计。如果 Z 是原子的正电荷,集中在一个很小的区域,又如果 α 粒子达到该距离时被停下,那时 α 的能量 E 就应该等于两者的相斥势能 $2Ze^2/r$ 。对于 E 为MeV和 $Z=79$ (金),答案是 $r=4.5 \times 10^{-14}$ m。顺便一提,常用的RaC发出 α 的能量是 $E=5.62$ MeV。

6) 氢核很轻,反冲修正必须放进卢瑟福的散射公式中。进化论的达尔文的孙子Charles Galton Darwin就做了这项工作: Collision of a particles with light atoms. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1914, 27(159): 499。

斥。如前所述,在 α -H短距离散射中,他已经发现这种新力的一些迹象了。

卢瑟福也确信核子里的电子和质子会构成一个中性物体,但无论如何,他都没法找到它。该中性物体最终于1932年被他曾经的学生詹姆斯·查德威克(James Chadwick)发现,带给了查德威克1935年的诺贝尔奖。这个物体被称为中子,但它的结构,除了电子和质子外,后来人们知道它的成分还必须包含有反中微子。

α 与氢和金的碰撞是弹性碰撞。碰撞的物体被抛到一边,但没有破碎。卢瑟福还研究了 α 与轻核的非弹性碰撞,把轻核打碎,得到譬如说质子和其他碎片。这里不讨论那些后来的实验,也不讨论他关于 β 或 γ 辐射的实验。

始于对放射性的好奇心,卢瑟福细心去研究每个现象,系统地抓住每条线索,让他在1911年发现原子核,证实了他1903年在麦吉尔大学已经提出的“亚原子”的真实存在。在他的职业生涯中,他取得了

不少新发现,开创了许多新思想。他不仅是原子物理之父,核物理学之父,还是高能物理领域的首位探险家。

致谢 衷心感谢陈德恒、郭洪、胡华雨、华家照、江本一、蓝家玥、邴民兴、陆少麒、徐一鸿、Jean Barrette、Subal Dasgupta、Nicholas DeTakacsy、Charles Gale、David Hanna、Paul Hoyer、Kenneth Ragan、John Strom-Olsen 的讨论、提议和指正。

参考文献

- [1] Jarlskog C. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 136:012001
- [2] 卢瑟福陈列馆. <https://www.physics.mcgill.ca/museum/rutherfordcollection.htm>
- [3] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1899, 47(284): 109
- [4] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1900, 49(296): 1;
- [5] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1900, 49(297): 161
- [6] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1903, 5(25): 95
- [7] Rutherford E, Soddy F. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1903, 5(29): 561
- [8] Rutherford E, Soddy F. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1902, 4(21): 370;
- [9] Rutherford E, Soddy F. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1902, 4(23): 569
- [10] Rutherford E, Soddy F. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1903, 5(28): 441
- [11] Rutherford E, Soddy F. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1903, 5(28): 445
- [12] Rutherford E. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 1905, 204: 372
- [13] Rutherford E. *Nobel Lecture—the Chemical Nature of α -particles from Radioactive Substance*. Dec 11, 1908
- [14] Rutherford E. *Proceedings of the Royal Society*, 1920, 97: 374
- [15] Decay chain W. https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain
- [16] Rutherford E, Hahn O. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1906, 12(70): 371
- [17] Rutherford E, Geiger H. *Proceedings of the Royal Society*, 1908, 81: 141
- [18] Rutherford E, Royds T. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1909, 17(98): 281
- [19] Hahn O. *Some Reminiscences of Professor Ernest Rutherford during his Time at McGill University, Montreal*. In: *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*. London: Routledge, 2014
- [20] Jackson J D. *Classical Electrodynamics*. John Wiley and Sons, 1962; 1975; 1999
- [21] Wallace P R. *Physics in Canada*, 1993, (11): 358
- [22] Jackson J D. *Physics in Canada*, 2010, 66(4): 14
- [23] Bragg W H. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1904, 8(48): 719
- [24] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1906, 12(68): 134
- [25] Geiger H. *Proceedings of the Royal Society*, 1908, 81: 174
- [26] Geiger H, Marsden E. *Proceedings of the Royal Society*, 1909, 82: 495
- [27] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1911, 21(125): 669
- [28] Geiger H, Marsden E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1913, 25(148): 604
- [29] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1914, 27: 488
- [30] Bohr N. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1913, 26(6): 1
- [31] 蓝志成. *物理*, 2024, 53: 654
- [32] Marsden E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1914, 27(161): 824
- [33] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1919, 37: 537
- [34] Rutherford E. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1919, 37: 562