

核科学百年讲座

第一讲 历史性发现及其对人类社会的影响(I)*

刘 军 许甫荣[†] 郑春开

(北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

沈文庆

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

编者按 自从 1896 年贝克勒尔发现天然放射性以来,核科学已经走过了百年有余的历史.核科学的出现使得人们能够从一个新的微观层次更深刻地了解物质结构.在 20 世纪,核科学技术得到了空前的发展,已经对人类社会进步产生了巨大的影响.尽管核武器的使用给人类带来了悲剧,但是核科学技术的和平利用已经极大地造福人类.核电、核医学、核固体物理学、材料核科学、辐射化学工业、核农业技术及核探测技术等正在对人类文明进步发挥巨大的推进作用.走过了百余年的历史,核科学研究正继续向纵深发展,开拓了新的研究领域,形成众多交叉学科.当前,欧美日等发达国家正投入巨资兴建或升级大型核科学设施,我国也在建设兰州冷却储存环大科学装置,这些都为核科学的进一步发展创造了极好条件.在进入新世纪之际,为让世人了解百年核科学技术的巨大成就,本刊将陆续发表 10 篇系列文章“核科学百年”以飨读者.

摘 要 第一讲和第二讲系统地介绍了核科学发展历史,特别是核科学中的历史性发现和重大应用.主要综述核科学的早期发展历史,总体介绍核科学中最基本的重大发现,如放射性、电子、质子、中子、原子核裂变和聚变的发现.介绍人类认识原子和原子核的历史过程,包括与之相关的著名实验和理论.通过介绍核科学的发展和应用,展示了核科学技术对自然科学本身及其对人类社会的深远影响和巨大贡献.

关键词 核科学 历史性发现 重大影响

Nuclear science in the 20th century ——its historical discoveries and impact on the world(I)

LIU Jun XU Fu-Rong[†] ZHENG Chun-Kai

(Department of Technical Physics , School of Physics , Peking University , Beijing 100871 , China)

SHEN Wen-Qing

(Shanghai Institute of Nuclear Research , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

Abstract Nuclear science has been in existence for more than one hundred years , and has affected the world in many important aspects. In this paper , we give a brief overview of the history of nuclear science , including major discoveries such as the discovery of radioactivity , the electron , proton , neutron , nuclear fission and fusion. The structures of atoms and atomic nuclei are explained , with some historic experiments and theo-

* 国家自然科学基金(批准号 :10075070)资助项目

2002 - 11 - 19 收到初稿 2003 - 01 - 14 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: frxu@pku.edu.cn

ries. The immense impact of nuclear science on the natural sciences and the world is reviewed.

Key words nuclear science, historic discoveries, important impact

核科学已经走过了它的百余年历史. 核科学的诞生及其发展不仅对自然科学本身起到了巨大的推动作用, 而且对人类社会也产生了巨大的影响. 人类从更深层次上认识了物质的构成与本质, 从而更深刻地认识了我们周围的世界. 核科学自诞生之日起就与人类的生存发展密切相关, 它正越来越多地进入我们的生活, 成为推进当今人类生存发展的重要因素之一. 核能已经成为人类所需能源的主要来源之一. 核诊断和放射治疗已经和正在广泛地用于医学, 核工业、核农业正在迅速发展并得到实际应用, 核科学也正在用于新材料研发、地质和文物探测以及环境监测. 这一切都在推动着人类历史的发展和人们生活的改善. 尽管核技术对人类和社会也存在着一些负面影响, 错误地利用会给社会和人类带来破坏甚至是灾难. 但是, 如果人类合理地应用核科学技术, 它完全可以安全地造福于人类.

核科学有着辉煌的百年历史, 为了让大众更科学地认识核科学, 我们将发表系列文章, 介绍核科学的重大发现及其在能源、医学、工农业和环境等领域的应用.

1 放射性的发现

1895年, 德国物理学家伦琴(Röntgen W C)在对阴极射线的研究中, 偶然发现了一种穿透性极强的“未知”射线, 取名为X射线^[1, 2](见图1). 为此, 伦琴获1901年首届诺贝尔物理学奖. X射线的发现对物理学乃至整个科学技术产生了深远的影响, 也是引发核物理和核技术一系列重大发现的开端.

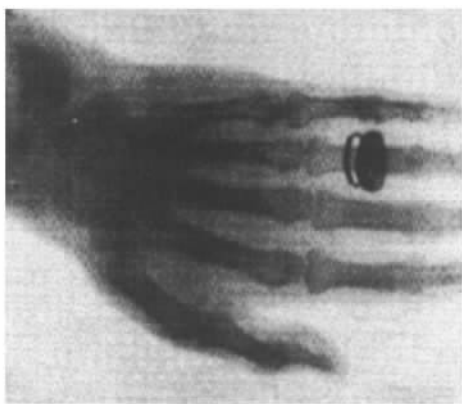


图1 第一张X射线光片

X射线发现引起了法国科学家贝克勒尔(Bec-

querel H)的强烈兴趣, 他在一次报告会上提出: “这种射线是怎样产生的?”. 彭加勒回答说, 可能是从阴极对面发荧光的那部分管壁发出的. 受此启发, 贝克勒尔当时很快想到: 如果把荧光物质放在强光下照射, 是否在发出荧光的同时, 也能放出X射线. 于是, 他把荧光物质(一块铀化合物——钾铀酰硫酸盐晶体)放在用黑纸包住的照相底片上, 然后放在太阳光下曝晒. 如果此铀化合物在阳光激活下, 发射荧光时也有X射线发出, 由于X射线的强穿透性, 定能使底片感光. 结果, 在底片上果然发现了与荧光物质形状相同的影像. 1896年2月24日, 他向法国科学院报告了此实验结果. 但是, 事隔一周, 在3月2日, 他向科学院又作了一个报告, 宣布了一个惊人的发现^[3]: 在上次报告后, 他想继续实验, 但天不作美, 连续两天不见太阳. 他把铀化合物和底片一起放在抽屉里. 可是, 丰富的实践经验, 使他富有灵感, 他想到要看一下此铀化合物未经太阳曝晒, 底片是否也感光. 原以为最多能看到非常微弱的影像, 但恰恰相反, 底片冲出后, 在上面出现了很深的感光黑影, 这使他大为惊奇. 他进一步用不发荧光的铀化合物进行试验, 结果发现也能使底片感光. 这说明了铀化合物本身也会放出一种肉眼看不见的射线, 它与荧光是完全无关的. 他还用各种铀盐做实验, 发现只要含有铀的, 都发出这种看不见的射线, 即使用纯铀做实验, 也同样. 由此可推断, 这些射线是铀自发放射出来的, 放出的射线具有很强的穿透力, 有一部分射线在磁场中偏转. 现在我们知道: X射线就是一种肉眼看不见的波长很短(频率很高)的电磁波. 当时伦琴发现的X射线是由阴极射线(电子流)打在金属靶(即阳极)上而产生的^[4]. 高速运动的电子在靶材料中被减速而发生韧致辐射, 放出能量连续的X射线; 同时, 高速电子也可以打掉靶材料原子的内层电子, 而较外层电子跃迁到内层放出能量分立的X射线. 今天我们清楚: 贝克勒尔当时发现的射线是铀核自发蜕变放射出来的, 有带电粒子和比X射线波长更短的电磁波(现称 γ 射线).

铀放射性的发现引起了居里夫妇(Curie M和Curie P)的极大兴趣, 难道只有铀具有放射性吗? 他们根据验电器放电快慢测量放射性强弱原理, 设计制造了一种测量放射性强度的简单仪器, 用它研究铀盐辐射强度与铀含量的关系. 实验证明, 铀盐

(包含各种化合物和金属铀)辐射强度与化合物中铀的含量成正比。但当她用这个方法测量铀矿石中铀含量时却出现了“怪事”,铀矿石的放射性比纯金属铀的放射性强得多。反复 20 多次实验,结果都如此。为了寻求原因,她用化学提纯方法,合成了铜铀云母,测量合成的铜铀云母的放射性,发现它只有天然铜铀云母矿石的 18%。三种云母的差别是天然铀矿中含有杂质,因此,天然铀矿中这些多出来的放射性应该是杂质产生的,也说明在杂质中存在一种新的放射性更强的元素。他们把矿石溶解在酸中,通入硫化氢,生成了很多沉淀物。1898 年 7 月,她从沉淀中分离出铋(Bi),经测量其放射性比同质量铀强 400 倍,而铋本身没有放射性,只能是化学性质与铋相似、混在铋中的一种放射性很强的新的微量元素。她把这个新发现的放射性元素命名为“钋”(Polonium)以纪念自己的祖国波兰(Poland)。同年 9 月,她又细心地测量了剩余溶液的放射性,从中又发现了一种放射性更强的新元素,并建议将它命名为“镭”(Radium)。他们的工作还开创了放射化学这门新学科,发展了放化分析分离技术,在此后的核科学发展和核技术应用中起到了关键性的作用。为此,贝克勒尔、居里夫妇共同获得了 1903 年诺贝尔物理学奖。

那么,这些放射性元素放射出来的射线到底是什么?来自哪里?在居里夫妇发现放射性元素“镭”之后,英国科学家卢瑟福(Rutherford E)通过实验发现,镭会放出两种射线:一种只能穿透 0.02mm 以内的薄铝箔,并有显著的电效应,在磁场中会偏转,卢瑟福将它命名为 α 射线;另一种能贯穿 0.5mm 以内的铝箔,但贯穿后强度减少一半,也在磁场中偏转,卢瑟福把它命名为 β 射线;但当时,他并没有发现 γ 射线^[2]。1900 年,法国物理学家维拉德(Villard P V)发现了 γ 射线^[2]。至此,三种主要的射线被人类发现。1902 年,卢瑟福指出,放射性元素会自发蜕变为另外元素,后来得到了证实。铀元素经过一连串的蜕变后会变成镭,镭又经过一连串的蜕变最后变成元素铅稳定下来,在蜕变过程中,产生 α 、 β 和 γ 射线。 α 和 β 射线都是带电粒子流, γ 射线是电中性的。后来知道 α 射线实际上是带两个正电荷的氦核 ^4He , β 射线就是电子流, γ 射线是电中性的高能电磁辐射。

2 走向原子结构

放射性的发现激起了人类对微观世界的极大兴趣,开启了人类探索原子世界的大门。

2.1 电子发现和汤姆孙原子模型

1897 年,英国物理学家汤姆孙(Thomson J J)研究了阴极射线在电场和磁场共同作用下的偏转,证明它们是带电的粒子流,并且测量了这些粒子的荷质比,发现它们是氢离子荷质比的 1837 倍^[5]。汤姆孙又用其他方法测量得出^[5]阴极射线粒子所带的负电荷与氢离子所带的电荷量大小相同,都等于一个基本电荷 e ,从而确定这些粒子的质量约为氢原子的 $1/1837$ 倍,这是电子发现的直接而可靠的依据。此外,汤姆孙还用大量的实验结果阐明了电子的普遍存在^[2]:阴极射线、 β 射线和光电子都是电子流;电场可以激发电子,紫外光可以从金属中击出电子,加热的金属可以发出电子,放射性元素镭还可以自发地放出电子。由此可见,电子是原子的组成部分。由于电子的发现,汤姆孙获得了 1906 年的诺贝尔物理学奖。

电子存在于原子之中,而原子是电中性的,所以,原子中一定有正电荷的存在,那么,正电荷在哪里?正电荷的载体又是什么?当时,人们试图回答这些问题,给出了种种猜测。1903 年,汤姆孙提出设想^[1]:原子是由带正电的物质和带负电的电子组成的,正电荷连续均匀地分布在整个原子大小的球体内,而电子镶嵌在正电荷内;由于电子很小,原子质量基本上集中于正电荷部分。这个模型被称为“葡萄干面包”模型,它能合理地解释物质原子的电中性问题,而且能够描述电荷的流动,但它不能解释原子发光的问题,人们对汤姆孙的原子模型存在疑虑^[1]。

2.2 卢瑟福 α 粒子散射实验和原子核式模型

放射性发现之后,卢瑟福对 α 射线进行了详细的研究,认识到: α 粒子就是具有较高动能的氦离子 ^4He ^[5]。放射性元素放射 α 粒子后变成质量轻一些的元素。既然 α 粒子是从放射性元素中放出来的,那么能不能把它们当作炮弹打进稳定的原子中去呢?1909 年,卢瑟福和他的学生盖革(Geiger H)、马斯顿(Masterton W L)用 α 粒子轰击金箔,结果发现:有极少数(约 $1/8000$)的 α 粒子被反弹回来(散射角大于 90°)^[1]。实验结果让卢瑟福十分惊讶,因为按照汤姆孙模型, α 粒子只可能朝前跑,电子的质量如此之小,是不可能使得比电子质量大得多的 α 粒子反弹回来的。为了解释这一实验事实,卢瑟福于 1911 年提出了原子的核式结构模型(或“行星”模型)^[1]:原子中的全部正电荷和原子的绝大部分质量都集中在原子中心一个很小的区域,称为原子核;

而电子像太阳系中的行星一样围绕着原子核转动. 卢瑟福的这个模型可以解释 α 粒子散射实验, 当 α 粒子从靠近原子核的地方或者是和原子核正碰时, 就可以发生大角度反弹. 卢瑟福根据实验结果还估计出: 原子核的半径大约是 10^{-14} m, 是原子半径的万分之一左右. 核式模型从根本上改变了人们关于原子可以看成均匀球体的假设, 揭示了原子核这一物质更深层次的存在, 在人类探索物质结构的道路上迈出了一大步. 由于在元素的辐射和放射性物质化学性质研究方面的贡献, 卢瑟福获得了 1908 年的诺贝尔化学奖.

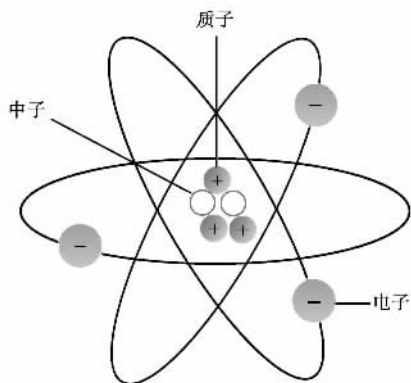


图2 原子核式模型示意图

2.3 玻尔原子理论

卢瑟福的原子“行星模型”正确地表达了原子有核结构, 但是没有说明原子中带负电的电子是如何围绕原子核运动的. 按照卢瑟福的模型, 根据经典电磁理论, 带负电的电子围绕带正电的原子核运动会向外辐射电磁波, 能量逐渐减少, 最终电子会跑到带正电的原子核上去而被吸收. 这表明原子是一个不稳定的体系, 这个结果与大量存在的稳定原子事实是不相符的. 另外, 卢瑟福的“行星模型”也不能解释原子发射分立光谱而不是连续光谱现象^[1]. 面对这些问题, 丹麦物理学家玻尔(Bohr N)提出了他的理论. 1913年, 玻尔运用量子概念, 把卢瑟福的原子结构和当时知道的光谱体系结合起来, 提出了基于三个基本假设的原子结构壳层模型^[1] (1) 原子可以看作一个大小为 10^{-10} m 的小球, 它由电子和处于中心带正电的原子核组成; 原子核的大小约为 10^{-14} m (2) 原子中的电子分布在原子核周围不同的轨道上, 不同的轨道与原子核的距离不同, 不同轨道的电子与原子核有不同的结合能量 (3) 每个轨道只能容纳一定数量的电子. 玻尔原子结构模型在解释和分析氢原子线状光谱现象方面获得了很大的

成功, 从而奠定了原子物理发展的基础. 由于这方面的理论成就, 玻尔获 1922 年诺贝尔物理学奖.

3 走向原子核结构

汤姆孙发现了电子, 卢瑟福提出了核式模型, 那么原子核到底是由什么构成的? 最开始, 人们设想原子核是由带正电的粒子组成的, 但是这又不能解释原子核释放电子发生 β 衰变这一事实. 于是, 1913 年居里夫人提出了原子核由带正电的粒子和电子构成的假设模型. 人们开始向原子核世界迈进.

3.1 质子的发现

1886 年德国物理学家戈德斯坦(Goldstein E) 在研究阴极射线的时候发现了一种“奇怪的射线”, 它来自阳极. 1907 年汤姆孙称这种射线为“阳极射线”, 他进一步研究发现: 阳极射线在磁场中能够发生偏转(说明带有电荷), 是一种粒子流; 它的电荷和质量正好等于氢原子核. 1914 年, 卢瑟福用 X 射线照射氢, 氢原子中的电子被打掉了, 结果测得氢原子核带一个单位的正电荷^[1]. 当时人们已经有了基本电荷的概念, 于是卢瑟福将氢原子核命名为“质子”, 意思是“原始的宇宙物质”^[1]. 1919 年, 卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核时, 也打出了质子. 到 1924 年, 卢瑟福已经从很多轻元素中打出了质子, 进一步证实了质子存在于所有原子核中. 质子带一基本单位的正电荷, 质量和氢原子核相同, 是电子的 1800 多倍. 至此, 人们发现了电子和质子两种粒子, 而且明确地知道质子存在于原子核中. 质子的发现也使当时的物理学家接受了原子核结构的“质子-电子”模型. 但是, 这一模型也很快受到质疑.

3.2 中子的发现

1920 年卢瑟福预言, 原子核里除质子外还存在中性粒子. 由于它不带电, 对物质有很强的穿透性, 可以容易地进到原子内部. 此后他的学生查德威克(Chadewick J) 坚持不懈地从实验上寻找这种中性粒子. 近十年的努力没获得结果. 直到 1930 年, 终于等来了机会. 德国的博特(Bothe W) 和贝克尔(Becker H) 在用钋发射的 α 粒子轰击铍和硼等轻元素时发现了一种穿透力很强的中性射线, 当时断言是 γ 射线. 在巴黎居里实验室里, 居里夫人的女儿伊伦·居里(Curie I) 和女婿弗里德里克·约里奥(Joliot F) 也正在进行类似的实验, 他们用 α 粒子打到铍靶上, 同样发现穿透性很强的射线, 而用这种射线去轰击石蜡, 发现有反冲质子飞出来. 但遗憾的是, 他们也误把铍的辐射看成是 γ 射线. 不过, 他们的石

蜡实验对弄清铍辐射性质和中子的发现却是跨出了重要的一步。1932年1月18日,发表了约里奥-居里夫妇的实验结果和评论。查德威克得到消息,立刻意识到石蜡中飞出来的反冲质子不是被 γ 射线打出来的,而应该是被某种新的中性粒子打出来的。他抓住机会,立刻用高压电离室、计数器和云雾室三种探测器做了这个实验,而且还用氮核代替石蜡中的氢作反冲核重复实验。通过对氢、氮两种反冲核的测量数据分析比较,指出:铍所发射的中性射线不是 γ 射线,而是卢瑟福预言的“中子”。1932年2月17日,查德威克赶快把论文送到《自然》杂志发表,宣布发现了“中子”。这是核物理发展史上的重大里程碑,为核结构和核反应的研究开辟了崭新的道路。1935年查德威克荣获了诺贝尔物理学奖。

仅过5天,1932年2月22日约里奥居里夫妇公布他们用云雾室又一次进行这项实验的结果,它只能成为查德威克的实验的证明。许多人为约里奥居里夫妇惋惜,事实上他们已经发现了中子,但却没有意识到,终于使一项重大的发现从他们的鼻子底下溜走了。

3.3 原子核的“质子-中子”模型

查德威克发现中子之后,德国科学家海森伯(Heisenberg W)和前苏联科学家伊万年柯(Ivanenko D)各自独立地提出了原子核是由质子和中子组成的假设^[1]。质子和中子是组成原子核的粒子,统称为核子。质子数和核外的电子数相同,使得原子保持电中性,原子核中的质子数和中子数之和就是原子核的核子数。人们把具有确定质子数和中子数的原子核称为某种核素。原子核的“质子-中子”模型很好地解释了原子量和原子序数问题,人们很快接受了这个模型。

虽然原子核是由质子和中子组成的,但精确的

测量发现^[1],原子核的质量并不等于质子和中子的质量之和,原子核的质量总是小于所有自由核子的质量之和(人们把这种质量差称为质量亏损 ΔM)。1905年,爱因斯坦(Einstein A)根据相对论原理,认为物质的质量 M 和能量 E 是相互联系和不可分割的,它们的关系可以用质能关系式来描述: $E = Mc^2$ (c 是光速)。于是,根据爱因斯坦的质能关系式,将质量亏损 ΔM 相应的能量 $\Delta E = \Delta Mc^2$ 称为原子核的结合能。每一种原子核都有自己的结合能,把各种原子核的结合能除以原子核的核子数就得到了每一个核子的平均结合能。经过系统的研究,人们发现^[1],较轻的原子核和较重的原子核的平均结合能较小,而中等质量的核素的平均结合能较大,平均结合能越大,原子核结合也越紧密,也就更加稳定。

由于篇幅限制,我们将在本文的下半部分继续讨论核科学的历史成就和对人类社会的巨大影响。

参 考 文 献

- [1] 刘洪涛等. 人类生存发展和核科学. 北京: 北京大学出版社, 2001[Liu H T et al. Nuclear Science and its Impact on the World. Beijing: Peking University Press, 2001(in Chinese)]
- [2] 郭奕玲. 物理学家的足迹. 长沙: 湖南教育出版社, 1994 [Guo Y L. The Tracks of Physicists. Changsha: Hunan Education Press, 1994(in Chinese)]
- [3] 杨福家等. 应用核物理. 长沙: 湖南教育出版社, 1996[Yang F J et al. Applied Nuclear Physics. Changsha: Hunan Education Press, 1996(in Chinese)]
- [4] 林文廉. 让射线造福人类. 北京: 北京师范大学出版社, 1997 [Lin W L. Let Rays Benefit Mankind. Beijing: Beijing Normal University Press, 1997(in Chinese)]
- [5] 黄祖洽. 探索原子核的奥秘. 长沙: 湖南教育出版社, 1994 [Huang Z Q. Exploring the Secrets of the Atomic Nuclei. Changsha: Hunan Education Press, 1994(in Chinese)]

2003年第6期《物理》内容预告

特约专稿

物理学与生物学(下)(郝柏林).

研究快讯

相互作用量子点自旋相关输运(张平等).

评述

网络建筑学(朱涵等).

前沿进展

集成原子光学: 原子芯片(何明等);

分子光学及其应用前景(印建平);

表面微构造的硅材料——一种新型的光电功能材料

(赵明等);

国外物理学核心期刊的研讨(Ⅱ)(范淑兰等).

物理学和高新技术

具有广阔应用前景的纳米金刚石膜(吕反修).

实验技术

电荷电压法测量 DBD 等离子体的放电参量(张芝涛等).

讲座

核科学百年讲座第三讲 核能与核武器(郑春开等);

核科学百年讲座第四讲 核能与核电(刘军等).

物理学史和物理学家

中国理论物理学家和生物学家结合的典范(上)(刘寄星);

也论电磁波的预言及其发现过程(钱长炎).