

a a a a
β β β β
γ γ γ γ γ
a a a a a
β β β β β β
γ γ γ γ γ γ γ
a a a a a a a
β β β β β β β β
γ γ γ γ γ γ γ γ γ
a a a a a a a a a
β β β β β β β β β β
γ γ γ γ γ γ γ γ γ γ

放射性 100 年

宁平治 曾月新

(南开大学物理系)

a a a a
β β β β β
γ γ γ γ γ
a a a a a
β β β β β β
γ γ γ γ γ γ γ
a a a a a a a
β β β β β β β β
γ γ γ γ γ γ γ γ γ
a a a a a a a a a
β β β β β β β β β β
γ γ γ γ γ γ γ γ γ γ

一、放射性的发现和认识过程

翻开 1896 年法国科学院每周例会《会议录》122 卷第 420 页,可以读到关于首次发现放射性的记载:2 月 24 日会议,亨利·贝克勒尔(A·H·Becquerel)报告:“……我用两张厚实的黑纸包住一张涂有溴化银乳胶的底片……在黑纸的外表面放上一片磷光物质(铀盐)在阳光下放置数小时后将底片冲洗出来,发现底片上有磷光物质的黑色影象。……由实验可得出结论:该磷光物质可放射一种射线,它能贯穿不透光的纸,并使底片上的银盐还原”。再翻到 501 页,可以读到他在 3 月 2 日例会上的报告:“……把一片约 0.1 毫米厚的十字形铜片插入到铀盐与黑纸之间,则在底片上可观察到不那么黑的十字形影象,表明射线还是穿透了铜片……我特别要强调下述事实:……使它处于黑暗中时,仍然产生同样的照相效应。”这些看来简单的实验现象的发现,却标志着人类认识物质世界的新起点,迄今整整 100 年了。

1898 年玛丽·居里(Marie Curie)和她的丈夫皮埃尔·居里(P.Curie)在极端困难的条件下,从天然沥青铀矿中分离出了放射性比铀强得多的钋和镭。由于镭的放射强度比铀高二百万倍,推动了一系列放射性新现象的观测和测量。所以就科学意义讲,居里夫妇的发现是可以与贝克勒尔的发现相提并论的,三人共同获得了 1903 年诺贝尔物理奖。“放射性”一词也是玛丽·居里在 1898 年 4 月发表的第一篇论文中首次引入的,并把能放出射线的元素称为放射性元素。

放射性的发现立即激起大批学者的研究兴趣。它有哪些性质?它的本质是什么?人们采用各种可能的实验方法去揭示放射性的奥秘,其中最重要的方法是磁场偏转法。年轻的卢瑟

福(E.Rutherford)早在 1898 年初写的一篇文章中就指出放射性至少有两种不同的成分:“一种非常容易被吸收,为方便称为 α 射线;另一种具有更强的穿透本领,称之为 β 射线”。这篇论文到 1899 年才正式发表。这时候盖赛尔(F.Giesel)、梅益尔(S.Meyer)与冯·史维德勒(Von Schweidler)分别指出,当在垂直于射线的方向加上强磁场时,射线中有一种成分被偏转,其余成分不偏转。1900 年维拉德(P.Villard)证实,在不偏转的成分中有一种穿透能力极强的射线,后来被卢瑟福命名为 γ 射线。

对三种射线的本质并不是很快认识清楚的。首先,贝克勒尔在 1899 年发现 β 射线在磁场中的偏转很像阴极射线,接着居里夫人观测到它带负电荷。为了确认 β 射线就是高速运动的电子流,1900 年贝克勒尔测定了 β 粒子的荷质比,结果与汤姆生(J.J.Thomson)在 1897 年由阴极射线测定的电子荷质比一致。这样,对 β 射线的本质就有了初步认识,然而更深入的认识过程持续了约 1/4 世纪。1932 年安德森(C.D.Anderson)发现正电子后,人们发现某些放射性元素也能发射正电子,称为 β^+ 射线,原来带负电的 β 射线有时记为 β^- 。对 α 射线本质的认识主要是卢瑟福的贡献。最初,居里夫人和斯特拉特(R.Strutt)先后提出 α 射线“可能是某种带正电的快速粒子,粒子质量像原子一样大。”当时注意到有放射性的矿物总伴随有惰性气体氦存在,人们猜测 α 粒子可能与氦有关。真正的确认还是靠卢瑟福多年的实验工作。1906 年他测定了 α 粒子的荷质比,1908 年利用盖革(H.Geiger)发明的计数管证实了 α 粒子是带有两个正电荷的氦原子。同年他又和他的学生罗伊兹(T.Royds)把 α 粒子引到一个抽成真空的

玻璃管内,设法积累起来进行放电,并拍摄 α 粒子的光谱线,他们发现这谱线与已知的氦原子谱线完全一样.至此, α 射线的本质得到了最肯定的确认.对于 μ 射线的本质,当时很容易就证实它是波长比X射线更短的电磁波,波长约为0.5到0.005埃.

直到1902年,人们还只限于寻找新的放射性物质和研究射线的性质,那么,这些射线到底是如何产生的?产生的机制是怎样的?由于原子不可分的传统观念,当时存在着各种离奇混乱的观点.卢瑟福等人在1900—1903年间就观察到:放射性物质的放射性是随着时间的增加而呈指数衰减的,不同物质衰减快慢不同,这种现象称为放射性衰变.卢瑟福把放射性衰减到一半所需要的时间称为“半衰期”.他和索迪(F.Soddy)总结了许多科学家对衰变现象艰苦探索的成果,于1903年提出了一个革命性的物理思想,即放射性是由原子本身内部变化产生的,衰变过程中一种原子变成了另一种原子.尽管遭到不少权威学者长期的反对,这一光辉思想终于成为现代物理学的重要基石.卢瑟福和索迪分别于1908年和1921年获得诺贝尔化学奖.

到1910年为止,已经认识到有约40种不同的放射性元素,它们分属于三个衰变系,两个由铀开始衰变,一个由钍开始衰变,而衰变最后的元素都是稳定的元素铅.1913年法詹斯(K.Fajans)和索迪等总结出放射性衰变的位移定律: α 衰变产生的新元素在周期表中位于母元素的前两格, β 衰变产生的新元素位于母元素的最后一格.在当时已知的40种放射性元素中发现,常是几种放射性不同的元素彼此化学性质都相同,它们在周期表中应处于同一格内,索迪称它们为“同位素”,包括稳定的和不稳定的核素.在以后的年代里新的核素不断发现,到今天人类已经认识到,对应于111种已知元素共有近3000种核素,其中约300种是自然界存在的,2600种以上是由人工核转变产生的.理论家估计半衰期大于1微秒的核素应有8000种以上,其中约6000种有可能人工产生.上述人

工核转变的首次实践是1914年由卢瑟福的合作者马尔斯登(E.Marsden)研究 α 射线在空气中的射程开始的,他观察到有射程比 α 粒子长得多的粒子出现.后来卢瑟福本人对此进行了几年的反复研究.1919年他成功地用 α 粒子从氮核中打出了氢核(质子),从此开始了人工控制原子内部转变的时代.不过,在30年代以前,只能人工产生稳定的核素.伊伦·居里(I.Curie)和约里奥·居里(F.Joliot)在1934年首次实现了人工产生放射性核素,他们使 α 射线穿过铝箔,观测到 β^+ 放射性,并证明 β^+ (正电子)是由新产生的放射性核素磷30发出的.他们夫妇因此获得1935年诺贝尔化学奖.后来利用加速器产生的高能粒子轰击各种靶元素,人工产生了越来越多的放射性同位素,使放射性的应用越来越广泛.放射性发现的意义不仅在于它的多方面应用,更重要的是它对整个近代物理学的诞生和发展所产生的深刻影响.

二、放射性与现代物理学

人们认识到原子不再是物质的最基本的不可分割的构造单元,原子内部还有着结构.在所提出的各种图象中,一度占主导地位的是汤姆生模型,即认为原子是由电子和均匀分布的正电荷构成的.1911年卢瑟福认真分析了合作者盖革和马尔斯登关于 α 射线穿透金属箔的实验结果,为了解释约1/100的 α 粒子被反弹回来,他提出原子内部一定有一个又重又小带正电的部分,电子围绕它运动,从而有力地否定了汤姆生的原子模型,为原子物理学建立了一个正确的起点,卢瑟福的原子模型后来被称为“原子的有核模型”.在此基础上,原子的玻尔理论发展起来了.但是,原子核是什么?这个问题使物理学家困惑了近20年.直到1932年查德维克(J.Chadwick)发现中子后才由伊万年柯(Д.Д.Иваненко)和海森伯(W.Heisenberg)先后给出了答案.原子核是由 N 个中子和 Z 个质子组成的,中子和质子统称为核子.原子核的质量数 $A = N + Z$.

还应指出,放射性既然来自原子核内部,它必将携带核内部的信息.实际上原子核物理学

诞生后的那些年代,三种放射性衰变在研究原子核内部的结构、状态和相互作用中起过重要作用,例如许多放射性核的基态自旋和宇称就是由测量相应的 β 衰变的半衰期、电子能谱以及出射电子与 γ 光子的角关联等来确定的.天然放射性核自发放出 α 粒子使人们很早就推断原子核内可能有相当大几率存在类 α 集团结构.1930年泡利(W.Pauli)在给“从事放射性工作的女士们和先生们”的一封信中为解释当时存在的 β 衰变“能量丢失”问题预言了中微子的存在.1957年吴健雄等根据李政道和杨振宁的建议,利用钴60 β 衰变实验证明了弱相互作用中宇称不守恒.以上提到的一些事实仅涉及到原子核物理学,实际上放射性与粒子物理、原子物理、分子物理、固体物理、生物物理、天体物理等也存在密切的联系,此处不再赘述.

三、与放射性有关的当前研究课题

1.放射性衰变的新模式

1896年发现天然放射性后,集中研究的是 α 、 β 、 γ 三种衰变模式.以后又发现了十多种新的衰变模式,如 β^+ (正电子)衰变,直接质子衰变, β^- 缓发单中子、双中子、三中子甚至四中子衰变, β^+ 缓发单质子、双质子、三质子衰变等.有时把自发裂变也看作是一种衰变模式.对这些不同的衰变模式的研究使我们获得了丰富的关于原子核内部结构和运动规律的认识.80年代以来又发现了集团衰变的新模式,就是发射比 α 粒子重得多的中等质量的原子核.第一个观测是1984年在牛津大学完成的.镭223在 α 衰变同时还发射碳14核.近年又发现了发射氧20、氟23、氦24(26)、镁28(30)、硅32(34)等衰变模式.目前这方面的实验和理论研究十分活跃.

2.放射性核束物理

用一定的方法产生放射性原子核束流,经加速后再去轰击稳定的靶核,这是近几年科学家们热衷研究的新领域,其目的是:(1)在实验室中模拟天体中发生的丰富的放射性核反应过程,为研究宇宙演化和星体中核素合成提供可靠的数据.(2)研究远离 β 稳定线原子核的结构

和性质.(3)为寻找已久的超重核“稳定岛”提供新的可能性.

3.探索远离 β 稳定线的新核素

近年来由于新的生成机制和先进的分离、鉴别技术的发展,新核素的发现正在沿核素图 β 稳定线向丰中子和缺中子两侧积极地拓展中,主要在丰中子侧.我国科学家最近取得了很大进展,先后合成了铪185、铂202、汞208(1992年)、钽237(1993年)镆239(1995年).由于产物寿命短、易裂变,实验难度很大.

4.探索超重元素

自然界不存在比铀92还重的元素.必须用各种人工方法合成超重(超铀)元素,见表1.

表1 超重元素研究进展简表

年代	合成方法	原子序数
1940—1955	中子俘获、轻离子反应	93—101
1958—1974	重离子熔合、蒸发反应	102—106
1981—1984	冷熔合技术	104—109
1994	冷熔合技术	110,111

迄今人造的最重元素是111号元素,它是1994年12月德国GSI用铋209与镍64合成的,其半衰期仅为1.5毫秒.108号元素半衰期更短到2微秒,可见是极不稳定的.从60年代起理论家就预言,可能存在以114号元素($Z=114$, $N=184$)为中心的“稳定岛”,范围是 $Z=112—118$,但至今尚未达到.显然111的发现为科学家向“稳定岛”的进军展现了诱人的前景,人类对原子核稳定性的极限必将有更新的认识.

以上简单介绍了当前与放射性有关的基础研究情况.下面转到放射性的应用研究方面.可以说放射性应用研究的历史与放射性发现的历史一样长.据认为,放射性应用范围之广,可与电子学的应用相比,这里仅扼要介绍放射性在工农业生产和医学上的应用.

四、放射性在工农业生产中的应用

放射性的发现同科学上其他重大发现一样引发了一系列新技术的兴起,其中放射性示踪技术和射线技术得到最广泛应用.如果要研究物质中某种元素,可设法加入与这种元素化学

性质相同的放射性同位素,于是可用探测放射性的仪器对这种元素进行动态跟踪和测定,这就是示踪技术。射线技术是把射线与物质发生的各种相互作用,用于测量或控制目的。

放射性在工业上应用的主要成果是:

1.种类繁多的利用放射性的核仪器。例如厚度计用于金属材料、薄膜、纺织品、镀层等厚度的测量;密度计用于矿浆、石油、河水泥沙等密度的测量;放射性同位素火灾预警装置。这些仪器具有不受外界条件变化影响、不破坏被检测物质、检测速度快捷等优点。

2.核测井技术。核测井技术利用射线与物质相互作用的各种效应或利用岩石本身的放射性对地层物理性质及井下技术参数进行探测。目前 γ 测井, γ - γ 测井、中子- γ 测井,核磁测井等广泛应用于石油、煤炭、金属矿的勘探和开发。

3.无损检验产业。无损检验主要指射线探伤,目前应用最广泛的是 γ 探伤,它运用各种探伤仪通过射线照象法;确定工件缺陷的位置及形状。80年代以来,医学射线断层显象技术迅速向工业转移,出现工业CT探伤,使无损检验广泛应用于石油、建筑、铁路、航空等部门。

4.放射性示踪技术使诸如机械磨损、冶金生产等一些生产过程可以得到监控,为改进生产工艺,提高产品质量提供科学依据。

放射性在农业上应用的几个主要领域是:

1.辐射诱变育种。利用各种射线的辐射效应诱发生物体的遗传变异,在较短的时间内获得新的有价值的优良品种。国际原子能机构1992年统计全世界有51个国家开展辐射育种,已在110种植物上育出突变品种1100个。近年来辐射育种的范围在扩大,出现了花卉、药用植物及微生物等辐射育种。

2.辐射防治害虫。辐射处理害虫,使其成为不育或半不育害虫,再让其同自然界中同一类害虫交配,产生的卵不能孵化,使害虫逐年减少以致灭绝。

3.农副产品的辐射储藏和保鲜。利用射线辐照农副产品进行杀虫、灭菌和抑制发芽、延迟后熟,可延长储藏期,减少在贮藏中的霉烂损

失。这种储藏方法不改变农副产品的色、香、味,没有农药污染。

4.放射性示踪技术已用于施肥效果、农药作用、植物生理、畜产质量、农田水利、生物工程等方面的研究。

5.低剂量辐射刺激农作物生长以提高产量。

五、放射性在医学上的应用

1900年瓦克霍夫和吉塞尔第一次报道了人体组织经射线照射后会产生某些生理效应,揭开了放射性在医学上应用的序幕,从此与放射性有关的新技术几乎全都被迅速运用到医学,并逐渐形成了一门新学科——放射医学。放射性促进了医学科学的发展,使医学科学发生了划时代的变化,其主要表现是:

1.基础医学研究的“难题”不断被攻破。通过放射性核素示踪法,基础医学领域已能在生理情况下从分子水平动态地研究体内各种物质的代谢变化,细致地揭示了体内及细胞内代谢的内幕,改变了过去只能在非生理条件下进行实验和获得数据的情况。60年代,与心血管疾病有密切关系的胆固醇生物合成过程基本搞清,全过程40步反应,几乎每一步都是用核素示踪实验阐明的,这个出色的例证表明放射性示踪技术已成为现代医学须臾不可离的“锐利武器”。

2.临床诊断与检验水平不断提高。放射医学仪器不断推陈出新,核素显象朝动态和断层迅速发展。诞生于1951年的扫描机只能对脏器静态显影,成象速度慢。1957年问世的 γ 照相机实现了对脏器快速动态显影把形态和功能结合起来观察。70年代出现的发射型计算机断层装置(ECT)可从不同方向摄取体内放射性核素的分布图,经计算机处理给出核素在体内各截面的分布及立体分布重建图,定位准确,分辨率极高。目前这一装置可分为单光子发射型计算机断层装置(SPECT)和正电子发射型计算机断层装置(PECT)。例如脑功能SPECT显象,不仅可研究脑血流量的变化,也可研究脑代谢,还可获得横切面、冠状面、矢状面或任意剖面的图象,使临床诊断达到将物质代谢、功能形态结

合起来综合观察的新高度。

1959年美国的柏森(S.A. Berson)和雅罗(R.S. Yalow)创建了放射免疫分析法(RIA),并用此法测定了人血浆胰岛素。此法综合了放射性核素分析的精确性、灵敏性和抗原抗体反应的特异性,开创了生物活性物质微量测量技术的新时代。继RIA之后又出现了竞争性蛋白结合分析法(CPBA)、放射酶分析法(REA)、放射受体分析法(RRA)等一组超微量体外分析方法,现将这组分析方法统称为体外放射分析。体外放射分析技术使过去无法测定或很难测定的微量成份准确地测定出来,为一些疑难病症的早期诊断、疗效观察和愈后分析提供可靠的依据。目前利用此法可测定300多种生物活性物质和药物,有人预言此法可测定任何生物活性物质,这充分说明体外放射分析技术是临床检验上的一个重大突破。

3. 医用放射性核素不断更新。医用放射性核素主要用于诊断药物、治疗药物和示踪研究中的“示踪剂”,医用放射性核素总的发展趋势是朝着半衰期更短和特异性更高的目标深入。近年来在医用放射性核素家族中核反应堆生产的长半衰期丰中子的放射性核素所占比例大减,医用加速器和放射性核素发生器所生产的 β^+ 辐射和电子俘获等短半衰期核素的比例激

增。由于医用放射性核素数量、品种的增加,人体重要脏器几乎已全部都能用放射性核素显影。

从贝克勒尔和居里夫人的年代发展到今天,由于把放射性的原理和技术应用到医学各领域,配合其他高新技术,已使医学的许多部分从病因、病理到预防、诊断与治疗发生了深刻变化。此外,由于现代医学越来越深入到分子水平上,这必将为放射性的医学应用带来更光辉的前景。

六、结束语

100年前放射性的发现,以及X射线和电子的发现,为现代物理学革命奠定了实验基础,加之相对论和量子论所建立的理论基础,使现代物理学在本世纪有了突飞猛进的发展,使人类对整个物质世界的认识有了长足的进步,这种认识的深刻程度以及它对科学技术乃至人类社会所起的作用可以说超过人类数千年文明史的总和。我们有理由相信,放射性100年从一个侧面向我们展示出的物理学的强大生命力,不但不会随着本世纪的结束而消失,相反,物理学自身的发展将会以新的形式和新的内涵实现实质性的飞跃,物理学的概念和方法仍将是众多学科赖以发展的重要因素,未来技术进步仍将极大地依靠物理学和相关学科的发展,当代物理学家将继续往开来豪迈地迎接21世纪的挑战。

科苑快讯

美国科学家利用等离子体处理废料

丹尼尔·科恩及其同事们在美国麻省理工学院的实验室和试验研究用焚化炉中使用一种“热”等离子体将能源部各装置所产生的废料(包括泥土、金属、易燃材料和残渣)熔化成熔岩状液体。实验时他们使电流从充氮气体室的石墨电极和石墨炉床之间通过,产生出摄氏10000度的电弧等离子体,所产生的液体会固化成一种稳定的黑色玻璃,能够安全储藏,甚至可用作建筑材料

(当然是对非放射性废料而言)。

科恩小组认定上述过程不会产生有毒灰烬,事实上没有产生二恶英,所放出的气体也比采用通常焚烧技术时要少,当然他们并未对这些副产品进行过测量。

在汉福德废料储藏库,科恩小组利用“冷”(室温)电子束产生的等离子体有选择地作用于低含量四氯化碳分子,使其分裂为不太稳定的化合物,并最终分解为二氧化碳、稳定的盐、水和少量的一氧化碳。

(爱民 编译自《Physics Today》1995年第6期第9页)