

核物理与核探测、核分析技术的应用^{*}

李湘庆 叶沿林[†]

(北京大学物理学院 核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

摘要 文章概要介绍了随着核物理研究发展起来的辐射和粒子探测的原理、方法和主要技术,举例介绍了相关核物理与核探测、核分析的典型技术及其在高精度测量和医学中的广泛应用,如活化分析技术、穆斯堡尔谱学、核磁共振技术、加速器质谱技术、核医学成像、同步辐射技术、中子散射分析、放射性示踪技术等等。

关键词 核物理,核探测,核分析技术,辐射,粒子探测

Nuclear physics, and nuclear detection and analysis technology

LI Xiang-Qing YE Yan-Lin[†]

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract We present a brief review of the principle, methods and main techniques of radiation and particle detection, which have developed along with the advances in nuclear physics. Some important and typical applications of nuclear physics, nuclear detection and nuclear analysis technology are reviewed, such as particle activation analysis, Mössbauer spectroscopy, nuclear magnetic resonance, accelerator mass spectroscopy, nuclear medicine imaging, synchrotron radiation technology, neutron scattering analysis, radioactive tracing, and so on.

Keywords nuclear physics, nuclear detection, nuclear analysis technology, radiation, particle detection

1 引言

人类认识和变革自然,离不开各种与自然界对话的手段,那就是天然的或人工的各种探针(probe)。在漫长的进化过程中,人类与环境的相互作用促成了人体五官的发达。而人类感官的功能又受限于人体生物大分子和细胞的物质密度、结构、相互作用性质等,人类感官能够直接感知的光波段、声波段、化学成分等都必然与日常生活(也就是所谓宏观现象)息息相关。随着社会的进步,人类开始利用各种工具与自然界对话,能力在不断提高。人们对微小事物的观察,起初主要依靠光学放大镜或显微镜,它使得人们可以了解微米(10^{-6} m)尺度上物质的结构和变化。各种类型的电子显微镜的出现,将人们观察微小物质的能力推进到纳米(10^{-9} m)量级,也就是可以达到原子尺度。

1896年贝可勒尔(Becquerel)发现天然放射性

(见图1),这是人类首次认识核现象,从此诞生了一个新的科学领域——原子核物理^[1]。1911年卢瑟福(Rutherford)利用天然 α 射线轰击各种原子,从射线偏折的分析确立了原子的核式结构模型,并且了解到原子核的空间尺度大约为 10^{-14} m,比原子的空间尺度小4—5个量级。显然,人类与原子核的对话,需要全新的手段。有趣的是,自然界给微观世界赋予了量子化的运动规律,在这里,波动性和粒子性相辅相成,通过普朗克常数关联起来(波长 λ 乘以动量 p 等于普朗克常数 h)。以日常的经验,似乎越微小的对象信号越微弱。实际上按照量子规律,空间范围越小,涉及的能量或动量变化越大。比如在原子核尺度(10^{-14} m)上的变化,涉及的能量释放或吸收通常在兆电子伏(MeV)以上,比原子尺度上的变化要剧烈得多,大大超出了日常可以感知的范围。这也是人类

^{*} 国家自然科学基金(批准号:11035001, 10875002)资助项目
2011-02-14收到

[†] 通讯联系人, Email: yeyl@pku.edu.cn

直到一百多年前才感知核现象的原因。

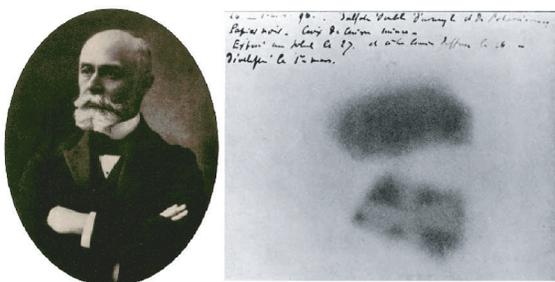


图1 贝可勒尔(左图)和他发现的放射性物质的底片(右图)

在发现核现象的初期,人们主要依靠天然放射性矿物质提供的射线去探索核现象.比如1919年卢瑟福等人用天然 α 射线轰击氮核时释放出质子,首次实现人工核反应,发现了原子核内部的质子.但是用天然射线源能够提供的手段非常有限,于是从上世纪30年代开始,粒子加速器应运而生,用人工方式产生了丰富多样的核探针.与此同时,为了探测各种射线和核反应的产物,建立了一系列能辨别射线种类以及能给出它们的时间、空间、能量、动量等信息的探测设备,其复杂性和精密程度不断提高,核探测技术和方法已经成为核科学研究和应用的核心环节之一^[2].

核探测技术就是研究和利用射线与物质相互作用的技术.核探测往往涉及大型仪器设备的研制,其本身又是材料、物理、机械、真空、电子、计算机、自动控制、成像等多种学科和技术的综合,充分体现了多种学科交叉的特点,是当代重要的高技术之一.现代很多科学技术成就的取得都与射线的产生和探测直接相关^[3].仅以诺贝尔奖为例,1931年美国科学家劳伦斯(Lawrence)发明的回旋加速器获得了1939年诺贝尔物理学奖;1932年英国科学家柯克罗夫特(Cockcroft)和爱尔兰科学家沃尔顿(Walton)建造了世界上第一台高压倍压加速器,以能量为0.4MeV的质子束轰击锂靶得到2个氦原子核(α 粒子),完成了历史上首次人工加速粒子实现的核反应,获1951年诺贝尔物理学奖;此外还有八项诺贝尔物理学奖和化学奖是利用加速器进行实验而获得的.在探测技术方面,英国科学家威尔逊(Wilson)因发明云室而与康普顿(Compton)共同分享了1927年的诺贝尔物理学奖;其后英国科学家布莱克特(Blackett)因改进威尔逊云室实现自动曝光而获得1948年诺贝尔物理学奖;英国科学家鲍威尔(Powell)发明照相乳胶法并用其发现 π 介子而获得1950年诺贝尔物理学奖;之后美国科学家格拉泽(Glaser)因发明气泡室使粒子探测效率提高1000倍而获得1960年诺贝尔物理学奖;美国科

学家阿尔瓦雷兹(Alvarez)因发展氢气泡室并用其发现共振态粒子而获得1968年诺贝尔物理学奖;法国科学家夏帕克(Charpak)因发明多丝正比室和漂移室而获得1992年诺贝尔物理学奖.在核分析方法方面,1948年美国科学家利比(Libby)因创立放射性 ^{14}C 测年方法而获得了1960年诺贝尔化学奖;德国科学家穆斯堡尔(Mössbauer)因发现穆斯堡尔效应而获得1961年诺贝尔物理学奖;加拿大科学家布罗克豪斯(Brockhouse)和美国科学家沙尔(Schull)因发展了中子散射技术而共同分享了1994年诺贝尔物理学奖.

本文首先介绍核探测、核分析的物理与技术基础,然后例举若干重要的应用.

2 核探测、核分析的物理与技术基础^[2]

2.1 射线和粒子束与物质的相互作用规律

射线和粒子信息的获取主要依赖于射线和粒子与探测介质的相互作用.射线和粒子在介质中被散射或吸收,其能量逐步损失,引起介质发生电离、激发、发射次级射线和粒子等物理效应,这些效应随即被转化为可记录的光电信号.射线和粒子束与物质相互作用的探测研究已经蓬勃发展了近百年,目前所研究的射线和粒子束的范围已由开始时较为单一的、由自发辐射产生的 α 粒子、 β 射线(快速电子流)及 γ 射线,扩充到由天然或加速器产生的各种能量、不同核素的离子束、中子束,以及团簇离子束及其反应产物.这些研究为研制核探测器、防护辐射危害、开展各种核技术应用工作奠定了基础,并提供了大量核结构的信息.

光子和电子与材料的相互作用,比较早就得到较充分的研究.对于较重的带电粒子与介质的相互作用,早在20世纪初,玻尔(Bohr)基于经典力学的两体碰撞,提出了计算能量损失的理论方法.30年代贝特(Bethe)和布洛赫(Bloch)通过量子力学玻恩(Born)近似,提出了关于阻止本领的贝特-布洛赫(Bethe - Block)公式.60年代中期,林哈德(Lindhard)等人提出了离子射程的LSS理论(即由Lindhard, Scharff, Schiott 3人提出的理论)及有关低速重离子在物质中的阻止本领的概念,从而建立了比较完备的关于离子在物质中的射程及能损的理论体系.在80年代,齐格勒(Ziegler)等人提出了新的有关原子间相互作用普适势的概念,编制出著名

的模拟离子在固体中能量损失及射程的 TRIM 程序. 另外, 在 50 年代, 实验发现了带电粒子在晶体中的沟道效应并随后由林哈德(Lindhard)等人建立了相应的理论模型. 60 年代末期, 西格蒙德(Sigmund)由级联碰撞理论提出了元素靶在离子轰击下的溅射公式. 这些基础理论研究工作的成果为带电粒子束技术(如离子溅射、离子注入和离子束分析等)的发展和应用奠定了重要的基础. 在粒子探测技术不断发展的同时, 粒子束材料改性和辐照损伤的研究也在不断发展和深化, 如强流粒子束及团簇离子束技术的出现促进了非线性辐照损伤研究热潮的兴起, 低能离子注入及离子束辅助沉积技术的发展促进了新材料制备等.

中子与物质的相互作用(如散射、慢化、裂变、扩散和辐射俘获等)对于反应堆技术至关重要. 近年来, 随着中子散射技术的发展, 中子在晶体和液体等物质中的散射、衍射等也得到了充分的应用, 为生命科学等领域的研究提供了新手段.

2.2 粒子加速器技术^[4]

自 20 世纪 30 年代初开始, 高压倍加器、静电加速器、直线加速器、回旋加速器等陆续发展起来. 40 年代后, 自动稳相原理的提出和射频技术的创新, 使加速器能量上限突破技术有了极大的发展, 从而推动了新一代中高能加速器的建造; 同步加速器也迅速发展起来, 并成为高能加速器的主流类型. 对撞机原理的提出, 极大地拓展了高能物理的实验能区. 70 年代以来, 美、欧、日本、中国相继建造了一批大型对撞机. 欧洲核子中心(CERN)80 年代末建造的大型正负电子对撞机(LEP)横跨法国和瑞士两国, 轨道周长约 27 公里; 近年来, LEP 再发展为质子对撞机, 设计质心能量达到 $2 \times 7 \text{ TeV}$ ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). 随着重离子物理研究和放射性核束物理研究的兴起, 大型串列静电加速器、等时性回旋加速器、重离子直线加速器等也相继发展起来. 近年来, 为满足加速器驱动洁净核能系统和散裂中子源的需要, 强流中能($\sim 1 \text{ GeV}$)质子直线加速器的建造已成为热点.

另一方面, 加速器技术在多学科研究、国民经济、医学、国防等方面也得到了日益广泛的应用^[3]. 此类加速器多数工作在低能区($< 100 \text{ MeV}$), 如用于离子束分析的静电加速器, 用于离子注入的高压倍加器, 用于放射性药物生产的回旋加速器, 用于辐照加工的高频高压加速器和绝缘芯变压器加速器, 用于放疗和探伤的电子直线加速器和电子感应加速

器, 用于核爆模拟及闪光照相的强脉冲加速器和感应直线加速器等. 这些加速器通常要求有较高的输出流强和输出功率, 有的还要求能对粒子束的能量进行精确调节. 近年来, 同步辐射作为新型光源得到了迅速发展. 我国在上海浦东建造了一台第三代同步辐射光源.

2.3 核探测技术

核探测技术是高能物理及核物理实验研究必不可少的基础, 也是核技术应用的重要支撑. 从本质上讲, 探测器是一种物理量转换仪器, 它可将辐射(粒子束)的能量通过与工作介质的相互作用转化为光电信号, 再由仪器记录和分析. 通常的核探测器主要包括气体探测器(利用射线或粒子束在气体介质中的电离效应进行探测)、闪烁体探测器(利用射线或粒子束在闪烁体中的发光效应进行探测)及半导体探测器(利用射线或粒子束在半导体介质中产生的电子空穴对来进行探测). 气体探测器最早得到大规模发展. 20 世纪 50 年代以后, 气体探测器在很多场合逐渐被闪烁探测器和半导体探测器取代, 但气体探测器因其独特的性能仍在继续发展和使用, 特别是 70 年代以来在高能物理实验中又获得了广泛应用. 闪烁体探测器近年来发展很快, 并在核物理、高能物理和核医学成像等方面得到了广泛应用. 上世纪 60 年代以来, 随着半导体工业的兴起, 半导体探测器也迅速发展起来. 半导体探测器有能量分辨本领好、线性范围宽、体积小、集成度高等优势, 随着加工成本的不断降低, 其应用领域正在不断扩大, 但辐照损伤和较短的寿命仍然是其弱点. 针对中子辐射的特殊性, 人们发展了专门的中子探测器. 在大型粒子物理实验及矿物学、地学等研究领域, 核径迹探测器也发挥着重要的作用. 随着材料科学、计算机技术及成像技术的飞速发展, 核探测技术也在迅猛发展之中. 在以前用于带电粒子探测的半导体探测器中, 其材料基本都是单晶 Si 和 Ge(Li)(包括高纯 Ge), 目前 CdZnTe, GaAs 以及 a-Se 等新材料发展势头非常好. 在无机及有机闪烁体中, 也不断出现新的性能更好的材料. 微结构气体探测器开始与半导体探测器形成竞争, 基于气体电子倍增(GEM)的探测器等也开始出现.

2.4 其他支撑技术

核电子学是对电信号进行放大、成形、甄别、排序、逻辑处理、数字转换等的专用电子技术和器件. 由于探测器的精度、记录速度和通道数等的快速发展, 对核电子学的精度、速度、集成度、同步控制等的

要求越来越高,最新的发展是采用高精度和高集成度的 ASIC 芯片技术以及新的总线标准等。

探测速度和数据量的极大提高,使得高速和大容量的电子计算机在核探测中必不可少。在数据记录的同时,适时快速的分析和图像显示也是极其重要的,相应的软件也得到规模化发展和应用。

3 核探测、核分析的应用^[3]

3.1 在高精度测量中的应用

各种射线和粒子束与物质相互作用会使入射的初级射线和粒子的状态或参数发生变化,在有些情况下还会产生次级射线和次级粒子。这些变化和次级发射在很大程度上取决于靶物质本身的组成、结构和特性。因此,观察入射和出射射线的变化,可用于了解靶材料的成分、元素含量等等。通常我们将这类技术统称为核分析技术。核分析技术主要包括活化分析技术、离子束分析技术和超精细相互作用核分析技术三大类。

开始于 1936 年的活化分析技术是最早发展的核分析技术,是检测荷能中子束或带电粒子束轰击试样所产生的缓发辐射。其中中子活化分析灵敏度高,精度好,业已在生命科学、环境科学和地学的元素分析中得到广泛应用,近年来更是发展了分子活化分析和体内活化分析技术。离子束分析技术开始于 20 世纪 60 年代末,主要有核反应分析(NRA)、背散射(RBS)、质子激发 X 射线荧光发射(PIXE)和沟道效应等方法,在凝聚态物理和材料科学中有广泛应用。利用微束进行扫描分析,进一步将应用领域扩展到生命科学和环境科学等领域。超精细相互作用核分析技术则是基于各种选择性很强的精细核效应的分析,如穆斯堡尔效应、核磁共振效应、扰动角关联效应、正电子湮灭效应和中子散射技术等。

穆斯堡尔效应又称为无反冲 γ 射线共振吸收现象,是 1955 年德国年轻的物理学家穆斯堡尔(Mössbauer)在做博士论文的实验中发现的(见图 2)。因这种效应具有极高的能量分辨本领(一般可测出原子核能级 $10^{-13} \sim 10^{-16}$ eV 的能量变动)而迅速得到普遍应用,形成了一门新的学科——穆斯堡尔谱学。目前已在 44 种元素、85 种同位素中观察到穆斯堡尔效应。因为许多物质中的铁含量很高, ^{57}Fe 的 14.4keV 的穆斯堡尔效应应用最广泛。共振吸收是物理学中的普遍现象,可以设想原子核的 γ 辐射也应有共振吸收现象,然而在相当时期内却



图 2 穆斯堡尔(左图)和穆斯堡尔光谱仪(右图)

观察不到,究其原因是由原子核辐射 γ 光子时的反冲引起的。核能级 γ 跃迁遵从能量守恒,跃迁的能量差 ΔE 等于 γ 光子的能量 E_γ 与核受到的反冲的动能 E_R 之和,即 $\Delta E = E_\gamma + E_R$,其中 $E_\gamma \gg E_R$ 。此外它还遵从动量守恒,反冲核的动量 P_R 与 γ 光子的动量 P_γ 在数量上相等,即 $P_R = P_\gamma = E_\gamma/c$,因此反冲核的动能

$$E_R = \frac{P_R^2}{2M_R} = \frac{E_\gamma^2}{2M_R c^2} \approx \frac{(\Delta E)^2}{2M_R c^2},$$

这里 M_R 是反冲核的质量。因此,考虑了核反冲, γ 跃迁中发射的 γ 光子的能量比 ΔE 小 E_R ,同理,核吸收 γ 光子时,也会发生反冲,核获得同样大的反冲动能,入射光子的能量应比 ΔE 大 E_R 。于是对于同一激发态与基态之间跃迁的 γ 射线发射谱线与吸收谱线的能量差为 $2E_R$ 。另一方面,谱线具有一定的宽度。谱线的自然宽度 Γ 可根据测不准关系由能级寿命 τ 确定, $\Gamma \sim \hbar/\tau$ 。对于核辐射 γ 射线而言,核能级差 ΔE 很大,从而通常情况下 $2E_R \gg \Gamma$,发射谱线和吸收谱线相隔很远,两者没有重叠部分,自然状态观察不到 γ 射线的共振吸收现象。穆斯堡尔想到一种消除反冲的非常简单也非常有效的办法。他将发射和吸收 γ 射线的核置于固体晶格中,使它们受到固体晶格的束缚而成为一个整体,并将发射源和吸收体置于低温下,以减少热运动的干扰,这样受到反冲的就不是单个原子核,而是整块固体。由于固体质量相对很大,于是 $E_R \approx 0$,从而可有效地观察到无反冲 γ 射线的共振吸收现象。入射的 γ 射线称为穆斯堡尔辐射,能实现无反冲共振吸收的原子称为穆斯堡尔原子。一般通过发射源的机械转动就可以精确改变所发射的 γ 光子的能量,与穆斯堡尔原子核跃迁能量相同的 γ 光子很明显地被共振吸收,而能量相差较大的 γ 光子则不被共振吸收。因此在以发射源速度为坐标轴的吸收谱上,就可以找到被吸收的 γ 光子的能量位置和宽度分布,这种谱就称为穆斯堡尔谱。由于 γ 射线谱具有很高的能量,谱线宽度却非常窄, γ 射线谱的相对谱线宽度 Γ/E_γ 非常小(例

如,对于 ^{57}Fe , $E_\gamma = 14.4\text{keV}$, $\Gamma = 4.6 \times 10^{-9}\text{eV}$, $\Gamma/E_\gamma = 3.2 \times 10^{-13}$),也就是说,穆斯堡尔谱具有极高的能量分辨率.由它可以测定核能级的自然宽度,直接观测核能级的超精细结构,以及用来验证引力红移等广义相对论效应.穆斯堡尔效应还可作为研究原子核周围环境的灵敏探针,它所提供的微观信息在物理、化学、生物、地质和冶金等学科得到了广泛的应用.

核磁共振效应是指核的磁矩与外磁场相互作用引起能级分裂和共振吸收效应.具有自旋的核都有磁矩,当它们置于恒定的外磁场中时,核磁矩和外磁场相互作用使核磁矩有不同的排列,以自旋量子数为 $1/2$ 为例,有两种取向.当核吸收符合能级差的能量时,就会发生能级跃迁,同时形成核磁共振信号.每个原子核外的电子以及化学环境不同,使得每个原子核实际受到的外加磁场强度也略有不同,每个原子核吸收的射频频率也不同,因此,核磁信号出现在谱图中不同频率的位置.1930年,物理学家拉比(Rabi)发现原子核会在磁场中发生有序重排,而施加无线电波时,原子核的自旋会发生翻转,这是关于原子核与磁场相互作用的最早认识.拉比因此获得了1944年的诺贝尔物理学奖.1946年,布洛赫(Bloch)与珀塞尔(Purcell)两个小组几乎同时发现了具有奇数个核子的原子核置于磁场并施加以特定频率的射频场时,会发生原子核吸收射频场能量的现象,这就是核磁共振现象的发现.这两位科学家分享了1952年的诺贝尔物理学奖.核磁现象被发现后,很快被应用到了实际的科学研究中.除了研究原子核的磁矩、电四极矩以及自旋等,化学家还利用核磁共振来研究分子的结构(主要是观察分子中氢原子周围磁场).到了50年代后期,就有了商用核磁共振谱仪.70年代,脉冲傅里叶变换核磁共振谱仪出现了.随着谱仪的不断改进和发展,核磁共振用来测定材料成分和结构分析的精度更高,对样品限制更少,核磁共振实验方法也得到迅速的发展.欧内斯特(Ernst)在发展二维核磁共振波谱方面的突出贡献,以及维特里希(Wuthrich)在解析分子结构方面做出的突出贡献,使他们分别获得了1991年和2002年的诺贝尔化学奖.1973年,劳特伯(Lauterbur)发表了关于核磁共振成像实验的结果,立刻引起了广泛的关注,使核磁共振应用到了医学,短短10年的时间就进入了临床应用(见图3).2003年,劳特伯和曼斯菲尔(Mansfield)分享了诺贝尔生理学或医学奖.在核磁共振技术发展过程中,每一次重大的突破

和新的应用都得到了诺贝尔奖的肯定,这样的发展历史,充分说明了核磁共振技术在科学技术发展中的重要地位和价值.

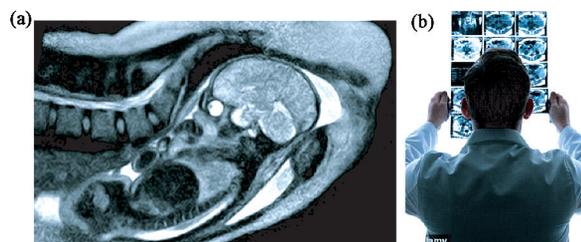


图3 (a)德国柏林沙里特医院为婴儿降生过程拍摄的核磁共振图像;(b)医生在查看核磁共振成像图片

耦合常数是除了化学位移外核磁共振谱提供的另一个重要信息.常用的J耦合是指原子核与原子核之间通过化学键的作用,使得原子核的进动频率分裂为以原来频率为中心的多重吸收峰.造成这种分裂的直接原因就是分子中原子的链接方式,因此它可以提供分子结构方面的很多信息.结构生物学是通过研究生物大分子结构、动力学以及功能的关系来阐释生命现象的科学,是目前生命科学的前沿和热点领域.核磁共振波谱学是继X射线晶体衍射技术后,第二种能够测定高精度蛋白质三维结构的技术.它的技术特点是蛋白质分子处于近似生理环境的溶液条件,并且可以非常有效地研究蛋白质分子等的动力学特征.

核磁共振成像(MRI)是核磁共振在医学领域中的应用,是继计算机断层(CT)后医学影像学的又一重大进步.人体内含有非常丰富水,不同的组织和部位含水量也不同.如果能够探测到这些水的分布信息,就能够绘制出一幅比较完整的人体内部结构图像.核磁共振成像技术就是通过识别水分子中氢原子信号的分布来推测水分子在人体内的分布,进而探测人体内部结构的技术.实际使用时,将人体置于特殊的磁场中,用无线电射频脉冲激发人体内氢原子核共振,并吸收能量,在停止脉冲后,氢原子核按特定频率发出信号,并将吸收的能量释放出来,被体外的接收器收录,经计算机处理获得图像.这是一种非介入探测技术,相对于X射线透视技术和放射造影技术,核磁共振成像对人体没有辐射影响;相对于超声探测技术,核磁共振成像更加清晰,能够显示更多细节;此外相对于其他成像技术,核磁共振成像不仅仅能够显示有形的实体病变,而且还能够对脑、心、肝等功能性反应进行精确的判断.由于具有安全快速准确的优点,在医学诊断方面,核磁共振成像技术发挥着重要的作用.

核分析技术对许多学科的发展起过重要的推动作用。例如计算机科学与技术、信息工程的发展是以大规模集成电路的发展和改进为硬件支持的,背散射分析成为半导体工业最常用、最便利的分析手段。在高温超导材料的研究中,1987年首先发现的超导体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 的分子式和分子结构就是用中子衍射的方法确定的。根据中子衍射显示的微结构,人们正确地解释了铜氧面和铜氧链在超导机制中的作用。此后,离子束分析技术应用于高温超导薄膜的无损测试,为优化成膜条件提供了非常有价值的数据和资料。又如在生物大分子的研究中,同步辐射技术和中子散射技术都是十分有效的研究手段。40年代末在电子同步加速器上观察到的同步辐射,具有波长范围宽且可调、不含任何杂质污染、亮度高、准直性好、张角非常小、完全线偏振、时间分辨率好等优点,是形貌分析、微区分析、表面分析、动态分析的强有力工具。反应堆或加速器散裂中子源提供的中子束,则是研究众多材料和生物结构等的有效手段。近几十年发展起来的环境科学,对大气、土壤、水质和粉尘的测试分析都要求很高的精确度,中子活化分析则是常用分析手段。图4为用X射线和中子散射观察到的含水大分子的结构比较,可以看出,中子射线相对于X射线具有较高的分辨率。

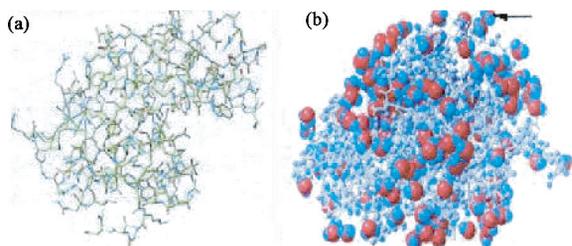


图4 (a)用X射线观察到的含水大分子的结构;(b)用中子散射观察到的含水大分子的结构

3.2 在医学中的应用

射线和粒子束技术在医学中的应用主要有两个方面:一个是核医学成像,另一个是肿瘤的放射治疗。核医学成像技术包括单光子发射断层成像(SPECT)和正电子断层成像(PET)。

SPECT是利用放射性同位素作为示踪剂,将这种示踪剂注入人体内,使该示踪剂浓聚在被测脏器上,从而使该脏器成为 γ 射线源,在体外用绕人体旋转的探测器记录脏器组织中放射性的分布,探测器旋转一个角度可得到一组数据,旋转一周可得到若干组数据,根据这些数据可以建立一系列断层平面图像,计算机则以横截面的方式重建成像。

PET则是用一种通过发射正电子而衰变的同

位素(如 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O 和 ^{18}F)来示踪的。正电子发射体所发出的正电子在极短时间内与人体组织中的自由负电子作用,产生湮灭辐射,转变为511keV的2个同时发射、方向相反的 γ 光子,并且被2个相对的探测器所探测,通过快符合电路(分辨率 $<10^{-8}\text{s}$)被记录下来,然后用计算机进行图像重建,再现衰变同位素的分布。

核医学成像技术不同于X射线断层成像(CT)、核磁共振成像(MRI)和超声波成像,在显像之前必须注射相应的放射性药物作为显像剂,其影像反映的是显像剂及其代谢产物的时间和空间分布。核医学成像技术是目前唯一能在体外获得活体中发生的生物化学反应、器官的生理学和病理学变化以及细胞活动信息的方法,可为疾病诊断提供分子水平的信息。SPECT和PET成像的优点是特异性好,能够用于早期诊断;其缺点是空间分辨率差,病理和周围组织的相互关系很难准确定位。把核医学成像叠加在诸如X-CT成像、MRI高分辨率结构图像上进行定位是目前比较流行的方法。

肿瘤的放射治疗是目前肿瘤临床治疗的三大技术之一。目前的放疗技术从使用的射线束看,可分为低传能线密度(LET)放疗和高传能线密度放疗。前者包括X射线、 γ 射线以及质子放疗,后者则包括中子和重离子放疗。放疗的主要装置是粒子加速器和 ^{60}Co 源。放疗的一个重要问题是如何在准确地杀死癌细胞的同时,保护正常组织不受或者少受伤害。对于形状不规则的肿瘤,如神经胶质瘤,硼中子俘获治疗(BNCT)可达到较好的效果。图5为射线和粒子束在医学中的应用情况。

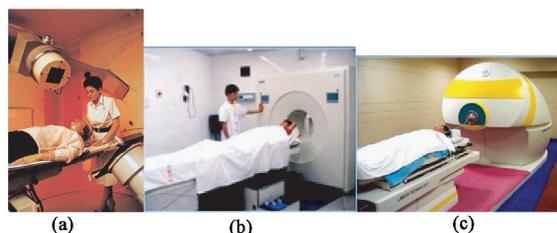


图5 射线和粒子束技术在医学中的应用 (a)X射线断层成像(CT);(b)正电子断层成像(PET);(c)硼中子俘获治疗(BNCT)

长期以来,常规放疗采用电子束、X射线和 γ 射线等轻粒子射线,它们在治疗某些肿瘤时表现出较好的疗效,但由于它们物理和生物特性的缺陷,在杀死癌细胞的同时,周围健康组织也受到较大损伤,造成了明显副作用,甚至出现一些并发症。这是因为轻粒子射线进入人体后,剂量主要损失在浅层,随着射程增大而逐渐减小,到达病灶时,剂量已经不足以治

疗肿瘤. 随着科学技术的发展, 人们发现, 重离子束在人体中的剂量损失集中于射程末端, 并且重离子束还具有高的相对生物学效应. 在利用重离子这两个特性进行治癌时, 与常规轻粒子放疗相比, 具有突出的优点. 德国重离子研究中心(GSI)对颅底瘤的治愈率达到 85%—100% 的高水平. 重离子治癌在国际上誉为 21 世纪最理想的放疗方法, 引起许多国家政府和相关领域科学家的重视. 中国科学院兰州近代物理研究所建成了国内首台重离子浅层治癌装置(见图 6), 使我国成为继美国、日本、德国之后世界上第 4 个可以开展浅层肿瘤临床治疗实验研究的国家.

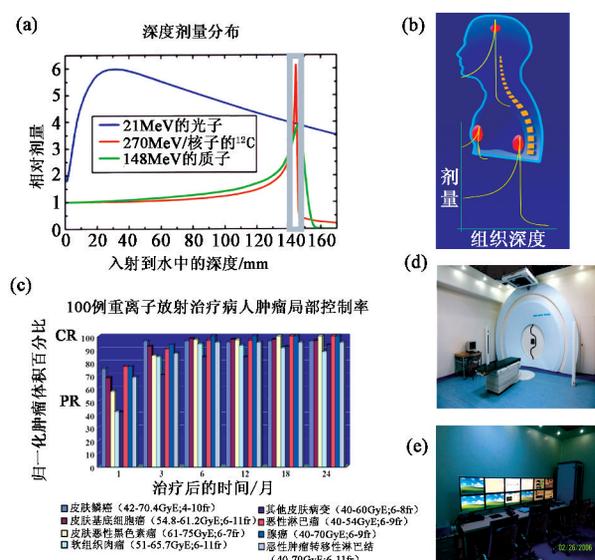


图 6 中国科学院兰州近代物理研究所建成的国内首台重离子浅层治癌装置 (a) 不同能量的粒子入射到水中的深度和剂量分布关系; (b) 不同能量的重离子入射到人体组织内的深度与剂量分布关系; (c) 100 例重离子放射治疗病人肿瘤局部控制率(图中 PR 为生存率, CR 为控制率, GyE 为等效生物剂量戈瑞, fr 为放射治疗次数); (d) 治疗室; (e) 治疗控制室

3.3 核探测、核分析技术的新领域——放射性核素技术及其应用

3.3.1 放射性核素测年

基于衰变规律的 ^{14}C 测年方法是在过去数万年时间范围内最精确的测年方法, 它使地质学和考古学从基于地层序列的相对年代研究进入到了绝对年代研究. ^{14}C 测年方法的优点有: (1) 测量范围广, 可测定 1000—50000 年内的考古样品; (2) 样品易得, 凡是含碳的骨头、木质器具、焦炭木或其他无机遗留物均可; (3) 对样品要求不严, 埋藏条件不要求, 取样也很简单.

加速器质谱测年技术 (accelerator mass spec-

trometry, AMS) 与 ^{14}C 测年方法原理相同, 只是以对 ^{14}C 原子计数代替对 β 粒子的计数. AMS 是加速器技术、质谱技术和探测鉴别技术的产物, 具有显著的优点. 首先, AMS 所需样品量少, 一般几毫克就足够了; 第二, 精确度高, 灵敏度可达 10^{-5} — 10^{-6} , 误差能达到不超过 0.3% (± 18 年); 第三, 测定年代可扩展到 7.5—10 万年; 第四, 测量时间短, 一般几十分钟就可测试一个样品. 还有, AMS 不受环境影响, 不像 β 计数要考虑宇宙射线等. 加速器质谱测年技术自问世以来, 广泛应用于考古学、古人类学、地质学、物理学、天体物理学、环境科学、生物医学等领域. 加速器质谱方法的高灵敏度还使利用其他宇宙成因核素进行衰变法测年成为可能. 例如, 利用 ^{10}Be 和 ^{26}Al 可以测量岩石的暴露年龄与侵蚀速率, 以及陨石的暴露年龄和居地年龄等.

放射性核素测年技术在很多情况下可以发挥十分关键的作用. 以考古学为例, 耶稣裹尸布之谜、阿尔卑斯山冰人年代均是由加速器质谱 ^{14}C 测年给出最可靠的答案. 在我国的夏商周断代工程中, 加速器质谱 ^{14}C 测年为夏商周年代框架的建立做出了关键性的贡献. 周口店北京猿人的年龄, 则是用核裂变径迹法测定的.

3.3.2 放射性核素示踪

放射性核素示踪技术具有灵敏度高, 方法简便, 不受环境与化学因素影响, 便于射线探测和揭示原子、分子的运动规律等优点, 在各种学科的研究中得到广泛的应用. 在地球科学和环境科学的示踪研究中, 通常采用自然界中存在的放射性核素. 例如中国石油工业广泛采用放射性示踪微球等来测绘注水井吸水剖面, 为评价地层, 改造地层, 调整注水量的分配, 实现石油的增产和稳产作出了贡献. 氯碱厂利用 ^{197}Hg 测量电解槽中使用汞的准确含量, 无需停产, 就可减少汞蒸汽逸入环境造成环境污染. 利用 ^{10}Be 示踪火山岩浆的来源, 从而验证板块俯冲理论, 利用 ^{14}C 研究全球各大洋的洋流循环模式, 利用 ^{36}Cl 示踪地下水的渗透率等, 利用 ^{129}I 示踪核泄露已成为当前进行核核查的重要手段. 在化学、生物与医学的示踪研究中, 由于放射性物质用量可以少至生物剂量水平, 不干扰体内生理过程及其平衡状态, 此法不仅能定量测得代谢物质的转移和变化, 而且可以确定组织器官中的定量分布及细胞水平的定位, 故多采用放射性核素标记化合物的方法, 最常用的标记化合物有 ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{125}I , ^{131}I 等. 示踪技术在化学反应动力学、生物大分子结构与功能关系、蛋白质

生物合成、药物代谢动力学等研究中都是十分有效的研究手段. DNA 碱基排列和遗传密码的关系就是借助于 ^{32}P 示踪方法揭示的. 可以说, 如果没有放射性核素示踪技术, 就不会有今天的生物基因工程. 示踪技术也可以应用于工业和农业. 例如, 在轴承中渗入 ^{85}Kr 可获得磨损的信息. 利用示踪技术还可以研究微量元素在农作物中的分布、迁移和转化规律, 化肥和农药的损失及其在土壤中的残留, 以及水土流失、草场退化等农业生态环境问题. 如使用 ^{32}P , ^{15}N 对水稻进行磷肥和氮肥的吸水研究, 以 ^{35}S 示踪的农药观察对作物的药效. 近年来加速器质谱计成为示踪核素测量的新手段, 使示踪灵敏度得到极大的提高, 开拓了示踪研究的范围. 例如, 研究用 ^{14}C 标记的基因毒性物质和 DNA、组蛋白的加合及其加合物的体内代谢, 现在用加速器质谱计可以在环境剂量的水平下进行, 其灵敏度可达 $5 \times 10^{-17} \text{ mol/mg}$ 蛋白质.

4 结束语

原子核物理学的诞生, 不仅深化了人类对自然

界的认识, 同时也大大发展了人类与微观世界对话的实验手段, 这些手段又在日常生产生活中得到广泛的应用, 从而促进了社会发展. 在辐射和粒子探测中发展起来的活化分析技术、穆斯堡尔谱学、核磁共振技术、加速器质谱技术、核医学成像、同步辐射技术、中子散射分析、放射性示踪技术等, 都是核物理与核探测、核分析技术的典型代表. 随着新兴核探测手段和方法的发展, 这样的应用还会大量涌现, 造福人类.

参考文献

- [1] 卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理(修订版). 北京: 原子能出版社, 2000
- [2] Leroy C, Rancoita P G. Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection(2nd edition). Singapore: World Scientific Publishing Co., 2009
- [3] 刘洪涛, 郑春开, 姚淑德等. 人类生存发展与核科学. 北京: 北京大学出版社, 2001
- [4] 郭之虞, 王宇钢, 包尚联. 北京大学学报(自然科学版)增刊: 北大物理 90 周年专辑, 2003, S1: 8