

回旋加速器的应用*

曹养书 孙官清

(辐射物理与技术教育部重点实验室 四川大学原子核科学技术研究所 成都 610064)

摘要 回旋加速器在核物理研究中发挥过重要的作用,现在和将来仍然是核物理研究领域的主要工具之一.随着核科学、核技术及核医学等高新技术的发展,回旋加速器在这些领域中的应用空间和发展前景已引起人们的关注.文章介绍了回旋加速器发展概况及其在核物理、核医学与核技术等领域的主要应用.

关键词 回旋加速器,核物理,核医学,核技术

APPLICATIONS OF CYCLOTRONS

CAO Yang-Shu SUN Guan-Qing

(Key Laboratory for Radiation Physics and Technology of Education Ministry, Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract The cyclotron played an important role in nuclear physics. It still is and will be one of the major tools in the field of nuclear physics research. With the development of high technology in nuclear science, nuclear technology and nuclear medicine, great attention is being drawn to the applications and potential of the cyclotron. The current development of cyclotrons is described briefly, with emphasis on their applications in nuclear physics, medicine, technology and other fields.

Key words cyclotron, nuclear physics, nuclear technology, nuclear medicine

加速器是用人工方法使带电粒子受电磁场作用而加速到较高能量的装置.目前加速器类型已达20多种,回旋加速器是其中之一.世界上第一台回旋加速器于1931年建成.随着加速器物理和技术的发展,这类加速器经历了普通回旋加速器、同步回旋加速器、等时性回旋加速器的发展过程,加速粒子的种类由质子、氘核、氦核增加到数十种重离子,粒子能量由几MeV提高到GeV量级.目前全世界运行的回旋加速器大约有200台,从1959年召开第一届回旋加速器及其应用国际会议以来,到1998年已经召开了15次这种专题的国际会议,成为回旋加速器发展、应用的国际交流论坛.

回旋加速器作为原子核物理研究的装置,至今仍然是科学家们进行核物理基础研究,包括核反应、核结构研究的主要工具之一,同时随着交叉学科的发展,回旋加速器在核医学、固体物理、粒子物理、天体物理、材料、能源、环境与生态、航天、农业等学科及军工、国防等多个领域都发挥着重要作用.本文着

重介绍其主要的应用.

1 回旋加速器的基本情况

1.1 回旋加速器基本原理

经典回旋加速器的工作原理基于拉摩定律,即在恒定均匀磁场中运动的带电粒子,其回旋运动的频率 $f_c = ZeB/2\pi m$ 是一个常量,而与粒子的线速度无关.如图1所示,若在磁场中放置一对D形电极,其间加上高频电压,当高频电源的频率 f_r 与带电粒子的回转频率 f_c 相等时,粒子每运动一圈可两次穿过加速间隙获得能量.经多圈加速后,离子束通过偏转系统引至靶室供实验使用.

但在经典回旋加速器中,由于被加速粒子质量的相对论效应和为满足粒子运动聚焦要求磁场沿径向的减弱,导致了回旋周期的逐渐增长及加速相位

* 2000-07-06收到初稿,2000-11-13修回

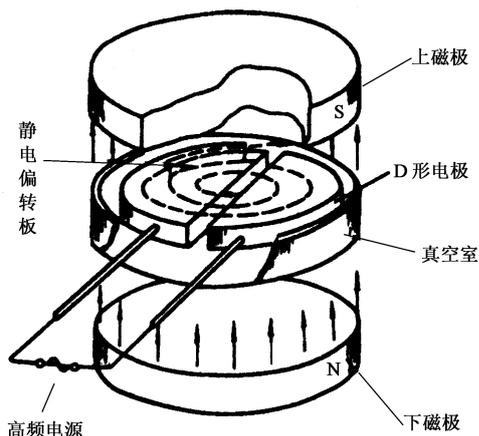


图1 回旋加速器原理示意图

的移动,限制了最终加速能量的提高.20世纪50年代后期,采用磁场沿方向角调变聚焦原理建成的等时性回旋加速器,实现了粒子既能谐振加速,又满足束流聚焦要求,从而提高了被加速粒子的能量.继之,基于分离扇聚焦原理的回旋加速器先后建成.

1.2 国际上回旋加速器概况

1931年建成的世界上第一台回旋加速器磁极直径仅10cm, H_2^+ 的能量只有0.8 MeV.但到1939年,回旋加速器磁极直径已增至150cm,加速氘核的能量可达20 MeV.20世纪40和50年代期间,世界上10余个国家先后建成回旋加速器40余台,其中大的同步回旋加速器13台^[1].60和70年代期间,包括我国在内的20多个国家建成和运行的回旋加速器多达90余台,其中大多数都是等时性回旋加速器^[2].至此,世界上从事核科学技术的机构大都配备有回旋加速器.近20年来,新建回旋加速器的数量相对较少,但这一时期所建的回旋加速器,其技术上的先进性、性能上的优越性是空前的.同时,用于科学研究的回旋加速器功能上的综合性强,如美国密执安州立大学的K500和K1200超导回旋加速器是世界上先进的综合应用型的回旋加速器之一.而作为核技术应用的回旋加速器,功能上的专一性更为突出.如比利时的CYCLONE 30是同位素生产的首选机型.1993年6月在悉尼建成的澳大利亚第一台医用回旋加速器专门用于生产全澳医院所需的放射性同位素.1997年7月韩国肿瘤中心医院设计的13 MeV回旋加速器是专为PET(正电子发射断层)配套使用的^[3].

另一方面,为了适应科学研究的要求及交叉学科发展的需要,对许多回旋加速器进行了技术改造,

改善了加速器的性能,拓宽了它的应用范围.如世界各国高度重视的放射性核束装置在许多回旋加速器实验室建成并投入使用;具有冷却和加速功能的储存环作为回旋加速器后续装置,在一些回旋加速器实验室构建,以达到增加粒子能量、提高束流强度、减少束流发散度的目的.如我国兰州中国科学院近代物理研究所建设中的重离子加速器冷却储存环HIRFL-CSR,设计加速能量为400—900 MeV/u的全离子.它的建成将为21世纪初我国核物理研究在国际前沿继续占有竞争地位提供先进的实验条件.

1.3 我国的回旋加速器

20世纪60年代我国曾生产过2台1.2m回旋加速器.近十年来,我国回旋加速器物理和技术取得了重大成果.1988年,兰州中国科学院近代物理研究所建成1.7m等时性回旋加速器和分离扇回旋加速器组合的重离子加速器(HIRFL),达到20世纪80年代国际同类重离子加速器先进水平,标志着我国回旋加速器技术跨入了国际先进行列.1993年中国科学院上海原子核研究所在世界上首次研制成功超灵敏小型回旋加速器质谱计,开创了我国独立设计新型加速器的先例.1996年中国原子能科学研究院研制的强流质子回旋加速器具有当代国际先进水平,为我国生产新一代回旋加速器奠定了基础.我国现有9台回旋加速器(不包括PET配备的回旋加速器),详见表1.

表1 我国的回旋加速器

单位	概况
中国原子能科学研究院	(1)1.2m固定能量加速器,1958年由前苏联引进,20世纪70年代末原器改成等时性 (2)强流质子回旋加速器,质子能量为15—30 MeV,自行研制,于1996年建成
中国科学院近代物理研究所	(1)1.5m固定能量加速器,1966年由前苏联引进,20世纪80年代改成1.7m等时性,作HIRFL注入器 (2)1.7m等时性加速器和分离扇回旋加速器组合成HIRFL, K=450,于1988年建成
中国科学院上海原子核研究所	(1)1.2m固定能量加速器,国产,1984年改成等时性,质子能量为30 MeV (2)超灵敏回旋加速器质谱计,自行研制,于1993年建成
四川大学原子核科学技术研究所	1.2m固定能量加速器,国产,1981年出束,1987年研制建立同位素生产自动上卸内、外靶装置
北京机械工业自动化研究所	CS-30等时性加速器,质子能量26 MeV,1984年由美国引进
北京师范大学低能核物理研究所	CS-22等时性加速器,质子能量为22 MeV,1996年由美国引进,现正在建设中
上海科兴药业公司	Cyclone30回旋加速器,质子能量为16—30 MeV,1993年由比利时引进

2 物理研究与回旋加速器

物理学是研究自然界物质结构与性质、运动形态及物质相互作用基本规律的科学。人们对物质微观世界的认识基本上可分为三个阶段：第一阶段是对原子、分子的认识；第二阶段是对原子核的认识；第三阶段是对基本粒子的认识。科学家们对原子核和基本粒子结构及其变化规律的研究，重要手段之一就是低能（ $< 100 \text{ MeV}$ ）、中能（ $100 \text{ MeV} - 3 \text{ GeV}$ ）、高能（ $> 3 \text{ GeV}$ ）的粒子加速器。从 20 世纪 30 年代第一台回旋加速器建成以来，由于加速器物理与技术的不断发展，为物理研究提供了强有力的工具。同样，物理研究对加速器不断提出新的更高的要求，又促进了加速器物理和技术的进步。

2.1 核物理与回旋加速器

核物理是探索物质微观世界，研究原子核的性质、结构、核力以及核与核、核与粒子间相互作用规律的科学。

1919 年，卢瑟福利用天然放射性同位素的 α 射线束进行了世界上第一个原子核反应实验以后，物理学家开始提出建造人工加速粒子装置的要求。1932 年，第二台回旋加速器的建成，实现了当时人工加速粒子到最高能量进行的核反应，为核结构研究及核模型建立创造了科学的实验条件。正是回旋加速器在核物理研究中的重要作用，它的发明人劳仑兹（E. Q. Lawrence）获 1939 年诺贝尔物理学奖。在串列加速器建成以前，从数 MeV 到 20 MeV 能区的核物理实验主要依靠回旋加速器^[4]。随着等时性回旋加速器、重离子回旋加速器的建成，使超铀核合成、新的核反应机制探索及核物理前沿研究成为现实。

国内有关核科研单位的研究人员利用回旋加速器开展了不同能区的大量核科学技术研究工作。我所科研人员利用回旋加速器开展的核物理研究工作的重点是核反应激发函数的实验测量。近年来具有代表性的测量工作有：(1) $6.6 - 13.1 \text{ MeV}$ 能量范围的氘核引起的 $^{197} \text{ Au}(\text{d}, \text{p})^{198} \text{ Au}$ ， $^{197} \text{ Au}(\text{d}, \text{n})^{197\text{m}} \text{ Hg}$ ， $^{197} \text{ Au}(\text{d}, 2\text{n})^{197} \text{ Hg}$ 及 $^{197} \text{ Au}(\text{d}, \text{p}2\text{n})^{196} \text{ Au}$ 反应；(2) 氘核能量在 $3.2 - 13.3 \text{ MeV}$ 范围内的 $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{95\text{m}} \text{ Tc}$ ， $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{96\text{g}} \text{ Tc}$ 及 $\text{Mo}(\text{d}, \text{x})^{97\text{m}} \text{ Tc}$ 反应；(3) 13.4 MeV 氘核辐照 Ag 靶产生的 $^{107} \text{ Ag}(\text{d}, 2\text{n})^{109} \text{ Cd}$ ， $^{109} \text{ Ag}(\text{d}, 2\text{n})^{109} \text{ Cd}$ ， $^{107} \text{ Ag}(\text{d}, \text{p})^{110\text{m}} \text{ Ag}$ 反应；(4) 26.8 MeV α 束辐照 Ag 靶产生的 $^{107} \text{ Ag}(\alpha, \text{n})^{110} \text{ In}$ ， $^{107} \text{ Ag}(\alpha, 2\text{n})^{111} \text{ In}$ ， $^{107} \text{ Ag}$

($\alpha, \text{p})^{109} \text{ Cd}$ 及 $^{109} \text{ Ag}(\alpha, 2\text{n})^{111} \text{ In}$ 反应^[5]；(5) α 粒子束 $10.4 - 26.5 \text{ MeV}$ 能量范围的 $^{55} \text{ Mn}(\alpha, \text{n})^{58\text{m-g}} \text{ Co}$ ， $^{55} \text{ Mn}(\alpha, 2\text{n})^{57} \text{ Co}$ 和 $^{55} \text{ Mn}(\alpha, \alpha' \text{n})^{54} \text{ Mn}$ 反应；(6) 从阈能到 26.4 MeV 能区的 α 束引起的 $^{181} \text{ Ta}(\alpha, \text{n})^{184} \text{ Re}$ ， $^{181} \text{ Ta}(\alpha, 2\text{n})^{181} \text{ Re}$ 反应^[6] 等等。这些核反应参数的实验测量为核反应机制的研究、用加速器生产缺中子同位素、带电粒子活化分析及核能应用提供了很有意义的依据，并丰富了核数据库的内容。

2.2 放射性束与回旋加速器

20 世纪 80 年代中期以来，由于重离子加速器技术的发展，放射性束引起了世界许多国家研究机构科学家的极大关注，利用放射性束在核结构研究、核天体物理、固体物理、凝聚态物理和材料科学等领域已经开展了卓有成效的研究工作。

放射性束（radioactive ion beam, RIB）是指具有一定衰变寿命的不稳定核构成的束流。目前有两种产生放射性束的方法：弹核裂变法（projectile fragmentation, PF）和在线同位素分离法（isotope separation on-line, ISOL）。在 PF 方法中，类弹碎片产物通过加速器的高能或中能（ $50 - 2000 \text{ MeV/u}$ ）的弹核碎裂反应产生。这类弹核碎片以接近初始束流的速度向前发射，所需的放射性核素经分离后传输到实验室供研究用。在 ISOL 方法中，使用加速器产生的高能量、大流强的轻离子束轰击厚靶产生放射性同位素，在高温下，放射性原子从靶材料内迅速释放和扩散，传输到离子源中被电离和引出，由同位素分离器选择特定质量的核素，送到后加速器再加速到适当能量，传输到实验室供研究用。这两种类型的放射性束，在核素半衰期、束流强度、核素能量及能量单色性等方面各具特色，为核物理及其他学科的研究提供了新的工具，成为核物理研究的一个重要的前沿领域。

从两种产生放射性束的方法可见，加速器，特别是回旋加速器是产生和加速放射性束的不可缺少的基本设备。目前国际上的主要放射性束装置，无论是 PF 方式还是 ISOL 方式大多用回旋加速器，表 2 列出了国际上 PF 方式产生放射性束若干装置使用加速器情况统计^[7]。而 ISOL 方式产生放射性束，其前

表 2 国际上 PF 方式产生放射性核束使用加速器概况

装置	Al 200 (美国 MSU)	LISE (法国 GANIL)	RIPS (日本 RIKEN)	COMBS (俄罗斯 DUBNA)	FBS/ESR (德国)	RIBLL (中国 兰州)
使用的 加速器	K500 与 K1200 超导 回旋 耦合	CSSI 回旋	RIC 回旋	μ -200/ μ -400/ μ -400 三台 回旋	SI 同 步回 旋	SFC + SSC 回旋

加速基本上使用回旋加速器,只是后加速使用线性加速器比回旋加速器多一些。

RIB装置可提供种类繁多的放射性核束,使原子核研究扩展到远离稳定线核乃至滴线核区域。对这些核的研究,既可验证现有的核理论和核模型,又可拓宽核理论的普适性,探索原子核组成的极限,研究极限核的结构和衰变特性。

中国科学院近代物理研究所研究人员利用HIRFL及国内第一个回旋加速器放射性束装置(RIBIL)首次合成的新核素达17种,进行衰变性质研究的核素24种,在重丰中子区和稀土质子滴线区已形成了一定优势,在远离稳定域原子核研究的国际前沿占有一席之地^[8]。

回旋加速器在研究原子核结构、探索核反应机制、测量核反应参数、合成新核素等核物理研究领域起着极其重要的作用。直到1999年6月,美国劳仑兹·伯克利国家实验室的研究人员,借助先进的回旋加速器和伯克利充气分离器,以大密度高能氮离子轰击铅靶,终于探测到了116号和118号两种超重元素的踪迹,而新核素的发现过程验证了理论上预言了20多年的“稳定岛”现象,为探索原子核和元素化学特性开辟了一个全新的领域^[9]。

3 回旋加速器在核医学中的应用

核医学是核技术与医学、生物学相结合的学科。它研究放射性核素和核射线在医学和生物学中的应用。核医学从临床应用角度可分为诊断核医学与治疗核医学。诊断核医学利用放射性同位素示踪原理及技术,对疾病进行诊断;治疗核医学利用放射性同位素或产生电子、质子、中子、重离子的装置对病灶进行治疗。核医学对目前世界上威胁人类生命的三大杀手——肿瘤、心脏病和脑部疾病的诊断和治疗具有特殊的优势。而回旋加速器无论在诊断核医学还是治疗核医学都发挥着重要作用,有些方面甚至起着不可替代的作用。

3.1 放射性同位素与回旋加速器

放射性同位素在核医学上主要用于诊断和治疗疾病,在核医学临床应用上有着十分重要的作用。核反应堆和粒子加速器都可以用来生产放射性同位素,前者利用中子核反应,主要生产丰中子同位素,后者是利用带电粒子核反应,主要生产缺中子同位素。已经发现由加速器生产的医用放射性同位素总数约50种,反应堆生产的医用放射性同位素有50

多种。据一个研究机构报道,加速器辐照生产的48种和反应堆辐照生产的47种医用放射性同位素中,除了⁵¹Cr和¹⁸⁸Re两种同位素既可用加速器生产,也可用反应堆生产外,其他的都只能或者用加速器或者用反应堆生产,所以两种核装置生产的同位素是互相补充和配合的,谁也代替不了对方^[10]。

回旋加速器是生产医用同位素的主要设备,绝大多数加速器生产的同位素都是或都能由回旋加速器生产。全世界的回旋加速器有50%以上生产同位素,而且所生产的放射性同位素80%以上都用于医学。由于回旋加速器生产放射性同位素采用带电粒子核反应,其产物与靶材不同,易用化学分离,纯度和放射性比度较高,而且半衰期短,满足放射性同位素药物的选择和应用要求,即适宜的辐射剂量、较高的射线分辨率、高放射性比度、对器官的专一性等,同时回旋加速器能量可调,适应许多核素反应激发函数的能量范围,束流强度大,耗电少,成本较低,很适合缺中子医用同位素的生产。

在设有核医学科的医院检查病人时,将适应于某种疾病的相应放射性核素或放射性核素标记的药物注入人体内,放射性核素发射出 γ 射线,在体外可用相应的探测设备进行探测,从体内发出的 γ 射线活度与细胞组织的吸收有关,比较正常细胞组织与病变细胞对 γ 射线吸收的显著差别构成反映人体吸收功能的图像,从这样的图像上医生们可以诊断相应脏器的疾病。

我国采用回旋加速器生产同位素先后有5家,生产的绝大多数是医用同位素。表3列出了各家生产同位素的情况。

表3 国内回旋加速器生产同位素统计

单位	已生产的同位素品种
中国原子能科学研究院	⁵⁷ Co, ²⁰¹ Tl, ⁶⁸ Ge, ¹¹¹ In, ¹⁰⁹ Cd, ⁶⁷ Ga, ¹⁸ F等
中国科学院上海原子核研究所	²⁰² P, ²⁰¹ Tl, ⁷⁷ Br, ⁶⁷ Br, ⁶⁷ Ga, ¹¹¹ In等
上海科兴药业公司	²⁰¹ Tl, ⁶⁷ Ga, ¹²³ I, ¹⁸ F等
四川大学原子核研究所	⁵⁷ Co, ⁶⁷ Ga, ¹⁹⁹ Tl, ²⁰¹ Tl, ²¹¹ At, ¹¹¹ In, ¹⁰⁹ Cd, ⁷⁷ Br等
北京自动化研究所	⁶⁷ Ga, ¹¹¹ In等

中国原子能科学研究院具备同位素批量生产能力,其中²⁰¹Tl和⁵⁷Co的质量达到或超过国际同类产品性能,⁵⁷Co和⁶⁸Ge产品除提供国内需要外,还销往比利时、美国和芬兰等国家。

我所利用回旋加速器及自动上卸内外靶装置生产的⁵⁷Co穆斯堡尔源为50余家科研单位和大学使

用, ^{57}Co γ 射线源供多家医院的 γ 相机校准用, $^{199}\text{TlCl}_3$ 注射液用于人体心肌显像, 取得了与门诊通过其他方法的诊断结果一致的满意效果. ^{211}At 的生物医学应用研究取得进展, 用 ^{211}At -Te 胶体对小白鼠艾氏腹水癌, ^{211}At 标记抗胃癌单克隆抗体 3H11 及其 Fab 片段进行的荷胃癌裸鼠实验性治疗都有明显的抑制率, 展现了 ^{211}At 胶体复合物和单克隆抗体标记物用于肿瘤的内辐射治疗具有的应用前景. 已形成批量生产的 ^{109}Cd 放射源能激发从 Cr 到 Mo 各元素的 K- X 射线和从 Tl 到 U 各元素的 L- X 射线, 适用于各种合金和矿物中多种元素的荧光分析, 以及金矿中金含量的测定. 同时已成功用于大庆油田石油井中在线测定原油含水率, 为油田采掘提供了很有价值的数[11].

3.2 正电子发射断层成像与回旋加速器

随着核医学的迅速发展, 正电子发射断层成像 (PET) 已是分子水平上医学研究的最先进手段. PET 显像技术利用回旋加速器生产的短寿命放射性同位素 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F 制成的药物注入人体, 利用符合探测原理, 由正电子湮没辐射的 511 keV 光子构成影像, 具有很高的灵敏度和分辨率. 由于 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F 等核素是构成人体组织元素 C, N, O 的同位素, 故可用来标记人体所需的代谢底物, 如葡萄糖、脂肪酸、氨基酸等进行体内代谢的显像研究. 因此, PET 能从体外无损伤、动态、精确、定量地观察这些物质进入人体后的生理、生态变化, 在临床上已成为诊断肿瘤、脑部和心脏疾病的最优手段, 是上世纪末生命科学的一项重大突破. 而这一突破的关键是仪器和放射性药物. 后者则借助于回旋加速器生产的短寿命放射性同位素. 譬如用回旋加速器通过 $^{20}\text{Ne}(d, \alpha)^{18}\text{F}$, 或 $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$, $^{16}\text{O}(\alpha, d)^{18}\text{F}$ 等核反应生成的 ^{18}F 与葡萄糖相标记, 变成葡萄糖的类似物 ^{18}F - α -fluoro-2-deoxy-D-glucose (^{18}FDG) - 氟代脱氧葡萄糖, 它在肿瘤中有很高的浓聚. 因此 ^{18}FDG 被认为是目前最有价值的肿瘤显像剂[12], 已经应用到包括肺、胸、乳房、结肠、黑瘤、软组织瘤、前列腺和各种甲状腺瘤的诊断[13].

PET 显像系统由 PET 和计算机、回旋加速器、放射性药物快速合成系统等主要部分组成. 目前全世界约有 150 个 PET 中心, 我国现有 11 台 PET, 它们大多配有回旋加速器, 而这种回旋加速器结构紧凑、安全可靠、自动化程度高、运行方便、质子能量不低于 11 MeV. 中国原子能科学研究院成功研制 Cyclone30 回旋加速器, 标志着制造与 PET 配套的回

旋加速器国产化能力.

3.3 质子治疗与回旋加速器

癌症是威胁人类生命的三大杀手之一, 放射治疗一直是治疗癌症的重要手段. 传统放射治疗是采用放射源产生的 γ 射线或电子加速器产生的电子束, 以及电子束打靶产生的 X 射线等对病灶进行辐照, 射线照射人体产生的剂量随深度指数衰减. 在对肿瘤进行照射时, 肿瘤附近的正常细胞受到损伤, 尽管它们是目前治疗肿瘤的主要方式, 但还不够理想.

质子治疗是放射肿瘤学中一种新兴的放射治疗方法. 由于质子束具有优良的剂量分布, 使得质子治疗在全世界范围得到较快的发展. 质子是带正电的粒子. 质子进入人体后, 由于电离作用, 其能量逐渐损失, 我们称粒子在单位距离上的能量沉积为传能线密度 (LET). 对质子来说, LET 随着质子能量的减少而增加. 质子的射程取决于其能量, 而且单能质子的射程分散很小, 在质子径迹终点形成一个尖锐的剂量峰即布拉格峰, 峰后尾巴很小, 在临床治疗时, 通过调节质子能量来移动布拉格峰的位置, 使得在一定射程范围内有均匀的剂量, 即将布拉格峰展宽, 如图 2 所示. 质子剂量分布的这一特点决定了它在临床应用上的适形治疗, 即在计划治疗的病灶区 (通常称为靶区), 有较高的照射剂量, 而对病灶周围的正常组织损伤很少, 能获得电子、中子、 γ 和 X 射线不能达到的效果[14]. 特别是对眼部黑色素瘤、颅底肿瘤、垂体肿瘤、前列腺癌等的疗效已被充分肯定.

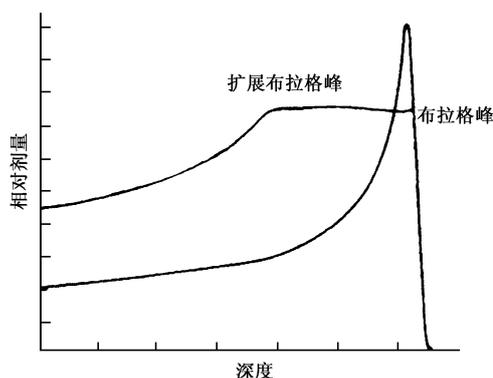


图 2 质子剂量随深度分布曲线

质子治疗装置包括加速器、束流输运系统、治疗计划系统、剂量监测系统及患者定位和控制系统. 由于质子治疗用的质子束能量要求在几十 MeV 到 250 MeV 范围, 回旋加速器是获得这种质子束的首选装置之一. 目前全世界有近 20 个质子治疗中心, 正在计划新建的有十几个这种中心, 其中大多采用回

旋加速器或同步回旋加速器^[15]。世界上第一例质子治疗始于美国加州大学 Berkeley 回旋加速器实验室,紧接着是 1957 年 Uppsala 大学 Gustaf Werner 研究所同步回旋加速器开展质子治疗的研究。美国马萨诸塞总医院长期利用哈佛大学的同步回旋加速器进行质子治疗,已治疗患者约 7000 余人。目前专用质子治疗回旋加速器及治疗装置已由比利时 IBA 公司和日本住友公司联合研制成功,并已装配在美国马萨诸塞总医院东北质子治疗中心和日本癌症中心^[16]。这种加速器具有足够的质子能量和其他优良性能。我国的质子治疗研究工作也取得了很好的成果,随着核医学与放射治疗中先进技术的采用,我国实现质子治疗也为期不远。

此外,据已召开的多次中子治癌国际专题会议报道,由于回旋加速器在中子产额和中子剂量利用率方面比中子发生器及直线加速器具有较突出的优势,目前世界上开展快中子治癌,尤其对喉癌、骨癌和恶性黑色素瘤的中子治疗,主要使用回旋加速器。其中仅美国就有 10 余台,而德国、法国、英国、日本和比利时都开展了回旋加速器中子治癌的研究和临床应用。

4 回旋加速器的其他应用

回旋加速器用途较广,除前面叙述的在核物理和核医学上的应用外,还有多方面的用途。

4.1 核分析技术

核分析就是通过射线与物质中的原子或原子核相互作用,采用近代核物理实验技术,分析物质元素组分和结构,是一种具有高灵敏度的分析方法。

4.1.1 回旋加速器质谱计

加速器质谱计(AMS)是离子束分析的一门新技术。问世于 20 世纪 70 年代末的现代加速器质谱计是指探测放射性同位素丰度灵敏度在 10^{-12} — 10^{-15} 范围内的超灵敏度质谱计。同时,它可检测反映天体演变和人类起源的半衰期在 5000 年至 1000 万年的长寿命同位素^[17]。最典型的有 ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ 年)和 ^{36}Cl ($T_{1/2} = 3.0 \times 10^5$ 年),而它们的同位素丰度只有 10^{-12} 。目前世界上加速器质谱计有 50 余台,几乎全是串列加速器质谱计。

中国科学院上海原子核研究所利用回旋加速器的共振特性所能获得的优良质量分辨率,已成功地研制成世界上第一台,也是目前唯一的一台超灵敏小型回旋加速器质谱计,开创了回旋加速器新的应

用途径。利用这台质谱计已成功地测定了一批考古样品和古代地质样品,其测量精度分别为 1% 和 3% 左右,已达到当前国际上串列加速器质谱计的测量水平^[18]。

上海回旋加速器质谱计的建成、运行和提供的研究结果表明,这种质谱计既具有串列加速器质谱计的优点,又保持了回旋加速器优良的质量分辨特点,同时采用负离子轴向注入,加速负离子不须电荷剥离,直接从加速器引出进行计数,效率高。它设备体积小、重量轻、低磁场、低能耗,且无放射性污染,在考古、天文、地球、材料和生命科学等领域有很好的应用前景。

4.1.2 核反应分析

用回旋加速器产生的离子束与原子核发生特定反应,测量反应产物可确定靶核的性质与数量。回旋加速器加速的 p, d, α 离子可以对 C, O, Fe, N, Al, Ba, F, B, Mg 等元素进行核反应分析具有较高的灵敏度。近年来我所科技人员与乌克兰科学院合作,利用回旋加速器加速的氘束,采用 $^{14}\text{N}(d,p)^{15}\text{N}$ 反应,快速无损伤地测量小麦和稻谷中氮含量^[19],优选出一批高蛋白含量的谷物种子并进行了第一代种植。可望培育出蛋白质含量高的小麦和稻谷良种,这对我国 12 亿人口有着巨大的实用价值。

4.2 射线环境模拟研究

用回旋加速器加速的带电粒子引发的核反应事件,特别是 $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{Be}$ 等反应产生的高通量、连续能谱的中子场是一种良好的核爆环境模拟方式,对核爆现场使用的相关仪器、设备的校验及防护措施的提供提供模拟实验条件。

空间辐射环境对航天器的危害已引起人们的高度重视。航天器件受宇宙射线单个重离子辐照,因能量沉积形成的瞬时电流脉冲可能引发微电子器件逻辑状态改变,导致指令失灵、功能失效,甚至引起毁灭性的后果。对这种影响的研究有空间实际测量和地面模拟等途径。加速器地面模拟是一种经济而有效的方法,也是空间实验的一种补充手段。它在机理研究、器件筛选、防护措施验证等方面具有优点。目前航天科技发达国家利用回旋加速器开展宇宙射线环境模拟研究取得了进展。中国科学院近代物理研究所在重离子加速器辐照终端建成了国内第一台用于单粒子效应研究的大型专用实验装置,已经成功地开展了“风云一号”卫星计算机主板单粒子效应实验,“实践四号”、“实践五号”卫星微电子系统地面考核及屏蔽措施的验证^[20]。这些研究对我国航天事业

的发展有很好的使用价值。

4.3 带电粒子辐照效应研究

回旋加速器可作为带电粒子辐射源,提供辐照效应研究,尤其是重离子加速器。目前,国际上的几台重离子回旋加速器如法国的 GANIL、日本 RIKEN 的 RRC 及我国兰州的 HIRFL 都在开展这方面的基础和应用研究,中国科学院近代物理研究所在生命科学方面的研究已取得了不少成果,如用各种不同能量、不同离子连续多年对不同品种的春小麦进行重离子辐照诱变育种,通过五六年的实验观察和大田培养,已获得早熟、矮秆、抗病、优质增产型的新品系 14 个,而重离子治疗的研究也在进行之中。

我所曾为核动力研究院用氦离子辐照反应堆结构材料,仿真聚变中子的损伤效应,为研究反应堆材料及其力学、机械性能变化提供有价值的设计参考。

应当指出,本文仅就回旋加速器的主要应用作了概述,显然并不全面。随着核物理学学科前沿研究的开展,核医学作用的进一步发挥,核技术应用的广泛推广,必将促进回旋加速器技术的进步和应用领域的拓展。

致谢 国内有关专家提供了相关材料,作者表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Livingston M S. Particle Accelerators. New York: McGraw Hill Book Company, Inc., 1962. 352—354
- [2] Harwood L. In: Marti F. (ed.). Proc. of the 10th Inter. Conf. on Cycl. & Their Appli. New York: IEEA, 1984. 623—626
- [3] Yoon M *et al.* In: Chin Y H *et al.* (eds.). Proc. of the 1st Asian Particle Acc. Conf. KEK, Tsukuba, Japan, 1998. 798—800
- [4] 徐建明. 加速器原理. 北京: 科学出版社, 1981. 240—242 [Xu J M. Principle of the Accelerator. Beijing: Science Press, 1981, 240—242 (in Chinese)]
- [5] 何福庆等. 原子能科学技术, 1994, 128(6): 513 [He F Q *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 1994, 128(6): 513 (in Chinese)]
- [6] 彭秀峰等. 四川大学学报, 1996, 33(1): 52 [Pen X F *et al.* Journal of Sichuan University, 1996, 33(1): 52 (in Chinese)]
- [7] 刘冠华. 原子核物理评论, 1997, 14(4): 227 [Liu G H. Nuclear Physics Review, 1997, 14(4): 227 (in Chinese)]
- [8] 罗亦孝. 原子核物理评论, 1999, 16(2): 69 [Luo Y X. Nuclear Physics Review, 1999, 16(2): 69 (in Chinese)]
- [9] 卞晨光等. 科技日报, 2000, 1, 8 [Bian C G *et al.* Science and Technology Daily, 2000, 1, 8 (in Chinese)]
- [10] 庄友祥等. 核物理动态, 1996, 13(1): 36 [Zhuang Y X *et al.* Trends in Nuclear Physics, 1996, 13(1): 36 (in Chinese)]
- [11] 曹养书等. 四川大学学报, 1998, 35(5): 790 [Cao Y S *et al.* Journal of Sichuan University, 1998, 35(5): 790 (in Chinese)]
- [12] 陈盛祖. 物理, 2000, 29(2): 91 [Chen S Z. Wuli (Physics), 2000, 29(2): 91 (in Chinese)]
- [13] Fim R D, Macapinlac H *et al.* In: Duggan J L. (ed.). Proc. of the 14th Inter. Conf. on Appl. of Acc. in Reser. & Indus. New York: AIP, 1996. 1345—1347
- [14] 郁庆长, 罗正明. 质子治疗技术基础. 北京: 原子能出版社, 1999. 2—6 [Yu Q C, Luo Z M. An Introduction to Proton Radiotherapy. Beijing: Atomic Energy Press, 1999. 2—6 (in Chinese)]
- [15] Sistersin J M. In: Duggan J L. (ed.). Proc. of the 14th Inter. Conf. on Appl. of Acc. in Reser. & Indus. New York: AIP, 1996. 1261—1269
- [16] 郁庆长, 罗正明. 质子治疗技术基础. 北京: 原子能出版社, 1999. 37—42 [Yu Q C, Luo Z M. An Introduction to Proton Radiotherapy. Beijing: Atomic Energy Press, 1999. 37—42 (in Chinese)]
- [17] Massonet S *et al.* In: Duggan J L. (ed.). Proc. of the 14th Inter. Conf. on Appl. of Acc. in Reser. & Indus., New York: AIP, 1996. 795—797
- [18] Kutschera W. Nucl. Inst. & Method B, 1997, 123(4): 594
- [19] 张坤, 曹建华. 核物理动态, 1996, 13(4): 31 [Zhang K, Cao J H. Trends in Nuclear Physics. 1996, 13(4): 31 (in Chinese)]
- [20] 侯东明等. 核物理动态, 1996, 13(1): 32 [He D M *et al.* Trends in Nuclear Physics, 1996, 13(1): 32 (in Chinese)]

封 面 说 明

HT-7 装置是继俄、法、日之后建成的世界上第 4 个超导托卡马克。经过三年的工程调试和运行, HT-7 运行参数均达到工程设计指标, 并全面开展围绕准稳态、长脉冲为核心的物理实验。HT-7 的历史使命就是探索实现稳态、高效率反应堆模式的科学技术问题。在过去的几年中, HT-7 物理实验取得较大进展: 高参数放电超过 7s; 总加热功率超过 1 MW; 在低杂波全波驱动、电流爬升、离子回旋共振加热、双波协同效应、多变量适时控制技术、射频壁处理、低环电压启动等方面都取得了多项成果。这些进展标志着我国磁约束核聚变研究的综合实力和科学技术接近国际先进水平。近两年来, HT-7 的实验结果在国际大会上作特邀报告 5 次。

(中国科学院等离子体物理研究所 李建刚 谢纪康)