

* 大科学工程 *

跨世纪的核科学研究重大工程 ——从重离子加速器到冷却储存环的研制

魏宝文* 詹文龙**

(近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 回顾了兰州重离子加速器(HIRFL)、放射性束流线(RIBLL)的研制和实验成果,并对正在建设中的跨世纪的核科学研究重大工程冷却储存环(CSR)的建设情况、科学目标和科学意义作了介绍,颂扬了我国科技人员自力更生、勇于探索、主动进取、不断创新的精神。

关键词 核科学,重大工程,重离子加速器,放射性束流线,冷却储存环

原子核物理研究在 20 世纪上半叶取得许多重大成就之后,于 60 年代拓展到一个新的研究领域——重离子物理。与此相适应,重离子加速器的研制也得到快速发展。中国科学院近代物理研究所的科技人员,于 1988 年建成了具有 80 年代国际先进水平的兰州重离子加速器(HIRFL),为我国开展重离子物理及其应用研究提供了先进和完备的实验装置。

从 80 年代后期开始,国际重离子物理研究开辟了一个极具活力的前沿领域——放射性束物理。为了不失时机地进入这一领域,近代物理研究所和 HIRFL 国家实验室于 1997 年 7 月在 HIRFL 上建成了具有 90 年代国际先进水平的兰州放射性束流线(RIBLL),为我国开展放射性束物理研究创造了极为有利的条件。

进入 90 年代以来,近代物理研究所和 HIRFL 国家实验室根据国家科技发展的总体目标及当今原子核物理发展的主要方向,考虑到 HIRFL 具有的优势和进一步发展的可能,审慎地提出了在 HIRFL 上扩建冷却储存环(CSR)的科研计划,即实施 HIRFL-CSR 大科学工程。这一工程建成后,可使我国以更先进的实验条件,在核物理研究的前沿领域取得更大突破。

从 HIRFL 到 HIRFL-RIBLL,再到 HIRFL-CSR,体现了我国科技人员自力更生、勇于探索、主动进取、不断创新精神,也标志着我国核科学研究不断迈向新的高度。

1 重离子加速器(HIRFL)的成功运行

HIRFL 是我国在 80 年代末建成的代表国家水平的三大加速器之一,于 1988 年 12 月建成出束,1989 年 11 月通过国家技术鉴定和竣工验收,主要技术指标达到 80 年代国家先进水

* 中国科学院院士,兰州重离子加速器国家实验室主任

** 近代物理研究所副所长,研究员,兰州重离子加速器冷却储存环工程经理

收稿日期:1999 年 5 月 28 日

平,1991年获中国科学院科技进步奖特等奖,1992年获国家科技进步奖一等奖。1992年,国家计委批准成立HIRFL国家实验室,向国内外开放。

HIRFL建成后,每年运行5 000小时左右,完成约20项科学实验。十多年来,来自全国30多个科研单位和高等院校的科学家,利用HIRFL提供的40多种不同种类和不同能量的重离子束流,在“远离稳定线新核素的合成和研究”、“中低能重离子碰撞和热核性质研究”、“重离子束在原子物理、材料科学和生命科学中的应用研究”、“放射性束物理研究”等领域中,完成了近200项实验,绝大部分是国家自然科学基金、“863”计划、攀登计划、中国科学院及省部委资助的重大、重点研究项目,取得了一批以新核素合成和研究为代表的具有国际先进水平的重要成果。这些成果获得各种奖励14项,其中:国家自然科学奖二等奖1项、三等奖1项;中国科学院自然科学奖一等奖2项、二等奖3项、三等奖3项,中国科学院科技进步奖一等奖1项;吴有训物理奖2项;甘肃省自然科学奖一等奖1项。这些成果还3次入选全国十大科技成就、全国十大科技新闻和全国十大科技事件。

这些成果的取得,大大提高了我国在国际核物理学界的学术地位,并在其前沿领域的激烈竞争中占有了一席之地。

然而,综观国际核物理研究的现状和发展趋势,要求加速器提供能量更高、品质更好、种类更多的束流,特别是放射性束流,以满足极端条件下核物质性质研究的需要。显而易见,我国在80年代建成的HIRFL已无法满足这种需要,必须对它进行改造升级,才能确保我国在21世纪世界核科学研究的激烈竞争中继续占有一席之地。因此,近代物理研究所和HIRFL国家实验室立足我国国情,本着既体现国家总体发展目标,提出了以HIRFL为基础,续建CSR,以提高我国在国际核科学领域竞争实力的重大科研计划,得到了国家的首肯。

2 放射性束流线(RIBLL)的研制

随着核物理研究的逐步深入和加速器技术的不断进步,80年代中期以来放射性核的产生和应用得到迅速的发展,使得人们可以产生和应用自然界不存在的多种放射性核作为束流,进一步揭示原子核的内部微观结构和变化规律。近年来已经发现了原子核的许多奇异现象和新的规律,如中子晕、中子皮、质子晕以及奇异衰变性质等,正在极大地拓展人们关于原子核物理的研究领域,将原子核研究由 β 稳定线迅速地向两边扩展到质子滴线和中子滴线,从而形成了放射性束物理学,成为当代原子核物理及其应用研究的一个重要前沿领域和新的里程碑。因此,放射性束物理受到国际上各著名核物理研究中心的极大关注,纷纷建造性能优越的放射性束装置,开展放射性束物理研究。

为了使我国放射性束物理及其应用研究尽早进入国际前沿并占有一席之地,同时作为CSR建设的前期研究,近代物理研究所的科研人员,于80年代末就提出了在HIRFL上分阶段建造放射性束流线和开展放射性束物理研究的计划,得到中国科学院院长特别基金的支持。经过几年的努力,于1993年将HIRFL的后束运线改造成放射性束流线,对放射性核束的产生和应用进行了初步研究,获得了30多种放射性核素,为设计和建造技术指标先进的放射性束装置探明了道路。

1995年,近代物理所和HIRFL国家实验室制定了建造具有国际先进水平的中能重离子弹核碎裂型放射性束流线的方案,经论证,很快被中科院批准实施,并得到国家科委的支持。

研制组的科技人员在原有工作的基础上,广泛深入地调研了世界上已投入运行的同类型

放射性束装置和放射性束物理发展趋势,与国外同行开展了密切的交流,博采众长,确定了最先进的技术指标和创新的结构设计,从而形成了鲜明的特色与先进的设计思想。如采用两极反对称双消色差结构,以显著提高放射性束纯度和粒子鉴别能力;采用初级靶前的强聚焦以增强对放射性束的接受能力;改变初级束入射角以得到部分极化的放射性束。这些创新的设计使 RIBLL 具备了 0° 谱仪的功能,在相当程度上克服了目前国际同类装置束流离散大、实验精度低的缺陷,不仅能产生 500 多种放射性核束,还能进行高精度的短寿命放射性束物理实验。

RIBLL 由放射性束的产生、分离、鉴别系统和专用的核反应测量及数据采集系统组成。其主体是一条 35 米长的束运线,它包括 4 台各重 30 吨的二极偏转磁铁、1 台调向磁铁、16 台各重 1—8 吨的四极透镜及其高精度电源,还有真空管道及其排气系统,以及自动控制和束流诊断系统。鉴别和测量系统包括 20 台(套)高分辨、高精度的探测器。

由于各方面的通力合作,RIBLL 的设计、加工、安装、调试仅用了 20 个月时间,建成后即投入运行,并于 1998 年 2 月通过了中国科学院组织的鉴定验收。国内核物理界的多位院士和专家的鉴定意见认为:RIBLL 的整体性能达到了 90 年代国际先进水平,它的胜利建成和运行,为我国开展放射性束物理这一国际前沿领域的研究创造了有利的条件,标志着 HIRFL 又上了一个新台阶。目前,RIBLL 已稳定运行 3 000 多小时,顺利完成了一批前沿领域的物理实验,取得了可喜的成果。

RIBLL 的成功研制不仅为我国开展放射性束物理研究提供了良好的实验装置,而且是 CSR 建设的一次“实战训练”。基于科研人员在 RIBLL 上开展研究工作的积累,将使 CSR 的实验探测系统建造得更加具有特色,也为 CSR 建成后完成具有重要科学意义的首批放射性束物理实验提供了保证;RIBLL 的硬件建设为 CSR 部分硬件设计和加工工艺奠定了基础;RIBLL 研制中富有成效的组织管理工作,为 CSR 建设在改革开放条件下实事求是地追求高质量和高效率,推行符合创新要求的管理机制积累了宝贵的经验。所以,RIBLL 研制作为 CSR 建设的前期研究是扎实可靠的。

3 建设中的冷却储存环(CSR)

纵观国际重离子物理发展的趋势,在当前和今后一二十年的时间内,原子核物理的前沿是极端条件下核物质性质研究及非核自由度研究。因此,各国重离子物理实验室都在积极开发加速器技术,正在研制或已经建成一批新的重离子加速器。其发展现状和趋势是:①研制中、高能直至相对论重离子加速器;②研制能产生丰中子或丰质子束流的放射性束装置;③研制高品质重离子 CSR。

在这种形势下,近代物理研究所和 HIRFL 国家实验室以 HIRFL 现有的优势和进一步发展的可能为基点,经过几年反复深入的研讨,慎重提出了在 HIRFL 上扩建 CSR 的计划,即实施 HIRFL-CSR 工程,以确保我国在 21 世纪国际核科学研究的前沿继续占有一席之地。经过国内外专家的多次论证和优化,CSR 的科学性、先进性和可靠性得到充分肯定,1997 年 6 月经国家科技领导小组批准,国家发展计划委员会作为国家“九五”重大科学工程立项,建造工期为 1999—2004 年。

CSR 是一个由主环(CSRm)和实验环(CSRe)组成的双储存环系统,配置兰州谱仪、核反应研究谱仪和应用核科学终端等 3 个实验探测装置。CSRm 周长 161.20 米,用于稳定核束的束流累积、冷却、加速、减速和高分辨薄内靶实验;CSRe 周长 125.98 米,用于放射性核束或高

离化稳定核束的冷却、高分辨内靶实验。CSR 的设计思想与特色是:以最佳的性能价格比,把放射性核束、稳定核束和高离化重离子束的产生、加速同束流的冷却储存结合起来,提供多品种、高品质、高流强且具有宽能量范围的稳定核束、放射性核束、高离化重离子束以及极化束,以满足未来多学科、高水平、高精度实验研究的需要。

CSR 的科学目标:①放射性束物理研究;②高温高密度条件下核物质性质研究;③高离化态原子物理研究;④探索超重元素的合成;⑤交叉学科和应用研究;⑥推动高新技术的发展。

CSR 具有多方面的科学意义:

在核物理研究方面:①它可以提高内靶实验亮度,降低实验本底,为远离核特别是滴线核的合成及其结构和性质的研究提供极为优越的实验条件;②在具有很大技术难度和重要物理意义的 $A > 170$ 重质量丰中子区以及滴线核区合成一批新核素;③在研究重质量丰中子区理论预言的缓发中子先驱核岛和缓发裂变岛上核性质方面取得进展;④在缺中子区,对一批在核结构和天体物理中具有重要意义的远离核进行深入研究;⑤开拓短寿命核素(10^{-7} — 10^{-5} 秒)新区域的研究;⑥在原子核稳定性极限研究、中子物质合成和中子物质态方程的研究中取得进展。与此同时,利用 CSR 的放射性束可以对核反应的同位旋效应进行研究。CSR 提供的具有与超重核相同 N/Z 值(1.6—1.7)的高强度丰中子核束流,以及 CSR 可作 (A, Z) 直接鉴别的探测条件,将为超重元素的合成提供丰富的信息和有效的手段。

在原子物理研究方面:CSR 建成后,将在我国开辟高离化态重离子原子物理研究的新领域。CSR 的高分辨、高离化态重离子束,以及能量可调的高密度电子流,结合气体内靶的使用,为精确研究高离化态重离子-电子(包括自由电子和束缚电子)相互作用和高离化态重离子内壳层能级精细结构等,提供了唯一可行的条件。

在核物理应用和交叉学科的发展方面:①天体物理研究。利用 CSR 提供的低中能丰中子、丰质子放射性束,合成天体核过程中的关键核并研究其性质和反应率(如 r -过程、 rP -过程、热 CNO 循环和重核合成),可以为研究宇宙的产生、演变、能量来源、元素质量丰度分布和宇宙年龄等,提供丰富的信息。②重离子束治癌研究。CSR 提供的足够强的中高能重离子束以及放射性束,可以穿透到人体的任何部位,在对人体正常部位损害最小的情况下非常有效地治疗各种肿瘤。这种方法与其它放射性治疗方法相比,具有显著的优越性。因此,CSR 建成后将使我国在放射性治癌方面大大地向前迈进一步,产生重大的社会效益。③高温、高压、高密度等离子体探索研究。中高能重离子束与物质的相互作用产生的等离子体比当今实验室条件下产生的高出几个数量级,这种新学科增长点的探索性研究是德国 GSI 国家实验室近年来开创的,深入开展高温、高压、高密度等离子体研究,将对星体演变的物理过程和重离子引起的惯性核聚变发展,提供基础学科理论和难以取代的新方法。

在促进我国高新技术发展方面:CSR 是一个高新技术的组合物。它包括了电子冷却、重离子束的堆积、超薄内靶、 10^{-11} 托大型超高真空、高流强高剥离态 ECR 离子源、快速跟踪控制、快速交变磁场、束流诊断等高新技术。通过 CSR 的建设,我国不仅能掌握这些技术,而且还能进一步发展和推广这些技术,从而提高我国相关工业的水平。