

北京串列加速器核物理国家 实验室十年回顾

赵志祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

北京串列加速器核物理国家实验室自1987年8月通过国家验收到现在已走过了十年的历程。实验室在放射性核束物理、核结构、重离子核反应、新核素合成、核数据测量、核技术应用等领域的一系列前沿及重大课题上均取得了一批具有国际先进水平的、对国民经济建设具有重要价值的科研成果。北京串列加速器核物理国家实验室已成为我国低能核物理研究和核事业人才培养的重要基地。

一、实验室历史回顾

1978年,中国原子能科学研究院(当时称原子能研究所)迎来了科学的春天。有关领导和专家不失时机地提出建议,要求继续推进“从美国高压工程公司引进一台 $2 \times 13\text{MV}$ 串列式静电加速器”的计划,以从根本上改进我国低能核物理研究及核数据测量的条件。这一建议得到了核工业部的有力支持。1979年,国家计委、国防科委批准了串列加速器工程设计任务书。1980年,核工业部批准了串列加速器工程经费概算,批准概算投资为5080万元(实际投资5500万元),建筑面积为8300平方米。1981年5月,土建工程动工。1986年10月,串列加速器的安装调试完成并通过了加速器技术验收。之后,开始试运行为核物理实验供束。1987年8月,串列加速器工程项目通过国家验收正式交付使用,并于当年9月向全国开放。至此,我国低能核物理研究进入了一个新的阶段。

在串列加速器交付使用之前,原子能院已开始酝酿在串列加速器上将要开展的物理工作。1981年底,召开了串列加速器实验室建设方案及建成后主要研究方向的专家研讨会,王淦昌等许多老一辈的核物理专家出席了会议,确定了实验室总体布局设计及三个主要研究方向——低能核物理的精细研究、核数据测量及

核技术应用研究。1985年4月,召开了第一次串列加速器课题评审会。为了推动串列加速器核物理实验室的建设,提高串列加速器相关物理工作的水平,1986年5月召开了有来自12个国家62个研究单位的171名代表参加的“北京串列物理国际讨论会”。王淦昌教授指出,“这个串列加速器核物理实验室的建成和这次北京串列物理国际讨论会的召开是我国核物理发展史上的一个里程碑”。

实验室的学术委员会主任一直由院外著名专家担任,第一位学术委员会主任为杨立铭院士,第二位学术委员会主任为胡济民院士。学术委员会委员中院外单位的专家约占三分之二。他们为串列加速器核物理国家实验室的建设和发展出谋划策,倾注了心血。

二、实验室建设

为了管好用好串列加速器这一国家大型科研设备,我们对操作运行人员严格要求,建立了相应的培训、考核制度。我们还在实践中不断完善各种操作规程。在人员流动性较大的情况下,保持了一支业务水平高、思想作风过硬的技术骨干队伍。10年来,串列加速器一直保持着较好的技术状态和运行状态。头部最高供束电压达 12.7MV ,束流传输效率对于轻粒子好于75%,对于重粒子在30%到50%之间。供实验用束时间逐年提高,1987年供束1136小时,1991年供束3000小时以上,1996年供束超过了3700小时,1997年上半年供束时间2000小时,达到了国际同类加速器运行水平。到1997年6月底,HI-13串列加速器已累计开机37600多小时,提供束流时间超过31500小时。10年来,为150多个科研课题提供了从氢到碘共30种离子束。

加速器的维护和改进工作是使其保持良好

运行状态、提高开机效率的十分关键的环节。在 HI-13 串列加速器上, 每年用于维修和改进工作的时间为两个月左右。10 年来, 开展了多项技术改进工作, 其中比较重要的工作有: 建立了输电梯组装新工艺; 建立了第二剥离器系统; 建立了非标准聚束模式; 建立了运行参数巡回检测系统。此外, 研制的加速器质谱计交替注入系统、重离子辐照扫描系统和离子源实验台架等对于扩展串列加速器的研究能力、提高开机效率都发挥了作用。

电阻分压系统和充电系统的性能对串列加速器的高压性能和使用效率有着决定性的影响, 而这两个系统又最易出现故障。前者在高压打火情况下极易损坏, 后者因长期不停运转而造成机械磨损。运行维修的大量经费和时间化在这两个系统上。因此, 提高这两个系统的性能可以延长设备的寿命, 提高运行效率, 节省串列加速器的运行经费。从 1989 年开始, 历时数年, 我们完成了这两个系统的国产化工作。国产部件在性能和使用寿命上都明显好于进口部件, 已在加速器上运行了一万多小时。国产部件的另一突出优点是价格低廉。国产输电梯价格仅为进口梯的四分之一 (进口梯每条 100 万元), 国产电阻每个仅为 120 元人民币 (美国电阻每个 450 美元, 加速器上共 1152 个电阻)。串列加速器关键部件的国产化工作的经济效益是十分显著的。

从 1990 年开始, 我们还设计建立了五条新的国产束流管道, 并已陆续投入了使用。这项工作不但为国家节省了数百万元开支, 而且还培养锻炼了一批工程技术人员。

串列加速器上配置的两套计算机系统在 1995 年进行了更新, 这两套计算机系统现已联入原子能院的计算机网络。此外, 串列加速器厂房和物理楼的微机也并入了网络。经过努力, 串列加速器核物理国家实验室已实现了计算机网络化, 大大提高了科研工作的能力和效率。

三、科研成果

实验室按开放的国家实验室模式运行, 已有国内外 30 多个单位完成了 150 多个科研课

题, 取得了丰硕的科研成果。10 年来, 共培养博士生 21 名, 硕士生 63 名; 在国内外公开学术刊物上发表论文 700 多篇。据不完全统计, 实验室获国家科技进步二等奖 2 项, 三等奖 2 项; 吴有训物理奖 4 项; 部委级科技进步一等奖 9 项, 二等奖 20 项, 三等奖 14 项。

核物理基础研究方面 1993 年在串列加速器上建成了我国第一条放射性次级束流线, 并成功地调出 ^{11}C , ^{17}F , ^6He , ^7Be 和 ^{13}N 五种放射性次级束。次级束的产生率、纯度、能散度、束斑和角发散度等综合指标达到国际上同类装置的先进水平。1995 年在国际上首次完成了 $^7\text{Be}(d, n)^8\text{B}$ 角分布测量, 导出对天体物理十分重要的 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 反应 $S_{17}(0)$ 因子, 用独立的实验为证实高能太阳中微子丢失现象提供了新的证据。文章发表在《物理评论通讯》(Physical Review Letters) 上。用在束 γ 谱学进行了核结构研究, 发现了 $^{167, 169, 175}\text{Ta}$ 质子 $1/2[541]$ 带交叉的反常推迟, 并揭示了这一反常现象随 Ta 核中子数变化的“V”字形规律。发现了 ^{167}Lu 的超形变带, 这是国内实验室中发现的第一个超形变带, 也是在国际上找到的第三个罕见的三轴超形变带, 是我国核结构研究的突破性进展。在国际上首先发现了重离子垒下熔合反应裂变碎片角分布异常现象, 引起国际核物理界的重视, 提出了一个新的予平衡裂变模型, 可以合理地解释所观察到的现象。合成了新核素 ^{90}Ru , 测得了它的寿命, 并对其性质进行了实验研究。这项工作得到了国际权威机构的认可。 ^{90}Ru 的合成及其性质的研究是国内新核素合成方面的一个重要进展。此外, 在重丰中子核素的合成和质量测量、高温转动核的巨共振研究、原子核最高拉长态的观测和高自旋态 g 因子测量等方面也取得了一批研究成果。在串列加速器核物理国家实验室有一支约 20 人的十分活跃的核理论队伍, 每年都要发表约 30 篇成果。近年来在基础核理论、激光物理及迁移问题的数学理论等方面都做出了成绩, 在国内外学术界享有声誉。近年来, 还开展了核理论在生命科学中的应用研究, 在 DNA 热变性研究取得了进展。

核数据测量 对核装置的设计和性能诊断及船用动力堆设计需要的关键性核数据进行以填补空白、澄清分歧、提高精度为目的的精益求精的测量一直是串列加速器核物理国家实验室的一个主要工作方向。10年来,很好地满足了用户的需要。在串列加速器上建成了氘气靶装置,把单能中子能区扩展到40MeV。精确测量了中子诱发核裂变的关键裂变产物的产额及质量分布,测量精度达到了国际先进水平。测量了21个中子指示剂反应截面和33个带电粒子活化反应截面。在IAEA组织的有美、日、德、匈四国实验室和我们参加的国际合作项目中,由于我们在活化截面测量解决关键的分歧中所起的作用,在国际同行中确立了重要的地位。在串列加速器上创建了非常规快中子飞行时间谱仪,巧妙地避开了 $D-d$ 破裂中子的干扰,成功地解决了国际上长期没解决的9-13MeV中子能区数据测量的方法。在 $E_n = 10\text{MeV}$ 测量了 ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{51}\text{V}$ 、 ${}^{56}\text{Fe}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ 和 ${}^{209}\text{Bi}$ 等核的次级中子双微分截面,填补了空白。用双飞行时间法测量了10MeV和12MeV中子诱发 ${}^{238}\text{U}$ 瞬发裂变中子谱,填补了7-13MeV能区无实验数据的空白。在 γ 射线测量方面,在7-18MeV数据少的中子能区,测量提供了 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{56}\text{Fe}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 和 ${}^{12}\text{C}$ 等重要核素的 (n, γ) 反应截面及角分布,添补了数据空缺,完成了用户急需的某些高能 γ 射线产生截面测量。测量了某些关键核素的 γ 射线发射几率和半衰期数据,对部分存在分歧和矛盾的衰变纲图数据也进行了精确的测量,澄清了一些分歧和矛盾。建成了国产2.2米掠入射真空紫外单色仪,并调试成功,其性能指标与国际上同类谱仪相当。用这套谱仪成功地完成了第一个物理测量工作—高离化态硫和溴的原子光谱测量。2.2米掠入射真空紫外单色仪的建成和试测成功标志着串列加速器核物理国家实验室已有能力成为我国高离化态原子物理研究基地之一。

核技术应用研究 在HI-13串列加速器上建成了我国第一台超灵敏加速器质谱计。这台加速器质谱计有两个特点:一是测量范围比较

宽,已经测定的微量核素包括 ${}^{10}\text{Be}$ 、 ${}^{26}\text{Al}$ 、 ${}^{40}\text{Cl}$ 和 ${}^{129}\text{I}$;二是灵敏度比较高,测定 ${}^{10}\text{Be}$ 的灵敏度达到 ${}^{10}\text{Be} / {}^9\text{Be} = 7 \times 10^{-14}$,接近国际先进水平,测定 ${}^{36}\text{Cl}$ 的灵敏度达到 ${}^{36}\text{Cl} / \text{Cl} = 3 \times 10^{-15}$,为国际先进水平。使用这台加速器质谱计开展了一系列的应用研究:测定了太平洋C-C区锰结核的生长速率和深海沉积物的沉积速率,为我国获得在太平洋地区海底资源开采权作出了重要贡献;参加了IAEA为了检验加速器质谱计测量 ${}^{129}\text{I}$ 作为核监督和核查手段的有效性而组织的美国、中国、加拿大、瑞士、以色列等国八个高水平的加速器质谱计实验室参加的国际比对测量,我们的结果同平均值的--致性在前三名以内。此外,使用这台加速器质谱计在塔里木油田形成年代的测定, ${}^{36}\text{Cl}$ 示踪法确定地下水迁移和年龄的研究, ${}^{79}\text{Se}$ 和 ${}^{126}\text{Sn}$ 的半衰期测定以及生物医学的示踪剂应用研究等方面也取得了许多成果。

与航天部501、510、511所合作,开展了卫星用电子元器件粒子辐射效应的模拟实验,用加速器提供的重粒子进行模拟辐照,研究单粒子翻转与锁定效应,获得了很好的结果。以我们的实验数据为依据,对东方红3号卫星做了单粒子效应敏感度评估,这是我国第一次做的发射前评估,受到了该领域权威人士的高度评价。

此外,与农科院合作开展了放射性束 ${}^7\text{Be}$ 注入农作物生物学效应研究,与中国人民解放军总医院合作完成了快中子和 γ 射线照射小鼠Lewis肺实体瘤的实验研究,采用正电子湮没寿命测量和内转换穆斯堡尔谱学分析了国产改进型316L不锈钢的辐照效应等。上述工作展示了核技术在国民经济和交叉学科领域广阔的应用天地。

四、实验室发展方向

北京串列加速器核物理国家实验室作为国内最大的核物理研究基地之一,作为我国核工业系统唯一的一个核物理研究基地,今后力争继续在三个发展方向上有所突破:集中资金和人力,少而精地开展核物理基础研究;紧密结合

γ 射线暴理论中有争议的两个问题

文冠一

γ 射线暴是指宇宙射线中的 γ 射线爆发,属宇宙线天体物理学研究的范畴.它是通过对 γ 射线爆发所释放出来的巨大能量的研究来认识我们目前的宇宙及天体的演化.

高能天体物理学主要研究发生在宇宙天体上的高能现象和高能过程,它研究的对象是:有高能粒子或高能光子参与的现象或过程,例如超新星爆发、星系统的活动和爆发、天体的X射线和 γ 射线辐射、X射线暴、 γ 射线暴、和中微子的产生、传播、演化等过程.随着类星体、脉冲星、宇宙X射线源、 γ 射线源的相继发现,空间技术和基本粒子探测技术在天文观察中的广泛应用以及高能物理学对天体物理学的不断渗透,对宇宙中高能现象和高能过程的研究日益活跃.高能天体物理学和高能物理学之间有十分密切的联系,它们互相渗透,互相促进.

而宇宙线天体物理学又是宇宙线物理学中的一个分支,它主要利用宇宙线进行天文观测.研究天体和宇宙空间的状态、组成和演化规律.研究宇宙线的起源、能量的强度分布、密度的分布、加速、传播和演变.

由于物理学理论,尤其是相对论、核物理学、粒子物理学和微波波谱学以及空间技术、红外技术和其它现代化的技术在天文学上的应用,使科学家们能够逐步认识到天体和宇宙的物理本质,

国内需求,小规模、高水平、有特点地开展核数据测量;核技术应用研究努力向其他交叉学科渗透.经过长期的酝酿和慎重的研究,中国原子能科学研究院提出了在现有的串列加速器上建设北京放射性核束装置的建议.它的建成将为我国核物理研究在新核素的合成与性质研究、远离 β 稳定线的核结构研究、核天体物理学研究等领域创造大量的机会,同时在材料科学、生命科学及原子物理等交叉学科中有广阔的应用前景.

抚今追昔,成绩来之不易.展望21世纪,

洞察天体和宇宙形成的奥秘,为天体物理学的研究和发展提供了理论基础.目前宇宙线天体物理学在高能天体物理学中占有越来越重要的地位,它正在为阐明地球、太阳和太阳系的来龙去脉,星系的起源和演化,宇宙的去、现在和未来,地球外生命和地球外文明等当代重大课题作出贡献.

50多年前,人们发现了一种穿透能力很强的辐射——宇宙线.宇宙线从宇宙中射到地球上,但多年来人们一直没有搞清这种辐射所包含的成份,现在,人们已经知道,宇宙线是一些带电的粒子——质子、原子核、电子和正电子,还有从宇宙中向我们射来的X射线和 γ 射线,中微子以及X射线暴和 γ 射线暴.

早在1958年人们就提出了建立 γ 射线天文学的问题,并由此进行了许多观察、测量和研究.1963年苏美两国签订了禁止在大气层和外层空间中爆发核装置的条约,为了监督该条约的执行,美国发射了四颗维拉卫星系列.卫星中的仪器是由洛斯·阿拉莫斯实验室设计的,能检测到由核爆炸释放出来的各类辐射:“在核裂变和聚变时发射的 γ 射线,热辐射和高能中子.”维拉卫星系统没有检测到由核试验所释放出的 γ 射线辐射,但从1969年7月到1972年7月,却意外地记录到了16次 γ 射线爆发,每次的持续时间由分之一秒到几十秒不等.特别需要指出的是,在

充满机遇和挑战.我们有信心按照“统观全局、突出重点、有所为有所不为”的原则,规划好实验室的中远期发展目标,争取为我国核事业和核物理学的发展再立新功.

我们的前辈科学家在极端艰苦的条件下几乎是从零开始发展起我国今天的核物理事业.我们今天有责任继往开来,建设好串列加速器核物理国家实验室,无愧于前辈科学家对我们的殷切期望.