

原子核物理及核技术在北京大学

江栋兴

(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 本文介绍了北京大学在原子核物理及核技术领域的工作和已建成的实验基地。实验基地的主体是一个小加速器群，它们能提供多种离子束流并在能区上彼此配套。

关键词 原子核宏观模型，核子间共有夸克模型，高温核，阻止本领，高频超导腔，高频四极场谐振腔。

北京大学技术物理系是为我国培养核科学技术人才的重要基地之一。为了提高培养人才的质量，特别是为了立足国内培养高层次人才的需要，教师在从事教学工作的同时，必须积极开展科学研究工作。因此，把我系建成一个具有适当规模而独具特色的实验基地是十分必要的和十分紧迫的。我们为此竭尽了全力。经过我们十来年的艰苦奋斗，今天终于建成了以相互配套、能提供多种轻重离子束流的小加速器群为主体的实验基地。下面简要介绍主要的实验设备和近年来开展的研究工作。

1 主要的实验设备

1.1 EN-18 型串列静电加速器及其现有束流管线

平面布局图如图 1 所示。除加速器主体和 90° 分析磁铁等少数部件由英国牛津大学转让外，我们研制和配置了气体循环处理系统、真空系统、束流输运系统和运行控制系统。一年多来的运行结果表明，这台加速器已全面达到在英国牛津大学的运行性能，有些性能还需提高和改进。目前，端电压可在 $(1 \sim 6)\text{MV}$ 连续可调，稳定度 $< 2\text{kV}$ ，已为

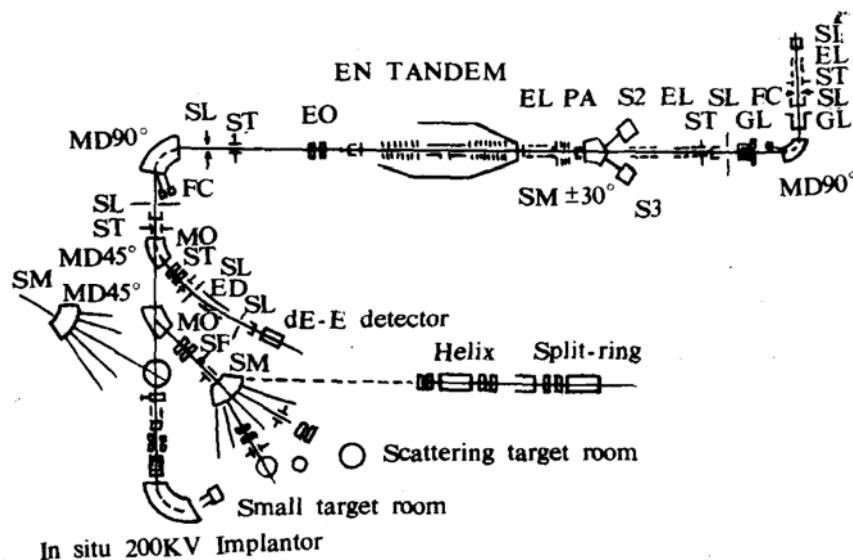


图 1 $2 \times 6\text{MV}$ 串列静电及束流管线平面布局图

物理实验提供过 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{19}F 、 ^{35}Cl 和 ^{79}Br 等多种离子束流。其典型数据列于表 1。现已

建成的五条管线是：

(1) 加速器质谱计管线^[1]：具有 18 个靶

位的专用高亮度离子源已引出 $350\mu\text{A } ^{12}\text{C}^-$ 和 $10\mu\text{A } ^9\text{BeO}^-$ 束流; 低能注入系统实现平顶传输和交替离子注入(如对 ^{12}C 和 ^{13}C 注入的持续时间分别为 0.3ms 和 1.0ms, 重复频率为 10Hz). 为减小同位素分馏效应, 除分析磁铁外的束流元件都采用静电型而非磁型束流元件, 高能束流线的分析系统主要由一个 90° 分析磁铁和 20° 圆筒型静电偏转器组成, 它们的质量分辨率分别为 1000 和 500; 粒子鉴别系统由 $\Delta E-E$ 计数器望远镜构成, 输出信号经过与 NIM 插件后由我们自己研制的基于微机的双参数数据获取系统记录; 整个管线的主要调控参数由专用控制系统实行远控. 目前, 已完成对整条管线的联调, 正在进行部分样品的测试. 今后, 拟在这条束流管线上集中开展考古、地质、海洋、生物医学和反应堆化学等边缘学科的研究.

(2)用于在场(in-situ)和在线(on-line)分

析的三束或双束共靶束流管线. 4.5MV 单端静电加速器, 200kV 中强流离子注入机和 $2 \times 6\text{MV}$ 加速器的束流可以同时引入到同一靶室系统. 近期准备设计新的靶室系统以替换暂时利用的旧靶室. 在这条束流管线上拟集中研究离子束与固体介质相互作用的动态过程, 即如何从一非平衡态向平衡态过渡的动态过程.

表 1 $2 \times 6\text{MV}$ 串联加速器典型束流数据

离子种类	端电压 (MV)	电荷态	离子源引出束流(μA)	分析束 (μA)
^{12}C	5.506	5	3.5	0.075
	1.004	2		0.180
^{35}Cl	5.000	6	1	0.060
^{79}Br	5.700	9	3.5	0.023
	5.010	6	5	0.120

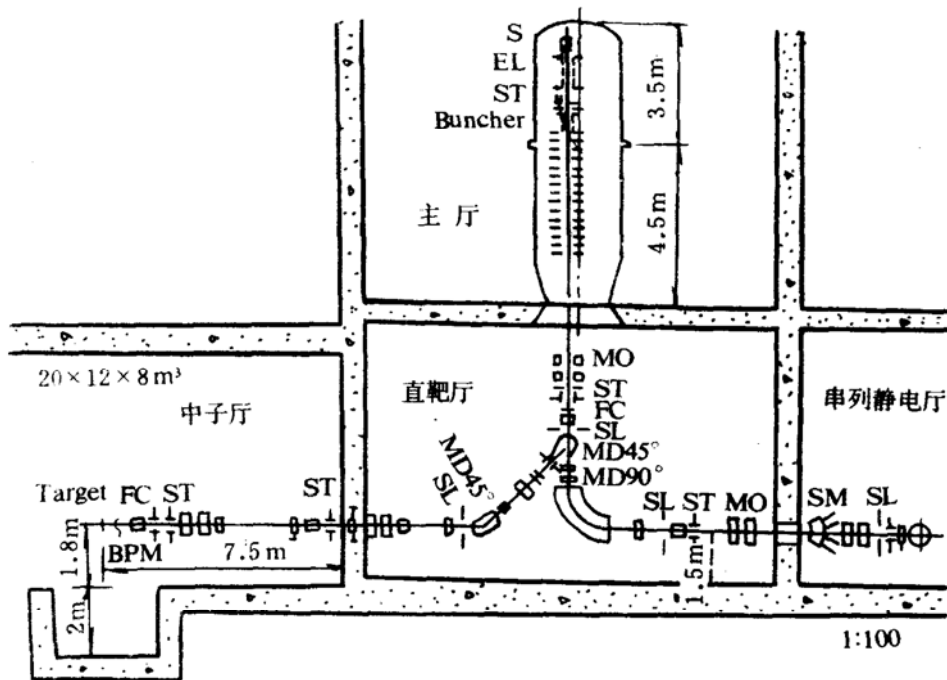


图 2 4.5MV 单端静电加速器及其束流管线平面布局图

(3)另外, 还有三条通用束流管线, 可 进行原子物理、轻体系低能核物理等基础研

究和开展高能离子束分析等应用研究工作。

1.2 4.5MV 单端静电加速器

该器是由我系进行物理设计, 上海先锋电机厂和我们共同完成工程设计并在该厂加工制造的. 虽然, 该器能够提供重至 Ar 的多种离子束流, 但它今后除提供串列加速器难以加速的¹⁴N 和¹⁵N 束流外, 将主要加速质子, 氘等轻离子束流, 以产生(6~11)MeV 的单能快中子. 目前, 该器可在 3MV 的端电压的连续束流状态下稳定可靠工作, 在中子厅靶上已获得 6 μ A 的氘束. 现正抓紧调整束流脉冲化系统, 以期达到如下指标: 重复频率 3MHz, 脉冲宽度(1~2)ns 和平均流强(3~5) μ A. 现已建成两条束流管线, 平面布局图如图 2 所示. 一条束流管线经 90° 大分析磁铁将重离子束流引入荷电粒子实验大厅, 既可与 2 \times 6MV 加速器和 200kV 注入机之束流共靶使用, 也可以单独使用. 另一条束流管线则经 45° 分析磁铁引出 p, α 等轻离子至 20 \times 12 \times 8m³ 的中子实验大厅. 由于大厅宽敞, 并在靶下地面挖有一大坑, 可以大大减小中子散射本底. 大厅还配有中子通量监测系统, 角分布仪, 快中子飞行时间谱仪和基于微机的四参数数据

获取系统. 可以预料, 它将成为开展快中子物理和进行核数据测量的理想场所.

1.3 NEC SSDH-2 型串列静电加速器及束流管线

整个设备的平面布局如图 3 所示. 该器自 1988 年正式运行以来, 运行正常可靠. 表 2 列出已经引出的束流典型数据. 为进一步提高流强, 我们已计划在离子源出口处配置分子泵, 以提高此区域的真空度和在加速高压头配置分子泵以及改进剥离系统的性能.

表 2. 2 \times 1.7MV 串列加速器引出的束流典型数据

离子种类	I_{LE} (源后) (μ A)	I_{HE} (开关磁铁后) (μ A)
H	6	1.5
He	0.8	0.28 He ⁺ 0.60 He ²⁺
B	2	0.5 B ²⁺
F	9	2.0 F ³⁺ 0.5 F ³⁺
P	3.4	1.2 P ²⁺ 1.0 P ³⁺
Si	26	11.0 Si ²⁺

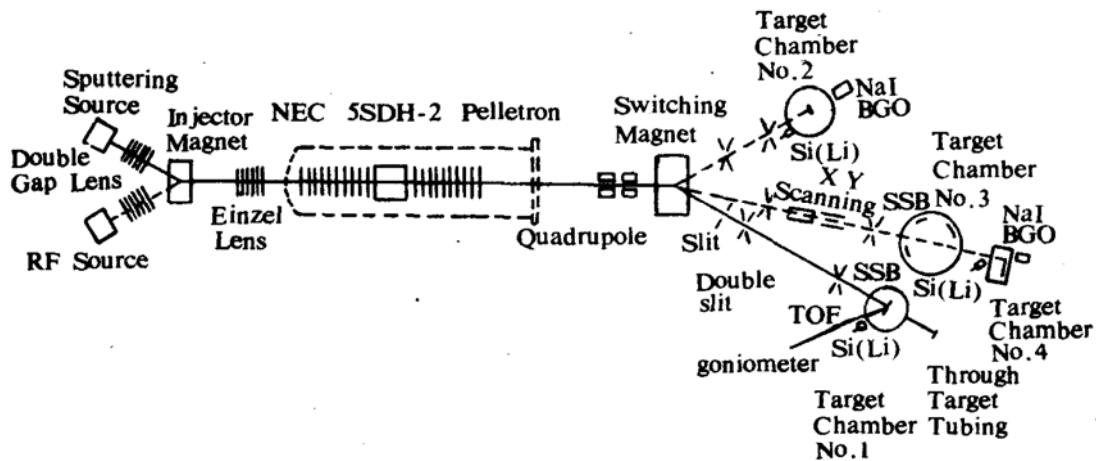


图 3 2 \times 1.7MV 串列静电加速器及束流管线平面布局图

现有的三条束流管线是(1)背散射及沟道分析管线:由相距 1.5m 的两个四爪光栏可

获得角发散小于 0.05° 的入射束流;靶室真空由涡轮分子泵系统维持, 真空度可达 1.33

$\times 10^{-4}$ Pa 量级. 靶室内配有三维测角仪, 其位置定位精度为 0.01mm, 角度定位精度为 0.01° . (2) 质子诱发 X 荧光及核反应分析管线: PIXE 的元素灵敏度因子对 Fe, Ni 和 Cu 分别可达 4.32×10^3 , 3.21×10^3 和 2.09×10^3 . 相应的最小检测限分别为 8.8×10^{-11} g, 7.4×10^{-11} g 和 1.02×10^{-10} g. (3) MeV 级离子注入管线: 该管线配有两个串联的靶室. 一个用于常温注入并兼顾核反应分析和重离子诱发 X 荧光研究; 另一个靶室则用于在几百度高温或液氮温度下的离子注入, 并可对常温注入后的样品进行在场背散射和沟道分析.

三条管线上的物理信号通过电缆与位于测量室的微机-S-88 数据获取系统相连接.

1.4. 200kV 中强流离子注入机

该注入机质子和 B^+ 的束流分别为 1 和 0.6mA. 除与 2×6 MV 和 4.5MV 做三束共靶实验外, 它可单独使用. 我们将发展氧离子源, 以便在该机上开展制造埋层工作.

1.5 其它配套设备

16 参数的多参数数据获取系统, 两台 Sun 多终端工作站(每台配置内存 8+8MB, 硬盘 2×207 MB 及共享的磁带机、光盘机和激光打印机等外设)以及各类探测器和电子学 NIM 插件.

2 主要研究领域及研究成果

2.1 理论核物理

2.1.1 原子核的宏观模型

我们建立了原子核的连续介质模型, 把原子核视为中子和质子密度可变的连续介质, 从而把原子核的能量表示为中子和质子密度的泛函^[2]. 在此模型框架中, 在引入壳修正后, 我们系统地研究了原子核和各种宏观性质^[3], 给出了精确的核质量, 均方根核电荷半径, 球形核的密度分布, 裂变位垒和同位旋相似态的库仑能差. 近年来, 我们又将此模型成功地应用于变形核, 获得了与实

验相符的电荷密度分布^[4], 也尝试用此模型研究原子核的高自旋态, 所得结果令人鼓舞.

2.1.2 原子核的裂变机制

利用布朗粒子运动模型及求解朗之方程的方法, 我们首次计算了高激发态二维裂变的全过程, 得到了接近实验结果的碎片动能、裂变寿命和碎片质量分布^[5]. 另外, 我们还利用裂变多模式理论全面分析了铀系核的碎片质量分布^[6], 从而为这种模型理论提供了实验验证, 在此基础上得到了关于碎片质量分布的半经验公式.

2.1.3 原子核内夸克自由度研究

我们建立了核子间共有夸克模型^[7], 完全用量子方式即几率方式处理核子波函数间的重叠效应, 避免了对夸克经典运动图像的描述. 这不仅简化了计算, 而且对夸克的运动方式及性质有新的了解. 在这模型的基础上, 较成功地处理了轻子—核间深部非弹(EMC 效应)^[8]、轻核的电荷形状因子^[9]和核内弱相互作用衰变等^[10]. 此外, 在这模型框架内, 我们计算了原子核的平均结合能, 结果与已知数值大体相符.

2.1.4 相对论重离子碰撞和核物质的状态方程

从不对称核物质的物态方程出发, 我们从理论上预言了: 对于不对称性不同的重离子碰撞体系, 应具有不同的核物质压缩系数和液—气相变临界温度. 如在相对论能区 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 相比, 压缩系数之比约为 0.9, 而液—气相变临界温度之比约为 0.95^[11]. 另外, 我们利用 Myers 和 Swiatecki 的小液滴模型, 从已知的约 1700 个核质量实验值, 分析了核物质压缩系数对于不对称性的依赖关系^[12].

2.2 实验核物理

2.2.1 中能重离子碰撞中高温核的形成与衰变性质研究

利用兰州的重离子研究装置(HIRFL)提供的 50MeV/u ^{12}C 轰击 ^{209}Bi 和 ^{197}Au 靶. 我们与兰州近物所合作, 用裂变碎片折叠角技

术实验测定了碰撞过程中转移线性动量的分布, 得到每个弹核子转移线动量的最可几值与靶核相关, 分别为 173 和 184 MeV/c. 实验结果还表明, 在分布的低值端, 约在 0.3 附近有一小的突起, 似乎可以认为是相应于弹核的 α 集团转移. 近期, 我们将用线动量转移作为碰撞剧烈程度“过滤器”, 选择不同产物的粒子蒸发, 中等质量碎片发射, 裂变性质及集体激发等性质的研究.

2.2.2 快中子物理及核数据编评

近年来, 我们一直在核工业总公司的支持下, 开展了对重要核数据的编评及部分核数据的实验测定工作^[13]. 与此同时, 还对 ^{252}Cf 等裂变中子源的中子能谱进行了测量(能区低至约 150 keV), 也得到在低能区 ($< 1\text{MeV}$) 偏离统计理论模型的预言^[14]. 我们与原子能院合作, 避免利用昂贵的放射性核素靶 ^{88}Y , 而用 $^{87}\text{Sr}(d, 2n)^{87}\text{Y}$ 反应获得 $^{88}\text{Y}(n, 2n)^{87}\text{Y}$ 的反应截面^[15]. 今后, 除继续进行重要核数据编评外, 将充分利用已建成的实验基地集中开展一些重要核的 (n, p) 、 (n, α) 和 $(n, 2n)$ 反应截面及次级中子能谱及角分布的实验测定工作.

2.3 重离子束的应用研究

2.3.1 低能(0.1~0.5)MeV/u 重离子阻止本领测量

由于实验技术上的困难, 目前这方面的数据缺乏而分散, 还没有可靠的论理计算. 我们用自己发展的弹性反冲探测质子法(ERDP)^[16]和重基质背散射(HSRBS)新方法测量了低能重离子穿过阻止介质的能量损失, 从而得到(0.2~0.5)MeV/u 能区各种重离子在不同介质中的阻止本领数据. 现已得到 C, O, Cl, F 等重离子在 Ag 中的阻止本领. 这无论对了解低能重离子穿过介质的能量损失过程及控制, 还是提供重离子束应用所需的重要基本数据都有重要意义.

2.3.2 离子束在微电子材料及器件制备和加工工艺中的应用研究

我们集中利用离子注入、离子混熔和离

子束改性等技术, 较系统地研究了与微电子薄膜材料制备及大规模集成电路新的制造工艺有关的微观过程和控制^[17], 发展了新的制作工艺. 现已首次获得十分完好的单晶结构, 它是具有广泛应用前景的 $\text{Si}(111)\text{-COSi}_2(200\text{\AA} \sim 500\text{\AA})\text{-Si}(850\text{\AA})$ 的新的微电子结构材料.

2.4 加速器物理

2.4.1 自由电子激光用 RF 超导腔实验研究

1988 年以来, 经过三年多的努力, 在基本建成具有国内较高水平的 RF 超导实验室的基础上, 在最近进行的低温实验中获得了稳定的、可重复的 1.5 GHz 铈谐振腔的超导的实验数据. 在 6K 时, 谐振腔品质因数 $Q_0 = 8.9 \times 10^7$; 4.2K 时, $Q_0 = 2.8 \times 10^8$; 2.3K 时, $Q_0 = (1 \sim 3) \times 10^9$, 腔的品质因素随温度的变化与 BCS 理论的预期值是一致的, 达到了国际先进技术水平. 微波线路经锁相后, 进行了初步的功率实验, 在 $Q_0 = (1 \sim 3) \times 10^9$ 条件下, 获得了 12 MV/m 的高加速梯度.

2.4.2 RFQ 加速腔研究

在国家自然科学基金的连续支持下, 经过近十年的不懈努力, 我们已经完全掌握了 RFQ 腔体的场分布计算、测量和控制, 并成功地建成了一台可供实际应用的高质量 RFQ 加速腔. 准备在近期内明确 RFQ 加速腔的实际应用目标, 配置相应的离子源、靶室及相关束流输运系统, 完成一台可有某种实际用途的 RFQ 加速器样机.

参 考 文 献

- 1 Chen Jiaer, et al. N.I.M., 1990, B52:306
- 2 胡济民. 高能物理与核物理, 1981, 5:244
- 3 胡济民等. 高能物理与核物理, 1985, 7:1
- 4 郑春开. 高能物理与核物理, 1990, 8:753
- 5 Zhong Yunxiao, Hu Jimin. 50 Years with Nuclear Fission, 1989, 668
- 6 Wang Fucheng, Hu Jimin. J.Phys., 1989, G15:829

- 7 Sun Ji, et al. J.Phys., 1991, G17:843
 8 涂丽萍等. 北京大学学报(自然科学版), 1989, 33:13
 9 Sun Ji. Chinese Phys. Lett., 1990, 3:105
 10 涂丽萍, 孙信. 高能物理与核物理, 1989, 10:890
 11 Chung Kaichong, Wang Chengshi. Commun. Theor. Phys., 1989, 11:499
 12 Wang Chengshi, et al. Phys. Rev., 1989, C40, 6:2881
 13 Tang Ganyou, et al. International Atomic Energy Agency. INDC(CPR)-15/L, 1989; INDC(CPR) 1991, 023
 14 Tang Ganyou, et al. Proc. in Conf. of Nuclear Data for Science and Technology, Mito, Japan, 1988, 755
 15 黄斐增, 施兆民等. 高能物理与核物理, 1990, 4:366
 16 Lu Xiting, et al. Nucl. Instr. & Meth., 1991, B58:280
 17 Ding Furong, et al. IBMM90. Knoxville, TN, USA. Sept. 9~14, 1990

Nuclear Physics and Nuclear Technology in Beijing University

Jiang Dongxing

(Department of Technique Physics, Beijing University, Beijing 100871)

Abstract Activities on nuclear physics and technology in Beijing University are introduced. The experimental base including four accelerators which match well one another in energy region and can provide various ion beams is mentioned.

Key Words nuclear macroscopic model, model of joint possession of Quarks by nucleons, high temperature nuclei, stopping power, RF superconducting cavity, RF Quadrupole resonator.

(上接第 54 页)

开国际核物理会议是最适当的时机, 建议中国核物理学会应在明年的 IUPAP C12 委员会上, 积极争取主办一九九五年的国际核物理会议. 会议认为, 为了真正达到促进中外学术交流和提高中国国际地位的目的, 核物理界应努力争取多出高质量的成果, 共同为会议贡献力量. 中国核物理学会和国际核物理会议承办单位, 要和全国各有关单位及其科技人员一道, 团结一致, 抓紧时间, 积极做好各项筹备工作. 会议希望国家有关部门和单位对此项工作给予大力支持.

会上代表们选举了第四届理事会, 建立了中国核物理学会的新领导机构. 会议责成新理事会认真研究, 努力争取尽快完成中国核物理学会的社团登记工作.

会议对今后的学术活动和学会工作作了安排, 除以前已作安排的活动外, 并决定一九九二年由吉林大学物理系在长春承办召开全国第二次核技术应

用战略讨论会, 一九九四年由西南师范大学在重庆承办第九届全国核物理会议.

会议期间, 针对我国即将正式实施版权法的现实情况召开了专题讨论会, 商讨了如何交流外科技期刊、书籍和资料的问题. 具体建议和措施, 是由中国核物理学会出面组织一个互助的资料交流网, 为各会员单位和会员提供方便.

与会代表衷心感谢西北核技术研究所和陕西省科协、省核工业局、省核学会对会议的关心和支持. 西北核技术所的领导和许多同志为承办会议付出了大量的辛勤劳动, 与会代表对他们的认真刻苦精神和出色组织工作十分赞赏, 对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢. 代表们对陕西省军区招待所的热情接待、周到服务以及精采的文娱演出印象深刻, 在此也一并表示感谢.

(中国核物理学会秘书处供稿)