

北京大学加速器及核物理和核 技术研究工作进展

陈佳洱 包尚联 卢希庭

(北京大学技术物理系和

北京大学重离子物理研究所)

一九八八年八月

一、加速器状况及加速技 术的研究

十年来,北京大学技术物理系和重离子物理研究所,经过共同努力建立了能在较宽的离子种类和能量范围内配套工作的四台低能离子加速器:

1. 200千伏重离子注入机

这是一台自制的紧凑型、中等流强离子注入机,可提供质子和多种重离子束,离子在加速前先经分辨率 $M/\Delta M \geq 200$ 的双聚焦 90° 磁铁分析,加速终了后注入有50枚靶片的靶室,束流在靶室中的均匀扫描面积为 $10 \times 10 \text{cm}^2$,主要用于离子束与固体及高分子材料的相互作用的研究以及半导体离子注入过程的研究。

2. 5SDH2小型串级静电加速器

这台由美国NEC公司生产的加速器于今年3月正式投运。这台加速器可加速周期表上几乎全部元素的离子,工作的高压范围为 $0.1-1.7 \text{MV}$ 。该器电控单元有较大的抗打火和电冲击的能力。

迄今在这台加速器上进行的核分析测试工作,包括在半导体微电子固体能谱以及高温超导材料等方面的研究课题共十余个,已发表论文十一篇,其中四篇在国际会议上报告,已为四名硕士生和九名大学生的论文提供了基本的实验手段。

3. 4.5MV单级静电加速器^[1]

这台由北京大学和先锋电机厂联合研制的静电加速器,直径2.4米,高8.3米,总重量约20吨。它可加速质子、氘和多种电荷重离子束。为了满足飞行时间法的实验要求,加速器头部高压电极内设有脉冲束流化设备,以在靶上提供1-2ns的脉冲束,其束流利用率比常规高出47%。预实验同时还证实:短焦距下的双漂移聚焦器其束流效率仍比常规正弦波聚焦器高出约一倍。为了放置功率较大的重离子源,头部初聚焦和分析系统及脉冲化设备,这台加速器具有一个相当大的脑袋—直径1.4米,高2.3米,重约1吨的高压电极。为了改善加速管中的真空度,加速器上设有微分抽气系统。该器有两条束流干线:一条轻离子引入中子大厅;另一条经一曲率半径为1.2m的 90° 分析磁铁引入荷电粒子束实验大厅。目前这台加速器机械和电气部分安装调试已基本完成,大气下输电电流可达 $230 \mu\text{a}$,离子源等头部设备,已可在控制台上操作运行将束注入加速管,目前正进入高压和载束总调试的阶段。

4. EN-18加速器

这台由美国HVEC公司制造的6.5MV串级静电加速器是由英国牛津大学运来我校的。我们去年末开始安装,至今加速器的本体、离子源、80kV预加速注入器、分析磁铁和气体处理系统都已安装完毕。目前正进行空载升高压和加速管锻练的试验阶段。

鉴于加速器质谱机(AMS)在地质年代学、考古学以及天体物理学等方面的重要意义和该器适宜于开展该领域工作的特点,我们已与中科院地质所、原子核所、社科院考古所等联合申请并承担了应用于地球科学的AMS的研制。我们计划先在已运行的 2×1.7 MV串级静电加速器上调试AMS各专用器件并取得C、Be等核素测量的初步结果,然后以EN为基础建立核技术在地球科学上应用的向全国开放的实验室。为此我们的近期计划和目标是:①在已有纯净室的基础上,建立制备纯净样品的手段并制出合乎AMS要求的C、Be、Al靶样;②建成一条以串级静电加速器为核心的、配有专用离子源、低能注入分析系统、高能分析和 $\Delta E-E$ 探测器的AMS专用线及在线数据获取系统;③取得C、Be、Al的初步应用成果,为今后高水平的AMS常规分析积累数据资料和经验。计划在EN上建成了AMS专线之后,逐步提高分析的灵敏度和精度并扩大核素检测的范围至C1—36以上。为了这个目的,我们还打算利用已有的螺旋波导加速结构研制的成果,在EN上增接3兆伏后加速段。

5. RFQ加速器的发展和研制

近年来迅速发展起来的射频四极透镜(RFQ)加速结构,被公认为最有效的低能强流结构。它能直接加速由离子源引出的数十keV的离子束至每核子2MeV左右,束流强度可达数十乃至数百毫安或更高,束流输运效

率达90%以上。我们发展一种新型的由多个分离环谐振器(Split-ring Resonator)整体激发的四杆RFQ结构(图1)。试验表明这种结构有三个优点:①将多个分离环联结在一起形成一个机械强度大大高于单个分离环的框架系统,有利于RFQ在高场下稳定工作;②工作频率在14-100MHz范围内,适宜于强流轻、重离子束的工作;③场分布均匀,不同模式之间的频率间隔较宽,有利于在较低公差要求下稳定运行。迄今在动力学研究和RFQ腔体结构设计方面已取得了一些进展^[2]。

三、核物理方面的研究工作

1. 原子核的宏观模型

原子核宏观模型是我们理论物理研究小组近几年来的主要工作^[3]。我们用原子核宏观模型得到的质量公式,计

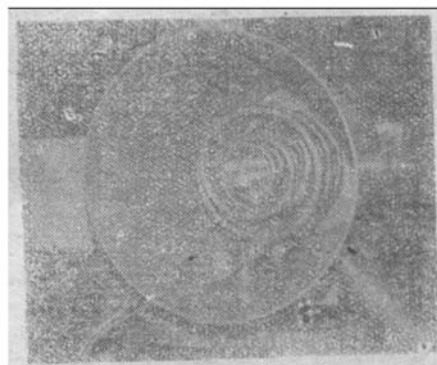


图1. 重离子四杆RFQ结构

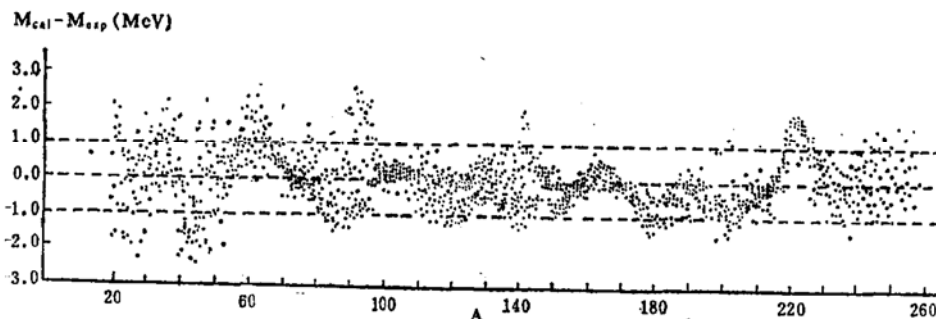


图2. 用原子核宏观模型计算的原子核质量和实验测量值差的分布

算了近1500个核的质量,均方根偏差是0.805MeV(图2)。其均方根偏差和Möller和

Nix用目前世界最大最新计算机和别的模型计算的结果相当,但我们计算用的机时少得

多而得到的参数比Möller和Nix的多^[4]。为了使原子核宏观模型自成体系,壳修正的问题正在考虑中。目前正在把宏观模型应用于计算裂变位能曲面、进行高自旋态和重离子核反应方面的研究。

2. 低能核物理的基础研究

我们在八十年代初,正式提出碳离子放射性的预言,指出一些重核存在碳离子放射性的可能性并建议用Ra-224和Ra-223作为研究对象^[5],同时进行实验探索。我们测得的分支比是 $(8.7 \pm 1.7) \times 10^{-10}$,与各家的实验结果相一致。今天人们已经公认一种新型放射性—重离子放射性的存在。近年来,我们和国内外一些实验室合作,开展了一些低能核物理的实验研究,有关课题包括重离子核反应机制、高自旋态、以及DSA方法测核能级寿命^[6]等方面的内容。

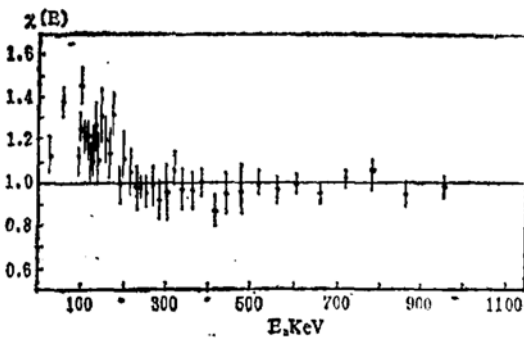


图3. Cf-252自发裂变中子谱(低能端)和Maxwell在 $T=1.42$ MeV时的比

3. 裂变机制的研究和裂变参数的测量

在裂变机制的研究方面我们已经开展了多年的工作,我们用布朗运动模型计算裂变几率,正在处理多维运动学问题,已经得到了一批结果^[7]。我们用宏观模型计算了位能曲面,证实了裂变的多通道理论;我们还用系统学的方法得到了裂变碎片质量分布的半经验公式,并把发射中子前的碎片质量分布从裂变后转换到裂变前。与此同时我们还和原子能科学院合测了Cf-252低能端的自发裂变中子谱^[8](图3),在国内首次把该能谱的能量范围推到200keV,为我单位4.5MeV静

电加速器建成后开展快中子诱发裂变中子谱的工作作准备。一个可用于裂变多参数测量的双屏栅电离室已经研制成功。

4. 高能物理研究

我们已经在标量介子场及物质的口袋晶体模型^[9]、夸克禁闭和禁闭解除^[10]与液气混合相核物态方程^[11]等方面做了一定的工作,并集中在夸克—胶子等离子体以及它与强子相互转变的形式、条件和相关的现象等方面开展工作。目前我们已把这几方面的工作集中于高能重离子反应,高能重离子反应是当前物理学发展的主要前沿之一。

四、核物理和核技术应用

核物理和核技术应用是我们利用现有加速器进行的主要研究方向。

1. 核数据的测量、评价和理论计算

在中国核数据委员会的领导和经费支持下,我们参加了核数据的评价、测量和理论计算方面的工作。最近我们完成了天然钙的全套数据评价,并和原子能科学院合作进行铀-8、钚-9的全套数据再评价,我们正在开展锂-7非弹中子角分布的测量工作。我们和原子能科学院合作开展了用替代法测中长寿命核素的激发函数,已经得到初步结果。我们还编制了一个用于中重核核反应截面计算的程序HFTT,用于计算入射道和出射道含有n, p, d, t, τ , α 等粒子的核反应截面,可在微机和VAX机上实现,使用方便,需要调整的参数少。该程序已入数据中心程序库并准备作国际交流用。

2. 核电子学和数据获取系统研究

我们以微机为基础开展多参数获取研究,主要有三个系统:基于IBM-PC/XT微机的“1024至6553道核谱数据与处理系统”,采用了国内首创的DMA方式顺序获取,可进行 128×128 、 128×256 、 256×256 双参数获取,变换时间为7.5微秒,以八位微机为基础建立了“4096 \times 4096核谱数据在线监测系

统”，可以用于数据获取也可以用于数据在线监测。采用伪随机数变换原理，用64k内存的微机而不是用小型机实现了速度为4.0—7.5微秒的获取系统^[12]，基于IBM-PC/XT(AT)的“微型化四参数核谱数据获取系统”^[13]，每个参数的标码长为12bits，可任选两个参数进行在线监测，正在进行裂变多参数测量实用试验。

3. 离子束分析在其它学科中的应用

(1). 核反应分析NRA

我们用质子诱发的(p, γ)共振反应测了半导体材料Ga-Al-As中的Al，用(p, α)的能谱分析法测量过钛表面层中的0-18的深度分析^[14]，最近我们还发展了一种测量硼元素的新方法利用能量为2.62MeV的B-11(p, α)Be-8反应的能谱分析法测量了材料中的硼含量的深度分布。

(2). 卢瑟福背散射在薄膜研究中的应用

耐用金属硅化物(NbSi₂)是大规模集成电路中栅极和互连线的材料，氮化钛(TiN)也是一种高强度、高熔点低电阻率的新型薄膜材料。对这两种薄膜材料，对Nb/Si 17层膜样品在炉退火和扫描电子束照射两种工艺下形成的硅化铌情况进行了研究^[15]，用背散射方法测的谱示于图4，并研究了硅化物中高浓度杂质再分布问题，我们还开展了TiN膜层制备工艺及形成过程研究，特别研究了在氮气氛下微量氧气对膜形成的影响及可能的机制，并研究了用TiN为硅铝层间阻挡层的作用。

(3). 质子荧光分析PIXE

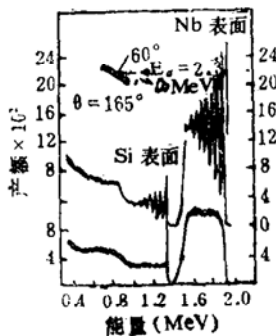


图4. Nb/Si多层膜背散射分析谱
(下部是退火后的情况)

我们在5SDH-2串列静电加速器上建立的PIXE(含NRA方法)输运线在提高灵敏度、降低本底方面吸取了国内外的优点，对Cu, Ni等元素的测量低限为 5×10^{-9} 。目前已经测了大量生物、环境样品，包括羊毛、头发，得到了较好的结果^[16]，老年人头发的PIXE谱示于图5。

(4). 弹性反冲探测分析(ERDA)

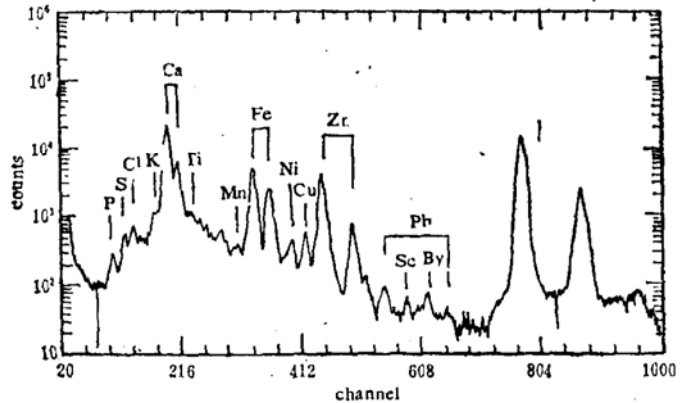


图5. 人体头发PIXE分析谱

弹性反冲探测分析是近几年才发展起来的一种离子束分析方法。用这种方法我们已经初步分析了材料中的氢元素。

4. 离子和固体相互作用研究

已经开展的工作介绍如下：

(1). 离子束混合诱导的材料表面改性

我们已在离子束混合的物理机制、离子束混合诱导的固体膜相变过程，以及离子束诱导的贵金属、近贵金属、难熔金属和稀土金属硅化物的形成和生长规律进行了系统研究^[17]。我们发现在离子束混合下，无限供给体系的相变过程主要依赖于混合中各组元在界面处的扩散流，热力学判据处于次要地位；而有限供给体系的相变是成核控制的，有整体反应的特点。在辐射增强扩散和化学驱动力对混合的贡献是主要的，对临界转变温度的影响的研究也已得到相应的结果。

(2). 材料中的氢分布分析

我们和科学院物理所合作在 2×1.7 MV小加速器上用核反应实现了测氢分布工作。和国外同样方法比，我们的方法费用低，分

析深度深, 处理数据简单等优点。以此方法研究了氢对硅化物多层膜的半导体器件性能的影响, 指出经过退火处理使氢定向扩散的办法可以改善器件的性能^[18]。

(3). 离子束与固体相互作用的计算机模拟

目前, 国际上对离子与固体相互作用的理论研究已经比较深入。我们近五年来用微机开展了这方面的探索。我们的工作分为两部分: 一是用解析方法来研究离子束与固体相互作用的几率分布^[19]; 二是用Monte-Garlo方法研究其动力学过程, 用这种软件已经对非晶材料的构型问题、动态碰撞级联过程等进行了研究, 得到了一些阶段性成果。

(4). 离子注入材料改性的研究

我们用B、F、Ar等离子注入PMMA, CMPS等多种高分子薄膜, 从宏观和微观两方面研究了注入后高分子膜的溶度特性及表层结构、组成的变化。由实验结果得到了正性胶的离子束曝光性。结果表明, 离子束正性抗蚀胶的灵敏度比电子束的高2—3个数量级, 离子束曝光的分辨率极限小于0.1mm。我们还系统地研究了离子注入后高分子膜的氧化问题。探讨了离子注入增强氧化、自动氧化、氧化保护等过程, 并从实验上考察了氧化的程度与注入离子质量、能量、剂量及高分子结构、注入后与时间的关系等。我们还用高能离子注入半导体材料, 研究材料的陷缺并成功地发现了后来被命名为北京6号的缺陷。

参考文献

1. 陈佳洱, 1979年全国粒子加速器会议论文集, P43
2. 陈佳洱等, 1987年第三次中日加速器会议文集
3. Hu Jimin et al., Proc. of Conf. on Heavy Ion Phys., Lanzhou, China, Sept., 1987
4. P. Moller and J. R. Nix, Nucl. Phys., A361(1981)117
5. 卢希庭主编, 《原子核物理》, p92, 原子能出版社, 1981
6. Lu Xiting et al., NIM A, to be published in 1988
7. Hu Jimin et al., Proc. of Conf. on Heavy Ion Phys., Lanzhou, China, Sept., 1987.3
8. Tang Guoyou et al., Proc. of Mito Conf., Japan, May, 1988
9. Zhang Qiren, Proc. of International Symp. on Medium Energy Phys., Beijing, 1987, to be published
10. Ji Sun, and B. -Q. Ma, Proc. Int. Symp. on Medium Energy Physics, Beijing, 1987
11. Wang Zhenxing, the Commun. in Theo. Phys., 1986
12. 夏松江, 核电子学与探测技术, 5(1987)257
13. 夏松江、刘建铭, 核电子学与探测技术, 3(1988)139
14. 毛联等, 北大学报, 4(1988)131
15. 夏宗璜等, 核物理会议, 南京, 1988
16. 谢淑贤等, 核物理会议, 南京, 1988
17. Yang Xihong et al., J. Vac. Sci. Tech., 1988
18. Luo Fei et al., Nucl. Phys., 8(1986)259
19. Yu Fuchung, et al., Proc. of 4th Annual Conf on Tech. of EIP Beam, BII, Shijiazhuang, Nov., 1986