

CIAENAL 核分析研究的进展和现状

朱升云

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 本文简介中国原子能科学研究院核分析实验室(CIAENAL)的核分析研究进展和现状,重点介绍活化分析、加速器质谱、核固体径迹探测器、离子束分析和核效应研究.

关键词 核分析, 加速器质谱, 活化分析.

1 引言

中国原子能科学研究院(CIAE)是我国综合性核物理研究基地.在核物理研究基础上,最早开展核分析研究,建立各种核分析方法,成立了核分析实验室(NAL).长期以来,CIAENAL的核分析研究取得了丰硕成果,获得国内外同行好评,某些工作达到了国际先进水平.CIAENAL的研究工作得到国家自然科学基金(NNSF)、核工业总公司(CNNC)和国际原子能机构(IAEA)的支持,目前在研的NNSF项目6项、CNNC基金项目7项、CNNC合同1项、IAEA合同3项、国防科技预研基金项目1项.CIAENAL正在开展的研究工作有:活化分析、加速器质谱、核固体径迹探测器、离子束分析和核效应研究.

2 活化分析

开展的活化分析有堆中子活化分析(ReNAA)、快中子活化分析(FNAA)和带电粒子活化分析(CPAA).

高压倍加器上用d-T中子源开展14MeV FNAA,进行ReNAA难以分析的O、F、Si、P、S等痕量元素分析.CPAA在回旋加速器和HI-13串列加速器上进行,测量高纯材料中B、C、N、O等轻微量元素.张士琛等在HI-13串列加速器上用薄层CPAA进行内燃机的使用寿命估价和部件制造工艺的改进研究(在研IAEA合同).

1958年我国第一座重水反应堆投入运行,开始了ReNAA研究.迄今,在环境科学、生命科学、地质和宇宙学、材料科学、考古和法医学、标

准参考物等方面作了大量工作,取得了很多研究成果和经济效益,下面仅举几例说明.标准参考物国际比对是ReNAA的“国际奥林匹克竞赛”.田伟之和倪邦发等参加了28个国家参加的IAEA湖底沉积物参考物质SL-3中45种元素的定值分析国际比对,在所有参加实验室中,给出元素值最多,是唯一给出全部26个IAEA推荐值元素和无一偏离群值的实验室.孙用均等分析了月球样品Apollo-17月海玄武岩,测定了36个元素的含量,与报道的Apollo-17月海玄武岩元素含量一致.实验结果对了解月岩、月壤的成因和月球演化史有重要意义.人体疾病与微量元素有关,赵砚卿等对人体器官和头发微量元素间的相关性作了测量,更好地确定人体疾病和头发微量元素的关系.袁玲等用超热中子活化分析法测定了人尿中的碘元素含量,为临床诊断克山病提供了重要依据.纪春城等研究了高血压与人发中32种微量元素之间的关系,为我国高血压的一级预防提供了科学依据.ReNAA组对陨石、岩样、河海沉积物、坠冰等进行了分析测定,建立了一系列地质、环境标准.食品标准的建立有重要的意义,方朝荫等对我国首批食品标样定值和均匀性作了测量.宋全勋等建立了国内首台缓发中子计数法测铀装置,铀探测下限可达 7×10^{-4} ppm.分析了几万个铀样,在我国铀矿普查中起了很重要的作用,取得了很好的经济和社会效益.田伟之等发展和完善了中子活化分析参量法的标准化,实现了堆中子活化分析的全面参量化,得到了国内外同行的重视.研制的缓发中子计数法测铀和中

子活化分析参量法获得国家科技进步三等奖。

3 加速器质谱(AMS)

AMS 是一种探测稀少核素的新方法, 探测同位素丰度的灵敏度可达 $10^{12} \sim 10^{15}$, 能测量物质中含量为 10^5 原子的核素. 在地球科学、考古学、环境科学、核科学、材料科学和生物医学等方面得到了广泛应用. AMS 研究国外始于 70 年代下半期, 80 年代初蒋崧生等在我院 2.5MV 静电加速器上开始了 AMS 研究, 测定了重水中的 $^3\text{H}/^2\text{H}$ 比, ^3H 的测量是国际上最早的 AMS 测量之一. HI-13 串列加速器投入运行, 蒋崧生等建立了重离子 AMS, 测量了 ^{10}Be 、 ^{36}Cl 和 ^{129}I 等微量元素. 1990 年, 通过 ^{10}Be 测定的锰结核生长速率和深海沉积物沉积速率的研究结果, 为我国申请太平洋深海区锰结核矿产资源的开采作出了重要贡献. ^{36}Cl 和 ^{129}I 是两种重要的示踪剂, 用于地下水年代和来源研究、岩石与沉积物的年龄测量、评估核设施环境和核废物安全贮存. 蒋崧生等对东北连山关铀矿地下水和矿石样品, 柴达木盆地朵斯勒湖石盐样品及河北地下水中的 ^{36}Cl 作了分析, $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比值灵敏度达 3×10^{-15} . 蒋崧生等测量了海藻、铀矿石和地下水中的 ^{129}I . ^{26}Al 的测量正在进行中, ^{26}Al 的测定在生物医学上有重要的意义. AMS 是 HI-13 串列加速器上活跃而有成果的研究课题.

4 核固体径迹探测器(NSSTD)

该院在国内最早开始 NSSTD 研究, 在 NSSTD 基础和应用方面作了大量富有成效的研究. 作为 NSSTD 研究水平的标志, 该院在 1992 年承办了第十六届国际核固体径迹会议.

在核爆试验中, 郭士伦等用 NSSTD 测量了核燃料、中子能量和通量随位置的变化等, 为我国核武器试验作出了重要贡献. NSSTD 广泛用于年代测量, 郭士伦等测量了天皮山白云母和海南岛玻璃陨石的年龄, 建立了年代测量标样. 郭士伦等在国际上首次采用灰烬法考古, 测量了北京猿人年代. 裂变径迹法探测铀矿是

NSSTD 的一个重要应用, 郭士伦等对该方法作了系统研究, 为我国裂法铀矿普查作出了贡献. 固体气泡损伤探测器是一种新型的中子探测器和个人剂量仪, 加拿大 1983 年首先制成, 郝秀红和郭士伦等在国内首先研制成了固体气泡损伤探测器. 郭士伦等用 NSSTD 测量了相对论核反应产生的中子能量和通量.

该院生产的核乳胶用户遍及全国, 广泛用于核物理、天体物理、地球物理、生物和冶金等方面. 并长期用于核爆试验中中子能谱和中子通量的测量. 最近, 刘泳莲等将其用于核素迁移材料的选择研究, 采用核乳胶自射线照相法测定岩石的核素吸附性能. 郑文己等将核乳胶用于卫星宇宙线的研究.

5 离子束分析(IBA)

离子束分析是材料表面分析和材料元素成分及含量测量的有力工具. 利用 CIAE 的加速器开展了多种 IBA 研究.

5.1 质子激发 X 荧光分析(PIXE)

70 年代中开始 PIXE 分析, 用其进行考古、生物医学和食品分析等研究. 马鑫培等作了 3300 年前铜战斧铁刀刃的元素分析. 分析表明, 刀刃的铁是陨铁而不是铸铁, 该铜战斧是第一件出土的含铁武器, 这对了解当时制铁工艺有重要价值. 毛一仙等与南开大学合作进行了人体全血中元素含量与白血病的相关性测量. 实验测量的全血中 Cu、Zn、Ca、K 含量和 Cu/Zn、Fe/Zn 之比是白血病早期诊断和治疗效果的重要依据. 毛一仙等对藻酸钠排出吸入到人体的 ^{90}Sr 的功効作了检验. 对服用藻酸钠的人的尿和血浆作了分析, 结果表明该药能有效地将 ^{90}Sr 排出体外, 而不影响人体新陈代谢. 马鑫培等对国产啤酒作了微量元素分析, 结果表明含有大量人体需要的微量元素, 而有害元素含量较允许量低得多, 因而誉为“干净啤酒”.

5.2 核反应分析(NRA)

NRA 用于轻元素分析, 已经测量了 B、N、O、F、Al 等微量元素在材料中的深度分布, 最好

深度分辨达 94 埃. 胡选文等用 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}^*$ 共振反应和 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应测量了反应堆燃料元件包壳锆合金管酸洗过程中表面污染氟的深度分布及含量与抛光深度关系, 确定了最佳抛光去氟工艺. 在国际上胡选文等首次采用 $^{14}\text{N}(\text{d}, \alpha)^{12}\text{C}$ 反应成功地测量了氮在 Fe、WC 和 CrC 中深度分辨.

5.3 卢瑟福背散射分析(RBS)和沟道效应(CE)

RBS 用于薄膜化学成分和厚度测量. 许国基等采用 RBS 测定了核物理实验用靶的厚度、均匀性和靶杂质成分及其含量. 赵玉华等用 RBS 方法研究了 Ar 和 Xe 的扩散现象. 郑胜男等用 CE 研究了中子嬗变掺杂 GaAs 的辐射损伤及其退火效应.

5.4 轻、重离子弹性反冲探测(ERD)

氢能扩散和渗透到几乎所有金属中, 因此 ERD 的氢分析有现实意义. 郭清江等在静电加速器上用 $\text{H}(\text{d}, \text{p})^0\text{ERD}$ 测量了 a-Si、Fe、Zr、Ti 中的 H 含量和分布. 胡选文等在 HI-13 串列加速器上建立了高能重离子 ERD 装置, 用 35MeV ^{35}Cl 测量了 a-Si 膜、H 注入 Si、TiD 膜. 对 TiD 样品, 同时测定了 D 和 H 的深度分布.

6 核效应研究

6.1 正电子湮没谱学(PAS)

PAS 研究虽始于 1987 年, 但以有自己特色的工作, 获得了国内外同行好评.

高温超导一问世, 就对其机制作了研究, 取得了最早的研究成果, 发现高温超导跃迁时电子结构变化. 其后对一系列 Y123 和 Bi 超导体作了系统研究, 发现高温超导跃迁电荷转移和正常态异常.

半导体材料辐照缺陷研究, 以前都限于低注量 ($< 10^{15}/\text{cm}^2$) 辐照产生低浓度简单缺陷研究. 高注量辐照缺陷研究尚属空白. 我们与日本原子能研究所合作开展了 $10^{20}/\text{cm}^2$ 快中子辐照在高纯硅中产生的缺陷及其退火效应的研究. 发现硅中产生高浓度复杂缺陷: 双、四空位

和单、双、四空位—氧复合体; 退火过程中双空位复合成四空位, 与低注量辐照完全不同. Al_2O_3 和各种掺 B 硅的实验正在进行中.

堆材料受中子辐照, 当累积中子注量达 $10^{23}/\text{cm}^2$ 时, 产生严重辐射损伤、诱发反应堆事故. 现有的中子源强度太低, 不能用于 $10^{23}/\text{cm}^2$ 中子辐照损伤研究. 高能重离子辐射损伤率较中子高 $10^5 \sim 10^7$, 所以在 HI-13 串列加速器上, 用 N、S、O、C 轰击国产常规和抗辐照型不锈钢、进口不锈钢和 Nb 等堆材料, 模拟 $10^{23}/\text{cm}^2$ 中子产生的辐射损伤, 用 PAS 研究产生的辐射损伤, 取得了有实用价值的成果.

NbH_x 和 PdAgH_x 是重要的能源材料, 通过氢行为研究, 提高贮氢效率的工作正在进行, 这是 NNSF 青年基金项目.

6.2 超精细相互作用(HFI)

采用时间微分扰动角关联(TDPAC)和角分布(TDPAD)方法, 建成了国际上第一台快-快符合 BaF_2 TDPAC 谱仪和串列加速器 BaF_2 TDPAC 谱仪, 时间分辨均可达 $\sim 180\text{ps}$.

在国际上率先采用 TDPAC 研究材料晶格结构的有序—无序相变, 一个典型的例子是 InGaAg 合金. PdSi 和 $\text{PdSiAg}_{0.05}$ 合金成分仅差 5%Ag, 但宏观性质不同, 且各随温度变化. 用 TDPAC 作了微观机理研究. 结果表明, PdSi 有两种结构, 随温度两种结构互相竞争; PdSiAg 只有一种结构, 且有温度相变. 非晶态材料是感兴趣的新型材料, 在国际上我们较早用 TDPAC 研究非晶态结构. 我们的 PdSi 和 PdSiAg 非晶态结果证实了非晶态长程有序短程无序的结构理论.

TDPAC 是材料缺陷微观研究方法, 我们用 ^{111}In 作探针研究了 Ag、Pd、Si 等的辐射损伤及其退火和自愈效应. 在国际上第一次用 ^{178}Hf 作探针研究了 ^{178}W 辐照模拟 $10^{19}/\text{cm}^2$ 快中子在 Si 中产生的辐射损伤.

高温超导几乎是各种方法的研究对象. 采用 TDPAC 方法对一系列 Y123 和 Bi 基超导体作了研究. 在高温超导跃迁温区和正常态异常温区, 观察到了电场梯度及其不对称系数的异常

(下转 21 页)

参 考 文 献

- 1 Zhang H Q, et al. Phys. Lett., 1989, B218 : 133
- 2 Zhang H Q, et al. Phys. Rev., 1990, C42 : 1086
- 3 Zhang H Q, et al. Nucl. Phys., 1990, A512 : 531;
Phys. Rev., 1990, C42 : 2752
- 4 Zhang H Q, et al. Nucl. Phys., 1992, A538 : 229
- 5 Zhang H Q, et al. Phys. Rev., 1994, C49
- 6 Li Zhichang, et al. Nucl. Inst. and Meth., 1993, A336 : 150
- 7 Zhao Kui, et al. Chinese Jour. of Nucl. Phys., 1991, 13 : 197
- 8 Lu Xiuqin, et al. Chinese Jour. of Nucl. Phys., 1993,
15 : 107
- 9 Yuan Jian, et al. Chinese Jour. of Nucl. Phys., 1993,
15(3) : 215
- 10 Yuan Jian, et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1989,
13 : 1038

Recent Studies and Achievements on Nuclear Reaction at HI-13 Tandem

Zhang Huanqiao Cheng Yehao Zhao Kui Yuan Jian Cheng Quan
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The experimental studies and achievements recently made at the HI-13 tandem accelerator are reviewed, including many subjects of three research fields: sub-barrier fusion reaction, heavy ion quasi-elastic collision and light particle nuclear reaction.

Key Words heavy ion collision, sub-barrier fusion, transfer reaction, stretch state.

(上接 41 页)

变化. 我们的重要贡献是发现 Y123 超导跃迁时金属氢化物(NNSF 青年基金)和生物大分子(CNNC 基金)研究正在进行中. Cu-O 链由二维变为一维结构, 解释了电荷转移.

Progress and Present Status of Nuclear Analysis in CIAENAL

Zhu Shengyun
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The progress and present status of nuclear analysis in CIAENAL are briefly described. The emphasis is given to the activation analysis, accelerator mass spectroscopy, nuclear solid state track detector, ion beam analysis and nuclear effect study.

Key Words nuclear analysis, accelerator mass spectroscopy, activation analysis.