

放射性离子束的产生和加速

秦久昌 姜永良 游曲波 白希祥 柳卫平 陈 泉

郭 刚 何 明 姜 山 许谨诚

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 研制了一条次级放射性束流线,产生放射性核束 ^{11}C , ^{17}F , ^7Be , ^{13}N , ^6He 。利用所获的放射性核束 ^7Be ,成功地完成了 $^7\text{Be}(\text{d},\text{n})^8\text{B}$ 反应的角分布测量。采取离线方法产生和加速了放射性核束 ^{64}Cu ,在实验靶上获 $1.2 \times 10^5 \text{ ions} \cdot \text{s}^{-1}$ (80 MeV),完成了 ^{64}Cu 库仑激发实验研究。

关键词 放射性核束,在线,离线

中图分类号 O562.5

20 世纪核物理的一个重要推动力是核反应探针(离子束)种类的不断更新和增多。30 年代起为轻离子,如 H , D , ^3He , ^4He 等;60 年代起为重离子,如 O , Si , Ni , Cu , I , Au 等;70 年代起为极化离子,如 H , D , T , ^3He , ^6Li , ^{23}Na 等;80 年代起产生新的离子,即放射性核束,如 ^6He , ^{11}C , ^{17}F , ^{64}Cu 等。历史经验表明,每类新离子束的出现都会给核物理和应用以及交叉学科开拓新局面,带来新发现。放射性核束的产生和加速已成为加速器工程技术的一个前沿领域。

产生放射性核束有在线法和离线法。在线法是指利用加速器加速的离子轰击反应靶,在线产生放射性核素和离子并加速^[1]。在线法又分为弹核碎裂法(PF 法)和在线同位素分离法(ISOL 法)。离线法是利用反应堆辐照(或其它方法)材料产生感兴趣的放射性核素,置入离子源中产生放射性离子,再注入加速器中加速。

为了适应国际核物理学的发展,开展放射性核束物理这一世界前沿工作,我们研制了一条次级放射性束流线,在线产生 ^{11}C , ^{17}F , ^7Be , ^{13}N , ^6He 等放射性离子束,离线产生和加速了放射性离子束 ^{64}Cu 。

1 次级放射性束流线的研制

次级放射性束流线安装在 HI-13 串列加速器上,由初级反应靶室、二极分析磁铁、磁四极透镜、缝隙仪、准直器和次级反应靶室等组成,其束流线总体安排如图 1 所示。

选用 HI-13 串列加速器提供的低能重离子打 H 或 D 靶,通过逆几何反应产生感兴趣的放射性离子,再经过分离纯化、聚焦、导向、最后传输到次级反应靶室^[2]。在次级放射性束流线上先后获得放射性核束 ^{11}C , ^{17}F , ^7Be , ^{13}N , ^6He ,其性能列于表 1。

利用所获的次级放射性核束,完成了 $^7\text{Be}(\text{d},\text{n})^8\text{B}$ 反应角分布测量等核物理实验研究工作。

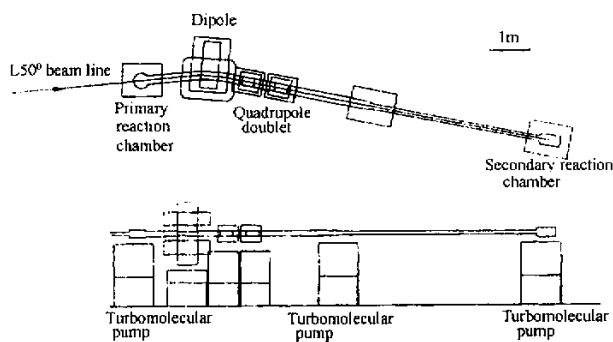


图 1 次级放射性束流线的总体布局

Fig. 1 Layout of secondary radioactive nuclear beam line

表 1 次级放射性核束性能

Table 1 Performance of RNB

放射性核束	反应	能量	纯度	转换率
RNB	Reaction	Energy/MeV	Purity/%	Conversion ratio/ions·s ⁻¹ (μA) ⁻¹
⁶ He	⁷ Li(⁶ He) ³ He	35.3	43	3.4×10 ⁻⁸
⁷ Be	⁷ Li(⁷ Be) _n	23.0	92	2.1×10 ⁻⁷
⁸ B	¹¹ B(¹¹ C) _n	38.2	85	6.8×10 ⁻⁸
¹³ N	¹² C(¹³ N) _n	65.7	6	6.0×10 ⁻⁸
¹⁷ F	¹⁶ O(¹⁷ F) _n	74.9	4.8	6.6×10 ⁻⁷

2 放射性核束 ⁶⁴Cu 的产生和加速

采用离线方法产生和加速放射性离子束的实验研究是在中国原子能科学研究院进行的^[3]。首先对放射性核素⁶⁴Cu 的产生和加速进行了出束实验研究。将高纯度的铜靶放在反应堆里被中子辐照,产生放射性核素⁶⁴Cu,再置入溅射离子源中产生⁶⁴Cu 离子,经预加速后,注入 HI-13 串列加速器。其技术难点是:离子源的强放射性⁶⁴Cu 阴极靶的制备、安装、准直和屏蔽;弱束流⁶⁴Cu 加速时的加速器调束以及⁶⁴Cu 的分离和鉴别。

2.1 ⁶⁴Cu 离子束的模拟出束实验

为了产生放射性⁶⁴Cu 负离子,我们选用 200 型强流溅射负离子源。首先将纯度为 99.9% 的铜靶置入离子源中,对稳定⁶³Cu 离子进行出束实验。其目的是:了解阴极被 Cs⁺ 溅射的靶点大小,确定安装⁶⁴Cu 阴极靶的尺寸;测出阴极靶材料的消耗,确定装载⁶⁴Cu 阴极靶材料数量;测出⁶³Cu 和⁶⁵Cu 的流强,根据⁶⁴Cu/(⁶³Cu+⁶⁵Cu) 的比活度,估算出⁶⁴Cu 的流强;⁶⁴Cu 的加速器模拟调束和测量⁶⁴Cu 束流中的成分。

实验结果显示,离子源连续工作 12h,引出⁶³Cu 和⁶⁵Cu 的负离子的平均流强分别为 1.5μA 和 0.5μA。阴极铜锥被 Cs⁺ 溅射出一个 φ2.2mm、深 2mm 的喇叭状小尖坑,其总耗量为 53.9 mg,相当 2.25mg/μA·h。

在⁶⁴Cu 加速器模拟调束中,先对⁶³Cu 和⁶⁵Cu 分别调束,使打到实验靶上的束流达到最大。再将注入器偏转磁铁,90°磁分析器和开关磁铁的磁场分别对应于⁶⁴Cu (即为⁶³Cu 和⁶⁵Cu 对应磁场的平均值),而加速器其他运行参数保持不变。虚拟加速⁶⁴Cu 时,用加速器质谱计方法(AMS)测实验靶上的束流成分如表 2 所示。

表 2 实验靶上离子束成分的分析结果

Table 2 Analyzed ion beam composition on the experimental target

离子种类 Ion species	Ni	⁶⁵ Cu	⁶³ Cu	Zn
离子流强 Ion intensity/ions·s ⁻¹	8.5×10 ⁴	<20	<20	4.0×10 ³
离子含量 Ion content/%	92.5	~0	~0	4.3

2.2 放射性核素⁶⁴Cu 的产生

要产生⁶⁴Cu 负离子,首先要获得放射性核素⁶⁴Cu。用纯度为 99.99% 的铜棒,加工成为 ϕ3.5mm×3.5mm 的小圆饼,置于 101# 重水反应堆(中子通量 1.2×10¹³/cm²·s)中辐照 4×12.7h,产生约 2.7×10¹¹Bq 的⁶⁴Cu。

2.3 强流溅射离子源的⁶⁴Cu 阴极靶的屏蔽和准直

离线产生放射性核束较难解决的问题之一是,为了将强放射性阴极靶准确地就位于离子源中,并给于安全屏蔽。经过反复考虑,设计出放射性靶的屏蔽和对中装置(图 2),图 2 中 1—9 为装置的各部件。从图 2 可见,靶杆位于圆柱形屏蔽体内,屏蔽体上部有可移动的长条盖板,因此,靶杆可滑动移进离子源。放射性靶前有一铅屏蔽塞,当靶杆向离子源内移动时,铅塞可掉进陷阱内,不影响放射性靶的就位。屏蔽体下面有两个支承调节杆,可实现靶的对中。

年允许剂量 5×10⁻²Sv/a,每年工作 20h。按每小时允许剂量 0.15×10⁻²Sv/h(为了尽量减少人体所受辐照剂量),离靶 0.5m 处工作,要求铅屏蔽厚 2.4cm,设计的铅屏蔽体厚 4cm,在所设计的屏蔽体可确保人体安全条件下,实现手动操作,迅速准确地将阴极靶杆就位于离子源中。

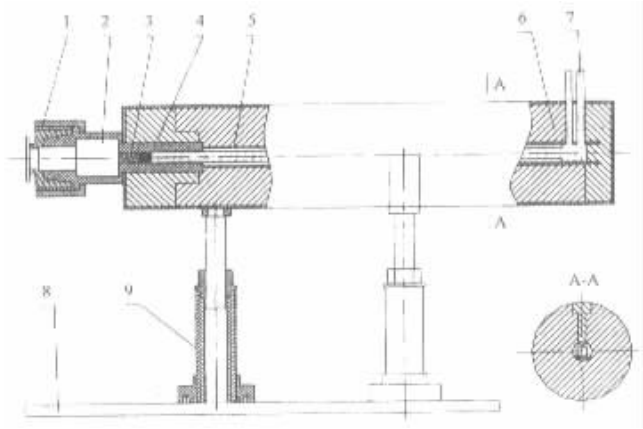


图 2 溅射离子源的放射性阴极靶的屏蔽和对中装置

Fig.2 Shielding and alignment device of the cathod of the sputther ion source

2.4 放射性核束⁶⁴Cu 的加速、分离和鉴别

将放射性⁶⁴Cu 靶置入强流溅射离子源中。离子源正常工作后,按前所述的⁶⁴Cu 模拟加速方法,分别加速⁶³Cu、⁶⁵Cu 和⁶⁴Cu。在不同位置上,所获离子(80MeV)流强如表 3 所示。

表 3 不同位置上的铜离子束强度

Table 3 Cu ion beam intensity at different positions

离子种类 Ion species	加速器低能端 L. E./nA	磁分析器象点 Image/nA	实验靶 Target
⁶³ Cu	2400	560	120nA
⁶⁵ Cu	1200	280	60nA
⁶⁴ Cu	* 500	1	1.2×10 ⁵ /s

当加速⁶⁴Cu 时,从离子源引出束流中的⁶³Cu 和⁶⁵Cu 等不同离子的绝大部分被注入器偏转磁铁、90°分析磁铁、开关磁铁分离掉。但在离子加速过程中,由于离子经固体剥离器及与气休碰撞等原因,离子有不同电荷态和不同能量分布,总有⁶³Cu、⁶⁵Cu 等少量离子与⁶⁴Cu、⁶⁴Ni 具有相同动量。磁分析器不能分离掉⁶³Cu 和⁶⁵Cu 等离子。因此,⁶³Cu、⁶⁵Cu 等离子可能通过磁分析器与⁶⁴Cu、⁶⁴Ni 一起打到实验靶上,而且⁶³Cu 和⁶⁵Cu 的束流强度高于⁶⁴Cu 几个数量级。具有相同动量的不同离子,它们的质量不同,能量也不同。静电分析器是能量分析器,因此,在实验靶前安装一台静电偏转板,可将⁶³Cu 和⁶⁵Cu 从⁶⁴Cu 和⁶⁴Ni 中分离开。静电偏转板后,仅⁶⁴Cu 和⁶⁴Ni 离子混在一起,再将它们打在铀靶上,利用 Si(Li)探测器测量入射离子产生的本征 X 射线(见图 3),就可鉴别出⁶⁴Cu 离子束,并依据探测器效率测得⁶⁴Cu 离子束强度为 1.2×10⁵/s。

图 3 入射离子的本征 X 射线谱

Fig.3 X ray characteristic spectrum of incident ion

我们利用所获的⁶⁴Cu 放射性离子束,已成功地完成了⁶⁴Cu 库伦激发实验研究。

参 考 文 献

1 秦久昌,崔心祎,姜永良,等. 原子能科学技术, 1998, 32(5) 403—408
QIN Jiuchang, CUI Xinyi, JIANG Yongliang, *et al.* Atom Energy Sci Technol, 1998, 32(5) 403—408

2 柳卫平,白希祥. 原子能科学技术, 1993, 27(5) 385—389
LIU Weiping, BAI Xixiang. Atom Energy Sci Technol, 1993, 27(5) 385—389

3 秦久昌,姜永良,陈泉,等. 核技术, 2000, 23(2) 90—93
QIN Jiuchang, JIANG Yongliang, CHEN Quan, *et al.* Nucl Tech, 2000, 23(2) 90—93

Production and acceleration of radioactive nuclear beam

QIN Jiuchang JIANG Yongliang YOU Qubo BAI Xixiang LIU Weiping CHEN Quan

GUO Gang HE Ming JIANG Shan XU Jincheng

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract

The secondary radioactive nuclear beam line was developed and RNB ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}$ were obtained from the beam line. Using ${}^9\text{Be}$, measurement of angle distribution of ${}^9\text{Be}(\text{d}, \text{n}){}^8\text{B}$ reaction was completed. Off-line method was used to produce and accelerate RNB ${}^{64}\text{Cu}$ on the HI-13 Tandem Accelerator with ${}^{64}\text{Cu}$ of $1.2 \times 10^5 \text{ ions} \cdot \text{s}^{-1}$ (80 MeV) on the experimental target. Experimental study of ${}^{64}\text{Cu}$ Coulomb excitation has been done.

Key words Radioactive nuclear beam, On-line, Off-line

CLC O562.5

《国防科技名词大典》2002 年 3 月出版

《国防科技名词大典》由栾恩杰主编, 3000 多位国防科技专家编撰, 分为综合、核能、航天、航空、船舶、兵器、电子等 7 卷, 收词 20000 多条, 1200 多万字, 彩色图表 6000 余幅。具有权威性、系统性和实用性, 是国防相关专业工作人员必备工具书。定价 2300 元(免收邮挂费)。另有《英汉科技大辞典》(收词 50 万条), 邮购价 690 元; 《汉英科技大辞典》(收词 60 万条), 邮购价 645 元。邮购地址: 北京 55 信箱清平书店金莉收, 邮编: 100053。开户行: 招商银行展览路支行, 帐号: 0981106810001, 户名: 北京清平书店有限公司, 电话: 010-83154081。