

# RIBLL 上的 $\beta^+$ 缓发粒子发射的在束测量\*

肖志刚 王宏伟 吴和宇 柳永英 靳根明  
张保国 李祖玉 段利敏 魏志勇 王素芳  
卢朝晖 胡荣江 朱海东 岑 玲 陈克良

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

李湘庆 陈 陶 华 辉

(北京大学技术物理系 北京 100871)

**摘要** 报道了在新建成的放射性次级束流线上完成的 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ 缓发 $\alpha$ 粒子发射 $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+} ^{20}\text{Ne}^* \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$ 的在束测量. 通过飞行时间和能损符合的方法实现 $^{20}\text{Na}$ 次级束流的在束鉴别与调制. 在束和停束两个获取时段分别完成对次级束流和 $\beta^+$ 缓发粒子的记录. 利用脉冲发生器和记数器实现 $^{20}\text{Na}$ 缓发粒子衰变半衰期的测量. 实验测量到 $^{20}\text{Ne}$ 几个低能共振能级的衰变能量分别为 2.69, 3.09, 4.74, 5.54 MeV, 相对强度分别为 100, 4.15, 1.10, 15.20. 测量到 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ 缓发 $\alpha$ 衰变的半衰期为 $(459 \pm 7)\text{ms}$ , 与现有的核数据基本上吻合.

**关键词** 次级束流线  $\beta^+$ 缓发 $\alpha$ 衰变 共振能级 半衰期

## 1 引言

随着放射性次级束流线的建成, 远离稳定线的丰中子核或丰质子核的性质已经成为人们的研究热点. 它们有较大的 $\beta$ 衰变 $Q$ 值 $Q_\beta$ , 因而发生 $\beta$ 衰变时, 可能衰变到子核的粒子不稳定态, 继而发射粒子如质子、中子或 $\alpha$ 粒子. 通过缓发粒子与 $\beta$ 粒子或 $\gamma$ 射线的关联测量, 可以得到子核激发能级的性质<sup>[1]</sup>. 它的一个应用是, 与直接反应和库仑解离方法互补, 测量核天体环境下的一些关键核的低能共振能级<sup>[2,3]</sup>.

兰州放射性次级束流线(RIBLL)的建立, 使 $\beta^+$ 缓发粒子发射的测量成为可能. 通常母核的寿命较短, 只能进行在束测量. 然而, 由于次级束流的强度较小, 纯度较低, 实际测

2000-04-13 收稿

\* 国家自然科学基金(19575055), 中国科学院“九五”基础性研究重大科学基金(KJ95T-03)和“百人计划”基金, 国家重点基础研究发展规划(G2000077401)和国家自然科学基金重点项目(19735010)资助

量时计数率偏低,本底较强.为了克服这些困难,有人采取束流鉴别手段,利用两套数据获取系统,测得 $^{11}\text{Li}$ ,  $^{15}\text{B}$ ,  $^{18}\text{C}$ 等的缓发中子衰变<sup>[1,4]</sup>.我们利用 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ 缓发 $\alpha$ 衰变的方法,间接测量 $^{20}\text{Ne}$ 的低能共振能级.它对核天体环境中 $\alpha + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ 反应截面的计算有重要意义<sup>[5,6]</sup>.

## 2 实验测量与数据获取

实验是在RIBLL上进行的,由兰州重离子加速器(HIRFL)引出的65MeV/u的 $^{36}\text{Ar}$ 初级束轰击 $^9\text{Be}$ 初级靶,产生 $^{20}\text{Na}$ 次级束流,其能量约为27MeV/u.整个实验安排大致可分为3个部分.

### 2.1 RIBLL

RIBLL是一个双消色差放射性束流(RIB)装置<sup>[7]</sup>.由HIRFL提供的初级束流轰击初级靶,发生弹核碎裂反应.类弹碎片与其他前角产物在较小的动量分散情况下进入RIBLL传输管道,结合二极磁铁和楔形降能片选择束流.在其第一和第二焦平面(T1和T2)上(见文献[7]图1),各放置一块高分辨高计数率低探测阈的时间拾取器<sup>[8-10]</sup>.光信号由一块安放在束流线中心的快塑料闪烁体产生,其中心位于一个内抛光的金属椭球面的一个焦点上,而另一个焦点上则放置一个光电倍增管,这样,向各个方向出射的光经椭球表面反射后均被光电管收集.由它提供的次级束粒子在T1和T2间的飞行时间(TOF)分辨可达140ps,飞行距离约16m.

### 2.2 粒子探测器

如图1所示, $^{20}\text{Na}$ 次级束经RIBLL传输到达T2后面的次级反应靶室,穿过40 $\mu\text{m}$ 厚的铝膜降能片后入射到由近物所自制的—个四叠层半导体望远镜上,每叠层都是100 $\mu\text{m}$ 的金硅面垒探测器,在真空中制冷的条件下,对ThC-C'标准 $\alpha$ 源(8.78MeV)的能量分辨可达0.6%.16块不同厚度的降能片安装在一个可升降可旋转的支架上,借助于能损程序的计算,通过调整降能片厚度决定次级束在探测器中合适的停阻深度.实验中 $^{20}\text{Na}$ 束流主要停阻在第三和第四片探测器中.在望远镜后面紧跟一块碘化铯晶体,用来测量和缓发粒子符合的电子.

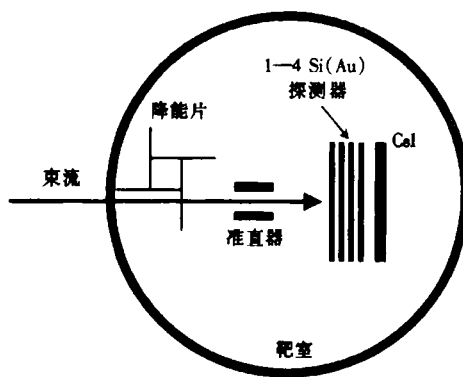


图1 实验装置示意图

### 2.3 在束测量与数据获取

在实验中, $^{20}\text{Na}$ 束流纯度约为3%,强度约为0.1pps.由于束流强度及纯度比较低,而且 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ 缓发粒子衰变的半衰期比较长,约为0.45s,远远长于束流周期130ns,也

长于获取系统的获取周期  $700\mu\text{s}$ , 因此在实际测量中必须进行束流鉴别与调制. 即当确认记录到一个  $^{20}\text{Na}$  后, 必须切断束流, 等待和测量该  $^{20}\text{Na}$  的  $\beta^+$  延发粒子<sup>[11]</sup>. 否则无法从本底中挑选真正的  $^{20}\text{Na}$  的  $\beta^+$  缓发衰变事件.

将数据获取过程分为在束与停束两个获取时段, 便可以由同一个数据获取系统完成对次级束流和  $\beta^+$  缓发粒子的记录. 在束鉴别  $^{20}\text{Na}$  是通过  $\text{TOF} - \Delta E$  方法完成的. 在束获取时段中, 由 T2 处的时间拾取器及第一块半导体探测器的定时信号符合, 给出触发信号使系统开始获取, 这样记录的便是大量的次级束事件. T1 与 T2 之间  $\text{TOF}$  信号和由第一块半导体探测器提供的  $\Delta E$  信号分别送到各自的上下阈甄别器中, 当它们同时落在各自

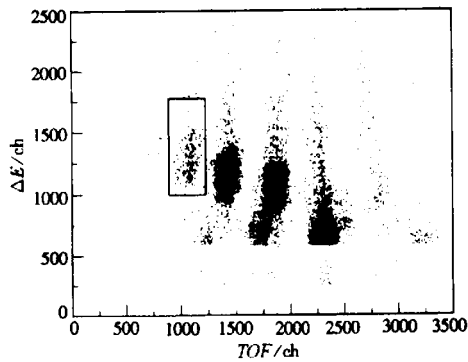


图 2 束流  $\text{TOF} - \Delta E$  关联图  
图中方框标定  $^{20}\text{Na}$  粒子.

设定的范围内时, 表明探测到的粒子是  $^{20}\text{Na}$ , 此时产生一个逻辑信号, 扇出一路用作束流调制信号, 使束流即时停止, 停止时段设定为  $1.5\text{s}$ .

当该入射粒子被鉴别是  $^{20}\text{Na}$  而且记录完成以后, 系统便结束在束获取而进入  $1.5\text{s}$  的停束获取时段, 此时,  $^{20}\text{Na}$  发生的  $\beta^+$  缓发粒子衰变会在第三或第四片半导体中产生一个脉冲, 它是衰变的  $\alpha$  粒子和  $^{16}\text{O}$  的能量之和, 由于总的衰变能量很小, 定时信号由其能量信号的主放双极性输出经倒相与甄别后引出. 但是, 由于次级束粒子在第三或第四片半导体中的

能量沉积也足以产生定时信号, 因此, 再将该定时信号同束流调制信号符合, 触发获取系统记录衰变事件.  $1.5\text{s}$  过后, 不管是否记录到衰变事件, 束流自动恢复, 系统也随着恢复到在束获取时段. 图 2 给出经 RIBLL 传输后的次级束的  $\text{TOF} - \Delta E$  关联图.

$^{20}\text{Na}$  的  $\beta^+$  缓发粒子衰变的半衰期大约为  $0.45\text{s}$  量级, 为了测量此半衰期, 联合使用一个  $200\text{Hz}$  的脉冲发生器及一个计数器进行时间标度. 该计数器是由 Phillips 公司生产的标准 CAMAC 插件, 其数值可由获取系统直接获取. 脉冲发生器的信号经过恒比甄别后, 直接输入到计数器中, 计数器的清零信号直接由  $^{20}\text{Na}$  束流鉴别信号提供. 这样, 如果系统获取到一个  $^{20}\text{Na}$  的延发衰变事件, 在不计  $^{20}\text{Na}$  在输运线上的飞行时间的影响下, 计数器的记数直接反映  $^{20}\text{Na}$  产生到其衰变之间的时间.

数据获取系统在接收触发信号开始模数变换到数据读取完毕清零插件之间的时间约为  $700\mu\text{s}$ , 这段时间内系统不响应外界触发信号, 但它与  $^{20}\text{Na}$   $\beta^+$  缓发  $\alpha$  衰变的半衰期相比小得多, 而停束时段有大于 3 倍的半衰期, 因此系统的获取效率是比较高的.

### 3 测量结果

图 3 给出测量到的缓发衰变的粒子动能谱, 由于没有作  $^{16}\text{O}$  的反冲动能修正, 其值为  $^{16}\text{O}$  和  $\alpha$  粒子动能之和, 对应于  $^{20}\text{Ne}$  的共振能量. 由图可以清晰地分辨 4 个主要能级的  $\beta^+$  缓发粒子能谱. 表 1 给出的是它与现有核数据的比较<sup>[12]</sup>.

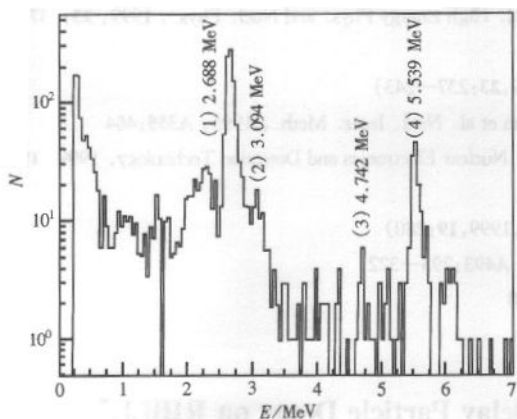


图 3  $\beta^+$  缓发粒子衰变的动能谱  
图中能量为 $^{16}\text{O}$ 和 $\alpha$ 粒子动能之和.

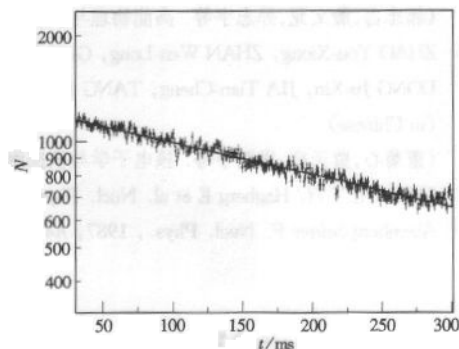


图 4  $^{20}\text{Na}$   $\beta^+$  缓发  $\alpha$  衰变曲线  
○实验值, — 拟合结果.

表 1 实验测得的 $^{20}\text{Ne}$ 的共振能级和相对强度

衰变能量(MeV)	相对强度 (%)		衰变能量(MeV)	相对强度 (%)	
	本次测量	文献[12]		本次测量	文献[12]
2.688	100	100	4.742	1.10	1.28
3.098	4.15	4.12	5.539	15.2	17.3

图 4 给出由计数器测量的 $^{20}\text{Na}$   $\beta^+$  缓发粒子衰变的时间曲线,用最小二乘法拟合,同时考虑 $^{20}\text{Na}$ 在束流线上的飞行时间及数据获取系统响应所带来 1ms 系统误差和拟合时的偶然误差,最后得到半衰期为 $(459 \pm 7)\text{ms}$ ,文献[13]给出的数值为 $(447.9 \pm 2.3)\text{ms}$ ,二者相差 3%.

作者感谢 HIRFL 和 RIBLL 成员在实验过程中的精心调束,感谢中国科学院近代物理研究所探测器组提供性能优良的金硅面垒探测器,感谢核电子学组提供束流调制装置, NIM 库提供电子学插件.

参考文献(References)

- Mueller A C, Bazin D et al. Z Phys., 1988, 330:63—68
- Arnold M. Nucl. Phys., 1992, A538:493c—504c
- XIAO Zhi-Gang, ZHANG Bao-Guo et al. Nuclear Techniques, 2000, 23:1(in Chinese)  
(肖志刚,张保国等.核技术,2000,23:1)
- Anne R, Bazin D et al. Ganil Annual Report, 1989, 33—34
- Kubono S et al. Phys. Rev., 1992, C46:361
- Dufour M, Descouvemont P, Baye D. Phys. Rev., 1994, C50:795—801
- ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. Science in China, 1999, 20:77—84(in Chinese)  
(詹文龙,郭忠言等.中国科学,1999,20:77—84)
- LI Jia-Xing, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23:231—236(in Chinese)  
(李加兴,詹文龙,郭忠言等.高能物理与核物理,1999,23:231—236)

- 9 GUO Zhong-Yan, ZHAN Wen-Long, SUN Zhi-Yu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23:237—243  
(in Chinese)  
(郭忠言, 詹文龙, 孙志宇等. 高能物理与核物理, 1999, 23:237—243)
- 10 ZHAO You-Xiong, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. Nucl. Instr. Meth., 1995, A355:464
- 11 DONG Ju-Xin, JIA Tian-Cheng, TANG Jing-Yu et al. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1999, 19:280  
(in Chinese)  
(董菊心, 贾天成, 唐靖宇等. 核电子学与核探测技术, 1999, 19:280)
- 12 Clifford E T H, Hagberg E et al. Nucl. Phys., 1989, A493:293—322
- 13 Ajzenberg-Selove F. Nucl. Phys., 1987, A475:1—198

### In-beam Measurement of $\beta^+$ Delay Particle Decay on RIBLL\*

XIAO Zhi-Gang WANG Hong-Wei WU He-Yu LIU Yong-Ying JIN Gen-Ming  
ZHANG Bao-Guo LI Zu-Yu DUAN Li-Min WEI Zhi-Yong WANG Su-Fang  
LU Zhao-Hui HU Rong-Jiang ZHU Hai-Dong CEN Ling CHEN Ke-Liang

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

LI Xiang-Qing CHEN Tao HUA Hui

(Department of Technical Physics, Beijing University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The in-beam measurement of  $\beta^+$  delay  $\alpha$  decay of  $^{20}\text{Na}$  on the Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou(RIBLL) is reported. The radioactive ion  $^{20}\text{Na}$  was identified in-beam by means of TOF -  $\Delta E$  method. The implantation depth of the secondary beam in the detectors was optimized by a group of degraders with different thickness. The procedure of data acquisition was divided into two stages, i. e., in-beam and off-beam stage, to record the RIB and the  $\beta^+$  delay  $\alpha$  particles respectively. Four resonant energy levels, 2.69, 3.09, 4.74, and 5.54MeV of  $^{20}\text{Ne}$ , have been observed with their relative amplitudes of 100, 4.15, 1.10 and 15.2, respectively. The half-life of  $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+} ^{20}\text{Ne}^* \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$  decay is preliminarily determined to be 459ms by using a time scaler combined with a pulse generator. The results are in good agreement with the ones of other group.

**Key words** radioactive ion beam line,  $\beta$  delay  $\alpha$  decay, energy level, half life

Received 13 April 2000

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19575055) and Partially by One Hundred Talents Project and Major Subjects of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T - 03), Major State Basic Research Development Program (G2000077401) and Key Project of National Natural Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences (19735010)