

## $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ 延发 $\alpha$ 粒子测量\*

王宏伟<sup>1)</sup> 吴和宇 靳根明 张保国 肖志刚 段利敏  
魏志勇 李祖玉 卢朝晖 柳永英 陈克良 胡荣江  
朱海东 岑玲 王素芳

(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** 利用兰州放射性次级束流线提供的 $^{20}\text{Na}$ 束流,通过 $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+} ^{20}\text{Ne}^* \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$ 过程,测量了 $^{20}\text{Na}$ 的衰变半衰期 $T_{1/2}$ 及衰变 $\alpha$ 粒子能谱.结果表明,除了 $E_d \geq 2.688\text{MeV}$ 的9条较高激发能级的衰变 $\alpha$ 粒子外,实验中还观察到衰变能量 $E_d$ 为0.890和1.054MeV,1.991MeV,2.424和2.457MeV的 $^{20}\text{Ne}$ 低激发能级的3条 $\alpha$ 谱线.

**关键词** 次级束流  $\beta^+$ 延发  $\alpha$ 衰变 激发能级 半衰期

### 1 引言

天体核反应中,核素合成反应都集中在近位垒或亚位垒的能量区,而且绝大多数反应都有放射性核的参与.直接测量这些放射性核参与的反应是非常困难的,所以在实验研究中大都采用间接测量的方法来确定其核反应率.对于 $A \leq 40$ 的轻核,因能级密度较低,反应截面往往由一个或少数几个共振态决定,此时Hauser-Feshbach的统计理论不能给出可靠的结果.因此, $\beta$ 延发粒子发射成为寻找天体核反应共振峰的极佳手段之一<sup>[1,2]</sup>.利用 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta$ 延发 $\alpha$ 粒子发射,可以研究 $^{16}\text{O}$ 与 $\alpha$ 合成 $^{20}\text{Ne}$ 反应的低位共振能级.

自60年代以来,人们就开始对 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ 延发 $\alpha$ 粒子衰变进行实验研究:1964年Marcfarlane和Siivola第一次测定了 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ 延发 $\alpha$ 粒子衰变<sup>[3]</sup>,同年,Pearson等人预言了 $^{20}\text{Na}$ 存在着低能 $\beta^+$ 延发 $\alpha$ 粒子衰变道<sup>[4]</sup>;1967年Sunier对 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta^+$ , $\gamma$ 衰变进行了研

2000-08-24 收稿

\* 国家自然科学基金(19575055),中国科学院百人计划和九五重大项目(KJ95T-03),国家重点基础研究发展规划(G2000077401)资助

1) E-mail: wanghw@why.lzb.ac.cn

究,并提出了 $^{20}\text{Na}$ 的衰变纲图<sup>[5]</sup>;1973年 Torgenson 等精确测定了 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta'$ 延发 $\alpha$ 粒子衰变的能量及分支比,并发现了几组新的高能 $\beta'$ 延发 $\alpha$ 粒子衰变<sup>[6]</sup>;1989年 E. T. H Clifford 等利用 $\beta'$ 延发实验研究了 $^{20}\text{Na}$ 衰变的同位旋混合及弱矢量耦合常数,在文中共给出了13条激发能级<sup>[7]</sup>;1999年 C. Angule 等人对 $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应的实验研究作了总结,列出了目前已知的 $^{20}\text{Ne}$ 的23条激发能级及其共振强度 $\omega\gamma$ 值<sup>[8]</sup>,其中低能的几个激发能级只在直接反应中被观察到,而在 $\beta'$ 延发 $\alpha$ 粒子衰变反应中则未见被观察的报道. 本文利用 $^{20}\text{Na}$ 放射性次级束测量了 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta'$ 延发 $\alpha$ 粒子衰变能谱.

## 2 实验布局与探测技术

实验是在兰州放射性次级束流线(RIBLL)<sup>[9]</sup>上进行的. 由兰州重离子加速器(HIR-FL)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,RIBLL对其进行分离. $^{20}\text{Na}$ 次级束能量约为27MeV/u,纯度约3.1%,束流强度为0.1particle/s,实验测量的半衰期为 $(459 \pm 7)\text{ms}$ . 束流的主要污染物为 $^{21}\text{Mg}$ (0.19%), $^{19}\text{Ne}$ (23.39%), $^{18}\text{F}$ (30.175%), $^{17}\text{O}$ (41.165%), $^{16}\text{N}$ (1.316%), $^{15}\text{C}$ (0.6093%). 幸运的是 $^{19}\text{Ne}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{17}\text{O}$ , $^{16}\text{N}$ , $^{15}\text{C}$ 均不是 $\beta$ 延发粒子先驱核,仅 $^{21}\text{Mg}$ 为 $\beta$ 延发质子先驱核,其半衰期为 $T_{1/2} = 122\text{ms}$ ,数据处理中可通过选择不同的衰变时间来扣除.

## 3 测量结果

图1为测量到的延发衰变的 $\alpha$ 粒子动能谱. 横坐标是束流调制期间探测器测量到的衰变能量,由于不存在 $^{16}\text{O}$ 的反冲动能修正,其值为 $^{16}\text{O}$ 和 $\alpha$ 粒子动能之和,对应于 $^{20}\text{Ne}$ 的衰变能量. 在图中不仅可以清晰地分辨出 $E_d$ 为2.688,3.094,4.742,5.288,5.539MeV的

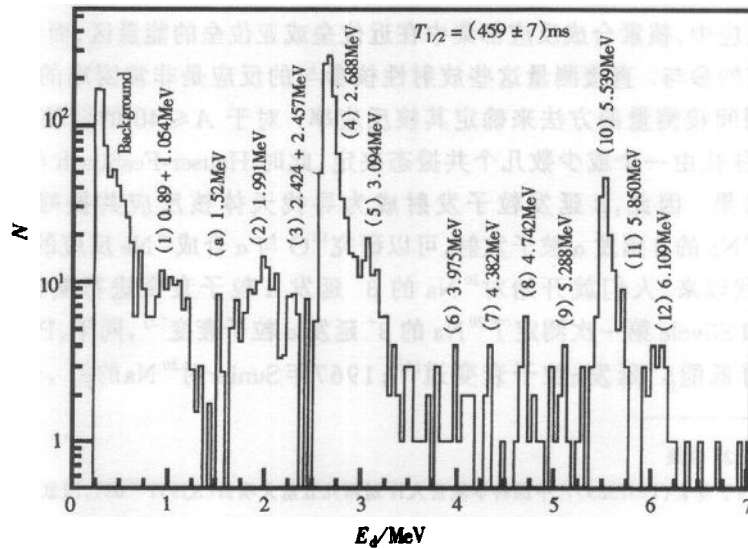


图1  $^{20}\text{Na}$ 延发衰变的 $\alpha$ 粒子动能谱

较强的几组  $\beta^+$  延发  $\alpha$  粒子能谱, 其中  $E_d = 5.539\text{MeV}$  对应于  $^{20}\text{Ne}$  的  $E_x = 10.274\text{MeV}$  ( $J^\pi = 2^+, T = 1$ ) 能级的  $\alpha$  发射, 同时我们在低能区还可以看到  $E_x$  为 0.890 和 1.054, 1.991, 2.424 和 2.457MeV 的三组谱线, 这在以前的实验中是没有观测到的.

表 1 给出了本工作测得的  $\beta^+$  延发  $\alpha$  粒子的相对强度值与文献[7]中的数据(取  $E_d = 2.688\text{MeV}$  的  $\alpha$  峰为 100). 从数据的对比可以看出, 我们的测量与文献中给出的数值相一致.

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	相对强度 <sup>[7]</sup>	衰变能量(MeV)	相对强度	相对强度 <sup>[7]</sup>
2.688	100	100	4.742	1.10	1.28
3.098	4.15	4.12	5.539	15.2	17.3

对于低能区的  $\alpha$  谱线, 尽管由于探测器的分辨、统计等原因, 使得  $E_d$  为 0.890 和 1.054MeV, 2.424 和 2.457MeV 在  $\alpha$  能谱中不能分开, 但可以得到其相对强度为 9.39% (0.890 和 1.054MeV), 6.78% (1.991MeV) 和 4.72% (2.424 和 2.457MeV), 其中 1.991MeV 的相对强度与文献[7]的 0.02% 的结果相差较大, 其它的几个能级没有数据可以比较. 对于观察到的较低的  $\alpha$  谱线及其强度, 我们考虑有以下几种原因:

1) 由于文献中[7, 10, 11]都是用非注入法测量  $\alpha$  粒子的能量, 且没有对  $^{16}\text{O}$  的反冲和探测器的入射窗的能损作修正, 谱中的峰位向低能方向拖了一个长的尾巴, 掩盖了低能的  $\alpha$  峰位的发现. 如  $E_d = 1.991\text{MeV}$  ( $E_x = 6.724\text{MeV}$ ,  $J^\pi = 0^+$ ,  $T = 0$ ),  $2.424\text{MeV}$  ( $E_x = 7.156\text{MeV}$ ,  $J^\pi = 3^+$ ,  $T = 0$ ),  $2.457\text{MeV}$  ( $E_x = 7.191\text{MeV}$ ,  $J^\pi = 0^+$ ,  $T = 0$ ) 峰位的测量, 在文献[7]中仅测到了 1.991MeV 峰, 而另外两个峰却没有被观测到. 从  $\beta$  跃迁选择定则来看,  $J^\pi = 3^+$  能级为一级禁戒跃迁, 而  $J^\pi = 0^+$  则为二级禁戒跃迁, 因此, 在  $\alpha$  谱中  $J^\pi = 3^+$  的能级应该能观测到. 文献[7]中图 4 的结果可能为 2.424MeV 的峰位被 2.688MeV 的强峰的低能尾巴掩盖了.

2) 在使用 He-Jet 系统及收集盘时, 由于  $^{16}\text{O}$  的反冲作用, 使得低能  $\alpha$  粒子的动能低于探测器的测量阈, 因而不能被测到.

3) 相对强度的差别, 主要是由于低能处的  $\beta^+$  本底以及探测器的噪声引起的, 实验中无法准确扣除其影响.

图 1 中标记为(a)的峰位, 在实验中不能确定其来源, 在已经给出的  $^{20}\text{Ne}$  纲图上也不存在对应的衰变.

综合我们的测量以及文献[7, 8, 10]的结果, 得到其衰变纲图如图 2 所示, 虚线为低能  $\alpha$  粒子能级, 其自旋与宇称数据来自文献[10]. 另据文献[11]的结果可知, 对于质心系 1.6—2.5MeV 的能量,  $J^\pi = 1^+$ ,  $E_d = 1.054\text{MeV}$  和  $J^\pi = 3^+$ ,  $E_d = 2.429\text{MeV}$  及其它附近的激发能级, 由于其能级窄, 延迟  $\alpha$  粒子发射弱, 因此对共振截面的贡献是较小的. 理论和实验都表明  $J^\pi = 0^+$ ,  $E_d = 1.991\text{MeV}$  的激发能级在  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  的截面中具有较大的贡献, 所以准确地测量这一能级的信息及其共振截面, 对确定直接俘获截面的贡献是有意义的, 并可将其外推至天体物理感兴趣的区域 ( $E_{\text{cm}} \approx 300\text{keV}$ , 对应于典型的氢燃烧的温度  $2 \times 10^8 - 3 \times 10^8\text{K}$ , 在这一温度下,  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应主要是通过非共振直接俘获  $\alpha$  粒

子进行). 目前, 我们的测量也观测到了这一能级. 有关  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  的共振强度、反应率等, 我们将在以后的工作中进行详细的讨论

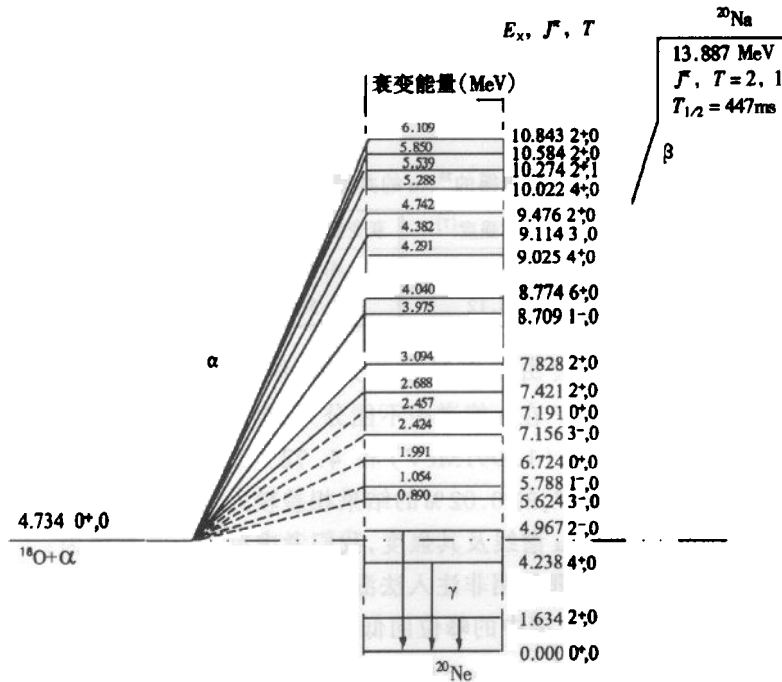


图 2  $^{20}\text{Na}$  衰变纲图

总之, 本文利用  $^{20}\text{Na}$  放射性次级束, 研究了  $^{20}\text{Na}$  的  $\beta^+$  延发  $\alpha$  粒子衰变过程, 实验结果表明, 除了 9 条较高的激发能级外, 实验中还新观测到了 0.890 和 1.054 MeV, 1.991 MeV, 2.424 和 2.457 MeV 的 3 条激发能级, 并给出了它们的相对强度.

### 参考文献 (References)

- DING Da-Zhao, CHEN Yong-Shou, ZHANG Huan-Qiao. Progress of Nuclear Physics, Shanghai: Scientific & Technical Publishers, 1997, 383—466 (in Chinese)  
(丁大钊, 陈永寿, 张焕乔. 原子核物理进展, 上海: 科学技术出版社, 1997, 383—466)
- WU He-Yu. Nuclear Physics Rivew, 1999, 16(3): 137—144 (in Chinese)  
(吴和宇. 原子核物理评论, 1999, 16(3): 137—144)
- Macfarlane R D, Siivola A. Nucl. Phys., 1964, 59: 168—176
- Pearson J D, Almquist E et al. Can. J. Phys., 1964, 42: 489—493
- Polichar R M, Steigerwalt J E et al. Phys. Rev., 1967, 163: 1084—1090
- Torgerson D F, Wien K et al. Phys. Rev., 1973, C8: 161—167
- Clifford E T H, Hagberg E et al. Nucl. Phys., 1989, A493: 293—322
- Angulo C, Arnould M et al. Nucl. Phys., 1999, A656: 3—183
- ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan, LIU Guan-Hua et al. Science in China, 1999, A20: 77—84 (in Chinese)  
(詹文龙, 郭忠言, 刘冠华等. 中国科学, 1999, A20: 77—84)
- Ajzenberg-Selove F. Nucl. Phys., 1987, A475: 1—198
- Hahn K H, Chang K H et al. Phys. Rev., 1987, C36: 892—898

## Measurement of $\beta^+$ Delayed $\alpha$ Decay of $^{20}\text{Na}^*$

WANG Hong-Wei<sup>1)</sup> WU He-Yu JIN Gen-Ming ZHANG Bao-Guo XIAO Zhi-Gang  
DUAN Li-Min WEI Zhi-Yong LI Zu-Yu LU Zhao-Hui LIU Yong-Ying  
CHEN Ke-Liang HU Rong-Jiang ZHU Hai-Dong CEN Ling WANG Su-Fang

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

LI Xiang-Qing CHEN Tao HUA Hui

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

**Abstract** Through the  $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+} ^{20}\text{Ne}^* \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$  process, the half-life and  $\beta^+$  delayed  $\alpha$  decay spectrum of  $^{20}\text{Na}$  have been measured on the Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL). The  $^{20}\text{Na}$  was identified through TOF- $\Delta E$  method and alpha particle was measured by four Si(Au) surface barrier detectors. The half life of  $^{20}\text{Na}$  is  $(459 \pm 7)$  ms. Result shows that in addition to nine high excitation energy levels with  $E_d \geq 2.688\text{MeV}$ , three low excitation energy levels of  $^{20}\text{Na}$  with  $E_d = 0.890$  &  $1.054, 1.991, 2.424$  &  $2.457\text{MeV}$  were observed in the experiment. The relative intensity for  $1.991\text{MeV}$  level, a more important energy level in the center of mass system energy region from  $1.6$  to  $2.5\text{MeV}$  obtained in this experiment is much higher than the existed one. We also obtained the relative intensities of the levels of  $E_d = 0.890$  &  $1.054, 2.424$  &  $2.457\text{MeV}$ .

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

Received 24 August 2000

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(19575055), 100 Talent Programme of CAS and The Chinese Academy of Sciences(KJ95T-03), Major State Basic Research development Program(G2000077401)

1) E-mail: wanghw@why.lzb.ac.cn