

^{23}Al 的 β^+ 延发质子测量*

王宏伟¹⁾ 靳根明 吴和宇 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 $\text{TOF} - \Delta E$ 和 0° 注入探测器的方法, 鉴别并测量了 ^{23}Al β^+ 延发质子衰变能谱, 通过精密脉冲发生器和计数器测得 ^{23}Al 的半衰期 $T_{1/2} = (476 \pm 45)\text{ms}$. 实验中重现了能量为 0.216, 0.278, 0.438, 0.479 MeV 的低能衰变质子. 另外, 还观察到了一个新的 β^+ 延发衰变能级 $E_x = 8.916\text{MeV}$, 并给出了它们的相对强度.

关键词 次级束流 β^+ 延发质子衰变 激发能级 半衰期

1 引言

随着世界上各大实验室的放射性束流线的建成, 远离 β 稳定线的奇异核的性质、结构及其反应特性的研究, 已经成为目前核物理研究的一个新领域^[1-4]. 自从 1962 年在实验上首次观测到 β^+ 延发质子衰变以来, 实验研究过的 β^+ 延发质子衰变先驱核已达上百种, 随着放射性次级束的应用, 获得了一大批更加远离稳定线的丰中子、丰质子核素, 使得 β^+ 延发粒子衰变的研究范围可以扩展到滴线附近的核素.

^{23}Al 的 β^+ 延发质子发射过程可以用来研究 ^{23}Mg 的激发能级的信息, 寻找在天体物理中感兴趣的共振能级^[5-9], 即 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应中质子阈附近 ^{23}Mg 的激发能级. $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应是消耗 ^{22}Na 的反应, 它的反应率的大小决定于核合成过程中 ^{22}Na 的丰度值, 而 ^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6\text{a}$) 的 β 衰变产物为 ^{22}Ne , 这同核天体物理中的 $\text{Ne} - \text{E}(\text{Ne 异常})$ 问题紧密相关^[1, 5, 10]. 由于 ^{22}Na 的半衰期较长, 制备相对容易些, 因此, 实验大多采用质子束轰击

2000-09-21 收稿

* 国家自然科学基金(19575055), “百人计划”基金, 中国科学院“九五”基础性研究重大科学基金(KJ95T-03)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

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

^{22}Na 放射性靶的方法进行直接测量^[5-7], 而 β^+ 延发质子的方法则因为 ^{23}Al 远离 β 稳定线, 半衰期较短 ($T_{1/2} = 470\text{ms}$), 只有 R. J Tighe 等^[9] 测量过, 他们利用 $^{24}\text{Mg}(p, 2n)$ 反应来获得 ^{23}Al . 由于探测器的分辨等原因, 实验中对低能的质子峰并没有很好地分开. 我们利用兰州放射性次级束流线 (RIBLL)^[11] 提供的 ^{23}Al 束流, 重新测量了 ^{23}Al 的延发质子谱, 测到了低能的延发质子.

2 实验布局与探测技术

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}Ar 初级束轰击 ^9Be 初级靶, 产生 ^{23}Al 次级束流, 其能量约 35MeV/u , 纯度约 0.6% . 束流的主要污染物为 $^{22}\text{Mg}(15\%)$, $^{21}\text{Na}(58\%)$, $^{20}\text{Ne}(11.5\%)$, $^{19}\text{Ne}(4.7\%)$, $^{19}\text{F}(10.2\%)$, 但它们均不是 β 延发粒子先驱核. ^{23}Al 束流经 RIBLL 的 T_1, T_2 焦平面到达次级反应靶室, 通过一可调厚度的 Al 降能片及 $\phi 15\text{mm}$ 的准直孔后, 入射到 0° 的一组 4 叠层 Si(Au) 面垒探测器上. Si 探测器的厚度均为 $100\mu\text{m}$, 直径为 17mm . Si(Au) 面垒探测器后紧接 CsI 探测器, 用来测量衰变中产生的 β^+ 射线, 即与延发衰变的质子作关联测量. 所有探测器均在真空中致冷以降低探测器的噪声. 由于 ^{23}Al 的纯度较低, 半衰期远比束流周期长, 因此测量过程中需要对 ^{23}Al 进行在线鉴别并实现束流调制. 实验中采用 $\text{TOF} - \Delta E$ 的方法来鉴别 ^{23}Al , 其中 TOF 由 RIBLL 的 T_1, T_2 焦点处的时间拾取探测器^[11-13] 给出, ΔE 由第一片 Si(Au) 探测器得到. 当电子学鉴别到一个 ^{23}Al 后, 束流调制器^[14] 给出一个信号并切断束流, 并开始对 ^{23}Al 的延发衰变粒子进行测量. 固定停束时间为 1.5s (3 倍的 ^{23}Al 半衰期长度). ^{23}Al 半衰期的测量通过精密脉冲发生器、计数器、束流调制器来共同完成. 探测器布局的详细情况参见文献 [15, 16]. 所有的探测器均用 ^{239}Pu 和 $\text{ThC}' - \text{C}$ 标准 α 源刻度. 作为例子, 图 1 显示了实验中测得入射离子的 $\text{TOF} - \Delta E$ 散点图 (图中只给出了部分数据).

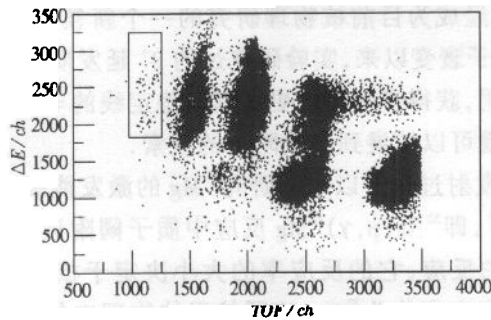


图 1 $\text{TOF} - \Delta E$ 散点图

图中方框内为 ^{23}Al .

3 结果与讨论

图 2 显示了实验测得的 ^{23}Al 的延发质子谱. 由于次级束流的传输率、束流时间的限

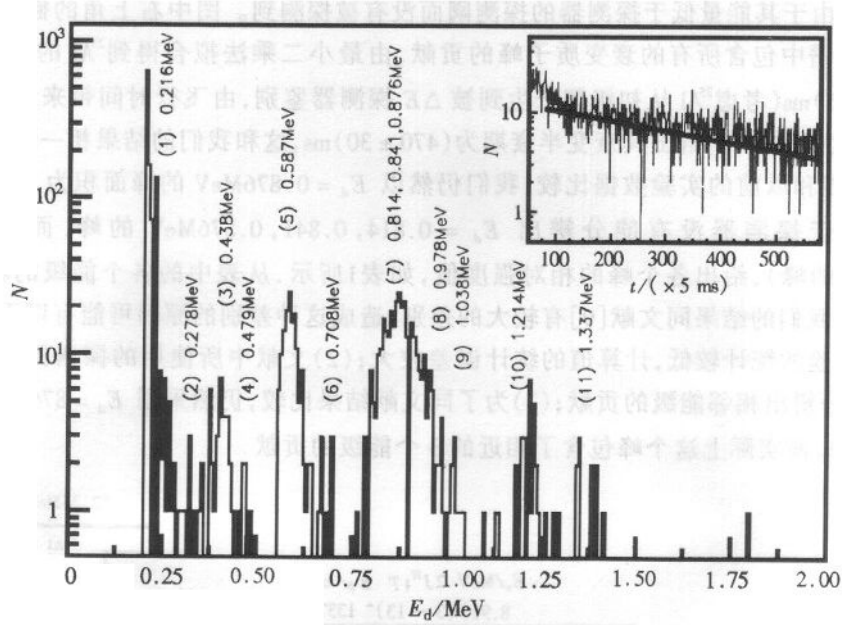


图 2 衰变质子谱

制,测得的总计数较少.从图 2 中可以看到,实验中共探测到了 11 条延发衰变的质子峰.其中,最低峰位在 0.216 MeV 处,但是 β⁺ 本底也叠加在这一区域,由于探测阈的关系,使得 β⁺ 本底的低能端被卡掉.标记为 (7) 的峰实际上是由衰变能量 $E_d = 0.814, 0.841, 0.876$ MeV 的 3 个峰叠加而成.对于衰变纲图中靠近质子阈的另外 4 条激发能级 $E_x = 7.582, 7.621, 7.643, 7.780$ MeV, 仍然可能存在 β⁺ 延迟质子发射,其衰变能量为 3, 43, 64,

表 1 衰变质子 E_d 的相对强度值

E_x/MeV	E_d/keV			相对强度	
	本次测量	文献[19]结果	文献[9]结果	本次测量	文献[9]结果
7.795	216	227 ± 6	223	2.56	2.2 ± 0.5
7.857	278	286 ± 6	285	0.21	0.9 ± 0.3
8.017	438	458 ± 6		0.12	
8.058	479	502 ± 7		0.01	
8.166 ^a	587	603 ± 6	560	0.46	0.7 ± 0.1
8.287	708	739 ± 8		0.03	
8.455	876	915 ± 5	839	1.00	1.00
8.557	978	1024 ± 6		0.05	
8.617	1038	1086 ± 6		0.03	
8.793	1214	1270 ± 8		0.09	
8.916	1337			0.03	

^a 此能级最初测定为 8.155 MeV, 后来的测量更正为 8.166 MeV.

204keV,但由于其能量低于探测器的探测阈而没有被探测到。图中右上角的插图为²³Al的衰变曲线,谱中包含所有的衰变质子峰的贡献,由最小二乘法拟合得到²³Al的半衰期 $T_{1/2} = (476 \pm 45)\text{ms}$ (考虑²³Al从初级靶产生到被 ΔE 探测器鉴别,由飞行时间带来的误差不超过 1ms),文献[17,18]给出其衰变半衰期为 $(470 \pm 30)\text{ms}$,这和我们的结果相一致。

为了能和以前的实验数据比较,我们仍然以 $E_d = 0.876\text{MeV}$ 的峰面积为 1.0(在文献[9]中,由于探测器没有能分辨出 $E_d = 0.814, 0.841, 0.876\text{MeV}$ 的峰,而只标记为 0.876MeV 的峰),给出各个峰的相对强度值,如表1所示。从表中的各个能级的相对强度可以看出,我们的结果同文献[9]有较大的差别,造成这种差别的原因可能有以下几点:(1)我们实验的统计较低,计算值的统计误差较大;(2)文献中所使用的探测器分辨较差,没有能够分辨出相邻能级的贡献;(3)为了同文献结果比较,仍然采用 $E_d = 876\text{keV}$ 峰的相对强度为 1,而实际上这个峰包含了相近的 3 个能级的贡献。

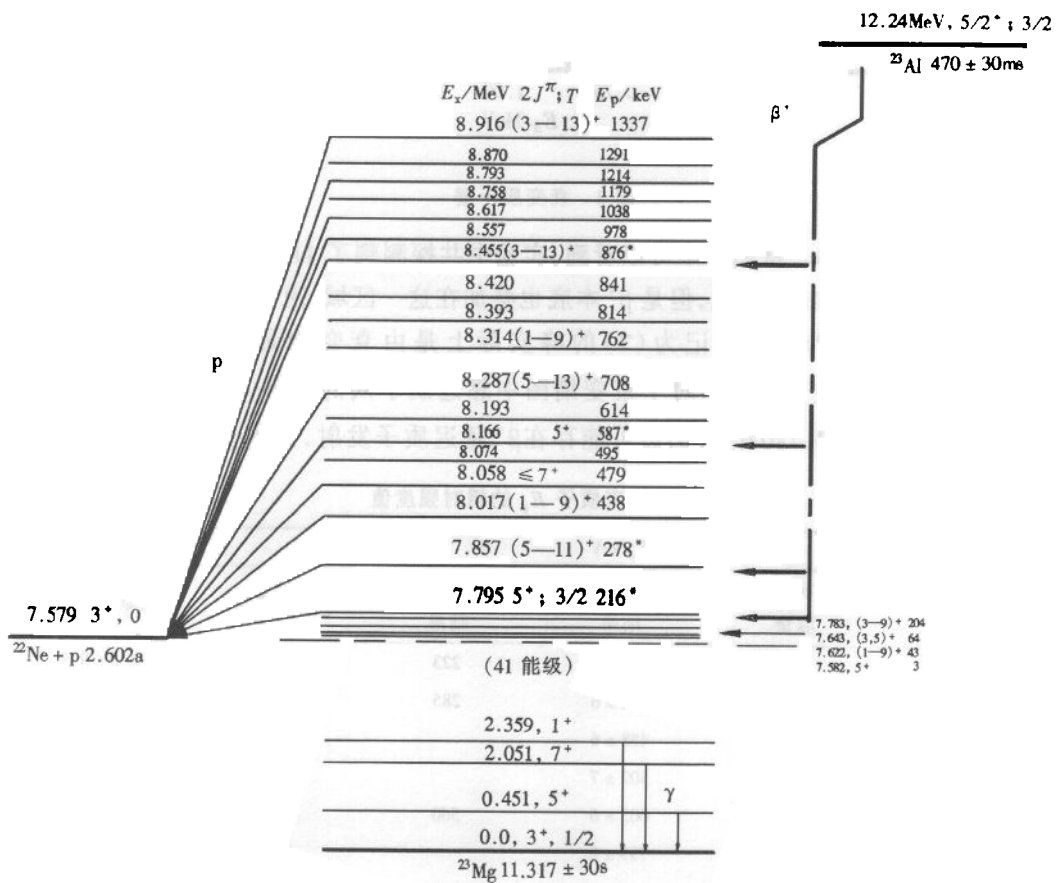


图 3 ²³Al 衰变部分纲图

由于统计性较差,本次实验各个能级的相对强度与计算值没有给出误差。从表中还可以看出衰变能量的差别主要来自于计算采用了不同的质子阈值和激发能级,本次测量中采用的最新的阈值为 7.579MeV,而文献[9]中采用的是 7.577MeV,对于 $E_d = 839\text{keV}$ 能

级,衰变能量差别较大的原因在于文献[9]中对于这一能级附近的几个能级没有分开.表中 $E_1 = 8.916\text{MeV}$, $E_4 = 1337\text{keV}$ 是首次在实验中观察到它的延发质子.由文献[18]可知,它的自旋为 $3/2^+$ 到 $13/2^+$,仍然没有确定值.从它的相对强度来看,这一能级可能为允许跃迁,即它的自旋值可能为 $3/2^+$, $5/2^+$, $7/2^+$, 而 $9/2^+$, $11/2^+$, $13/2^+$ 则为高级禁戒跃迁,其跃迁几率要比允许跃迁小得多.

根据本工作的测量结果并结合转移反应等的实验测量,我们给出了 ^{23}Al β^+ 延发质子的衰变部分纲图,如图3所示.

衰变纲图中的数据主要来自于文献[18],对于有些能级的自旋、宇称到目前为止仍不能确定.图中星号所示的4条能级为文献[9]中所给出的 β^+ 延发质子的衰变峰,另外由于在天体物理中越是靠近质子阈的能级对共振俘获截面的贡献越大,但是实验精度以及探测器的分辨本领、探测阈等因素影响了纲图中能量接近质子阈的能级的测量.

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,同时感谢核电子学组提供束流调制装置,感谢 NIM 库提供电子学插件.

参考文献 (References)

- 1 DING Da-Zhao, CHEN Yong-Shou, ZHANG Huan-Qiao. *Progress of Nuclear Physics*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1997. 446—465
(丁大钊,陈永寿,张焕乔. 原子核物理进展. 上海:上海科学技术出版社,1997. 446—465)
- 2 Kubono S et al. *Phys. Rev.*, 1992, **C46**:361—364
- 3 Vervier J. *Nucl. Phys.*, 1997, **A616**:97c—106c
- 4 XIAO Zhi-Gang, ZHANG Bao-Guo et al. *Nuclear Techniques*, 2000, **23**(1):1—5(in Chinese)
(肖志刚,张保国等. 核技术,2000,23(1):1—5)
- 5 Seuthe S, Rolfs C et al. *Nucl. Phys.*, 1990, **A514**:471—502
- 6 Schmidt S, Rolfs C et al. *Nucl. Phys.*, 1995, **A591**:227—243
- 7 Stegmüller F, Rolfs C et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **A601**:68—180
- 8 Görres J, Wiescher M et al. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:8—13
- 9 Tighe R J, Batchelder J C et al. *Phys. Rev.*, 1995, **52**:R2298—R2301
- 10 PENG Qiu-He. *Progress in Physics*, 1995, **15**(1):79—112(in Chinese)
(彭秋和. 物理学进展,1995,15(1):79—112)
- 11 ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan, LIU Guan-Hua et al. *Science in China*, 1999, **A20**(1):77—84(in Chinese)
(詹文龙,郭忠言,刘冠华等. 中国科学,1999, A20:77—84)
- 12 LI Jia-Xing, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* 1999, **23**(3):231—236(in Chinese)
(李加兴,詹文龙,郭忠言等. 高能物理与核物理,1999,23(3):231—236)
- 13 GUO Zhong-Yan, ZHAN Wen-Long, SUN Zhi-Yu et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1999, **23**(3):237—243(in Chinese)
(郭忠言,詹文龙,孙志宇等. 高能物理与核物理,1999,23(3):237—243)
- 14 DONG Ju-Xin, JIA Tian-Cheng, TANG Jing-Yu. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 1999, **19**:280(in Chinese)
(董菊心,贾天成,唐靖宇. 核电子学与核探测技术,1999,19:280)
- 15 XIAO Zhi-Gang, WANG Hong-Wei et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2001, **25**(5):394(in Chinese)

17

18

19 Angulo C, Arnould M et al. Nucl. Phys., 1999, A656:3—183

Measurement of β^+ Delay Proton Decay of $^{23}\text{Al}^*$

WANG Hong-Wei JIN Gen-Ming WU He-Yu 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, Beijing University, Beijing 100871, China)

Abstract The β^+ delay proton decay spectrum has been measured with $TOF-\Delta E$ method and zero degree detectors at the radioactive ion beam line in Lanzhou. The half-life of ^{23}Al was determined to be $T_{1/2} = (476 \pm 45)\text{ms}$ by using a time scaler combined with the precision pulse generator, which is consistent with the other group's result of $(470 \pm 30)\text{ms}$. The known β^+ delay protons at $E_d = 0.216, 0.278, 0.438, 0.479\text{MeV}$ have been observed in the experiment. A new energy level of ^{23}Mg at $E_x = 8.916\text{MeV}$ was found in the β^+ delay proton decay of ^{23}Al , and their relative intensity was also determined.

Key words radioactive ion beam, β^+ delay proton decay, excitation energy level, half life

Received 21 September 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19575055), 100 Talent Programme of CAS, Major Subjects of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03), Major State Basic Research Development Program (G2000077401) and Key Project of the National Natural Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences (19735010)