

^{20}Na β 延迟 α 衰变研究的新结果*

徐晓冀 胡志强 郭俊盛 马瑞昌 刘洪业
罗亦孝 张聿照 郭天瑞 黄文学 徐连联

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993年11月6日收到

摘 要

以 25 及 35.5 MeV 质子轰击氖靶, 对 ^{20}Na 的 β 延迟 α 衰变作了重新研究. 实验中使用了以气体电离室作为 ΔE 探测器的新型粒子望远镜系统, 在所测带电粒子谱的 0.695 MeV 及 0.907 MeV 处, 首次观察到两个新峰. 根据粒子鉴别、分支比和寿命测量, 确信它们是来自 ^{20}Na 的低能 β 延迟 α 衰变, 由此修改了 ^{20}Na 的衰变纲图和低激发态纲图, 并讨论了它在天体物理研究中的意义.

关键词 β -延迟 α 衰变, 天体物理, 质子, 鉴别.

1 引 言

众所周知, ^{20}Na 是天体物理上一个引人关注的核, 它正好处于天体核反应摆脱所谓的热 CNO (即碳氮氧) 循环, 进入快质子 (γp) 过程的关键位置上, 如图 1 所示. 与此

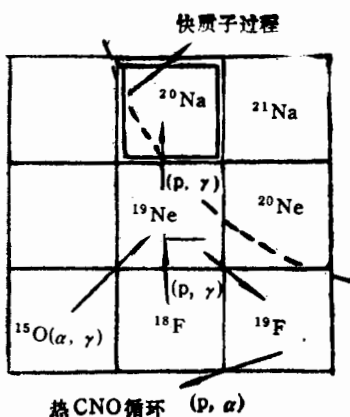
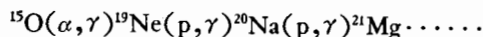


图 1 突破热 CNO 循环进入快质子 (γp) 过程示意图

有关的核反应序列是:



而 ^{21}Na 质子阈 (2199 keV) 以上的低激发态核结构信息对于增强(或减弱) $^{19}\text{Ne}(p, \gamma)^{20}\text{Na}$ 天体反应率至关重要, Lamm^[1] 和 Kubono^[2] 等人成功地观察到 ^{20}Na 质子阈以上的 2637 keV, 1^+ 第一激发态, 据理论预言, 由于此态可导致 $p + ^{19}\text{Ne}$ 反应中大幅度的 S 波共振, 比之早先的设想, $^{19}\text{Ne}(p, \gamma)^{20}\text{Na}$ 的天体反应率将增强两个数量级. 近年来, 国外一些实验室用 ^{20}Mg 的 β 延迟质子衰变所得的质子谱研究 ^{20}Na 低激发态的布居分支比, 来推测天体反应率的大小, 以求深入理解与天体演化

* 国家自然科学基金和中国科学院“八五”重大课题支持.

有密切关系的快质子过程. 在 ^{20}Mg 的 β 延迟质子衰变测量中^[3], 从 2637keV 与 3046keV 等 ^{20}Na 的低激发态发射的质子, 其质子衰变能(也即质心系质子能量)分别仅有 438keV 与 847keV. 对如此低能的质子, 测量中并没有采取严格的粒子鉴别手段; 而作为 ^{20}Mg 衰变子核的 ^{20}Na , 在其级联的 β 延迟 α 衰变中如有低能 α 衰变, 则很可能与上述的低能质子相混淆, 干扰了正确结果的获得. 如前报道^[4], 我们发现在 ^{20}Na 的 β 延迟 α 衰变中确实存在低能 α 衰变, 为此, 较详尽地研究 β 延迟 α 衰变, 特别是关注其低能 α 衰变, 就显得很有必要. 本文报道了对 ^{20}Na β 延迟 α 衰变的再次研究, 并据此提出了修改的 ^{20}Na 衰变纲图和 ^{20}Mg β 衰变到 ^{20}Na 激发态的布居分支比, 讨论了其可能的天体物理含义.

2 实 验

实验仍然在北京中国科学院高能物理研究所的直线加速器上进行, 分别用 35.5 及 25MeV 的质子轰击浓缩氚靶, 所用靶室及氦喷嘴传输收集系统如文献[4]中图 1 所示. 核反应产物通过毛细管快速传到收集室, 并喷射到室内一个连续转动的转盘上. 随着盘的转动, 反应产物轮流经过三个金硅面垒半导体探测器(或粒子望远镜)而被探测. 三个探测器沿着放射源(即反应产物)运动的轨迹圆成 20° 分开放置, 这样可以直接探测到核的衰变关系. 所用金硅面垒单探测器厚度为 $26\mu\text{m}$, 面积 64mm^2 . 采用了两种类型的粒子望远镜, 一种是由金硅面垒薄片探测器(厚 $7\mu\text{m}$, 面积 28mm^2)做 ΔE 探测器, 用金硅面垒半导体探测器(厚 $166\mu\text{m}$, 面积 154mm^2)做 E 探测器; 而另一种用气体电离室做 ΔE 探测器, 灵敏面积为 1520mm^2 , 长度为 43mm , 内充以 Ar, CH_4 气体, E 探测器为较大面积的金硅面垒半导体探测器(厚 $300\mu\text{m}$, 面积 1960mm^2). 这样设置 ΔE 探测器厚度, 能使其完全阻止 1.6MeV 以下的 α 粒子, 而让 0.8MeV 的质子穿过, 在 E 探测器中至少留下 0.38MeV 的剩余能量.

为了测量反应产物的半衰期, 采用了两种方法. 一是适当改变收集盘转速, 例如快的转速使短寿命核素产额相对突出, 反之亦然. 这样, 根据设置的不同转速及探测系统的几何条件, 并将核的可能的半衰期作为参数, 代入以下公式进行拟合计算:

$$\frac{\eta(g, t_w, t_{1/2})}{\eta(g, t_w, t_{1/2})} = \frac{R_1 \times I_2}{R_2 \times I_1}, \quad (1)$$

可得核的半衰期. 其中 η 是粒子望远镜对短寿命运动放射源的绝对探测效率(见文献[5]), g 是探测系统的几何因子, t_w 是收集盘的转动周期, R, I 分别是实验所得粒子谱中的峰下计数及实验所用的积分束流, 下标 1, 2 指分别对应的两种不同的收集盘转速. 第二种方法是考虑到三组探测器(或望远镜)沿源的运动轨迹按 20° 分开放置, 在一定转速下, 核的半衰期可按以下公式直接得出:

$$t_{1/2} = \frac{t_w \times \ln 2}{18(\ln I - \ln II)} = \frac{t_w \times \ln 2}{18(\ln II - \ln III)} = \frac{t_w \times \ln 2}{9(\ln I - \ln III)}, \quad (2)$$

这里, I、II、III 分别表示由第一个、第二个及第三个探测器(或望远镜)探测到的峰下计数.

探测系统的能量刻度分两步进行, 先用 ^{241}Am α 源及精密脉冲发生器对系统作粗略刻

度,然后参照反应中产生的已知放射性射线能量(例如 ^{20}Na 的几组 β 延迟 α 能量)对系统进行精确刻度。此外,还要对探测器入射窗和金硅面垒探测器的死层进行修正,这对于探测很低能量的带电粒子十分重要。

3 结果和讨论

用第一个 $26\mu\text{m}$ 厚的金硅面垒单探测器所测得的带电粒子全谱如图 2 所示,由图可见, ^{20}Na 的 β 延迟 α 衰变确定无疑地出现了,其能量和强度比与以前报告的值很一致^[6]。

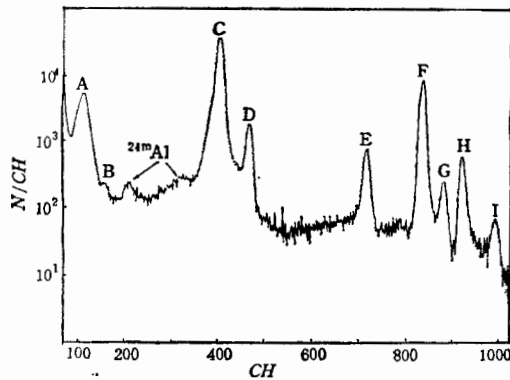


图 2 由金硅面垒半导体探测器(厚 $26\mu\text{m}$)测得的带电粒子谱
说明见表 1

有意思的是,在 0.695MeV 与 0.907MeV 处出现了两个新峰,其能量与以前预言的 ^{20}Na 的 β 延迟低能 α 衰变很一致^[7],图 3(a)—(d)分别显示了用半导体探测器望远镜所测到的双维谱及其对应的 ΔE 、 E 和 E_{tot} 谱 ($E_{\text{tot}} = \Delta E + E$),图 3(a) 双维谱中 α 带由几个斜带形的点簇组成,而不是由点团组成,每一斜带代表一个确定的 α 能量—— ^{20}Na β 延迟 α 的能量。这是由于放射源随盘转动经过探测器时, α 粒子对探测器的人射角在不断地变化,即 ΔE 探测器的等效厚度在不断地变化,但是, E_{tot} 谱的分辨仍

然很好,说明 α 粒子在 ΔE 、 E 两探测器中沉积的总能量并未因此而畸变。双维谱的 α 带下面有两团计数,下者可能主要是 β^+ 本底,上者可能是低能 α 在 ΔE 中的信号与 E 探测器中高于阈的噪声(或其它 α 粒子)的偶然符合计数。由图 3(b) 和 (d) 可见, 0.695MeV 峰的强度和半宽度 (FWHM) 在 ΔE 和 E_{tot} 谱中完全一样,这意味着粒子被完全阻停在 ΔE 探测器中,即 0.695MeV 峰是低能 α 衰变,因为,如果是质子,它将会穿过 ΔE , 在 ΔE 中只留下一部份能量,而将其剩余能量沉积在 E 探测器中。当用三个探测器级联测量,或用一个探测器在几种不同收集速度下测量时,此 0.695MeV 峰与 ^{20}Na 最强峰 (2.148MeV) 的强度比维持不变,当束流能量由 35.5MeV 降到 25MeV , 此时 $^{20}\text{Ne}(p, n)^{20}\text{Na}$ 反应截面最大,这个强度仍然不变,这意味着新峰的半衰期与 ^{20}Na 一样。事实上,本实验用方法(1)和(2)测到的 ^{20}Na 半衰期分别是 $450 \pm 13\text{ms}$ 和 $453 \pm 5\text{ms}$, 它与以前发表的数值很一致^[6]。表 1 中列出了所测 α 能量,相对强度和在 ^{20}Ne 中相应的激发态数值,并与以前结果作了比较。

这样,基于以下理由,我们将 0.695 及 0.907MeV 新峰归因于 ^{20}Na 的低能 β 延迟 α 衰变:(1) 由粒子鉴别断定是 α 衰变,半衰期与 ^{20}Na 一致;(2) 0.695MeV 的 α 衰变能 (0.869MeV) 和预言的 $^{20}\text{Ne}5.622\text{MeV}$ 激发态与 ^{16}O 基态的能量差基本一致, 0.907MeV 小峰对应的 α 衰变能也和预言的 $^{20}\text{Ne}5.785\text{MeV}$ 激发态与 ^{16}O 基态的能级差很接近;(3) 由 $^{20}\text{Ne}5.622\text{MeV}$ 及 5.785MeV 激发态到 ^{16}O 基态的 α 衰变遵守角动量及宇称守恒律 ($1^- \rightarrow$

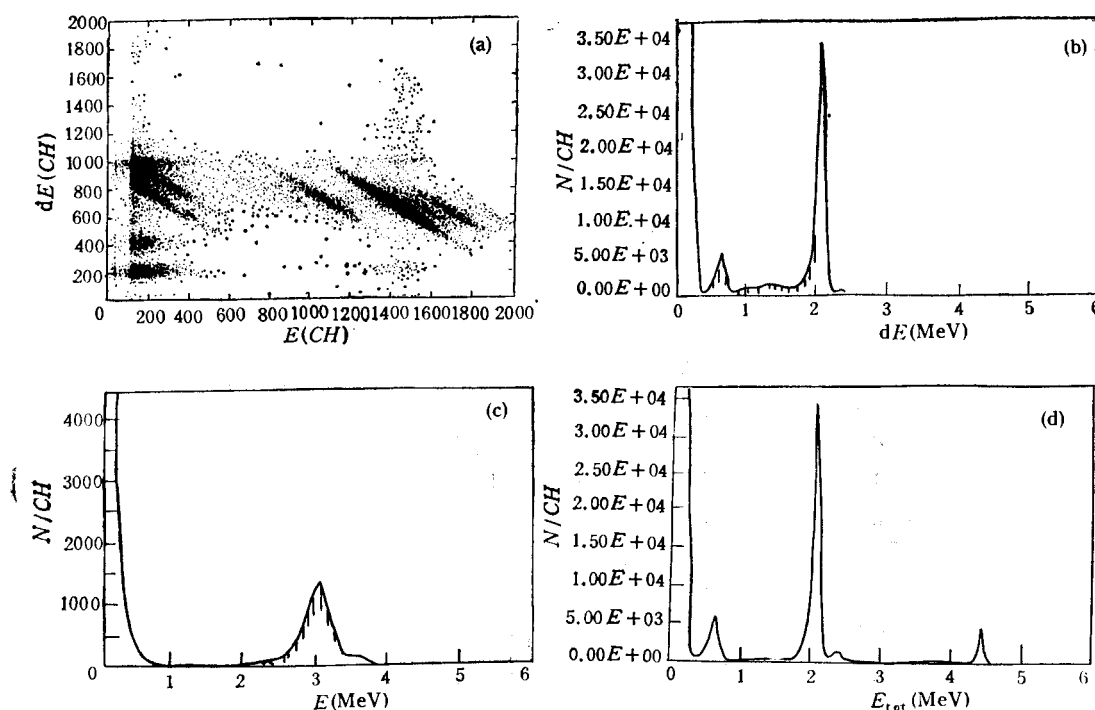
图 3 由 Si(Au) 望远镜测得的双维谱及其所对应的 ΔE 、 E 和 E_{tot} 谱表 1 ^{20}Na 的 β 延迟 α 衰变数据

图 2 中 的 峰	峰能量 (MeV)		对应的 ^{20}Ne 激发态 (MeV)		相 对 强 度	
	这次的结果	过去的结果 ^[6]	这次的结果	过去的结果 ^[9]	这次的结果	过去的结果 ^[6]
A	0.695 ± 0.016		5.603	5.622	19.21 ± 0.02	
B	0.907 ± 0.021		5.868	5.785	0.30 ± 0.03	
C	2.153 ± 0.008	2.148 ± 0.005	7.425	7.424	100.00	100.00
D	2.481 ± 0.006	2.477 ± 0.007	7.835	7.834	3.96 ± 0.01	4.12 ± 0.10
E	3.803 ± 0.005	3.801 ± 0.007	9.488	9.49	1.58 ± 0.01	1.51 ± 0.04
F	4.439 ± 0.003	4.438 ± 0.005	10.283	10.274	17.65 ± 0.02	17.39 ± 0.11
G	4.683 ± 0.002	4.683 ± 0.007	10.588	10.58	0.57 ± 0.01	0.53 ± 0.04
H	4.897 ± 0.002	4.894 ± 0.007	10.855	10.85	1.13 ± 0.05	1.18 ± 0.02
I	5.271 ± 0.002	5.272 ± 0.015	11.323	11.32	0.17 ± 0.01	0.22 ± 0.02

$^{+}, 3^{-} \rightarrow 0^{+}$); (4) 根据反应道分析, 本实验中超过反应阈能产生的 β 延迟 α 粒子先驱核只可能是 ^{20}Na 或 ^{24}Mg 和 ^{24}Al , 但是 ^{24}Al 的粒子分支比比 ^{20}Na 小三个多数量级, 实验中不可能看到。图 2 中还可看到的另外两个弱峰, 分别位于 1.21 MeV 和 1.73 MeV, 它们来源于 ^{24}Mg 的 β 延迟 α 衰变, ^{24}Mg 是由质子与靶室中的 Mg 杂质反应而产生的。

结论: 基于上述事实, 我们探测到了质子轰击氖反应中产生的 ^{20}Na , 首次观察到 0.695 MeV 的 ^{20}Na β 延迟低能 α 衰变, 它是 ^{20}Na 次强的 β 延迟 α 衰变。以前报道的 0.78 MeV α 衰变^[4] 应以此次报道的 0.695 MeV 为准。

根据新的实验结果,结合 ^{20}Na 的已知数据,重新计算了 ^{20}Na β 衰变到 ^{20}Ne 相应激发态的分支比及 $\log ft$ 值,列于表 2 中,并据此提出了修改的 ^{20}Na 衰变纲图,如图 4 所示。

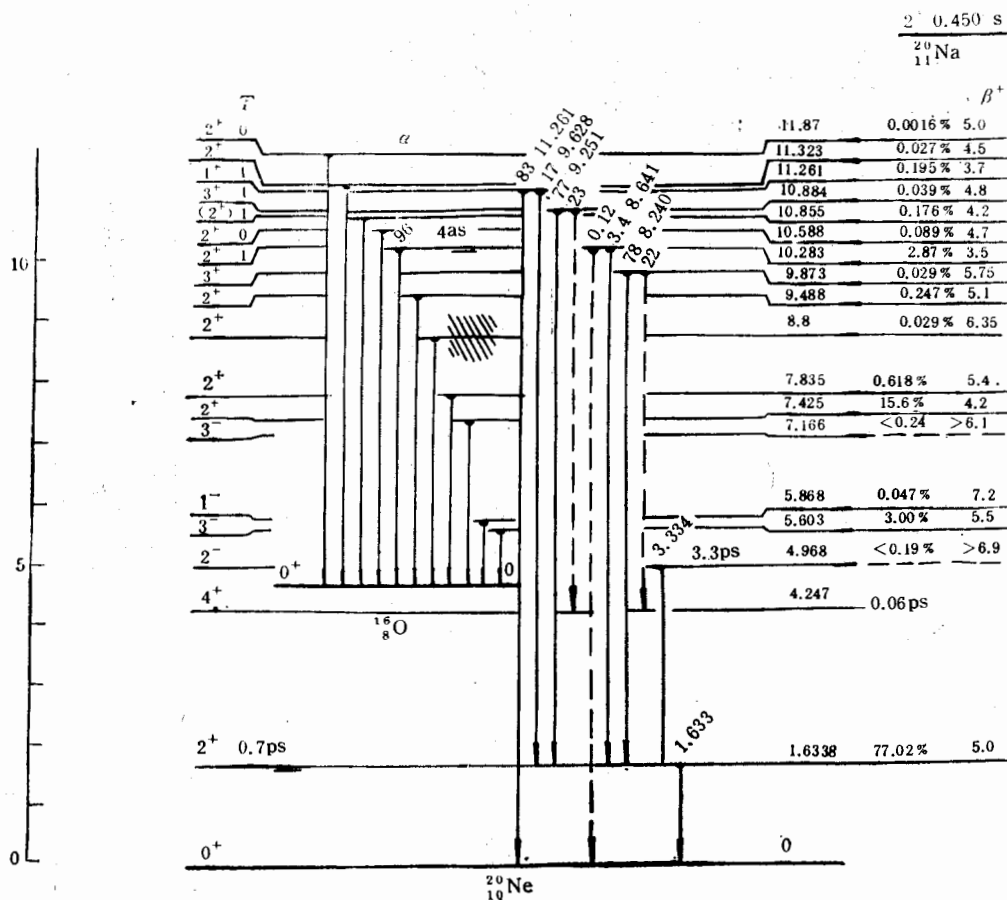


图 4 修改的 ^{20}Na 衰变纲图

^{20}Na 0.695MeV β 延迟 α 衰变的发现,提醒我们重新考虑由 ^{20}Mg β 延迟质子衰变建立起来的 ^{20}Na 低激发态纲图^[3],它忽略了紧接着 ^{20}Mg β 衰变的 ^{20}Na 0.695MeV 低能 β 延迟 α 衰变(相应的衰变能为 0.869MeV),注意到在 ^{20}Mg β 延迟质子衰变中,来自 3.046 MeV ^{20}Na 激发态的 847keV 质子衰变,在能量上与 ^{20}Na 的 0.695MeV β 延迟 α 衰变(衰变能 869keV)相混,而在此低能区并没有令人信服的粒子鉴别,换言之, ^{20}Mg 实验中 0.847MeV 的“质子”峰计数与由此得出的 ^{20}Mg β 衰变到 3.046MeV 激发态的分支比是被过高地估计了,从核谱学和天体物理学的观点来看,以新的实验结果来修改 ^{20}Na 激发态能级纲图有着重要意义。

根据本次实验所得到的 0.695MeV α 峰在谱中的相对强度和以前报道的 ^{20}Na β 衰变分支比,以及 ^{20}Mg β 衰变的分支比,修改了 ^{20}Mg β 衰变到 ^{20}Na 激发态的分支比,结果列于表 3 中。据此所得的 ^{20}Mg β 延迟质子衰变以及与此级联的 ^{20}Na β 延迟 α 衰变纲

表 2 $^{20}\text{Na}\beta$ 衰变的分支比和 $\log ft$ 值

^{20}Ne 激发态 (MeV)	分支比		$\log ft$ 值	
	这次的结果	过去的结果 ^[9]	这次的结果	过去的结果 ^[9]
1.6338	77.02%	79%	5.0	5.0
4.968	<0.19%	<0.2%	>6.9	>6.9
5.603	3.0%	} <0.5%	5.5	} >6.3
5.868	0.047%		7.2	
7.166	<0.24%	<0.25%	>6.1	>6.1
7.425	15.6%	16%	4.2	4.2
7.835	0.618%	0.7%	5.4	5.4
8.8	0.029%	0.03%	6.35	6.3
9.488	0.247%	0.25%	5.1	5.0
9.873	0.029%	0.03%	5.75	5.7
10.283	2.87%	2.9%	3.5	3.5
10.588	0.089%	0.09%	4.7	4.7
10.855	0.176%	0.19%	4.2	4.2
10.884	0.039%	0.04%	4.8	4.8
11.261	0.195%	0.20%	3.7	3.7
11.323	0.027%	0.036%	4.5	4.5
11.87	0.0016%	0.0016%	5.0	5.0

图如图 5 所示。

由此可见,比较大的修改是对 $^{20}\text{Mg}\beta$ 衰变到 ^{20}Na 的 3.046MeV 激发态的分支比,到此态的分支比大约减少了近 30%,而到其它态的分支比将相对有所增加,但是,对于引人注目的 2637keV 第一激发态,它在 $^{20}\text{Mg}\beta$ 延迟质子衰变中仍然是弱布居(分支比 <1.1%),这使如下理论预言成了问题,即由于 2637keV 第一激发态的存在,将使 $^{19}\text{Ne}(p,\gamma)^{20}\text{Na}$ 天体反应率增加两个数量级。然而,这结果却与早先的猜想相一致^[8],即 2637keV 态是最低的 $2\hbar\omega$ 低位侵入态 $[(1p)^2(2s1d)^6]^+$ 。看来,对这一问题作进一步的理论探讨是很有意义的。

中国科学院高能物理研究所质子加速器室全体同志对本工作给予了大力的支持,并在实验中进行了密切的合作,特别是高效率地提供束流,作者表示深切的感谢。

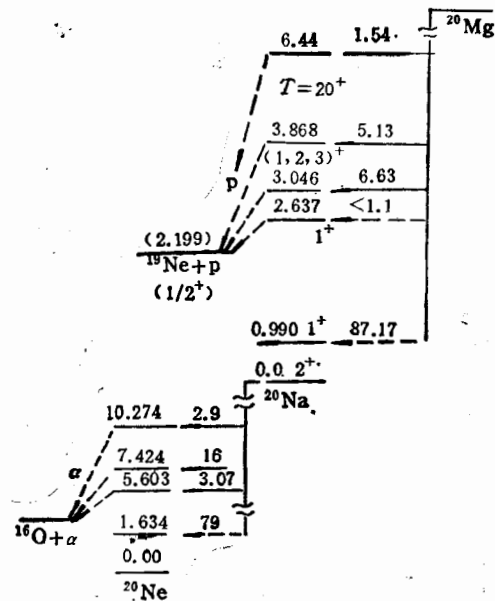


图 5 ^{20}Mg — ^{20}Na 级联 β 延迟粒子衰变纲图

表3 修改的 $^{20}\text{Mg}\beta$ 衰变到 ^{20}Na 各态分支比

E_p^m (keV)	文献[10]	文献[3]	分支比				激发态能量 (keV)	
			文献[10]	修改值	文献[3]	修改值	文献[10]	文献[3]
束缚态			74±7	75.7	85	87.2		
446			0.2	0.2	1	1.1		2637±17
807±10	847		10.7±0.5	8.7	9	6.6	3006±10	3046±20
1670±10	1699		5.4±0.5	5.5	5	5.1	3869±11	3868±40
4098±19	3990		1.3±0.6	1.3	1.5	1.5		6440
							6533±15	
4332±16	4239		1.7±0.6	1.7				

参 考 文 献

- [1] L. O. Lamm et al., *Z. Phys.*, **A327** (1987) 239.
 [2] S. Kubono et al., *Z. Phys.*, **A331** (1988) 359.
 [3] S. Kubono, N. Ikeda and Y. Funatsu et al., *Phys. Rev.*, **C46** (1992) 361.
 [4] 徐晓冀、郭俊盛、胡志强等, 高能物理与核物理, **17**, (1993) 577.
 [5] 胡志强、徐晓冀, 粒子望远镜对运动放射源的绝对探测效率研究, 原子能科学技术, 待发表.
 [6] D. F. Torgerson, K. Wien and Y. Fares et al., *Phys. Rev.*, **C8**(1973) 161.
 [7] J. D. Pearson, E. Almqvist and J. A. Kuehner, *Can J. Phys.*, **42**(1964) 489.
 [8] L. O. Lamm et al., *Nuclear Physics*, **A510**(1990) 503.
 [9] C. Michael Lederer and Virginia S. Shirley, Table of Isotopes, Seventh Edition, P. 32.
 [10] J. Gorres, M. Wiescher and K. Scheller et al., *Phys. Rev.*, **C46** (1992) R833.

New Results of β -delayed α Decay of ^{20}Na

Xu Xiaoji Hu Zhiqiang Guo Junsheng Ma Ruichang Liu Hongye
 Luo Yixiao Zhang Yuzhao Guo Tianrui
 Huang Wenxue Xu Lianlian

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Received on November 6, 1993

Abstract

The β -delayed α decay of ^{20}Na was restudied using neon target bombarded by 25 and 35.5 MeV protons. In this experiment a newly developed particle-telescope system including a gas ionization chamber as a thin ΔE detector was used. Two new peaks, one at 0.695 MeV and other at 0.907 MeV, were observed for the first time in the charged particle spectra. Based on particle identification, branching ratio and life time measurement, it is believed that these new peaks result from β -delayed low energy α decay of ^{20}Na . The decay scheme and the low-lying level scheme of ^{20}Na were thus revised. Its possible astrophysical implications were discussed.

Key words β -delayed, α Decay, astrophysics, proton, Identification.