

$^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的实验研究*

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

(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 讨论了目前有关 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的实验研究工作,结合兰州放射性束流线上的放射性束流 ^{23}Al 的 β^+ 延发质子衰变实验的测量结果,给出了 ^{23}Al 延发衰变的质子能谱,并比较了近期实验给出的相关能级的自旋、宇称值,正是由于这种自旋、宇称和能级部分宽度的不确定性,导致了反应率计算的不确定性.计算了同位旋相似态的共振强度.对于测量到的新的延发衰变能级 $E_d = 8.916\text{MeV}$,由于没有相应的能级宽度值,实验仅给出其相对共振强度值.

关键词 氢燃烧 β^+ 延发质子衰变 共振 反应率

1 引言

1972年,Black等在奥盖尔(Orgueuil)陨石中发现Ne同位素的丰度异常现象(简称为NeE问题),其中 ^{22}Ne 的丰度明显地反常高:($^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$) > 0.67,而地球上 $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ 的比值为0.10.人们认为这些过多的 ^{22}Ne 是在太阳系形成年代,由于附近的新星和超新星爆发过程中抛射新合成的 ^{22}Na 衰变形成的($^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \beta + \gamma$, γ 射线的能量为1.274MeV),由于 ^{22}Na 的寿命只有2.6a,其1.274MeV的 γ 射线强度对新星和超新星爆发的频度很灵敏,但是自从1979年以来的宇宙飞船和探空气球的 γ 射线观测表明,除了 ^{26}Al 的1.809MeV的 γ 射线和SN1987A的 ^{56}Co 衰变的 γ 射线外,迄今尚未探测到其他放射性核素(例如 ^{44}Ti , ^{44}Sc , ^{56}Ni , $^{57,60}\text{Co}$, ^{60}Fe 等)的 γ 射线,而 ^{22}Na 对应的1.274MeV的 γ 射线流量仅给出刚好在观测流量阈值的上限^[1-4].因此有关 ^{26}Al , ^{22}Na 的来源问题的研究,在天体物理学界和核物

2002-01-17收稿

*国家自然科学基金(10175081, 19575055, 19735010),中国科学院“百人计划”,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),所长基金资助

1) E-mail: wanghw@impcas.ac.cn

理学界掀起了研究热潮,成为当前核天体物理学最热门的课题之一。

人们所关注的 ^{22}Na 合成反应,主要集中在氢燃烧过程的 NeNaMgAl(图 1)区域,其中 rp 过程(rapid proton capture process)对于人们了解 ^{22}Ne 的合成具有重要的意义。根据不同天体的温度和密度条件,产生 ^{22}Na 的反应序列有以下几种,其中最感兴趣的是 NeNa 循环: $^{20}\text{Ne}(p,\gamma)^{21}\text{Na}(\beta^+,\nu)^{21}\text{Ne}(p,\gamma)^{22}\text{Na}$ 和更高温度、更高密度条件下的热 NeNa 循环: $^{20}\text{Ne}(p,\gamma)^{21}\text{Na}(p,\gamma)^{22}\text{Mg}(\beta^+,\nu)^{22}\text{Na}$ 反应链^[5]。在 NeNa 循环中, ^{22}Na 是通过质子俘获反应合成的,在后一反应序列中, ^{22}Na 的产生率依赖于 ^{22}Mg 的质子俘获几率的竞争。除了 ^{22}Na 合成反应外,消耗 ^{22}Na 的关键反应 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 的反应率也是目前天体核物理研究的重点。

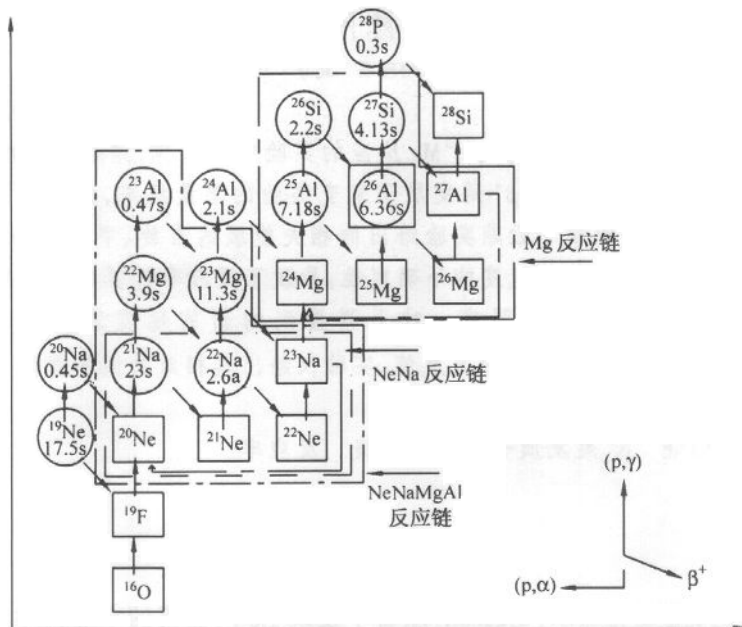


图 1 NeNaMgAl 反应链^[4]

圆形为 β^+ 不稳定核,图中标明了它们的半衰期,方形为稳定核。

由于 ^{23}Mg 在接近质子阈附近的能级密度很低,其 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应率是由一个或几个共振态来决定的,而统计的 Hauser-Feshbach (HF) 理论计算值是不可靠的,因此对于 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的研究,主要集中在对 ^{23}Mg 的质子阈能(7.579MeV)以上的激发能级的测量上。目前有 3 种方法对 ^{23}Mg 的能级参数进行测量:(1) 直接反应,由于 ^{22}Na 的半衰期为 2.6a,因此在实验上最早采用质子束轰击 ^{22}Na 的放射性靶来研究 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应,如 Wiescher^[2,5]等采用的 $^{22}\text{NaCl}$ 靶,Seuthe^[6]等采用的 ^{22}Na 注入靶。(2) 转移反应,如 Kubono^[7]等利用 $^{24}\text{Mg}(p,d)^{23}\text{Mg}$ 反应,Schmidt^[8]等利用 $^{22}\text{Na}(^3\text{He},d)^{23}\text{Mg}$ 反应。(3) β^+ 延迟质子衰变,Tighe^[9]等的 $^{24}\text{Mg}(p,2n)^{23}\text{Al} \xrightarrow{\beta^+} ^{23}\text{Mg} \xrightarrow{p} ^{22}\text{Na}$ 反应,以及本工作组的放射性次级束 $^{23}\text{Al} \xrightarrow{\beta^+} ^{23}\text{Mg} \xrightarrow{p} ^{22}\text{Na}$ 反应^[10,11]等。1999 年 Angulo^[12]在他的总结性文章中共列出了目前测量到的 21 条对 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应率有贡献的共振态。由于很多能级的自旋、宇称

及能级部分宽度还不确定,因此对 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ (Gamow 窗为 $T_0(\times 10^9\text{K}) = 0.05-1.0$, 相应的质心系能量为 81—595keV)的反应率的计算值只给出了上下限,尤其是在较低温度时,反应率的不确定性仍然达到几个量级. 所以提高实验精度、降低探测阈、确定能级的自旋、宇称和部分宽度仍是目前实验研究的重点.

2 β^+ 延发质子衰变实验测量结果

我们利用 RIBLL^[13] 提供的放射性次级束,通过 TOF- ΔE 方法从一系列核中鉴别出 ^{23}Al 后,停束测量 ^{23}Al 的 β^+ 延发质子衰变. 能谱测量采用一组 0° 金硅面垒型探测器,图 2 给出了实验测量的质子能谱,图中标出了各个峰所对应的 ^{23}Al 的 β^+ 延发质子衰变能量及其半衰期,半衰期的测量是通过精密脉冲发生器和计数器来进行的,测量值(476 ± 45)ms 同核数据表中给出的半衰期(470 ± 30)ms 在误差范围内相一致. 另外,从图中可以看到第七个峰包含了邻近的几个能级的贡献. 详细的实验布局、测量过程可参见文献 [10,11,14].

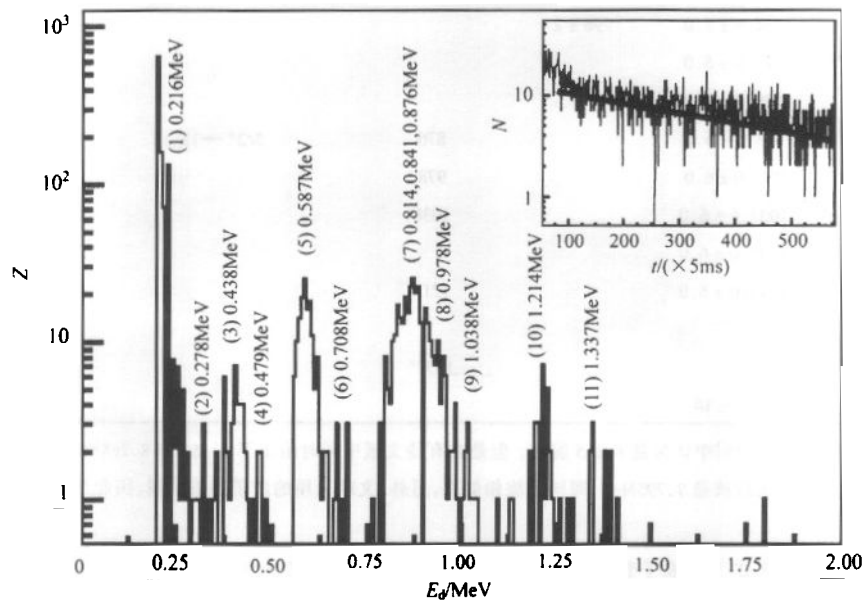


图 2 衰变质子能谱

3 结果与讨论

在我们的实验中,共测量到了 11 条质子阈以上的激发能级(由于 β 跃迁选择定则的限制,有些能级的强度较弱,因此实验中不能观察到). 表 1 给出了测量结果和目前已有的实验数据的比较,其中某些能级的自旋、宇称还不确定(这给 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应率计算中带有很大不确定性,导致了不同的反应序列的产生).

表 1 $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应中的相关激发能级及其自旋、宇称

E_x/MeV	E_d/keV			J^π	
	文献[12]	文献[15]	本组测量	文献[12]	文献[15]
7.582	2.6 ± 6.0			$5/2^+$	$5/2^+$
7.622	41.6 ± 8.0			$7/2^+, 9/2^+$	$1/2^+ - 9/2^+$
7.643	61.6 ± 8.0			$3/2^+, 5/2^+$	$3/2^+, 5/2^+$
7.783	204.1 ± 2.3	213 ± 3^b		$1/2^+ - 11/2^+, 5/2^- - 7/2^-$	$3/2^+ - 9/2^+$
7.795	215.6 ± 6.0		216	$5/2^+$	$5/2^+$
7.857	274.0 ± 6.0	290 ± 2	278	$7/2^+, 9/2^+$	$5/2^+ - 11/2^+$
8.017	436.6 ± 6.0	457 ± 2	438	$3/2^-$	$1/2^- - 9/2^+$
8.058	478.6 ± 7.0	503 ± 2	479	$5/2^-$	$\leq 7/2^+$
8.074	496.3 ± 8.0			$5/2^+$	
8.155*	575.6 ± 6.0			$3/2^+$	
8.165	585.1 ± 1.6	613 ± 2	587	$5/2^+$	$5/2^+$
8.193	613.6 ± 8.0			$7/2^-$	
8.287	705.6 ± 8.0	740 ± 2	708		$5/2^+ - 13/2^+$
8.341	754.6 ± 8.0	796 ± 2			$1/2^+ - 9/2^+$
8.393	813.6 ± 6.0				
8.420	840.6 ± 6.0				
8.455	873.6 ± 5.0		876	$3/2^+ - 13/2^+$	$3/2^+ - 13/2^+$
8.557	977.6 ± 6.0		978		
8.617	1037.6 ± 6.0		1038		
8.758	1178.6 ± 6.0				
8.793	1213.6 ± 8.0		1214		
8.870					
8.916			1337 ^c		$3/2^+ - 13/2^+$
9.596	1931 ± 14				$1/2^+ - 9/2^+$

a 这一能级在文献[15]中认为是 8.165 能级. 但是在有些文献中同时给出了 8.155 和 8.165 MeV 的两个能级.

b 这里的给出能级应该是 7.795 MeV, 即同位旋相似态, 另外, 文献采用的质子阈值不同, 因此给出的衰变质子能量 E_d 亦不同.

c 此能级为本组在 β^+ 延发质子衰变中测量到的一条新的延发质子衰变能级

3.1 同位旋相似态的共振强度计算

我们利用已知共振强度的衰变质子峰, 由其衰变强度的比值推导出同位旋相似态 IAS 的相对共振强度值, $\omega\gamma_1/\omega\gamma_2 = E_1 I_1/E_2 I_2$ ^[16], 其中 E 为共振能量, I 为对应峰的强度, 即衰变质子峰的面积. 由文献[8]可知, 对于 7.857 MeV 能级的测量较准确, 其共振能量为 (274.0 ± 6.0) keV, 共振强度为 $\omega\gamma = 15.8 \pm 3.4$ meV, 由 IAS 和 7.857 MeV 能级的衰变质子强度比为 0.933, 因此我们得到 IAS 共振强度^[2]为 $\omega\gamma = (11.4 \pm 6.0)$ meV. 将镜像核 ^{23}Na 最低的 $T = 3/2$ 的 γ 衰变部分宽度 Γ_γ 作为 ^{23}Mg IAS 的总宽度 $\Gamma_{\text{tot}} \approx \Gamma_\gamma = (3.0 \pm 0.2)$ eV^[15], 可以推导 IAS 态的质子衰变部分宽度为 $\Gamma_p = 14\omega\gamma/(2J + 1) = (26.6 \pm 13.0)$ meV

$$\left(\omega\gamma = \frac{(2J+1)\Gamma_\gamma\Gamma_p}{(2J_p+1)(2J_T+1)\Gamma_{tot}} \right)$$
 其中 J 为激发态的自旋, J_p, J_T 分别为弹、靶核的自旋, 对于²²Na(p,γ)²³Mg 反应来说, $J_p = 3, J_T = 1/2, \Gamma_{tot} = \Gamma_\gamma + \Gamma_p + \dots$, 由于测量的统计误差很大, 我们给出的相对共振强度值的误差也较大. 另外, 可以定义某一衰变态的延发质子衰变强度为 $I = I_\beta \frac{\Gamma_p}{\Gamma_{tot}}$, I_β 为 β 衰变强度, 并假设 $\Gamma_{tot} = \Gamma_p + \Gamma_\gamma$, 同样可以利用一已知衰变质子峰, 由其衰变强度的比值推导出同位旋相似态 IAS 的 Γ_p 值, 但是从目前的实验测量的数据来看, 对²²Na(p,γ)²³Mg 反应有贡献的激发能级, 还没有一个能级给出完整的以及 Γ_{tot} 值. 最近的壳模型理论计算给出的质子衰变部分宽度为 $\Gamma_p = 17.5 \text{meV}^{[17]}$. 表 2 给出了目前几个实验对 IAS 共振强度的测量值.

表 2 实验测量的 IAS 共振强度值

实验组	本组测量	文献[18]	文献[6]	文献[8]	文献[9]	文献[16]
共振强度/meV	11.4 ± 6.0	2.2 ± 1.0	≤ 1.3	0.05 ≤ ωγ ≤ 33	45 ± 25	≤ 2.6

表中文献[9]和[18]定义了一个质子分支比 B_p (proton branching ratio) 为质子衰变部分宽度和 γ 衰变部分宽度的比值 $B_p = \Gamma_p/\Gamma_\gamma$, 如果 $\Gamma_\gamma \gg \Gamma_p$, 则 $\Gamma_{tot} \approx \Gamma_\gamma$, 同样利用镜像核²³Na的 Γ_γ 作为²³Mg 的 IAS 的总宽度 $\Gamma_{tot} = (3.0 \pm 0.2) \text{eV}$ 值. 文献[9]根据简单的理论假设给出 $B_p = \Gamma_p/\Gamma_\gamma$ 为 $3.5 \pm 1.9\%$, 得到 $\Gamma_p = (0.11 \pm 0.06) \text{eV}$, 最后给出的共振强度值为 $(45 \pm 25) \text{meV}$. 文献[18]测量了 IAS 态的衰变质子和 γ 射线, 通过数据分析给出质子分支比: $B_p = \Gamma_p/\Gamma_\gamma = (0.17 \pm 0.08)\%$, 由 $\Gamma_\gamma = (3.0 \pm 0.2) \text{eV}$, 得到 $\Gamma_p = (5 \pm 2) \text{meV}$, 共振强度值为 $(2.2 \pm 1.0) \text{meV}$, 文献[6]的共振强度是通过测量 γ 射线强度推导出的, 文献[8]的质子衰变部分宽度值是由 $\Gamma_p = \Gamma_{\beta p} C^2 S$ ($\Gamma_{\beta p}$ 为单粒子宽度, 由 DWUCK4 计算出, C^2 为同位旋相关的 Clebsch-Gordan 系数, S 为谱因子) 计算得到的, 文献[16]中假设了 γ 射线跃迁到基态和第一, 第二激发态, 由 γ 射线产额得到 γ 衰变部分宽度. Angulo^[12]等在总结了所有的实验结果后, 给出的 IAS 态的采用值是 $2.6_{-2.6}^{+2.3} \times 10^{-1} \text{meV}$. 由此可见, 目前有关 IAS 的共振强度的确定仍然有很大的误差, 各个实验组给出了不同的范围, 因此还需要实验测量精度的进一步提高.

同样, 可以给出在²³Al 的 β⁺ 延发质子衰变测量中发现的一条新的延发质子能级 8.916MeV (衰变能量为 1.337MeV) 的相对共振强度为 $\omega\gamma = 128.5 \text{meV}$, 文献[18]测量到的 9.598MeV (衰变能量为 1.931MeV) 能级的相对共振强度为 $\omega\gamma = 53.4 \text{meV}$.

由于用于计算共振强度及共振截面的能级参数 $\Gamma_\gamma, \Gamma_p, \Gamma_{tot}$ 和自旋、宇称等的实验值的不确定性, 以及壳模型对于激发能大于 6MeV 的能级的计算结果同实验测量的差距较大, 还不能准确地认定一些能级同实验测量值的对应关系, 特别是自旋、宇称可以有多个可能值. 同时, 在超过 6MeV 的激发能时, 由于能级的交叉, 使得²³Na 的镜像态与²³Mg 不能正确对应, 因此不能再利用镜像态的信息. 所以对这些能级宽度的精确测量是我们下一步实验的重点, 同时也是力求能够测量到靠近质子阈的 4 条能级以及能够分辨出衰变质子能量在 700—880keV 之间的几个能级.

3.2 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的反应率

表 3 给出了已测得的 21 条能级的共振强度值^[6,8,12,16], 对于最新实验测量得到的两个新的激发能级的贡献, 没有包括在内. 对于直接俘获 (DC) 的贡献, 可参见文献[6], 计算也表明, 非共振直接俘获的贡献是可以忽略的 (如图 3 中虚线所示).

表 3 目前 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的共振强度采用值

E_r/keV	J^π	$\omega\gamma/\text{meV}$
2.6 ± 6.0	$5/2^+$	$1.4^{+13}_-4 \times 10^{-64}$
41.6 ± 8.0	$7/2^+, 9/2^+$	$7.2^{+20}_-7 \times 10^{-13}$
61.6 ± 8.0	$3/2^+, 5/2^+$	$2.9^{+12}_-2 \times 10^{-9}$
204.1 ± 2.3	$1/2^+ - 11/2^+, 5/2^- - 7/2^-$	1.8 ± 0.7
215.6 ± 6.0	$5/2^+$	$2.6^{+23}_-2 \times 10^{-1}$
274.0 ± 6.0	$7/2^+, 9/2^+$	15.8 ± 3.4
436.6 ± 6.0	$3/2^-$	68 ± 20
478.6 ± 7.0	$5/2^-$	37 ± 12
496.3 ± 8.0	$5/2^+$	$7.5^{+67}_-5 \times 10^{-1}$
575.6 ± 6.0	$3/2^+$	$8.3^{+25}_-8 \times 10^{-1}$
585.1 ± 1.6	$5/2^+$	235 ± 33
613.6 ± 8.0	$7/2^-$	$8.9^{+80}_-8 \times 10^{-1}$
705.6 ± 8.0		364 ± 60
754.6 ± 8.0		95 ± 30
813.6 ± 6.0		2^{+18}_-2
840.6 ± 6.0		2^{+18}_-2
873.6 ± 5.0	$3/2^+ - 13/2^+$	2.1^{+19}_-1
977.6 ± 6.0		1.5^{+13}_-5
1037.6 ± 6.0		4.4^{+40}_-4
1178.6 ± 6.0		5.1^{+46}_-5
1213.6 ± 8.0		5.1^{+46}_-3

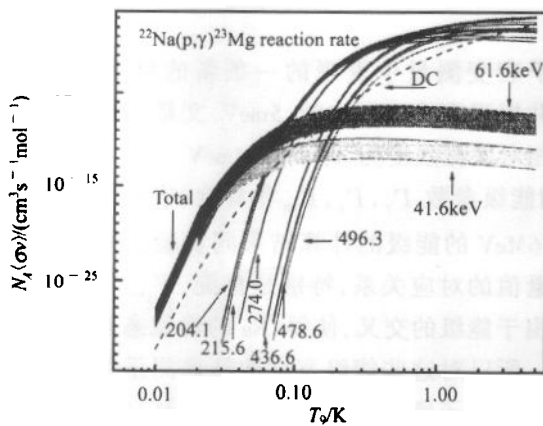


图 3 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的反应率

根据共振态反应率的公式^[12]:

$$N_A \langle \sigma v \rangle_r = 1.5394 \times 10^{11} (\mu T_0)^{-3/2} \cdot \left(\sum_i \omega \gamma \right) \exp(-11.605 E_i / T_0), \quad (1)$$

其中 μ 为系统的约化质量, E_i 为共振能, 我们可以计算出 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的反应率, 图 3 显示了根据实验测量 $\omega\gamma$ 值计算 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应的反应率. 图中只显示了几条较低的能级共振态的贡献, 总的反应率包含了所有 21 个共振态的贡献. 我们实验中测量到的 1.337MeV 共振态, 以及文献[18]中

测量到的 1.931 MeV 的共振态的贡献没有计算在内. 可以从图中看出, 高能共振态对于较高的 T_0 温度处的反应率的贡献较大, $T_0 < 0.05$ 时, 主要是 41.6 和 61.6 keV 的贡献, 2.6 keV 的贡献较小, 实际上这一能级的 $\Gamma_p \approx 0$, 主要是 γ 跃迁过程.

图 4 显示了本工作 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应率的测量值与文献 [19] 的比值 $\eta = \frac{N_A \langle \sigma v \rangle_{\text{目前测量值}}}{N_A \langle \sigma v \rangle_{\text{文献[19]值}}}$, 其中深色区域为测量值的上限, 浅色区域为测量值的下限. 由图可知在 $T_0 < 0.1$ 的范围内, 反应率的误差比较大, 主要来源于于较低的几条能级的共振强度的误差. 在 $T_0 < 0.02$ 时, 目前的反应率要大于文献 [19] 的值. 在 $0.1 < T_0 < 5.0$ 时, 采用的反应率约为文献 [19] 的 1/10.

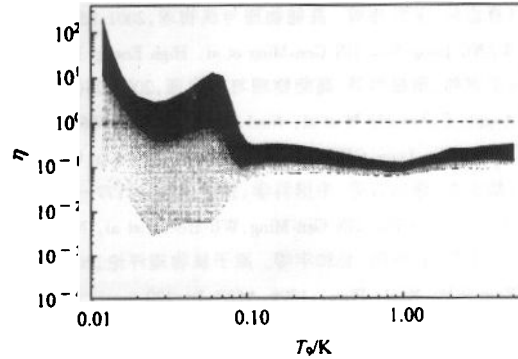


图 4 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应率的测量值与文献 [19] 的反应率的比值

4 结论

通过以上计算与讨论, 我们得到了 IAS 共振强度为 $\omega\gamma = (11.4 \pm 6.0) \text{meV}$, 以及新的延迟质子能级 8.916 MeV 的相对共振强度为 $\omega\gamma = 128.5 \text{meV}$, 9.598 MeV 能级的相对共振强度为 $\omega\gamma = 53.4 \text{meV}$. 结合本工作组的测量及文献的测量结果, 我们计算了 $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$ 反应率, 从中可以看出, 在不同的温度下, 各个共振态的贡献是不同的, 而非共振直接俘获的贡献则可以忽略. 本组测量结果和文献的数据相比较, 其误差主要来源于于较低的几条能级的共振强度的测量误差.

作者感谢 HIRFL 和 RIBLL 成员在实验过程中的精心调束, 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, 及 NIM 库提供电子学插件.

参考文献 (References)

- 1 Arnould M, Norgaard H. *Astron. Astrophys.*, 1978, **64**:195
- 2 Wiescher M, Langanke K. *Z. Phys.*, 1986, **A325**:309
- 3 DING Da-Zhao, CHEN Yong-Shou, ZHANG Huan-Qiao. *Progress in Nuclear Physics*, Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1997, 446—465 (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, 446—465)
- 4 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)
- 5 Cörres J, Wiescher M, Graff S et al. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:8—13
- 6 Seuthe S, Rolfs C et al. *Nucl. Phys.*, 1990, **A514**:471—502
- 7 Kubono S, Yun C C, Boyd R N et al. *Z. Phys.*, 1994, **A348**:59—60

- 8 Schmidt S, Rolfs C et al. Nucl. Phys., 1995, **A591**: 227—243
- 9 Tighe R J, Batchelder J C et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: R2298—R2301
- 10 XIAO Zhi-Gang, WANG Hong-Wei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(5): 394—398 (in Chinese)
(肖志刚, 王宏伟等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(5): 394—398)
- 11 WANG Hong-Wei, JIN Gen-Ming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(10): 971—976 (in Chinese)
(王宏伟, 靳根明等, 高能物理与核物理, 2001, **25**(10): 971—976)
- 12 Angulo C, Arnould M et al. Nucl. Phys., 1999, **A656**: 3—183
- 13 ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. Science in China, 1999, **A20**(1): 77—84 (in Chinese)
(詹文龙, 郭忠言等, 中国科学, 1999, **A20**(1): 77—84)
- 14 WANG Hong-Wei, JIN Gen-Ming, WU He-Yu et al. Nuclear Physics Review, 2002, **19**(1): 13 (in Chinese)
(王宏伟, 靳根明, 吴和宇等. 原子核物理评论, 2002, **19**(1): 13)
- 15 Endt P M. Nucl. Phys., 1998, **A633**: 1—220
- 16 Stegmüller F, Rolfs C et al. Nucl. Phys., 1996, **A601**: 68—180
- 17 Siiskonen T, Lipas P O. Proceedings of the Procon'99 Conference. In: Batchelder J C, First Int. Symp. on Proton-Emitting Nuclei, Procon'99, Oak Ridge, Tennessee: (N. Y.) American Institute of Physics, 2000. 1—9
- 18 Perajarvi K, Siiskonen T, Honkanen A et al. Phys. Lett., 2000, **B492**: 1—7
- 19 Caughlan G R, Fowler W A. Atomic Data and Nucl. Data Tables, 1988, **40**: 283—350

Experimental Study on $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ Reaction *

WANG Hong-Wei¹⁾ JIN Gen-Ming WU He-Yu XIAO Zhi-Gang ZHANG Bao-Guo

DUAN Li-Min WEI Zhi-Yong LI Zu-Yu HU Rong-Jiang LIU Yong-Ying

LU Zhao-Hui CHEN Ke-Liang WANG Su-Fang ZHU Hai-Dong

(Institute of Modern Physics, 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 reaction of $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ has been investigated at the Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) using a radioactive beam ^{23}Al . The β^+ delayed proton decay spectrum has been measured with the TOF- ΔE method and zero degree detectors. The half-life of ^{23}Al is determined to be $T_{1/2} = (476 \pm 45)$ ms by using a time scaler combined with the precision pulse generator, which is consistent with the other group's result of (470 ± 30) ms. The known β^+ delayed protons at $E_p = 0.216, 0.278, 0.438, 0.479$ MeV have also observed in the experiment. The resonance strength of isospin analog state (IAS) is calculated. The resonance intensity of IAS is (11.4 ± 6.0) meV. A new energy level of β^+ delayed proton decay has been identified at $E_p = 8.916$ MeV, and their relative intensity also been obtained.

Key words Hydrogen burning, β^+ delayed proton decay, resonance, reaction rate

Received 17 January 2002

* Supported by National Science Foundation of China (10175081, 19575055, 19735010), 100 Talents Programme of CAS, Major Subjects of Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03), Major State Basic Research Development Program (G20000777401), Foundation of Director Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: wanghw@impcas.ac.cn