

文章编号: 1007-4627(2002)01-0013-07

## $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应的实验研究\*

王宏伟<sup>1</sup>, 靳根明, 吴和宇, 张保国, 肖志刚,  
段利敏, 魏志勇, 李祖玉, 胡荣江, 王素芳  
(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

李湘庆, 陈 陶, 华 辉  
(北京大学技术物理系, 北京 100871)

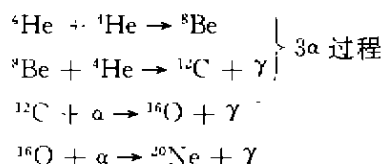
**摘 要:** 讨论了目前 $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的实验研究工作, 并对 $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^-} ^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$  的 $\beta^+$  缓发衰变 $\alpha$  能谱的相对强度值同文献进行了比较, 讨论了低能激发能级、共振强度及其对共振截面的贡献、 $S$  因子的理论研究.

**关键词:** 氦燃烧;  $\beta^-$  缓发 $\alpha$  衰变; 激发能级; 反应率

**中图分类号:** O571.32<sup>-2</sup>; P142.5 **文献标识码:** A

### 1 引言

$^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应是氦燃烧阶段的一个反应过程. 氦燃烧是继氢燃烧之后的恒星演化过程的一个重要的燃烧过程, 它是跨越  $A=5, 8$  的质隙的一个桥梁. 该过程主要包含以下几个主要的反应<sup>[1-4]</sup>:



其中 $^8\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$  反应中 $^{12}\text{C}$  的 S 波共振峰 ( $E^* = 7.6542$ ,  $J^\pi = 0^+$ ) 的发现已经成为核天体物理学中最杰出的成就之一, 但随后的 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的反应率仍是当今核天体物理学最重要的不确定量之一. 到目前为止仍有很多实验组在以不同方法研究这一反应.  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  和 $^8\text{Be}(\alpha, \gamma)^{12}\text{C}$  的反应率之比 (即决定了 $^{12}\text{C}$  和 $^{16}\text{O}$  的相对丰度) 决定了中等质量核素和大质量恒星继续演化的过程. 接下来的 $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  的反应率似乎会影响 $^{16}\text{O}$  和 $^{20}\text{Ne}$  的丰度, 但在 1975 年 W. A. Fowler 等人的文章中即已指出: 这个反应的反应率较低, 以致不能影响 $^{16}\text{O}$

和 $^{20}\text{Ne}$  的丰度值. 1997 年 Kunz 等<sup>[5]</sup> 指出:  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应在静态的氦燃烧中具有非常低的速率, 而当燃烧温度  $T_9 > 0.3$  时, 在大质量恒星、壳燃烧以及更高级的燃烧过程中,  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应起了关键性的作用, 该反应的激发曲线由少数几个激发能级支配, 但对  $E_{\text{cm}} = 300$  keV 处的反应率的贡献仍然很小, (典型的氦燃烧温度为  $T_9 = 0.2 - 0.3$ , 相当于质心系中的能量为  $E_{\text{cm}} = 300$  keV,  $T_9$  为  $10^8$  K). 更进一步的理论分析指出, 在  $E_{\text{cm}} = 300$  keV 时,  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应在 $\alpha$  阈能附近的 $^{20}\text{Ne}$  的激发能级中, 由于没有合适的能量、自旋、宇称以及角动量值, 因此没有哪个能级共振的贡献较大, 所以在这一温度下,  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  的反应率决定于非共振直接俘获反应截面. 只有当温度更高时, 通过几个已知的低能激发能级的共振俘获才成为可能, 相应的能级为 ( $E^*$  为激发能,  $E_d$  为衰变能量):  $E^* = 5.62$  MeV,  $J^\pi = 3^-$ ,  $E_d = 0.890$  MeV;  $E^* = 5.79$  MeV,  $J^\pi = 1^-$ ,  $E_d = 1.054$  MeV;  $E^* = 6.73$  MeV,  $J^\pi = 0^-$ ,  $E_d = 1.991$  MeV;  $E^* = 7.16$  MeV,  $J^\pi = 3^-$ ,  $E_d = 2.424$  MeV.

由 $^{20}\text{Na}$  的 $\beta^+$  衰变部分纲图 (图 1) 可知, 这 4 个

收稿日期: 2001-09-27; 修改日期: 2001-11-08

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19575055, 10175081, 19735010); 中国科学院“百人计划”基金资助项目; 中国科学院“九五”基础性研究重大科学基金资助项目 (KJ95T-03); 中国科学院近代物理研究所所长基金资助项目

作者简介: 王宏伟 (1971-), 男 (蒙古族), 内蒙古赤峰人, 硕士, 助研, 从事放射性束物理及核反应机制的研究.

能级为最靠近  $\alpha$  (4.734 MeV) 阈能的几个能级. 图中以虚线所示. 另外, 在  $^{20}\text{Ne}$  的能级中  $E^* = 4.967$  MeV,  $J^\pi = 2^-$  能级应该对  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应截面具有重要的贡献. 但是该能级并不延发  $\alpha$  粒子, 而是通过  $\gamma$  跃迁到第一激发态和基态, 因此在缓发粒子实验中不能测到.

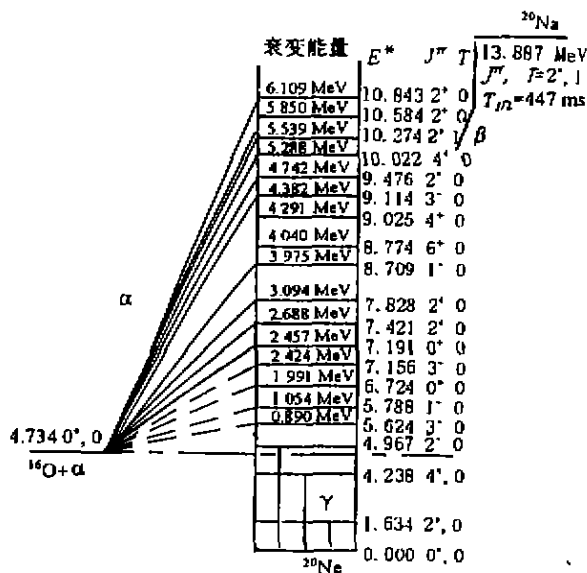


图 1  $^{20}\text{Na}$  的  $\beta^+$  衰变部分纲图

对于质心系  $E_{\text{cm}} = 300$  keV 来说, 目前的实验技术还难以达到, 因此其反应率仍然是利用较高能量处的测量值向天体物理感兴趣的能区外推, 即测量较高能量处的共振和非共振俘获截面的量级, 然后外推到天体物理感兴趣的能区.

1983 年 Descouvemont 等<sup>[3]</sup>以及 1984 年 Langanke 等<sup>[7]</sup>在做直接俘获截面的理论计算时预言, 在质心系能量 1.6—2.5 MeV 时, 可以观测到直接俘获的贡献, 实际上对于仔细选择的能区, 直接俘获截面可以超过窄共振的贡献. 文献[8]提出在这一能区  $E_{\text{cm}} = 1.054$  MeV ( $J^\pi = 1^-$ ) 和  $E_{\text{cm}} = 2.424$  MeV ( $J^\pi = 3^-$ ) 以及它附近的激发能级对截面的贡献是较小的, 因为它们的能级窄而且弱, 但  $E_{\text{cm}} = 1.99$  MeV ( $J^\pi = 0^+$ ) 的共振对这一感兴趣的能区 (1.6—2.5 MeV) 的截面还是具有较大贡献的, 文献[8]通过测量其截面, 对这一能级进行过初步研究, 并将得到的  $S$  因子外推到较低的能区. 另外在 Microscopic Cluster Model<sup>[6]</sup> 和 Generator Coordinate Method<sup>[1]</sup> 计算中得到在氦燃烧温度下, 这一反应的反应率是原来推荐值的 4—5 倍, 虽然这不能

显著地改变天体物理的预言, 但利用不同的方法可以更加精确地研究这一激发能级 ( $J^\pi = 0^+$ ), 以确定直接俘获截面在总截面中的贡献以及理论计算的有效性范围是必要的.

## 2 实验测量结果及讨论

对于具有分立能级的窄共振态, 其反应率为

$$N_A(\sigma v)_r = N_A \left( \frac{2\pi}{\mu k_B T} \right)^{3/2} \left( \sum \omega \gamma \right) T^{-3/2} \exp \left( - \frac{E_r}{k_B T} \right), \quad (1)$$

其中  $\omega \gamma$  为共振强度, 定义为:  $\omega \gamma = \omega (\Gamma_r \Gamma_i / \Gamma(E_r))$ ,  $\Gamma_r, \Gamma_i$  为部分衰变宽度,  $\Gamma(E_r)$  为全宽度,  $E_r$  为共振能量. 当反应率的单位为  $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $E_r$  和  $\omega \gamma$  的单位为 MeV, 公式表示为

$$N_A(\sigma v)_r = 1.5394 \times 10^{11} (\mu T_9)^{-3/2} \left( \sum \omega \gamma \right) \exp \left( - \frac{11.605 E_r}{T_9} \right). \quad (2)$$

因此, 实验上对窄能级共振截面的测量主要是测量其共振态的共振强度和自旋宇称, 更准确地说是测量其衰变半宽度.

我们利用  $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+} ^{20}\text{Ne}^* \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$  反应过程研究了  $^{20}\text{Ne}$  的激发能级, 具体的实验布局参见文献 [9,10], 图 2 显示了实验中测量的延发  $\alpha$  粒子能谱, 可以看到低能的几个  $\alpha$  峰均被探测到, 因为统

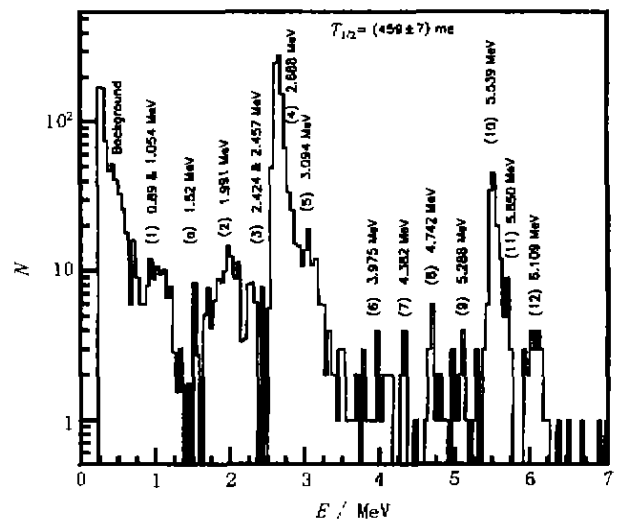


图 2 延发  $\alpha$  粒子能谱

计的关系, 其实验的误差比较大. 利用  $\beta$  延发粒子发射过程的主要目的是寻找天体物理感兴趣的能区的共振峰, 而对这个共振峰衰变信息的详细测量难度较大, 因而其共振峰的  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_0$ ,  $\Gamma$ ,  $\omega\gamma$  等参数的获得还需要借助于其镜像核的能级的详细测量 (对于  $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+} ^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$  反应来说,  $^{20}\text{Ne}$  没有镜像核可以参照), 更进一步、更精确的测量应该利用直接反应测量其  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_0$ ,  $\Gamma$ ,  $\omega\gamma$  和截面  $\sigma$  等信息, 根据测量的结果, 再利用理论来计算其反应率的大小. 表 1 给出了我们测量的延发  $\alpha$  粒子的能级的相对强度值与文献[11]的比较, 可以看出, 对于统计

较低的峰, 根据测量结果计算的数值和文献值的误差也较大.

我们利用一已知共振强度的衰变峰, 由其衰变强度的比值推导出其它未知衰变峰的相对共振强度值, 即  $\omega\gamma_1/\omega\gamma_2 = E_1 I_1 / E_2 I_2$  [3], 其中  $E$  为共振能量,  $I$  为对应峰的强度, 即衰变峰位的面积. 因此利用 9.476 MeV 激发能级的共振强度值 ( $1.3 \pm 0.5$  eV), 其自旋、宇称、同位旋也为  $(2^+, 0)$ , 可以得到 10.584 MeV 和 10.843 MeV 的两个能级的相对共振强度分别为  $5.9 \times 10^{-1}$  eV, 1.2 eV.

到目前为止,  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应已经测量到了

表 1 延发  $\alpha$  粒子能级的相对强度

$E^*/\text{keV}$	$E_d/\text{keV}$	相对强度	
		本次测量	文献[11]
5.627 & 5.788 <sup>a</sup>	890 & 1.054	9.39	
6.725	1.991	6.78	0.020 ± 0.004
7.156 & 7.189 <sup>a</sup>	2.424 & 2.457	4.72	
7.432	2.688	1.00	1.90
7.828	3.098	4.15	3.652 ± 0.43
8.709	3.975	1.10	
9.114	4.382	0.91	0.39 ± 0.04
9.476	4.742	1.10	1.510 ± 0.027
10.022	5.288	1.47	
10.273	5.539	15.2	17.31 ± 0.09
10.584 <sup>b</sup>	5.850	1.28	0.553 ± 0.015
10.843 <sup>b</sup>	6.109	3.30	1.09 ± 0.03

a 表中第一和第三行的数值给出了两个, 是由于在我们的探测器中没有能分辨出这两个能级的衰变能量; b 这两个能级在表 2 中没有列出, 但根据我们的测量以及文献[11, 12]的结果, 确定为 10.584 和 10.843 MeV 的两个能级, 其  $J^\pi$  均为  $(2^+, 0)$ ,  $\beta$  跃迁分支比为  $(0.087 \pm 0.009)^{[8]}$  和  $(0.193 \pm 0.016)^{[12]}$ .

23 条激发能级. 正如前面所述, 关键的激发能级只有低能的几条 (其中只包括我们测量中的 10 条能级, 但  $E_d$  为 5.850 和 6.109 MeV 的能级的贡献在表 2 中却没有给出). 表 2 给出了目前测量到的 23 条激发能级、 $\beta$  跃迁分支比和  $J^\pi$  等 [14].

从表 2 中的  $J^\pi$  值可见  $E^* = 10.273$  MeV 为  $^{20}\text{Na}$  的一个同位旋相似态, 但其衰变能量 ( $E_d = 4.431$  MeV) 较高, 对  $E_{\text{cm}} = 300$  keV 的天体物理感兴趣的能区内的截面没有任何贡献. 理论和以前的实验测量均表明  $E_d = 1.991$  MeV,  $J^\pi = 0^+$  的激发能级的贡献较大, 因此, 我们只计算较低的 4 条激发能级以及同位旋相似态  $E^* = 10.274$  MeV 激发能

级的  $\omega\gamma$  值.

从表 3 可以看出, 除了  $E^* = 6.725$  MeV 能级外, 计算的共振强度值与文献[14]的值相差不大. 对于  $E^* = 6.725$  MeV 能级的  $\omega\gamma$  值, 文献[8]的测量值为  $(7.1 \pm 1.2) \times 10^{-2}$  eV, 文献[14]给出的值为  $(7.4 \pm 0.9) \times 10^{-2}$  eV, 而我们的计算值仅考虑了 6.725 MeV 跃迁到第一激发态 1.634 MeV 的  $\Gamma_1 = 33 \times 10^{-3}$  eV, 而跃迁到基态的  $\Gamma_0$  由于没有相应的数值, 没有计算在内 (仅在文献[12]中提供了 Monopole matrix element  $|M| = 7.4 \pm 2.0 \text{ fm}^2$ ), 目前这一能级的共振强度的采用值为  $(7.4 \pm 0.9) \times 10^{-2}$  eV.

表 2  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应中相关的能级及其自旋、宇称、分支比<sup>\*</sup>

PEAK NUM	$E_c$ /keV	$E_a$ /keV	$E^*$ /keV	$\beta$ -decay branch(%) <sup>[11]</sup>	$\beta$ -decay branch(%) <sup>[11]</sup>	$J^\pi, T$
1	890±3	712	5.627±4			3 <sup>-</sup> , 0
2	1.054±3	843	5.788			1 <sup>-</sup> , 0
3	1.991±3	1.592	6.725		0.003 2±0.000 7	0 <sup>+</sup> , 0
4	2.424±3	1.339	7.156			3 <sup>-</sup> , 0
5	2.457±3	1.367	7.189			0 <sup>+</sup> , 0
6	2.688±3	2.150	7.422	16.37±1.28	15.96±0.22	2 <sup>+</sup> , 0
7	3.094±3	2.475	7.828	0.674±0.055	0.583±0.010	2 <sup>+</sup> , 0
8	3.975±3	3.180	8.709			1 <sup>-</sup> , 0
9	4.040±10	3.232	8.774			0 <sup>+</sup> , 0
10	4.291±1	3.433	9.025			4 <sup>+</sup> , 0
11	4.382±4	3.501	9.114			3 <sup>-</sup> , 0
12	4.742±30	3.794	9.476	0.247±0.020		2 <sup>+</sup> , 0
13	5.288±30	4.231	10.022			4 <sup>+</sup> , 0
14	5.539±7	4.431	10.273	2.868±0.039	2.877±0.042	2 <sup>+</sup> , 1
15	6.358±1	5.086	11.092			4 <sup>+</sup> , 1
16	6.544±5	5.235	11.278	0.026 3±0.001 7	0.026 3±0.001 7	1 <sup>-</sup> , 1
17	6.838±6	5.470	11.559			0 <sup>+</sup> , 0
18	7.193±8	5.754	11.928			4 <sup>+</sup> , 0
19	7.210±10	5.768	11.950			8 <sup>+</sup> , 0
20	7.480±5	5.384	12.214			2 <sup>+</sup> , 1
21	7.520±4	5.016	12.254			3 <sup>-</sup> , 1
22	7.656±10	6.125	12.390			3 <sup>-</sup> , 1
23	7.768±30	6.214	12.502			1 <sup>+</sup> , 1

\* 其中  $E_c$  为衰变能量,  $E_a$  为扣除 $^{16}\text{O}$ 反冲的影响后的能量,  $E^*$  为 $^{20}\text{Ne}$ 的激发能级,  $\alpha$ 的阈能为 4.734 MeV.

表 3 部分能级的共振强度( $\omega\gamma$ )值

$E^*/\text{MeV}$	$E_c/\text{MeV}$	$J^\pi$	$\omega\gamma^*/\text{eV}$	$\omega\gamma^{[11]}/\text{eV}$
5.627	0.890	3 <sup>-</sup>	$1.66 \times 10^{-3}$	$1.90 \times 10^{-2}$
5.788	1.054	1 <sup>-</sup>	$1.38 \times 10^{-2}$	$2.30 \times 10^{-2}$
6.725	1.991	0 <sup>+</sup>	$3.3 \times 10^{-2}$	$7.4 \times 10^{-2}$
7.156	2.424	3 <sup>-</sup>	$1.13 \times 10^{-2}$	$1.08 \times 10^{-2}$
7.421	2.688	2 <sup>+</sup>	$1.62 \times 10^{-1}$	$1.60 \times 10^{-1}$
10.274	5.539	2 <sup>+</sup>	21.62	19.50

a 利用文献提供的数值  $\Gamma_c, \Gamma$  计算得到, 并假设  $\Gamma_c = \Gamma - \Gamma_c$ ,  $\omega\gamma = (2J+1)\Gamma_c\Gamma/\Gamma$ ; 对于我们测量中给出的 10.584 和 10.843 MeV 能级, 其  $\Gamma$  分别为 24 和 13 keV, 但没有相应的  $\Gamma_c$  值, 故没有给出其  $\omega\gamma$ .

### 3 S 因子的理论计算及讨论

对于带电粒子引起的非共振反应截面  $\sigma$  可以表达成如下形式:

$$\begin{aligned} \sigma(E) &= S(E)\exp(-2\pi\eta)\frac{1}{E} \\ &= S(E)\exp\left[-\frac{E_G}{E}\right]\frac{1}{E}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\exp(-2\pi\eta)$  是与库仑位垒穿透几率相关的项,  $\eta$  为 Sommerfeld 因子,  $\eta = Z_1Z_2e^2/\hbar v = 0.157 5Z_1Z_2$

$(A/E)^{1/2}$ ,  $E_G = 2\mu(\pi e^2 Z_1 Z_2 / \hbar)^2 = 4E_0^3 / (k_B T)^2$ , 同时上式又为核天体物理因子  $S(E)$  的定义式. 借助于  $S$  因子, 可以将能量较高处的截面外推至天体物理中感兴趣的能量处. 这时核反应率就可以写成:

$$\begin{aligned} N_A \langle \sigma v \rangle &= N_A \left\{ \frac{8}{\pi\mu(k_B T)^3} \right\}^{1/2} \int_0^\infty S(E) \cdot \\ &\exp\left[ \frac{-E}{k_B T} - \left( \frac{E_G}{E} \right)^{1/2} \right] dE, \end{aligned} \quad (4)$$

对 $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应的实验测量主要有直接测量总截面和基态直接俘获截面<sup>[5,8]</sup>, 以及 $^{20}\text{Na}$ 的 $\beta$

延发衰变等<sup>[1-11]</sup>。理论研究主要是利用 Microscopic Cluster Model 讨论反应的直接俘获截面以及  $S$  因子<sup>[12,14,15]</sup>等。

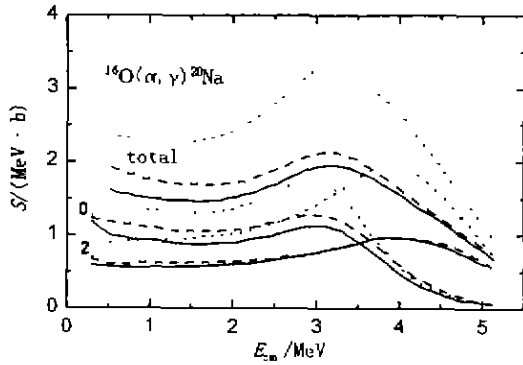


图 3  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的  $S$  因子(取自文献[15])

其中包括了  $l=0, 2$  的贡献。点线和虚线分别为考虑两个中心和五个中心的  $^{16}\text{O}+\alpha(\alpha^+)$  的计算值，实线为考虑了五个中心的  $^{16}\text{O}+\alpha(\alpha^+, 3^-, 1^-)$  的计算值。

1983 年, Descouvemont 等<sup>[14]</sup>计算了  $E_{cm}=1.7$

$-2.35$  MeV 区间总的  $d$  波俘获到基态和第一激发态的  $S$  因子约为  $0.8 \text{ MeV} \cdot \text{b}$ , 并给出了  $S$  因子随能量变化的解析式  $S=2.54-0.13E \text{ MeV} \cdot \text{b}$ 。1984 年 Langanke<sup>[7]</sup>计算了  $d$  波俘获到基态的  $S$  因子约为  $1.2 \text{ MeV} \cdot \text{b}$ 。1987 年 Hahn 等<sup>[8]</sup>测量了基态俘获的  $S$  因子, 并给出在  $E_{cm}=1.7-2.35$  MeV 间的  $S$  因子为  $(0.26 \pm 0.07) \text{ MeV} \cdot \text{b}$ , 外推到 300 keV 时, 得到的  $S$  因子为  $(0.7 \pm 0.3) \text{ MeV} \cdot \text{b}$ 。1997 年 Dufour 等<sup>[15]</sup>利用 Multicluster generator coordinate method 研究了  $S$  因子后, 给出了 300 keV 处的  $S$  因子约为  $2 \text{ MeV} \cdot \text{b}$ (如图 3 所示)。

### 4 反应率的计算

结合理论计算的  $S$  因子和目前  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应已经测量到了 25 条激发能级的共振强度, 我们可以计算出  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的反应率如图 4 所示。

表 4  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应中相关的能级及其自旋、宇称和共振强度\*

$E_a/\text{keV}$	$E^*/\text{keV}$	$J^\pi, I$	$\omega/\text{eV}$
$880 \pm 3$	$5.627 \pm 1$	$3^-, 0$	$(1.9 \pm 0.3) \times 10^{-3}$
$1.051 \pm 3$	$5.782$	$1^-, 0$	$(2.3 \pm 0.3) \times 10^{-3}$
$1.991 \pm 3$	$6.725$	$0^-, 0$	$(7.4 \pm 0.9) \times 10^{-3}$
$2.424 \pm 3$	$7.156$	$3^-, 0$	$(1.08 \pm 0.15) \times 10^{-2}$
$2.457 \pm 3$	$7.189$	$0^-, 0$	$(5.9 \pm 0.9) \times 10^{-3}$
$3.688 \pm 3$	$7.422$	$2^-, 0$	$(1.6 \pm 0.2) \times 10^{-1}$
$3.094 \pm 3$	$7.828$	$2^-, 0$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-1}$
$3.975 \pm 3$	$8.709$	$1^-, 0$	$(2.1 \pm 0.5) \times 10^{-1}$
$4.040 \pm 10$	$8.774$	$0^+, 0$	$1.35 \pm 0.15$
$4.291 \pm 1$	$3.025$	$4^+, 0$	$3.05 \pm 0.31$
$4.382 \pm 1$	$3.114$	$3^-, 0$	$(1.8 \pm 0.2) \times 10^{-1}$
$4.742 \pm 3$	$9.476$	$2^+, 0$	$1.3 \pm 0.5$
$5.288 \pm 3$	$10.022$	$4^-, 0$	$8 \pm 3$
$5.537 \pm 7$	$10.273$	$2^+, 1$	$19.5 \pm 1.5$
$5.859 \pm 10$	$10.584$	$2^-, 0$	$5.9 \times 10^{-1}$
$6.104 \pm 10$	$10.843$	$2^-, 0$	$1.22$
$6.354 \pm 1$	$11.092$	$1^-, 1$	$30 \pm 4$
$6.544 \pm 6$	$11.278$	$1^-, 1$	$2.06 \pm 0.25$
$6.838 \pm 6$	$11.556$	$0^-, 0$	$(4.1 \pm 0.5) \times 10^{-1}$
$7.194 \pm 8$	$11.926$	$1^-, 0$	$(2.3 \pm 0.5) \times 10^{-1}$
$7.210 \pm 10$	$11.959$	$8^-, 0$	$(1.3 \pm 0.2) \times 10^{-1}$
$7.480 \pm 5$	$12.243$	$2^-, 1$	$1.4 \pm 0.2$
$7.520 \pm 1$	$12.254$	$1^-, 1$	$6.6 \pm 0.8$
$7.656 \pm 10$	$12.390$	$3^-, 1$	$1.94 \pm 0.15$
$7.768 \pm 3$	$12.502$	$1^+, 1$	$(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-1}$

\* 其中  $E_a$  为衰变能量,  $E^*$  为  $^{20}\text{Ne}$  的激发能级,  $\alpha$  的阈能为 4.734。

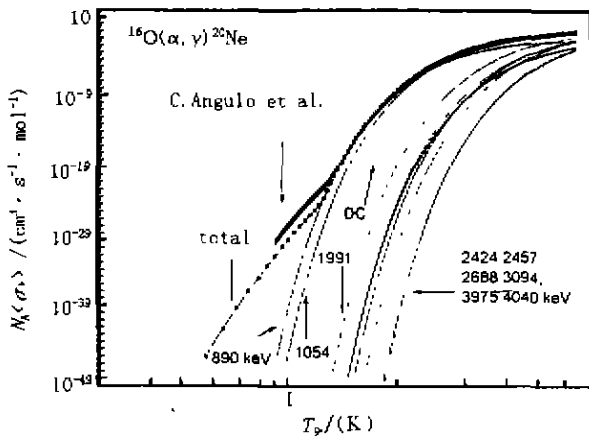


图 1  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的反应率

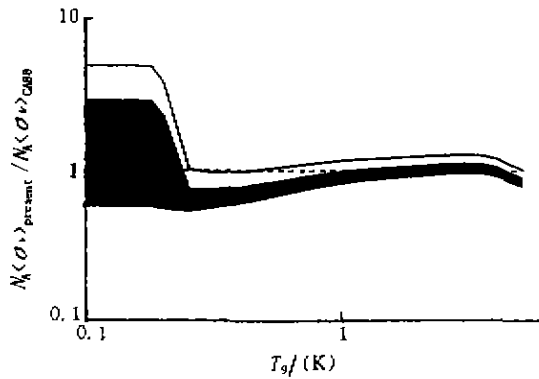


图 5 目前  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的反应率的测量值与文献[16]的反应率的比值

图 4 显示了  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的反应率，其中点线为直接俘获的计算结果，实线为靠近阈能的几条激发能级的计算结果，以及所有能级的贡献。从图中可以看出  $T_9 < 0.3$  时，是非共振直接俘获占主要成分， $T_9 > 0.3$  以后，主要是共振俘获的贡献，其中 890 keV 和 1054 keV 对反应率的贡献最大，随着温度的增加，一些较高能级的贡献逐渐增大，图中只标示了较低的几个能级，实际的计算包含了表 4 中的所有能级的贡献，图中还同 Angulo 等<sup>[14]</sup>的结果进行了比较。可以看出，由于所采用  $S$  因子

的不同，使得  $T_9 < 0.3$  处的反应率同文献[14]的结果差别较大，由于质心系能量较低，到目前为止，还没有从实验上对  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的  $S$  因子进行过测量，因此，准确的测定  $S$  因子，并结合理论计算，将其外推到 300 keV 处，是确定低温天体环境下  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的反应率的关键。

图 5 显示了目前  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应的反应率的测量值与文献[16]的比值，其中白色区域为测量值的上限，深色区域为测量值的下限。由图可知在  $T_9 < 0.25$  的范围内，目前的反应率同文献[16]的差别较大，主要来源于非共振直接俘获  $S$  因子和较低的几条能级的共振强度的误差， $T_9 > 1.0$  时，目前的反应率和文献[16]的值相近，误差主要来自较高激发能的共振强度及能级的部分宽度的误差。

### 3 结束语

迄今为止，共有 23 条共振能级在  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应中被考虑，非共振的贡献可以从实验<sup>[5]</sup>及有关的理论计算<sup>[14]</sup>中得到。反应率的上下限亦可以从共振参数和非共振的贡献的上下限推导出，同时实验表明，所有的共振的尾巴对反应率的贡献可以忽略。由于我们采用的  $S$  因子在 300 keV 处要大于以前的采用值，因此在  $T_9 < 0.25$  时反应率增强。 $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应在天体物理中的应用及其共振截面、非共振俘获截面的理论计算，以及较高能量处的  $S$  因子的计算和  $S$  因子向天体物理感兴趣的能区的外推等，可参见相关的文献[6、8、14、15]，本文不再进行详细讨论。

致谢 感谢 HIRFL 和 RIBLL 成员在实验过程中的精心调束，感谢中科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，同时也感谢核电子学组提供束流调制装置及感谢 NIM 库提供电子学插件。

### 参 考 文 献:

[1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A. Synthesis of the Elements in Stars [J]. Rev Mod Phys, 1957, 29: 547-650.  
 [2] Wallerstein G, Iben Jr I, Parker P, et al. Synthesis of the Elements in Stars: Forty years of progress [J]. Rev Mod Phys, 1997, 69: 995-1064.  
 [3] Li Guanglie, Li Jiong. Nucleosynthesis of Elements [J]. Nuclear Physics Review, 1999, 16(4): 201-206 (in Chinese).  
 [4] Luo Wendong, Chen Yongshou. Synthesis of Stellar Elements and Properties of Nuclei [J]. Nuclear Physics Review, 1999, 16(4): 207-213 (in Chinese).  
 [5] Kunz K, Mayer A, Joos K-D, et al. Capture Reactions in the Helium Burning of Stars [J]. Nucl Phys, 1997, A621: 149c-

- 152c.
- [6] Descouvemont P., Baye D. Microscopic Investigation of  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  Relative Capture Reaction [J]. *Phys. Lett.*, 1983, **B127**: 276-290.
- [7] Langanke K. The  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  Direct Capture Reaction at Low Energies [J]. *Z. Phys.*, 1981, **A317**: 327-328w.
- [8] Hahn K. B., Chang K. H., Donoghue K. H., *et al.* Search for Nonresonant Capture in the  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  Reaction at Low Energies [J]. *Phys. Rev.*, 1987, **C36**: 892-898.
- [9] 肖志刚, 王宏伟, 吴和宇等. RIBLIP 上的  $\beta^+$  缓发离子发射的在束测量 [J]. *高能物理与核物理*, 2001, **25**(5): 394-398.
- [10] 王宏伟, 肖志刚, 吴和宇等.  $\beta^+$  缓发粒子衰变的一种在束测量方法 [J]. *核电子学与探测技术*, 2001, **21**(5): 417-419.
- [11] Chifford E. I. H., Hagberg E., Harby J. C., *et al.* Measurements of Isospin Mixing and the Weak Vector Coupling Constant as well as Other New Decay Data [J]. *Nucl. Phys.*, 1989, **A493**: 243-322.
- [12] Aizenberg-selove F. Energy Levels of Light Nuclei  $A=18-20$  [J]. *Nucl. Phys.*, 1987, **A475**: 1-198; *Nucl. Phys.*, 1983, **A392**: 1-216.
- [13] Siegmüller F., Rolfs C., Schmidt S., *et al.*  $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$  Resonant Reaction at Low Energies [J]. *Nucl. Phys.*, 1996, **A601**: 68-180.
- [14] Angulo C., Arnould M., Rayet M., *et al.* A Compilation of Charged-particle Induced Thermonuclear Reaction Rates [J]. *Nucl. Phys.*, 1999, **A656**: 3-183.
- [15] DuFour M., Descouvemont P., Baye D. Microscopic Description of the  $\alpha+^{16}\text{O}$  System in a Multicenter Model [J]. *Phys. Rev.*, 1994, **C50**: 795-801.
- [16] Caughlan G. R., Fowler W. A. Thermonuclear Reaction Rates V [J]. *Atomic Data and Nucl. Data tables*, 1988, **40**: 283-350.

## Experimental Study on $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ Reaction \*

WANG Hong-wei, JIN Gen-ming, WU He-yu, ZHANG Bao-guo, XIAO Zhi-gang,  
DUAN Li-min, WEI Zhi-yong, LI Zu-yu, HU Rong-jiang, WANG Su-fang  
(*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 experimental investigations of  $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$  reaction is reviewed. The energy spectrum of  $\beta^+$  delay  $\alpha$  decay were measured through the  $^{20}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+} ^{20}\text{Ne}^* \rightarrow ^{16}\text{O} + \alpha$  process, and the relative densities of  $\alpha$  decays are compared with the reference's results. The low excitation energy levels, resonance strength and its contribution to the resonance cross section are also discussed. Finally, we have calculated the reaction rate of the direct capture reaction and resonance capture reaction, respectively.

**Key words:** He burning;  $\beta^+$  delay  $\alpha$  decay; excitation energy level; reaction rate

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (30775055, 10175081, 10735015); Partially by One Hundred Talents Project of Chinese Academy of sciences; Major Subjects of Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03); Foundation of Director Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences