

低能 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应的测量

曾晟^{①*}, T. Spillane^②, F. Raiola^②, C. Rolfs^②

① 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

② 鲁尔大学物理系, 德国波鸿 D-44780

* E-mail: llzs@ciae.ac.cn

收稿日期: 2008-09-21; 接受日期: 2008-12-17

国家重点基础研究发展计划(编号: G200077400, 2003CB716704)、国家杰出青年科学基金(批准号: 10025524)和国防基础研究项目(编号: GFJ00F00101)资助

摘要 在鲁尔大学 DTL 实验室 4 MV 串列加速器上利用 ^{12}C 束流轰击高纯度的 C 靶. 通过 γ 谱学方法测量了 $E_{\text{c.m.}} = 2.10 - 4.75 \text{ MeV}$ $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合蒸发反应, 并导出了 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha)^{20}\text{Ne}$ 和 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{p})^{23}\text{Na}$ 反应的天体物理 $S(E)^*$ 因子. 在 $E_{\text{c.m.}} \leq 3.0 \text{ MeV}$ 时发现新的共振. 特别是在 Gamow 峰的高能尾部 $E_{\text{c.m.}} = 2.14 \text{ MeV}$ 处出现强共振峰. 当 $T = 8 \times 10^8 \text{ K}$ 时, 这些共振使得 α 链的反应率比无共振情况下提高了近 5 倍.

关键词

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应

C 燃烧

直接测量

γ 谱

碳燃烧是恒星演化过程中继氢燃烧和氦燃烧后的重要过程, 其中的 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha)^{20}\text{Ne}$ ($Q = 4.62 \text{ MeV}$) 和 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{p})^{23}\text{Na}$ ($Q = 2.24 \text{ MeV}$) 反应一直倍受关注. 它们不仅涉及到 ^{20}Ne 和 ^{23}Na 核素的合成, 而且关系到恒星是否会演化为碳爆炸超新星^[1], 因此, 在核天体物理感兴趣的 Gamow 能量 $E_{\text{G}} = (1.5 \pm 0.3) \text{ MeV}$ 附近, 精确测量它们的反应截面是非常必要的. 此前的许多实验在很宽的能量范围内(质心系能量低至 $E_{\text{c.m.}} = 2.5 \text{ MeV}$), 采取探测反应产生的带电粒子或者 γ 射线的方法得到了这两个反应的截面^[1~5], 但是, 在 $E_{\text{c.m.}} = 3.0 \text{ MeV}$ 以下的区域, 测量结果还存在很大的不确定性.

1 实验方法

实验在 Ruhr 大学 DTL 实验室 4 MV 串列加速器上进行. 选用 $^{12}\text{C}^{2+}$ 束流轰击 ^{12}C 靶. 束流强度可达 $40 \text{ p} \cdot \mu\text{A}$, 能量为 $4.2 \sim 9.5 \text{ MeV}$, 实验时按 50 keV 步长依次改变 ^{12}C 束流的能量, 精度好于 3 keV , 能量展宽约为 2 keV ^[6,7]. 束流中 O 和其他轻离子的含量低于 10^{-11} .

在碳靶前 60 cm 处放置 $\Phi = 4 \text{ mm}$ 的准直孔, 束流经过准直孔后打到厚度为 1 mm 的 ^{12}C 靶上. 靶面积为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 安装在不锈钢框架上, 框架与一段 30 cm 长 $\Phi = 4 \text{ cm}$ 的束流管道相连, 并与上游其他管道绝缘, 形成法拉第筒. 由靶上引出电流来实时监测束流情况. 采用一相对效率为 115% 的高纯 Ge 探测器来测量 γ 谱. 探测器放置在 0° 束流方向, 前端距靶 2 cm , 在 $E_{\gamma} = 1.4 \text{ MeV}$ 处探测器的分辨为 2.4 keV (FWHM) . 靶室和探测器周围覆盖 15 cm 厚的铅砖, 用以屏蔽本底. 为了进一步降低本底, 在靶室上方放置一块塑料闪烁体探测器(厚度为 4 cm , 面积为 $100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$) 用以鉴别 γ 谱中的宇宙射线本底.

为了降低 ^{12}C 靶中的氢含量, 用 ^{12}C 束流轰击靶大约 20 min , 使靶上的温度达到 700°C , 轰击后 C 靶中的氢含量对测量的影响可以忽略. $E_{\text{c.m.}} = 4.75, 3.75, 2.75 \text{ MeV}$ 时实验测得的 γ 谱如图 1 所示, 我们所感兴趣的能量为 440 和 1634 keV 的 γ 射线峰在谱中占主要部分, 这两处的峰都出现多普勒展宽, 这是由于 ^{20}Ne 和 ^{23}Na 在厚 C 靶中经历较长的慢化时间. 此前的实

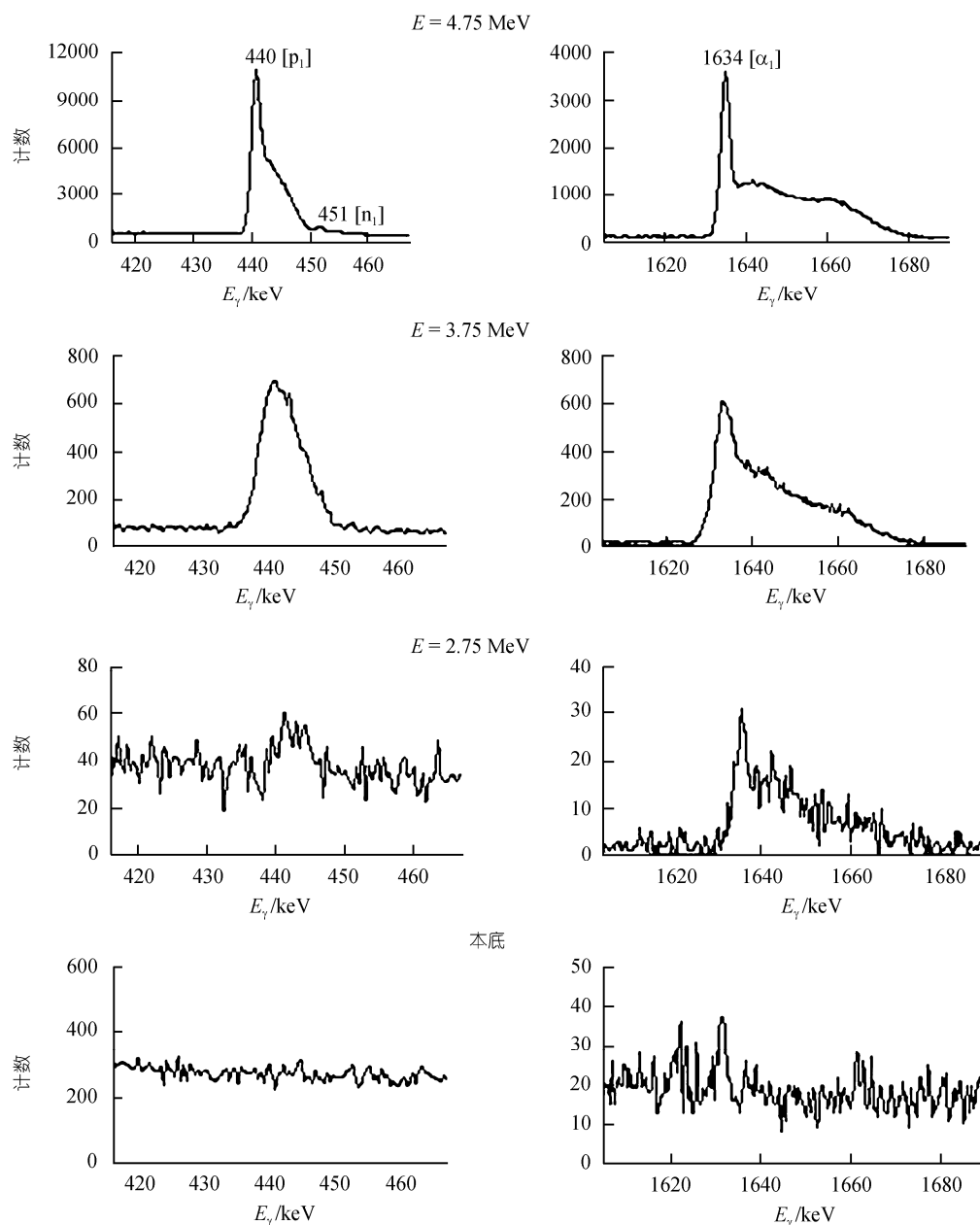


图1 $E_{\text{c.m.}} = 4.75, 3.75, 2.75$ MeV 时实验测得的 γ 谱及本底谱

验中^[3], 由于大都采用薄 C 靶和 Ta 衬底, ^{20}Ne 和 ^{23}Na 的慢化时间短, 这种展宽并不明显。

作为与能量相关的函数, 能量为 440 和 1634 keV 的这两处 γ 峰的产额占总融合产额相当大的部分^[4,8]。这两个 γ 射线存在近乎各向同性的角分布^[3], 因此我们按照参考文献[8]中 $E_{\text{c.m.}} = 4.74$ MeV 的绝对截面来归一我们的实验数据($\sigma_{\alpha} = (1.29 \pm 0.07)$ mb, $\sigma_{\text{p}} = (0.76 \pm 0.04)$ mb)。

2 数据处理与实验结果

实验测得质心系能量 $E = 2.1 - 4.75$ MeV 范围内, 各能量点处厚靶的相对产额 $Y^{\infty}(E)$, 测量的步长为 $\Delta = 25$ keV。薄靶的产额 $Y(E)$ 可以通过对厚靶的产额进行微分得出, 即

$$Y(E) = (Y^{\infty}(E) - Y^{\infty}(E - \Delta)) / \Delta \\ = \alpha \varepsilon(E)^{-1} \sigma(E_{\text{eff}}),$$

式中 E_{eff} 为能量范围 Δ 内的有效能量^[1], α 为归一系数, $\varepsilon(E)$ 为靶材料对入射粒子的阻止本领^[9]. 用这样的方法得到薄靶的产额避免了先前的实验中用薄 C 靶所遇到的靶容易破损和碳沉积等问题^[8]. 图 2 为 $E = 2.15$ MeV 时测量到的 γ 谱和扣除本底后的结果. 本底谱是没有束流的情况下测量 5 d 得到的.

经过多轮测量, 对结果进行加权平均后得到相应能点处的反应截面 $\sigma(E_{\text{eff}})$. 在低能处反应截面随能量降低而迅速地下降, 为了便于将数据与之前的工作比较和向低能区外推, 将反应截面转变为反应的 $S(E)$ 因子^[1-4]:

$$\begin{aligned}\sigma(E) &= S(E)^* E^{-1} \exp(-2\pi\eta - gE) \\ &= S(E)^* E^{-1} \exp(-87.21E^{-1/2} - 0.46E),\end{aligned}$$

式中能量 E 的单位为 MeV. 由于实验中的粒子为 $^{12}\text{C}2+$ 态离子和中性原子, 核外电子的电子屏蔽效应对反应截面存在一定影响. C+C 体系的电子屏蔽势为 $U_e = 5.9 \text{ keV}^{[10]}$, 对低能点 $E = 2.2 \text{ MeV}$ 的影响较大, 使反应截面增加了 8%. 对较高能点而言, 电子屏蔽效应对反应截面的影响可以忽略不计. 图 3 给出了反应的 $S(E)^*$ 因子随能量的变化, 图中最低能量处对应的反应截面低于 0.8 nb .

从图 3 中可以看到明显的共振结构, 这种共振结

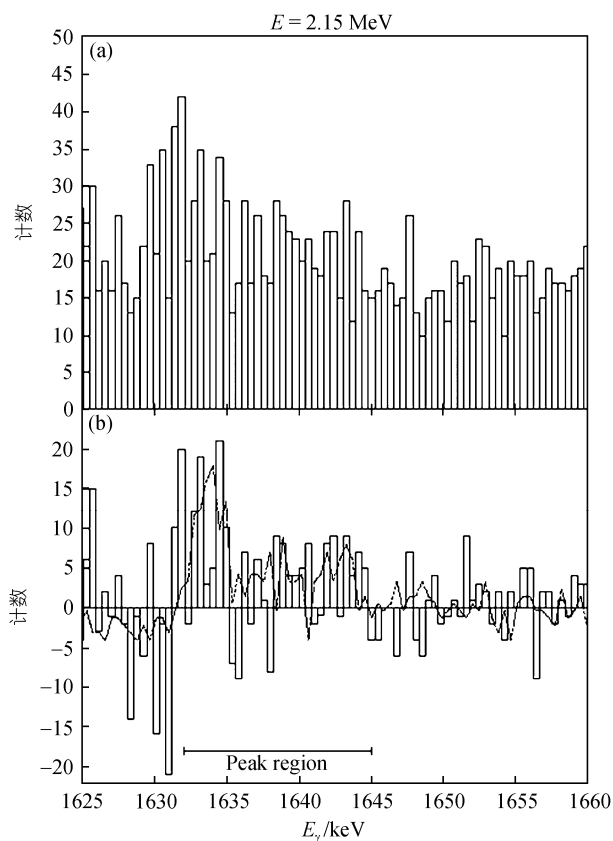


图 2 $E = 2.15 \text{ MeV}$ 时的 γ 谱(a)和上图扣除本底后的 γ 谱(b) 峰区域与考虑到多普勒频移后 $E = 2.75 \text{ MeV}$ 时相同(虚线)

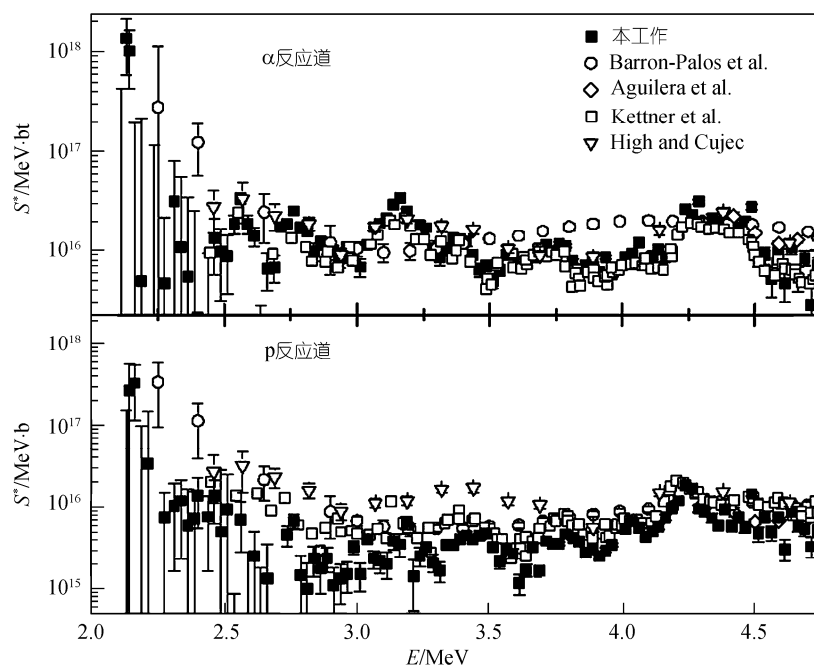


图 3 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应中 α 和 p 反应道的 $S(E)^*$ 因子与文献中数据的比较

构持续到我们所测量的能量下限. 在 $E_R = (2138 \pm 3)$ keV 处发现很强的共振, 宽度为 $\Gamma_R = (12 \pm 4)$ keV, α 和 p 反应道的共振强度分别为 $(\omega\gamma)_R = (0.23 \pm 0.05)$ 和 (0.02 ± 0.02) meV. 误差主要来自统计误差, 使用文献中的反应截面带来的误差大约为 5%. 在发生共振的能量范围, 本底谱是非常平坦的.

反应速率可以表示为

$$\begin{aligned} \langle \sigma v \rangle = & 3.33 \times 10^{-21} \tau^2 \exp(-\tau) S^* \\ & + 5.54 \times 10^{-13} T_6^{-3/2} (\omega\gamma)_R \\ & \times \exp(-11.6 E_R T_6^{-1}) \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \end{aligned}$$

式中 $\tau = 839 / T_{\text{eff}}^{1/3}$, $T_{\text{eff}} = T_6 / (1 + 4.0 \times 10^{-5} T_6)$, T_6 是以 10^6 K 为单位的无量纲温度, S^* 的单位为 keV·b, $(\omega\gamma)$ 和 E_R 的单位为 keV. 当 $T_6 = 800$ 时, 2.14 MeV 处的共振使得 α 反应道的反应速率比之前无共振情况下增加了近 5 倍. 该反应速率的提高带来的天体物理学方面的意义有待通过进一步的恒星模型计算得出. 然而, 由于每隔约 300 keV 有一个共振, 我们有理由推测在

Gamow 峰中心附近也存在共振, 这样上面谈到的反应速率就很不精确了, 只能说是真实的反应速率的下限.

3 结果与讨论

实验测量了 $E = 2.10 - 4.75$ MeV $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应的 γ 谱. 导出的 $S(E)^*$ 因子在 $E \leq 3.0$ MeV 时出现新的共振. 特别是在 Gamow 峰的高能尾部 $E = 2.14$ MeV 处出现强共振峰. 这些共振使得现在的无共振 α 链的反应率在 $T = 8 \times 10^8$ K 提高了近 5 倍. 实验结果在 $E > 3.0$ MeV 时与之前的一些实验数据相符合, 当 $E < 3.0$ MeV 时 p 反应道的结果有较大的差异.

要更好地测量低能 C+C 反应, 需要进一步改进实验装置. 例如, 可以在地下加速器上测量, 并使用适当的仪器装置使 1634 keV 附近的 γ 射线本底进一步降低. 此外, 可以通过使用高纯锗球、提高束流强度、延长实验时间等方法, 使实验测量范围向更低能量 (Gamow 峰) 推进.

致谢 作者对德国鲁尔大学 Dynamitron-Tandem-Laboratory 实验室的运行人员在实验过程中所给予的帮助表示感谢.

参考文献

- 1 Rolfs C, Rodney W S. *Cauldrons in The Cosmos*. Chicago: University of Chicago Press, 1988. 133—189
- 2 Mazarakis M G, Stephens W E. Experimental measurements of the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ nuclear reactions at low energies. *Phys Rev C*, 1973, 7: 1280—1287
- 3 Kettner K U, Lorenz-Wirzha H, Rolfs C. Study of the fusion reaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ below the coulomb barrier. *Phys Rev Lett*, 1977, 38: 337—340
- 4 Becker H W, Kettner K U, Rolfs C, et al. The $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ reaction at subcoulomb energies (II). *Z Phys A*, 1981, 303: 305—312
- 5 High M D, Cujec B. The $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ sub-coulomb fusion cross section. *Nucl Phys A*, 1977, 282: 181—188
- 6 Wüstenbecker S, Ebbing H, Schulte W H, et al. Improvements in targetry and high voltage stability for high resolution ion beam experiments. *Nucl Instrum Method A*, 1989, 279: 448—466
- 7 Spillane T. The Reaction Rates of Charged-Particle Exit Channels from the Fusion Reaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ at Energies Below the Coulomb Barrier. Doctor Dissertation. Connecticut: University of Connecticut, 2007 (to be published)
- 8 Aguilera E F, Resales P, Martinez-Quiroz E, et al. New g-ray measurements for $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ sub-coulomb fusion: Toward data unification. *Phys Rev C*, 2006, 73: 064601
- 9 Andersen H, Ziegler J F. *The Stopping and Ranges of Ions in Matter and SRIM-2003*. New York: Pergamon Press, 1977
- 10 Assenbaum H J, Langanke K, Rolfs C. Effects of electron screening on low-energy fusion cross sections. *Z Phys A*, 1987, 327: 461—468