

# 基于上海激光电子 $\gamma$ 源的天体核合成关键反应

## $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的反应率研究\*

徐毅 徐望<sup>1)</sup> 马余刚 蔡翔舟 陈金根 顾嘉辉 郭威

潘强岩 沈文庆 王呈斌 王宏伟 徐加强 袁仁勇

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

**摘要** 正在研制的上海激光电子  $\gamma$  源是 MeV 量级的高品质  $\gamma$  光束线站, 基于该装置可以开展一系列核天体物理实验, 从而更准确的确定各天体核合成反应的反应率. 本文研究了天体核合成中的关键反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的反应率. 根据多组实验和理论截面数据分别计算了反应率, 并给出了这些反应率计算结果的平均值和统计误差. 根据该结果拟合了理论反应率的解析形式, 确定了新的参数. 进而给出俘获反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  在 He 燃烧环境下的反应率和误差, 并讨论了电子屏蔽效应对天体反应率的修正.

**关键词**  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  反应率  $\gamma$  光源

### 1 引言

核天体物理中原初核合成理论<sup>[1]</sup>指出宇宙中绝大多数元素都是在恒星燃烧过程中形成的. 其中 He 燃烧末期的产物是  $^{12}\text{C}$  和少量  $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$  有可能通过反应道  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  俘获一个  $\alpha$  粒子生成  $^{16}\text{O}$ . 该反应的反应率决定了恒星中  $^{12}\text{C}$  和  $^{16}\text{O}$  的丰度比, 因此也就决定了恒星演化的命运. 反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  被认为是恒星演化过程中的关键反应, 其反应率是核天体物理中的重要参量.

反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  发生在 He 燃烧末期, 温度约为  $0.2 \times 10^9 \text{K}$  (一般记作  $T_9 = 0.2$ ), 根据 gamow 理论, 对应反应的  $E_{c.m.} = 0.3 \text{MeV}$ , 理论估计在这个能量下的反应截面约为  $10^{-17} \text{barn}$ , 现有的实验条件无法直接测量. 一般通过  $R$  矩阵方法或其他理论方法对实验结果进行拟合外推得到该能量下的反应截面. 到目前为止, 反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的截面测量结果已经有 30 多组, 也有多种理论方法对实验结果进行分析, 但得到的  $E_{c.m.} = 0.3 \text{MeV}$  下的反应截面差别很大, 计算得到的  $T_9 = 0.2$  处的反应率也有很大差异. 因此该反应的反应截面及反应率是当今核天体物理中没有被很好确

定的一个参量.

对俘获反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的反应率研究已经有较多工作<sup>[2-5]</sup>, 但彼此结果差异较大. 本文根据多组数据对该反应的反应率进行了系统的研究. 并提出了结合上海激光电子  $\gamma$  源进行核天体反应实验从而更好的确定俘获反应率的设想.

### 2 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率的计算、拟合及讨论

将恒星燃烧过程中的核物质看作服从 maxwell-Boltzmann 分布的理想气体, 则核天体反应中两体反应的平均反应率定义如下<sup>[6]</sup>:

$$N_A \langle \sigma v \rangle = N_A \frac{(8/\pi)^{1/2}}{\mu^{1/2} (k_B T)^{3/2}} \times \int \sigma E \exp(-E/k_B T) dE, \quad (1)$$

其中  $N_A \langle \sigma v \rangle$  是反应率,  $N_A$  是 Avogadro 常数,  $\mu$  是反应体系的约化质量,  $k_B$  是 Boltzmann 常数,  $T$  是反应温度,  $\sigma$  是反应截面,  $E$  是反应体系的质心系能量.

根据 Kunz 等人的 7 组截面数据<sup>[7-13]</sup>, 分别计算

\* 中国科学院知识创新工程项目(KJ9X2-SW-N13)和中国科学院上海应用物理所百人计划项目资助

1) E-mail: wangxu@sinap.ac.cn

了它们对应的反应率. 由于各组数据在低能区差别很大, 在计算过程中没有用到低于能量为 $E_{c.m.}=0.3\text{MeV}$ 下的截面数据, 因此所得到的反应率结果是在温度范围为 $0.3 < T_9 < 2.7$ 内. 由于数据结果跨度很大, 用Angulo给出的理论反应率<sup>[4]</sup>对计算结果做了归一化, 见图1.

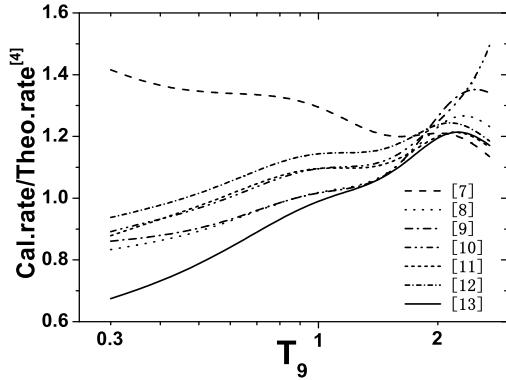


图1 根据文献[7—13] 7组数据计算的反应率结果

由于各种恒星演化理论模型的计算和验证都需要天体环境温度与反应率的定量关系, 利用统计的方法, 计算了7组反应率的平均值和统计误差. 并用该结果拟合了反应率的理论解析式<sup>[3, 5]</sup>

$$N_A \langle \sigma v \rangle = \frac{a_0}{T_9^2 (1 + a_1 T_9^{-2/3})^2} \times \exp \left[ -\frac{a_2}{T_9^{1/3}} - \left( \frac{T_9}{a_3} \right) \right] + \frac{a_4}{T_9^2 (1 + a_5 T_9^{-2/3})^2} \exp \left( -\frac{a_6}{T_9^{1/3}} \right) + \frac{a_7}{T_9^{3/2}} \exp \left( -\frac{a_8}{T_9} \right) + \frac{a_9}{T_9^{2/3}} (1 + a_{10} T_9^{1/3}) \exp \left( -\frac{a_{11}}{T_9^{1/3}} \right) \quad (2)$$

中的各参数. 关于该理论形式的物理含义等详细研究见Fowler和Buchmann等人的工作<sup>[2, 3, 6]</sup>.

拟合结果见表1. 其中set1, set2和set3分别是用反应率的平均值及误差下限和上限对(2)式拟合得到的各参数值. 根据(2)式和表1中的各参数, 可以给出在该温度区间内俘获反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的理论反应率及误差范围.

根据上述拟合结果, 给出了不同温度下新的理论反应率及误差的上下限, 并与其他理论结果<sup>[2—5]</sup>进行了比较. 由于数据跨度很大, 用前面计算得到的7组反应率的平均值对所有理论结果进行了归一化, 见图2.

表1 (2)式中各参数的拟合结果

参数	set1	set2	set3
$a_0$	$3.133 \times 10^9$	$1.082 \times 10^{10}$	$1.868 \times 10^{10}$
$a_1$	4.340	13.35	2.946
$a_2$	30.58	30.54	30.55
$a_3$	2.002	1.137	2.422
$a_4$	$8.807 \times 10^7$	$9.176 \times 10^8$	$1.584 \times 10^9$
$a_5$	1.259	0.8975	4.284
$a_6$	33.43	32.22	35.27
$a_7$	$5.863 \times 10^{-13}$	$4.508 \times 10^{-20}$	$5.815 \times 10^{-4}$
$a_8$	36.37	137.7	83.02
$a_9$	$1.889 \times 10^4$	$8.939 \times 10^3$	$5.229 \times 10^4$
$a_{10}$	$2.469 \times 10^6$	$1.168 \times 10^6$	$6.835 \times 10^6$
$a_{11}$	38.92	37.23	41.69

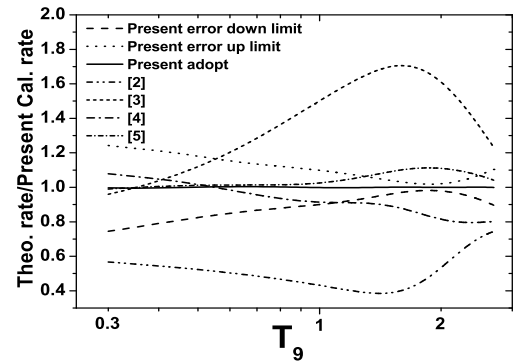


图2 本文给出的理论反应率与文献[2—5]的理论结果比较

从图2中可以看到, 本文给出的理论反应率与计算得到的反应率平均值的比率几乎是1, 这说明我们的拟合结果很精确. 虽然5组理论结果之间有较大的差别, 但是从图中可以看出我们的理论反应率及误差范围反映了其他4组理论结果的平均趋势.

### 3 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 在He燃烧温度 $T_9 = 0.2$ 下的反应率结果及讨论

根据(2)式及表1的参数值, 将我们给出的理论反应率外推到He燃烧末期的温度 $T_9=0.2$ 下, 确定了反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 在该温度下的反应率及误差, 并与其他理论结果<sup>[2—5]</sup>进行了比较, 见表2. 可以看出我们给出的误差范围与其他的理论结果相当甚至更小一些.

由于电子屏蔽效应的存在<sup>[14]</sup>, 俘获反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 在天体环境下与实验室条件下的反应情况会有所不同, 且反应的质心系能量越低, 该效应越大. 对该反应在 $E_{c.m.}=0.3\text{MeV}$ 下的电子屏蔽效应进行了计算, 发现在该能量下电子屏蔽效应十分微弱, 可以忽略.

因此在温度为  $T_9=0.2$  下, 俘获反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  在实验室环境下的反应率与天体环境下的相同, 本文给出的理论反应率结果和误差范围可以直接用于天体环境下各理论模型的计算.

表 2 各理论给出的  $T_9=0.2$  下的反应率及误差  
( $\times 10^{-15} \text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

	文献[2]	文献[3]	文献[4]	文献[5]	present
推荐值	4.73	7.04	9.11	7.58	8.11
误差下限		3.04	5.44	5.25	5.50
误差上限		13.4	12.8	10.2	10.3

## 4 总结与展望

与一般的在所有数据能区直接计算并拟合反应率

的方法不同, 本文的方法是用多组反应率的平均值及误差拟合理论反应率的解析形式, 进而将拟合结果外推得到其他温度下的反应率及误差范围. 通过上面的计算和讨论, 对俘获反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的反应率给出了较好的理论结果.

正在研制中的上海激光电子  $\gamma$  源是根据 Compton 背散射原理, 利用高功率激光与上海光源存储环内能量为 3.5 GeV 的电子作用产生高亮度、单色性好、可极化的 MeV 量级的  $\gamma$  光束线站, 基于该装置可以开展一系列核天体物理中的低能光核反应实验. 为了更准确的确定俘获反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的反应率, 可以测量反应  $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$  的低能区截面, 有关实验模拟计算和方案研究正在进行中.

## 参考文献(References)

- Burbidge E et al. Rev. Mod. Phys., 1958, **C29**: 547—650
- Caughlan G. R et al. At. Data Nucl. Data Tables, 1988, **40**: 283—298
- Buchmann L. Astrophys. J., 1996, **468**: L127—L130
- Angulo C et al. Nucl. Phys., 1999, **A656**: 3—183
- Kunz R et al. Astrophys. J., 2002, **567**: 643—650
- Fowler A et al. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1967, **5**: 525—570
- Braizinha B et al. Nucl. Phys., 2001, **A689**: 369c—372c
- Brune R et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 4025—4028
- Brune R et al. Nucl. Phys., 2001, **A688**: 263c—266c
- Hammer J et al. Nucl. Phys., 2005, **A752**: 514c—521c
- Hammer J et al. Nucl. Phys., 2005, **A758**: 363c—366c
- Ouellet J et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 1982—1998
- Kunz R et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 3244—3247
- Liolios T. Phys. Rev., 2001, **C63**: 045801:1—7

# Study on the Reaction Rate of Key Reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ in Astrophysics Base on Shanghai Laser Electron $\gamma$ Source<sup>\*</sup>

XU Yi XU Wang<sup>1)</sup> MA Yu-Gang CAI Xiang-Zhou CHEN Jin-Gen GU Jia-Hui  
GUO Wei PAN Qiang-Yan SHEN Wen-Qing WANG Cheng-Bin  
WANG Hong-Wei XU Jia-Qiang YUAN Ren-Yong

(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The MeV photon beam will be produced by Shanghai Laser Electron  $\gamma$  Source which is being proposed. Based on it, a series of nuclear astrophysics experiments can be carried on and the reaction rates of these reactions can be determined accurately. In this paper, the reaction rates of the key reaction  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  are calculated according to experiments data and theoretical results, and the mean value and statistical error of these calculated rates are evaluated. The new set of parameters of reaction rate formula are obtained through fitting above results. The reaction rate and its error at  $T_9=0.2$  in which  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  occurred are extracted, and the screening effects of reaction rate are discussed.

**Key words**  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ , reaction rate,  $\gamma$  ray source

<sup>\*</sup> Supported by CAS Knowledge Innovation Project(KJCX2-SW-N13) and CAS SINAP Hundreds Talents Project

1) E-mail: wangxu@sinap.ac.cn