

文章编号: 1007-4627(2012)03-0224-06

天体演化过程中 CNO 核子辐射俘获反应

李云居, 李志宏

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: C 和 N 核的质子辐射俘获反应对恒星平稳 H 燃烧阶段的能量产生和元素核合成起重要作用, C, N 和 O 核的中子辐射俘获是原初核合成和 AGB 星核合成的关键反应, 精确测定它们天体物理反应率有重要意义。除 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 和 $^{16}\text{N}(n, \gamma)^{17}\text{N}$ 等不稳定核的核子辐射俘获反应外, 国际上已完成了其中若干反应的直接测量工作。但 $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$, $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 和 $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ 等 CNO 循环关键反应的实验测量还没有达到天体物理感兴趣的能区。 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$, $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ 和 $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ 等中子辐射俘获反应测量的能量跨度较大, 截面仍存在较大的不确定性。介绍了这些反应的研究进展, 并讨论了间接测量这些反应的方法和可行性。

关键词: 核天体物理; 辐射俘获反应; 间接测量; 天体物理反应率

中图分类号: O571.1 **文献标志码:** A

1 引言

核反应不仅是恒星的主要能源, 也是宇宙中除 H 外所有核素赖以合成的机制, 在原始大爆炸后最初几分钟至恒星寿命终结之前的天体演化进程中起至关重要的作用。核天体物理是核物理与天体物理相互渗透和交融形成的交叉学科, 主要研究核过程对恒星结构及其演化的影响和各种核素合成的过程。20 世纪 30 年代末贝特等 3 位学者提出了太阳和恒星的能源主要来自它们内部的 H 通过 pp 反应链和 CNO 循环转化为 He 的聚变反应理论^[1], 弄清了令人困惑的恒星能源问题, 并揭示了它与元素起源之间的紧密联系。二战后, 福勒等 4 位学者对恒星演化过程中的核反应进行了系统的实验和理论研究, 在著名的 B²FH 论文^[2]中阐释了恒星在赫罗图上的演化进程和各阶段中发生的 8 种核合成过程, 以及超新星爆发和大质量恒星演化的关系, 从而奠定了元素核合成理论的基础。虽然核天体物理已取得了上述具有里程碑意义的成就, 但迄今人类对天体中极其复杂的核过程只有初步的了解, 不仅对新星、超新星和 X 射线暴等爆发性天体事件中大量远离稳定线核的反应和衰变的研究很不完善, 即

使对恒星平稳演化阶段稳定核反应的研究也还存在一系列有待破解的难题。

CNO 循环是恒星平稳 H 燃烧的一个重要环节, 其中诸多的质子辐射俘获反应对能量产生和 He 元素合成有显著贡献。另外, 重子密度不均匀模型的原初核合成和 AGB 星中的核合成涉及一系列 CNO 的中子辐射俘获反应^[3], 目前虽有部分反应的直接测量数据, 但其不确定性较大, 远不足以满足天体演化中核反应网络计算的需要, 因此精确测量 C, N 和 O 核素的核子辐射俘获反应截面仍具有十分重要的意义。本文旨在介绍相关反应的实验研究现状, 并探讨开展间接测量的方法及可行性。

2 CNO 循环中的 C 和 N 质子俘获反应

恒星平稳 H 燃烧阶段的能源主要来自 pp 反应链和 CNO 循环, 两者的净结果都是 $4p \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ 并释放能量。pp 反应链是 $M \leq M_{\odot}$ (太阳质量) 恒星的主要能源。在 $M \gg M_{\odot}$ 的恒星中, CNO 循环消耗质子并产生能量的速率将超过 pp 反应链^[4], 从而成为主要的能源。

质子辐射俘获反应是 CNO 循环中的主要核过

收稿日期: 2012-02-04; 修改日期: 2012-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11021504, 10720101076, 10735100, 10975193)

作者简介: 李云居(1983—), 男, 河南平顶山人, 助理研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究;

E-mail: li_yunju@ciae.ac.cn

程, 但受库仑势垒及低能带电粒子的鉴别困难等因素的影响, 通常的直接测量难以达到反应截面甚小的天体物理能区。如 $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ 和 $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 只有 100 keV 以上能区的反应截面数据^[5-6], 因此, 在恒星有效能区的天体物理 S 因子和反应率只能通过理论外推得到^[7-8]。其中, $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 反应的数据与最新的测量结果^[9] 分歧明显, 因而仍需要做进一步的测量。

在 $T_6 > 100$ 的高温恒星环境中, $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 的反应率将超过 ^{13}N 的 β 衰变率, 导致 CNO 循环中反应链 $^{13}\text{N}(\beta^+ \nu)^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ 转变为 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ ($\beta^+ \nu$) ^{14}N , 即高温 CNO 循环取代低温 CNO 循环成为 H 燃烧的主导过程。因此 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 是低温 CNO 循环向高温 CNO 循环转变的关键反应, 但由于涉及不稳定核, 恒星能量下反应截面的直接测量很难实现。近年来已经有相当多的实验工作很好地确定了 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 反应 1^- 态宽共振的共振参数, 这在文献^[10] 及其引用文献中有详尽描述。2004 年, 美国圣母大学唐晓东等人利用 $^{14}\text{N}(^{13}\text{N}, ^{14}\text{O})^{13}\text{C}$ 反应间接得到了 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 天体物理 S 因子^[11]。2006 年, 中国原子能科学研究院 RNB 小组通过逆运动学测量 $^{13}\text{N}(d, n)^{14}\text{O}$ 反应也间接得到了更为可靠的 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 天体物理反应率^[12], 该反应率被美国 JINA 核反应数据库选为推荐值, 并用于 X 射线暴的模型计算中^[13]。

$^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ 是进入 CNO 子循环的起始反应, 尽管其反应率远低于与之竞争的 $^{15}\text{N}(p, \alpha)^{12}\text{C}$ 的反应率, 但它对 ^{16}O 和 ^{17}O 等重要核素的合成有直接贡献。图 1 展示了现有 $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的天体物理 S 因子随能量的变化关系^[14-18]。可以看出,

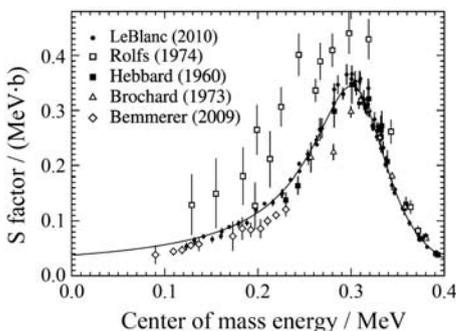


图 1 $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ 天体物理 S 因子^[18]

200 keV 以下的直接测量结果之间还存在 2 倍以上的分歧, 理论外推到恒星能区存在很大的不确定因

素, 因而仍需要开展独立的实验进行交叉检验。

3 原初核合成反应网络中的 C, N 和 O 中子辐射俘获反应

非标准模型预言原初核合成可以跨越 $A = 8$ 的稳定核质隙, 产生极其微量 ($X/H < 10^{-12}$) 的重元素^[19]。在该模型的反应网络中, CNO 核的 (n, γ) 反应链 $^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}(\beta^-) \{^{14}\text{C}(\beta^-) ^{14}\text{N}(n, \gamma)\} ^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}(\beta^-) ^{16}\text{O}(n, \gamma) \{^{16}\text{N}(n, \gamma)^{17}\text{N}(\beta^-)\} ^{17}\text{O}(n, \gamma)^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$ 对 $A \geq 13$ 原初种子核的产生有重要贡献^[20-22], 其中有的反应(如 $^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}$) 还与 AGB 星中的核合成密切相关^[23]。下面介绍其中若干关键反应的研究现状。

3.1 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}$

^{14}C 寿命长达 5 730 a, 在原初核合成的时标中可视作稳定核。 $A \geq 20$ 的原初核可能通过 $^{14}\text{C}(\alpha, \gamma)^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}(\beta^-) ^{19}\text{F}(n, \gamma)^{20}\text{F}(\beta^-) ^{20}\text{Ne} \dots$ 反应链产生^[24]。由于 $^{14}\text{C}(\alpha, \gamma)^{18}\text{O}$ 是其中最慢和对后续核的产生有决定性影响的反应, 因此精确测量该反应的天体物理 S 因子以及其他产生和消灭 ^{14}C 反应的截面具有特别重要的意义。

Raman 等确定了 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 反应共振俘获的辐射宽度^[25], 得出的共振峰处 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 天体物理反应率示于图 2, 其结果比 JINA 数据库原先的

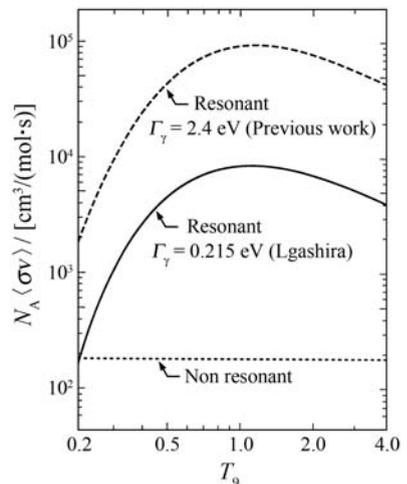


图 2 $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ 天体物理反应率^[25]

收录值低了一个量级, 导致在 $T_9 < 0.2$ 时直接俘获成为主要过程。Shima 等在两个能点测量了该反

应的截面^[26]，但由于截面相对较低并受到其它(n, γ)反应的干扰，所得结果的误差较大。Wallner 等曾尝试利用加速器质谱方法研究了该反应^[27]，但由于¹⁴C天然本底的影响，只给出了总截面的上限。从上述情况可以看出，利用转移反应间接测量¹³C(n, γ)¹⁴C的反应截面可能是一个有效的交叉检验方法。

¹⁴C(n, γ)¹⁵C既是原初核合成非标准模型中消灭¹⁴C的主要反应，又与AGB星中由中子诱发的CNO循环{¹⁴C(n, γ)¹⁵C(β⁻)¹⁵N(n, γ)¹⁶N(β⁻)¹⁶O(n, γ)¹⁷O(n, α)¹⁴C}^[29]相关。1990年以来，国外的一些实验组分别采用直接测量、库仑离解、镜像核及谱因子等方法研究了该反应的截面^[28, 30-36]，结果示于图3。由于截面分歧很大，仍需要开展新的实验做进一步的验证。

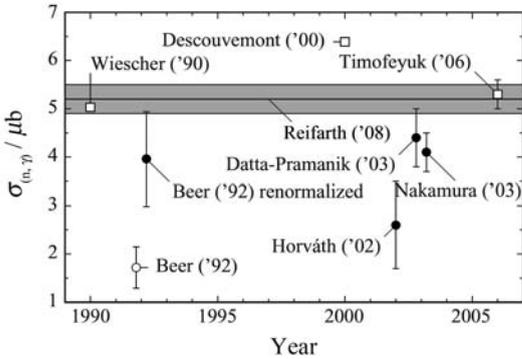


图3 质心系能量 23.3 keV 的 ¹⁴C(n, γ)¹⁵C 反应截面测量值(阴影带和实心圆)和理论估计值(空心方框)^[36]

3.2 ¹⁵N(n, γ)¹⁶N(n, γ)¹⁷N

宇宙中¹⁹F的来源一直是天文学家和核物理学家关注的一个热点问题^[37-38]。根据一系列的天文观测推断，¹⁹F主要由AGB星中的核过程{¹⁴N(α, γ)¹⁸F(β⁺)¹⁸O(p, α)¹⁵N(α, γ)¹⁹F}产生的^[39-40]。由于¹⁵N(n, γ)¹⁶N反应消耗¹⁵N，因而成为该反应链的有害反应，直接影响¹⁹F的丰度。美国橡树岭国家实验室使用逆运动学方法测量了¹⁵N(d, p)¹⁶N反应^[41]，由于没能分开¹⁶N基态和第一激发态、第二和第三激发态，如图4所示，只得到了两个态混合的角分布，并通过DWBA分析给出了¹⁶N 4个阈下态的谱因子。该结果与此前研究结果^[42-43]有2倍的差异。因此有必要利用其它转移反应从实验上分开4个束缚态，以更可靠地确定它们各自的中子谱因子，进而导出¹⁵N(n, γ)¹⁶N天体物理反应率。

目前国际上仅有关于¹⁷N核结构方面的实验研究^[44-45]，¹⁶N(n, γ)¹⁷N反应的天体物理反应率也仅有理论计算值^[46]。由于¹⁶N和¹⁷N同为短寿命核素，只能利用¹⁶N离子束和转移反应来间接测量¹⁶N(n, γ)¹⁷N的反应截面。由于¹⁷N中子发射阈下有十几条能级，阈上还可能几个共振态，实验测量有相当大的困难。

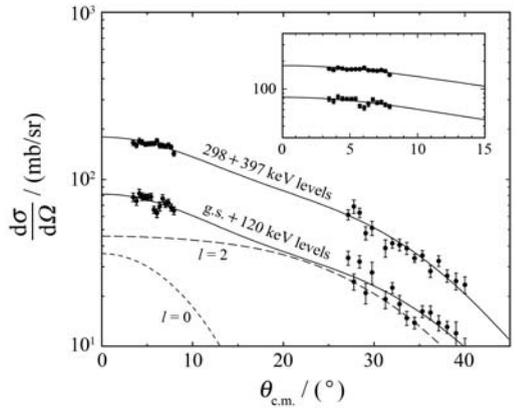


图4 ¹⁵N(d, p)¹⁶N 反应角分布^[41]

3.3 ¹⁶O(n, γ)¹⁷O(n, γ)¹⁸O(n, γ)¹⁹O

¹⁶O(n, γ)¹⁷O是AGB星中由中子诱发CNO循环反应链中另一重要反应，其截面的大小将影响重核区s过程核的合成。通常认为该反应的截面主要决定于布居¹⁷O基态和第一激发态的直接俘获过程，已有的直接测量结果如图5所示^[23]。低能量的3个实验点的能量跨度较宽，截面误差也相对较大，而且理论计算结果^[46-48]与实验数据之间还存在一定偏离。

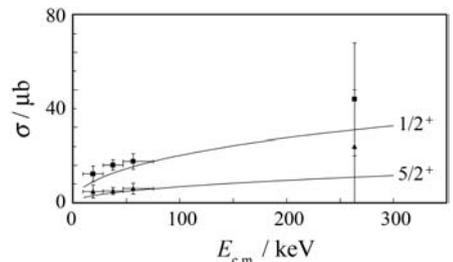


图5 ¹⁶O(n, γ)¹⁷O 反应布居基态(5/2⁺)和第一激发态(1/2⁺)的直接测量^[23]及理论分析结果^[46-48]

由于¹⁷O的天然丰度很低，目前还没有¹⁷O(n, γ)¹⁸O的直接测量工作。另外，¹⁸O的中子发射阈下有十几条能级，也增加了间接测量的难度。

国外有3个实验组分别利用纯度为97%的¹⁸O

气体^[49]及含 95.1% ¹⁸O 的氟化水^[50-51]对 ¹⁸O(n, γ)¹⁹O 反应截面进行了直接测量, 实验及理论分析结果^[48, 52-53]如图 6 所示。可以看出, 在天体物理感兴趣的能区仍缺少必要的实验数据。

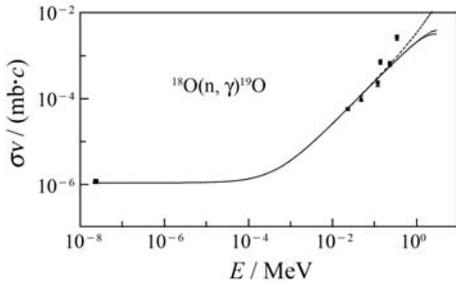


图 6 ¹⁸O(n, γ)¹⁹O 反应天体物理反应率实验测量值^[49-51]与理论分析曲线^[48]

4 核子俘获反应的间接测量

直接测量得到令人满意的天体物理能区 (p, γ) 和 (n, γ) 反应截面通常是相当困难的, 通过核子转移反应间接测量直接俘获过程的截面, 结合较高能区直接测量数据进行分析, 可以得出可信度较高的结果。由于 ²H 和 ³He 的谱因子或渐进归一化系数 (ANC) 比较可靠, (d, n), (d, p) 和 (³He, d) 反应已被广泛用于 (p, γ) 和 (n, γ) 反应截面的间接测量^[12, 54-56]。

中国原子能科学研究院 RNB 小组自 1993 年在 HI-13 串列加速器上建成国内第一条低能放射性次级束装置以来, 利用 (d, n) 和 (d, p) 反应开展了一系列核天体物理反应率的间接测量工作。除前文提及的 ¹³N(p, γ)¹⁴O 反应外, 还通过逆运动学测得 ⁷Be(d, n)⁸B, ⁸Li(d, p)⁹Li, ⁸Li(d, n)⁹Be 和 ⁶He(d, n)⁷Li 等转移反应角分布, 并导出了 ⁷Be(p, γ)⁸B, ⁸Li(n, γ)⁹Li, ⁸Li(p, γ)⁹Be 和 ⁶He(p, γ)⁷Li 等诸多重要反应的天体物理反应率^[55-58]。

由于 ⁷Li 质子谱因子^[59-60]和中子谱因子^[61]都有可靠的数据, 近年来我们开始尝试利用 (⁷Li, ⁶He) 和 (⁷Li, ⁶Li) 反应来间接测量 CNO 核子辐射俘获反应率。20 世纪 80 年代, Cook 等^[62]和 Kemper 等^[63]分别测量了 ¹³C(⁷Li, ⁶Li/⁶He) 和 ¹⁶O(⁷Li, ⁶Li/⁶He) 反应, 但都没有测到角分布的第一个峰, DWBA 计算不能很好地重现测得角分布。为了澄清其中的问题, 我们利用 Q3D 磁谱仪重新精确测

量了 ¹³C(⁷Li, ⁶He)¹⁴N 反应的角分布, 首次得到了转移反应角分布的第一个峰, 结果示于图 7。可以看出, DWBA 计算结果很好地重现了实验数据。根据该测量结果, 我们提取了 ¹⁴N 的质子谱因子, 并导出了 ¹³C(p, γ)¹⁴N 反应的天体物理 S 因子和反应率^[64]。这一结果表明, (⁷Li, ⁶He) 是提取质子谱因子很好的工具反应, 可以用于 (p, γ) 俘获反应的间接测量。今后我们将利用这种方法得到更多的天体物理反应率, 为天体演化的研究提供急需的实验数据。

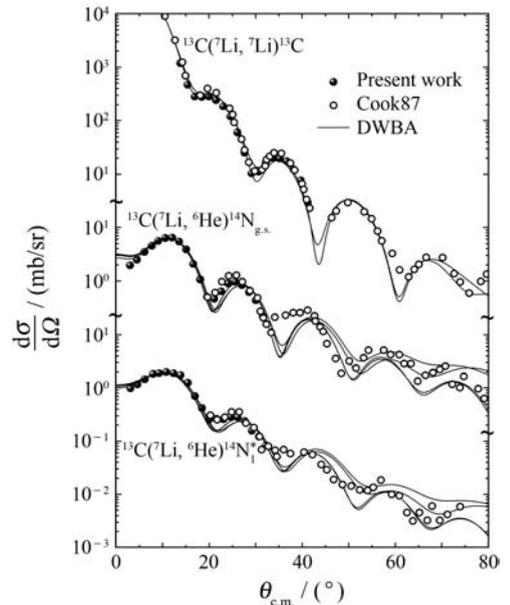


图 7 ⁷Li 能量 34 MeV 的 ¹³C(⁷Li, ⁷Li)¹³C 弹性散射及 ¹³C(⁷Li, ⁶He)¹⁴N_{0,1} 转移反应角分布

5 总结

本文首先总结了恒星主序 H 燃烧阶段 CNO 循环中^{12, 13}C, ^{13, 15}N(p, γ)等关键反应的研究现状, 其反应截面都来自于直接俘获、共振过程及二者相干的贡献。¹³N(p, γ)以外的其它反应已经有直接测量的实验数据, 但在核天体物理感兴趣能区的外推结果还存在一定差异。同时在原初核合成非标准模型及 AGB 星中子诱发 CNO 循环中所涉及的 CNO 核中子俘获反应率, 大多还没有令人满意的直接测量结果。因此, 由转移反应导出核子俘获反应截面, 作为一种有效的间接测量方法可以很好地弥补直接测量的不足。

参考文献 (References):

- [1] BETHE H A. Phys Rev, 1939, **55**: 103; Phys Rev, 1939, **55**: 434.
- [2] BURBIDGE E M, BURBIDGE G R, FOWLER W A, *et al.* Rev Mod Phys, 1957, **29**: 547.
- [3] FIELDS B D. Eur Phys J A, 2006, **27**: 3.
- [4] ROLFS C E. Cauldron in the Cosmos. Chicago: The University of Chicago Press, 1998, 328—375.
- [5] LAMB W A S, HESTER R E. Phys Rev, 1957, **107**: 550.
- [6] KING J D, AZUMA R E, VISE J B, *et al.* Nucl Phys A, 1994, **567**: 354.
- [7] LI Zhihong, SU Jun, GUO Bing, *et al.* Science China, 2010, **53**: 658.
- [8] MUKHAMEDZHANOV A M, AZHARI A, BURJAN V, *et al.* Nucl Phys A, 2003, **725**: 279.
- [9] GENARD G, DESCOUVEMONT P, TERWAGNE G. J Phys Confer Ser, 2010, **202**: 012015.
- [10] MAGNUS P V, ADELBERGER E G, GARCÍA A. Phys Rev C, 1994, **49**: 1755R.
- [11] TANG Xiaodong, AZHARI A, FU Changbo, *et al.* Phys Rev C, 2004, **69**: 055807.
- [12] LI Zhihong, GUO Bing, YAN Shengquan, *et al.* Phys Rev C, 2006, **74**: 035801.
- [13] CYBURT R H, AMTHOR A M, FERGUSON R, *et al.* Astrophys Jour S S, 2010, **189**: 240.
- [14] HEBBARD D F. Nucl Phys, 1960, **15**: 289.
- [15] BROCHARD F, CHEVALLIER P, DISDIER D, *et al.* J Phys France, 1973, **34**: 363.
- [16] ROLFS C, RODNEY W S. Nucl Phys A, 1974, **235**: 450.
- [17] BEMMERER D, CACIOLLI A, BONETTI R, *et al.* J Phys G, 2009, **36**: 045202.
- [18] LEBLANC P J, IMBRIANI G, GORRES J, *et al.* Phys Rev C, 2010, **82**: 055804.
- [19] KAJINO T, BOYD R N. Astrophys J, 1990, **359**: 267.
- [20] APPLGATE J H, HOGAN C J, SCHERRER R J. Rhys Rev D, 1987, **35**: 1151.
- [21] KAJINO T, MATHEWS G J, FULLER G M. Astrophys J, 1990, **364**: 7.
- [22] KAWANO L H, FOWLER W A, KAVANAGH R W, *et al.* Astrophys J, 1991, **372**: 1.
- [23] IGASHIRA M, NAGAI Y, MASUDA K, *et al.* Astrophys J, 2004, **441**: L89.
- [24] FUNCK C, LANGANKE K. Astrophys J, 1989, **344**: 46.
- [25] RAMAN S, IGASHIRA M, DOZONO Y, *et al.* Phys Rev C, 1990, **41**: 458.
- [26] SHIMA T, OKAZAKI F, KIKUCHI T, *et al.* Nucl Phys A, 1997, **621**: 231c.
- [27] WALLNER A, COQUARD L, DILLMANN I, *et al.* J Phys G, 2008, **35**: 014018.
- [28] NAKAMURA T, FUKUDA N, AOI N, *et al.* Nucl Phys A, 2003, **722**: 301c.
- [29] WIESCHER M, GÖRRES J, SCHATZ H. J Phys G, 1999, **25**: R133.
- [30] WIESCHER M, GÖRRES J, THIELEMANN F. Astrophys J, 1990, **363**: 340.
- [31] BEER H, WIESCHER M, KAEPPELER F, *et al.* Astrophys J, 1992, **387**: 258.
- [32] DESCOUVEMONT P. Nucl Phys A, 2000, **675**: 559.
- [33] HORVATHÁ, WEINER J, GALONSKY A, *et al.* Astrophys J, 2002, **570**: 926.
- [34] DATTA P U, AUMANN T, BORETZKY K, *et al.* Phys Lett B, 2003, **551**: 63.
- [35] TIMOFEYUK N K, BAYE D, DESCOUVEMONT P, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **96**: 162501.
- [36] REIFARTH R, HEIL M, FORSSEN C, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**: 015804.
- [37] MEYNET G, ARNOULD M. Astron Astrophys, 2000, **355**: 176.
- [38] GREVESSE N, SAUVAL A J. Space Sci Rev, 1998, **85**: 161.
- [39] WERNER K, RAUCH T, KRUK J W. Astron Astrophys, 2005, **433**: 641.
- [40] LUGARO M, UGALDE, C, KARAKAS A I, *et al.* Astrophys J, 2004, **615**: 934.
- [41] BARDAYAN D W, O'MALLEY P D, BLACKMON J C, *et al.* Phys Rev C, 2008, **78**: 052801R.
- [42] BOHNE W, BOMMER J, FUCHS H, *et al.* Nucl Phys A, 1972, **196**: 41.
- [43] MEISSNER J, SCHATZ H, HERNDL H, *et al.* Phys Rev C, 1996, **53**: 977.
- [44] AUDI G, WAPSTRA A H. Nucl Phys A, 1993, **565**: 1.
- [45] SCHELLER K W, GÖRRES J, VOUZOUKAS S, *et al.* Nucl Phys A, 1995, **582**: 109.
- [46] HERNDL H, HOFINGER R, JANK J, *et al.* Phys Rev C, 1999, **60**: 064614.
- [47] DUFOUR M, DESCOUVEMONT P. Phys Rev C, 2005, **72**: 015801.
- [48] WANG CHENGBIN, CISSÉ O I, BAYE D. Phys Rev C, 2009, **80**: 034611.
- [49] MEISSNER J, SCHATZ H, GÖRRES J, *et al.* Phys Rev C, 1996, **53**: 459.
- [50] NAGAI Y, SEGAWA M, OHSAKI T, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**: 051301R.
- [51] OHSAKI T, IGASHIRA M, NAGAI Y, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**: 051303R.
- [52] KUMAR N. Nucl Phys A, 1974, **225**: 221.

- [53] NAKAMURA T, FUKUDA N, AOI N, *et al.* Phys Rev C, 2009, **79**: 035805.
- [54] MUKHAMEDZHANOV A M, TRIBBLE R E, TIMOF-EYUK N K. Phys Rev C, 1995, **51**: 3472.
- [55] LIU Weiping, BAI Xixiang, ZHOU Shuhua, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **77**: 611.
- [56] LI Zhihong, LIU Weiping, BAI Xixiang, *et al.* Phys Rev C, 2005, **71**: 052801R.
- [57] SU Jun, LI Zhihong, GUO Bing, *et al.* Chin Phys Lett, 2006, **23**: 55.
- [58] LI Ertao, LI Zhihong, SU Jun, *et al.* Chin Phys Lett, 2011, **28**: 052102.
- [59] LAPIKÁS L, WESSELING J, WIRINGA R B. Phys Rev Lett, 1999, **82**: 4404.
- [60] LI Zhihong, LI Ertao, GUO Bing, *et al.* Eur Phys J A, 2010, **44**: L1.
- [61] SU Jun, LI Zhihong, GUO Bing, *et al.* Chin Phys Lett, 2010, **27**: 052101.
- [62] COOK J, STEPHENS M N, KEMPER K W. Nucl Phys A, 1987, **466**: 168.
- [63] KEMPER K W, HALL G A, VAN VERST S P, *et al.* Phys Rev C, 1988, **38**: 2664.
- [64] LI Yunju, LI Zhihong, LI Ertao, *et al.* Eur Phys J A, 2012, **48**: 13.

Radiative Capture Reactions of Nucleon on C, N, O in Cosmogonic Process

LI Yun-ju¹⁾, LI Zhi-hong

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: The proton radiative capture reactions of C and N nuclei are important for the energy production and nucleosynthesis in the CNO cycle, and the neutron radiative capture reactions of C, N and O nuclei are key reactions for the inhomogeneous Big Bang nucleosynthesis as well as for the neutron induced CNO cycle in AGB stars. So far, most of these reactions have been measured except some reactions of the unstable nuclei, such as $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ and $^{16}\text{N}(n, \gamma)^{17}\text{N}$. While the direct measured reactions, such as the $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$, $^{13}\text{C}(p, \gamma)^{14}\text{N}$ and $^{15}\text{N}(p, \gamma)^{16}\text{O}$ key reactions in CNO cycle, have not reached down to the stellar energies. In addition, the large uncertainties still exist in the measured neutron capture reactions such as $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$, $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ and $^{18}\text{O}(n, \gamma)^{19}\text{O}$. Thus it is significant to determine their astrophysical reaction rates via the indirect measurements. In this paper, the research status and feasibility of the indirect measurements for these reactions are discussed.

Key words: nuclear astrophysics; radiative capture reaction; indirect measurement; astrophysics reaction rate