

文章编号: 1007-4627(2008)01-0031-07

星际 ^{26}Al 核合成的研究进展*

刘宏林, 罗志全[#]

(西华师范大学理论物理研究所, 四川南充 637002)

摘要:介绍了星际 ^{26}Al 衰变所发射 1 809 keV γ 射线的最新空间探测结果, 综述了目前关于星际 ^{26}Al 起源的各种天体模型的研究进展。最后, 简要阐述了 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ 反应截面的最新测量结果及其对 ^{26}Al 起源研究的影响, 探讨了一种星际 ^{26}Al 合成的可能新途径。

关键词: 星际介质; 大质量主序星; 新星; 超新星; WR星; AGB星

中图分类号: P145.4 **文献标识码:** A

1 引言

1982年, Mahoney等^[1]首先发现了星际中含有 ^{26}Al 衰变产生的能量为 1.809 MeV的 γ 射线。 ^{26}Al 是不稳定核(半衰期约为 7.2×10^5 a), 易于通过 β^+ 衰变或电子俘获转化为 ^{26}Mg 的不稳定激发态($^{26}\text{Mg}^*$), 而 $^{26}\text{Mg}^*$ 退激过程中伴随发射 1 809 keV γ 射线, 因此通过探测这条 γ 射线的流量就可以推算出星际 ^{26}Al 的含量。由于 ^{26}Al 的半衰变期相对于宇宙的典型演化时标是非常短暂的, 因此可以得出结论: 现在所探测到的星际 ^{26}Al 是在较近年代内从某些恒星内部或新星、超新星等天体爆发时通过热核反应合成, 并被喷射到宇宙太空中来的。星际 ^{26}Al 对宇宙化学和 γ 射线天文的研究都是非常重要的, 对星际 ^{26}Al 天体物理起源这一问题的探讨, 可以促进或检验现代恒星的演化模型^[2]。为了探测星际 ^{26}Al 衰变所发射的 1 809 keV γ 射线, 自发现这一现象以来, 人们利用宇宙飞船和探空气球上的 γ 射线探测器对其进行了探测, 并先后对探测到的数据进行了处理和分析。图 1给出了最近 Diehl等^[3]利用 SPI/INTEGRAL (International Gamma-ray Astrophysics Laboratory)分光计探测到的银河内部星际 ^{26}Al 衰变所发射的 1 809 keV γ 射线轮廓。按照他们的分析, 观测到银河系内部 1 809 keV γ 射线的流量为 $(3.3 \pm 0.4) \times 10^{-4}$ ph/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。通过探

测到的 γ 射线流量推算出星际 ^{26}Al 的总含量为 $(2.8 \pm 0.8) M_{\odot}$ (M_{\odot} 表示太阳质量), 与以前的探测结果(1— $3M_{\odot}$)基本一致。为什么星际空间存在如此大量的 ^{26}Al , 产生它们的天体物理源泉又是什么等一系列的问题都是自发现这一现象以来一直使很多天文学家迷惑的重大天体物理难题。虽然很多学者对此进行了详细研究, 但迄今为止所建立的天体物理模型还不能完全解决这个难题。因此, 对其进行继续研究是完全必要的。

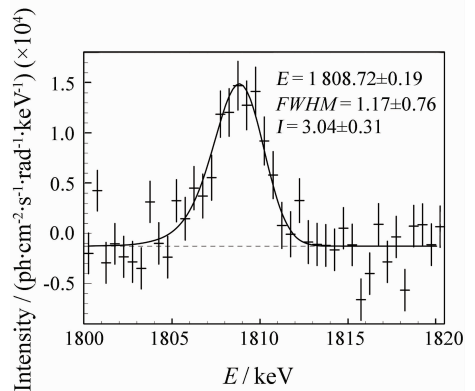


图 1 根据 SPI/INTEGRAL 的探测结果, 经处理得到银河系内部 ^{26}Al 发射线及其附近弥散 γ 射线谱^[3]

2 理论进展

实际上, 早在 20 世纪 70 年代中期还没有发现如此大量的星际 ^{26}Al 以前, 许多学者就已经预言了

* 收稿日期: 2007-07-20; 修改日期: 2007-09-28

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10778719); 四川省教育厅重点科研项目资助(2006A079)

作者简介: 刘宏林(1982—), 男(汉族), 四川蓬安人, 硕士研究生, 从事核天体物理研究; E-mail: honglinliu@126.com

通讯联系人: 罗志全, E-mail: zqluo@tom.com

核心塌陷超新星(SNII + SNIb/c)的爆炸性 C/Ne 燃烧阶段很可能会合成大量的 ^{26}Al ^[4], 同时他们还预言了星际 ^{26}Al 的存在和衰变所发射的 1 809 keV γ 射线流量大约为 10^{-4} ph/(cm² · s)。其后, 很多学者在进一步研究中把星际 ^{26}Al 的主要贡献者扩展到了具有强星风的大质量主序星^[5]、WR 星^[6]、新星^[7]和 AGB 星^[8]等天体模型。各种候选天体模型提出以后都有很多学者对其进行了详细研究, 结果表明由于各种候选天体模型的爆炸频率和其本身 ^{26}Al 产量的不确定性, 所有的候选者都仅能部分解释所探测到的 γ 射线流量。下面我们将对这些天体模型分别作简短评述。

2.1 大质量主序星模型

20 世纪 80 年代中期, Dearbore 等^[5]提出具有强大星风的大质量主序星可以产生大量的星际 ^{26}Al 。90 年代初期, CGRO(Compton Gamma-ray Observatory) 卫星上的 COMPTEL (COMPTEL/CGRO) 探测表明, 这条 γ 射线弥漫地分布在银道面内, 其空间分布相对扁平, 随银经的分布轮廓不对称, 银心和旋臂两个方向对 1 089 keV γ 射线有重要贡献, 因此部分学者认为大质量恒星很可能是星际 ^{26}Al 的主要贡献者之一^[9], 看似证实了 Dearbore 等人的观点。对于较大质量恒星 ($M > 15M_{\odot}$), 在其氢燃烧的主序阶段, CNO 循环的产热效率非常高, 温度可达到 $T_9 = 0.05 - 0.03$ (T_9 为 10^9 K 的温度单位), 其核燃烧产物 ^{19}F 和 ^{19}Ne 等核素将通过质子俘获或 β^+ 衰变进入 Ne-Na 循环, 连同原先存在的 Ne, Na 和 Mg 等元素在随后的 Mg-Al 循环中合成 ^{26}Al 。大质量恒星的内部处于强烈的对流状态, 其对流区可以从星体中心一直向外延伸到整个星体质量的 70% 以上。核心区相当大部分刚合成的 ^{26}Al 将对流被运输到星体的较外包层, 这类具有强星风的主序星将很大部分星体物质抛出, 因此刚合成的 ^{26}Al 也被一起带到了宇宙太空, 从理论上讲具有强星风的大质量主序星可能是星际 ^{26}Al 的主要贡献者。然而详细的研究表明^[10], 大质量主序星对星际 ^{26}Al 的贡献是很小的, 一般都不超过 10%。近来 Limongi 等^[11]更加详细地考虑了大质量恒星的核心 H 燃烧阶段对星际 ^{26}Al 的贡献, 结果表明质量越大的恒星, 燃烧时标越短 ($\log t_{\text{H}} = 3.869$

$8M^{-0.4674}$), 其 H 对流核越大, 质量损失率就越高, 因而对星际 ^{26}Al 的贡献也就越大。在这里, H 对流核的大小对星际 ^{26}Al 的贡献起着关键作用, 主要是因为 H 对流核的大小决定了 H 燃烧结束后恒星的质量分布和 ^{26}Al 的质量丰度, 因此它直接影响恒星内部 ^{26}Al 的产量。 ^{26}Al 的最终产量与 ^{25}Mg 的初始丰度成正比, 因此 ^{25}Mg 的初始丰度对 ^{26}Al 产量的影响也很大。但是由于 ^{25}Mg 的初始丰度、 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 的反应截面、恒星 H 对流核的大小、氢燃烧后 ^{26}Al 的产量和恒星质量损失率等诸多不确定性的影响, 大质量主序对星际 ^{26}Al 的贡献还不明确。就目前大质量主序星模型对星际 ^{26}Al 的贡献的研究来看, 普遍认为它们不可能对星际 ^{26}Al 作出太大贡献, 因此近来很少有学者对此进行研究。

2.2 WR (Wolf-Rayet) 星模型

WR 星是大质量单星的超新星前身星, 即要经历超新星爆炸的恒星演化的前期阶段^[10]。1986 年, Prantzos 和 Casse^[6]指出具有强星风的 WR 星也可以是星际 ^{26}Al 的主要贡献者。后来很多学者对此进行了详细研究^[12], 他们发现在 O 型大质量恒星(最后演化成为 WR 星)的核心 H 燃烧时期, 星际 ^{26}Al 主要通过 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应在 Mg-Al 循环中被合成, 然后通过核心 He 燃烧时期(演化到 WC 或 WO 阶段)的强大星风将其抛到星际太空, 成为星际 ^{26}Al 的主要贡献者。Meynet 等的研究表明, WR 星对星际 ^{26}Al 的贡献是其金属性的敏感函数。对于非旋转 WR 星模型, $Y(^{26}\text{Al}) \propto Z^{2.13}$ (Z 为金属性); 对于旋转 WR 星模型, $Y(^{26}\text{Al}) \propto Z^{1.5}$ ^[14]。由于旋转增加了星体的质量损失率, 因而增加了 WR 星对星际 ^{26}Al 的贡献, 研究表明旋转可以提高星际 ^{26}Al 的产量 2.5—2.9 倍^[14]。WR 星中 ^{26}Al 的产量还与其初始质量函数有关, 对于不同的初始质量函数, WR 星对星际 ^{26}Al 贡献也大不相同。Vuissoz 等^[14]基于提高质量损失率的 WR 星模型和不同的初始质量函数估计出 WR 星对星际 ^{26}Al 的贡献可以达到 0.9—1.5 M_{\odot} , 但是由于参数的不确定性很大, 还是不能确切地说明旋转 WR 星对星际 ^{26}Al 的具体贡献。COMPTEL/CGRO 卫星的观测数据表明, WR 星对星际 ^{26}Al 的贡献远小于观测结果。为了说明 WR 星对星际 ^{26}Al 贡献的产量, Palacios 等^[15]提出了快速旋转的 WR 星模型, 计算表明对

于陡的初始质量函数 ($\alpha = 1.7$), WR 星对星际 ^{26}Al 贡献约为 $1.27M_{\odot}$, 可以达到 $2\text{--}3M_{\odot}$ 。星际 ^{26}Al 的 $42\%\text{--}63\%$ 。从某种程度上讲, WR 星的贡献可以很大部分解决星际 ^{26}Al 的超丰难题。然而, 他们提出的这种快速旋转 WR 星的旋转速度达到 300 km/s , 实际上只有少部分 B 型 WR 星才能达到这样的旋转速度^[16]。关于 WR 星模型的贡献, 例如产生如此强大星风的机制、对流核心的延伸程度和如此巨大恒星经历 WR 阶段的时标等一系列问题都还在研究和争论之中。此外, WR 星对星际 ^{26}Al 的贡献也有很多不确定因素的影响, 例如它的初始质量、旋转速度、重要元素的核反应率、超新星爆炸率和金属性等。因此 WR 星对星际 ^{26}Al 的具体贡献还有待进一步研究。

2.3 新星模型

这里所讨论的新星是经典新星。很多学者^[17]都认为在新星的典型温度 ($T_9 = 0.1\text{--}0.3$) 条件下, ^{26}Al 主要通过 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应被合成, 因此只要是在富质子区域和富 ^{25}Mg 核素区域或者两者都富裕的区域就可以合成大量的 ^{26}Al 。在新星的爆炸性 H 燃烧环境中, 由于白矮星表面大量的 H 和 Mg 元素可以合成大量的 ^{26}Al , 爆炸时的强大辐射压很容易将表面的 ^{26}Al 抛射到宇宙太空。在新星中, ^{26}Al 主要通过 $^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}(\beta^+ \nu_e)^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}^s$ (处于基态的 ^{26}Al) 反应路径被合成, 通过 $^{26}\text{Al}^s(p, \gamma)^{27}\text{Si}$ 反应被摧毁, 因此新星也可能是星际 ^{26}Al 的主要贡献者之一。然而, 由于 $^{25}\text{Al}(p, \gamma)^{26}\text{Si}$ 反应率的不确定性太大, 这使得 ^{25}Al 发生反应的分支比非常不确定, 因而新星对 ^{26}Al 的贡献也不得而知。2003 年, Clayton^[18] 提出如果有 He 新星 (白矮星的爆炸包层中 He 的含量比 H 大) 存在, 那么爆炸包层中的 ^{14}N 元素可以通过连续地俘获 3 个自由 He 核将部分 ^{14}N 转化为 ^{26}Al , 但还未见具体的计算。同时, 他还提出与太阳质量相当的经典新星外部大约 $0.000\text{--}1M_{\odot}$ 包层中的热核反应失控可以产生一定量的 ^{26}Al , 然后通过新星爆炸将其抛射到宇宙空间成为星际 ^{26}Al 的来源之一。由于爆炸期间合成的 ^{26}Al 主要通过 Mg 元素转化而来, 因此富 Mg 新星 (特别是 O-Ne-Mg 新星) 的贡献会更大。José 等人对 O-Ne 新星的贡献进行了一系列研究: 1997 年, 他们用更新的初始新星元素组份和核反应

率对质量为 $1.15\text{--}1.35M_{\odot}$ 的 O-Ne 新星静力学仿真表明, 新星对星际 ^{26}Al 的贡献为 $0.1\text{--}0.4M_{\odot}$ ^[19]。后来, 他们^[20]又提出质量低于 $1.0M_{\odot}$ 的 O-Ne 新星对 ^{26}Al 的贡献可能是很重要的。1999 年, 用更新的核反应网络对 O-Ne 新星的计算证实了他们以前的结果^[21]。最近, José^[22]利用更新的 O-Ne 白矮星核心元素组份通过核反应网络计算表明, O-Ne 新星爆炸对星际 ^{26}Al 的贡献是很小的, 一般不会超过 15% , 这同 COMPTEL/CGRO 卫星的观测结果基本一致。因此可以得出结论: 目前所有的新星模型都不能对星际 ^{26}Al 作出明显贡献。

2.4 处于 AGB 阶段的红巨星模型

处于渐进分支的红巨星 (Asymptotic Giant Branch), 简记 AGB 星^[10]。其 H 燃壳层是辐射区域, 该区域的温度非常高, 几乎都在 10^8 K 以上, 即使在其对流壳层的底部也可以达到几倍 10^7 K 的高温。由于这里的燃烧完全是在对流条件下进行的, 因此燃烧过程中由于 H 燃料可以获得及时补充而成为高效率的核合成场所。它主要通过 CNO 循环, 同时也伴随着 Ne-Na 循环和 Mg-Al 循环, 合成重元素。因此该壳层可以合成像 ^7Li , ^{13}C 和 ^{14}N 一直到 ^{23}Na 等的重要元素, 而 Mg 和 Al 的同位素混合可以严重地影响 ^{26}Al 和 ^{27}Al 的比率。因此, Mowlavi 和 Meynet^[8] 提出 AGB 星也可能是星际 ^{26}Al 的主要贡献者, 他们对 AGB 星中 ^{26}Al 的产生和摧毁过程进行详细研究后发现, 大质量 ($M > 4M_{\odot}$) AGB 星的 HBB (Hot Bottom Burning) 可以合成大量的 ^{26}Al , 因而 HBB 很可能是 AGB 星中合成 ^{26}Al 的主要场所。由于 AGB 星的 H 燃烧壳层中, ^{26}Al 主要通过 Mg-Al 循环被合成, 当温度 $T_9 > 0.035$ 时, ^{26}Al 主要通过 ^{25}Mg 质子俘获反应被合成; 当温度 $T_9 > 0.055$ 时, ^{26}Al 主要通过 $^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}(\beta^+ \nu_e)^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}^s$ 反应链以初始的 ^{24}Mg 为种子核被合成。AGB 星中的 H 壳层燃烧的温度通常为 $T_9 > 0.04$, 所以 AGB 星的 H 燃烧壳层中可以合成大量的 ^{26}Al 。然而, 由于后来的 He 燃烧壳层中有自由中子放出, 则在 H 壳层燃烧中合成的 ^{26}Al 将在 He 燃烧壳层中被摧毁。在 $T_9 = 0.09\text{--}0.1$ 的温度范围内, 中子主要通过 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应产生; 在更高温度范围内, 中子主要通过 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应产生。根据近来

的 AGB 星模型计算表明^[23], 当温度 $T_9 < 0.2$ 时, 在壳层区域内的 ^{26}Al 被摧毁率低于 20%, 而当温度 $T_9 > 0.3$ 时, 在壳层区域内的 ^{26}Al 将有 95% 的被摧毁。质量为 $2.5M_{\odot}$ 的太阳金属性 AGB 星中的壳层燃烧时不能达到后者温度, 计算表明每个这样的 AGB 星的壳层区域将有大约 $3 \times 10^{-7}M_{\odot}$ 的 ^{26}Al 产生。因此, 在一定条件下, AGB 星对星际 ^{26}Al 的贡献可以是很大的。近来, Nollett 等^[24] 对表面混合参数化的低质量 AGB 星模型研究表明, 基于不同的混合参数, 它们能够合成足够的 ^{26}Al 以解决星际 ^{26}Al 的超丰难题, 但是由于这些参数存在很大的不确定性, AGB 星的具体贡献还有待进一步研究。根据文献[25]可知, 对于初始质量 $M = 1.5\text{--}3M_{\odot}$ 的 AGB 星, ^{26}Al 主要通过 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应合成, 其产量不依赖恒星的质量损失率, 而主要与恒星的混合深度 (T_p) 有关。对于这样的低质量的 AGB 星, 只需考虑 H 燃烧壳层对 ^{26}Al 的贡献。当 H 燃烧壳层产生的 ^{26}Al 被卷入 He 燃烧壳层, 它将在对流脉冲中被 (n, p) 反应摧毁。计算表明, 当 ^{26}Al 的产生和摧毁过程达到平衡时, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比率可达到 5×10^{-3} 。AGB 星中合成的 ^{26}Al 将通过第 3 次挖掘 (TP-AGB) 被运输到包层, 而 TP-AGB 的时标决定了星际 ^{26}Al 的产量。对于较低质量的 AGB 星, CBP (Cool Bottom Processing) 过程能够解释发现的 C/O 陨石颗粒中 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比率, 研究表明如果没有 CBP 过程, H 燃烧时产生的 ^{26}Al 大部分将在 He 燃烧过程中被摧毁。但是由于其质量损失率和核反应率等不确定因素的影响, 关于 AGB 星的具体贡献还有很多工作需要做。

2.5 核心塌陷超新星模型

20 世纪 70 年代, Schramm 等^[4] 预言了核心塌陷超新星的爆炸性 C 燃烧阶段可以合成 ^{26}Al , 其产量为 $10^{-5}M_{\odot}/\text{SN}$ (SN 为每颗超新星)。假设该类超新星的爆炸频率为 $1/30 \text{ a}$, 并考虑到 ^{26}Al 的平均寿命为 1.07 Ma, 经简单计算就可以求得星际 ^{26}Al 的稳定平均含量为 $\sim 0.3M_{\odot}$ 。然而, 后来的探测结果 (2.8 ± 0.8) M_{\odot} 却远大于这个值, 因此超新星对星际 ^{26}Al 的贡献一时引起了广泛的关注。1994 年以前的相关工作见文献[26], 这里不再复述。1995 年, Timmes 等^[27] 的研究表明, 大于 $25M_{\odot}$ 、无星风

损失的大质量恒星晚期形成的 SNII 核心的 Ne 燃烧阶段和中微子诱导核反应可以产生足够多的 ^{26}Al 以说明其观测值; 而小于 $25M_{\odot}$ 的大质量恒星在同等条件下合成的 ^{26}Al 仅有观测值的 1/8。由于 WR 单星的强星风损失, 人们普遍认为 SN Ib/c 前身星 (WR 星) 的质量不可能太大。Woosley 等^[28] 对小质量的 SN Ib/c 前身星模型的计算表明, SN Ib/c 对星际 ^{26}Al 的贡献是非常小的。2001 年, Nakamura 等^[29] 利用较大质量的 SN Ib/c 前身星模型计算发现, SN Ib/c 对星际 ^{26}Al 有明显的贡献。特别是对于质量为 $6\text{--}8M_{\odot}$ 的 SN Ib/c 前身星合成星际 ^{26}Al 的产量为 $6.7 \times 10^{-3}\text{--}1.2 \times 10^{-2}M_{\odot}/\text{SN}$, 而更大质量 ($10\text{--}16M_{\odot}$) 前身星模型的贡献却比较小。后来, Van Bever 和 Vanbeveren^[30] 对这种较大质量的前身星模型给出了解释, 他们认为密近双星中的 WR 星从其伴星吸积物质可以达到如此大质量的前身星。同时, Nakamura 等^[29] 通过近似公式对较小质量的前身星模型研究发现, 质量为 $2.3\text{--}3.5M_{\odot}$ 的前身星合成星际 ^{26}Al 的产量为 $4.9 \times 10^{-6}\text{--}8.4 \times 10^{-5}M_{\odot}/\text{SN}$; 利用相同的近似公式对大质量的前身星模型计算发现, $7M_{\odot}$ 的前身星模型对星际 ^{26}Al 的贡献为 $7.6 \times 10^{-3}M_{\odot}/\text{SN}$ 。近来, Meynet 和 Maedert 等^[31] 对大于 $10M_{\odot}$ 的旋转 WR 星前身星研究表明, 这类前身星在爆炸时对星际 ^{26}Al 的贡献一样很小。最近, Higdon 等^[32] 利用 Salpeter 初始质量函数、放射性元素 ^{26}Al 的平均寿命和核心塌陷超新星频率 $1/40 \text{ a}$, 对初始质量为 $30\text{--}50M_{\odot}$ 的密近双星中 SN Ib/c ^{26}Al 的产量计算表明, SN Ib/c 对星际 ^{26}Al 的贡献为 $2.5M_{\odot}$; 同样的计算发现 WR 星风损失、SNII 和 SN Ib/c 单星对星际 ^{26}Al 的贡献分别为 1.4, 0.4 和 $0.14M_{\odot}$ 。也就是说, 可观测到星际 ^{26}Al 的总质量应该为 $4.5M_{\odot}$, 这个值明显大于近来的观测值 (2.8 ± 0.8) M_{\odot} , 星际 ^{26}Al 的超丰难题看似已基本得到解决。因此可以得出结论: 超过 60% 的星际 ^{26}Al 来自密近双星中前身星初始值质量为 $30\text{--}50M_{\odot}$ 的 SN Ib/c。由于这类超新星仅占核心塌陷超新星的 1% 左右, 因此可观测到的星际 ^{26}Al 是来自大约 300 颗这类超新星。但是, SN Ib/c 对星际 ^{26}Al 的贡献作为其前身星质量函数需进一步研究。

3 实验进展

早在 1985 年 Leising 和 Clayton^[33] 指出, 由于缺

乏银河系中 ^{26}Al 衰变所发射 1 809 keV γ 射线源的分布图像, 因而严重地限制了对星际 ^{26}Al 主要贡献者的鉴别。银河对于 γ 射线是相对透明的, 从以前 Compton 天文台上的 Compton 望远镜所拍摄到的星际 ^{26}Al 衰变所发射的 1 809 keV γ 射线的分布图像来看, 星际 ^{26}Al 主要集中在银道面上, 这就使人们得出结论: 银河系内的大质量恒星对星际 ^{26}Al 的贡献起主导作用。后来的继续观测和研究表明星际 ^{26}Al 的主要起源于大质量恒星^[34], 特别是具有强星风的 WR 时期和最后的超新星爆炸时期的贡献最明显。1991 年发射的 COMPTEL/CGRO 卫星对星际 ^{26}Al 进行了 10 a 的巡天观测提供了比较完整的银河系内 1 809 keV γ 射线源的分布图像, 结果表明星际 ^{26}Al 主要集中在银心、成块成团、具有很强的不对称性, 并且与几个银河系的年轻星形成区域有很好的相关性, 这种相关性可以很好地解释星际 ^{26}Al 主要是大质量恒星演化的产物^[35]。然而, 由于当前对大质量恒星的研究只局限在距太阳几个 kpc 的小范围内, 很多其它星系区域的大质量恒星基本上都还不了解^[36]。另一方面, 也有陨石数据表明星际 ^{26}Al 也可能来自原太阳吸积盘的撕裂反应^[37]。此外, 天鹅座明显的 1 809 keV γ 射线流量表明大量的 ^{26}Al 也可能来自恒星的形成区域。因此就出现了另一个有挑战性的问题, 那就是当前所探测到的 ^{26}Al 衰变所发射的 1 809 keV γ 射线流量仅来自银河的局部区域, 而不是全天空 1 809 keV γ 射线源的贡献。最近, Diehl 等^[3] 解决了这个问题, 他们利用 SPI/INTEGRAL 分光计精确地探测了沿银心方向星际 ^{26}Al 衰变所发射的 1 809 keV γ 射线的 Doppler 红移, 从而支持了 ^{26}Al 在银河系内的大范围分布。探测结果如图 2 所示, 表明星际 ^{26}Al 与银河系作同步旋转。虽然还有很多问题都没有解决, 但很多基本特征已经被证实: 探测到的 1 809 keV γ 射线源沿银道面扩展, 具有很强的不对称性, 天鹅座区域更加明显。通过目前探测到的 γ 射线流量可以推算出星际 ^{26}Al 的总含量为 $(2.8 \pm 0.8) M_{\odot}$, 并且进一步支持了星际 ^{26}Al 的主要贡献者是大质量恒星, 特别是有强星风的 WR 时期和最后超新星爆炸时期这一观点。

2003 年, RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager)^[38] 第 1 次探测到了银河系中

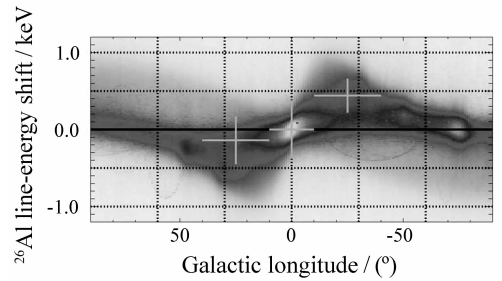


图 2 根据 SPI/INTEGRAL 的探测结果, 经处理得到 ^{26}Al 发射线沿银道面的空间探测结果^[3]

^{60}Fe 衰变所发射的 1 173 和 1 333 keV 两条 γ 射线, 并测得 ^{60}Fe 和 ^{26}Al 衰变所发射的 γ 射线流量之比 ($^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$) 约为 0.16。通过进一步观测, RHESSI^[39] 和 SPI/INTEGRAL^[40] 两个小组在 2005 年几乎同时探测到了 ^{60}Fe 衰变所发射的这两条 γ 射线, 按照同样的分析方法分别得到 $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ 为 0.17 ± 0.05 (RHESSI) 和 0.11 ± 0.03 (SPI/INTEGRAL)。实际上, 早在 1995 年 Timmes 等^[27] 就预言了大质量恒星在其超新星前身星演化阶段和最后爆炸阶段内部都可以合成大量的 ^{26}Al 和 ^{60}Fe , 并且指出如果所探测到的星际 ^{26}Al 全部来自核心塌陷超新星, 探测到的 $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ 应为 0.16。理论预言和观测结果非常接近, 这不得不让我们考虑 Timmes 等人预言的正确性。国际上现在普遍认为 SPI/INTEGRAL 的精度更高, 因此可以取 $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$ 为 0.11。按照 Timmes 等^[27] 的预言, 简单计算就可以得出大约有 2/3 的星际 ^{26}Al 来自核心塌陷超新星的结果。结合星际 ^{26}Al 衰变所发射的 γ 射线源的空间分布图像可以得出结论: 核心塌陷超新星很可能是星际 ^{26}Al 的主要贡献者。根据 Plantzos^[41] 最近的计算, SNII 对星际 ^{26}Al 的贡献仅为 $0.3\text{—}0.6 M_{\odot}$, 相对于观测值 $2\text{—}3 M_{\odot}$ 还相差甚远, 而这个差值只能通过 SN Ib/c 的贡献来弥补。因此我们可以猜想: SN Ib/c 才是星际 ^{26}Al 的主要贡献者, 当然这个猜想的正确性还需要通过进一步研究来证实。

此外, 最近的核物理实验表明 $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ (CNO 循环中 3 个最关键的核反应之一) 的反应截面在低温 ($E \approx 50\text{—}225$ keV) 范围比以前所公认的外推值减小了 40%^[42]。因此, 以前所提出的在大质量主序星、WR 星和 AGB 星等候选天体模型中通过 CNO 循环、Ne-Na 循环和 Mg-Al 循环合成的 ^{26}Al

的产量至少要下降一半^[16]。因此, 星际 ²⁶Al 的超丰难题不但没有在继续研究中得到解决, 反而遇到了更大的问题。

4 合成星际 ²⁶Al 的可能新途径

鉴于星际 ²⁶Al 的核合成与天体起源的严重困难, 20 世纪 90 年代南京大学彭秋和教授提出了一种同国际流行方式(通过 rp-过程合成 ²⁶Al)截然不同的核合成途径(¹⁴N(¹⁶O, α)²⁶Al)以及 SNIa(前身星为 ONeMg 白矮星)产生星际 ²⁶Al 的模型^[43]。若核反应温度取为 $T_9 = 3.0$, SNIa 爆发频率取 $1/200$ a, 初步估算表明银河系内 SNIa 可能提供 $1.0 - 1.2M_{\odot}$ 的星际 ²⁶Al。2004 年, 何明等^[44]在日本筑波大学研究了¹⁴N(¹⁶O, α)²⁶Al 在 $E_{cm} = 9.5, 7.9$ 和 6.6 MeV 时的反应截面, 其结果如表 1 所示。最近, 南京大学研究小组利用该实验数据外推发现, 当热运动能 $E_k < 1$ MeV 时, ¹⁴N + ¹⁶O 反应的 α 出射分支比将大于 20%。利用这个结果进行核反应网络计算表明^[45], 超新星的爆炸性氧燃烧阶段可以合成大量的 ²⁶Al, 其最终质量丰度可以达到 7.779×10^{-6} 。从某种程度上讲, 初步证实了¹⁴N(¹⁶O, α)²⁶Al 反应很有可能是 SNIa 中爆炸性氧燃烧阶段核合成星际 ²⁶Al 的主要来源的观点。但是, 他们的计算中也有一些不确定性存在, 例如, SNIa 中¹⁴N 的混合量和¹⁴N(¹⁶O, α)²⁶Al 反应率等都限制了 SNIa 对星际 ²⁶Al 贡献的精确计算。当然, 该设想的正确性需要通过更详细的核反应网络程序计算来证实, 并且计算过程中需要应用更可靠的恒星对流模型和更精确的核反应率。

表 1 ¹⁴N(¹⁶O, α)²⁶Al 反应的截面

E_{cm}/MeV	σ/b
9.5	$(2.20 \pm 0.28) \times 10^{-3}$
7.9	$(2.70 \pm 0.39) \times 10^{-4}$
6.6	$(2.25 \pm 0.39) \times 10^{-5}$

5 结语

近年对星际 ²⁶Al 核合成问题的研究已取得了很大进展, 目前的观测和理论研究都已基本上确定核心塌陷超新星很可能都是星际 ²⁶Al 的主要贡献者, 但是仍有一些不确定因素。例如, (1)最为关键的几

个核反应截面不够精确; (2)恒星演化过程中对流机制的不确定性; (3)恒星质量损失率的不确定性; (4)核反应网络仿真技术还有待进一步发展; (5)超新星爆发理论迄今不能使超新星自恰地爆发。

不管结果怎样, 我们深信随着观测手段的进步、理论模型的进一步完善和核物理实验数据的更加精确, 人们对星际 ²⁶Al 核合成及相关问题的研究即将进入一个新的阶段。

参考文献 (References):

[1] Mahoney W A, Ling J C, Jacobson A S, *et al.* *Astrophys J*, 1982, **262**: 742.

[2] Peng Qiuhe. *Prog Phys*, 1995, **15**(4): 79(in Chinese); Arnould M, Goriely S, Meynet G. *Astron & Astrophys*, 2006, **453**: 653. (彭秋和. *物理学进展*, 1995, **15**(4): 79.)

[3] Diehl R, Hailo H, Kretschmer K, *et al.* *Nature*, 2006, **439**: 45.

[4] Schramm D N. *Ap Space Sci*, 1971, **13**: 249; Arnett W D. *Ann N Y Acad Sci*, 1977, **302**: 90; Arnett W D, Wefel J P. *Astrophys J*, 1978, **224**: 139; Truran J W, Cameron A G W. *Astrophys J*, 1978, **219**: 226; Ramaty R, Lingenfelter R E. *Astrophys J*, 1977, **213**: 5; Woosley S E, Weaver T A. *Astrophys J*, 1980, **238**: 1 017.

[5] Dearbore D S P, Blake J B. *Astrophys J*, 1985, **288**: 21.

[6] Prantzos N, Casse M. *Astrophys J*, 1986, **307**: 324.

[7] Arnould M, Norgaard H, Thielemann F K, *et al.* *Astrophys J*, 1980, **237**: 931; Clayton D D. *Astrophys J*, 1984, **280**: 144.

[8] Mowlavi N, Meynet G. *Astron & Astrophys*, 2000, **361**: 959.

[9] Diehl R, Bennett K, Bloemen H, *et al.* *Astron & Astrophys Suppl*, 1993, **97**: 181.

[10] Peng Qiuhe. *Prog Astron*, 1994, **12**(4): 278(in Chinese). (彭秋和. *天文学进展*, 1994, **12**(4): 278.)

[11] Limongi M, Chieffi A. *Nucl Phys*, 2005, **A758**: 11.

[12] Walter R, Maeder A. *Astron & Astrophys*, 1989, **218**: 123; Peng Qiuhe. *Chin Phys Lett*, 1994, **11**(8): 480.

[13] Meynet G, Arnould M, Prantzos N, *et al.* *Astron & Astrophys*, 1997, **320**: 460.

[14] Vuissoz C, Meynet G, Kn dlseder J, *et al.* *New Astron Rev*, 2004, **48**: 7.

[15] Palacios A, Meynet G, Vuissoz C, *et al.* *Astron & Astrophys*, 2005, **429**: 613.

[16] Peng Qiuhe. *New Astron Rev*, 2006, **50**: 481.

[17] Peng Qiuhe. *Prog Astron*, 1995, **13**(4): 305(in Chinese). (彭秋和. *天文学进展*, 1995, **13**(4): 305.)

[18] Clayton D D. *Handbook of Isotopes in the Cosmos: Hydrogen to*

- Gallium. Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 135.
- [19] José J, Hernanz M, Coc A. *Astrophys J*, 1997, **479**: 55.
- [20] José J, Hernanz M. *Astrophys J*, 1998, **494**: 680.
- [21] José J, Coc A, Hernanz M. *Astrophys J*, 1999, **520**: 347.
- [22] José J. *Nucl Phys*, 2005, **A758**: 713.
- [23] Mowlavi N. *ESA-SP*, 2001, **459**: 51.
- [24] Nollett K M, Busso M, Wasserburg G J. *Astrophys J*, 2003, **582**: 1 036.
- [25] Wasserburg G J, Busso M, Gallino R, *et al.* *Nucl Phys*, 2006, **A777**: 5.
- [26] Peng Qiuhe. *Prog Astron*, 1995, **13**(4): **315**(in Chinese).
(彭秋和. *天文学进展*, 1995, **13**(4): 315.)
- [27] Timmes F X, Woosley S E, Hartmann D H, *et al.* *Astrophys J*, 1995, **449**: 204.
- [28] Woosley S E, Langer N, Weaver T A. *Astrophys J*, 1995, **448**: 315.
- [29] Nakamura T, Umeda H, Iwamoto K, *et al.* *Astrophys J*, 2001, **555**: 880.
- [30] Van Bever J, Vanbeveren D. *Astron & Astrophys*, 2003, **400**: 63.
- [31] Meynet G, Maeder A. *Astron & Astrophys*, 2003, **404**: 975.
- [32] Higdon J C, Lingenfelter R E, Rothschild R E, *et al.* *Astrophys J*, 2004, **611**(1): L29.
- [33] Leising M D, Clayton D D. *Astrophys J*, 1985, **294**: 591.
- [34] Knödlseeder J. *Astrophys J*, 1999, **510**: 915; Knödlseeder J, Bennett K, Bloemen H, *et al.* *Astron & Astrophys*, 1999, **344**: 68.
- [35] Plüschke S, Diehl R, Schönfelder V, *et al.* *ESA-SP*, 2001, **459**: 55.
- [36] Limongi M, Chieffi A. *Astrophys J*, 2006, **647**: 483.
- [37] Young E D, Simon J I, Galy A, *et al.* *Science*, 2005, **308**: 223.
- [38] Smith D M. *Astrophys J Lett*, 2003, **589**: 55.
- [39] Smith D M. *ESA-SP*, 2005, **552**: 45.
- [40] Harris M J, Knödlseeder J, Jean P, *et al.* *Astron & Astrophys*, 2005, **433**: 49.
- [41] Prantzos N. *Astron & Astrophys*, 2004, **420**: 1 033.
- [42] Lemut A, Bemmerer D, Confortola F, *et al.* *Phys Lett*, 2006, **B634**: 483.
- [43] Peng Qiuhe. *Prog Astron*, 1995, **13**(4): 315(in Chinese).
(彭秋和. *天文学进展*, 1995, **13**(4): 315.)
- [44] He Ming, Yang Yaoyun, Jiang Shan, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2004, **21**(4): 404(in Chinese); He Ming, Jiang Shan, Nagashima Y, *et al.* *Nucl Instr and Meth*, 2005, **B240**: 612.
(何明, 杨耀云, 姜山等. *原子核物理评论*, 2004, **21**(4): 404.)
- [45] Wang Peng, Peng Qiuhe, Zhang Shuinai, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2006, **23**(6): 1 652.

Progress in Study of Nucleosynthesis on Interstellar ^{26}Al *

LIU Hong-lin, LUO Zhi-quan[#]

(*Institute of Theoretical Physics, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China*)

Abstract: The recently detection outcome about interstellar ^{26}Al is introduced, as well as the investigation progresses of interstellar ^{26}Al nucleosynthesis in all models are reviewed. Finally, the new nuclear physics experimental results for the $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ reaction effect on sources of interstellar ^{26}Al and an alternative new way for nucleosynthesis ^{26}Al in SNIa are discussed.

Key words: interstellar medium; massive main sequence stars; novae; supernovae; WR star; AGB star

* **Received date:** 20 Jul. 2007; **Revised date:** 28 Sep. 2007

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10778719); Scientific Research Fund of Sichuan Provincial Education Department (2006A079)

Corresponding author: Luo Zhiquan, E-mail: zqluo@tom.com