

# 超新星在星际 $^{26}\text{Al}$ 问题中的作用： 星际 $^{26}\text{Al}$ 的天体源泉问题之三

彭 秋 和

(南京大学天文系 南京 210093)

## 摘 要

讨论了迄今超新星爆发理论中各种爆炸性核燃烧核合成  $^{26}\text{Al}$  的问题。评述了星际  $^{26}\text{Al}$  天体起源的 SNII+SNII<sub>b</sub> 模型的有利因素和不足之处。最后提出一种产生星际  $^{26}\text{Al}$  的新途径和有关部分星际  $^{26}\text{Al}$  起源于 SNI<sub>a</sub> 的初步设想。

**关键词** 超新星：一般 — 核合成 — 星际物质：原子

## 1 引 言

早在 50 年代，人们在探讨直径为几百公里的小行星内部处于融熔状态的能源时，就推测可能有 8 种放射性元素作为其能源，其中最佳候选者为  $^{26}\text{Al}$ <sup>[17]</sup>，其核基态的半衰期为  $\tau_{1/2} = 7.2 \times 10^5 \text{yr}$ ，它通过  $\beta^+$  衰变和电子俘获过程衰变为  $^{26}\text{Mg}$  的激发态，当它退激发跃迁到基态时伴随着发射 1.809MeV  $\gamma$  射线。在 70 年代中期人们对碳粒陨石的同位素分析发现并推断，太阳系早期曾有丰富的  $^{26}\text{Al}$ ，其比值  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  可达  $5 \times 10^{-5}$ <sup>[2]</sup>，有人推测为  $1.0 \times 10^{-3}$ <sup>[3]</sup>。与此同时，Ramaty 和 Lingenfelter 首次预言超新星爆发时抛射  $^{26}\text{Al}$ ，他们还预测星际  $^{26}\text{Al}$  衰变产生的 1.809MeV  $\gamma$  射线的流量大约为  $10^{-4} \gamma \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (但当时超新星核合成理论尚处于初始阶段)<sup>[23]</sup>。

有关空间  $\gamma$  射线探测情况和结果请参阅文献 [4]，这里不再复述，只是强调如下观测事实：(1) 观测到的 1.809MeV  $\gamma$  射线流量约为  $4.8 \times 10^{-4} \gamma \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{str}^{-1}$ ，谱线全半宽 (FWHM) 约为 3keV<sup>[5]</sup>；(2) 到 1993 年为止，除  $^{26}\text{Al}$  衰变发射的 1.809MeV  $\gamma$  射线和 SN1987A 爆发后半年探测到  $^{56}\text{Co}$  衰变发出的几条  $\gamma$  射线外，空间探测器迄今尚未探测到其他放射性核素发出的  $\gamma$  射线。特别是  $^{22}\text{Na}$  和  $^{44}\text{Ti}$ 。前者对于检验新星模型至关重要，我们已在文献 [6] 中详细讨论过。后者 ( $^{44}\text{Ti}$ ) 对于检验超新星模型非常重要。 $^{44}\text{Ti}$  的半衰期是 47.3yr，它通过电子俘获转变为不稳定核素  $^{44}\text{Sc}$ ，伴随着发射 78keV  $\gamma$  射

国家八五攀登计划和国家自然科学基金资助项目

1993 年 9 月 1 日收到，1995 年 2 月 10 日收到修改稿

线, 而  $^{44}\text{Sc}$  半衰期为 3.9h, 它通过  $\beta^+$  衰变和电子俘获过程衰变为稳定的核素  $^{44}\text{Ca}$ , 同时发出 1.157MeV  $\gamma$  射线。也就是说,  $^{44}\text{Ti}$  衰变过程中, 实际上将伴随着几乎等强度的两条  $\gamma$  射线发射。空间观测至今尚未发现上述两条  $\gamma$  射线的任何迹象, 即它们的流量肯定低于探测器的流量阈值以下。

(3) 最近 Compton  $\gamma$  射线天文卫星上的 COMPTEL 探测器观测表明<sup>[7]</sup>: 银心方向和旋臂方向都显著发射 1.809MeV  $\gamma$  射线。这确切显示大质量恒星 (包括 WR 星) 或者 II 型、I<sub>b</sub> 型超新星 (SNII, SNI<sub>b</sub>) 对于星际  $^{26}\text{Al}$  有着重要贡献<sup>[8]</sup>。我们在文献 [4] 中已从当前核物理实验出发, 分析了大质量主序星和 WR 星几乎不可能成为星际  $^{26}\text{Al}$  的重要来源, 因此人们把希望寄托于 SNII+SNI<sub>b</sub> 模型。在本文中评述和扼要介绍作者最近就星际  $^{26}\text{Al}$  来源的关于 SNI<sub>a</sub> 模型的一种新设想。

## 2 超新星爆发过程中 $^{26}\text{Al}$ 的核合成问题

迄今为止, 人们在所有天体模型中,  $^{26}\text{Al}$  主要是通过核反应  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  来合成的。至于摧毁  $^{26}\text{Al}$  的核过程, 在新星 (爆发时峰值温度只有  $(1-4) \times 10^8\text{K}$ ) 和处于平稳核燃烧星体 (例如, 大质量主序星、WR 星、处于 AGB 阶段的红巨星, 它们产生  $^{26}\text{Al}$  的核燃烧区域的温度都在  $1 \times 10^8\text{K}$  以下) 模型中, 由于星体内部自由中子浓度不高, 摧毁新生的  $^{26}\text{Al}$  的主要核过程是  $^{26}\text{Al}$  本身的  $\beta$  衰变和电子俘获过程 (当温度低于  $5 \times 10^7\text{K}$ ) 或核反应  $^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$  (在  $T > 5 \times 10^7\text{K}$  时, 以它为主)。超新星的情形则大为不同。由于超新星的温度很高 ( $10^9\text{K}$  以上), 在爆炸性碳、氮、氧燃烧过程中将发射较多的自由中子。由于中子不带电, 它同原子核之间不存在库仑排斥位势, 因此  $^{26}\text{Al}$  吸收中子的反应将远远快于核反应  $^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$  的速率。因此在超新星中, 摧毁  $^{26}\text{Al}$  的核过程主要是  $^{26}\text{Al}(n, \gamma)^{27}\text{Al}$ 。由于在  $10^9\text{K}$  以上的高温下, 核反应  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  远比较低温度下迅速得多 (指数增长), 因此, 即使中子俘获过程摧毁了相当比例的新合成的  $^{26}\text{Al}$ , 但仍然累积相当数量的  $^{26}\text{Al}$  被超新星抛射到宇宙太空中。

关于同  $^{26}\text{Al}$  核合成有关的详细核物理过程, 以及近年来有关的核物理实验结果及其对合成  $^{26}\text{Al}$  的影响问题, 请参阅文献 [10]。

这里只是强调指出<sup>[10]</sup>: 1987 年以来一系列有关核物理实验的新进展, 对于较低温度下 ( $T \leq 4 \times 10^8\text{K}$ ) 的所有星体模型来说, 有着极其严重的不利影响, 使它们都不大可能成为星际  $^{26}\text{Al}$  的重要天体源泉。但是, 它们对于在  $1 \times 10^9\text{K}$  以上的超新星爆炸性核燃烧来说, 几乎没有什么重要影响。因此, 1986 年前后以及最近超新星爆发过程中有关  $^{26}\text{Al}$  核合成的计算结果, 都无需作出重大修改。

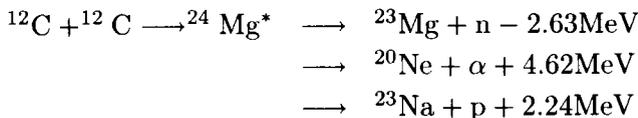
自 1978 年以来, 许多研究者都对超新星爆发过程中的爆炸性核燃烧合成  $^{26}\text{Al}$  的问题进行过详细计算。例如, 1978 年 Truran 和 Cameron<sup>[11]</sup>、Arnett 和 Wefel<sup>[12]</sup> 就分别研究过在峰值温度为  $2 \times 10^9\text{K}$ 、峰值密度为  $10^5\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  条件下 C-O 燃烧壳层绝热膨胀时的核合成问题。后来, Morgan<sup>[13]</sup> 以及 Woosley 和 Weaver<sup>[14]</sup> 在 1980 年都在较高温度 ( $3 \times 10^9\text{K}$ , 对应于爆炸性氮燃烧温度) 下, 利用更加现实的爆炸场合的模

型，分别对此问题进行过计算。他们的结论实际上都一致，核合成有关铝的同位素比率 ( $X_{26}/X_{27}$ )<sub>SN</sub>  $\sim 4 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$ ，其中  $X_{26}$  代表  $^{26}\text{Al}$  的合成丰度， $X_{27}$  代表  $^{27}\text{Al}$  (它是铝的唯一稳定的同位素) 的合成丰度。

表 1

核燃烧阶段	氢燃烧	氦燃烧	碳燃烧	氖燃烧	氧燃烧	硅燃烧	
燃烧峰值温度 ( $T_P$ ) <sub>9</sub>	0.1-0.4 (CNO 循环)	1.0-3.0	1.8-2.3	2.3-3.0	3.1-3.9	4.0-5.0	
峰值密度	1.0E3-1.0E5 g · cm <sup>-3</sup>	1.0E4-1.0E7 g · cm <sup>-3</sup>	1E5	5.5E5	2.2E6	2.0E7	
燃烧时标 (s)	~ 10	0.72	1.4	0.6	0.3	0.1	
爆炸性	$X(^{22}\text{Na})$	$2 \times 10^{-3}$	苛刻条件下 ( $\eta = 1.5E-4$ , $T_9 = 1.0$ , $\rho_P = 1.0E4$ )	1.4E-6 ( $T_9 = 2.2$ , $\rho_P = 1E5$ )	5.8E-7 ( $T_9 = 2.4$ , $\rho_P = 5.5E5$ , $\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}} \sim 0.02$ )	$^{22}\text{Na}$ 与 $^{26}\text{Al}$ 的合成量非常低，可不计及	
	$X(^{26}\text{Al})$	$1 \times 10^{-5}$	$\rho_P = 1.0E4$ $X_{26} \sim 7.0E-4$	1.1E-4 ( $T_9 = 2.2$ , $\rho_P = 1E5$ )	2.1E-4 ( $T_9 = 2.4$ , $\rho_P = 5.5E5$ , $\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}} \sim 0.02$ )		
核燃烧	核合成的主要特征	高温 CNO 循环 - NeNa 循环 - MgAl 链，高温 CNO 循环，主要产物： $^4\text{He}$ , $^{14}\text{O} \rightarrow ^{14}\text{N}$ , $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N}$	PF 非常高 ( $10^3 - 10^4$ ) 的核素： $^{44,43}\text{Ca}$ , $^{45}\text{Sc}$ , $^{46-48}\text{Ti}$ , $^{78}\text{Kr}$ , $^{39}\text{K}$ , $^{51}\text{K} \dots$	1. 各核素间相对丰度对 $\eta$ 值和模型关系很大 2. $\text{PF}(^{46}\text{Ca}) \geq 10^3$ $\text{PF}(^{36}\text{S}) \sim 500$	各主要产物核素的相对丰度接近于太阳值	Si- $^{54}\text{Fe}$ 之间各种核素大量产生， $^{54}\text{Fe}$ 很丰富， $^{28}\text{Si}$ , $^{32}\text{S}$ 丰度最高	重核按核统计平衡分布 $^{54}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ 太高
	有关推断	新星 (高温下爆炸性氢燃烧) 为产生 $^{26}\text{Al}$ 较好的候选者	由于上述稀有元素的超产因子太高，爆炸性 He 燃烧不是 SNIa 的主要核过程	爆炸性 C 燃烧在自然界中几乎不会单独起主要作用	SNI 合成的 $^{26}\text{Al}$ 主要来自爆炸性 Ne 燃烧壳层中	它们不可能成为 $^{26}\text{Al}$ 的主要合成方式	

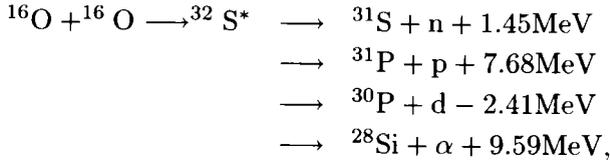
表 1 列出爆炸性核燃烧的主要性质。表中关于  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{26}\text{Al}$  核合成丰度以及爆炸性氖燃烧过程同位素比值 ( $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )，都引自 1986 年 Woosley 的参量化 (核燃烧过程中) 核合成的计算 [15]。表中爆炸性碳、氧核燃烧栏内未列出  $^{26}\text{Al}$  的合成量，是因为这些核燃烧过程合成的  $^{26}\text{Al}$  太少。例如按 Woosley 的计算 [15]，爆炸性碳燃烧过程中， $^{26}\text{Al}$  的丰度最多也不会达到  $1 \times 10^{-10}$ ，远远低于爆炸性氖燃烧过程的合成丰度。其原因大致如下：碳燃烧的基本核反应过程是



其中质子反应道和  $\alpha$  粒子反应道都是放热过程，且它们的概率大致相等。放出中子的出射道是吸热反应，因而在较低温度下其分支比实际为零，随着温度的增加，它的分支比

迅速上升。例如，当  $T_9$  (以  $10^9\text{K}$  为单位的温度) 为 0.8, 1.0, 1.2 和 5.0 时，放出中子的反应分支比分别为 0.011%, 0.11%, 0.40% 和 5.4%。

氧燃烧的基本核反应过程是



在高温下 (此时发射氦核 (d) 的吸热出射道完全打开)，发射中子、质子氦核和  $\alpha$  粒子的各反应道的分支比分别为 5%, 56%, 5% 和 34%。

氦燃烧的基本核反应过程是：



它的主要反应过程不涉及中子的发射。不过，氦燃烧实际上是由高能热  $\gamma$  光子的光致裂变过程引起核素间的重新组合，它将涉及许许多多的轻质量原子核和一系列核反应过程，其中有不少反应放出中子，它们又很快被几乎所有的原子核相竞争地吸收，这些原子核之一才是  ${}^{26}\text{Al}$ 。

从上述各核燃烧反应过程及其分支比来说，氦燃烧，特别是爆炸性氦燃烧过程中，虽然物质中不断出现中子的放出和吸收过程，但它并非主要核过程 (所占比例远远小于  $10^{-4}$ )，所以物质中自由中子的浓度不高 (但也高于平稳核燃烧的恒星内部)，新合成的  ${}^{26}\text{Al}$  被中子俘获过程摧毁的概率不大，因而爆炸性氦燃烧过程可净生成相当多的  ${}^{26}\text{Al}$ ，而被超新星抛向宇宙太空。

与此相反，爆炸性碳、氧燃烧中，由于温度在  $10^9\text{K}$  或更高 ( $(1-3) \times 10^9\text{K}$ ) 以上，核反应过程中大量中子被发射出来，这些自由中子摊分到各个核素原子核的机会就多，因而在高温下虽然可以生成很多的  ${}^{26}\text{Al}$ ，但它们绝大多数都很快地被自由中子的吸收而摧毁 (转化为  ${}^{27}\text{Al}$ ) 了。因此，爆炸性碳、氧燃烧过程几乎不会净生成多少  ${}^{26}\text{Al}$ 。

由于现有  $\text{SNI}_a$  理论模型中，爆炸性碳燃烧是主要的核燃烧过程<sup>[16]</sup>，所以人们认为， $\text{SNI}_a$  不可能对星际  ${}^{26}\text{Al}$  作出任何可观测的贡献。而在  $\text{SNII}$  (以及  $\text{SNI}_b$ ) 的爆发过程中，氦燃烧壳层在高温爆轰 (激) 波作用下，温度上升到  $(2-3) \times 10^9\text{K}$  以上，成为爆炸性氦燃烧，正是它们成为  ${}^{26}\text{Al}$  核合成的主要场所。

此外，它也是抛射物中  ${}^{56}\text{Ni}$  主要的合成场所<sup>[15]</sup>，正是由于这些  ${}^{56}\text{Ni}$ ，通过  ${}^{56}\text{Co}$  衰变为  ${}^{56}\text{Fe}$ ，而衰变过程中释放的能量，成为维持超新星爆发半年以后较缓慢衰退的光变曲线的能源。

尽管如此，在整个 80 年代，除了 Woosley 等少数人仍然“顽固”地坚持  $\text{SNII} + \text{SNI}_b$  可能成为星际  ${}^{26}\text{Al}$  的重要天体来源之外，绝大多数学者都认为超新星不可能成为星际  ${}^{26}\text{Al}$  的重要提供者。理由如下<sup>[17]</sup>：假定银河系内星际介质 (其总质量约为  $4 \times 10^9 M_\odot$ ) 的所有  ${}^{27}\text{Al}$  (其丰度约为  $X_{27} \sim 6 \times 10^{-5}$ ) 都是在银河系诞生 ( $t_G \sim 10^{10}\text{yr}$ ) 以来从超新

星(主要通过爆炸性氦燃烧)产生的, 则在过去的  $\tau_{26} \sim 10^6 \text{yr}$ (放射性核素  $^{26}\text{Al}$  的平均寿命)内通过超新星产生的  $^{26}\text{Al}$  的总量应为

$$\begin{aligned} M_{26} &\sim (X_{26}/X_{27})_{\text{SN}}(\tau_{26}/t_G)X_{27}M_{\text{ISM}} \\ &\sim (2-3) \times 10^{-2} M_{\odot}, \end{aligned}$$

(其中  $M_{\text{ISM}}$  为银河系内星际介质的总质量), 它比空间探测估计的总数量 ( $M_{26} \sim (2-3)M_{\odot}$ ) 要低 100 倍。

Clayton 在 1984 年从另一个角度也否定超新星作为星际  $^{26}\text{Al}$  源泉的可能性<sup>[18]</sup>。他假定, 目前观测到星际介质中所有 ( $3M_{\odot}$ ) 的  $^{26}\text{Al}$  都起源于 (II 型) 超新星, 则这些超新星抛射的  $^{27}\text{Al}$  总量应使星际介质中  $^{27}\text{Al}$  的丰度远高于太阳值的 100 倍, 这当然是观测不能容许的。

因此, 在 80 年代, 人们在研究星际  $^{26}\text{Al}$  问题时, 主要的兴趣转向新星和 WR 星模型的研究, 参看文献 [4]、[6]。但是, 正如我们在文献 [4]、[6] 中已经指出的, 新星模型和 WR 星模型遇到了更加难以克服的矛盾。

Woosley 在后来一系列的研究中, 反复改进他的超新星模型, 加进超新星爆发过程中的中微子诱导核反应, 把  $X_{26}/X_{27}$  的核合成丰度比进一步提高到  $6 \times 10^{-3}$ (他认为中微子诱导核反应产生的  $^{26}\text{Al}$  可达到超新星合成  $^{26}\text{Al}$  总量的 15%—30%)<sup>[19]</sup>, 但他尽量回避 Clayton<sup>[18]</sup> 和 Prantzos<sup>[17]</sup> 提出的严重矛盾, 只是声称:  $^{27}\text{Al}$  的合成量同 Mg(主要是  $^{24}\text{Mg}$ ) 的合成量之比, 同太阳值粗略相近(这两种核素被认为都是通过大质量恒星氦燃烧过程由超新星抛向星际介质的)<sup>[19]</sup>。

自 1992 年年底 Compton  $\gamma$  射线卫星观测结果发表<sup>[7]</sup>之后, 人们不提过去曾提出的上述重大矛盾, 根据观测又重新重视 Woosley 等人坚持的 SNII+SNI<sub>b</sub> 模型(例如, 文献 [8] 的作者就是 Prantzos)。

那末, 除了上面所述的严重矛盾之外, SNII+SNI<sub>b</sub> 模型(产生星际  $^{26}\text{Al}$ ) 究竟有哪些有利因素和不利因素呢? 下一节我们就来分析这个问题。

### 3 星际 $^{26}\text{Al}$ 的 SNII+SNI<sub>b</sub> 模型的有利因素和困难

就目前的理论研究, 对于观测的星际  $^{26}\text{Al}$  的最佳候选者是 SNII+SNI<sub>b</sub> 模型, 其有利因素和困难问题分述如下。

#### 3.1 有利因素

(1) Compton  $\gamma$  射线天文卫星上的 COMPTEL 仪器最近观测表明<sup>[7]</sup>, 在银心方向和旋臂上对于 1.809MeV  $\gamma$  射线有明显的贡献。最近发现银心区域存在着大量由大质量 O、B 星组成的星团<sup>[21]</sup>, 旋臂上也以大质量恒星为主, II 型和 I<sub>b</sub> 型超新星主要集中在旋臂和银心附近。根据上述分析, 大质量主序星难以成为星际  $^{26}\text{Al}$  的主要提供者之一, 因此人们把希望之一寄托于 SNII+SNI<sub>b</sub>。

(2) 现有 SNII 和 SNI<sub>b</sub> 理论模型中, 计算结果表明,  $^{26}\text{Al}$  的产生量随模型各种参量的不同差异也很大<sup>[15]</sup>。但人们已经提出一些模型, 使银河系内 SNII+SNI<sub>b</sub> 全体产生的

$^{26}\text{Al}$  可以达到  $(0.2 \sim 1.4)M_{\odot}$  (其中较大的产量来自  $\text{SNII}_b$ )，接近观测值的一半<sup>[8]</sup>。

(3) 最近，我们小组计算了从  $\text{SNII}+\text{SNII}_b$  产生的星际  $^{26}\text{Al}$  因衰变发射的  $1.809\text{MeV}$   $\gamma$  射线的流量<sup>[20]</sup> 和谱线轮廓<sup>[21]</sup>。观测的谱线轮廓全半宽约为  $3\text{keV}$ ，相应于  $250\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  的多普勒加宽，它难以只用银河系的较差自转速度引起的多普勒加宽效应来解释，在某些文献中人们误用这种效应粗略解释。在谱线轮廓的计算时，我们考虑了银河系的较差自转 (在太阳附近为  $220\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )，恒星的速度弥散度 (对银河系来说，沿银道面径向的速度弥散度分量为沿垂直银道面方向分量的两倍，而且它们都是随径向指数衰减) 以及超新星爆发时物质抛射速度 (初始速度达  $1 \times 10^4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，然后随时间的  $1/4$  次幂而降低，在几万年仍有  $40\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  左右)。计算结果表明：由于上述因素的加宽效应，计算的谱线轮廓可同观测轮廓相比较。特别在谱线轮廓的两翼，它们致宽的主要原因是超新星爆发后不久高速抛射物质中  $^{26}\text{Al}$  发射的  $\gamma$  射线造成的。这表明，从谱线轮廓的角度看，星际  $^{26}\text{Al}$  来源的最佳候选者应该是超新星。

### 3.2 面临的一些困难

(1) 当前  $\text{SNII}+\text{SNII}_b$  的模型中，关于  $^{26}\text{Al}$  的合成量具有相当大的不确定性。不仅如此，即使调整参量， $\text{SNII}+\text{SNII}_b$  最多可以产生  $(0.2 \sim 1.4)M_{\odot}$  的  $^{26}\text{Al}$ ，只有观测值的一半<sup>[8]</sup>。

(2) 按照 1991 年 Woosley 的计算<sup>[19]</sup>，在目前  $\text{SNII}$  模型中，通过  $(2 \sim 5) \times 10^9\text{K}$  高温下原子核统计平衡反应， $^{44}\text{Ti}$  的质量丰度  $X(^{44}\text{Ti}) \sim 10^{-5} \sim 10^{-4}$ 。同时，对  $25M_{\odot}$  的  $\text{SNII}$  来说，在爆炸性氦燃烧过程和中微子诱导核反应中，可以产生  $^{26}\text{Al}$  的量占抛射物质量的百分比为  $X(^{26}\text{Al}) \sim (6 \sim 8) \times 10^{-5}$ ，其中 15% 是由中微子诱导核反应产生的。

在新星模型中，存在着它们合成太多的  $^{22}\text{Na}$  的严重矛盾<sup>[22]</sup>。与此相似，在  $\text{SNII}+\text{SNII}_b$  模型中，也同样存在着对于  $^{44}\text{Ti}$  合成量的限制<sup>[23]</sup>。由于迄今人们还未探测到  $^{44}\text{Ti}$  在衰变序列 (见表 1) 中发射的  $0.078\text{MeV}$  和  $1.157\text{MeV}$   $\gamma$  射线，因此要求  $\text{SNII}$  和  $\text{SNII}_b$  (平均来说) 合成的  $^{44}\text{Ti}$  量的上限应为

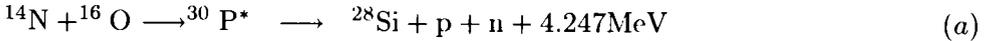
$$\frac{X(^{44}\text{Ti})}{X(^{26}\text{Al})} < 0.4 \left( \frac{dS/d\Omega}{10^{-4}\gamma\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}} \right)$$

其中  $dS/d\Omega$  为  $0.078\text{MeV}$  或  $1.157\text{MeV}$   $\gamma$  射线的观测流量。上式右端括号内因子小于 1 (有可能远小于 1)。显然，迄今 Woosley 计算的有关模型中， $^{44}\text{Ti}$  的合成量仍然太多，不能满足上述不等式。也就是说，虽然  $\text{SNII}+\text{SNII}_b$  是星际  $^{26}\text{Al}$  的最有希望的提供者，但目前的有关理论模型必须进一步修改。在私人通信中，Woosley 多次表示他们正在改进模型，力图大大降低  $^{44}\text{Ti}$  的合成量。

## 4 $^{26}\text{Al}$ 核合成的可能新途径—— $\text{SNII}_a$ <sup>[9]</sup>

Compton  $\gamma$  射线卫星最新的观测显示，星际  $^{26}\text{Al}$  沿银道面附近的分布只是相对地扁平<sup>[7]</sup>，不能完全由  $\text{SNII}+\text{SNII}_b$  来产生。这两类超新星同大质量恒星有关，属于星族 I，分布非常扁平，而且它们最多只能产生观测推断的星际  $^{26}\text{Al}$  的一半<sup>[8]</sup>。这表明，必

定还存在着同旋臂或大质量恒星无关的其他天体来源。从前述有关核物理实验的分析可知，凡是同  $\text{MgAl}$  核反应链有关的过程及其天体来源（除  $\text{SNII}+\text{SNI}_b$  外），几乎都难以对星际  $^{26}\text{Al}$  作出明显的贡献，因此，只能从  $\text{MgAl}$  反应链以外的过程来寻找合成  $^{26}\text{Al}$  的新途径。事实上，1977 年 Switkowski 等人曾从重离子融合反应  $^{14}\text{N} + ^{16}\text{O}$  研究过产生  $^{26}\text{Al}$  的可能性<sup>[24]</sup>。



其分支比为

$$(b) + (c)/(a) \ll 1 \quad \text{且} \quad (c) < (b) \quad \text{对} E_k \sim (6-8)\text{MeV}$$

$$(c)/(b) \geq 1 \quad \text{且} \quad (c)/(a) \longrightarrow (0.1-0.3) \quad \text{对} E_k < 1\text{MeV},$$

其中  $E_k$  为  $^{14}\text{N}$  与  $^{16}\text{O}$  两原子核间相对运动动能，对  $E_k < 1\text{MeV}$  情形的比率  $(c)/(a)$ ，是根据反应截面随  $E_k$  的变化曲线，沿低能方向的趋势外推估计的。这表明，只要（爆发性核燃烧）温度  $T_9 \sim (2-9) \times 10^9\text{K}$ ，上述核反应就可以产生一定数量的  $^{26}\text{Al}$ 。若令  $\eta$  表示反应道 (c) 的分支比，当  $E_k < 1\text{MeV}$  时，可取  $\eta \sim 0.1-0.3$ ，这个反应的优点在于它不涉及  $^{22}\text{Na}$  与  $^{44}\text{Ti}$  合成量过多的问题。但是欲使这种新方式产生较多的  $^{26}\text{Al}$ ，行之有效的条件如下<sup>[25]</sup>：

(1) 要求星体的上述核反应区域内有非常丰富的  $^{16}\text{O}$  和  $^{14}\text{N}$ 。一般来说， $^{16}\text{O}$  是容易存在于许多星体（如白矮星）的内部。但是，对于经历过氦燃烧阶段后的星体内部，由于反应链  $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}^*(3^+)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$  使得  $^{14}\text{N}$  几乎全部转化为  $^{22}\text{Ne}$ 。因此，我们只能乞助于密近双星系统，其中一个子星为致密的白矮星（其内部含有大量的  $^{16}\text{O}$ ），另一光学子星的大气包层（以  $^1\text{H}$  为主，其次为  $^4\text{He}$ ，其中  $^{14}\text{N}$  的丰度若取为太阳值则为  $0.94 \times 10^{-3}$ ）通过 Roche 瓣流向白矮星。正是这种含有较丰富  $^{14}\text{N}$  的吸积流，进入白矮星表层以下（由于吸积物质具有一定的动能，它转化为热能引起表层内外物质对流，使吸积的物质可进入到表层以下某壳层处）。关键的问题在于如何使星体内某层物质能够累积和保存这些从外部吸积流进入的  $^{14}\text{N}$ 。

(2) 为使  $^{14}\text{N}$  不被  $(\alpha, \gamma)$  过程摧毁，以及将来核合成中新生的  $^{26}\text{Al}$  不被  $(\text{p}, \gamma)$  和  $(\text{n}, \gamma)$  过程摧毁，我们必须要求进入的吸积流同物质相互作用（并混合）以后，残留的质子、中子以及  $\alpha$  粒子非常少。实际上，由于吸积流动能的转化而加热该（表层以下）区域物质，使得它的温度可达  $(1.0-2.0) \times 10^8\text{K}$ 。在这种温度下，吸积流中的质子和  $\alpha$  粒子逐渐被白矮星物质（如  $^{16}\text{O}$  等）所吸收，由于吸积流本身原子（例如  $^{14}\text{N}$ ）数目远远低于原基底中  $^{16}\text{O}$  原子数，可以证明，由于吸积流已被该基底物质大大稀释，质子、 $\alpha$  粒子（以及  $^{14}\text{N}$ ）的密度相当低，因而只有很少部分  $^{14}\text{N}$  被吸积流中的  $\text{p}, \alpha$  所摧毁（ $T_8 < 2.0 \times 10^8\text{K}$ ），大多数  $^{14}\text{N}$  会逐渐存储在表层以下某壳层物质中，而  $\text{p}, \alpha$ （以及中子）的密度却非常低。

(3) 为使  $^{14}\text{N}$  不被白矮星内简并电子（其费米能量远远高于  $^{14}\text{N}$  的电子俘获能阈值）所摧毁，我们要求  $^{14}\text{N}$  的储存区域离表层以下不太深（这完全合乎实际），该处密度不太

高 ( $\rho \sim 10^4 - 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 在  $T_8 = 2 \times 10^8 \text{ K}$  的温度下, 原来的电子简并态已消失, 只有少数  $^{14}\text{N}$  可能被热电子所摧毁 ( $^{14}\text{N}(e^-, \nu_e)^{14}\text{C}$ )。

(4) 为了合成 (通过前述反应道 (3)) 较多的  $^{26}\text{Al}$ , 要求星体爆发时, 该区域内的核燃烧温度高达  $(2-3) \times 10^9 \text{ K}$ , 这相应于  $\text{I}_a$  型 ( $\text{SNI}_a$ ) 超新星的情形 (它爆发时初始峰值温度可达  $(7-9) \times 10^9 \text{ K}$ )。

(5) 为使  $^{14}\text{N}$  在高温下不因反应  $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$  (它并不产生  $^{26}\text{Al}$ ) 而过多地消耗, 我们要  $\text{SNI}_a$  的原先吸积的白矮星为  $\text{ONeMg}$  (大质量) 白矮星。

通过上述推论, 我们设想银河系内 (起爆于  $\text{ONeMg}$  白矮星的)  $\text{SNI}_a$  通过反应  $^{14}\text{N} + ^{16}\text{O}$ , 可能成为星际  $^{26}\text{Al}$  的重要天体来源之一 [23], 它同大质量恒星、旋臂以及恒星形成区都无直接关系。我们已对  $^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$  这三种核素原子核相互之间的融合核反应率进行了研究 [25]。根据这个反应率, 经过初步估算 [23] (其中  $\text{SNI}_a$  爆发频率取为每 200 年一次), 若核反应温度取为  $3.0 \times 10^9 \text{ K}$ , 则银河系内所有这种  $\text{SNI}_a$  可能提供  $(1.0-1.2)M_\odot$  的  $^{26}\text{Al}$ 。这里必须指出, 这并不能正式称为一种“模型”, 因为还未通过全面细致的核合成计算以及  $\text{SNI}_a$  模型计算, 它是否符合已有的观测资料, 尚属未知。上述看法只能是一种乐观的设想。

## 5 最新进展

到 1995 年为止, 人们从 Compton  $\gamma$  射线天文卫星继续观测的记录数据分析中, 获得如下进一步的信息。

(1) 人们从  $\text{I}_a$  型超新星遗迹 Cas A 方向上首次探测到  $^{44}\text{Ti}$  衰变放射出的  $1.16 \text{ MeV}$   $\gamma$  射线 ( $4\sigma$  水平) [25]。Compton  $\gamma$  射线天文卫星上的 COMPTEL  $\gamma$  望远镜的灵敏度约为  $10^{-5}$  光子  $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) COMPTEL  $\gamma$  望远镜就  $1.8 \text{ MeV}$   $\gamma$  射线对银道面附近扫描观测, 获得  $1.8 \text{ MeV}$   $\gamma$  射线源的天空成像图, 其特征如下 [26, 28]:

(i)  $^{26}\text{Al}$  源的分布集中在银道面附近 (但分布在银纬  $\pm 10^\circ$  内), 但对于银心并不对称。

(ii)  $1.8 \text{ MeV}$   $\gamma$  射线源的星空图是不规则的, 具有一些成团的结构。在银心附近,  $l = 32^\circ$ , Cygnus, Vela ( $l = 263^\circ$ ), Carina ( $l = 280^\circ$ ),  $l = 310^\circ$  以及  $l = 345^\circ$  区域, 可看见一些  $1.8 \text{ MeV}$   $\gamma$  热斑。但现有的资料分析可能过分地强调了  $\gamma$  源的成团性。

(iii) 在银心附近的  $\gamma$  热斑是最明亮的, 但它偏离银心, 在东南方向  $l \sim 2^\circ, b \sim -2^\circ$  位置上。

为了探明银河系内  $^{26}\text{Al}$  的天体源分布同超新星遗迹分布以及恒星形成区的相关性, 文献 [26] 利用  $5 \text{ GHz}$  射电连续巡天观测和  $115 \text{ GHz}$  CO 的分子谱 (发射) 线巡天观测结果作了对比后发现:  $\gamma$  源分布与这两种射电源分布 (前者反应超新星遗迹分布, 它们是明亮的同步辐射射电源, 后者反应大质量恒星的形成区分布) 大致相似, 凡是这两种射电发射源较强之处, 基本上  $1.8 \text{ MeV}$   $\gamma$  射线也出现热斑。但是, 反过来则不对。此外, 超新星遗迹 ( $5 \text{ GHz}$  源) 的银纬方向分布要比  $1.8 \text{ MeV}$   $\gamma$  源狭窄得多。CO 分子云分布也比  $\gamma$  源

沿银纬分布狭窄。文献 [26] 认为这可能是超新星爆发后， $^{26}\text{Al}$  原子向高银纬方向扩散的结果。但这种论断是有疑问的，因为超新星抛射物质速度开始时虽然高达  $5000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  以上，但至少在三十年以后它降到几百公里以下，并以  $t^{-1/4}$  规律继续降低，在以后超新星遗迹膨胀时，速度一般只有  $30\text{--}50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在  $10^6$  年内最远不会超过  $50 \text{ pc}$ 。因此，在银道面附近超新星爆发时抛射的  $^{26}\text{Al}$  物质不可能到达银纬  $2^\circ$  以上。由此可以推论：必然存在着除 SNII 和 SNI<sub>b</sub> 以外的  $^{26}\text{Al}$  的天体来源。

(iv) 在 Vela 区域出现的  $1.8 \text{ MeV}$   $\gamma$  源强热斑。这个天区包含两个可能的  $^{26}\text{Al}$  天体源：Vela 超新星 (SNII) 遗迹和 WRII。分析结果表明 WR 星源的可能性不大，Vela 超新星遗迹可能性最大 [27]。这同本文作者在文献 [4,9,10,16] 中从核物理实验分析的结论是一致的。

### 参 考 文 献

- [1] Urey W C. Proc. Nat. Acad. Sci., 1955, 41: 127
- [2] Lee T et al. Ap. J., 1977, 221: L107
- [3] Zinner E et al. Nature, 1991, 349: 51
- [4] 彭秋和. 天文学进展, 1994, 12: 278
- [5] Mahoney W A et al. Ap. J., 1984, 286: 578
- [6] 彭秋和. 天文学进展, 1995, 13:
- [7] Diehl R. Astron. Astrophys. Suppl., 1993, 97(1): 181
- [8] Prantzos N. Astron. Astrophys. Suppl., 1993, 97(5): 119
- [9] 彭秋和. In: Borner G, Buchert T eds. Proceedings 4th MPG-CAS workshop on high energy astrophysics and cosmology, 第四届马普 - 中科院高能天体物理和宇宙学讨论会, Ringberg-Castle, Tegernsee, F. R. G. 1993, Garching, FRG: Max-Planck-Institut für Astrophys., 1993: 74
- [10] 彭秋和. 物理学进展, 1995, (1): 79
- [11] Truran J W, Cameron A G W. Ap. J., 1978, 219: 236
- [12] Arnett D W, Wefel J P. Ap. J., 1978, 224: L129
- [13] Morgan J A. Ap. J., 1980, 238: 674
- [14] Woosley S E, Weaver T A. Ap. J., 1980, 238: 1017
- [15] Woosley S E. In: Hauck B, Maedet A, Meynet G eds. Nucleosynthesis and chemical evolution, 16th Advanced course Swiss Society of Astrophysics and Astronomy, Saas-Fee, 1986, Geneva Observatory, Switzerland: CH-1290 Saunerny-Versoix, 1986: 1
- [16] 彭秋和. Chinese Phys., Lett., 1994: 480
- [17] Prantzos N. In: Vanginoni-Flam E et al eds., Advances in nuclear astrophysics. Proceedings of the second IAP workshop, France, 1986, [s.l.]: [s.n.], 1986: 321
- [18] Clayton D D. Ap. J., 1984, 280: 144
- [19] Woosley S E, Weaver T A. In: Audouze J et al eds. Supernovae, Les Houches Session LVII, Course X, 1990, [s.l.]: Elsevier Science Publishes B V, 1991: 1
- [20] 彭秋和, 初一, 谢敬东等. 中国科学, A 辑, 1993, 23: 403
- [21] 彭秋和, 初一, 谢敬东. 1995, 正在成文中
- [22] 初一, 彭秋和, 谢敬东. 天文学报, 1993, 34: 341
- [23] Ramaty R, Lingerfield R E. Ap. J., 1977, 213: L5  
Starafeld S et al. Phys. Rep., 1993, 227: 223
- [24] Switkowski Z E et al. Nucl. Phys., 1977, A279: 507

- [25] Iyudin A F *et al.* In: Fichtel C E *et al* eds., The second Compton symposium, 1994, New York: AIP, 1994: 156
- [26] Chen Wan(陈 莞)*et al.* Ap. J., 1995(付印之中)
- [27] Oberlack U *et al.* Ap. J., Suppl., 1994, 92: 433
- [28] Diehl R *et al.* In: Fichtel C E *et al* eds. The second Compton symposium, 1994, New York: AIP 1994: 156

(责任编辑 刘金铭)

## The Origin of the Interstellar $^{26}\text{Al}$ (III): The Role of Supernovae

Peng Qiuhe

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

### Abstract

Nucleosynthesis of  $^{26}\text{Al}$  in explosive nuclear burning of supernovae is discussed. The favourable factors and some difficulties of models of SNII+SNI<sub>b</sub> responsible to the origin of the interstellar  $^{26}\text{Al}$  are also reviewed. A new way to the synthesis of the interstellar  $^{26}\text{Al}$  and a proposal concerning the origin of the fraction of the interstellar  $^{26}\text{Al}$  in SNI<sub>a</sub> are suggested in this paper.

**Key words** supernovae: general—nucleosynthesis—interstellar medium: atoms