

# 新星在星际 $^{26}\text{Al}$ 问题中的作用： 星际 $^{26}\text{Al}$ 的天体源泉问题之二

彭秋和

(南京大学天文系 南京 210093)

## 摘 要

介绍和评述了有关星际  $^{26}\text{Al}$  问题的各种新星模型计算结果, 阐述了我们对于这一问题的研究和看法, 指出了现今各种新星模型在星际  $^{26}\text{Al}$  问题上存在的严重困难。

**关键词** 超新星: 一般 — 核合成 — 星际物质: 原子

## 1 引 言

80年代中期, 根据空间探测器探测  $1.809\text{MeV}$   $\gamma$  射线的结果<sup>[1]</sup>, 人们断定在银河系星际空间中存在着大量 ( $2\text{--}3M_{\odot}$ ) 的放射性核素  $^{26}\text{Al}$ , 由于  $^{26}\text{Al}$  的半衰期约为  $7.2 \times 10^5\text{yr}$ , 肯定无疑地推论出它们是在较近的年代内从某些恒星内部或新星、超新星爆发事件中由热核反应过程产生, 并被抛射到宇宙太空中来的。因此, 对于宇宙  $1.809\text{MeV}$   $\gamma$  射线辐射的性质及其星际  $^{26}\text{Al}$  的天体起源问题的探讨, 可以促进或检验现代恒星演化、新星和超新星理论模型的研究。正是这一原因, 很快在天体物理学界和核物理学界围绕  $^{26}\text{Al}$  的核合成和天体来源问题掀起了一阵巨大的研究浪潮, 成为80年代核天体物理学最热门的课题之一。使得全世界科学家感到迷惑的是: 利用最近有关核物理实验的数据, 人们迄今建立的所有有关天体 (包括新星与超新星) 模型, 几乎全部无法解决星际  $^{26}\text{Al}$  问题。它使天体物理学家几乎束手无策, 成为当今核天体物理学的一个重大疑难问题。

关于空间  $\gamma$  射线的探测情况和结果, 我们已在文献 [2] 作了较详细的列表介绍 (见文献 [2] 表 2), 这里不再复述, 只是强调如下观测事实: (1) 观测到的  $1.809\text{MeV}$   $\gamma$  射线是由  $^{26}\text{Al}$  衰变过程:  $^{26}\text{Al}^g$  (通过  $\beta^+$  衰变或电子俘获过程)  $\rightarrow$   $^{26}\text{Mg}^*$  (原子核激发态)  $\rightarrow$   $^{26}\text{Mg}$ , 即  $^{26}\text{Mg}$  的核激发态退激发时通过电磁 ( $\gamma$ ) 跃迁回复到基态过程时发射的。它的流量约为  $4.8 \times 10^{-4} \gamma\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{str}^{-1}$  (国际上的采用值),  $\gamma$  射线的全半宽 (FWHM)

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

约为 3keV；(2) 除 SN1987A 爆发后半年探测到  $^{56}\text{CO}$  衰变放出的  $\gamma$  射线外迄今空间观测尚未探测到其他放射性核素 (特别是  $^{22}\text{Na}$  与  $^{44}\text{Ti}$ ) 放出的  $\gamma$  射线。例如, 人们曾期望空间观测能够同时探测到  $^{22}\text{Na}$  放射的 1.275MeV  $\gamma$  射线<sup>[3]</sup>。这是由于 1972 年人们已发现在奥盖尔陨石中  $^{22}\text{Ne}$  同位素丰度特别高<sup>[4]</sup>:  $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne} \geq 0.67$  (地球平均值为 0.10), 人们认为这些过多的  $^{22}\text{Ne}$ , 是在太阳系形成年代, 它附近的新星爆发抛射出刚合成不久的  $^{22}\text{Na}$  (其半衰期为 2.6yr), 凝结于某些尘埃微粒, 并结合在陨石中衰变形成的<sup>[3,5]</sup>。但是, 空间探测的观测数据分析表明, 这条 1.275MeV  $\gamma$  射线的流量仅仅恰在流量观测阈值的上限附近 ( $1\sigma$  水平), 人们认为它的流量至少低于  $1.0 \times 10^{-4} \gamma \text{cm}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{str}^{-1}$ , 或认为尚未探测到; (3) 最近, Compton  $\gamma$  射线天文卫星上的 COMPTEL 探测器观测资料初步分析表明: 星际  $^{26}\text{Al}$  的空间分布在银河系内是弥散的, 相对扁平, 在银心和船底座旋臂两个方向上显著发射 1.809MeV  $\gamma$  射线。这表明: 同大质量恒星或 SNII、SNI<sub>b</sub> 有关的天体 (它们属于星族 I, 分布非常扁平), 对于星际  $^{26}\text{Al}$  有非常重要的贡献, 但目前的理论还难以符合观测要求。但同时, 除分布非常扁平的星族 I 天体外, 必定还存在着产生星际  $^{26}\text{Al}$  的其他天体源泉, 它们同旋臂无关, 80 年代被人们研究最为广泛的新星就属于这类天体。

在文献 [2] 中我们已详细分析了现有所有平稳核燃烧星体模型 (大质量主序星、WR 星、AGB 红巨星) 都难以产生可供观测的星际  $^{26}\text{Al}$  量。在本文中则较详细介绍新星模型及其在星际  $^{26}\text{Al}$  问题上面临的困难。

需要强调的是, 在有关恒星演化、新星和超新星的爆发, 以及恒星内部或爆发时元素 (特别是  $^{26}\text{Al}$ 、 $^{22}\text{Na}$  以及其他放射性核素) 的核合成问题的研究中, 核物理实验和理论分析起着至关重要的作用。迄今核物理方面的困难和不确定性, 造成了天体物理学研究极大的困难和不确定性。例如, 通常人们所说的恒星内部高温下的热核反应, 实际上对应核物理学中的低能核反应。例如, 一般主序星内部核反应 (氢燃烧) 温度在  $(1-3) \times 10^7 \text{K}$ , 热运动能为 1—3keV。即使在超新星爆发时的核燃烧中, 温度最高也不过  $5 \times 10^9 \text{K}$ , 即 0.5MeV。目前实验核物理学仍然难以直接进行如此低能的核反应截面测定工作。因而, 迄今天体物理上所采用的核反应率数值, 几乎全部都是从高能 (或中高能) 核物理实验测出的数据外推到低能范围而获得的, 当然非常不可靠。事实上, 近年来核物理学不断采用新的实验技术、设备与方法, 正在向较低能区推进, 重新测定了一系列核反应截面, 其结果往往同过去的外推值相差几倍, 甚至可能相差几个量级。这往往激起天体物理研究的巨大变化 (例如,  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  反应截面比过去估计值可能大 3—5 倍), 这就使得质量大于  $20-25M_{\odot}$  的恒星晚期演化研究几乎完全改写。

## 2 (经典) 新星简述

(经典) 新星是一种不常见的恒星 (规模较大的) 爆发现象。爆发时其光学亮度在几天之内可急剧地增亮 10mag 以上, 极大光度可达  $10^5 L_{\odot}$  (超过  $10^{38} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ )。光极大后亮度虽按指数衰减, 但衰减时标可达几百天。爆发时发射的总辐射能可达  $10^{45} \text{erg}$ , 物质

抛射速度达几百  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$  (最高可达  $3000\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )。根据抛射物的化学成分, 可将新星分为三类: (1) 成分与太阳相近的新星; (2) CNO 含量很高的 CNO 新星以及 O、Ne 丰度很高但 Mg 丰度很低的新星; (3) ONeMg 新星, 它约占新星总数的 30%。 (1) 类新星爆发时抛射物质质量约为  $10^{-7} - 10^{-6} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ ; (2) 类新星则为  $10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。 ONeMg 新星抛射物质至多不超过 (2) 类新星。不同的新星抛射物化学成分见表 1。可以看出, 有的新星较重元素的丰度可达 10%—30% 或更多。

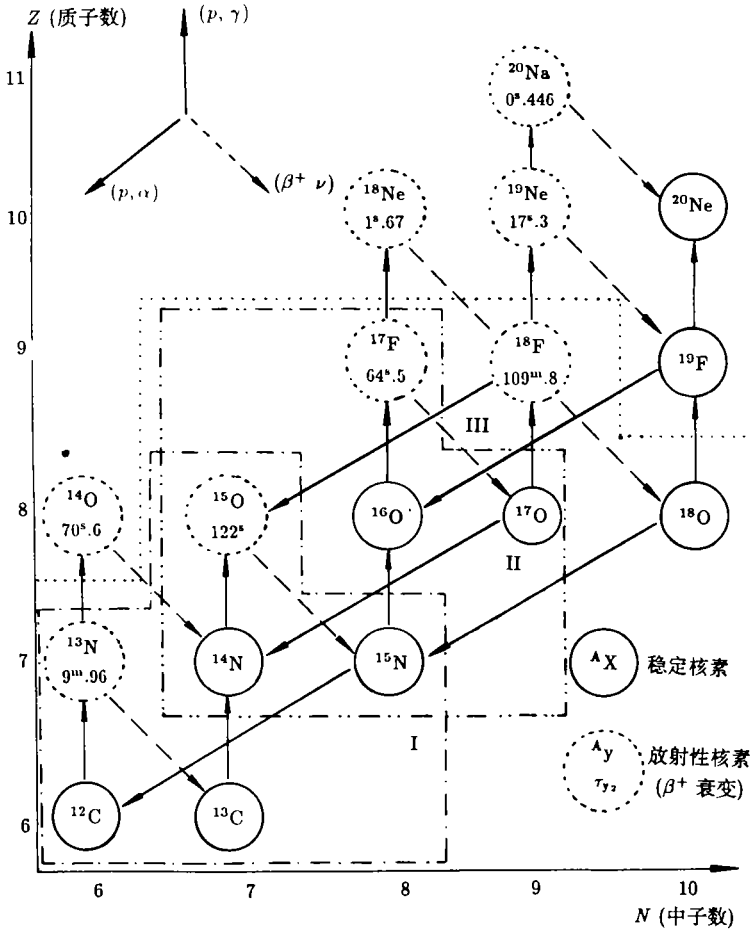


图 1 高温下 CNO 循环的氢燃烧  
 由 —— 围成的区域 CN 子循环; 由 - - - 围成的区域为 ON 子循环;  
 由 ··· 线界定下方区域为低温 CNO 循环

直到 70 年代末, 人们才接受如下的新星爆发图像 [7]: 经典新星出现于某些含有白矮星的密近双星系统, 其中的白矮星长期吸积另一光学主星 (一般为正常恒星) 包层大气中的物质 (以氢为主)。被吸积的物质因白矮星表面强大的引力压缩而形成密度、温度都相当高的表面层。如果白矮星的吸积率较低,  $\dot{M}_H \leq 10^{-9} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 则大约经过  $10^5 - 10^6 \text{yr}$  的不太长时间, 白矮星表面吸积累积的质量超过某一临界值, 其温度和密度

就会升高到出现爆炸性氢燃烧，使得整个吸积表层向外爆发，这就是(经典)新星爆发。

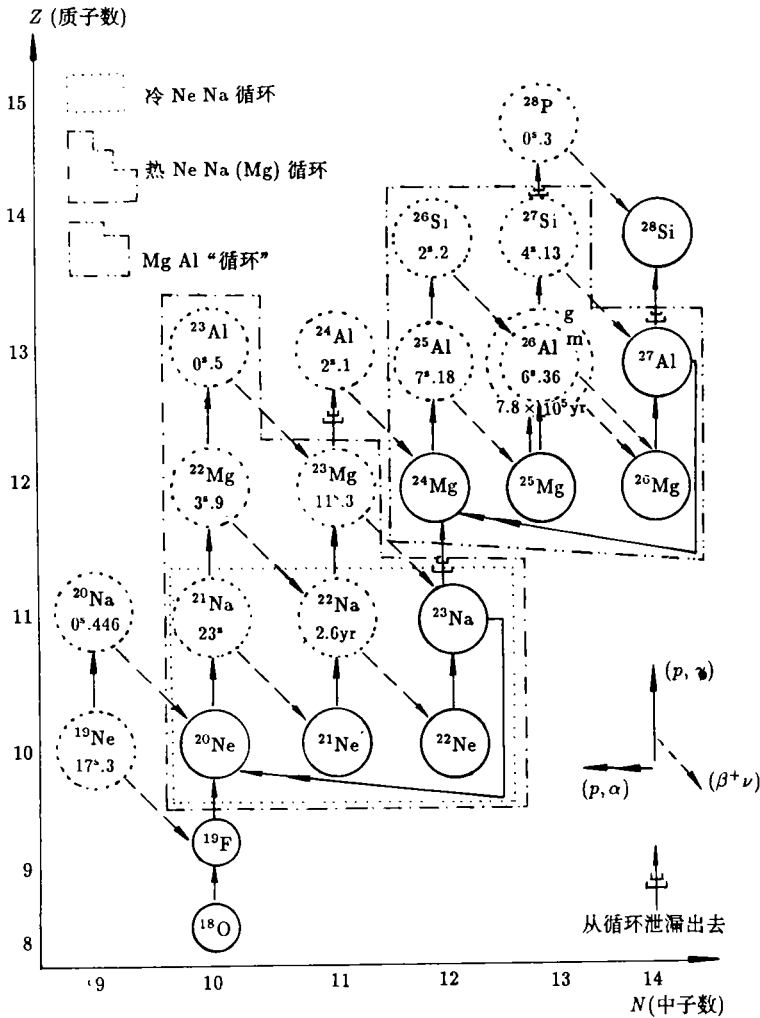


图 2 NeNa(Mg) 循环和 MgAl “循环”。点圆内的核素为  $\beta^+$  不稳定的，图中标明了它们的半衰期<sup>[13]</sup>

核素符号与半衰期的图示说明与图 1 相同。图中  $^{26}\text{Al}^g$  表示  $^{26}\text{Al}$  原子核的基态，而  $^{26}\text{Al}^m$  是其寿命相当长(6.36s)的第一激发态，或称同质异能素，它直接通过  $\beta^+$  衰变为  $^{26}\text{Mg}$  而不伴随  $\gamma$  射线的发射

关于新星爆发的具体过程以及现有各种模型的特点和存在的问题，我们将另文评述。这里只说明如下几点：

- (1) 通常的新星模型中，爆发时核燃烧的峰值温度都取为  $(1-4) \times 10^8\text{K}$ 。
- (2) 新星表层爆炸性氢燃烧的具体核反应过程为高温 CNO 循环<sup>[8]</sup>(参见图 1)，参与反应的  $^{12}\text{C}$  和  $^{16}\text{O}$  被认为是通过对流从白矮星内挖掘出来的<sup>[8]</sup>。
- (3) 在爆发过程中，通过高温 CNO 循环，不仅大量消耗  $^1\text{H}$ ，使其含量明显下降，而

且 CNO 各核素在爆炸性核燃烧后绝大多数都转换成  $^{14}\text{N}$  和  $^{15}\text{N}$ , 但它们以及整个 CNO 核素逐渐经过质子俘获 ( $p, \gamma$ ) 过程而缓慢地向  $^{20}\text{Ne}$  转化, 核素流入与它衔接的 NeNa 循环和 MgAl 反应链<sup>[13]</sup>(参见图 2), 逐渐合成较重的核素与  $^{22}\text{Na}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 。

(4) 前述三类新星的爆发图像基本相同, 其区别在于质量与初始化学成分不同。观测发现密近双星中大质量白矮星都是 ONeMg 白矮星。而 C·O 白矮星质量似乎都比较小。在爆发时, 前者峰值温度较高, 爆发迅速; 而后者相反<sup>[6]</sup>。

### 3 新星对星际 $^{26}\text{Al}$ 的贡献

关于星体内较轻的核素如何通过 NeNa 循环和 MgAl 核反应链合成  $^{22}\text{Na}$  与  $^{26}\text{Al}$  的核物理问题, 以及新近核物理实验对星际  $^{26}\text{Al}$  问题研究的重要作用, 请参阅本文作者另外三篇文章<sup>[19,20,21]</sup>。下面, 我们仅就新星能否成为星际  $^{26}\text{Al}$  的重要来源的研究进行介绍和评述。

新星能够产生并抛射非常丰富的  $^{26}\text{Al}$ , 最早是由 Clayton 和 Hoyle(1976 年) 预言的<sup>[3]</sup>。80 年代初, 利用文献 [7] 中 C·O 新星模型, Arnould 等人<sup>[9]</sup>、Hillebrandt 和 Thielemann<sup>[10]</sup> 详细计算了有关  $^{26}\text{Al}$  的核合成, 发现核反应产物的同位素比率  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim (0.1-1)$ 。Wallance 和 Woosley<sup>[11]</sup> 一方面采用  $^{21}\text{Na}(p, \gamma)$  和  $^{22}\text{Na}(p, \gamma)$  改进的核反应率(它们使 NeNa 循环加快, 流入 MgAl 反应链的核素流增强), 另一方面考虑对流因素以降低从 MgAl 反应链流出的核素流, 他们发现新星爆发产生的比率  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  将增加到 1—5, 正是由于这些计算促使人们将星际  $^{26}\text{Al}$  的主要天体来源寄托于新星模型。

1986 年 Wiesher 等人<sup>[12]</sup> 重新改进了有关的不稳定原子核参与 ( $p, \gamma$ ) 过程的反应率。例如,  $^{27}\text{Si}(p, \gamma)^{28}\text{P}$  的核反应率比原来值增加了几个数量级。虽然当时还认为 MgAl 链基本上“循环”, 但上述结果也使  $^{26}\text{Al}$  的最后生成量显著地低于过去的估计值(过去估计值:  $X(^{26}\text{Al}) \sim 10^{-4}$  的几倍, 其中  $X$  表示核合成丰度)。他们发现: 在较冷和较热的新星抛射物中,  $X(^{26}\text{Al})$  分别为  $7 \times 10^{-5}$  和  $2 \times 10^{-5}$ , 最佳平均值为  $5 \times 10^{-5}$ 。新星每次抛射物质量 ( $M$ ) 的上限为  $10^{-4} M_{\odot}$ , 银河系新星爆发频率 ( $q$ ) 估计为  $40\text{yr}^{-1}$ , 则在星际  $^{26}\text{Al}$  的平均存留寿命 ( $\tau_{26} \sim 10^6\text{yr}$ ) 内, 银河系内所有新星抛射的  $^{26}\text{Al}$  总质量为:

$$M(^{26}\text{Al}) \sim X(^{26}\text{Al}) \cdot \Delta M \cdot q \cdot \tau_{26} < 0.2 M_{\odot},$$

这比空间观测的推断值要低一个数量级。

由于新星抛射物中  $X(^{26}\text{Al})$  正比于它的初始金属丰度<sup>[13]</sup>, 近年来人们更多地研究占新星总数 1/4 的 ONeMg 白矮星的新星模型。1986 年 Starrfield 等人计算表明<sup>[14]</sup>, 这类新星每次抛射物的质量远低于“标准值” ( $5 \times 10^{-5} M_{\odot}$ )。

1986 年 Woosley 首次公布在各个平稳核燃烧阶段以及爆炸性核燃烧过程中核合成的详细计算结果<sup>[8]</sup>。根据他建立的 ONeMg 白矮星新星模型计算的结果<sup>[8]</sup>,  $^{22}\text{Na}$  与  $^{26}\text{Al}$  核合成的丰度分别为  $X(^{22}\text{Na}) = 2 \times 10^{-3}$  和  $X(^{26}\text{Al}) = 1 \times 10^{-5}$ 。根据文献 [7] 中建立的 C·O 白矮星的新星模型, 调节有关各种物理参量(初始化学成分、峰值温度、是否考虑对流或不同的对流时标, H 燃烧区的内层厚度等等), Woosley 公布了有关核合成

的详细计算结果 [8]。它表明：不同的新星爆发模型核合成结果大不相同，不同物理因素（特别是对流）对核合成计算的影响也非常复杂，不同模型（或参量）下，许多核素的最后合成丰度可能相差几个数量级。例如，在某个特殊的模型（其对流时标为 100s, H 燃烧区分为内、外质量相等的两层，核燃烧时标为 260s）中，<sup>26</sup>Al 的丰度最高可达  $3.6 \times 10^{-3}$ 。

表 1 一些重要因素对新星抛射物中 <sup>22</sup>Na 和 <sup>26</sup>Al 丰度的影响 [15]

(a) 核反应率的影响

		$X(^{22}\text{Na})$	$X(^{26}\text{Al})$	模型与计算说明
核反应率取值				初始化学成分：
1988 年		4.6E-7	3.3E-5	$X_0(^{12}\text{C}) = 0.45$ $X_0(^{16}\text{O}) = 7.2 \times 10^{-3}$
1990 年	高值	3.2E-6	1.2E-5	新星爆发： $T_p = 1.46 \times 10^8 \text{K}$ $\rho_p = 2.4 \times 10^3 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
	低值	2.2E-5	1.1E-5	
(1990)/(1988)		(7 - 50)	$\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$	

(b) 初始化学成分的影响

$X_0(\text{ONeMg})$			新星爆发动力学
$7.18 \times 10^{-4}$ (太阳值)	5.1E-5	1.1E-5	参量同前
0.25	3.3E-3	1.1E-3	按新的核反应率
后者 / 前者	65	100	计算

(c) 爆发峰值温度的影响

	$X(^{22}\text{Na})$	$X(^{26}\text{Al})$	模型与计算说明
峰值温度 ( $T_p$ )			$X_0(\text{ONeMg}) = 0.25$ $\rho_p = 10^4 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
2.5E8	6.5E-4	9.7E-5	按新核反应率
1.5E8	3.3E-3	1.2E-3	
后者 / 前者	5	12	计算

(d) 对流因素的影响

核反应率	$n$	$p$			$n:\text{H}$ 燃烧壳层分层数	
旧	1	1	4.0E-7	1.6E-6		
值	2	0.5	1.0E-5	5.5E-6	$T_p^{(\text{内})} : 2.52 \times 10^8 \text{K}$ $\rho_p^{(\text{内})} : 1.4 \times 10^4 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\tau_{\text{对流}}$ 300s
	后者 / 前者		25	4		
旧	2	0.1	1.2E-5	1.2E-4	$T_p^{(\text{外})} = \frac{1}{2} T_p^{(\text{内})}$	$\tau_{\text{对流}}$ 1000s
值					$\rho_p^{(\text{外})} = \frac{1}{8} \rho_p^{(\text{内})}$	
新值	2	0.1	2.4E-5	1.6E-6	$X_0(^{12}\text{C})$ $= X_0(^{16}\text{O})$	
	后者 / 前者		2	$\frac{1}{75}$	$= 0.04$	

所有的计算结果都非常敏感于新星爆发模型所采用的物理参量, 使得问题变得非常复杂和困难。理论研究的主要困难来自对流问题 (对流时标同核燃烧时标同量级), 质量损失以及从白矮星基底“挖掘”重元素物质的机制等问题的处理。

表 1 中我们简要列出近两年人们对于一些重要因素对新星抛射物中  $^{22}\text{Na}$  和  $^{26}\text{Al}$  丰度影响的计算研究结果与比较。

表 1 显示了有关因素对  $^{22}\text{Na}$  和  $^{26}\text{Al}$  生成量都几乎有数量级的巨大影响。例如, 依据 1990 年实验 [16,17] 给出的核反应率进行计算, 发现新星抛射物中  $^{26}\text{Al}$  的丰度比依据 1988 年数据要低 (2—3) 倍, 而  $^{22}\text{Na}$  却比过去估算值高得多, 这显然不利于星际  $^{26}\text{Al}$  问题的解决。

从表 1 看出, 如果新星爆发时 H 燃烧壳层的初始金属丰度非常高 (例如,  $X_0(\text{ONeMg}) = 0.25$ ), 则  $^{26}\text{Al}$  的合成量可以大幅度地提高 (例如 100 倍), 这同文献 [13] 的结论 ( $X(^{26}\text{Al})$  正比于初始金属丰度) 是一致的。这似乎更加促使人们对于新星模型的兴趣。但是, 人们尚未找到一种完全自洽而且合理的“挖掘”机制 (它使重元素从白矮星内部大量流向表面) 来实现核燃烧区如此高的初始金属丰度 (而观测的新星抛射物的高金属含量被认为是在爆炸过程中从白矮星底层挖掘出来的)。这是目前理论研究中的巨大困难。

在所有新星模型中, 引起爆发的失控热核反应发生在白矮星表面吸积层的底层处, 物质处于电子弱简并状态, 压强基本上都相同。因此, 燃烧区的物质密度在  $^{26}\text{Al}$  核合成问题中并非是重要参数。1990 年 Nofar 等人指出 [13], 爆发中  $^{26}\text{Al}$  的合成量对于爆发的峰值温度 ( $T_p$ ) 和爆发时标 ( $\tau_{\text{ex}}$ , 它定义为当热核反应开始失控, 温度从  $1.8 \times 10^8 \text{K}$  上升到  $T_p$  的增温时标) 这两个参量非常敏感。从表 1 可以看出, 较冷的新星 ( $T_p = 1.5 \times 10^8 \text{K}$ ) 比较热的新星 ( $T_p = 2.5 \times 10^8 \text{K}$ ) 产生更多的  $^{26}\text{Al}$ 。这是由于在高温下刚合成的  $^{26}\text{Al}$  很快就会被反应  $^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$  所摧毁,  $T_p \geq 2.7 \times 10^8 \text{K}$  的新星爆发时几乎不抛射  $^{26}\text{Al}$  [13]。反之, 如果  $T_p$  太低, 则合成的  $^{26}\text{Al}$  太少。Nofar 等人发现 [13]: 新星模型合成  $^{26}\text{Al}$  的最佳条件是  $T_p \sim 1.7 \times 10^8 \text{K}$  和  $\tau_{\text{ex}} \simeq 100\text{s}$ 。

由于问题的计算复杂性, 人们在研究对流的影响时, 往往采用非常简单的模型: 把 H 燃烧区分为内外两层 (表 1 中  $n = 2$ ), 其中内燃烧壳层 (按质量计算) 的厚度  $p$  是指它占整个 H 燃烧壳层的比例, 则外燃烧壳层的厚度为  $(1-p)$ 。两个燃烧壳层之间通过物质对流来耦合, 对流时标记为  $\tau_{\text{对流}}$ 。为了比较, 表 1 中列出了无对流 ( $n = 1, p = 1$ ) 的计算结果。表 1 再次显示了在某一特定对流模型 ( $p = 0.1, \tau_{\text{对流}} = 1000\text{s}$ ) 中新旧核反应率的影响, 其中  $^{26}\text{Al}$  下降 75 倍是由于  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应率下降和  $^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$  反应率增加的结果。

按照文献 [13] 的计算 (当时尚不知道 [16],[17] 有关  $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$  和  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  核反应率的新实验), Nofar 等人对于银河系内三类新星可能合成的  $^{26}\text{Al}$  总量作了如下的估算 [13]: (1) 如果所有新星都是 (1) 类 (即具有太阳丰度), 则它们全体只能合成  $10^{-3}M_{\odot}$  的  $^{26}\text{Al}$ ; (2) 如果新星的一半是 (2) 类中 O、Ne 含量很高而 Mg 含量很低的新星, 则它们全体可以抛射的  $^{26}\text{Al}$  总共只有  $0.1M_{\odot}$ ; (3) 如果 30% 的新星是 O、Ne、Mg 都很丰富的 ((3) 类), 则它们全体可以产生  $5M_{\odot}$  的  $^{26}\text{Al}$ 。虽然, 在很好地观测过的 12 个新星 [18] 中有 4 个呈现丰富的 O、Ne、Mg, 但 Mg 的含量并非高达在

文献 [13] 中计算所需要的量。正如文献 [23] 总结了文献 [13] 所得到的结论如下：

(1) 化学成分与太阳相同的新星包层中只能形成非常少的  $^{22}\text{Na}$  和  $^{26}\text{Al}$ 。这表明：慢爆发的 C O 新星不会对银河系内这两种放射性核素有明显贡献。

(2) 虽然 C O 白矮星会产生一些稀有的轻核素，但仅仅增加初始 CNO 丰度，也不会使  $^{22}\text{Na}$  或  $^{26}\text{Al}$  的核合成量明显的增加。

(3) 如果新星包层中从 Ne 到 Al 的初始丰度增高，则  $^{22}\text{Na}$  与  $^{26}\text{Al}$  的产量也大大增加。例如，如果初始时在星体内金属丰度高达  $Z = 0.25$ ，则  $^{22}\text{Na}$  和  $^{26}\text{Al}$  的合成量将比初始丰度为太阳值时的产量高出 1 至 2 个数量级。

(4) 从 ONeMg 白矮星引起的新星可能是银河系内星际  $^{26}\text{Al}$  的重要源泉之一。但由于模型的不确定性，它们产生的  $^{26}\text{Al}$  可能是观测值的 (0.1—1.0) 倍。

(5) 由 ONeMg 白矮星导致的新星抛射物中， $^{22}\text{Na}$  的理论计算丰度非常高，以致于对于那些离我们很近的 ONeMg 新星 (例如 1991 武仙座新星)，可以产生 GRO 能够探测到的由  $^{22}\text{Na}$  衰变放射的 1.275MeV  $\gamma$  射线 [24]。

(6) 计算表明，新星爆发中， $^{22}\text{Na}$  与  $^{26}\text{Al}$  核合成量之间似乎应该存在着逆相关。

(7)  $^{22}\text{Na}$  与  $^{26}\text{Al}$  合成丰度增强的程度，对于新星爆发时温度变化的过程相当敏感。

1991 年 Paulus 和 Forestini 按照 1990 年关于  $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$  和  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应率的物理实验新结果 [16,17] 重新计算，其结论是 [15]：在过去一百万年内，由银河系全部新星发射的  $^{26}\text{Al}$  的总量不超过  $0.5M_{\odot}$  (但可接近这个数值)。这似乎表明新星可能对星际  $^{26}\text{Al}$  作出大约 20% 的贡献。在他们的计算中，新星抛射物中  $^{22}\text{Na}$  的含量明显高于  $^{26}\text{Al}$  的含量 (这几乎是迄今所有较合理的新星模型的共同结论)： $X(^{22}\text{Na}) = 2.4 \times 10^{-5}$ ， $X(^{26}\text{Al}) = 1.6 \times 10^{-6}$ 。虽然如此，他们认为这个结果并不同“卫星空间观测只探测到  $^{26}\text{Al}$  的 1.809MeV  $\gamma$  射线，而未探测到  $^{22}\text{Na}$  的 1.27MeV  $\gamma$  射线”这一观测事实相矛盾。他们的理由是，“就  $^{22}\text{Na}$  而言，它的半衰期很短，妨碍了在星际介质中任何明显的累积效应” [15]。初看来这似乎有一定道理，但从我们的下述分析 [19] 看，他们的简单理由是不对的。事实上，星际空间中某种放射性核素 ( $A_i, Z_i$ ) 衰变放射的  $\gamma$  射线的流量，正比于它衰变的几率 ( $\sim 1/\tau_i, \tau_i$  为特征寿命， $\tau_i = \tau_{1/2}^{(i)}/\ln 2$ ) 和自银河系诞生以来累积的、尚未衰变的该种核素的原子总数目  $N_i$ ，而

$$N_i \sim \Delta M \cdot X_i \int_{t_0}^{\infty} \exp(-t/\tau_i) dt \sim \Delta M \cdot X_i \cdot \tau_i e^{-t_0/\tau_i}.$$

此处  $\Delta M$  是每个新星 (或超新星) 抛射物质的质量， $X_i$  是抛射物中  $i$  种核素的质量丰度。 $t_0$  则是自新星 (或超新星) 爆发时刻到相应  $\gamma$  射线开始透明时刻之间的时间间隔。对新星  $t_0 \sim 0.5-1.0\text{yr}$ ，对超新星  $t_0 \sim 2-3\text{yr}$ 。由上述可知，相应  $\gamma$  射线的流量正比于因子  $X_i e^{-t_0/\tau_i}$ ，它虽然同衰变时标密切相关，但由于  $^{26}\text{Al}$  的衰变寿命  $\tau_i \gg t_0$ ， $^{22}\text{Na}$  的寿命  $\tau_i = 3.75\text{yr}$ ，与  $t_0$  同量级，因而观测流量同  $\tau_i$  之间的关系并非决定性的，主要取决于新星抛射物中相应核素的丰度。更准确地说，我们有下述关系式

$$\frac{X_i}{X(^{26}\text{Al})} \approx \frac{1}{\eta_i} \frac{A_i}{26} e^{t_0/\tau} \frac{(dS/d\Omega)_i}{(dS/d\Omega)_{1.8\text{MeV}}}.$$



其中  $\eta_i$  为核素  $i$  衰变时发射某条  $\gamma$  射线的分支比。  $(dS/d\Omega)_i$  表示在单位立体角内观测到的第  $i$  条  $\gamma$  射线的流量。由此可知, 如果 20% 星际  $^{26}\text{Al}$  来源于银河系新星, 则从现在尚未观测到  $^{22}\text{Na}$  发射的 1.27MeV  $\gamma$  射线这个事实出发, 便可获得对新星模型合成  $^{22}\text{Na}$  量的上限

$$\frac{X(^{22}\text{Na})}{X(^{26}\text{Al})} < 1.0 \left( \frac{dS/d\Omega}{10^{-4}\gamma\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}} \right)_{1.27\text{MeV}}$$

迄今所有较合理的新星模型都无法满足这个条件 (由于空间探测尚未发现 1.27MeV  $\gamma$  射线, 其流量的上限为  $10^{-4}\gamma\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此上式右端括号内的因子小于 1)。因此可以明确得出结论: 就目前所有的新星模型来说, 它们不可能对星际  $^{26}\text{Al}$  作出明显贡献。

最后, 我们简单介绍一下直到 1995 年初所出现的研究进展:

(1) 1993 年 Starrfield 等人计算了质量分别为  $1.0M_{\odot}$ ,  $1.25M_{\odot}$  和  $1.35M_{\odot}$  大质量 ONeMg 白矮星吸积引起的新星爆发过程中的  $^{26}\text{Al}$  和  $^{22}\text{Na}$  核合成计算<sup>[22,23]</sup>。他们计算的结果似乎是非常乐观的。根据他们的计算, 大质量 ONeMg 白矮星表面的高温氢燃烧可以产生相当多的  $^{22}\text{Na}$  和  $^{26}\text{Al}$ , 它们分别占新星抛射物质量的 3% 和 2%。 $^{22}\text{Na}$  的最高核合成量来自最大质量的 ONeMg 白矮星新星系统, 它们被预言为最快速爆发以及最亮的新星类型; 而  $^{26}\text{Al}$  的最高合成量则来自质量最小的白矮星新星。应该指出, 按照 Starrfield 等人的演化计算<sup>[23]</sup>, 质量最小的白矮星抛射的物质质量则最多。从慢 ONeMg 新星 QU Vul 的观测可估算它抛射的物质质量约为  $10^{-3}M_{\odot}$ , 但质量大于  $1.25M_{\odot}$  的经典 ONeMg 白矮星不可能抛射如此多的物质。

本文中前述关于新星  $^{22}\text{Na}$ - $^{26}\text{Al}$  丰度比的上限条件成立的前提是: 银河系内新星爆发是相当频繁的, 可以认为它在空间上时间是连续分布的。这个前提对新星来说是较好的近似。这样, 文献 [22]、[23] 的计算最多只能显示在距离最近的 ONeMg 的新星中, 应该首先探测到  $^{22}\text{Na}$  的 1.275 MeV  $\gamma$  射线, 而不是  $^{26}\text{Al}$  的 1.809MeV  $\gamma$  射线。由于 GRO 的最近探测并未探测到任何 1.275MeV  $\gamma$  射线的肯定信号, 所以只能说明, 这类新星也不可能产生足以观测到的 1.809MeV  $\gamma$  射线。

(2) 从 1995 年初刚收到的预印本了解到, Diehl 等人分析了 GRO 卫星对银道面 COMPTEL 巡天的最新观测结果<sup>[25]</sup>。发现 1.809MeV  $\gamma$  射线发射线来自相当局限的一些区域, 且并不集中在内银盘区域内。如果星际  $^{26}\text{Al}$  主要来自新星爆发, 则由于新星连续分布, 且在星系核球更加集中, 则应得到 1.809MeV  $\gamma$  射线不仅应连续分布, 且应集中在银心方向, 这明显地违背观测事实。因而, 这大大不利于产生星际  $^{26}\text{Al}$  的新星来源假设。

## 参 考 文 献

- [1] Mahoney W A et al. Ap. J., 1984, 286: 578
- [2] 彭秋和. 天文学进展, 1994, 12: 278
- [3] Clayton D D, Hoyle F. Ap. J., 1976, 203: 490
- [4] Black D C. Geoch. Cosmoch. Acta. 1972, 36: 347
- [5] Arnould M, Nørgaard H. Astron. Astrophys., 1978, 64: 195

- [6] Conal R *et al.* In: Woosley S E ed. *Supernova, The tenth Santa Cruz workshop in astronomy and astrophysics*. Lick Observatory, 1989. New York: Springer-Verlag, 1991: 535
- [7] Sftarrfield S, Truran J., W. Sparks K. *Ap. J.*, 1978, 226: 186
- [8] Woosley S E. In: Hauck B, Maeder A, Maynet G eds. *Nucleosynthesis and chemical evolution, 16th Advanced course Swiss Society of Astrophysics and Astronomy, Saas-Fee*. 1986. Geneva Observatory. Switzerland: CH-1290 Sauverny: Versoix, 1986: 1
- [9] Arnold A *et al.* *Ap. J.*, 1980, 237: 937
- [10] Hillebrandt W, Thielemann F K. *Ap. J.*, 1982, 255: 617
- [11] Wallace R K, Woosley S E. *Ap. J., Suppl.*, 1981, 45: 389
- [12] Wiesher M *et al.* *Astrophys.* 1986, 160: 56
- [13] Nofar I *et al.* In: Oberhummer H, Hillebrandt W eds. *Proceedings of the international symposium on nuclear astrophysics "Nuclei in the cosmos"*, Baden/Vienna. Austria, 1990, Garching, Germany: Max-Planck-Institut für Astrophysik, 1990: 119
- [14] Starrfield S, Sparks K, Truran J W. *Ap. J.*, 1986, 303: L5
- [15] Paulus G, Forestini M. In: Hillebrandt W, Muller E eds. *Proceedings of the 6th workshop on nuclear astrophysics, Ringberg, Castle, Tegernsee, FRG*. 1991, Garching, FRG: Max-Planck-Institut für Astrophysik, 1991: 76
- [16] Seuthe S *et al.* *Nucl. Phys.*, 1990, A514: 471
- [17] Iliadis Ch *et al.* *Nucl. Phys.*, 1990, A512: 509
- [18] Truran J W, Livio M. *Ap. J.*, 1986, 308: 721
- [19] 初一, 彭秋和, 谢敬东. *天文学报*, 1993, 34: 341
- [20] 彭秋和. *物理学进展*, 1995, (1): 79
- [21] 彭秋和. In: Burner 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, FRG*, 1993, Garching, FRG: Max-Planck-Institut für Astrophysik, 1993: 74
- [22] Starafeld S *et al.* *Phys. Rep.*, 1993, 227: 223
- [23] Starrfield S *et al.* *AIP Conf. Proc.*, 1993, 280: 168
- [24] Starrfield S *et al.* *Ap. J.*, 1992, 391: L71
- [25] Diehl R *et al.* In: Fichtel C E *et al.* eds. *The second Compton symposium, 1994, New York: AIP*, 1994: 147

(责任编辑 刘金铭)

## The Origin of the Interstellar<sup>26</sup>Al (II): The Role of Novae

Peng Qiuhe

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

### Abstract

The results of various models of novae for the origin of the interstellar <sup>26</sup>Al are reviewed. A constraint on the abundance ratio  $X(^{22}\text{Na})/X(^{26}\text{Al})$  produced by novae is discussed, based on the observation from space. The conclusion is that all the nova models up to now are hard to provide enough detected interstellar <sup>26</sup>Al.

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