

星际 ^{26}Al 的平稳核燃烧星体模型 *

—— 星际 ^{26}Al 的天体源泉问题之一

彭 秋 和

(南京大学天文系 南京 210008)

摘 要

介绍了有关星际 ^{26}Al 发射的 1.809 MeV γ 射线的空间探测结果。简要介绍并评述了有关星际 ^{26}Al 天体来源问题中的平稳核燃烧星体模型, 即大质量主序星模型、WR 星模型和处于渐近巨分支阶段 (AGB) 红巨星模型。根据近几年核物理实验新进展所获得的有关核反应率的新数据, 指出这些模型都面临着严重困难, 似乎不大可能成为星际 ^{26}Al 的重要天体源泉。

1 问题的提出

1.1 天文学中最重要的放射性核素

早在 70 年代人们曾预言星际空间存在着某些重要的放射性核素和可能探测到它们衰变时伴随发射的 γ 射线 (见表 1)^[1,2], 对它们的探测和定量研究, 是检验恒星演化理论以及内部核合成 (特别是新星和超新星) 理论的重要探针。

1.2 空间探测结果

为了探测上述放射性核素的星际 γ 射线, 自 1979 年以来, 人们利用宇宙飞船和探空气球上的 γ 射线探测器进行了多次观测, 并先后对观测资料进行了处理和分析。人们发现了 ^{26}Al 发射的 1.809 MeV γ 射线。除了这条 γ 射线和 SN1987A 的 ^{56}Co 衰变发射的 γ 射线之外, 迄今尚未探测到表 1 中其他放射性核素的 γ 射线 (^{22}Na 对应的 1.275 MeV γ 射线流量, 仅给出刚好在观测流量阈值的上限 (1σ 水平))。关于 1.809 MeV γ 射线的探测情况与结果列于表 2。图 1 和图 2 分别显示出 1979 年 HEAO-3 探测到银道面方向的 γ 射线能谱和银心方向 1.809 MeV 附近的弥漫 γ 射线谱线轮廓。从表 2 可以看出, 按照 Mahoney 等人的分析, 观测到的 1.809 MeV γ 射线的流量为 $(4.8 \pm 1.0) \times 10^{-4} \gamma \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$, 谱线宽度 $< 3 \text{keV}$ 。其他的观测不仅证实了这个结果, 而且发现至少在 10 年的时间内, 这

* 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

表 1 γ 射线天文学中最重要的放射性核素及其发射的 γ 射线

衰变链	衰变方式	半衰期	γ 射线能量 (MeV)
$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}$	β^+, E_c	2.6yr	1.275
$^{26}\text{Al(g)} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$	β^+, E_c	$7.2 \times 10^5 \text{yr}$	1.809
$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc}$	E_c	47.3yr	0.078(93%) 0.068 0.147
$^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca}$	β^+, E_c	3.93h	1.157(99.9%) 1.500
$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$	E_c, β^+	6.10d	0.158(98.8%) 0.812 0.750
$^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$	E_c, β^+	78.8d	0.847 1.771 1.238 1.038 2.599 3.253
$^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$	E_c	271d	0.122 0.014
$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co}$	β^-	$3 \times 10^5 \text{yr}$	0.059 1.332
$^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$	β^-	5.271yr	1.173

* E_c 表示电子俘获过程, $^{26}\text{Al(g)}$ 表示处于核基态的 ^{26}Al

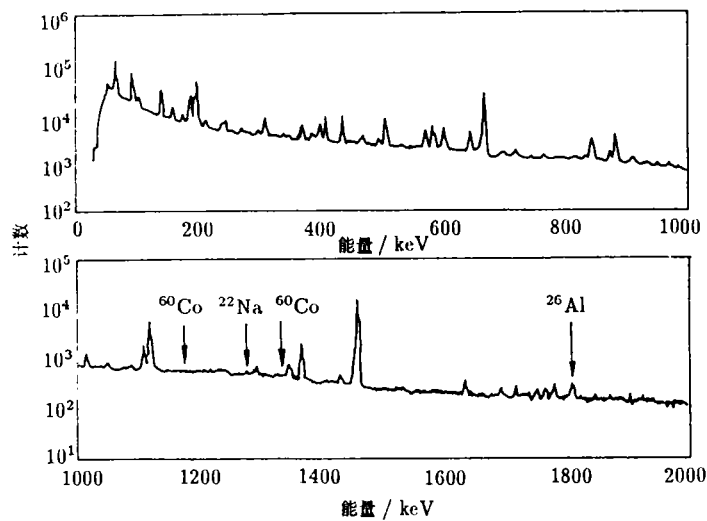


图 1 利用 HEAO-3 获得的银道面方向的观测光谱 [3]

条 γ 射线的流量不随时间变化。如果假定这条 γ 射线的发射源是弥散地分布在银道面上, 而且其沿银经的分布与 100MeV 以上高能 γ 射线 (它们是由于宇宙线同星际物质相

表 2 观测资料及初步分析结果

空间 探测器	观测 时间	数据处理者 及时间	假定的 γ 射 线源分布	流量 $10^{-4}\gamma\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{rad}^{-1}$	FWHM	参考 文献
HEAO-3	1979 年 秋 (两周)	Mahoney <i>et al.</i> 1980		~ 1	$< 3\text{keV}$	[3]
		Mahaney <i>et al.</i> 1982	与 $> 70\text{MeV}\gamma$ 射 线源分布一致	6.0 ± 2.3	$< 3\text{keV}$	[4]
		Mahaney <i>et al.</i> 1984	与 $> 70\text{MeV}\gamma$ 射 线源分布一致	4.8 ± 1.0		[5]
		Mahaney <i>et al.</i> 1986	点源	1.4 ± 0.9		[6]
SMM	1980— 1982	Share <i>et al.</i> 1985	与 $> 100\text{MeV}\gamma$ 射 线源分布一致	4.0 ± 0.4	38^{+21}_{-38}keV	[7]
		Purcell <i>et al.</i> 1988		1.4 ± 0.9		[8]
MPI	1982	Ballmoos <i>et al.</i> 1987	点源	6.4 ± 2.6	17%	[9]
		Ballmoos 1991	与薄热等离子体 分布一致	1.5		[10]
四个气球 探测器	1977— 1984	MacCallum 1987 <i>et al.</i>	与 $> 70\text{MeV}\gamma$ 射 线源分布一致	$3.9^{+20}_{-1.7}$		[11]
			点源	1.3 ± 0.9		[11]
GRIS	1988	Gehrels <i>et al.</i> 1991	与 $> 100\text{MeV}\gamma$ 射线源分布一致	$l=0^\circ$ 方向 $4.2^{+1.9}_{-1.7}$	$4.2\pm 2.4\text{keV}$	[12]
				$l=335^\circ$ 方向 $5.4^{+2.9}_{-3.1}$	$5.5^{+4.5}_{-5.5}\text{keV}$	[12]
HEAOGONE	1987	Malet <i>et al.</i> 1990	点源	1.9 ± 0.9		[13]
Compton Observatory	1992	Diehl <i>et al.</i> 1993	(直接测量) 弥漫源	4.0		[14]

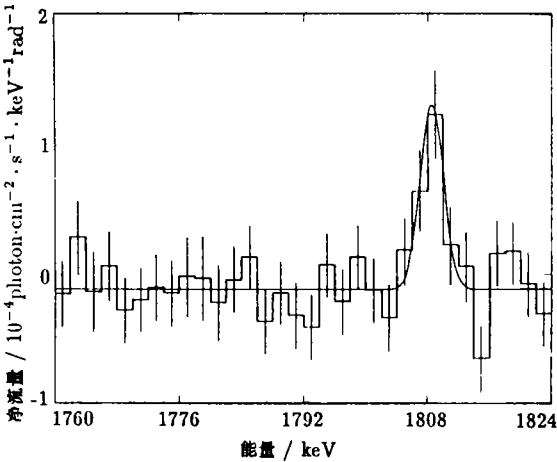


图 2 根据 HEAO-3 观测结果, 经处理得到的银心方向, 1.809MeV 附近弥散 γ 射线辐射谱 [5]

互作用而产生的) 所测量的分布基本一致, 就可以估算出目前银河系内存在的 ^{26}Al 物质总质量约有 $(2.6\text{—}4.0)M_\odot$, 其下限对应于太阳到银心的距离为 8.0kpc。

最近, 安放在 Compton γ 射线天文卫星上的 COMPTEL 仪器测量结果的分析 (对空间分布无需作假定), 显示了这条 γ 射线发射是弥漫地分布在银道面内, 其空间 (方向) 分布是相对地扁平。但随 (日心银道坐标系中) 银经的分布轮廓是不对称的 (参看图 3), 在银心和船底 (旋) 臂这两个方向有着明显的重要贡献 [14,16]。

为什么星际空间中存在如此大量

的放射性核素 ^{26}Al , 却未探测到 (除 SN1987A 爆发后半年探测到 ^{56}Co 衰变伴随的 γ 射线外) 其他放射性核素 (如 ^{22}Na 、 ^{44}Ti) 的 γ 射线? 产生星际 ^{26}Al 的天体源泉是什么? 这是近十年来使全世界天体物理学家迷惑不解的核天体物理学的重大疑难问题。

1.3 两种不同类型的天体源泉^[15]

通常认为, 星际 ^{26}Al 可能通过如下两种方式产生: (1) 通过短时标的高温下爆炸性核反应并立即快速抛射到宇宙太空 (例如超新星的爆炸性碳燃烧或氦燃烧, 温度在 10^9K 以上, 新星爆炸性氢燃烧温度在 $(1-3)\times 10^8\text{K}$ 范围内); (2) 或者是长时标准稳核燃烧过程合成, 通过强大的恒星风吹向星际空间 (例如大质量主序星、WR 星、处于 AGB 的红巨星氢燃烧壳层) 等模型, 燃烧温度通常在 $(5-10)\times 10^7\text{K}$ 。

本文目的是评述当前有关星际 ^{26}Al 问题中各种平稳核燃烧天体 (大质量主序星、WR 星和 AGB 红巨星) 模型及其面临的严重困难。至于星际 ^{26}Al 的新星模型和超新星模型, 请读者参阅另外两篇评述性文章^[17,18]。

这里要强调指出, 星际 ^{26}Al 以及其他放射性核素在星体内核合成问题的研究, 已经成为检验和修改恒星演化模型、新星与超新星理论模型的重要推动因素。它不仅同恒星的具体模型和天体物理环境密切相关, 而且强烈地依赖于核物理实验提供的有关原子核结构和核反应截面的信息和数据。实验核物理学最近的进展, 不断地给各种星体模型带来致命性冲击。本文未介绍核物理近年来的进展及其对星际 ^{26}Al 问题的重要影响。由于这个问题涉及过多核物理内容, 作者将这方面的内容写成一篇评述性文章^[19], 请读者参阅。本文只是简要引用有关核物理实验的最新结果, 分析有关各种星体模型面临的困难。

2 大质量主序星模型

由于最近 Compton γ 射线卫星观测表明, 银心和旋臂对 $1.809\text{MeV}\gamma$ 射线有重要贡献^[14], 因此人们认为大质量恒星很可能成为星际 ^{26}Al 的主要来源之一^[16]。其实, 早在 1984 年人们就曾提出具有强大星风的大质量主序星可以产生 ^{26}Al ^[22]。对于通常质量不很大的恒星, 其主序星阶段的氢燃烧 (即使是 CNO 循环), 在 $(1-3)\times 10^7\text{K}$ 的较低温度下, $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应率非常低^[24], 因而不可能成为星际 ^{26}Al 的重要源泉。但是对于 $M > 15M_{\odot}$ 的大质量恒星来说, 核心氢燃烧区域的温度达到 $(5-9)\times 10^7\text{K}$, 一般它们的主要能源来自 CNO 循环的核反应链。其中的核产物 ^{19}F 、 ^{19}Ne 将因 (p, γ) (或 β^+ 衰变) 过程进入 NeNa 循环^[2,17], 连同原先存在的 Ne、Na、Mg 等元素在随后的 MgAl 反应链中合成 ^{26}Al ^[2,17]。这些大质量恒星内部物质处于强烈的对流状态, 对流区从星体中心一直向外延伸到星体质量的 70% 以上^[20]。核心区刚合成的 ^{26}Al 的相当大部分, 通过对流而输运到星体的较外部包层。这类恒星具有强大的星风, 在其主序寿命 (短于 $1.0\times 10^7\text{yr}$) 期间将向外抛出其质量的可观部分 (可达 40%—60% 或更多)^[21]。通过这些方式, 恒星内部合成的 ^{26}Al 将连续不断地抛向星际太空。文献 [22] 根据 1984 年以前有关核反应率的数据, 估算了银河系内这类大质量主序星最多只能提供 $0.2 M_{\odot}$ 的 ^{26}Al , 比观测要求值低一个量级。如果利用 1987 年 Rangacharyulu 等人关于 $^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$ 反

应率的估算(当 $T_9 \leq 0.1$ 时它比过去估计值要高三四个量级以上)^[23] 以及 1990 年 Iliadis 等人关于 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应率的测定(在低温下它至少要比过去值低 5 倍)^[24], 则银河系内大质量主序星所能贡献的星际 ^{26}Al 数量, 最多只能达到 $0.05M_\odot$ 。因此, 它们不可能成为星际 ^{26}Al 的重要源泉。

3 WR (Wolf-Rayet) 星

1986 年 Prantzos 等人提出了 WR 星作为星际 ^{26}Al 的主要提供者^[15]。WR 星是一类表面温度很高 ($T_e \sim 3 \times 10^4 - 10^5 \text{K}$)、光度很大 ($L \sim 10^5 - 10^6 L_\odot$) 的恒星, 其主要光谱观测特征是: 它们的光谱中没有通常恒星光谱中很强的氢线, 而有很强的氮原子发射线。此外, 它们有的分别具有较强的 N、C、O 原子光谱线, 分别称为 WN、WC 和 WO 星。这类恒星的初始质量非常大, $M_{\text{主序}} > (25-30)M_\odot$, 强大的星风使它们已丧失了全部的氢包层而使原先核心区域(质量约为 $4M_\odot$, 经历了氢燃烧阶段, 氢已几乎全部转化为氮)暴露于外表。其星风质量损失率平均为 $\langle \dot{M} \rangle \sim 3 \times 10^{-5} M_\odot \cdot \text{yr}^{-1}$, 比同样光度的普通 O 型星的星风质量损失率大 10 倍。关于如此强大星风的产生机制、对流核心延伸的程度、如此巨大质量恒星经历 WR 星阶段的时标等一系列关键问题, 尚在研究与争论之中。近年来有关 WR 星的理论模型很多, 近年来 SNI_b 爆发就建立在 WR 星模型的基础上。

在 1986 年 Prantzos 等人对 $50M_\odot < M_{\text{主序}} < 100M_\odot$ ($M_{\text{主序}}$ 代表零龄初始主序质量) 的恒星演化和内部核合成进行了计算^[15], 计算中依据了当时最新的核物理数据(但未计及 1987 年 Rangacharyulu 等人的实验^[23]) 和直到涉及 ^{30}Si 的所有核素的核过程以及放出和俘获中子的过程。由于 ^{26}Al 的合成量对于核反应区温度非常敏感, 所以不同质量的恒星合成的 ^{26}Al 量是不同的。他们采用恒星的初始质量分布函数 $f(M) \propto M^{-2.5}$, 以太阳大气的化学成分作为其初始化学成分。计算表明: 平均每一个 WR 星能产生 $4 \times 10^{-5} M_\odot$ 的 ^{26}Al , 产生的 γ 射线的光度为 $6 \times 10^{37} \gamma \text{s}^{-1}$ 。为了估计银河系内所有 WR 星对 ^{26}Al 及其光度总量的估计, 还需要知道银河系内 WR 星的总数及其分布, 以及银河系内“金属”含量 (Z) 的分布 (C、N、O 及其更重的元素统称“金属”)。观测表明: 银河系中心附近金属含量丰富, 从银心向外金属含量逐渐降低。在银心附近, $Z_{\text{GC}} \sim 3Z_\odot$ (其中 $Z_\odot$ 表示太阳值)。人们常用 $[X/H] \equiv \log[(X/H)/(X/H)_\odot]$ 表示相对于太阳值而言, 恒星(或星际物质)上某元素 (X) 相对于氢的丰度比。对于氧元素来说, 观测给出银河系内区 $[O/H]$ 的径向梯度为 $\frac{d}{dR}[O/H] \sim -0.07 \text{dex} \cdot \text{kpc}^{-1}$ (其中 R 为离银心的距离)。从太阳向银心方向上, 银河系内区物质(包括恒星和星际介质)的金属平均丰度 $\langle Z_G \rangle \sim 2.2Z_\odot$ (太阳表面物质, 金属总丰度为 $Z_\odot \simeq 0.023$)。

由于星际介质闪烁的影响, 迄今人们仍未能很好地发现银心方向距我们 $r > (3-4)$ kpc 远处的 WR 星。文献 [15] 中 Prantzos 从恒星形成率正比于银道面上星际气体的密度, 以及恒星合成 ^{26}Al 的数量与它的金属丰度成正比出发, 对银河系内 WR 星的径向分布作了三种模型假设, 并且估算了银河系内所有 WR 星所产生的 ^{26}Al 的总量。其结果为 (下面 σ 表示某种物质或星体在银道面上的投影面密度):

(1) $\sigma_{\text{WR}}(R)$ 正比于银河系内巨 H II 星云的分布。在这种模型分布下, 银河系内 WR 星的总数目为 $N_{\text{WR}} \sim 1\,000$, 在过去 10^6 年内抛射到星际介质中的 ^{26}Al 的总质量 $M(^{26}\text{Al}) \sim 0.25 M_{\odot}$ 。

(2) $\sigma_{\text{WR}}(R) \propto \sigma(\text{H}_2)$, 即同氢分子云的分布相同。在这种模型下, $N_{\text{WR}} \sim 2500$, $M(^{26}\text{Al}) \sim 0.65 M_{\odot}$ 。

(3) 假定 WR 星形成率正比于氢原子丰度, 则有 $\sigma_{\text{WR}}(R) \propto \sigma(\text{H}_2)(Z(R)/Z_{\odot})^{1.7}$, 则有 $N_{\text{WR}} \sim 8\,000$, 但在银核区域 ($R < 1\text{kpc}$) 内应包含 2 000 个 WR 星。在这个模型下, $M(^{26}\text{Al}) \sim 2.2 M_{\odot}$ 。

因此, 模型 (3) 似乎是有希望的, 但是通常人们估计银河系内的 WR 星大约只有 1000 个, 远低于模型中所估算的。由于银核附近, 存在着大量分子云, 在那里恒星形成率特别高 (事实上, 1992 年下半年观测证实银心存在着致密的大质量恒星星团, 很可能有不少 WR 星), 因此 Prantzos 把希望寄托于未来的观测, 可能会在银心方向发现几万个 B、O 型星, 其中包含 1 万颗 WR 星。

但是, 如果考虑到 WR 星氢燃烧阶段的核燃烧温度一般在 $(7-9) \times 10^7 \text{K}$ 范围内, 1990 年 Iliadis 等人关于 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 核反应率的新实验 [24] 表明, 过去人们 (在这个温度范围内) 所采用的核反应率过高地估算了 5—8 倍。1987 年 Rangacharyulu 等人的实验 [21] 与估算则显示了前人对摧毁 ^{26}Al 的核反应 $^{26}\text{Al}(p, \gamma)^{27}\text{Si}$ 却低估计 3—4 个量级。虽然到 1993 年, Prantzos 基于最近 Compton γ 射线卫星的观测显示出银心和旋臂对 $1.809\text{MeV}\gamma$ 射线有着明显贡献 [14] 的观测事实, 但他却仍然主张 WR 星可能是星际 ^{26}Al 的重要天体源泉 [16]。可是他在 1993 年发表的论文是基于他们 1986 年的计算, 当时他们并未考虑上述 Iliadis 等人和 Rangacharyulu 等人的实验改进, 因此本文作者认为他的结论是不可靠的。至少, 根据现有的核物理实验结果, 对于星际 ^{26}Al 这个重大疑难问题来说, WR 星模型的希望是渺茫的。

4 处于 AGB 阶段的红巨星模型

从恒星演化理论得知 [20]: 初始质量为 $(0.5-8)M_{\odot}$ 的恒星演化会经历红巨星的 AGB 阶段, 这时它们在结构上的共同特征为: 具有较为致密的碳-氧核心, 外围由内向外出现双燃烧 (He^- 和 H^-) 壳层, 再外面是延伸很广的 (以氢为主) 对流大气包层。近来人们从观测上已发现, 这些红巨星大气中存在某些通过 H^- 燃烧和 He^- 燃烧过程所合成的元素 [25] 以及 S- 过程 (指慢中子俘获过程产生的) 重元素 [26], 人们认为它们是在这些恒星内部产生、通过上述第二次或第三次“挖掘”而转移到恒星表面来的。这种“挖掘”机制的效率, 主要依赖于星体的对流理论、星风质量损失率以及恒星初始金属丰度。而这些因素至今也尚不清楚, 不同研究者的理论计算结果大不相同。

1980 年 Nørgaard 首先研究了 $(5-7)M_{\odot}$ 恒星在 AGB 阶段其对流包层底部在较高温度条件下的核合成反应序列, 并给出较高的 ^{26}Al 的合成量 [27]。在他的计算基础上, 1984 年 Cameron 最先以定性的方式论证了这些红巨星有可能成为银河系内星际 ^{26}Al 的重要源泉之一 [28]。但在后来一些研究者的计算中, 在这类恒星对流包层底部的温度并

非像 Nørgaard 所假定的那样高^[29]。

1991 年, Paulus and Forestini 对 $1-3M_{\odot}$ 恒星的演化 (从主序前的金牛座 T 型变星阶段一直到经过红巨星的 AGB 阶段) 进行了详细计算。在计算中他们采用了较好的物质不透明度规律, 红巨星大气中温度分布的轮廓以及最新的核反应率, 计入了 (包括 ^{26}Al 在内的) 38 种核素及其有关的 120 个核反应。他们获得的主要结果如下^[29]:

(1) 在他们的计算中, 恒星的对流包层底部的温度也没有达到 Nørgaard 计算中假定

的那样高。对于质量为 $3M_{\odot}$, $Z = 0.03$ 的模型, 在 AGB 阶段经历了 13 次热脉冲后, 在 $M(r)/M \approx 0.207$ 附近的 H- 燃烧壳层内, ^{26}Al 达到了最高的丰度: $X(^{26}\text{Al}) \approx 10^{-4}$, 这时 (通过反应 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$) 初始时的 ^{25}Mg 几乎都转化为 ^{26}Al 。而在这之前的几次热脉冲时, 星体内合成的 ^{26}Al 是相当少的。由于对流作用使物质混合, 使得在第 13 次热脉冲后对流区物质 (被前几次物质所稀释后) 所含 ^{26}Al 的丰度降为 $X(^{26}\text{Al}) \approx 10^{-5}$ 。在更深的内部的 He 燃烧壳层 [$M(r)/M \leq 0.195$] 内, 主要由于 $^{26}\text{Al}(\beta^+)^{26}\text{Mg}$ 和 $^{26}\text{Al}(n, p)^{26}\text{Mg}$ (其中自由中子来自反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$), 一部分刚生成的 ^{26}Al 被转化为 ^{26}Mg , 使得 ^{26}Al 的浓度大大下降。图 3a 显示出该恒星在 AGB 阶段中经历了 13 次热脉冲后, 星体内部 H 燃烧壳层内外 ^{26}Al 、 ^{25}Mg 以及 ^{27}Al 丰度的分布曲线 (^{27}Al 的丰度基本上仍然保持它的初始值不变)。

(2) 在他们的计算中, 并不能自洽地出现前述在 AGB 阶段因外部包层对流向内延伸引起的“第三次挖掘”, 而只能人为地引进“挖掘深度” (作为自由参量, 这是当前理论计算中几乎共有的缺陷)。在图 3b 中显示出从内部挖掘出来物质中 ^{26}Al 的含量随被挖掘出来的

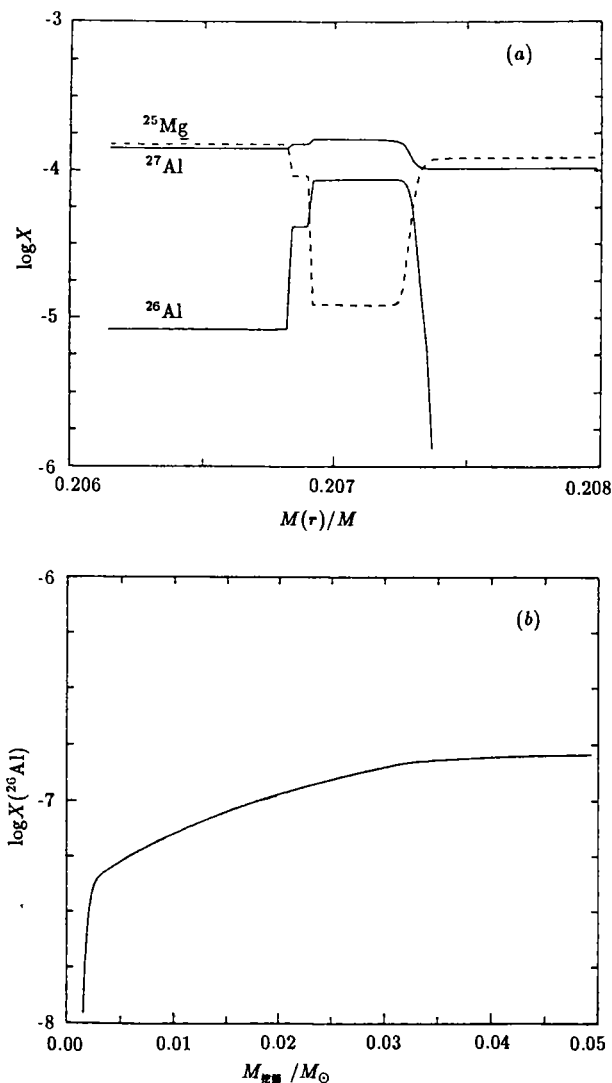


图 3 质量为 $3M_{\odot}$, $z=0.03$ 的 AGB 恒星经历了 13 次热脉冲后: (a) ^{25}Mg 和 Al 的丰度分布曲线; (b) 大气包层中 ^{26}Al 丰度随内部挖掘出来的质量的变化^[14]

质量增长而变化的情况。从图可以看出，包层中的 $X(^{26}\text{Al})$ 很快地趋向于饱和值 10^{-7} ，而同被挖掘的物质质量几乎无关。其原因是：对于合理的挖掘深度而言，只有相对很少的 ^{26}Al 被输送到表面包层。对初始含量 $X(^{27}\text{Al}) \sim 10^{-4}$ 来说，在外表面的氢包层，比率 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 10^{-3}$ ，这同人们最近从原始陨星微粒中测量到的 ^{26}Mg 超丰量而推断出来的原始同位素比 $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})^{[30]}$ 相符。虽然如此，但这种红巨星却难以成为星际 ^{26}Al 的主要源泉，原因如下。

(3) 这种 $3M_{\odot}$ 的红巨星模型所提供的 ^{26}Al 的数量，依赖于它在 AGB 阶段所经历的热脉冲的次数。根据他们在文献 [29] 中的计算，上述恒星 AGB 阶段经历 13 次热脉冲后，约有 $10^{-8}M_{\odot}$ 的 ^{26}Al 随着恒星的星风吹散到星际介质中去。此时恒星的气体包层仍然含有 $2M_{\odot}$ 的物质。如果星风质量损失率保持不变，大约再经历 32 次热脉冲后，这个气体包层就会全部（因星风而）丧失。他们估计，在 $7 \times 10^6 \text{yr}$ （远大于 ^{26}Al 的 β^+ 衰变特征时标）内，这样一颗红巨星将有大约 $3 \times 10^{-8}M_{\odot}$ 的 ^{26}Al 抛向宇宙太空。如果进一步假设，主序质量在 $1-3M_{\odot}$ 范围内所有恒星 AGB 阶段中每相继两次热脉冲的时间间隔以及每次热脉冲所挖掘出来的 ^{26}Al 的平均数量都相同（这些假设大致合理，这是由于 $1M_{\odot}$ 与 $3M_{\odot}$ 恒星 AGB 红巨星阶段的恒星包层模型的区别不太大），根据适当的恒星初始质量分布函数和小质量 AGB 恒星的星风质量损失率，他们发现，在 10^6yr （ ^{26}Al 的 β^+ 衰变的特征时标）内，银河系内所有那些初始主序质量在 $1-3M_{\odot}$ 范围内的 AGB 红巨星抛向星际空间的 ^{26}Al 总量只有 $0.1M_{\odot}$ ，比观测要求值低一个数量级以上。也许每个 $3-8M_{\odot}$ 的恒星在 AGB 阶段能够合成较多的 ^{26}Al （迄今尚未详细计算），但是这些大质量恒星的数目远小于 $1-3M_{\odot}$ 恒星的总数。因此，处于 AGB 阶段的红巨星总体难以成为星际 ^{26}Al 的主要源泉。如果考虑到 Rangacharyulu 等人的实验结果 [23]，上述模型计算中合成 ^{26}Al 的净数量可能还要下降，将使 AGB 红巨星模型的希望变得更加渺茫。

结论：根据最近核物理实验的结果，迄今所有处于平稳核燃烧阶段的恒星模型（大质量主序星，WR 星及 AGB 红巨星）都不可能成为星际 ^{26}Al 的重要来源。在另外两篇文章 [17], [18] 中，我们将分别评述新星和 SN II + SNI_b 对星际 ^{26}Al 贡献的研究状况。

参 考 文 献

- [1] Ramaty R, Lingenfelter R E. Ap. J., 1977, 213: L5
- [2] Clayton D D, Leising M D. Phys. Reports, 1987, 144: 1
- [3] Mahoney W A et al. Nucl. Instr., 1980, 178: 363
- [4] Mahoney W A et al. Ap. J., 1982, 262: 742
- [5] Mahoney W A et al. Ap. J., 1984, 286: 578
- [6] Mahoney W A et al. Bull. Am. Astron. Soc., 1986, 18: 979
- [7] Share G H et al. Ap. J. Lett., 1985, 292: L61
- [8] Purcell W R et al. Ap. J., 1988, 326: 717
- [9] von Ballmoos P et al. Ap. J., 1987, 318: 654
- [10] von Ballmoos P Ap. J., 1991, 380: 98
- [11] MacCallum C et al. Ap. J., 1987, 317: 877
- [12] Gehrels N et al. Ap. J. Lett., 1991, 375: L9

- [13] Malet *et al.* In: Prantzos N. Durouchoux Ph eds. Proc. international symposium on Gamma-ray line astronomy, New York: AIP, 1990: 18
- [14] Diehl R *et al.* Astron. Astrophys. Suppl., 1993, 97: 181
- [15] Prantzos N. In: Vangioni-Flam E *et al* eds. Advanced in nuclear astrophysics., Proceedings of the second IAP workshop, France, 1986, Gif sur Yvette, France: Frontieres, 1986:321
- [16] Prantzos N, Astron. Astrophys. Suppl., 1993, 97(5): 119
- [17] 彭秋和. 新星爆发模型和星际 ^{26}Al 问题 — 星际 ^{26}Al 的天体来源问题之二, 已投天文学进展
- [18] 彭秋和. 超新星在星际 ^{26}Al 问题中的作用 — 星际 ^{26}Al 的天体来源问题之三, 天文学进展
- [19] 彭秋和. 星际 ^{26}Al 核合成研究面临的困难 — 核天体物理学的重大疑难问题, 物理学进展, 1995, 付印中
- [20] Kippenhahn R, Weigert A. Stellar structure and evolution. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 213
- [21] Chiosi C. In: Hauck B *et al* eds. Nucleosynthesis and chemical evolution, 16th Advanced course of the Swiss Society of Astronomy and Astrophysics, Saas-Fee, 1986, Switzerland: Geneva Observatory, 1986. 199
- [22] Dearbore D S P, Blake J B. Ap. J., 1985, 288: L21
- [23] Rangacharyulu *et al.* Ap. J., 1987, 320: 405
- [24] Iliadis Ch *et al.* Nucl. Phys. A, 1990, 512: 509
- [25] Lambert D L. In: Johnson H R, Zuckerman B eds. Evolution of peculiar red giant stars, Proc. of IAU colloq. No. 106, Indiana University, 1988, Dordrecht: Reidel, 1989: 101
- [26] Zhao Gong, magain P. Astron. Astrophys., 1991, 244: 425
- [27] Nørgaard H. Ap. J., 1980, 236: 95
- [28] Cameron A G W. Icarus, 1984, 60: 416
- [29] Paulus G. Forestini M. In: Hillebrandt W, Müller E eds. Proceedings of 6th workshop on nuclear astrophysics, Germany: Max-Planck-Institut für Astrophysik, 1991: 76
- [30] Zinner E *et al.* Nature, 1991, 349: 51

(责任编辑 刘金铭)

The Stable Nuclear Burning Star Model of Interstellar ^{26}Al — One of Problems on Astrophysical Sources of Interstellar ^{26}Al

Pen Qiuhe

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract

The results of 1.809 MeV ray emitted by the interstellar ^{26}Al from the space observation is presented in this paper. The stable nuclear burning star models, i.e., the model of massive main-sequence stars, WR star model and the model of red-giant in the stage of asymptotic giant branch, are briefly reviewed. Based on the data of nuclear reaction rate derived by the progress in the nuclear experiment in recent years, it is pointed out that all these models might fail to provide the important astrophysical sources of interstellar ^{26}Al as there are some severe difficulties.