

AGB 星核合成理论的研究进展

张 波 常 瑞 香

(河北师范大学物理系 石家庄 050016)

彭 秋 和

(南京大学天文系 南京 210093)

摘 要

综述了近年来 AGB 星核合成的理论研究情况, 包括轻、重核素核合成理论、AGB 星的分类、AGB 星的演化特征、AGB 星内的元素核合成理论的研究及外赋 MS、S 星的双星吸积机制的研究情况。

关键词 核反应, 核合成, 丰度—恒星: 渐近巨星支 (AGB)—吸积, 吸积盘

1 引言: AGB 星及其热脉冲

40 年代, 人们在研究球状星团的 HR 图时, 发现在红巨星支 (RGB) 附近存在着另外一个分支。它们在赫罗 (HR) 图上与红巨星分支很靠近, 被称作渐进巨星支 (Asymptotic Giant Branch), 或简称 AGB 星。

按照现代恒星演化理论^[1], 初始主序质量在 $(0.5-8)M_{\odot}$ 之间的中、小质量恒星, 在其核心区经历了氢燃烧与氦燃烧 (对于质量在 $(0.5-2.3)M_{\odot}$ 之间的小质量恒星此时会经历“氦闪”剧烈闪耀过程, 然后进入平稳氦燃烧) 阶段。当它们核心内的氦基本燃尽之后, 一般会形成如下结构: 其核心收缩成为具有通常白矮星大小一样的致密的碳、氧简并核, 在它的外面通常形成双燃烧壳层: 由内向外分别有氦燃烧壳层与氢燃烧壳层。这时恒星进入 AGB 演化阶段, 成为一颗 AGB 星。刚形成的 AGB 星, 氦燃烧壳层位于星体的深层处, 燃烧层并不太薄, 这时氢、氦双燃烧壳层的核燃烧仍在平稳地进行。不过, 随着燃烧的进行 (C-O 核心质量增大) 它们逐渐向外推移, 而且氦燃烧壳层变得愈来愈薄。这时由氢、氦核燃烧释放大能量, 恒星 (在氦燃烧壳层外面) 的以氢为主的很厚的大气包层因受热向外迅速地膨胀 (表现为虽光度增加同时星体表面温度却降低), 在 HR 图上它从 AGB 分支的初始点 (其位置同星体质量以及化学成分密切相关) 逐渐朝向右上方的 AGB 分支最高点演化, 这个阶段 AGB 星称为处于早期的 AGB 星 (E-AGB)。当它的氢燃烧壳层向外推移到相当程度时 (至少对小质量

AGB星), 背景温度低于 $1 \times 10^7 \text{K}$, 壳层氢燃烧会熄灭, 这时 AGB 星释放的能量大为减少, 星体表面将停止膨胀而转向收缩, 在 HR 图上表现为演化途径开始回落。但这时氦燃烧壳层已变得非常薄, 它自身物质对辐射能的吸收变得不重要时, 由于氦燃烧 (3α 反应) 产能率对温度的极其敏感性 (产能率同温度的 40 次方成正比), 热核燃烧时标远远短于自发热膨胀时标, 因而非常薄的壳层氦燃烧具有极强的热失控不稳定性 (若氦燃烧壳层较厚, 且在较内深层对辐射能的自吸收不透明度随温度上升而减少, 大部分辐射能将直接穿透该壳层向外辐射, 该燃烧壳层的温度不会急剧增长, 不会形成失控的热不稳定性): 它的温度与产生的光度都急剧上升, 不仅将外围邻近的氢包层底部已经熄灭的壳层氢燃烧再度点燃, 而且它 (加上死灰复燃的壳层氢燃烧的相助) 将使整个大气包层急剧地向外膨胀。星体虽膨胀, 但由于光度急剧增加, 所以其表面温度几乎没有明显下降, 在 HR 图上它将呈现为沿 AGB 分支竖直向上 (但由于时标短于 AGB 阶段的寿命, 故难以从观测上发现它)。星体大气膨胀到相当程度后, 不仅外面的壳层氢燃烧因背景温度降到一千万度以下而再次熄灭, 甚至连壳层氦燃烧也随之熄灭, 这时星体大气包层因失去内部强辐射压的驱动而在星体自引力作用下开始向中心收缩, 星体大气包层底部以内的物质密度和温度随之回升。一旦氦壳层温度超过 1 亿度, 壳层氦燃烧再次点燃, 上述失控热不稳定性再次起作用。失控薄层氦燃烧—点燃壳层氢燃烧—星体大气包层急剧膨胀 (光度急剧增长)—壳层核燃烧熄灭—大气包层收缩 (光度急剧下降)—再次点燃壳层氦燃烧的这种周而复始几乎循环的过程称为热脉冲。这时的恒星处于 AGB 星的热脉冲阶段 (简记为 TP-AGB)。每次热脉冲过程中, 其光度、氦燃烧壳层的温度、星体大气包层向外膨胀的速度以及大气包层的半径的脉冲变化幅度随脉冲数的增加而增大^[2]。一般认为, 在最初几次热脉冲时, 温度变化幅度不够大, 由此造成的温度梯度还不至于导致氦燃烧壳层同外部大气包层剧烈的对流。一旦热脉冲振幅增长到足够大, 热脉冲过程中氦燃烧壳层与外部包层巨大的温度梯度导致内外物质急剧对流 (对流速度超过包层膨胀速度), 它产生在观测上最重要的影响: 它将内部壳层氦燃烧中核燃烧产物 (3α 反应合成的 ^{12}C 和在氦燃烧壳层中通过慢中子俘获过程 (s- 过程) 合成的重元素) 借助物质对流而带到大气包层甚至带到恒星表面 (这是人们称为的“第三次挖掘”), 这就是使得人们可以观测到大量的富碳以及重元素超丰的红巨星 (例: MS, S, R 型星和碳星) 的原因。当然, 在内外对流过程中, 内部氦燃烧壳层也不断地从外部大气包层补充新的核燃料。特别是, 这种内外混合将使氦燃烧壳层中产生的 ^{13}C 不断地进入到内部的氦燃烧壳层中去, 通过核反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 而成为 s- 过程所需要的重要中子源。

一般来说, TP-AGB 星的这种热脉冲周期较长, 而其时标以及可经历的热脉冲次数同星体质量密切相关^[1]。例如: (初始主序) 质量为 $1.3M_{\odot}$ 的 AGB 星, 其热脉冲周期长达 10^5 年, 大约经历 (10—12) 次热脉冲之后, 大气包层全部丧失而变成白矮星, 其抛射的物质在它周围形成一个向外扩张的行星状星云。对于 $5M_{\odot}$ 的 AGB 星, 热脉冲周期大约为 (1—3) 千年, 可能在经历 (30—50) 次热脉冲后形成 (质量较大的) 白矮星加上行星状星云。通常认为: TP-AGB 星只有在最后几次热脉冲时, 由于星体大气包层膨胀幅度 (以及膨胀速度) 太大, 以至于星体自身引力不可能将它们再拉回而呈现为 AGB 星大量抛射物质, 而且随后一次继一次地大量抛射物质, 最后物质损失率可达 $10^{-4}M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。最后一次热脉冲将把星体包层全部剥光, 只呈露中心的白矮星 (其外包层的氦燃烧已熄灭而不再复燃)。

上述 AGB 星演化图像已得到大量观测上的支持。

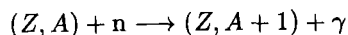
近 20 年来, 关于 AGB 星的演化已取得很多重要结果。首先, 热脉冲时的 He 壳层燃烧中产生的富中子同位素, 能自然解释太阳系的核素分布。其次, 伴随着深层对流, 在 He 壳层中新合成的富中子同位素和产生的碳被挖掘出来, 到达表面, 从而可在表面观测到这些核素的超丰。恒星通过星风损失表面质量, 使其携带新产生的物质进入星际介质。而最令人振奋的方面是它使碳星分布的理论计算能与观测的分布直接比较, 并且能将 AGB 星对星系中 ^4He 、 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}N 、 ^{19}F 、 ^{22}Ne 及富中子同位素的贡献的理论计算与观测进行比较。

特别是近 10 年来, 由于天文仪器和分光技术的重大发展, 使人们能够获得低噪声、高分辨率的光谱, 并利用改进的恒星大气模型, 较精确地归算出元素化学丰度, 获得了一批 AGB 星的丰度观测资料, 使对这些星表面化学成分的研究成为可能。核物理实验技术也得到改进和提高, 导致恒星演化理论的发展, 使人们可以利用更新的恒星演化结果研究元素的核合成。因此, 将恒星演化理论与元素核合成理论相结合来研究 AGB 星中的核合成并与观测进行比较, 是 AGB 星核合成的理论研究的基本方法。我们在这一综述中将较详细地介绍与 AGB 星有关的核合成理论的研究情况。

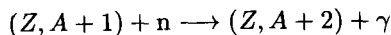
2 重元素核合成理论

重元素是指比铁族元素还重的元素 ($A > 60$)。1957 年, Burbidge 等人^[3] (B²FH 理论) 在核天体物理学的重元素核合成方面作出了开创性的工作。他们指出, 中子俘获在重元素核合成方面起主导作用。中子俘获有两种不同的、彼此独立的过程——r-(快中子俘获) 过程和 s-(慢中子俘获) 过程, 分别对应于不同的物理环境: r- 过程主要发生在爆炸的天体物理环境中, 如超新星爆发; s- 过程发生的场合则是恒星内部宁静 He 燃烧, 对应于红巨星阶段。后来人们的分析^[4] 和计算^[5] 表明, 中等质量星和小质量星的渐进巨星分支 (AGB) 热脉冲阶段的 He 燃烧壳层是合成 s- 核素主要部分 ($A > 90$) 的最合适的场合。在 r- 过程和 s- 过程中, 种子核俘获中子形成重元素。种子核主要是 ^{56}Fe 及次要的其他铁族元素如 Co 和 Ni。

假定恒星内有中子源, 即存在放出自由中子的核反应 (如 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 或 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$), 使自由中子能够维持一定数密度, 则这些中子的热运动将导致中子俘获过程的发生。设原子核 (Z, A) 稳定 (不发生 β 衰变), 则中子俘获过程为:



若 ($Z, A+1$) 也稳定, 则继续俘获中子:

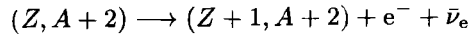


若 ($Z, A+2$) 不稳定, 则有两种可能, 一是进行 β^- 衰变, 平均寿命为 τ_β ; 也可继续吸收中子, 特征时标为 τ_n , 其分支比为 τ_β/τ_n , 其中 $\tau_n^{-1} = n_n \langle \sigma V \rangle$, σ 为靶核中子俘获截面, V 为中子热运动速度, $\langle \sigma V \rangle$ 为热中子 σV 的 Maxwell 平均值, n_n 为中子数密度, $\tau_n \sim 10^9/n_n \text{ yr}$ 。B²FH 设想了两种极端情况作为重元素核合成的主要方式。

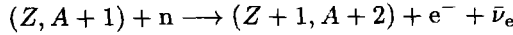
(1) 慢中子俘获过程 (s- 过程)

从核素图中可见, β 稳定谷附近, τ_β 在 1m—10yr 之间。若 $n_n \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$, 则 $\tau_n \geq 10 \sim 10^2$

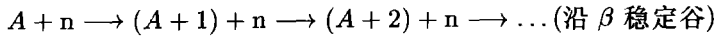
yr。经典 s- 过程中假定 $\tau_\beta \ll \tau_n$ ，这时不稳定核 $(Z, A + 2)$ 将进行 β 衰变：



由于这个过程时标极短，可直接认为吸收中子的反应为



一般情况 $(Z + 1, A + 2)$ 稳定，继续俘获中子，这样，s- 过程核反应方式为：



这种类型中子俘获反应链称为无分叉 s- 过程反应链，所经过的核素叫 s- 核素。由此可给出 s- 过程中各重元素丰度随时间变化的微分方程组：

$$dN_{56}/d\tau = -\sigma_{56}N_{56}$$

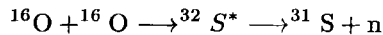
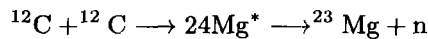
$$dN_A/d\tau = -\sigma_A N_A + \sigma_{A-1} N_{A-1} \quad (57 \leq A \leq 209, A \neq 206)$$

$$dN_{206}/d\tau = -\sigma_{206}N_{206} + \sigma_{205}N_{205} + \sigma_{209}N_{209}$$

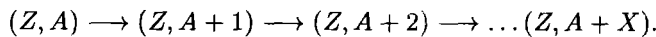
其中 N_A 是核素丰度， $\tau = V_T \int n_n(t)dt$ 是中子辐照量， V_T 是温度为 T 时中子热运动平均速度， σ_A 是 A 核的中子俘获截面。在这里 ^{56}Fe 作为 s- 过程种子核是因为：除了宇宙形成后的第一代恒星以外，形成恒星的星际物质已被许多代超新星爆发所污染。超新星爆发的产物以铁族元素最为丰富，宇宙中 ^{56}Fe 的丰度远高于其他重核。反应 $^{209}\text{Bi}(n, \gamma)^{210}\text{Bi}(\alpha)^{206}\text{Pb}$ (^{210}Bi 的 α 衰变半衰期为 5.01d) 使得中子俘获的慢过程反应链终止。

(2) 快中子俘获过程 r-

超新星爆发过程会出现释放大量中子的核反应，如 C、O 的燃烧：



其中子数密度 $n_n \leq 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ，使 $\tau_n \sim 1\text{s}$ 。若核素 (Z, A) 稳定，则 r- 过程的核合成方式为：



这种类型的中子俘获反应链叫 r- 过程反应链。随着核内中子数的增加，结合能降低，该反应链在某核素处终止。一旦中子源消失，则核素 $(Z, A + X)$ 将经过 β^- 衰变，直到 β 稳定谷。

1961 年，Clayton 等人 [6] 给出了经典 s- 过程方程组，并给出解析解（单辐照理论），Seeger 等人 [7] 在 1965 年给出了中子辐照量的指数分布形式（指数辐照理论），并较好地拟合了太阳系的 s- 核素的 $(\sigma_A N_A)_\odot - A$ 曲线。

1976 年，Ward 等人 [4] 考虑 β^- 衰变与中子俘获的分支比，给出了分叉 s- 过程方程组及解析解（分叉 s- 过程理论）；由于恒星演化计算表明中子源是以脉冲形式出现的，1978 年 Ward 等人 [8] 给出单脉冲 s- 过程方程组的解（单脉冲 s- 过程理论）；1989 年恒星演化的计算 [9] 表明相继出现的中子源有两个： $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 和 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 。1991 年 Beer [10] 给

出双脉冲 s- 过程的解 (双脉冲 s- 过程理论)。s- 过程核合成的解析理论对理解 s- 过程核合成及各物理参量不同取值对核合成的影响是十分重要的, 但由于其近似程度较大, 与恒星演化的计算结果相结合的 s- 过程方程组的数值解才能给出更符合实际的结果。数值计算中, 各种核素的初始丰度根据恒星情况不同取值不同。一般取与太阳系核素丰度呈相似分布, 即 $N_i = N_{i\odot} \times Z/Z_\odot$, 其中 Z 为恒星的金属度。

3 轻元素核合成理论 ($12 \leq A \leq 28$)— ^{19}F 的核合成

随着对恒星表面元素丰度观测结果的增多, 关于恒星表面不同轻元素的丰度比及同一元素不同同位素的丰度比的理论也越来越引起人们的兴趣^[11,12]。

核素丰度随时间变化的微分方程为:

$$dY_i/dt = \rho Y_\alpha \sum (R_{ij} Y_j - R_{ji} Y_i) + \sum (Y_j \lambda_{ij} - Y_i \lambda_{ji}) + N_n (\langle \sigma v \rangle_{jn} Y_j - \langle \sigma v \rangle_{in} Y_i) + N_p (\langle \sigma v \rangle_{jp} Y_j - \langle \sigma v \rangle_{ip} Y_i)$$

其中 $Y_i = X_i/A_i$, X_i 为核素 i 的质量丰度, A_i 为其原子量; N_n 和 N_p 分别为中子和质子的数密度, $\langle \sigma v \rangle_{in}$ 和 $\langle \sigma v \rangle_{ip}$ 分别为中子和质子俘获截面乘以热运动速度的平均值; $R_{ij} = N_A \langle \sigma v \rangle_{j\alpha}$ 是核素 j 通过 α 俘获成为核素 i 的反应率; λ_{ij} 代表 β^\pm 衰变率。方程中第一项为 α 俘获 (α, n) 及 (α, γ) 的贡献, 第二项为 β^\pm 衰变的贡献, 第三项为中子俘获 (n, p) 及 (n, α) 的贡献, 第四项为质子俘获 (p, γ) 及 (p, α) 的贡献。以上方程结合 AGB 星的演化模型, 可通过数值计算揭示热脉冲中轻核素的核合成行为。数值计算时各核素的初始丰度可取恒星形成时的值, 但有的核素取值应考虑第一、第二次挖掘的影响。

在核天体物理的研究中, 核合成起源尚未确定的元素为数不多。氟便是其中之一 (它只有一种稳定的同位素: ^{19}F)。迄今为止, 太阳系中氟的起源问题还在探讨之中。1986 年, Woosley^[13] 利用二区模型经过计算表明: 在超新星爆炸性氢燃烧的环境里, 会有相当数量的氟的合成。1988 年他们^[14] 又发现 II 型超新星的 Ne 壳层中的 ν - 过程也值得注意。1989 年 Goriely^[15] 等人强调爆炸性氢燃烧对氟的产生有利。1992 年 Forestini 等人^[16] 计算了 AGB 星热脉冲中氟的核合成, 并得到观测的支持^[17]。

4 AGB 星的分类

根据 AGB 星外包层的碳、氧丰度比 C/O, 可将 AGB 星分为两类^[18]: 富氧的 MS、S 星 ($C/O < 1$) 和富碳的碳星 ($C/O > 1$)。

1983 年 Iben^[19] 用挖掘理论定性讨论了这个问题。“第三次挖掘”是一种较强烈的对流过程, 当 He 闪发生时, 燃烧壳层底部变为对流区, 把新产生的富中子同位素 (重元素) 和碳元素、 ^{19}F 等输送到恒星大气, 使恒星大气的 C/O 及重元素丰度变大, 富氧 AGB 星变为富碳 AGB 星。

根据恒星外包层中是否含有不稳定核素 ^{99}Tc ($\tau_{1/2} \approx 2 \times 10^5 \text{yr}$), Lambert^[20] 将富含 s- 核素的 MS、S 星分为两类:

(1) 内禀 MS、S(T_c -yes) 星: 这类恒星含有不稳定核素 ^{99}Tc , 说明它们正在经历第三次挖掘, 即处于 TP-AGB 阶段;

(2) 外禀 MS、S(T_c -no) 星: 这类恒星观测不到 ^{99}Tc 。一般认为这些巨星从它们的富含 s-核素的伴星——以前是 TP-AGB 星, 现在已演化为白矮星——那里通过星风吸积或盘吸积获得 s-核素。这种质量传输发生在 1×10^6 年以前, 于是在原 TP-AGB 星中产生的 ^{99}Tc 几乎全部衰变。但也有其他机制^[21]。

5 恒星在 AGB 阶段的结构演化及特征

对 s-过程的唯象研究 ($(\sigma_A N_A)_\odot - A$ 曲线的研究) 可确定发生 s-过程的“平均”物理条件^[22]: 中子辐照量、中子数密度、温度 T 、s-过程时标等。人们发现上述 s-过程的时标和温度最适合的场合是恒星内部的宁静 He 燃烧阶段, 这对应于红巨星阶段。AGB 热脉冲阶段的 He 燃烧壳层是合成 s-核素主要部分的 ($A > 90$) 最合适的场所。AGB 星可分为以下三层: 电子简并的 C-O 核心、脉冲开始后 H-He 双燃烧层间的对流壳层和对流外包层。在恒星的演化过程中, 核心质量随脉冲数平稳增长, 对流壳层逐渐平缓上移。对流外包层质量因星风及超星风损失而逐渐减小, 它被完全剥蚀光的时间就是 TP-AGB 星的寿命。s-过程核合成在对流 He 壳层中进行, 中子源依次为 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 和 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 。

AGB 星核心是一个半径约 $10^{-2}R_\odot$ 的高温白矮星。TP-AGB 阶段的核心质量在 $0.5-1.38M_\odot$ 之间, 主序质量大的恒星核心质量也大。富氢的外包层与核心之间有一个很薄的 He 燃烧区, 叫 He 燃烧壳层。

壳层氢燃烧区接近于向内推移的外部对流区的底部, 氢燃烧的高温 ($\sim 2 \times 10^8\text{K}$) 使得邻近的对流层升温到 $1 \times 10^7\text{K}$ 以上, 这时已经熄灭的壳层氢燃烧又重新开始。由于非常薄的壳层氢燃烧具有热力学不稳定性, 使得具有 C-O 核心及其外非常薄的 He 壳层和 H 燃烧壳层结构的星体具有一种脉冲不稳定性: 薄层 He 燃烧具有热失控性质, 它的温度和产能率急剧增长, 释放出的能量大部分用于使其外层膨胀, 从而使外面 H 燃烧壳层温度降低, 因而氢燃烧的光度降低。与此同时, 由于膨胀, 氢燃烧壳层变宽, 不透明度 (自由电子散射和束缚-束缚吸收) 增高, 对能量的吸收增强, 使氢燃烧成为稳定。这样, 在引力作用下, 外面的整个包层开始向内收缩, 使氢燃烧壳层变热, 从而恢复它过去的结构。

这种热脉冲的幅度随脉冲数增加而逐渐增大, 在壳层 He 燃烧产能率达到极大时, 燃烧区外面出现短时间对流壳层, 在其后的脉冲过程中, 对流壳层非常接近 H、He 不连续区, 随着对流外包层的向内推移, 即可将 H、He 燃烧区核合成的产物转移到恒星表面, 这个过程叫第三次挖掘。

1988 年, Boothroyd 等人^[23-26] 比较系统地研究了低质量 AGB 星的演化特征, 分别讨论了热脉冲引起的光度和半径的变化 (给出了光度、半径变化的物理原因及变化范围)、核心质量-光度关系 (给出的 Mc-L 关系, 理论上可用于 AGB 星行为的半解析研究, 观测上可以从 AGB 星的光度峰值确定核心质量)、AGB 星的热脉冲过程及向碳星的演化 (指出脉冲开始后, 脉冲幅度随脉冲数的增加而迅速增加。在大约 10 个脉冲后, 脉冲幅度不再明显增加, 通常认为这时已达到全幅脉冲。全幅脉冲与第三次挖掘有密切关系, 即第三次挖掘对各层化学成分的改变使脉冲达到全幅脉冲)。

AGB 星的最主要的两个特征是热脉冲和星风质量损失。1993 年 Vassiliadi^[27] 研究了不同质量、不同金属度的 AGB 星的演化特征 (光度、半径、总质量等随时间的变化), 指出超星风的存在会对 AGB 星寿命产生重要影响。

最近, Straniero 等人^[28] 计算了太阳金属度 $3M_{\odot}$ 的 TP-AGB 星的演化, 首次自洽地计算出该金属度恒星的第三次挖掘, 指出第三次挖掘出现在第 14 个脉冲, 并给出了核心质量、挖掘程度随脉冲数变化的计算结果。对 AGB 星演化研究的逐步深入, 会大大推动对 AGB 星中核合成的研究。

6 AGB 星内的核合成理论研究及与观测的比较

1977 年, Truran 和 Iben^[29] 首次给出了基于高光度 ($M_{\text{bol}} < -6$)、中介质量 ($3 < M/M_{\odot} < 8$)、以 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 为中子源的 TP-AGB 核合成数值计算模型, 但此模型在拟合太阳系核素分布上遇到了问题: 高光度的 AGB 星出乎意料地少^[30,31], 并且近期计算表明由此得到的 s-核素丰度分布与太阳不相符合^[32,33]。

近年来的直接观测表明银河系中 AGB 星确实发生了 s-过程, 但中子源主要是 ^{13}C 而不是 ^{22}Ne ^[33], 原因是在与太阳相似金属度的红巨星中并没有发现的 ^{22}Ne 燃烧产物 ^{25}Mg 的超丰^[34]。另外, 这些红巨星光度太低不能达到使 ^{22}Ne 点火所需的温度 ($T_8 > 3$)^[35]。但 1991 年核物理实验进展表明, 在 $T \sim (1-3) \times 10^8 \text{K}$ 范围内, ^{22}Ne 也可能成为有效的中子源^[36]。

Hollowell 和 Iben^[9] 指出, 至少在星族 II 的低质量 TP-AGB 星中 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应的确起主要作用。在他们的模型中富 ^{12}C 区域在一个半对流区的作用下将外层质子混入其中而形成 ^{13}C 和 ^{14}N , 这一过程发生在热脉冲后的恒星冷却阶段。Keppeler 等人^[22] 利用这一理论拟合出了太阳核素中的大部分 s-核素的丰度。

可是, 是否可用半对流区理论来解释银盘中 MS、S 和 C 星的 s-核素超丰还没有成为定论。 ^{13}C 是如何产生的仍是一个问题。有关质子进入富 ^{12}C 区生成 ^{13}C 的其他理论也不完善, 如 Gallino 等人^[37] 提出壳层与外包层间由于扩散和剪切不稳定性产生的特别混合区理论。因此, 目前星族 I 星中 ^{13}C 的产量还不得不认为是一个相对独立的参量, 人们尚需通过模型预言与实际观测的比较来获得有关这方面的信息^[22]。虽然这样, 还是可以通过对恒星表面丰度的分析给出 ^{13}C 产量的范围^[21]。

Busso 等人^[21] 以文献 [9] 中关于第 15 个脉冲的计算结果为基础, 建立了各脉冲物理参量均相同的星族 I 小质量星的 TP-AGB 模型。计算中的核心质量、重叠因子及所挖出的物质总量均保持不变, 利用 TP-AGB 模型和 s-过程理论, 通过调整主要参量, 在拟合 MS、S 星的表面重元素超丰方面给出了一种方法, 并提出了 AGB 单星呈现为 Tc-no 的可能性。1993 年, Gallino 等人^[38] 用类似方法讨论了 C 星的形成。我们科研小组^[39] 结合不同质量 AGB 星内部物理状况、热脉冲出现次数、幅度以及第三次挖掘程度的差异, 计算了不同质量范围的 AGB 单星的重元素超丰, 并进一步讨论了 AGB 单星分别呈现为 Tc-yes 和 Tc-no 的可能性。

Jorissen 等人^[17] 第一次明确地给出了太阳系外氟的丰度。在他们观测的红巨星中, 氟的丰度随着碳、氧丰度比的升高而增长, 在一些 N 型 C 星中, 超过太阳系氟的丰度达 30 倍。这些结果对 Woosley 等人^[14] 用 II 型超新星的 Ne 壳层中的 ν -过程来解释氟的起源的观点提

出了疑问, 使人们相信氟主要来自 AGB 星内核合成。

1992 年, Forestini 等人^[16]在 ^{13}C 瞬时注入 He 燃烧壳层的前提下计算了 AGB 星热脉冲中氟的核合成。结果表明 ^{19}F 能在 AGB 阶段产生, 并得到观测上的支持, 取得了重要的结果。由于采用的是 ^{13}C 瞬时注入方式, 中子源维持时间太短以至于重元素核合成的 s- 过程不能有效进行。因而 Forestini 等人认为这两个核合成事件不一定紧密关联。我们科研小组^[40]重新考察了氮燃烧环境中氟的产生问题, 采用小质量 AGB 星热脉冲模型, ^{13}C 以渐进方式注入 He 燃烧壳层, 计算了不同温度下氟的核合成。结果表明在满足重元素 s- 过程核合成能有效进行的条件下, ^{19}F 仍能有效地在 AGB 星的热脉冲阶段中产生, 它们是在 AGB 星氮燃烧壳层中同时进行的不同的物理过程。由此出发可进一步解释观测到的 ^{19}F 与重元素丰度的相关性。

7 外赋 MS、S 星的双星吸积机制

人们在逐步完善上述 TP-AGB 模型及其 s- 过程理论的同时, 发现按上述图象难以解释天文观测上发现的 Ba 星以及在某些 MS、S 星的表面上并未发现放射性 Tc 元素 (即 Tc-no)。为了解释这些现象, 人们把观测到的 AGB 星划分为内禀 AGB 星和外赋 AGB 星两大类^[20]。内禀 AGB 星就是指前面描述的 TP-AGB 星 (包括核合成以及第三次挖掘过程)。按照目前国际上多数派的观点, 外赋 AGB 星的重元素超丰来自双星吸积^[41,42]: 即目前观测上的外赋 AGB 星是在双星系统中。此系统现在是由一颗质量较小的白矮星和一颗质量较大的、重元素超丰的红巨星组成。但在 10^6 年以前, 现在的光学主星昔日却是一个质量较小的 (尚处于主序阶段) 伴星, 而现在的白矮 (伴) 星当时却是一颗质量相当大的内禀 AGB 星。当时双星系统内物质交流的方向是物质从当时质量较大的 AGB 星流向质量较小的主序伴星, 其方式可能通过盘吸积 (若主星充满 Roche 瓣, 这对应于两星距离较近)^[43], 也可能通过星风吸积 (此时主星远未充满 Roche 瓣, 对应于两星距离较远情形)^[44]。在当时 AGB 星热脉冲最后阶段, 它大量抛射 (重元素超丰的) 大气包层, 除部分散失在星际太空外, 有相当一部分流入到当年质量较小的 (主序) 伴星上, 不仅使它质量显著增加 (因而超过了原先 TP-AGB 星残留核心的白矮星质量), 它的大气层变得很厚, 而且重元素明显超丰。在观测上它呈现为外包层富含碳和重元素的 MS、S 星。由于质量传输大约发生在 10^6 年以前, 在原来 TP-AGB 星中产生的 Tc 元素几乎全部衰变掉, 在观测上就呈现为 Tc-no 的 MS、S 星。

7.1 星风吸积的理论研究

1992 年, Jorissen 等人^[45]在分析了 S 星的双星轨道参数后, 给出了包括 Ba 星和 S 星的双星系统的可能演化路径, 指出对于较长轨道周期系统, 吸积机制是星风, 而对短轨道周期系统, 吸积机制是 Roche 瓣满溢的稳态盘吸积。1988 年, Boffin 和 Jorissen^[44]首次用一级近似的方法定量计算了由星风吸积引起的 Ba 星的重元素超丰, 为星风吸积的定量计算打下了基础。随后的工作用类似方法计算了 Ba 星的重元素超丰, 并解释了 s- 元素的超丰与 Ba 星的轨道周期期间存在的关系^[46,47]。

虽然星风吸积理论取得了一些重要结果, 但在 Boffin 等人的计算中^[44], 忽略了伴星相对于主星的切向动量的改变, 且在 Ba 星重元素超丰计算中, 采用了“阶梯” (step-process) 模型, 即假设在某一时刻 AGB 星的超丰因子在瞬间由 1 变为 f (f 为恒星重元素丰度与太阳重

元素丰度的比值), 然后保持此值直到 AGB 阶段结束。而事实上在第三次挖掘开始后, AGB 星的超丰因子随挖掘的次数和挖掘程度不同而改变, 外赋 MS、S 星的重元素超丰应是逐渐吸积混合的结果。因此, 目前的星风吸积的理论模型仍显粗糙, 有待于进一步改进。

7.2 盘吸积的理论研究

一般认为轨道周期较短的双星系统通过盘吸积发生质量传输, 因为 Roche 瓣的半径约正比于两颗星的分离距离, 两颗星的分离距离越小, 恒星越容易充满 Roche 瓣。根据发生质量传输时主星的演化阶段不同, 盘吸积可分为 A、B、C 三种类型^[48]。A 型盘吸积发生在主星核心氢燃烧阶段, B 型和 C 型分别发生于主星的氮和碳点燃之前的猛烈膨胀阶段。外赋 MS、S 星同主星(以前是 AGB 星, 现在已演化为白矮星)之间发生的质量传输属于稳态 C 型盘吸积^[49]。

1989 年以前, 一般认为 C 型盘吸积是以动力学时标发生的, 极其不稳定。Pastetter 和 Ritter^[49]第一次提出稳定的 C 型盘吸积质量传输模型, 并给出定量计算, 结果表明, 在 $q \leq 0.65$ (q 为充满洛希瓣的主星同其伴星的质量比) 时 C 型质量传输是稳定的。然而, 只有双星系统演化开始时的质量比 $q_i \geq 1.2$ 时, 主星才能首先充满 Roche 瓣, 这就要求盘吸积之前发生质量反转, 即主星通过星风损失大量的质量。对于距离较近的双星系统, 由于潮汐粘滞作用, 主星可通过比 Reimers 型星风强烈得多(有时甚至达到 Reimers 型星风的几十倍)的星风损失大量质量^[50], 从而在主星到达 AGB 阶段后不久, 便可满足稳定 C 型质量传输条件。

至此, 稳定的 C 型盘吸积质量传输的理论框架已基本形成, 但仍然很粗糙, 有待进一步完善。例如, 距离较近的双星系统的强烈星风的大小很难估算, 表现为其中可调参数的范围较大^[50]。另外, 伴星元素丰度的计算也应结合主星内的核合成与挖掘同步进行。

8 结束语

虽然目前对 AGB 星核合成的理论研究已经取得很大进展, 但仍有许多问题有待人们去研究。如:

1. 利用最新得到的 AGB 星演化的结论去讨论 M-S-C 序列恒星丰度演化并与观测结果进行比较;
2. 利用星系化学演化模型结合关于 AGB 星中的核合成的计算解释太阳系中氟的丰度;
3. 将 AGB 星重元素核合成的计算与星风吸积模型结合起来研究外赋 MS、S 星以及 Ba 星、CH 星的重元素的超丰;
4. 将 AGB 星重元素核合成的计算与盘吸积模型结合起来研究外赋 MS、S 星以及 Ba 星、CH 星的重元素的超丰;
5. 无 Tc 单星及伴星为主序星的无 T_c 双星的重元素超丰^[42]的研究;
6. 伴星为白矮星的 AGB 星的重元素超丰的研究;
7. 结合 AGB 星核合成的计算结果研究星系的化学演化。

我们顺便指出, 对于大质量恒星的红巨星(He-燃烧)阶段能否进行 s-过程, 产生并抛出大量重元素的问题, 也仍是人们的一个研究课题。1992 年 Raiteri 等人曾指出^[51], 根据 1991 年核物理实验的迹象表明, ^{16}O 的中子俘获截面有可能为 $2 \times 10^{-3}\text{mb}$, 比现在国际采用值 ($2 \times 10^{-4}\text{mb}$) 高一个量级。如果按照这个很高的中子俘获截面值, 那么, 由于恒星内大量存在

的 ^{16}O 在较高温度下将有效地吸收中子, 从而使得形成重元素的 s- 过程难以有效地进行。因此, 他们得出结论: 至少对于 $M > 20M_{\odot}$ 的大质量恒星来说, 它们是不可能合成重元素的。最近, Wasierburg 等人^[52] 的研究表明太阳星云中短寿命放射性核素可能来自 AGB 星。这意味着太阳系的形成可能与 AGB 星有着密切关系。除此之外, 还有许多问题有待人们去深入探讨。随着观测资料的增多及这些问题的逐步解决, AGB 星核合成的理论研究也将进入一个新的阶段。

参 考 文 献

- [1] Kippenhahn R, Weigert A. *Stellar structure and evolution*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990
- [2] Groenewegen M A T, de Jong T. *Astron. Astrophys.*, 1993, 267: 410
- [3] Burbidge E M *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 1957, 29: 547
- [4] Ward R A, Newman M J, Clayton D D. *Ap. J. Suppl.*, 1976, 31: 33
- [5] Iben I Jr. *Ap. J.*, 1975, 196: 525
- [6] Clayton D D *et al.* *Ann. Phys.*, 1961, 12: 331
- [7] Seeger P A, Fowler, W A, Clayton D D. *Ap. J. Suppl.*, 1965, 11: 121
- [8] Ward R A, Newman M J. *Ap. J.*, 1978, 219: 195
- [9] Hollowell D, Iben I Jr. *Ap. J.*, 1989, 340: 966
- [10] Beer H. *Ap. J.*, 1991, 379: 409
- [11] Boothroyd A I, Sackmann I J, Wasserburg G J. *Ap. J.*, 1995, 442: L21
- [12] Smith V V *et al.*, *Ap. J.*, 1995, 441: 735
- [13] Woosley S E. In: Audouze J, Chiosi C, Woosley S E eds. 16th Saas-Fee course: Nucleosynthesis and chemical evolution. Geneva: Geneva Observ., 1986.1
- [14] Woosley S E, Haxton W C. *Nature*, 1988, 334: 45
- [15] Goriely S E, Jorisson A, Arnould M. In: Hillebrandt W, Miller E eds. Proc. 5th workshop on nuclear astrophys, Garching: Max Planck Inst., 1989: 60
- [16] Forestini M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1992, 261: 157
- [17] Jorissen A, Smith V V, Lambert D L. *Astron. Astrophys.*, 1992, 261: 164
- [18] Lambert D L. In: Johnson H R, Zuckerman B eds. Evolution of peculiar red giant stars, Proc. IAU Coll. No.106, Bloomington, USA, 1988, Cambridge: Cambridge Univ. Press., 1989: 101
- [19] Iben I. *Annu. Rev. Astro. Astrophys.* 1983, 21: 271
- [20] Lambert D L. In: Michaud G, Tutukov A eds. Evolution of stars: The photospheric abundance connection. Dordrecht: kluwer, 1991. 299
- [21] Busso M *et al.* *Ap. J.*, 1992, 399: 218
- [22] Kappeller F *et al.* *Ap. J.*, 1990. 354: 630
- [23] Boothroyd A I, Sackmann I J. *Ap. J.*, 1988, 328: 632
- [24] Boothroyd A I, Sackmann I J. *Ap. J.*, 1988, 328: 641
- [25] Boothroyd A I, Sackmann I J. *Ap. J.*, 1988, 328: 653
- [26] Boothroyd A I, Sackmann I J. *Ap. J.*, 1988, 328: 671
- [27] Vassiliadis E, Wood P R. *Ap. J.*, 1993, 413: 641
- [28] Straniero O *et al.* *Ap. J.*, 1995, 440: L85
- [29] Truran J W, Iben I Jr. *Ap. J.*, 1977, 216: 797
- [30] Blanco V M, Mccarty M F, Blanco B M. *Ap. J.*, 1980, 242: 938
- [31] Iben I Jr, Renzini A. *Astron. Astrophys.*, 1983, 21: 271
- [32] Howard W M *et al.* *Ap. J.*, 1986, 309: 633
- [33] Busso M *et al.* *Ap. J.*, 1988, 326: 196
- [34] Smith V V, Lambert D L. *Ap. J.*, 1986, 311: 843
- [35] Malaney R A, Boothroyd A I. *Ap. J.*, 1987, 320: 866

- [36] Drotleff H W *et al.* In: Oberhumer H, Hillebrandt W eds. Proceeding of the international symposium on nuclear astrophysics "Nuclei in Cosmos", MPA/P4, Garching: Max Planck Inst., 1990: 181
- [37] Gallino R *et al.* *Ap. J.*, 1988, 334: L45
- [38] Gallino R, Raiteri C M, Busso M. *Ap. J.*, 1993, 410: 400
- [39] 王新舸, 张 波, 彭秋和. *天文学报*, 1996, 37: 243
- [40] 刘永新, 张 波, 彭秋和. *天体物理学报*, 1996, 16: , 57
- [41] Johnson H R, Ake T B, Ameen M M. *Ap. J.*, 1993, 402: 667
- [42] Jorissen A *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1993, 271: 463
- [43] Iben I Jr, Tutukov A V. *Ap. J. Suppl.*, 1985, 58: 661
- [44] Boffin H M J, Jorissen A. *Astron. Astrophys.*, 1988, 205: 155
- [45] Jorissen A, Mayor M. *Astron. Astrophys.*, 1992, 260: 115
- [46] Boffin H M J, Zacs L., *Astron. Astrophys.*, 1994, 291: 811
- [47] Zacs L. *Astron. Astrophys.*, 1994, 283: 937
- [48] Boyle C B. *Vistas in Astron.*, 1984, 27: 149
- [49] Tout C A, Eggleton P P. *M.N.R.A.S.*, 1988, 231: 823
- [50] Meyer F, Meyer-Hofmeister H. *Astron Astrophys.*, 1983, 121: 29
- [51] Raiteri C M, Gallino R, Busso M. *Ap. J.*, 1992, 387: 263
- [52] Wasserburg G J *et al.* *Ap. J.*, 1994, 424: 412

(责任编辑 刘金铭)

Progress in the Study of Nucleosynthesis on Asymptotic Giant Branch Stars

Zhang Bo Chang Ruixing

(*Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016*)

Peng Qiuhu

(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Abstract

The progress in the nucleosynthesis of the asymptotic giant branch stars is presented in this paper. The content includes: the nucleosynthesis of both light and heavy elements, the classification of AGB star and its evolutionary features, the theory of nucleosynthesis of intrinsic AGB star, as well as the accretion scenario for extrinsic AGB star.

Key words nuclear reactions, nucleosynthesis, abundances—stars: AGB—accretion, accretion disks