

渐近巨星分支 (AGB) 长周期变星研究进展

龚 志 刚 李 焱

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘 要

AGB 长周期变星是中小质量恒星演化到晚期时形成的, 由于它们存在强烈的振动和巨大的星风物质损失, 研究这类变星对于了解恒星振动性质、星风产生机制及恒星晚期演化都有十分重要的意义。本文比较广泛地考查了最近十几年来国际上对于 AGB 长周期变星观测和理论研究工作的现状, 讨论了 AGB 长周期变星的主要观测性质以及恒星振动和演化理论工作中所取得的进展, 同时也分析了目前研究工作中存在的一些问题和困难, 指出今后研究工作中需要逐步加以解决的一些问题。

1 引 言

随着观测技术的发展, AGB 长周期变星的研究在最近十几年得到了不少研究成果, 引起人们的极大兴趣。AGB 阶段是中小质量恒星演化到晚期时必然经过的阶段, 这一阶段的恒星有非常激烈的活动, 如大量星风物质损失、明显的振动现象等, 而对这类活动的起因现在还不十分清楚。同时在 AGB 长周期变星的研究中还存在一些争议较大的问题, 因此有必要从各个方面对 AGB 长周期变星的演化和振动性质、观测特性等研究结果, 进行分析总结, 使人们对于中小质量恒星的晚期演化特性和演化结局有进一步的了解。

我们所讨论的 AGB 星, 是主序质量小于 $9M_{\odot}$ 的中小质量恒星演化到晚期, 中心氢和氦都已燃尽, 位于赫罗图中渐近巨星分支的恒星。这时的恒星中心是致密的碳氧简并核, 恒星外部是非常稀薄的延伸大气, 在核与外壳之间有氢燃烧壳和氦燃烧壳。AGB 长周期变星则是在发生脉动的 AGB 星, 主要包括 Mira 变星、OH/IR 天体、半规则变星 SRa、SRb 以及不规则变星 L_b 、 L_c 。这类变星的振动周期为 100—2 000d, 有效温度约 3 000K, 光度可达绝对星等 -6mag 以上, 光变幅达 2.5mag, 而星风物质损失率达 10^{-7} — $10^{-4}M_{\odot}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。

目前 AGB 长周期变星的观测研究主要有以下几个问题: 由于很难得到完整的光变曲线(周期长、消光大), 使观测得到的周光关系有很大的弥散度; 大量分子和尘埃的吸收和谱线覆盖效应, 使有效温度难以确定; 采用不同方法得到的振动常数不同; 有必要确

定金属丰度对 AGB 长周期变星演化和振动的影响; 如何测定星风物质损失率等。

理论研究方面, 目前也存在一些问题。在演化方面, 需要对观测得到的 AGB 长周期变星表面元素丰度及其变化加以解释; 振动方面, 目前国际上采用的两种方法虽然都能解决一些问题, 但都存在缺陷, 而且现在还无法明确得出这类星是处在基频还是一阶谐振振动; 同时在 AGB 长周期变星初始质量的研究方面还存在一些矛盾。下面我们将对 AGB 长周期变星研究的工作进展及存在问题作详细讨论。

2 AGB 长周期变星的观测性质

精确测定恒星的距离在天文学中是比较困难的问题, 所产生的误差也相当大。因而, 为了能够较全面了解 AGB 长周期变星的特性, 必须对同一星团或星系中的长周期变星进行系统的观测和分析。因为一般来说, 可以认为在非常遥远的星团或星系中的恒星到观测者的距离基本相同。因此, 根据对大麦哲伦云 (LMC) 和小麦哲伦云 (SMC) 及几个星团中长周期变星的观测结果进行分析, 发现长周期变星可以明显地分成两种类型^[105,113]: 一种是处于中心氮或碳燃烧阶段, 主序质量约 $16-23 M_{\odot}$ 的红超巨星长

周期变星, 其振幅一般都比较小 ($0.2-0.3\text{mag}$); 另一种是处于 AGB 阶段, 主序质量 $\leq 9M_{\odot}$ 的 AGB 长周期变星, 振幅都比较大 ($\geq 0.7\text{mag}$)^[29,41,43,105,106,110]。我们主要讨论 AGB 长周期变星的观测性质及其演化和振动的研究。

AGB 长周期变星的光度一般都很高, 绝对星等可以达到 $M_{\text{bol}} \sim -6\text{mag}$ 以上^[35,43], 在星团和星系中属于一种很亮的变星, 因而比较容易观测到。AGB 长周期变星的有效温度都非常低, 只有约 $2\,000-3\,000\text{K}$ ^[55,56,70,90,91], 位于赫罗图中最红端, 辐射的能量主要集中在红外波段^[59,62,79,85]。由于 AGB 长周期变星表面温度很低, 大气中就会产生大量的分子和尘埃^[81]。而现在人们对于分子谱线覆盖效应和尘埃生成率以及它们对辐射转移造成的影响, 还了解得不甚清楚, 再加上 AGB 星周围一般都有较厚的星周介质包层^[17,25,26,30,70,108], 给有效温度的测定造成很大困难, 使得现在用不同方法得到的有效温度有较大的差异^[29,88,92,113]。这就严重影响到对这类变星性质的了解, 使观测得到的 AGB 长周期变星处于不同的振动方式。

观测发现 AGB 长周期变星包括光谱型为 M、S 或 C 型的恒星^[32], 其表面丰度对不同的星是不同的。有些是表面 $C/O < 1$ 的富氧星, 光谱型为 M 型, 光谱中有 TiO 吸收

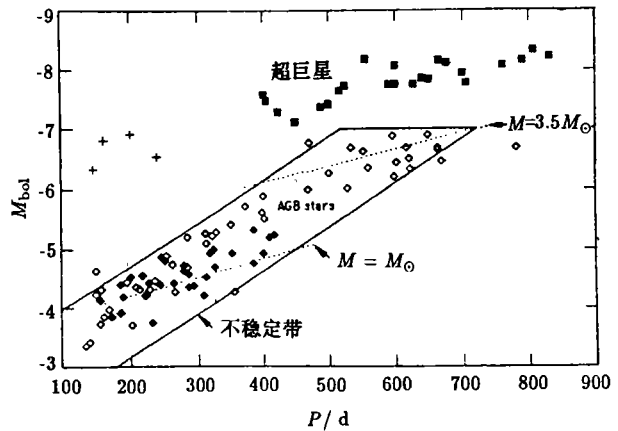


图 1 大麦哲伦云中长周期变星的周光关系^[105]

带, 而 ZrO 的丰度正常; 另一些则是表面 $C/O > 1$ 的碳星, 光谱型为 C、N 或 R 型, 光谱中以 CN 和 C 的特征为主; 还有一些星则是 $C/O \sim 1$ 的 S 型星, 光谱中富含 ZrO。Pilachowski^[69] 认为 AGB 星存在着由 $M \rightarrow MS \rightarrow S \rightarrow SC \rightarrow C$ 的演化序列, Iben^[49] 则认为 AGB 星中金属丰度低的星更容易成为碳星, 而金属丰度高的星则比较困难。Wood 和 Glass 等人^[32,114] 发现, 相同光度的 AGB 长周期变星中, 碳星比非碳星有效温度低、半径大、周期长。

AGB 长周期变星周期都较长, 其中 Mira 变星周期 $P \sim 100-450d$ ^[5,10,17,28,82,83,109], 而 OH/IR 天体的周期则可达 $P \sim 500-2000d$ ^[37,55,93,113]。OH/IR 天体与 Mira 变星处于同一演化序列, Mira 变星是其中较早的阶段, 随着演化, 星风增大而成为 OH/IR 天体^[24,36,70]。Mira 变星与 OH/IR 天体的分界大约在 $\log P \sim 2.7$ 时^[10,109]。由于在 AGB 长周期变星所处区域内同时还存在半规则和不规则变星, 观测中一般将红外波段 I 星等的振幅 $\Delta I \geq 0.9\text{mag}$ 的称为 Mira 变星, 而 $\Delta I < 0.9\text{mag}$ 的称为 SRa^[42]。

曾经有不少人研究过 AGB 长周期变星是否存在良好的周光关系。如果 AGB 长周期变星存在造父变星那样的周光关系, 那么由于 AGB 长周期变星的光度很大, 从而可以选用它们的周光关系作为星团和星系测定距离的依据。Hughes 和 Wood^[42] 根据观测资料进行拟合, 给出了 AGB 长周期变星的周光关系为:

$$\begin{aligned} \langle M_{\text{bol}} \rangle &= -4.39 - 2.9(\log P - 2.4) & P \leq 450d \\ \langle M_{\text{bol}} \rangle &= -3.22 - 7.76(\log P - 2.4) & P > 450d \end{aligned}$$

但是观测同时发现, AGB 长周期变星周光关系的弥散度相当大。对于相同的周期其视星等弥散度 $\sim 0.5\text{mag}$, 红外 JHKL 波段弥散度 $\sim 0.25\text{mag}$ ^[27]。同时随着温度的降低周期也会增长。此外, AGB 长周期变星的周期还与恒星的初始质量有密切关系。主序时初始质量越大, 则相同周期时光度越大。而且 AGB 长周期变星的周期还与初始化学组成、演化年龄及恒星表面 C/O 丰度比值等有关。这些都说明 AGB 长周期变星没有造父变星那样严格的周光关系。

AGB 长周期变星还有一个特征就是振动振幅很大, 可达 $\sim 2.5\text{mag}$ ^[5,28,36,55,66,93,110]。而且振幅大小与周期有关, 周期越长则振幅越大。由于 AGB 长周期变星的周期长、振幅大, 因而很难得到这些星的完整光变曲线, 也就很难得出其准确的平均光度。这样就增大了周光关系的弥散度, 给振动性质的分析造成困难。

观测还发现, 恒星演化到晚期 AGB 阶段时都伴随有相当大的星风。由观测得到的 Mira 变星的星风损失率 $\sim 10^{-7}-3 \times 10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$, 而 OH/IR 天体的星风损失率则可达到 $\sim 10^{-4} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[26,34,36,44,60,61,70,108]。不过星风的膨胀速度都不大, 只有 $4-20\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[60,61,70]。同时还发现, AGB 长周期变星如果只采用 Reimers 的星风公式^[71,72]所描述的平衡星风损失率 $\dot{M} \sim 10^{-8}-10^{-6} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$, 难以在较短的演化时间 ($\sim 10^3-10^4\text{yr}$) 内抛掉全部恒星外壳, 因此人们就提出在恒星演化到 AGB 阶段顶端时, 应该产生比上述正常星风大 100 倍左右的超星风^[14,34,37,46,73,74,85,87]。

观测同时还发现, AGB 长周期变星的巨大的星风物质损失, 同振动有密切关系。首先这类变星的星风比相同光度、质量和半径的正常恒星的星风要大得多^[19,20,80,86,91,105,107,116];

其次, 星风物质损失率与振动的周期、振幅、激波冷却时间以及尘埃颗粒生成率等有关, 例如星风的大小随振动周期的增加而增大^[10,70,109], 其中 Wood^[109] 还给出近似的星风损失率与振动周期的关系为:

$$\log \dot{M} = -11.4 + 0.0125P(d)$$

此外星风的大小随振幅的增加而增大^[25,89,94,108], Whitelock 等人^[89] 对观测资料分析后得到

$$\log \dot{M} = -0.97M_{\text{bol}} + 1.32\Delta M_{\text{bol}} - 12.36$$

说明 AGB 长周期变星的星风与振动有密切的联系。

3 AGB 长周期变星理论研究现状

对 AGB 长周期变星的理论分析主要有两种方法。一种是研究恒星大气的振动性质及结构, 另一种是研究恒星壳层源以外部分的振动性质。下面我们分别对这两种方法加以介绍。

第一种方法是根据理论假设建立球对称的非线性大气振动方程组及周期振动的内边界条件, 通过数值计算得到大气结构随时间的变化^[9-13,39,91-93,95,96]。由于大气物质的振幅与恒星振动的振幅密切相关, 当光球层内恒星物质的振幅很大时, 大气内的振动可以产生激波, 从而使大气的温度、密度分布以及气体的电离和化学组成等都发生变化, 这时大气的性质就同没有发生振动时有很大区别。同时由于激波还会使大气中产生尘埃, 并引起星风; 反过来, 由于一部分声波能量传到大气中, 从而改变了恒星内部振动能量分布, 进而影响到恒星振动的振幅; 并且声波能量的传出还同振动频率有关^[10,12,68], 又会影响到恒星对振动方式的选择。分析恒星大气动力学结构和行为, 可以了解恒星振动的性质以及振动与星风的相互作用。但是用这种方法进行计算时, 人们没有深入研究恒星内部的振动及其激发机制, 只是假设一个振动的内边界条件, 因而只有在深入了解恒星内部振动性质的基础上, 这种方法才能得出更为可靠的结果。

第二种方法是采用 Paczynski^[65] 通过恒星演化计算得到的恒星在 AGB 阶段的结构模型, 然后用经典恒星振动理论对此模型进行振动分析, 得到其振动性质^[29,64,83,113,115]。具体做法就是认为红巨星的演化时标比外层动力学时标长得多, AGB 星壳层源以内中心部分的演化与外层质量无关, 因此认为星风对核心的结构和演化影响极小, 于是就可以不考虑恒星的中心结构, 利用中心质量 M_c 和光度 L 的关系^[65,84,117]:

$$L/L_{\odot} = 59250(M_c/M_{\odot} - 0.495)$$

这里 M_c 指氢燃烧壳以内恒星物质的质量。如果给出一定中心质量 M_c 情况下的恒星总质量 M 和光度 L , 再通过 AGB 在赫罗图中的位置 $M_{\text{bol}} = 38 \log T_{\text{eff}} - 138.5$, 得到恒星的有效温度, 对流参数 α 则由 M_c 和 T_{eff} 加以确定。这时利用表面积分方法, 将恒星结构方程组从对流层底部开始积分, 内边界以内的质量就等于 M_c 。对不同的 M_c 和 M , 选

择不同的 T_{eff} 和 α , 就可得到恒星外壳的结构, 然后再用经典恒星振动理论计算出此时外壳的振动性质。这种方法有一基本假设, 即认为所有 AGB 长周期变星都满足相同的 M_c-L 关系。我们知道, 当 AGB 星壳层源发生热脉动时, 其光度 L 、半径 R 等都发生剧烈变化, 因此可以想到并非 AGB 星的各个阶段都满足相同的 M_c-L 关系。另外, Tuchman 等人 [6-8,82] 指出, 以前的 M_c-L 关系, 只适用于壳层源外部还有较薄的辐射平衡区, 且在热脉动发生前 $0.52 \leq M_c/M_\odot \leq 0.7$ 时的情形。Groenewegen 等人 [33] 还发现, 重元素丰度及星风物质损失, 会对热脉动开始时的 M_c 产生影响。所以采用第二种方法研究 AGB 长周期变星时, 无法研究其振动性质随演化的变化, 有必要由严格的恒星结构演化计算得出恒星结构模型, 然后再用恒星振动计算研究其振动性质。

对 AGB 长周期变星的理论研究发现, 这类变星存在周期—质量—半径关系。Fox 和 Wood [29] 得出的理论 PMR 关系为 $P \propto M^{-0.8} R^2$ 。Wood 等人 [105,108,109,111] 由线性非绝热振动计算得到 AGB 长周期变星基频振动的 PMR 关系为:

$$\log P_0 = -2.07 + 1.94 \log R/R_\odot - 0.9 \log M/M_\odot \quad 0.6 \leq M/M_\odot \leq 1.5$$

$$\log P_0 = -2.44 + 2.09 \log R/R_\odot - 0.77 \log M/M_\odot \quad 2.5 \leq M/M_\odot \leq 5$$

而 Ostile 和 Cox [63,64] 得到的 PMR 关系 ($M \sim 1.4M_\odot$) 为:

基频振动 $\log P_0 = -1.92 + 1.86 \log R/R_\odot - 0.73 \log M/M_\odot$

一阶谐振 $\log P_1 = -1.60 + 1.59 \log R/R_\odot - 0.51 \log M/M_\odot$

AGB 长周期变星研究中存在几个需要深入探讨的问题。首先是 AGB 长周期变星的主序质量问题, 由恒星结构和演化理论可知, 对于主序质量 $\leq 9M_\odot$ 的中小质量单星 (质量同初始化学丰度及所选取的物理参数有关), 可能经历许多次变星阶段 [4,5,40,66], 例如

β Cep、 δ Sct、 δ Cep、RR Lyr 等变星, 当恒星中心氢燃烧结束后就会演化到渐近巨星分支 [47,48,50] (主序质量小于 $1M_\odot$ 的恒星在中心氢或氦燃烧结束后可能直接演化成白矮星)。可是, 是否所有能演化到 AGB 阶段的星都会成为 Mira、OH/IR 等长周期变星? 有不少人根据对麦哲伦云等的红外测光结果分析, 认为大部分 AGB 长周期变星的年龄是 $\sim(11-51) \times 10^9 \text{yr}$, 相应的恒星主序质量 $\leq 1.6M_\odot$, 在 AGB 阶段振动质量 $\leq 1.3M_\odot$ [2,21-23,28,38,40,55,105,114], 但也有人认为 AGB 长周期变星的主序质量为 $1.5-3M_\odot$ [58,85]; Baud 等人 [3] 认为 OH/IR 天体主序质量应为 $2-6M_\odot$, 而 Feast 等人 [24-27] 则指出主序质量大的恒星才能成为周期很长的 AGB 长周期变

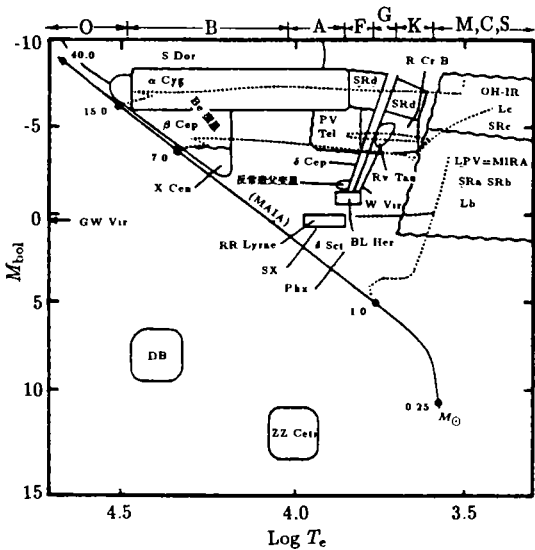


图 2 AGB 长周期变星在赫罗图中的位置 [5]

星。从理论和观测都可看出, 要确定 AGB 长周期变星的主序质量问题, 不能单纯根据恒星演化研究, 而还须将恒星演化和恒星振动相结合来加以讨论。

其次是 AGB 长周期变星的表面化学丰度问题。AGB 星的中心是收缩到白矮星尺度的致密的碳氧简并核, 外壳则是膨胀到红巨星尺度的稀薄延伸大气, 在核与大气之间有氢和氦燃烧壳。由于 AGB 星外壳温度和密度都非常低, 外部基本上是靠超绝热对流传能。这时表面对流区就会深入到恒星内部氢燃烧壳以内。这样通过对流运动就能将内部通过 CNO 反应、 3α 反应、S 过程所产生的重元素带到恒星表面, 造成恒星表面化学丰度会随恒星演化而发生变化, 这就是通常所说的挖掘效应^[49-53,118,119]。由于恒星内部条件和演化阶段的不同, 通过挖掘效应带到 AGB 星表面的化学元素丰度也会发生变化, 表现为 AGB 星有不同的光谱型, 且各种光谱型还有一定的联系。但由于目前恒星对流理论还不完善, 初始化学丰度和核反应速率等的选取都存在一些争议。人们对较低温度条件下原子结合成为原子团、分子和尘埃的了解, 还十分有限, 使得通过理论计算的挖掘效应所得到的结果, 与实测值存在一些差异, 也不能很好解释 AGB 长周期变星表面化学丰度随演化的变化。今后在理论方面需要考虑包括对流、星风等多种因素条件下多种化学元素丰度随恒星演化的变化。

另外就是 AGB 长周期变星的振动方式问题。恒星究竟是处于基频振动, 或是一阶或更高阶谐频振动, 主要取决于其振动常数 $Q = P(\bar{\rho}/\rho_{\odot})^{1/2}$ 。Cox^[16] 曾给出对于所有变星都适用的振动常数与周期、光度、有效温度的关系:

$$\log Q = \log P + 0.5 \log M/M_{\odot} - 0.75 \log L/L_{\odot} + 3 \log T_{\text{eff}} - 11.286$$

从上式可以看出, 温度的确定对于测定恒星的振动常数从而决定恒星处于哪种振动方式, 起到很大影响, 而 AGB 长周期变星观测中有效温度的测定很不精确, 因为这些星周围的分子和尘埃会对辐射产生很大而现在又无法确切知道的谱线覆盖效应和吸收。如果采用 Robertson 等人^[31,76] 提出的由红外 JHKL 测光值与黑体谱相比较得到有效温度的方法, 则有 $T_{\text{eff}} = 5000 / [(J - K) + 0.6]$, 发现 AGB 长周期变星处于一阶谐振^[29,102,103,112,113]。但如果采用 Ridgway 等人^[75] 给出的温度测定法, 则 $T_{\text{eff}} = 7070 / [(J - K) + 0.88]$ 。因此 Willson^[92] 认为 AGB 长周期变星处于基频振动。

此外, Willson 等人^[9-11,39,92,94,108,109] 由恒星大气动力学出发, 作了在解析近似和非线性情况下的理论求解。由计算得到的速度振幅 Δv 与观测中通过测量谱线分裂得到的速度振幅作比较, 认为 AGB 长周期变星处于基频振动, 而 Willson 等人^[97] 由谱线拟合发现, 要产生观测到的氢 Balmer 发射线至少需要 $\Delta v \sim 20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时还要求 $\Delta v_{\text{obs}} < \Delta v_{\text{shock}}$, 也只有基频振动才能满足这一要求。Bowen 等人^[9,14] 通过理论分析认为, Mira 的高阶振动传播到恒星大气时会受到很强的阻尼, 只有基频振动受到的阻尼最小, 因此 Mira 处于基频振动。Ostlie 等人^[64] 用恒星外壳振动方法计算的结果, 也支持 AGB 长周期变星处于基频振动的看法。

但是 Wood 等人^[98-103,113] 根据恒星外壳振动的方法计算, 认为 AGB 长周期变星是一阶谐振, 因为在他们的计算中发现基频振动是不稳定的。由于 AGB 星随着演化光度增大, 振动方式有从高阶向低阶变化的趋势, 一旦 AGB 长周期变星基频开始振动, 就会由

于不稳定性产生巨大的星风,把恒星的整个外壳吹掉,结果恒星就变成了行星状星云,因此不可能有稳定的基频振动存在。Wood^[106]采用恒星大气动力学方法与Willson^[92]不同的另一种解析近似,得到AGB长周期变星一阶谐振产生的速度振幅 $\Delta v=28\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,与观测值 $\Delta v_{\text{obs}}\sim 26\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 相符,因而认为此时恒星处于一阶谐振。

Whitelock^[88]对LMC和SMC中长周期变星分析的结果,认为恒星振动方式受金属丰度的影响。贫金属Mira变星是基频振动,而富金属Mira则是一阶谐振。另外有些人^[67,96,105]则认为,光学波段长周期变星与OH/IR天体的振动方式不同,光学波段长周期变星是一阶谐振,而OH/IR天体则是基频振动。

由此可以看出,对于AGB长周期变星的振动方式,不论理论还是观测,都还不能给出比较明确的答案,有必要作进一步的研究。

另外就是AGB星的星风机制问题。AGB星存在很大的星风物质损失,这样的星风产生机制,也是目前理论研究中的一个难题。一般认为,晚型星的星风机制主要有热驱动、辐射压驱动、Alfvén波驱动、振动驱动等几种^[18-20,61,8,120-121]。热驱动只适用于类太阳型恒星星风,辐射压驱动在AGB星大气中不足以产生如此大的星风,Alfvén波驱动无法解释IUE观测谱线,振动驱动也不能产生这么强大的星风^[10,19,20,61,96,101]。使AGB星产生如此强大星风物质损失的一种较为普遍承认的解释是:强大的星风是由振动和辐射压联合作用产生的,首先大振幅振动产生激波,把恒星物质带到恒星表面,当温度下降到可以形成尘埃时,由辐射压作用于尘埃,尘埃与气体碰撞使物质加速,从而产生巨大的星风^[18,25,86,94,116]。但是,由于现在对AGB星的振动和尘埃的生成等都存在许多有争议和未知的问题,AGB星星风机制尚需进一步加以研究。

还有一个问题,就是热脉动与振动和星风的相互影响及超星风的产生问题。AGB星的中心是高温高密的碳氧简并核,由于中微子带走大量能量,使中心碳无法点燃,AGB星表面所辐射出的能量,主要是由氢壳层燃烧所提供,当氢壳层燃烧所产生的氦达到一定数量时($M_c\sim 0.6M_\odot$ 时 $M_{\text{He}}\sim 10^{-2}M_\odot$ 、 $M_c\sim 1.0M_\odot$ 时 $M_{\text{He}}\sim 10^{-3}M_\odot$),氦壳层就开始燃烧,这时由于 3α 反应对温度非常敏感,而且这种反应的能量释放速率大于由辐射和对流所能带走能量的速率,区域能量存积使氦壳层温度升高,压强增大,核产能率也增大, $L_{\text{He}}=10^7-10^8L_\odot$, $T_{\text{He}}=3-5\times 10^8\text{K}$,因而这一区域开始膨胀,氦壳层源之外的物质被推到远离恒星中心温度较低的地方,这时氢壳层源熄灭,恒星不久就达到能量平衡并停止膨胀,恒星所辐射出的能量由氦壳层源提供,等到氦燃烧把原来氢燃烧所产生的氦基本燃尽时,恒星就会收缩以使氢壳层重新点燃,这样就完成热脉动的一个完整周期^[47,50,53]。Wood^[104]指出,随着热脉动的变化,恒星的振动性质和星风也会发生变化。振动周期会不断增长,与振动相关的星风则会变成巨大的超星风,使恒星的外壳迅速被抛掉,而AGB星即变为行星状星云。超星风则可能是由于恒星振动由一阶谐频向基频转变时的不稳定性造成的,也可能是恒星振动与星风的相互作用或是热脉动造成的^[73,74,91,113]。以上虽然指出热脉动的性质及其与振动和星风的相互影响,但其中具体物理过程还不十分清楚,尤其是热脉动如何影响恒星的振动性质,如何产生超星风等,都需作进一步研究。

4 今后工作的展望

AGB 长周期变星的观测和理论研究已取得巨大进展, 但无论研究方法和结果都还有不少问题, 值得进一步改进和深入研究。今后需要解决的主要问题有以下几个。

理论研究方面:

(1) 研究方法上。对 AGB 长周期变星的研究存在一些难以解决的困难和问题, 有必要用恒星演化和恒星振动相结合的方法, 考察 AGB 长周期变星的振动性质及其随恒星演化的变化。

(2) AGB 长周期变星的整个外壳基本上都处于对流状态, 同时由于延伸外壳的温度、密度都很低, 混和程理论中混和长度较大, 流体元走过混和长度所需时间与振动周期可比, 因而有必要引入随时间的对流理论, 考虑对流与振动的相互作用。

(3) 有振动时的恒星大气性质与没有发生振动时不同, 特别是如果有激波产生就会对大气结构产生很大影响, 而振动能由大气传输出去又会影响到振动方式的选择, 因而如果能够把恒星演化、恒星振动与恒星大气理论结合起来, 就能对 AGB 长周期变星及其他变星的振动性质有更全面的了解。

(4) AGB 长周期变星的振动有很强的非线性混沌效应, 因而有必要对这类变星的振动性质进行非线性振动分析。

(5) AGB 星表面化学丰度随演化的变化, 以及 AGB 星的星风和超星风产生的机制问题, 也将是今后理论工作中值得进一步探讨的问题。

实测研究方面:

(1) AGB 长周期变星振幅大, 周期长, 只是短时间观测到的光度就与平均光度相差很大, 用这样的观测资料分析演化和振动性质时, 不但弥散度很大, 而且还有可能得出错误的结论, 因而需要进行长期多波段观测。

(2) 由于强大的星风物质损失, AGB 长周期变星周围有较厚的星际介质, 而星际介质中分子和尘埃对辐射的吸收和谱线覆盖效应, 现在还不十分清楚, 严重影响到恒星有效温度的测量, 而振动常数 Q 又对有效温度极其敏感。为了研究 AGB 长周期变星的振动方式, 需要找到测定 AGB 星有效温度的合理方法。

(3) 不同金属丰度 AGB 长周期变星的演化和振动性质有所不同, 因而需要对不同金属丰度的星团和星系中的 AGB 长周期变星分别加以研究, 然后再把它们性质加以综合比较, 以得到金属丰度对 AGB 长周期变星演化和振动的影响。

(4) 强大的星风物质损失对 AGB 长周期变星的演化、振动等都有很重要的影响, 但目前测定星风物质损失率的方法还存在一些缺陷, 需要找到准确测定 AGB 长周期变星星风物质损失率的方法。

致谢 本文作者十分感谢黄润乾、熊大闰、陈 彪、陈培生、吴光节等几位先生提出的宝贵意见和建议。

参 考 文 献

- [1] Aikawa T. In: Nomoto K ed. Atmospheric diagnostics of stellar evolution, Lecture Notes in Physics, Vol.305. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 193
- [2] Baud B *et al.* *Ap. J.*, 1985, 292: 628
- [3] Baud B, Habing H J. *Astron. Astrophys.*, 1983, 127: 73
- [4] Becker S A. In: Maeder A, Renzini A eds. Observational tests of the stellar evolution theory, Proc. of IAU symp. No.105, Geneva, 1983, Dordrecht: Reidel, 1984: 83
- [5] Becker S A. In: Cox A N, Sparks W M, Starrfield S G eds. Stellar pulsation, Lecture Notes in Physics, Vol.274, Los Alamos, 1986, Berlin: Springer-Verlag, 1987. 16
- [6] Blöcker T, Schönberner D. *Astron. Astrophys.*, 1991, 244: L43
- [7] Boothroyd A I, Sackmann I-J. *Ap. J.*, 1992, 393: L21
- [8] Cassinelli J P. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1979, 17: 275
- [9] Bowen G H. *Ap. J.*, 1988a, 329: 299
- [10] Bowen G H. In: Stalio R, Willson L A eds. Pulsation and mass loss in stars. Dordrecht: Kluwer, 1988b: 3
- [11] Bowen G H. In: Johnson H R, Zuckerman B eds. Evolution of peculiar red giants, Proc. of IAU colloq. No.106, Bloomington, 1988. Cambridge: Cambridge University Press, 1988c: 269
- [12] Bowen G H. In: Buchler J R, Gottesman S T eds. Nonlinear astrophysical fluid dynamics, *Ann. N.Y.A.S.*, 1990a, 617: 104
- [13] Bowen G H. In: Buchler J R ed. The numerical modeling of nonlinear stellar pulsation. Dordrecht: Kluwer, 1990b. 155
- [14] Bowen G H, Willson L A. *Ap. J.*, 1991, 375: L53
- [15] Collins G W. The fundamental of stellar astrophysics. New York: W.H.Freeman and Company, 1989. 201
- [16] Cox J P. Theory of stellar pulsation. Princeton: Princeton University Press, 1980. 135
- [17] de Jager C. The brightest stars. Dordrecht: Reidel, 1980. 69
- [18] de Jager C, Nieuwenhuijzen H. In: Nomoto K ed. Atmospheric diagnostics of stellar evolution, Lecture Notes in Physics, Vol.305. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 102
- [19] Drinkwater M J, Wood P R. In: Morries M, Zuckerman B eds. Mass loss from red giants. Dordrecht: Reidel, 1985. 257
- [20] Fadeyev Ya A. In: Nomoto K ed. Atmospheric diagnostics of stellar evolution, Lecture Notes in Physics, Vol.305. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 174
- [21] Feast M W. *M.N.R.A.S.*, 1984, 211: 51
- [22] Feast M W. *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 1985a, 56(1): 213
- [23] Feast M W. *The Observatory*, 1985b, 105(1066): 85
- [24] Feast M W. In: Schmidt E G ed. The use of pulsation stars in fundamental problems of astronomy, Proc. of IAU colloq. No.111, Lincoln, 1988, Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 205
- [25] Feast M W. In: Bergeron J ed. Highlights of astronomy. Dordrecht: Reidel, 1992a, 9. 613
- [26] Feast M W. In: de Jager C, Nieuwenhuijzen H eds. Instabilities in evolved super- and hypergiant. Amsterdam: North-Holland, 1992b. 18
- [27] Feast M W *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1989, 241: 375

- [28] Feast M W, Whitelock P A. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 33
- [29] Fox M W, Wood P R. *Ap. J.*, 1982, 259: 198
- [30] Frogel J A. *Ap. J.*, 1983, 272: 167
- [31] Glass I S, Feast M W. *M.N.R.A.S.*, 1982, 199: 245
- [32] Glass I S *et al.* In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 51
- [33] Groenewegen M A T, de Jong T. *Astron. Astrophys.*, 1993, 267: 410
- [34] Habing H J. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 291
- [35] Habing H J. In: Bergeron J ed. Highlights of astronomy. Dordrecht: Reidel, 1992, 9. 605
- [36] Habing H J, de Lintel Hekkert P, van der Veen W E C J. In: Torres-Peimbert S ed. Planetary nebulae, Proc. of IAU symp. No.131, Mexico City, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1989: 359
- [37] Herman J. In: Morries M, Zuckerman B eds. Mass loss from red giants. Dordrecht: Reidel, 1985. 215
- [38] Herman J, Habing H J. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 55
- [39] Hill S A, Willson L A. *Ap. J.*, 1979, 229: 1029
- [40] Hoffmeister C, Richter G, Wenzel W. Variable stars. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 54, 68
- [41] Hughes S M G. *A. J.*, 1989, 97: 1634
- [42] Hughes S M G, Wood P R. *A. J.*, 1990, 99: 784
- [43] Hughes S M G, Wood P R, Reid N. In: Haynes R, Milne D eds. The Magellanic clouds, Proc. of IAU symp. No.148, Sydney, 1990, Dordrecht: Kluwer, 1991: 81
- [44] Humphreys R M. In: de Loore C W H, Willis A J, Laskarides P eds. Luminous stars and associations in galaxies, Proc. of IAU symp. No.116, Porto Heli, Greece, 1985, Dordrecht: Reidel, 1986: 45
- [45] Iben I. *Ap. J.*, 1977, 217: 788
- [46] Iben I. In: Chiosi C, Stalio R eds. Effects of mass loss on stellar evolution, Proc. of IAU colloq. No.59, Italy, 1980, Dordrecht: Reidel, 1981: 373
- [47] Iben I. In: Iben I, Renzini A eds. Physical processes in red giants. Dordrecht: Reidel, 1981.3
- [48] Iben I. In: Araki H *et al* eds. Cool stars, stellar systems, and the Sun. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 309
- [49] Iben I. In: Maeder A, Renzini A eds. Observational tests of the stellar evolution theory, Proc. of IAU symp. No.105, Geneva, 1983, Dordrecht: Reidel, 1984: 3
- [50] Iben I. In: Morries M, Zuckerman B eds. Mass loss from red giants. Dordrecht: Reidel, 1985. 1
- [51] Iben I. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 157
- [52] Iben I. *Ap. J. Suppl.*, 1991, 76 :55
- [53] Iben I, Renzini A. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1983, 21: 271
- [54] Iben I, Truran J W. *Ap. J.*, 1978, 220: 980
- [55] Jones T J. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 3
- [56] Jones T J *et al.* *Ap. J.*, 1982, 253: 208

- [57] Kippenhahn R, Weigert A. *Stellar structure and evolution*. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 398
- [58] Kwok S. In: Chiosi C, Stalio R eds. *Effects of mass loss on stellar evolution*, Proc. of IAU colloq. No.59, Italy, 1980, Dordrecht: Reidel, 1981: 347
- [59] Kwok S. In: Torres-Peimbert S ed. *Planetary nebulae*, Proc. of IAU symp. No.131, Mexico City, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1989: 401
- [60] Kwok S, Purton C R. In: Conti P S, de Loore C W H eds. *Mass loss and evolution of O-type stars*, Proc. of IAU symp. No.83, Vancouver Is., 1978, Dordrecht: Reidel, 1979: 151
- [61] Linsky J L. In: Chiosi C, Stalio R eds. *Effects of mass loss on stellar evolution*, Proc. of IAU colloq. No.59, Italy, 1980, Dordrecht: Reidel, 1981: 187
- [62] Lucy L B. In: Hillebrandt W, Meger-Hofmeister E, Thomas H C eds. *Physical processes in comets, stars, and active galaxies*. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 125
- [63] Ostile D A. Ph.D. Thesis, Iowa State University, 1982
- [64] Ostile D A, Cox A N. *Ap. J.*, 1986, 311: 864
- [65] Paczynski B. *Acta. Astron.*, 1970, 20: 47
- [66] Petit M. *Variable stars*. Chichester: John Wiley & Sons, 1987. 53, 65
- [67] Phillips J P. In: Torres-Peimbert S ed. *Planetary nebulae*, Proc. of IAU symp. No.131, Mexico City, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1989: 425
- [68] Pijpers F P. *Astron. Astrophys.*, 1993, 267: 471
- [69] Pilachowski C A. In: Nomoto K ed. *Atmospheric diagnostics of stellar evolution*, Lecture Notes in Physics, No.305. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 17
- [70] Pottasch S R. *Planetary nebulae*. Dordrecht: Reidel, 1984. 226, 242
- [71] Reimers D. *Mem. Soc. R. Sci. Liège, 6^e Ser.*, 1975, 8: 369
- [72] Reimers D. In: Iben I, Renzini A eds. *Physical processes in red giants*. Dordrecht: Reidel, 1981. 269
- [73] Renzini A. In: Chiosi C, Stalio R eds. *Effects of mass loss on stellar evolution*, Proc. of IAU colloq. No.59, Italy, 1980, Dordrecht: Reidel, 1981: 319
- [74] Renzini A. In: Torres-Peimbert S ed. *Planetary nebulae*, Proc. of IAU symp. No.131, Mexico City, 1987, Dordrecht: Kluwer, 1989: 391
- [75] Ridgway S T *et al.* *Ap. J.*, 1980, 235: 126
- [76] Robertson B S C, Feast M W. *M.N.R.A.S.*, 1981, 196: 111
- [77] Schönberner D. In: Kwok S, Pottasch S R eds. *Late stages of stellar evolution*. Dordrecht: Reidel, 1987. 337
- [78] Schönberner D. In: Martinez A P ed. *Planetary and proto-planetary nebulae: from IRAS to ISO*. Dordrecht: Reidel, 1987. 113
- [79] Smak J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1966, 4: 19
- [80] Takeuti M, Tanaka Y. In: Nomoto K ed. *Atmospheric diagnostics of stellar evolution*, Lecture Notes in Physics, No.305. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 195
- [81] Tsuji T. In: Nomoto K ed. *Atmospheric diagnostics of stellar evolution*, Lecture Notes in Physics, No.305. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 158
- [82] Tuchman Y. In: Flower D R ed. *Planetary nebulae*, Proc. of IAU symp. No.103, London, 1982, Dordrecht: Kluwer, 1983: 281
- [83] Tuchman Y, Glasner A, Barkat Z. *Ap. J.*, 1983, 268: 356
- [84] Uns U. *Nauch. Inform. Acad. Nauk.*, 1970, 17: 3

- [85] van der Veen W E C J. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 309
- [86] Wannier P G. In: Araki *et al* eds. Cool stars, stellar systems, and the Sun. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 296
- [87] Weidemann V. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1990, 28: 103
- [88] Whitelock P A. *M. N. R. A. S.*, 1986, 219: 525
- [89] Whitelock P A, Pottasch S R, Feast M W. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 269
- [90] Willson L A. In: Chiosi C, Stalio R eds. Effects of mass loss on stellar evolution, Proc. of IAU colloq. No.59, Italy, 1980, Dordrecht: Reidel, 1981: 353
- [91] Willson L A. In: Iben I, Renzini A eds. Physical processes in red giants. Dordrecht: Reidel, 1981. 225
- [92] Willson L A. In: Cox J P, Hansen C J eds. Pulsations in classical and cataclysmic variable stars. Boulder, Colorado: Joint Institute for Laboratory Astrophys., 1982. 269
- [93] Willson L A. *JAAVSO*, 1986, 15(2): 228
- [94] Willson L A. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 253
- [95] Willson L A, Bowen G H. In: Maeder A, Renzini A eds. Observational tests of the stellar evolution theory, Proc. of IAU symp. No.105, Geneva, 1983, Dordrecht: Reidel, 1984: 183
- [96] Willson L A, Hill S J. *Ap. J.*, 1979, 228: 854
- [97] Willson L A, Kowalsky P. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987. 277
- [98] Wood P R. *Ap. J.*, 1974, 190: 609
- [99] Wood P R. In: Fitch W S ed. Multiple periodic variable stars, Proc. of IAU colloq. No.29, Budapest, 1975, Dordrecht: Reidel, 1975: 69
- [100] Wood P R. In: Fitch W S ed. Multiple periodic variable stars, Proc. of IAU colloq. No.29, Budapest, 1975, Budapest: Akademiai Kiads, 1976: 113
- [101] Wood P R. *Ap. J.*, 1979, 227: 220
- [102] Wood P R. In: Iben I, Renzini A eds. Physical processes in red giants. Dordrecht: Reidel, 1981. 205
- [103] Wood P R. In: Cox J P, Hansen C J eds. Pulsations in classical and cataclysmic variable stars. Boulder, Colorado: Joint Institute for Laboratory Astrophys., 1982. 284
- [104] Wood P R. In: Jaschek M, Keenan P C eds. Cool stars with excesses of heavy elements. Dordrecht: Reidel, 1985. 185
- [105] Wood P R. In: Cox A N, Spark W M, Starrfield S G eds. Stellar pulsation, Lecture Notes in Physics, Vol.274. Berlin: Springer-Verlag, 1987a. 250
- [106] Wood P R. In: Kwok S, Pottasch S R eds. Late stages of stellar evolution. Dordrecht: Reidel, 1987b. 197
- [107] Wood P R. In: Nomoto K ed. Atmospheric diagnostics of stellar evolution, Lecture Notes in Physics, No.305. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 31
- [108] Wood P R. In: Cacciari C, Clementini G eds. Confrontation between stellar pulsation and evolution, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol.11, San Francisco: ASP, 1990a: 355
- [109] Wood P R. In: Mennessier M O, Omont A eds. From miras to planetary nebulae. Montpellier, France: Edition Frontiers, 1990b. 67

- [110] Wood P R *et al.* In: Haynes R, Milne D eds. The Magellanic clouds, Proc. of IAU symp. No.148, Sydney, 1990, Dordrecht: Kluwer, 1991: 386
- [111] Wood P R *et al.* Ap. J., 1992, 397: 552
- [112] Wood P R, Bessell M S, Fox M W. Proc. Astron. Soc. Aust., 1981, 4: 203
- [113] Wood P R, Bessell M S, Fox M W. Ap. J., 1983, 272: 99
- [114] Wood P R, Bessell M S, Paltoglou G. Ap. J., 1985, 290: 447
- [115] Wood P R, Faulkner D J. Ap. J., 1986, 307: 659
- [116] Wood P R, Vassiliadis E. In: Bergeron J ed. Highlights of astronomy. Dordrecht: Reidel, 1992, 9. 617
- [117] Wood P R, Zarro D M. Ap. J., 1981, 247: 247
- [118] Iben I, Renzini A. Ap. J., 1982, 263: L23
- [119] Iben I, Renzini A. Physics Reports, 1984, 105: 331
- [120] Chiosi C, Maeder A. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1986, 24: 329
- [121] Renzini A. In: Dickens R J, Perry J E eds. The galaxy and the local group. Herstmonceux: RGO Bull., 1976, 182: 87

(责任编辑 刘金铭)

Progresses in Studies on AGB Long-period Variable Stars

Gong Zhigang Li Yan

(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

Abstract

AGB long-period variable stars are low or intermediate mass stars at the asymptotic giant branch stages, which have been widely investigated in the recent decades. As there are so many improvements in the theoretical and observational researches of AGB LPVs, a review ought to be given to show what we've known and what needs to be known. Because of their strong pulsations and large mass loss rates, to study AGB LPVs may give us a lot information on stellar pulsation, late stage of stellar evolution and mass loss mechanisms. Progress, together with some problems, is discussed in detail in this paper in order that we can get more information on AGB long-period variable stars.