

文章编号: 1000-8349(2006)01-0054-08

AGB 星 s-过程核合成相关问题的研究进展

张 波¹, 崔文元^{1,2}

(1. 河北师范大学 物理系, 石家庄 050016; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 综述了近年来 AGB 星核合成理论的研究情况, 述及 AGB 星的结构与 s-过程核合成有关的中子辐照量分布、人们比较关注的铅星与非铅星、后 AGB 星元素丰度分布及与 AGB 星核合成有关的 s+r 星。

关键词: 天体物理学; AGB 星; 综述; 中子俘获; s-过程; 铅星; 后 AGB 星; s+r 星
中图分类号: P145.4 **文献标识码:** A

1 引 言

1957 年, Burbidge 等人^[1]在恒星元素核合成方面做出了开创性工作。他们指出, 中子俘获在重元素的核合成方面起主导作用。中子俘获有两种不同、彼此独立的过程, 即快中子俘获过程 (r-过程) 和慢中子俘获过程 (s-过程)。它们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-过程则发生在恒星内部宁静的 He 燃烧时期, 如红巨星阶段或渐近巨星分支 (Asymptotic Giant Branch, AGB) 阶段^[2]。在 r-过程和 s-过程中, 种子核 (主要是 ^{56}Fe 及其他铁族元素, 如 Co、Ni 等) 俘获中子形成重元素。s-过程作为重元素核合成理论^[1]的重要组成部分, 为解释自然界重元素的起源提供了有力的理论依据。

2 中子辐照量分布与 AGB 星 s-过程核合成

关于 s-过程核合成的研究, 历史上可分为 3 个阶段。20 世纪 60 年代, Clayton 等人^[3]通过解经典 s-过程方程组, 得到单辐照解 $\psi(\tau)$ 。由于太阳系核素丰度分布是长期星系化学演化的结果, 对应于各种中子俘获核合成结果的积累, 当唯像地取中子辐照量分布函数为指数衰减形式 $\rho_{\text{sun}}(\tau) = G \exp(-\tau/\tau_0)$ 时 (其中中子辐照量 $\tau = \int N_n V_T dt$, N_n 是中子密度, V_T 是中子平均热运动速度, G 是比例常数, τ_0 是平均中子辐照量), 对单辐照解进行加权平均

收稿日期: 2005-04-04; 修回日期: 2005-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10373005)

($\sigma_A N_A = \int_0^\infty \rho_{\text{sun}}(\tau) \psi(\tau) d\tau$, 其中 σ_A 是核素 A 的平均中子俘获截面, N_A 是新合成的质量数为 A 的核素的粒子数目), 可较好地拟合出太阳系的核素丰度分布^[4]。20 世纪 70 至 80 年代, AGB 星热脉冲对流 He 壳层核合成模型^[5]能自然地给出指数形式的中子辐照量分布 $\rho_{\text{AGB}}(\tau)$, 这为太阳系中子辐照量分布函数 $\rho_{\text{sun}}(\tau)$ 取指数形式提供了天体物理依据, 但对流核合成模型仍存在强分量问题, 即理论计算的强分量丰度偏低。

20 世纪 90 年代, Straniero 等人^[6,7]在 AGB 星的演化和核合成研究方面跨出了重要的一步。他们运用 Schwarzschild 判据处理对流, 发现在具有太阳金属丰度、质量为 $1.5 M_\odot$ (不考虑质量损失) 或 $2 M_\odot$ (考虑适当的质量损失率) 的恒星中, 可以自然地得到导致恒星表面 ^{12}C 和 s-核素增丰的“第三次挖掘”。他们指出, ^{13}C 中子源是在相邻两次脉冲间隔之间、处于辐射平衡状态的富 He 中间壳层中释放中子从而合成重核素的。采用这一新的 s-过程核合成机制, Straniero 等人^[7,8]计算了低质量 TP-AGB 星的核合成, 并给出与“第三次挖掘”有关的物理量随脉冲数的变化情况。Gallino 等人^[9]进一步解释并发展了上述机制。他们依据混入 H、He 壳层间的 q 层 (^{13}C pocket) 中的质子由外到内的质量不同, 将 q 层细分为 3 个区域。在这 3 个区域内, ^{12}C 吸收质子并通过系列反应形成 ^{13}C 并释放出中子, 因而 s-过程核合成发生在这种辐射环境下的 q 层内。1999 年, Busso 等人^[10]详细评述了这一机制。

Gallino 等人^[9]的研究表明, 对于 ^{13}C 在热脉冲间隔阶段的辐射平衡状态释放中子的情况, AGB 星核合成区域内中子辐照量的大小与位置有关, 其中子辐照量分布函数 $\rho_{\text{AGB}}(\tau)$ 更接近于几个单辐照的迭加。由于仍沿用对流核合成模型中原子核在经历相同的脉冲数后将获得相同的中子照射次数的假设, 使得这一结论过于简化, 其分布函数形式仍值得进一步研究。事实上, 根据辐射核合成模型, 同一次脉冲注入到对流 He 壳层中的新鲜原子核在经历相同的脉冲数后, 将获得不同的中子照射次数, 而且经历相同照射次数的种子核因其在核合成区域中所处位置不同, 也将具有不同的中子辐照量。既然基于指数辐照分布的经典模型和辐射核合成恒星模型都能给出太阳系的核素丰度分布, 那么, 这两个模型的中子辐照量分布就不应有太大差异(原则上说, 相似的丰度分布应与相似的中子辐照量分布对应)。进一步的工作应基于同一次脉冲注入到对流 He 壳层中的新鲜原子核在经历相同的脉冲数后将获得不同的中子照射次数, 得到 He 壳层内经历各种照射次数的种子核数目占 He 壳层内种子核总数的比例, 然后再考虑经历相同照射次数的种子核因其在核合成区域中所处位置不同将具有不同的中子辐照量, 得到 AGB 星 He 壳层内的中子辐照量分布函数 $\rho_{\text{AGB}}(\tau)$ 。对 AGB 星 He 壳层内的中子辐照量分布函数研究, 既可以确定参数特定取值情况下 AGB 星 s-过程核合成结果给出太阳系核素丰度分布的原因, 又可以研究不同质量及金属丰度 AGB 星 s-过程核合成元素丰度的分布规律, 并为进一步解释太阳系唯像的中子辐照量分布的指数衰减形式打下基础。

Travaglio 等人^[11]对 AGB 星 s-过程核合成的研究表明, 重元素产量和丰度分布强烈地依赖于金属丰度(当 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.3$ 时, 核合成结果可以得到太阳系分布), 在贫金属环境下其丰度分布与太阳系分布不相似。显然, 贫金属环境下中子俘获元素丰度分布规律问题仍没有得到解决。最近 Straniero 等人^[12]评述了近年来关于 AGB 星结构和演化的研究进展, 指出进一步的工作应集中解决 ^{13}C pocket 形成过程中的流体动力学不定性方面的问题。目前研究星系各演化阶段重元素丰度分布的主要方法, 仍是将单颗恒星丰度观测值与 AGB 星 s-过程核合成结果^[13~15]或太阳系的核素丰度分布^[16~18]进行比较。由于各恒星自身物理状态及所

处的物理环境的多样性,如恒星自转、初始质量、初始金属丰度等因素的影响,现在还没有得到确定的结果^[18,19]。从星系化学演化角度看,引入并利用随时间变化的星系中子辐照量分布函数 $\rho_{\text{gal}}(\tau, t)$,来描述各演化阶段星系s-过程核素丰度的分布规律以及太阳系中子辐照量分布的形成应该是简洁有效的,但目前国际上这方面的研究仍为空白。太阳系唯像的中子辐照量分布函数 $\rho_{\text{sun}}(\tau)$ 与AGB星核合成区域内中子辐照量分布函数 $\rho_{\text{AGB}}(\tau)$ 既有明显区别又有紧密联系。虽然目前s-过程理论已取得重要成果,但由于涉及到与恒星质量及金属丰度有关的AGB星s-过程核合成详细结果以及中子俘获元素的星系化学演化等复杂理论问题, $\rho_{\text{sun}}(\tau)$ 与 $\rho_{\text{AGB}}(\tau)$ 的关系还没有建立, $\rho_{\text{sun}}(\tau)$ 为什么是指数形式也一直没有定量解释,这些问题的解决不可避免地要涉及对星系中子辐照量分布函数的研究。

利用星系中子辐照量分布函数既可得到各演化阶段星系s-过程核素丰度的分布规律,确定s-过程对星系中子俘获元素丰度的相对贡献,也可对r-过程理论提供更准确的丰度分布约束条件,探求作为研究丰度分布问题基础的太阳系核素丰度分布、太阳系s-过程丰度分布和太阳系r-过程丰度分布的典型性,解决贫金属环境下星系中子俘获元素丰度的平均分布问题,从而对检验元素核合成理论、认识星系化学演化和太阳系的形成,以及核天体物理学中一系列基本问题起到关键作用。目前观测到重元素丰度的AGB星和贫金属星已达数百个,对这些丰度观测资料进行分析,从理论和观测角度得出中子俘获元素丰度分布及演化规律的时机已逐渐成熟^[20]。

3 铅星与非铅星

一些外包层呈现重元素超丰而未观测到 ^{99}Tc 的特殊红巨星(包括Ba星、CH星等),由于光度太低,理论上认为它们还未演化到AGB阶段^[21]。而AGB星是s-过程核素最主要的来源^[22],因此,人们认为,这类恒星同AGB星的重元素超丰有着完全不同的机制——可能来自双星物质吸积^[21]。Lambert等人^[23]将富含C及s-核素,但观测不到 ^{99}Tc 的恒星取名为“外赋AGB星(Extrinsic AGB stars)”。由于双星间的质量传输发生在 10^6 yr以前,于是在原AGB星中产生的 ^{99}Tc 几乎全部衰变。Ba星和CH星、外赋S星、贫金属的铅星(Pb stars)与非铅星以及s+r星都属于外赋AGB星^[24,25]。由于外赋AGB星的元素丰度分布间接反映了AGB星核合成特点,因此对研究AGB星核合成的物理条件具有重要意义。特别是C超丰的极贫金属星,由于形成年代较早,质量较大的主星(AGB星)已演化结束(现在是白矮星),目前只能观测到它的伴星——外赋AGB星^[19,25,26]。

2000年,Goriely和Mowlavi^[27]的低质量AGB星核合成模型预言:在金属丰度较高时,由于核合成区域内中子数密度较低,中子辐照量较小,合成铅的效率较低,铅相对于其他重元素不会超丰;而当金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.3$ 时,由于核合成区域内中子数密度较高(中子数密度近似与金属丰度成反比),中子辐照量也较大,合成铅的效率较高,铅相对于其他重元素超丰。富s-过程的低质量AGB星都是铅星($[\text{Pb}/\text{hs}] \geq 1$,其中hs代表较重中子俘获元素,如Ba、La、Ce)。上述预言被欧洲南方天文台的研究人员所证实^[28]。他们利用3.6 m天文望远镜观测到了3颗铅星——HD 187861、HD 224959和HD 196944。不过他们同时指出,符合金属丰度条件的贫金属星LP 625-44($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.71$)并不是铅星。2001年Busso等人^[13]为

了解释低金属丰度 AGB 星的元素丰度观测结果, 曾人为地将标准情况的中子数密度降低 24 倍。最近 Straniero 等人^[12] 为解释低金属丰度 AGB 星铅的观测丰度分布 (如图 1 所示), 更是将标准情况的中子数密度降低 75 倍。这意味着, 贫金属环境下中子数密度与太阳金属环境几乎没有区别, 这与中子数密度的金属丰度依赖关系不一致^[29]。很明显, 目前的 AGB 星核合成模型还不能合理解释非铅星的存在^[30,31]。

Aoki 等人^[32] 利用不依赖于任何具体恒星演化模型参数化方法, 很好低金属丰度地拟合出非铅星 (LP 625-44 和 LP 706-7) 的 s-过程核素丰度。该方法中, 核素最终的丰度只与 4 个物理量有关, 它们是: 每次中子照射的持续时间 Δt 、两次脉冲的重叠因子 r 、发生 s-过程的温度 T_9 (以 10^9 K 为单位) 及中子数密度 N_n 。这几个量结合起来可以给出每次照射的中子辐照量 $\Delta\tau = V_T N_n \Delta t$, 其中 V_T 是给定温度下的中子平均热运动速度。在热脉冲 AGB 核合成模型中, 每次脉冲的中子辐照量 $\Delta\tau$ 和重叠因子 r 是两个重要的物理参量。Aoki 等人对非铅星 (LP 625-44 和 LP 706-7) 的丰度模拟结果表明, 其重叠因子 r 仅为 0.1, 远低于 Gallino 等人^[9] 给出的太阳系金属丰度下低质量 AGB 星的重叠因子 ($r = 0.4 \sim 0.7$)。最近对某些 C 超丰极贫金属星的观测结果显示^[33,19], 其重元素超丰较少, 甚至几乎不超丰。

可以看出, 非铅星的丰度模拟结果以及极贫金属星的一系列丰度观测事实, 对低金属 AGB 星核合成模型提出了严峻的挑战, 目前的恒星演化理论还不能解释上述观测事实^[33,19]。由于完全参数化方法脱离了具体的恒星演化模型, 即脱离了核合成的物理环境, 所以只能得到与核合成相关的物理参量, 不能用来解释贫金属 (外赋) AGB 星既有铅星又有非铅星的物理原因。事实上, 完全参数化方法所涉及的 4 个参量与 AGB 星演化过程中的恒星参量密切相关, 如中子数密度 N_n 与恒星初始金属丰度相关, 重叠因子 r 及相邻两次脉冲的时间间隔 (约等于中子辐照的持续时间) 与恒星的核心质量相关, 因此与恒星演化计算结果相结合的参数化方法可能是研究贫金属 AGB 星元素丰度分布以及铅星问题简洁而有效的方法。从恒星演化角度看, s-过程核合成的结果应主要依赖于 AGB 星的初始金属丰度和初始质量, 铅星作为低质量、低金属丰度 AGB 星的演化产物, 其形成过程既具有 AGB 星演化的共性, 又具有自身的特点。

AGB 星核合成区域内, 在温度确定、中子数密度随金属丰度变化规律确定的情况下, 重叠因子 r 和每次中子辐照的持续时间 (约等于相邻两次脉冲的时间间隔) 是 AGB 星核合成模型的重要物理参量, 而这两个参量与 AGB 星的核心质量密切相关。1977 年 Iben^[34] 根据中等质量的恒星演化模型, 给出了重叠因子 r 随核心质量的变化关系。结果表明, 随着核心质量的增加, 重叠因子 r 逐渐降低。当核心质量达到 $1.4 M_\odot$ (初始主序质量约为 $8 M_\odot$) 时, 重叠因子 r 约为 0.1。这一结果与非铅星的拟合结果非常接近。由于重叠因子 r 主要由核心质量决定, 1986 年 Howard 等人^[35] 将此公式推广为计算 AGB 星重叠因子 r 的普适公式。

Gallino 等人^[9] 在考虑星风质量损失的情况下, 给出了新的低质量 AGB 星核合成模型,

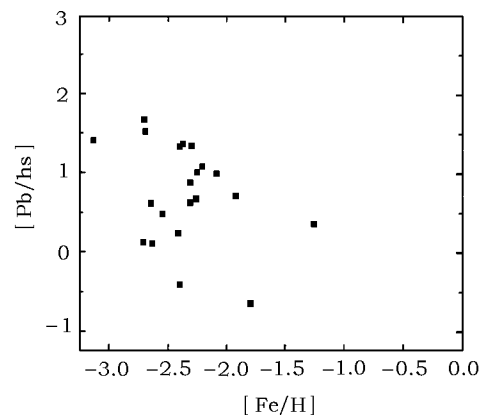


图 1 [Pb/hs] 随金属丰度的分布^[12]

其结果仍为核心质量逐渐增加导致重叠因子 r 逐渐降低, 但它的重叠因子 r 低于 Iben^[34] 给出的相应结果。1988 年 Boothroyd 和 Sackmann^[36] 根据中等质量的恒星演化模型, 给出了相邻两次脉冲的时间间隔随核心质量的变化关系。结果表明, 随着核心质量的增加, 相邻两次脉冲的时间间隔减小。Travaglio 等人^[37] 的研究工作也证实了这一结论。低质量 AGB 星 s-过程核合成在相邻两次脉冲间的辐射条件下进行^[9], 意味着每次中子辐照的持续时间 Δt 与相邻两次脉冲的时间间隔密切相关。

由于 AGB 星模型的主要不确定性来自星风物质损失率^[9], 2004 年 Zijlstra^[38] 提出, 在贫金属环境下 AGB 星的星风物质损失率远低于高金属丰度情况, 从而使低金属丰度 AGB 星的最终核心质量可以达到很高的数值。这一结果一方面直接导致 AGB 超新星的形成, 为 s+r 星的形成提供坚实的物理基础; 另一方面, 也将直接影响低金属丰度 AGB 星的重叠因子 r 和每次中子辐照持续时间。特别是低金属丰度下, $3 M_{\odot}$ 的 AGB 星的核心质量可达 $1.4 M_{\odot}$, 相应的重叠因子 r 约为 0.1, 这与 Aoki 等人^[32] 对非铅星的参数拟合结果相当。因此, 考虑金属丰度对核心质量的影响, 可能对贫金属 AGB 星中既有铅星也有非铅星的观测事实, 以及极贫金属 AGB 星观测结果的物理解释具有重要意义。

4 后 AGB 星的元素丰度分布

后 AGB 星 (Post AGB stars) 属于内禀 AGB 星 (intrinsic AGB stars), 其元素丰度分布在 AGB 星核合成理论与观测结果对比过程中具有非常重要的地位。后 AGB 星不像外赋 AGB 星那样经历过复杂的物质交流阶段, 演化进程也不受其他因素影响 (如伴星), 因此它的元素丰度分布可与 AGB 星核合成理论直接对比。另外, 后 AGB 星已经完成了 $M \rightarrow MS \rightarrow S \rightarrow SC \rightarrow C$ 的全部 AGB 星演化序列, 其元素丰度分布代表了 AGB 星的最终演化结果。

2004 年, Reyniers 等人^[39] 在研究后 AGB 星的元素丰度分布时发现, 代表中子辐照量大小的元素丰度比 $[hs/ls]$ (其中 ls 代表较轻的中子俘获元素, 如 Sr、Y、Zr) 与金属丰度 $[Fe/H]$ 之间几乎完全不相关, 不同于 AGB 星核合成理论的预言: 它们之间具有逆相关性。为解释这一观测事实, 需引入较大中子数密度范围。Reyniers 等人指出, 目前为模拟后 AGB 星的元素丰度分布所引入的较大中子数密度范围还没有任何物理基础。另外, 观测表明, 后 AGB 星的 $[hs/ls]$ 与 $[s/Fe]$ 之间具有非常强的相关性, 且存在相当数量重元素不超丰的后 AGB 星。这些观测事实都需要进一步的物理解释。最近 Engels^[40] 指出, 在后 AGB 星理论研究中, 最大的不确定性来自星风物质损失的描述。

后 AGB 星元素丰度分布的系列观测事实对 AGB 星核合成理论提出了严峻的挑战^[39]。

5 s+r 星

2000 年, Hill 等人^[41] 对富 C 的极贫金属星丰度观测表明, 有一部分星的元素丰度非常特殊, 既不能用 s-过程理论解释, 也不能用 r-过程理论解释, 它们的 s-过程及 r-过程核素丰度均超丰。这一观测事实不能用原有的外赋 AGB 星模型解释, 令人困惑^[17]。

2003 年, Qian 和 Wasserburg^[42] 提出了一种机制, 认为这类恒星来自双污染事件: 首先, 初始质量较大的主星演化快, 当演化到 AGB 阶段时, 通过“第三次挖掘”, 把 He 燃烧壳层内合成的重元素和 C 挖掘到恒星表面, 通过质量传输, 带到其伴星上, 从而改变伴星表面重元素和 C 的丰度。主星把整个外包层抛出后, 经行星状星云演化为白矮星。然后随着双星系统的进一步演化, 白矮星从初始质量较小的伴星吸积物质, 引起核心坍缩, 进而发生超新星爆发, 同时出现 r-过程核合成, 并将核合成产物再次抛向伴星, 通过二次污染形成 s+r 星。

较大质量星在最后的爆发过程中释放的大量能量将其伴星驱出系统的机制, 可解释 s+r 星并不都属于双星系统的观测事实^[29]。但是这一机制虽然易于接受, 也存在一定问题。首先它与 Ia 型超新星的爆发机制基本相同, 而 Ia 型超新星的爆发将产生大量的 Fe, 使被污染的伴星金属丰度显著升高。其次, 根据目前的核合成理论, II 型超新星才是 r-过程核合成的主要场所^[43,44], 而 Ia 型超新星几乎不产生 r-过程核素。由于目前普遍认为富含 r-过程元素的贫金属星 (r-only 星) 形成于 II 型超新星污染的云中^[45~47], 相关问题还有待于深入研究。

同年 Cohen 等人^[18] 提出了三星系统的双污染机制: 大质量星的 II 型超新星爆发产生的 r-过程核素, 以及较低质量的 AGB 星产生的 s-过程核素依次污染系统中最小质量恒星, 形成 s+r 星。但这一形成机制存在的可能性很小。随后 Barbuy 等人^[29] 又进一步指出, 三星系统在动力学上是极不稳定的。

2004 年 Zijlstra^[38] 指出, 在贫金属环境下, AGB 星的星风物质损失率远低于高金属丰度情况, 它将导致低金属丰度 AGB 星的最终核心质量达到很高的数值。在低金属条件下, 随着恒星的演化, $3\sim 5 M_{\odot}$ 的 AGB 星的核心质量可超过白矮星的质量极限, 直接形成 AGB 星的超新星爆发。这类天体被称作 1.5 型超新星或 AGB 超新星。由于这种恒星核心质量与较大质量星相当, 因此物理上与 II 型超新星情况相近, 可有效地进行 r-过程核合成, 这为 s+r 星的形成提供了较为坚实的物理基础。如果这一机制属实, 则这类 AGB 星 s-过程核合成的重叠因子 r 应很小, 属于非铅星。

当然, 在被 II 型超新星污染、富含 r-过程元素的云中形成的双星系统, 其较小质量星在伴星经历 AGB 阶段时, 吸积富含 s-过程元素的物质也可能成为 s+r 星。Ivans 等人^[48] 的研究表明, s+r 星 CS 29497-30 的元素丰度可以用这一机制来解释。相应的另一些工作也对其他 s+r 星作了类似的分析^[14,15]。在这种机制中, s+r 星与 r-only 星的形成场所相同。然而, 观测显示, 较大数量 s+r 星似乎不能与较小数量的高超丰 r-only 星相匹配。这使得人们对 s+r 星的形成机制提出质疑, Barbuy 等人^[29] 甚至提出 r-only 星也可能形成于双星系统。如果这些假设得到证实, r-过程的主要核合成场所将出现变化, 从而对恒星内部的核合成及中子俘获元素的化学演化理论研究产生重大影响。

6 结 语

近年来 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研究。如: (1) AGB 星 He 壳层内的中子辐照量分布函数 $\rho_{\text{AGB}}(\tau)$ 到底是几个单辐照的叠加, 还是更接近于指数辐照? 历史上出现的两个中子辐照量分布函数的关系如何? 现有理论是否能解释太阳系

中子辐照量分布函数的指数形式? (2) 对于后 AGB 星, 为什么代表中子辐照量大小的元素丰度比 $[\text{hs}/\text{ls}]$ 与金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 之间几乎完全不相关? (3) 铅星产生的物理条件及非铅星存在的物理原因是什么? 物质吸积对铅星的产生有何影响? (4) $s+r$ 星的物理机制是什么? 与其相应的核合成的物理条件怎样? (5) r -only 星如何形成?

随着观测资料的增多, 以及相关问题的逐步解决, AGB 星核合成理论研究将进入一个更新的阶段。

参考文献:

- [1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 1957, 29: 547
- [2] 张波, 常瑞香, 彭秋和. *天文学进展*, 1996, 14(4): 275
- [3] Clayton D D, Fowler W A, Hull T E *et al.* *Ann. Phys.*, 1961, 12: 331
- [4] Seeger P A, Fowler W A, Clayton D D. *ApJ*, 1965, 11: 121
- [5] Ulrich R K. In: Schramm N D ed. *Explosive Nucleosynthesis*, Austin: Austin Univ. Texas Press, 1973: 139
- [6] Straniero O, Gallino R, Busso M *et al.* *ApJ*, 1995, 440: L85
- [7] Straniero O, Chieffi A, Limongi M *et al.* *ApJ*, 1997, 478: 332
- [8] Straniero O, Domínguez I, Cristallo S *et al.* *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 2003, 20: 389
- [9] Gallino R, Arlandini C, Busso M *et al.* *ApJ*, 1998, 497: 388
- [10] Busso M, Gallino R, Wasserburg G J. *ARA&A*, 1999, 37: 239
- [11] Travaglio C, Galli D, Gallino R *et al.* *ApJ*, 1999, 521: 691
- [12] Straniero O, Gallino R, Cristallo S. 2005, preprint (astro-ph/0501405)
- [13] Busso M, Gallino R, Lambert D L *et al.* *ApJ*, 2001, 557: 802
- [14] Delaude D, Gallino R, Cristallo S *et al.* *Mem. Soc. Astron. It.*, 2004, 75: 706
- [15] Gallino R, Delaude D, Husty R *et al.* *Nucl. Phys. A*, 2005, 758: 485
- [16] Truran J W, Cowan J J, Pilachowski C A. *PASP*, 2002, 114: 1293
- [17] Johnson J A, Bolte M. 2004, preprint (astro-ph/0402003)
- [18] Cohen J G, Christlieb N, Qian Y-Z *et al.* *ApJ*, 2003, 588: 1082
- [19] Sivarani T, Bonifacio P, Molaro P *et al.* *A&A*, 2004, 413: 1073
- [20] Simmerer J, Sneden C, Cowan J *et al.* *ApJ*, 2004, 617: 1091
- [21] Johnson H R, Ake T B, Ameen M M. *ApJ*, 1993, 402: 667
- [22] Iben I Jr, Truran J W. *ApJ*, 1978, 220: 980
- [23] Lambert D L, Smith V V, Busso M *et al.* *ApJ*, 1995, 446: 775
- [24] Pourbaix D, Jorissen A. *A&AS*, 2000, 145: 161
- [25] Lucatello S, Tsangarides S, Beers T C *et al.* *ApJ*, 2005, 625: L825
- [26] Goswami A. *MNRAS*, 2005, 359: 531
- [27] Goriely S, Mowlavi N. *A&A*, 2000, 362: 599
- [28] Van Eck S, Goriely S, Jorissen A *et al.* *Nature*, 2001, 412: 793
- [29] Barbuy B, Spite M, Spite F *et al.* *A&A*, 2005, 429: 1031
- [30] Van Eck S, Goriely S, Jorissen A *et al.* *A&A*, 2003, 404: 291
- [31] Lattanzio J C, Lugaro M A. preprint (astro-ph/0505424)
- [32] Aoki W, Sean G R, Norris J E *et al.* *ApJ*, 2001, 561: 346
- [33] Plez B, Gohen J G. 2005, preprint (astro-ph/0501535)
- [34] Iben I Jr. *ApJ*, 1977, 217: 788
- [35] Howard W M, Mathews G J, Takahashi K *et al.* *ApJ*, 1986, 309: 633
- [36] Boothroyd A J, Sackmann I J. *ApJ*, 1988, 328: 653
- [37] Travaglio C, Gallino R, Busso M *et al.* *ApJ*, 2001, 549: 346

- [38] Zijlstra A A. MNRAS, 2004, 348: L23
- [39] Reyniers M, Van Winckel H, Gallino R *et al.* A&A, 2004, 417: 269
- [40] Engels D. Mem. Soc. Astron. It., 2004, 75: 282
- [41] Hill V, Barbay B, Spite M *et al.* A&A, 2000, 353: 557
- [42] Qian Y-Z, Wasserburg G J. ApJ, 2003, 588: 1099
- [43] Qian Y-Z. 2005, preprint (astro-ph/0501237)
- [44] Qian Y-Z. In: Qian Y-Z, Rehm E, Schatz H *et al.* eds. Proc. of the First Argonne/MSU/JINA/ INTRIA workshop, Singapore: World Scientific Publishing Company, 2004: 147
- [45] Tsujimoto T, Shigeyama T, Yoshii Y. ApJ, 2000, 531: L33
- [46] Fields B D, Truran J W, Cowan J J. ApJ, 2002, 575: 845
- [47] Cowan J J, Sneden C, Beers T C *et al.* ApJ, 2005, 627: 238
- [48] Ivans I I, Sneden C, Gallino R *et al.* ApJ, 2005, 627: L145

Progress in the Study of the s-Process Nucleosynthesis on the Asymptotic Giant Branch

ZHANG Bo¹, CUI Wen-yuan^{1,2}

(1. Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In this paper a review of the theoretical investigation of nucleosynthesis and evolution of low mass AGB stars is presented. AGB stars are the source for the main component of the s-process. Some details of the s-process in AGB stars seem now to be well understood, and yet others remain a mystery, such as the mechanism responsible for the observed spread of Pb abundance of metal-poor AGB stars. The present status of post-AGB stars is also introduced. Special abundance pattern of the elements, in particular of the neutron-capture elements, is observed in some metal-poor stars recently. It shows a strong enrichment in “r” and “s” process elements. The possible origins of this abundance pattern and especially of the strong enhancement of both “s” and “r” elements are discussed. The new challenge of AGB modeling, namely the study of C-rich and s-rich very metal-poor stars, is also discussed.

Key words: astrophysics; AGB stars; review; neutron capture: s-process; Pb stars, Post-AGB stars, s+r stars