

太阳系的元素丰度分布与 AGB 星慢中子俘获元素*

张妙静^{1,2,4} 张波^{2,3,4} 厉光烈^{2,4}

1(广西师范大学物理与信息工程学院 桂林 541004)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

3(河北师范大学物理系 石家庄 050016)

4(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 通过对 AGB 星演化模型的理论计算结果和 51 颗 AGB 星的观测丰度进行重新分析,发现任何 AGB 星与慢中子俘获过程(s 过程)主要分量对应的重元素(简称 SMH 元素)丰度分布都与对应的太阳系 s 过程主要分量的元素丰度分布相似. 这表明,任意 AGB 星 SMH 元素丰度分布的迭加结果与对应的太阳系 s 过程主要分量的元素丰度分布相似. 由此得出结论:太阳系 s 过程主要分量的重元素丰度分布模式是一个典型的模式,可以作为标准用于单星重元素丰度的研究.

关键词 丰度 AGB s 过程

1 引言

太阳系的元素丰度,主要由演化程度较少的 C1 型(碳质球粒)陨石的实验分析结果连同太阳大气(光球、日冕)的观测分析结果综合编制而成. 由于太阳是离地球最近的恒星,在获得的所有天体的元素丰度数据中,它的元素丰度是各类天体中测定元素种类最多、数据最为准确的. 因此,太阳系的元素丰度常常被当作标准用于各种天体元素丰度差别的讨论. 通常,它又被称为标准元素丰度或宇宙元素丰度.

AGB 星是指位于渐进巨星分支(Asymptotic Giant Branch)上的恒星. 由于大量天文观测数据显示,AGB 星光球中的碳和重元素¹⁾的丰度不同程度地高出一般恒星,因此,人们相信 AGB 星是发生慢中子俘获过程¹⁾最合适的场所²⁾. 所谓慢中子俘获过程,是指在较低中子数密度(约为 10^8 cm^{-3})的条件下不稳定种子核在俘获中子之前先发生 β 衰变的中子俘获过程,简称 s(slow)过程. 它所经过的元素统

称为 s 元素. s 过程一般分为 3 个分量:弱分量、主要分量和强分量. 不同分量对应不同质量范围的 s 元素. 其中,从 Fe 到 Sr 的元素主要由弱分量产生;从 Sr 到 Pb 的元素由主要分量产生;而强分量产生了约占宇宙中将近一半的²⁰⁸Pb.

在 20 世纪 40 年代以前,人们只知道大多数恒星的化学组成与太阳系的很相似,从而认为整个宇宙中的元素丰度可能都是一样的. 其他恒星的元素丰度分布可以用下式计算得到:

$$N_i = N_{i\odot} \times Z/Z_{\odot}, \quad (1)$$

2003-04-29 收稿,2003-06-02 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G20000774),中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJCX2-SW-N02),国家自然科学基金(19973002;10175074)资助

1)指比铁族元素还要重的元素($A > 60$)

普遍形成了一种看法,认为贫金属星的丰度分布并非太阳系丰度分布的简单缩放;太阳系的丰度模式,是不同质量、不同金属丰度的多代恒星在长期的星系化学演化过程中不同核合成过程混合的平均结果.从这种观点出发,人们很容易得到以下结论:由于太阳系的元素丰度分布不可能是单颗恒星的核合成结果,因此,它不能作为一个标准用于计算单颗恒星的表面丰度.

可是非常有意思的是,应用 $3M_{\odot}$ 和 $[Fe/H] = -0.3$ 的标准 AGB 恒星演化模型^[6],人们非常好地重现了太阳系 s 过程主要分量元素的丰度分布.这就使我们产生了疑问:为什么单颗恒星的 s 过程核合成结果可以很好地拟合太阳系 s 过程主要分量元素的丰度分布?太阳系的丰度模式是否具有典型性,是否可应用于单星的丰度计算?

2 AGB 恒星演化模型元素丰度的再分析

最近,Travaglio 等^[7]和 Busso 等^[8]利用标准 AGB 恒星演化模型,计算了质量为 $1.5-5M_{\odot}$ 、金属丰度从 $-3-0.3$ 的恒星表面丰度分布.其中,Travaglio

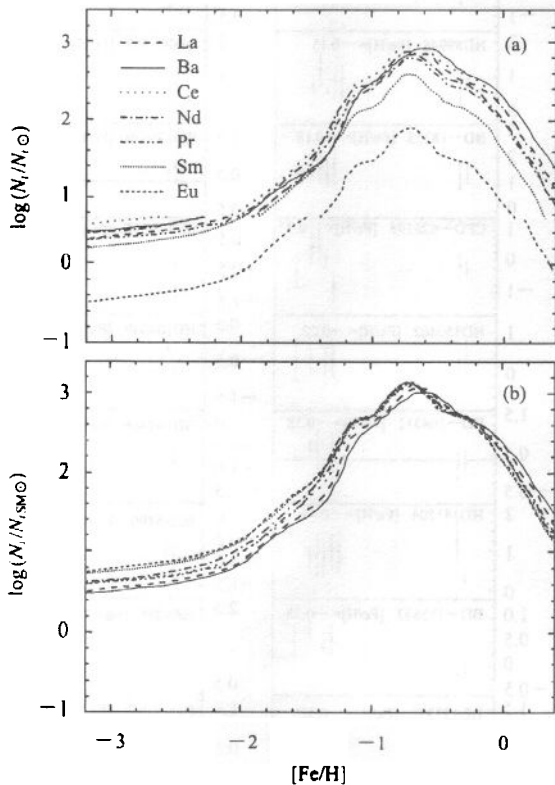


图 1 (a)是文献[7]利用 $2M_{\odot}$ AGB 恒星演化模型得到的重中子俘获元素丰度相对于金属丰度 $[Fe/H]$ 的分布;
(b)是将文献[7]的结果重新归一到太阳系 s 过程主要分量后的丰度分布

等^[7]的结果如图 1(a)所示.从图 1(a)不难看出:所有元素的丰度都归一到对应的太阳系元素丰度;7 种丰度曲线的形状基本上一样;7 条丰度曲线包围而成的带状区域最宽处超过了 $1.1dex$.这些特征表明,不同元素的产量随金属丰度的变化趋势基本一致;但是,在同一金属丰度下,不同元素的产量明显不同,这些产量之间的弥散超过了 $1.1dex$.以此为依据,Travaglio 等得出了“恒星的元素产量和丰度分布强烈依赖于恒星的初始金属丰度”以及“恒星表面的元素丰度分布并非太阳系丰度模式的简单缩放”的结论.以他们的计算结果为基础,我们将每个元

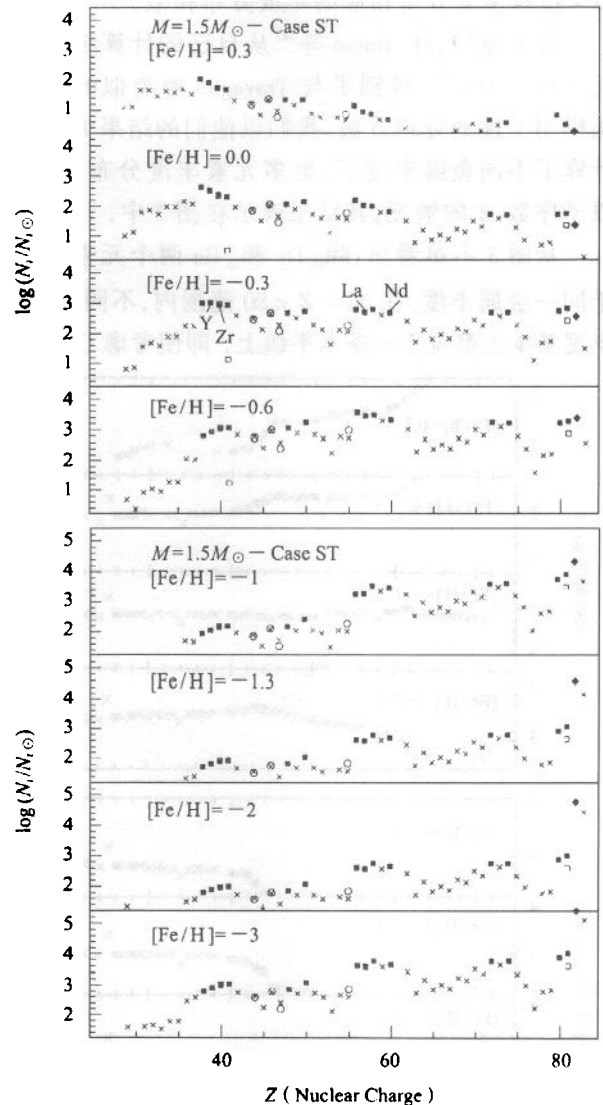


图 2 文献[8]利用 $1.5M_{\odot}$, $[Fe/H] = -3-0.3$ 的标准 AGB 恒星演化模型(Gase ST)得到的从 Cu 到 Bi 的元素丰度,相对于恒星金属丰度的分布情况
■由 s 过程产生的元素(根据文献[9],元素产量中至少 50% 由 s 过程产生);◆Pb, × 其余的元素. □和○代表受不稳定核素衰变影响的元素在不稳定核素衰变前的丰度.

素的丰度均归一到对应的太阳系 s 过程主要分量^[9], 结果见图 1(b). 图 1(b) 显示出比图 1(a) 更多的物理信息: 7 种丰度曲线不但形状基本一样, 而且, 它们都聚集在一条宽度小于 0.35dex 的窄带中. 例如, 在 $[Fe/H] = -3.2$ 处, 所有元素的产量基本上都是太阳系 s 过程主要分量元素产量的 0.6dex 倍, 且偏差都小于 0.17dex. 这说明, 同一颗恒星的不同 s 过程主要分量元素的产量, 相对于太阳系的 s 过程主要分量, 其增丰程度基本一样, 且偏差不超过 0.35dex. 这意味着, 至少从 Ba 到 Tl 的 s 过程主要分量的重元素(以下统称 SMH 元素)丰度分布, 与太阳系 s 过程主要分量相应的丰度分布相似.

除文献[7]外, Busso 等^[8]从自己的计算结果(如图 2 所示)出发, 得到了与 Travaglio 等类似的结论. 同样用上述的处理方法, 我们以他们的结果为基础, 计算了不同金属丰度下, 更多元素丰度分布相对于原子序数 Z 的情况, 其结果表示在图 3 中.

从图 3 不难看出: 除 ${}_{66}\text{Dy}$ 和 ${}_{75}\text{Re}$ 两个元素外, 对于同一金属丰度, 在 $56 < Z < 80$ 范围内, 不同元素的丰度基本上都位于一条水平线上. 即使考虑 Dy(只有

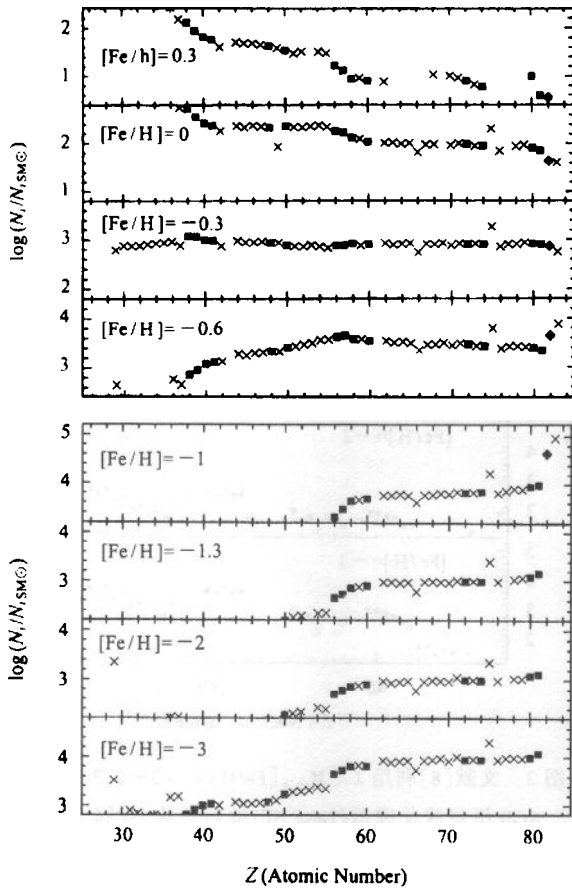


图 3 将文献[8]的结果重新归一到太阳系 s 过程主要分量后的丰度分布

15% 的产量由 s 主要分量产生)和 Re(只有 8.9% 的产量由 s 主要分量产生), 所有 SMH 元素丰度偏离直线的程度都不超过 0.35dex. 从以上结果可以得出结论: 由于不同金属丰度的 AGB 恒星演化模型得出的 SMH 元素丰度分布, 都与太阳系相应的 s 过程主要分量元素丰度分布成比例, 因此不同金属丰度 AGB 星的 SMH 元素丰度分布都与相应的太阳系 s 过程主要分量元素丰度分布相似, 它们的元素丰度与简单缩放后的太阳系 s 过程主要分量元素丰度一致.

3 AGB 星观测丰度的分析讨论

为了检验以上结论, 从最近的文献[10—17]中

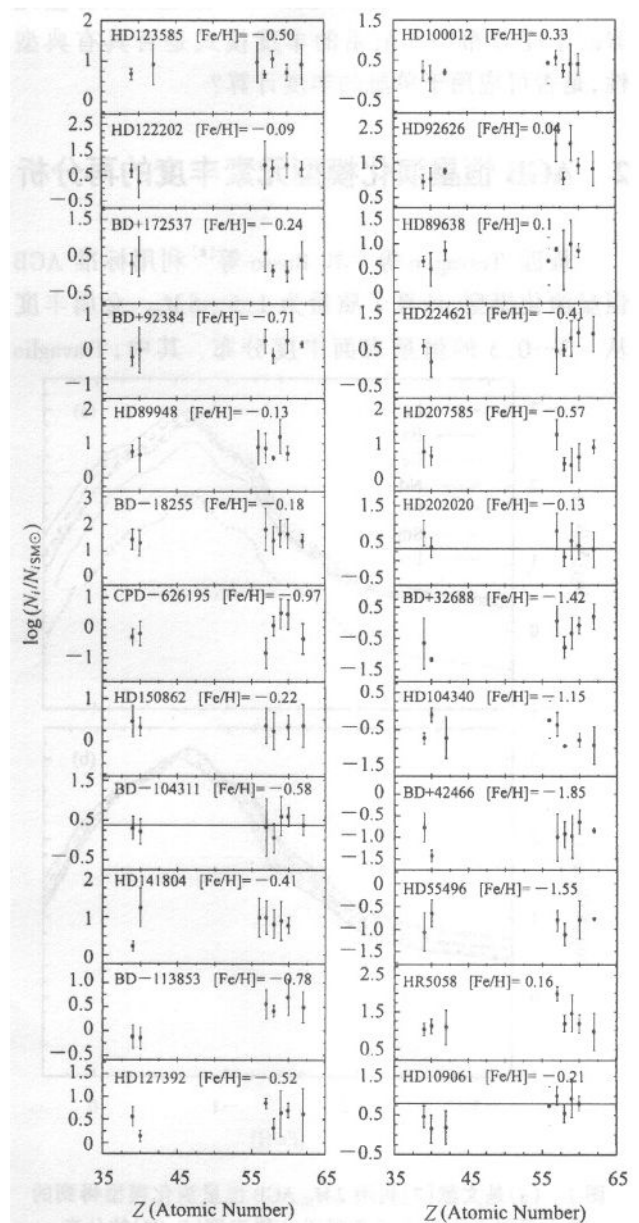


图 4 51 颗 AGB 星样本的丰度分布模式
图中的直线表示该样本星 SMH 元素丰度的平均值.

选出了 51 颗 AGB 星样本. 这些样本的金属丰度范围为 -2.74 — 0.33 , 其中包含了各种类型的 AGB 星. 另外, 每颗样本星中至少有 4 种 SMH 元素的丰度已测定. 参照上述的分析方法, 将这些 AGB 星的元素丰度都归一到对应的太阳系 s 过程主要分量元素丰度后重新进行了分析. 分析结果如图 4 和图 5 所示. 另外, 为了找到恒星 SMH 元素的平均丰度, 利用了以下误差公式:

$$\chi^2 = \sum \frac{(N_{\text{exp}} - N_{\text{ave}})^2}{(\Delta N_{\text{exp}})^2 K} \quad (2)$$

其中 N_{exp} 和 N_{ave} 分别表示元素丰度的观测值和平均值; ΔN_{exp} 是观测误差; K 表示样本星观测元素的个数. 通过输入多个 N_{ave} 试探值, 找到了使 χ^2 最小的各样本星元素丰度的平均值.

从这些图不难看到, Sr 峰元素 ($38 \leq Z \leq 55$) 和 Pb 的丰度多数偏离直线, 而且两者偏离的程度明显

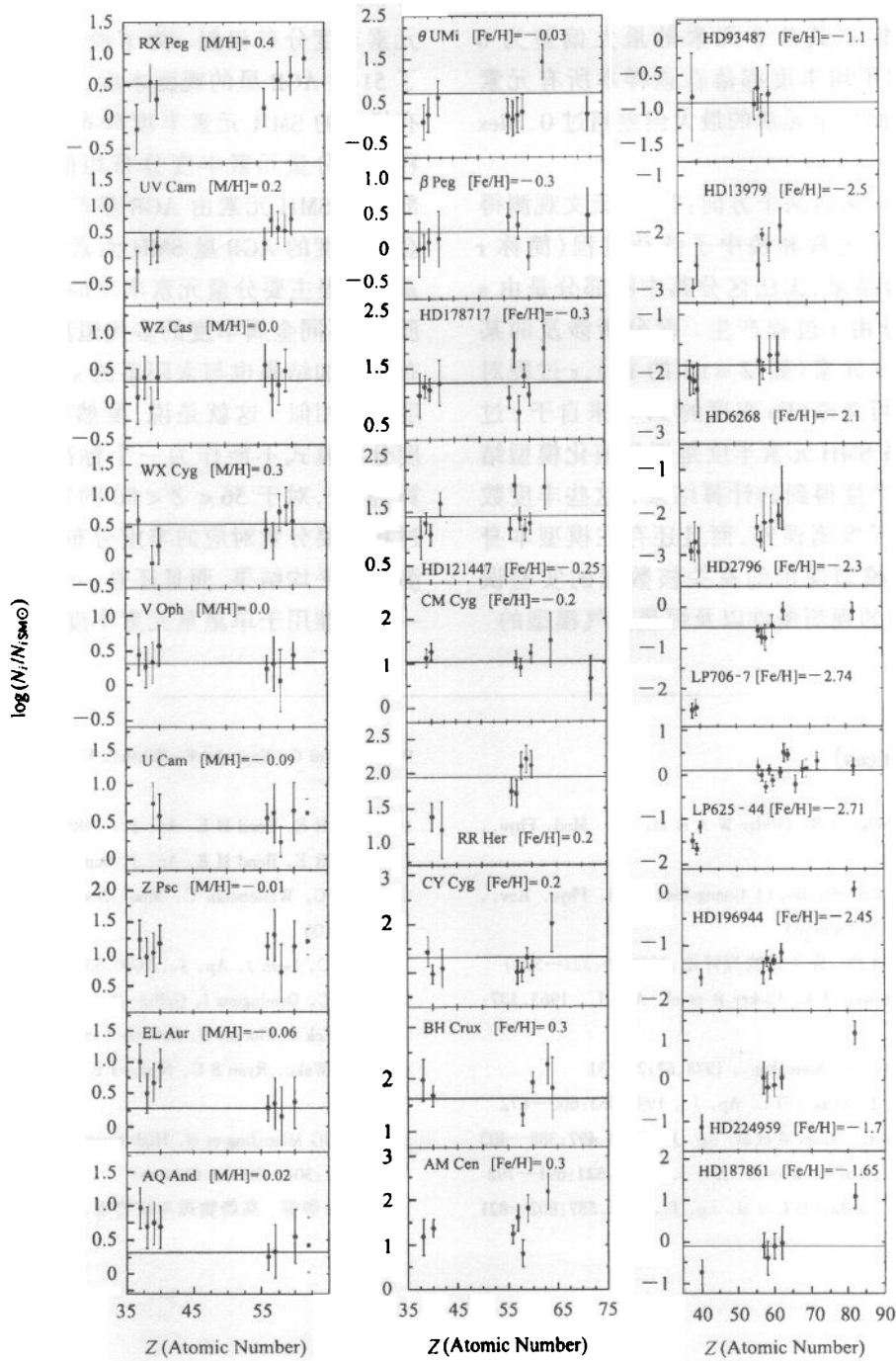


图 5 51 颗 AGB 星样本的丰度分布模式(续)
图中的直线表示该样本星 SMH 元素丰度的平均值.

不同. 这说明, AGB 星主要产生 SMH 元素; 较轻的 Sr 峰元素和重元素 Pb 来自于其他的天体物理环境, 而且, 产生 Sr 峰元素的场所应该与产生 Pb 的场所不同. 另外, 从图中还可以看到, 除少量样本的个别 SMH 元素丰度偏离平均丰度外, 绝大多数样本的平均丰度线都在该样本所有 SMH 元素丰度的误差范围内. 而且, 所有样本的单个元素偏离平均丰度的最大值不超过 0.35dex. 在 51 个样本中, 86% 的样本其单个元素的最大偏差小于 0.2dex. 其中, 占样本总数 51% 的样本其单个元素的最大偏差为 0 (即: 51% 样本的平均丰度都落在该样本所有元素的误差范围内); 而单个元素的最大偏差超过 0.3dex 的样本只有 2 个.

这些误差可能来自两个方面: 首先, 天文观测得到的元素丰度是 s 过程和快中子俘获过程 (简称 r 过程) 产量的混合结果, 无法区分其中哪部分是由 s 过程产生, 哪部分由 r 过程产生. 而分析涉及的某些元素是典型的 r 元素 (如 $Z = 63$ 的 Eu), r 过程对其丰度的贡献不可忽略 (Eu 丰度的 94% 来自于 r 过程); 其次, 太阳系 SMH 元素丰度是恒星演化模型结合太阳系的观测丰度得到的计算结果. 这些丰度数据本身不仅包含了观测误差, 而且还存在模型本身引起的误差以及模型使用的有关核数据的实验误差. 因此, 从目前的观测条件以及恒星大气模型的

精度考虑, 这里出现的观测值与平均丰度值之间的误差是合理的, 不会对我们的结论产生太大影响.

4 小结

综上所述, 通过对文献 [7, 8] 计算结果的重新处理, 我们发现, 不同金属丰度 AGB 星 SMH 元素的丰度分布都与相应的太阳系 s 过程主要分量元素丰度分布成比例, 因此, 它们与太阳系的 s 过程主要分量元素丰度分布相似. 为了检验这个结论, 我们分析了 51 颗 AGB 星的观测丰度, 发现在误差范围内, 所有样本的 SMH 元素丰度分布与相应的太阳系 s 过程主要分量元素丰度分布相似. 这表明: 由于绝大部分的 SMH 元素由 AGB 星产生, 而不同质量、不同金属丰度的 AGB 星 SMH 元素丰度的分布都与太阳系 s 过程主要分量元素丰度的分布相似, 因此, 不同质量、不同金属丰度的多代恒星的 SMH 元素丰度分布的迭加结果也与太阳系的 s 过程主要分量元素丰度分布相似. 这就是说, 虽然整个的太阳系元素丰度分布模式不能作为一个标准用于单星的丰度计算, 但是, 对于 $56 < Z < 80$ 的重元素来说, 太阳系 s 过程主要分量对应的丰度分布模式不仅是星系化学演化的平均结果, 而且还是一个典型模式, 可以作为一个标准用于单星重元素丰度的研究.

参考文献 (References)

- Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A et al. *Rev. Mod. Phys.*, 1957, **29**: 547—650
- ZHANG Miao-Jing, ZHANG Bo, LI Guang-Lie. *Nucl. Phys. Rev.*, 2002, **19**: 321—328 (in Chinese)
(张妙静, 张波, 厉光烈. *原子核物理评论*, 2002, **19**: 321—328)
- Wallerstein G, Greenstein J L, Parker R et al. *Ap. J.*, 1963, **137**: 280—300
- Spite M, Spite F. *Astron. Astrophys.*, 1978, **67**: 23—31
- Woolf V M, Tomkin J, Lambert D L. *Ap. J.*, 1995, **453**: 660—672
- Gallino R, Arlandini C, Busso M et al. *Ap. J.*, 1998, **497**: 388—403
- Travaglio C, Galli D, Gallino R et al. *Ap. J.*, 1999, **521**: 691—702
- Busso M, Gallino R, Lambert D L et al. *Ap. J.*, 2001, **557**: 802—821
- Arlandini C, Käppeler F, Wisshak K et al. *Ap. J.*, 1999, **525**: 886—900
- Luck R E, Bond H E. *Ap. J.*, 1985, **292**: 559—577
- Luck R E, Bond H E. *Ap. J. Suppl.*, 1991, **77**: 515—540
- Abia C, Wallerstein G. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1998, **293**: 89—106
- Abia C, Isern J. *Ap. J.*, 2000, **536**: 438—449
- Abia C, Dominguez I, Gallino R et al. *Ap. J.*, 2002, **579**: 817—831
- Van Eck S, Goriely S, Jorissen A et al. *Nature*, 2001, **412**: 793—795
- Aoki Wako, Ryan S G, Norris J E et al. *Ap. J.*, 2001, **561**: 346—363
- ZHANG Miao-Jing et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2003, **27**(4): 304—308 (in Chinese)
(张妙静等. *高能物理与核物理*, 2003, **27**(4): 304—308)

Abundance Distribution in the Solar System and Slow Neutron Capture Elements in AGB Stars *

ZHANG Miao-Jing^{1,2,4} ZHANG Bo^{2,3,4} LI Guang-Lie^{2,4}

1(Academy of Physics and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

2(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

3(Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)

4(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract By re-analyzing the results of the theoretical abundance of AGB stellar models and the observed abundances of 51 AGB samples, we find that the abundance distribution of heavy elements belonging to the main-component of slow neutron capture process (SMH elements) of any AGB star is similar to that of the scaled s-process main component of the solar system. It means that superposition of the SMH element abundance distributions of AGB stars should be similar to that of the scaled solar s-main component. As a conclusion, the heavy element abundance pattern of the solar s-main component is a typical one and can be used as a standard in the investigation of heavy element abundances in single star.

Key words abundance, AGB, s-process

Received 29 April 2003, Revised 2 June 2003

* Supported by Major State Basic Development Program (G20000774), CAS Knowledge Innovation Project (KJ92-SW-N02), NSFC (19973002 and 10175074)