

贫金属星重元素丰度分布的参数化研究*

谢革英^{1,2†} 张 波² 李宏杰^{2,3} 胡金江¹ 李晨璞¹

(1 河北建筑工程学院数理系 张家口 075024)

(2 河北师范大学物理科学与信息工程学院 石家庄 050016)

(3 河北科技大学理学院 石家庄 050018)

摘要 基于大量贫金属星元素丰度的观测资料,以太阳系重元素丰度分布为标准,选取 Sr、Ba、Eu 分别作为贫金属星弱 s- 过程、主要 s- 过程、r- 过程 3 种核合成的典型元素,采用参数化方法,分析了不同核合成过程对贫金属星重元素丰度的贡献比例.研究表明:金属丰度越高,弱 s- 过程、主要 s- 过程对较轻的中子俘获元素丰度的贡献就越大,较重的中子俘获元素主要由 r- 过程和主要 s- 过程产生;金属丰度较低,重中子俘获元素丰度主要由 r- 过程产生,星系早期弱 s- 过程对元素丰度几乎没有贡献.

关键词 核反应,核合成,恒星:基本参数,星系:丰度

中图分类号: P 144; **文献标识码:** A

1 引言

确定不同年龄恒星大气的化学元素丰度,对研究元素核合成理论及星系化学演化规律具有十分重要的意义.恒星的元素丰度随着 [Fe/H] 的变化趋势能够对星系演化模型给出观测上的限制,从而检验模型的合理性.贫金属星产生于银河系极早期,其表面大气化学组成记录了早期恒星形成时星际物质的金属丰度,因此,一直是人们关注的焦点之一.近年来,随着数据测量精度的提高及恒星大气模型的改进,元素丰度的资料也日趋丰富和精确.

重元素是指比铁族元素更重的元素,中子俘获过程在重元素的核合成时起主导作用.在恒星元素核合成方面,中子俘获有两种对应于不同物理环境、彼此独立的过程^[1]:快中子俘获(r-)过程和慢中子俘获(s-)过程,分别产生于爆炸的天体物理环境中 and 红巨星内部宁静的 He 燃烧阶段. s- 过程又分为弱 s- 过程分量和主要 s- 过程分量,其中弱分量主要产生于大质量的恒星内部核心 He 燃烧阶段,主要分量主要产生于中、小质量 AGB 星 He 壳层燃烧过程中^[2].

太阳系的核素丰度是迄今为止唯一详细的核素丰度资料,常将其作为元素丰度分布的标准.星族 I 的恒星元素丰度具有与太阳系核素丰度相似的分布,即 $N_i = N_{i\odot} \times Z_*/Z_\odot$, 式中 Z_* 为恒星的金属丰度.观测表明,星族 II 贫金属星重元素的丰度明显与太阳系的

2009-12-02 收到原稿, 2010-02-04 收到修改稿

* 国家自然科学基金(10973006)资助项目

† xiegeying@hebiace.edu.cn

丰度分布不同. 这种差异不仅反映了其核合成环境不同于太阳系, 而且也表明了银河系早期的化学成分不同于太阳系星云. Zhang 等^[3] 根据 3 种中子俘获典型元素的观测丰度, 提出了 r-、弱 s-、主要 s- 3 个不同核合成过程对恒星元素丰度贡献的方法, 用参数化方法预言了贫金属星所有的中子俘获元素丰度. 但是, 由于分析的恒星数目少而很难得出普遍结论. 随着贫金属星中子俘获元素观测资料的丰富, 可以作进一步分析.

本文依据 2008 年综述的太阳系核素观测数据^[4], 采用参数化模型的方法, 预言了贫金属星重中子俘获元素丰度分布, 并将计算结果与观测结果进行了比较.

2 模型及计算

太阳系核素丰度分布作为星系元素丰度的标准分布, 假设恒星中子俘获元素丰度来自 3 个不同核合成过程 (r-、弱 s-、主要 s-) 的共同贡献, 贫金属星的第 i 种元素丰度计算的公式^[3] 为

$$N_{i,\text{cal}} = (C_1 N_{i,\odot,r} + C_2 N_{i,\odot,s,w} + C_3 N_{i,\odot,s,m}) 10^{[\text{Fe}/\text{H}]}, \quad (1)$$

其中 $N_{i,\text{cal}}$ 代表贫金属星的第 i 种元素丰度计算结果, $N_{i,\odot,r}$ 、 $N_{i,\odot,s,w}$ 、 $N_{i,\odot,s,m}$ 分别是太阳系 r-、弱 s-、主要 s- 的核合成过程元素丰度, C_1 、 C_2 、 C_3 为对应过程的分量系数, $[\text{Fe}/\text{H}]$ 是贫金属星的金属丰度.

当取太阳系的核素丰度作为标准时, 太阳系的分量系数 $C_1 = C_2 = C_3$. 最新的太阳系观测资料^[4-7] 显示, 大约 95% 的 Eu 元素丰度来自于 r- 过程贡献, 85% 的 Ba 元素丰度来自主要 s- 过程贡献, 18% 的 Sr 元素丰度来自弱 s- 过程贡献. 相对其它元素, 弱 s- 过程对 Sr 的贡献比例最大^[8]. 因此, 本文取 Eu、Sr、Ba 作为贫金属星 r-、弱 s-、主要 s- 过程核合成的典型元素^[3], 将文献 [4] 太阳系 r- 过程元素丰度 $N_{i,\odot,r}$ 以及 s- 过程元素丰度按文献 [5] 的比例分为 $N_{i,\odot,s,w}$ 和 $N_{i,\odot,s,m}$ 代入 (1) 式得

$$\begin{cases} C_1 = 1.02616 \times 10^{[\text{Eu}/\text{Fe}]} - 0.02616 \times 10^{[\text{Ba}/\text{Fe}]} \\ C_2 = 7.175414 \times 10^{[\text{Sr}/\text{Fe}]} + 0.14142 \times 10^{[\text{Eu}/\text{Fe}]} - 6.316834 \times 10^{[\text{Ba}/\text{Fe}]} \\ C_3 = 1.17733 \times 10^{[\text{Ba}/\text{Fe}]} - 0.17733 \times 10^{[\text{Eu}/\text{Fe}]} \end{cases} . \quad (2)$$

由此可知, 只要给出贫金属星 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ 的观测值, 就能通过 (2) 式计算得出 C_1 、 C_2 、 C_3 , 再将 C_1 、 C_2 、 C_3 代入 (1) 式, 即可预言贫金属星其它重元素的丰度.

本文根据文献 [9-13] 给出的 $[\text{X}/\text{Fe}]$ 观测值, 将 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ 的值代入 (2) 式, 计算了 66 颗贫金属星的分量系数 C_1 、 C_2 、 C_3 , 然后代入 (1) 式, 得出贫金属星重元素的计算丰度, 并与观测值相比较.

3 结果和分析

为了研究不同金属丰度环境下各种核合成过程对中子俘获元素丰度贡献的比例, 我们所计算的样本星包括摘自文献 [9] 中的 28 颗星、文献 [10] 中的 26 颗星及文献 [11-13]

中的 12 颗星. 对 66 颗样本星的计算结果表明: 不同核合成过程对中子俘获元素丰度的贡献与金属丰度具有相关性. 本文从中选取了 $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ 、 $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ 和 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ 共 3 个金属丰度区间的各两颗星作为典型代表进行说明.

表 1 给出了这 6 颗贫金属星 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ 观测值和 3 种核合成过程分量系数 C_1 、 C_2 、 C_3 , 其中 HD 62644、HD 121384、HD 64606、HD 63077 的观测结果取自文献 [11], HD 6268 取自文献 [12], HD 115444 取自文献 [13].

表 1 6 颗样本星的元素丰度和分量系数

Table 1 Element abundances and component coefficients of six sample stars

Stars	$[\text{Fe}/\text{H}]$	$[\text{Sr}/\text{Fe}]$	$[\text{Ba}/\text{Fe}]$	$[\text{Eu}/\text{Fe}]$	C_1	C_2	C_3
HD 62644	-0.29	-0.03	-0.12	-0.2	0.6276	1.9939	0.7812
HD 121384	-0.53	-0.05	-0.05	0.15	1.4262	0.9650	0.7988
HD 64606	-1.09	-0.25	-0.25	0.38	2.4469	0.8221	0.2367
HD 63077	-1.15	-0.14	-0.13	0.38	2.4422	0.8546	0.4474
HD 6268	-2.63	0.07	-0.04	0.52	3.3741	3.1376	0.4865
HD 115444	-2.95	0.32	0.18	0.85	7.2251	6.4318	0.5266

将表 1 中 C_1 、 C_2 、 C_3 代入 (1) 式计算得到的贫金属星重中子俘获元素的理论丰度, 与观测结果进行比较, 如图 1~3 所示. 图中横坐标 Z 为元素的原子序数, 纵坐标为各元素的丰度, 天文学中常以各元素原子数与氢原子数比值的对数来表示, 即 $\lg \varepsilon = \lg(N_i/N_{\text{H}}) + 12$ (其中 $N_{\text{H}} = 10^{12}$).

由图 1 可见, $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ 的两颗贫金属星 HD 62644、HD 121384 较轻中子俘获元素丰度 (如 Sr, Y, Zr) 和较重中子俘获元素丰度 (如 Ba, Eu) 的计算值与观测值都符合得很好. 由表 1 可见, 与另外两个金属丰度区间的贫金属星相比, 这两颗星的 C_1 、 C_2 、 C_3 都更接近于太阳系的分量系数 1. 说明贫金属星的金属丰度越高 (接近太阳系的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$), 重元素的丰度分布与太阳系的元素丰度分布越一致, 即相对富金属星族 I 的贫金属星所对应的核合成过程的形成与太阳系的相似 [14].

图 2 是 $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ 的贫金属星 HD 64606 和 HD 63077 的重元素计算丰度与观测结果的比较. 由表 1 可见, 这两颗星均出现了 $C_1 > 1$ 、 $C_3 < 1$, 表明 r- 过程分量对贫金属星重中子俘获元素丰度贡献的比例大于太阳系的, 而主要 s- 过程分量的贡献比例小于太阳系的. 由于 r- 过程的贡献主要来源于大质量恒星, 恒星的寿命较短, 在星系形成早期对重元素就有可观的贡献, 主要 s- 过程主要产生在中、小质量 AGB 星 He 壳层的燃烧过程中, 恒星的寿命较长, 在星系形成早期对重元素丰度的贡献较少. 因此我们的计算结果与星系的化学演化理论相一致 [15].

图 3 是 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ 的贫金属星 HD 6268 和 HD 115444 的重元素计算丰度与观测结果的比较. 由图可见, 对较重的中子俘获元素 (Ba 以后的) 的拟合要比对较轻的 (如 Sr, Y, Zr) 拟合效果更好. 与另外两个金属丰度区间的贫金属星相比, 表 1 显示 HD 6268 和 HD 115444 都有 $C_1 \gg C_3$ 和 $C_2 \gg C_3$, 说明 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ 的极贫金属星的主要 s- 过程对中子俘获元素丰度的贡献相对较少, 重中子俘获元素丰度主要来自于 r- 过程的贡献. 星系演化早期, 低金属丰度的贫金属星重中子俘获元素丰度主要产生于 r- 过程, 这一结论与极贫金属星较重中子俘获元素丰度的太阳系 r- 过程分布相一致 [16].

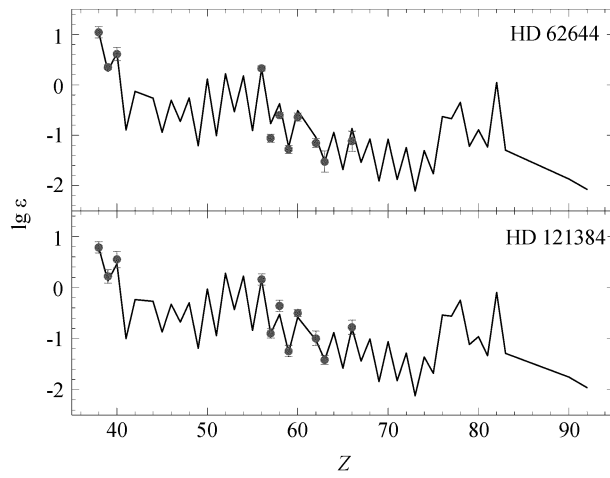


图 1 计算得到的恒星 HD 62644 和 HD 121384 重元素计算丰度与观测丰度的比较 (图中带误差棒的实心圆点代表观测值, 折线代表计算结果)

Fig. 1 Comparison of theoretical calculations (solid line) with observed abundances (filled circles) of HD 62644 and HD 121384

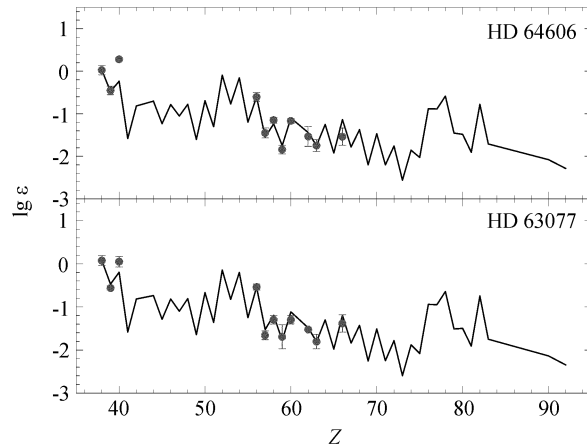


图 2 HD 64606 和 HD 63077 重元素计算丰度与观测丰度的比较, 图标如图 1

Fig. 2 Comparison of theoretical calculations (solid line) with observed abundances (filled circles) of HD 64606 and HD 63077

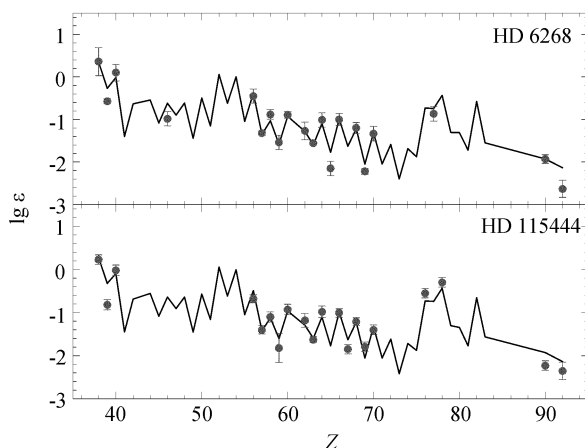


图3 HD 6268 和 HD 115444 重元素计算丰度与观测丰度的比较, 图标如图 1

Fig. 3 Comparison of theoretical calculations (solid line) with observed abundances (filled circles) of HD 6268 and HD 115444

另外, 关于图 3 中较轻的中子俘获元素拟合不好可能的原因有: 一方面是由 C_2 的不确定性造成的, 因为比 Sr 更轻的元素观测数据很少, 在此以 Sr 作为弱 s- 过程代表元素忽略了主要 s- 过程对轻中子俘获元素的贡献; 另一方面可能是在星系形成早期存在不同的 r- 过程场所^[9]. 较重的中子俘获元素的拟合效果很好, 说明贫金属星重中子俘获元素丰度分布是太阳系 r- 过程的分布, 与文献 [7] 的研究结果一致, 支持了文献 [4] 极贫金属星重元素丰度的太阳系 r- 过程分布.

必须指出, 贫金属星中 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ 、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ 的观测误差也是导致计算结果与观测结果产生不符的原因之一. 另外, 仅对有限的贫金属星进行分析还很难得出普遍结论, 更确切的结果依赖于大样本贫金属星丰富的观测资料.

4 结论

本文利用中子俘获核合成过程的 3 种典型元素观测丰度值, 采用参数化方法, 分析了不同金属丰度区间内的贫金属星的重元素丰度分布, 讨论了不同的核合成过程对重元素丰度的贡献.

(1) $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ 的年轻贫金属星 r- 过程贡献不突出显示其优势, 贫金属星重中子俘获元素丰度主要来自于 s- 过程的贡献. $C_2 > C_3$, 说明弱 s- 过程对较轻中子俘获元素丰度的贡献比例大于主要 s- 过程的, 即弱 s- 过程对金属丰度较高的较轻中子俘获元素丰度有很可观的贡献, 与星系早期弱 s- 过程对重元素丰度几乎没有贡献的星系演化理论相一致.

(2) $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ 的中等金属丰度贫金属星 r- 过程对重中子俘获元素丰度的贡

献比例较大, 弱 s- 过程和主要 s- 过程的贡献较小. r- 过程、弱 s- 过程均产生于大质量的恒星, 而主要 s- 过程分量主要产生于中、小质量 AGB 星的 He 壳层燃烧过程中, 在星系演化的中期, 3 种分量过程共同对贫金属星重中子俘获元素丰度产生贡献, 金属丰度越低, r- 过程的贡献比例越大^[17-18].

(3) $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ 的极贫金属星重中子俘获元素丰度主要由 r- 过程和弱 s- 过程产生. 较重的中子俘获元素 ($Z \geq 56$) 丰度是太阳系纯 r- 过程丰度分布^[19], 即较重的中子俘获元素丰度主要是 r- 过程产生的; 较轻的中子俘获元素 ($38 \leq Z \leq 56$) 丰度与太阳系 r- 过程丰度分布不同, 弱 s- 过程对其贡献比较可观. 较轻中子俘获元素和较重中子俘获元素丰度的分布不同与太阳系 r- 过程丰度分布的截断效应相符, 表明它们产生于不同的核合成场所^[20-21].

结果表明, 贫金属星的金属丰度越低, 弱 s- 过程、主要 s- 过程对重中子俘获元素丰度的贡献比例就越小, 其重中子俘获元素丰度主要来自于 r- 过程核合成, 星系早期弱 s- 过程对元素丰度几乎没有贡献; 金属丰度越高, 弱 s- 过程、主要 s- 过程对较轻中子俘获元素丰度的贡献比例就越大, 较重的中子俘获元素丰度主要来自于 r- 和主要 s- 过程的共同贡献; 金属丰度越接近于太阳系的值, 3 种核合成过程对重元素丰度的贡献也越趋近于太阳系的比列.

本文所采用的计算方法非常依赖于所选的标准元素, 例如不选 Ba 而选其它的 s- 过程元素作为主要 s- 过程的典型元素, 得到的元素丰度分布一定是有差异的, 即方法本身就有一定的偏差. 虽然不能从个别的星系特点得出普遍的结论, 但是由于目前 r- 过程样本星很少, 弱 s- 过程的代表元素的不确定性, 中子俘获元素丰度的形成机制仍不十分确定^[22], 我们的研究对于探索恒星元素的核合成理论具有一定的意义, 相关的问题还有待于进一步的完善.

参 考 文 献

- [1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. *RvMP*, 1957, 29: 547
- [2] Busso M, Gallino R, Wasserburg G J. *ARA&A*, 1999, 37: 239
- [3] Zhang B, Li J, Zhang C X, et al. *ApJ*, 1999, 513: 910
- [4] Sneden C, Cowan J J, Gallino R. *ARA&A*, 2008, 46: 241
- [5] Raiteri C M, Gallino R, Busso M, et al. *ApJ*, 1993, 419: 207
- [6] Arnould M, Goriely S, Takahashi K. *PhR*, 2007, 450: 97
- [7] Cowan J J, Sneden C. *Natur*, 2006, 440: 1151
- [8] Gratton R G, Sneden C. *A&A*, 1994, 287: 927
- [9] Burris D L, Pilachowski C A, Armandroff T E, et al. *ApJ*, 2000, 544: 302
- [10] Allen D M, Barbuy B. *A&A*, 2006, 454: 917
- [11] Honda S, Aoki W, Kajino T, et al. *ApJ*, 2004, 607: 474
- [12] Westin J, Sneden C, Gustafsson B, et al. *ApJ*, 2000, 530: 783
- [13] Mathews G J, Bazan G, Cowan J J. *ApJ*, 1992, 391: 719
- [14] Qian Y Z, Wasserburg G J. *ApJ*, 2002, 567: 515
- [15] Aoki W, Norris J E, Ryan S G, et al. *ApJ*, 2002, 567: 1166
- [16] Travaglio C, Gallino R, Busso M, et al. *ApJ*, 2001, 549: 346
- [17] 戴俊安, 彭秋和. *天文学报*, 2008, 49: 251
- [18] Dai J A, Peng Q H. *ChA&A*, 2009, 33: 48

- [19] Sneden C, Lawler J E, Cowan J J, et al. *ApJS*, 2009, 182: 80
[20] 张波, 张彦霞, 刘俊红, 等. *天文学报*, 2001, 42: 22
[21] Zhang B, Zhang Y X, Liu J H, et al. *ChA&A*, 2001, 25: 298
[22] Izutani N, Umeda H, Tominaga N. *ApJ*, 2009, 692: 1517

Study on Abundance Distribution of Heavy Elements in Metal-poor Stars by Parameterized Method

XIE Ge-ying^{1,2} ZHANG Bo² LI Hong-jie^{2,3} HU Jin-jiang¹ LI Chen-pu¹

(1 *Department of Mathematics and Physics, Hebei Institute of Architecture Civil Engineering, Zhangjiakou 075024*)

(2 *College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal Univesity, Shijiazhuang 050016*)

(3 *School of Sciences, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018*)

ABSTRACT The abundance distribution of heavy elements of solar system is considered as the standard abundance pattern in this paper. Based on a large number of observational data of element abundances in metal-poor stars, Sr, Ba and Eu are chosen as the representative elements for the weak s-process, main s-process and r-process, respectively. The parameterized method is adopted to explore the heavy element abundance pattern of these stars. Then the different contributions from three kinds of neutron-capture processes to the abundance distribution of heavy elements are discussed. It is shown that, considering the stars with metallicities similar to the solar system, the contributions from three kinds of neutron-capture processes to this abundance distribution are also similar to the solar system. The heavy elements of the metal-poor stars are mainly produced by r- and main s-neutron-capture processes at low metallicity.

Key words nuclear reactions, nucleosynthesis, stars: fundamental parameters, galaxy: abundances