

极贫金属星 CS 22892-052 重元素丰度的研究^{*}

张 波 张彩霞^{**} 李 冀 梁艳春

(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 根据太阳系的重核素丰度分布, 提出了一种利用 3 种中子俘获过程的典型代表元素的丰度观测值计算贫金属星重核素丰度的方法, 并计算了极贫金属星 CS 22892-052 的重元素丰度分布.

关键词 贫金属星 金属丰度 重元素 丰度

中子俘获在重元素核合成方面起着主导作用. 中子俘获有两种不同的、彼此独立的过程^[1]: r-(快中子俘获)过程和 s-(慢中子俘获)过程, 由于太阳系的核素丰度分布是迄今为止得到的唯一详细的核素丰度分布, 因此常将它作为标准的丰度分布. 例如对于星族 I 的恒星, 常取与太阳系核素丰度呈相似分布^[2], 即 $N_i = N_{i\odot} \times Z/Z_\odot$, 其中 Z 为恒星的金属丰度. 但观测表明, 对于星族 II 的贫金属星, 其重元素丰度明显与太阳系核素丰度分布不同^[3]. 贫金属星的重元素丰度分布的确定是非常重要的: 它提供了星系形成后各个阶段核合成的直接和详细的证据, 但目前仍缺乏一种简单而有效的确定不同金属丰度下重核素丰度的方法, r-过程和 s-过程对元素丰度贡献相对比例的确定仍有很大的不定性^[4], 各种可能性仍在探讨之中^[3]. 在某一核合成过程在重元素产生方面占支配地位的较极端的环境下, 对这些恒星的重元素丰度分布的分析就显得更为重要, 它可以提供很多重元素核合成方面的信息, 如星系形成早期的各核合成过程产生的重元素丰度是否与太阳系丰度分布类似, 对丰度的贡献比例如何等. 1994 年以来, 天体物理刊物(Ap. J.)上连续刊登 Cowan 和 Sneden 等人的 4 篇文章^[5~8]分析极贫金属星 CS 22892-052 的重元素丰度, 发现其中的重元素丰度分布与太阳系纯 r-过程元素丰度分布相似, 这说明在星系形成的早期, 重元素的 r-过程核合成占支配地位并与太阳系 r-过程元素丰度呈相似分布. 虽然取得了非常重要的结果, 但他们在拟合贫金属星重元素丰度时人为地将太阳系丰度乘以一下降因子^[6~8](以某元素丰度为标准进行归算)的作法, 失去了下降因子所含的重要的物理意义, 为拟合 Zr 丰度的观测值所作的 r-过程和 s-过程丰度的人为混合, 也缺乏详细合理的物理解释.

1998-06-23 收稿

^{*}国家自然科学基金资助项目(批准号: 19673008)

^{**}石家庄师范专科学校访问学者

本文以 3 种中子俘获过程的典型代表元素的丰度观测结果为依据，以重元素核合成理论及星系化学演化理论所得结论为基础，提出了一种确定在不同金属丰度下不同核合成过程对重元素丰度的贡献的方法。将计算结果与极贫金属星 CS 22892-052 的重元素丰度观测结果进行比较，并讨论了下降因子所含的重要的双重物理意义。

1 模型和基本方程

由重元素核合成理论可知，r-过程同位素可以从初始值为零金属丰度(也可为其他金属度)的恒星中合成，而 s-过程同位素只能在已经包含了一定数量的铁族元素的恒星中合成。对 s-过程同位素，又可分为弱分量(weak s-component)和主要分量(main s-component)。其中弱分量是指较轻的中子俘获元素，即使在低金属度区，在大质量恒星中也可合成相当可观的数量，而主要分量主要产生于中、小质量的 AGB 星 He 壳层燃烧过程中。以 Ba 作为 s-元素主要分量的典型代表，Sr 作为 s-元素弱分量的典型代表，Eu 作为 r-元素的典型代表，贫金属星的第 i 种核素丰度可由下式计算：

$$N_i = (C_1 N_{i,r} + C_2 N_{i,s-weak} + C_3 N_{i,s-main}) 10^{[Fe/H]}, \tag{1}$$

其中 $N_{i,r}$ 、 $N_{i,s-weak}$ 和 $N_{i,s-main}$ 分别为太阳系 r-过程丰度，s-过程弱分量和 s-过程主要分量丰度， C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 r-过程、s-过程弱分量与 s-过程主要分量对第 i 种重核素丰度贡献的分量系数。利用太阳系 r-过程分量^[9]，s-过程弱分量^[10]和 s-过程主要分量^[11]中 Eu，Sr，Ba 的丰度值，由(1)式可解得 C_1 、 C_2 、 C_3 与 $[Eu/Fe]$ ， $[Sr/Fe]$ ， $[Ba/Fe]$ 的关系为

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.186\,34 \times 10^{[Eu/Fe]} - 0.186\,343 \times 10^{[Ba/Fe]}, \\ C_2 &= 11.299\,435 \times 10^{[Sr/Fe]} - 0.645\,729\,9 \times 10^{[Eu/Fe]} - 9.648\,05 \times 10^{[Ba/Fe]}, \\ C_3 &= 1.089\,98 \times 10^{[Ba/Fe]} - 0.089\,98 \times 10^{[Eu/Fe]}. \end{aligned} \tag{2}$$

将(2)式代入(1)式，即可得各金属丰度的恒星重核素的丰度分布。

2 计算结果和讨论

根据上述方法，将 CS 22892-052 的观测值代入(2)式，得 $C_1 = 46.49$ ， $C_2 = 0$ ， $C_3 = 0.757$ ，将这些值代入(1)式，可得元素丰度分布。所得计算结果由图 1 给出，其中 ϵ 为元素的丰度($\lg N_H = 12.00$)。

可以看出，曲线能拟合除 Y 和 Th 以外的所有观测到元素的丰度值。r-过程分量系数 C_1 远大于 s-过程分量系数 C_2 和 C_3 且远大于太阳值，这意味着 CS 22892-052 形成于 r-过程贡献占优势的区域。对于在没有得到充分混合的区域内形成的恒星，某一分量系数远大于该金属丰度的分量系数的平均值时，应考虑用单一分量系数去进行计算。在(1)式中令 $C_2 = C_3 = 0$ ，可得 C_1 的计算公

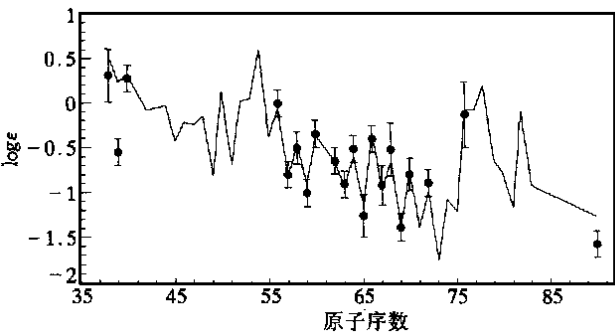


图 1 二分量理论计算曲线与丰度观测值的比较

式为

$$C_1 = 1.170\,88 \times 10^{\int \text{Eu/Fd}} \quad (3)$$

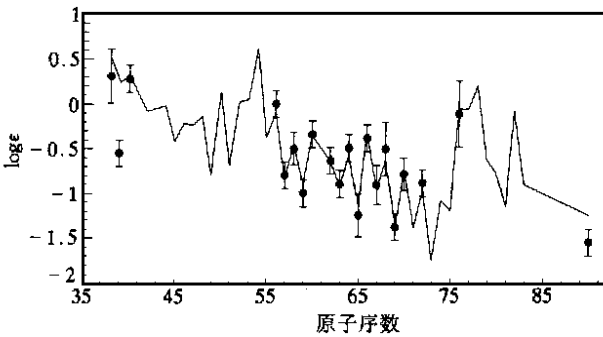


图 2 单分量理论计算曲线与丰度观测值的比较

准), 这样 Sr 和 Y 的丰度拟合出来, 但又不能解释 Zr 的丰度的计算值的偏低. 为与 Zr 的丰度观测值相符, 再附上 50% 乘以下降因子后太阳系 r-过程对 Zr 的贡献. 这样就拟合出所有观测到的元素的丰度值. Cowan 等人认为, 上述结果说明在 Zr ($Z=40$) 处存在截断效应: 弱 s-分量的贡献在此处截断, r-分量的贡献在此处开始. 虽然取得重要结果, 但采用下降因子及试探混合的作法不可能对所得结果作出详细合理的物理解释. 在 Cowan 等人工作的基础上, 假定在 Zr 处存在截断效应, 我们也对 Sr-Y-Zr 问题的解决做了以下两方面的尝试. 对 $Z < 40$ 的元素, 假定弱 s-分量的分量系数等于相应金属丰度恒星的平均值; $C_2 = 1.88$ (丰度观测的平均值取自文献 [9]), 计算结果由图 3 给出. 可见弱 s-分量丰度的平均值远低于贫金属星 CS 22892-052 的观测值, 这说明该星的弱 s-分量丰度主要不来自充分混合后的平均环境, 而更可能来自没得到充分混合的环境: 弱 s-分量丰度与 r-分量丰度都主要产生于同一颗 (或几颗) 大质量星, 分别对应于它的核心 He 燃烧阶段和最后的超新星爆发阶段. 基于这种考虑, 对 $Z < 40$ 的元素取 $C_2 = C_1$, 发现计算结果 (图 4) 与除 Th 以外所有观测到元素的丰度值都符合得很好. 这对我们提

将 CS 22892-052 的观测值代入 (3) 式, 可得 $C_1 = 46.6$, 将其代入 (1) 式, 重元素丰度分布的计算结果由图 2 给出, 可以看出, 太阳系 r-过程丰度分布同样能拟合除 Y 和 Th 以外的所有观测到的元素的丰度值, 这与 Cowan 等人 [9] 的结果是相同的. 对于 Y 的丰度问题, Cowan 等人从另一方面做了尝试: 考虑弱 s-分量的贡献. 在他们的计算中, 弱 s-分量的贡献是通过在太阳系相应过程分量乘以一个下降因子得到 (以 Y 的丰度为标

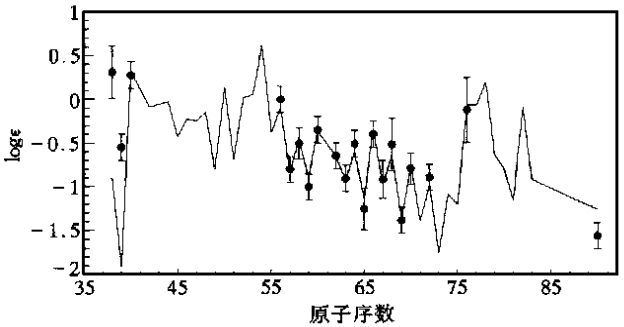


图 3 弱 s-分量的分量系数等于相应金属丰度恒星的平均值时理论计算曲线与丰度观测值的比较

解释. 在 Cowan 等人工作的基础上, 假定在 Zr 处存在截断效应, 我们也对 Sr-Y-Zr 问题的解决做了以下两方面的尝试. 对 $Z < 40$ 的元素, 假定弱 s-分量的分量系数等于相应金属丰度恒星的平均值; $C_2 = 1.88$ (丰度观测的平均值取自文献 [9]), 计算结果由图 3 给出. 可见弱 s-分量丰度的平均值远低于贫金属星 CS 22892-052 的观测值, 这说明该星的弱 s-分量丰度主要不来自充分混合后的平均环境, 而更可能来自没得到充分混合的环境: 弱 s-分量丰度与 r-分量丰度都主要产生于同一颗 (或几颗) 大质量星, 分别对应于它的核心 He 燃烧阶段和最后的超新星爆发阶段. 基于这种考虑, 对 $Z < 40$ 的元素取 $C_2 = C_1$, 发现计算结果 (图 4) 与除 Th 以外所有观测到元素的丰度值都符合得很好. 这对我们提

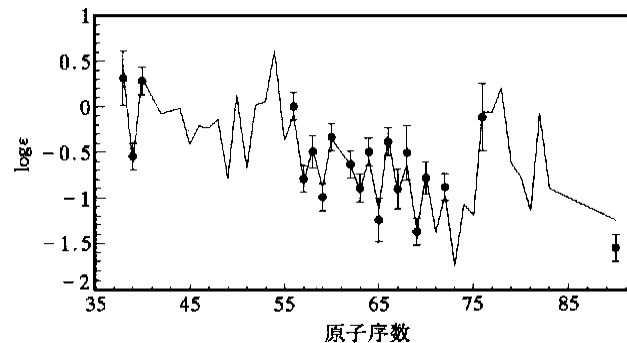


图 4 弱 s-分量的分量系数等于 r-分量的分量系数时理论计算曲线与丰度观测值的比较

出的假定是有力的支持. 对于存在截断效应的原因, 还有待于 r -过程理论研究的深入和完善. 一个可能的解释是 r -过程核素丰度也分为两个分量: 质量数较低的核素在较低中子数密度的环境中产生, 质量数较高的核素在较高中子数密度的环境产生^[8].

由图 1~4 可以看出, 4 种情况所给出的 Th 的丰度的计算值都大于它的观测值, 且其偏差已超出观测的误差范围. 这说明贫金属星 CS 22892-052 的 Th 元素的丰度观测值低于太阳系 r -过程产生的 Th 的丰度. 这是因为极贫金属星 CS 22892-052 的年龄 $((17 \pm 4) \text{ Ga})$ 远远大于太阳系的年龄, 而 Th 又是一种放射性元素, 到太阳系形成时, 贫金属星 CS 22892-052 的 Th 元素已衰变了相当数量, 从而造成 Th 的丰度观测值低于根据太阳系形成时的核素丰度分布计算出来的 Th 的丰度值.

3 结论

本文以 3 种中子俘获过程的典型代表元素 (Ba, Sr, Eu) 丰度观测结果为依据, 以重元素核合成理论及星系化学演化理论所得结论为基础, 提出了确定在不同金属丰度下不同核合成过程对重元素丰度的相对贡献的一种方法. 由图 4 可以看出, 将此方法应用于贫金属星 CS 22892-052, 计算结果与丰度观测值基本符合. 我们所给出的计算方法意义在于: 仅根据个别元素的丰度观测结果, 通过以上计算步骤, 即得到各不同金属丰度恒星的所有重元素丰度, 得到了与观测基本符合的结果, 确定了各核合成过程对贫金属星重元素贡献的分量系数; 由图可见, 计算曲线基本落入观测值区域内, 这一方面是对重元素核合成理论的支持, 另一方面也说明本文所提出的计算方法是合理的, 它也可用于分析其他恒星的重元素丰度分布. 我们所提出的分量系数还具有以下意义:

(1) 由于 C_1, C_2, C_3 为除去了金属丰度因素后的分量系数, 因此它们给出了贫金属情况下各核合成过程的贡献与太阳系情况 ($C_1 = C_2 = C_3 = 1$) 的比较. 若 $C_i > 1$, 说明除去金属丰度因素后, 该机制的贡献大于在太阳系中的贡献; 若 $C_i < 1$, 说明除去金属丰度因素后, 该机制的贡献小于在太阳系中的贡献.

(2) 由于分量系数 C_1, C_2, C_3 具有明显的物理意义, 因此我们所给的计算方法避免了国际上在拟合贫金属星重元素丰度时人为地将太阳系丰度乘以一下降因子的做法^[6~8] (常以某元素丰度为标准进行归算, 不同恒星不同, 不同的分量也不同). 而以前的做法明显失去了下降因子所含的重要的物理意义: 它等于恒星的金属丰度和分量系数的乘积. 对于在没有得到充分混合的区域内形成的恒星, 其分量系数与相应金属丰度恒星的平均值有明显差异时, 应考虑用单一分量去进行计算. 由本文所得结果可见, 通过对分量系数 $C_i (i=1, 2, 3)$ 值的分析还可将重元素丰度分布特殊的恒星挑选出来, 进行单独分析. 由于这些恒星是在某一核合成过程对丰度的贡献占优势的环境中形成的, 因此对它们丰度的分析研究将使我们对于重元素核合成及星系重元素丰度化学演化的理解更加深入.

需要说明的是, 由于太阳系中的 Ba 和 Eu 主要来自 s -过程主要分量和 r -过程分量, 因此本文所得到的分量系数 C_1 和 C_3 的值是比较可靠的. 由于比 Sr 更轻的中子俘获元素的丰度观测资料较少, 我们不得不采用 Sr 作为 s -过程弱分量的典型代表, 而实际上太阳系中 s -过程主要分量对 Sr 的丰度的贡献更大, 这使分量系数 C_2 的计算值对 $[\text{Sr}/\text{Fe}]$ 的数值非常敏感, 这些因素可能导致对 s -过程弱分量贡献的计算产生偏差.

参 考 文 献

- 1 Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. Synthesis of the elements in stars. *Rev Mod Phys*, 1957, 29: 547
- 2 Busso M, Gallino R, Lambert D L, et al. Nucleosynthesis and mixing on asymptotic giant branch. I. MS and S stars with and without Tc. *Ap J*, 1992, 399: 218
- 3 Gratton R G, Sneden C. Abundances of neutron-capture elements in metal-poor stars. *A & A*, 1994, 287: 927
- 4 Busso M, Picchio G, Gallino R, et al. Are s-elements really produced during thermal pulses in intermediate-mass stars? *Ap J*, 1988, 326: 196
- 5 Sneden C, Preston G W, McWilliam A, et al. Ultrametal-poor halo stars: the remarkable spectrum of CS 22892-052. *Ap J*, 1994, 431: L27
- 6 Cowan J J, Burris D L, Sneden C. Evidence of heavy element nucleosynthesis early in the history of the galaxy: the ultrametal-poor star CS 22892-052. *Ap J*, 1995, 439: L51
- 7 Sneden C, McWilliam A, Preston G W, et al. The ultrametal-poor, neutron-capture-rich giant star CS 22892-052. *Ap J*, 1996, 467: 819
- 8 Cowan J J, McWilliam A, Sneden C, et al. The thorium chronometer in CS 22892-052: estimates of the age of the galaxy. *Ap J*, 1997, 480: 246
- 9 Cowan J J, Thielemann F K, Truran J W. The r-process and nucleochronology. *Phys Rep*, 1991, 208: 267
- 10 Raiteri C M, Gallino R, Busso M, et al. The weak s-component and nucleosynthesis in massive stars. *Ap J*, 1993, 419: 207
- 11 Anders E, Greochem N. Abundance of the elements: meteoritic and solar. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 197