

贫金属星的中子俘获元素*

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 利用分量系数公式并结合太阳系元素丰度的最新数据,计算了64颗贫金属星的中子俘获元素丰度.结果显示,快中子俘获过程(r过程)是贫金属星中子俘获元素的主要来源,且金属丰度小于-2.5的贫金属星的重中子俘获元素产量可能来自于纯r过程;重中子俘获元素与轻中子俘获元素来自于不同的天体物理场所.

关键词 贫金属 中子俘获 分量系数 丰度

1 引言

在天体物理中,氢和氦以外的所有元素都被称为金属元素.恒星的金属丰度通常用比较容易测定的恒星和太阳系铁原子数与氢原子数的比值之对数表示.即

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \lg(\text{Fe}/\text{H})_* - \lg(\text{Fe}/\text{H})_{\odot}, \quad (1)$$

其中下标*表示恒星, \odot 表示太阳.贫金属星就是金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] < 0$ 的恒星.由于贫金属星是星系早期形成的恒星,其外包层仍然保持着星系形成早期的星际空间所特有的化学组成,因此它们又被誉为星系的“化石”.

中子俘获元素是指由慢中子俘获过程或快中子俘获过程^[1]形成的所有元素.其中,慢中子俘获过程(简称s过程)是处于较低中子数密度(约为 10^8cm^{-3})下的不稳定种子核(主要是铁族元素)在俘获中子生成重元素¹⁾之前先发生 β 衰变的元素核合成^[2]机制.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 ^{208}Pb .中小质量渐进巨星分支恒星(简称AGB星)^[3]热脉冲过程中的富氦中间壳层被认为是形成s过程主要分量元素最合适的场所.与慢中子俘获不同,快中子俘获过程(简称r过程)中的不稳定种子核处于中子数密度较高的环境中.它们俘获中子的速率比其产物发生 β 衰变的速率快得多,即使中子俘获的产物多数不稳定,在它们连续两次俘获中子的过程中也很难插进 β 衰变.对于r过程的产生场所,至今尚未确定.理论上提出的候选者至少有10种.它们大体可分为两类:一类是温度较高、富中子的天体物理环境,如超新星爆发、中子星碰撞等,目前认为这种环境最可能是II型超新星²⁾的爆发阶段,那时的中子数密度可以高达 10^{20}cm^{-3} ;第二类是温度较低、中子较少的天体物理环境,如正在发生超新星爆发的恒星的氦壳层和碳壳层、低质量星的氦核心等.

在恒星的中子俘获元素中,贫金属星中子俘获元素的丰度与恒星的形成及演化密切相关.这是因为,星系演化理论认为,贫金属星表面的化学组成是第一或第二代恒星中的一个或少数几个大质量星发

2003-05-09 收稿

*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(KJ951-A1-002),国家自然科学基金(19973002,10147202,10175074)资助

1) 重元素是指比铁族元素还要重的元素($A > 60$)

2) II型超新星一般由质量大于8倍太阳质量、富含重元素的年轻大质量星爆发形成

生超新星爆发的结果. 所以, 透过它们不但可以观察贫金属星的前辈们所生产的中子俘获元素, 同时, 还可以通过它们的元素丰度推断第一、二代恒星的特性. 到目前为止, 许多观测事实和理论研究表明, 可观测贫金属星的中子俘获元素丰度具有太阳系 r 过程元素丰度的特点, 而且较重的中子俘获元素的丰度大致与相应的太阳系 r 过程元素丰度成正比. Gilroy 等^[4]对大量贫金属星的研究虽然证明了在低金属丰度下主要是 r 过程在起作用, 但其结果同时也显示: $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$ 的不同恒星的中子俘获元素相对于铁的丰度存在明显的弥散. 这个现象已在极贫金属星的研究中被证实^[5,6]. 另外, 在更多中子俘获元素丰度被测出的情况下, 即使只考虑少量特殊恒星, $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ 的不同恒星的中子俘获元素相对于铁的丰度仍然显示出很大的弥散. 这样, 贫金属星表面丰度与简单缩放后的太阳系 r 过程元素丰度相同的观点受到了进一步的质疑^[7]. r 过程作为贫金属星中子俘获元素唯一来源的机制变得越来越不可靠. 人们相信, 从 $-3.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$ 中的某个金属丰度开始, s 过程已经对星系化学演化有贡献. 以极贫金属星 CS22892-052 为例, 这颗 $[\text{Fe}/\text{H}] = -3.1$ 的恒星是目前为止元素观测丰度仅次于太阳的恒星. 它的金属丰度虽然很低, 但重元素却明显超丰. 太阳系 r 过程丰度曲线乘以一个下降因子后得到的丰度曲线, 能够很好地拟合这颗星中比 Ba 重的所有重中子俘获元素的丰度. 不过, 要拟合较轻中子俘获元素的丰度, 必须考虑 s 过程的作用. Cowan 等^[8]发现, 最佳的拟合效果是将太阳系 r 过程元素丰度与 s 过程弱分量对应的元素丰度进行人为的混合. 这表明, 即使在金属丰度如此低的情况下, 恒星中已经包含了 s 过程的贡献.

1988 年 Busso 等^[9]提出, 将太阳系重元素丰度中的 s 过程贡献部分缩小 10 倍并保持 r 过程贡献不变, 便可以得到贫金属星的重元素丰度. 但是, 这种方法不能拟合所有贫金属星重元素的观测丰度. 1996 年, Cowan 等^[10]利用哈勃空间望远镜首次测出了贫金属星 HD126238 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -1.7$) 的 r 过程第三峰元素 Os, Pt, Pb 的丰度, 并结合地面的观测结果研究了它的重元素丰度分布. 发现太阳系纯 r 过程或纯 s 过程元素丰度均不能拟合出该星的丰度观测值, 拟合观测丰度的最佳曲线的混合比例为 80% 的太阳系 r 过程元素丰度和 20% 的 s 过程元素丰度. 2003 年, 这个小组^[11]发布了 CS22892-052 最新的丰度数据, 在 36 种中子俘获元素丰度中, 有 7 种

是以前没有测定的. 他们发现, 缩放后的太阳系 r 过程的丰度曲线与该星中比 Ba 重的中子俘获元素丰度曲线吻合, 对于较轻的中子俘获元素, 无论是纯 r 过程, 还是纯 s 过程缩放后的丰度曲线均不能拟合. 如上所述, 一般情况下, 恒星的中子俘获元素丰度是 r 过程与 s 过程产物的混合结果. 但由于光谱观测不能将不同核合成过程的贡献区分开, 因此在贫金属星情况下, r 过程与 s 过程对元素丰度贡献比例的确定具有极大的不确定性.

2 分量系数公式

1999 年张波等^[12]考虑到不同核合成过程对元素丰度的贡献不同, 提出了计算贫金属星表面丰度的分量系数公式

$$N_i = (C_1 N_{i,r\odot} + C_2 N_{i,sm\odot} + C_3 N_{i,sw\odot}) 10^{[\text{Fe}/\text{H}]}, \quad (2)$$

式中的 N_i 表示恒星第 i 个元素的丰度; $N_{i,r\odot}$, $N_{i,sm\odot}$ 和 $N_{i,sw\odot}$ 分别表示太阳系第 i 个元素丰度的 r 过程分量、 s 过程主要分量和 s 过程弱分量; $[\text{Fe}/\text{H}]$ 表示恒星的金属丰度, C_1 , C_2 和 C_3 分别为恒星 r 过程分量、 s 过程主要分量和 s 过程弱分量的系数. 利用此公式, 他们计算了不同金属丰度下的恒星表面丰度, 并将计算值与 20 颗贫金属星的观测数据进行比较. 他们的研究表明, 这个公式可以较好地拟合 $[\text{Fe}/\text{H}] > -2.5$ 的贫金属星重元素的观测丰度, 但不适用于 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ 的极贫金属星. 为此, 他们对公式作了进一步的改进. 考虑到太阳系元素丰度的 s 过程弱分量是太阳系元素丰度减去 s 过程主要分量及其 r 过程分量的结果, 其分量系数具有较大的不确定性, 他们去掉了公式中的弱分量部分, 并利用改进的公式计算了贫金属星重元素的平均丰度趋势. 改进后的公式如(3)式所示. 其中, C_r 和 C_s 分别为 r 过程分量和 s 过程主要分量的系数:

$$N_i = (C_r N_{i,r\odot} + C_s N_{i,sm\odot}) 10^{[\text{Fe}/\text{H}]}. \quad (3)$$

通过计算结果与观测数据的比较, 他们得到了以下结论: 在贫金属环境下, 确实是 r 过程起主要作用; 虽然 s 过程主要分量与 r 过程分量的元素丰度分布与太阳系的相应分布相似, 但它们的相对产量明显不同; $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ 极贫金属星的重元素产量可能是纯 r 过程的贡献^[13].

2000 年 Burris 等^[14]发表了新的太阳系丰度数

据并重新确定了其中的 s 过程、r 过程的贡献. 依据这些新的数据, 并考虑到太阳系 s 过程主要分量对应的元素丰度分布是一个典型的分布^[15], 我们重新修正了(3)式的分量系数. 具体做法如下: 首先, 取太阳系的元素丰度作为标准, 令太阳系所有元素丰度的分量系数全部为 1. 即: $C_r = C_s = 1$. 其次, 根据文献[14]的太阳系丰度数据, Ba 丰度的 85% 来自于 s 过程主要分量, 其余的来自 r 过程; 而 Eu 有 97% 来自于 r 过程, 只有 3% 是 s 过程的贡献. 将这两个元素看作 s 过程和 r 过程的代表元素. 这样可以得到一个包含两个未知数(C_r 和 C_s)的方程组:

$$N_{\text{Ba}} = (C_r N_{\text{Ba}, r\odot} + C_s N_{\text{Ba}, s\odot}) 10^{[\text{Fe}/\text{H}]},$$

$$N_{\text{Eu}} = (C_r N_{\text{Eu}, r\odot} + C_s N_{\text{Eu}, s\odot}) 10^{[\text{Fe}/\text{H}]}, \quad (4)$$

求解方程组(4)可以得到分量系数 C_r 和 C_s 与贫金属元素相对丰度 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$, $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ 的关系式:

$$C_r = 1.0366 \times 10^{[\text{Eu}/\text{Fe}]} - 0.0366 \times 10^{[\text{Ba}/\text{Fe}]},$$

$$C_s = 1.1829 \times 10^{[\text{Ba}/\text{Fe}]} - 0.1829 \times 10^{[\text{Eu}/\text{Fe}]} \quad (5)$$

3 贫金属星元素丰度的拟合结果及讨论

利用式(4)及(5), 对近几年发表的 64 颗贫金属

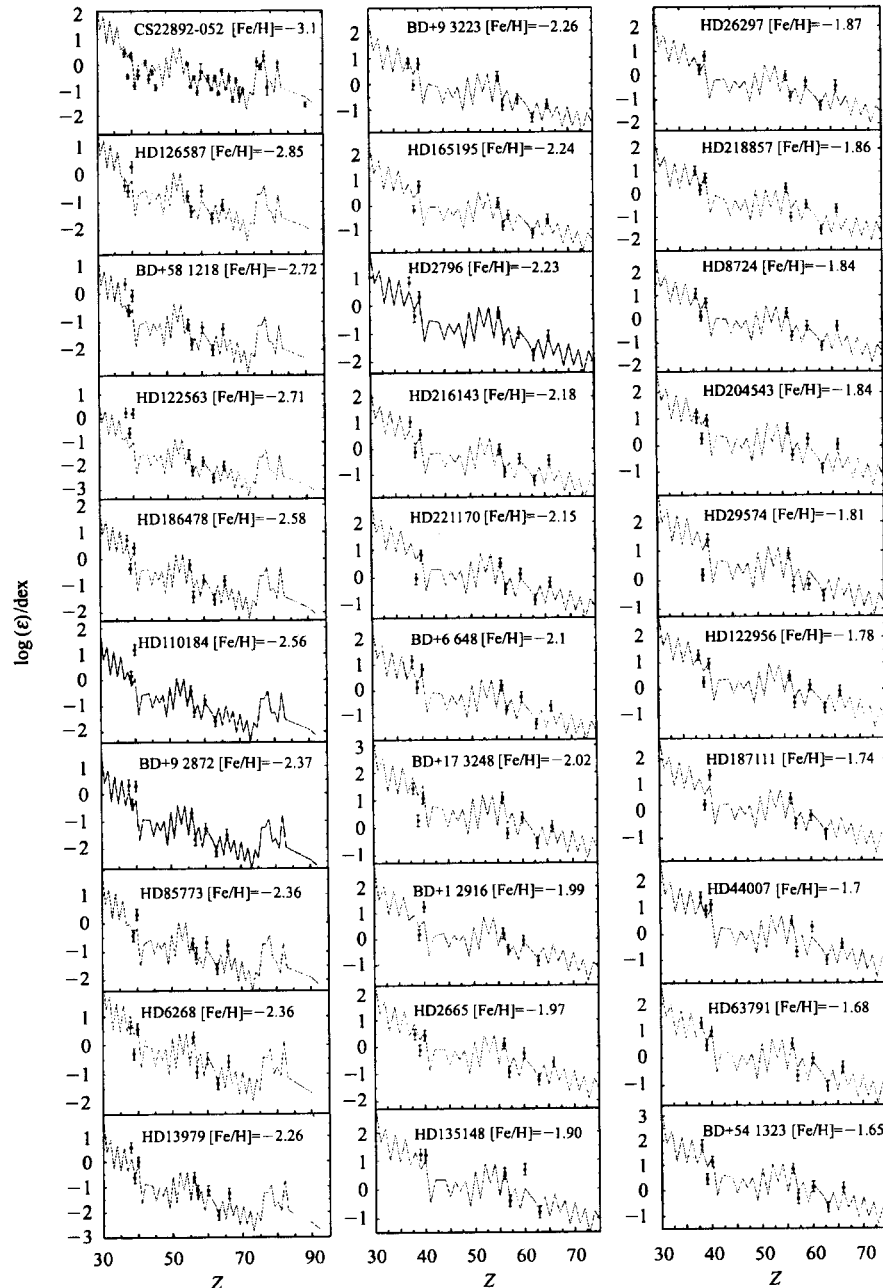


图 1 贫金属星元素丰度的拟合

Z 表示原子序数; $\log(\epsilon) = \lg(N_i/N_H) + 12$ 表示元素的丰度. 其中 N_i 和 N_H 分别为第 i 种元素的原子数和氢原子数.

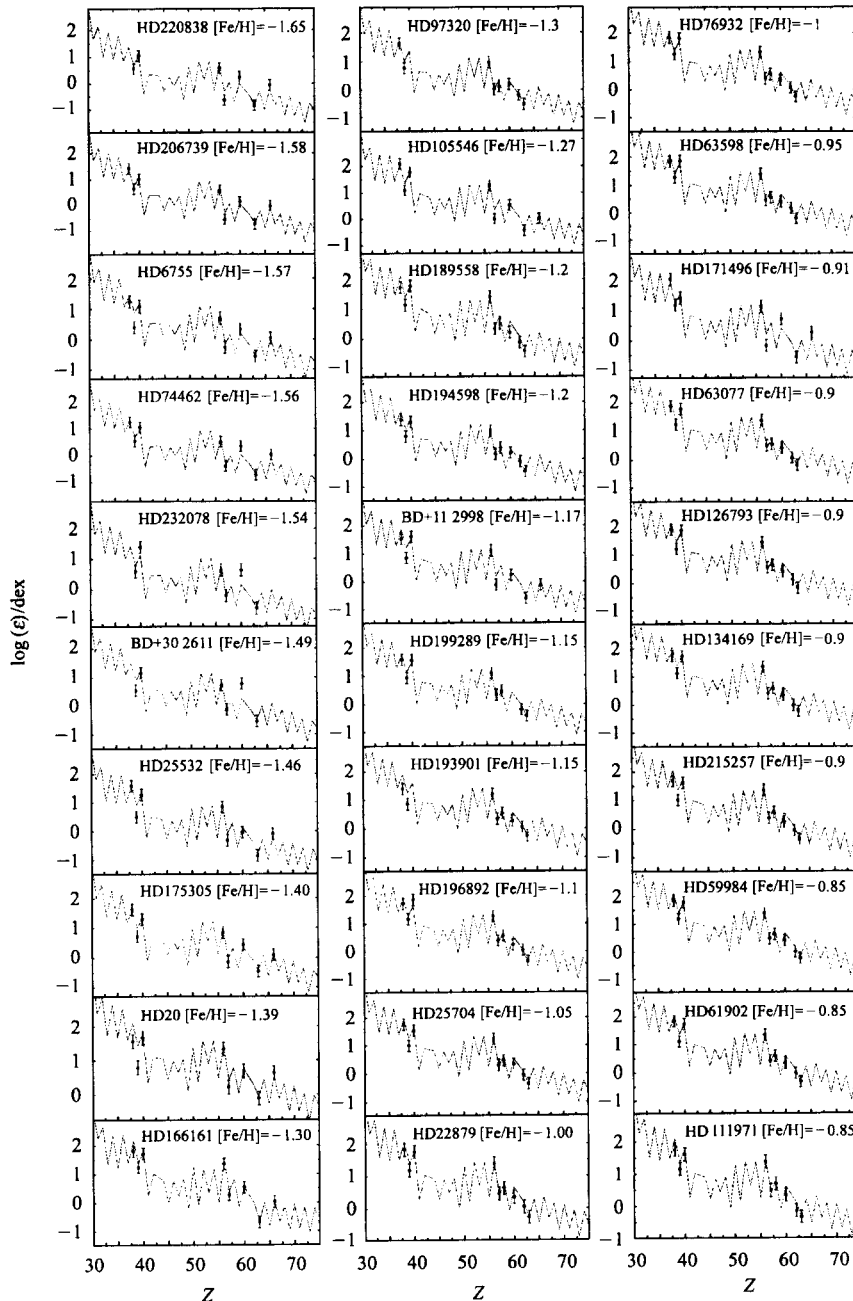


图 2 贫金属星元素丰度的拟合(续)

星元素丰度数据^[14,16]进行了拟合. 拟合结果见图 1—图 3, 各贫金属星的分量系数见表 1.

从拟合情况看, 总体上, 除部分样本的 La 和 Nb 元素丰度出现较大偏差外, 计算结果能够很好地拟合贫金属星重中子俘获元素的观测丰度. 这表明几乎所有的重中子俘获元素都来自于 s 过程主要分量和 r 过程的混合贡献. 对于轻中子俘获元素来说, 整体拟合效果不理想. 显然, 只有 r 过程和 s 过程主要分量的作用不能得到贫金属星轻中子俘获元素的所有产量. 这说明, 轻中子俘获元素与重中子俘获

元素可能来自不同的天体物理场所. 不过, 在仔细观察所有样本的拟合情况后, 发现, 对于 $-0.75 \geq [\text{Fe}/\text{H}] \geq -1.1$ 的贫金属星, 其轻中子俘获元素观测丰度与理论计算结果拟合得非常好. 这种特征暗示: 当星际空间的金属丰度大于 -1.1 时, 重、轻中子俘获元素在相同的天体物理环境中产生, 而在金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.1$ 的情况下, 大部分的轻中子俘获元素来自于与重元素产生场所不同的天体物理环境. 由于星系化学演化理论一般认为, 在金属丰度小于 -2 时, 质量大于 $8M_{\odot}$ 的 II 型超新星

表 1 贫金属星的分量系数

[Fe/H]	C_r	C_s	[Fe/H]	C_r	C_s
-3.10	44.89156	3.57586	-1.57	3.22632	1.09251
-2.85	5.79735	0.00174	-1.56	2.13389	0.64813
-2.72	1.66959	0.07744	-1.54	2.56180	0.89873
-2.71	0.51513	0.05055	-1.49	2.87753	0.90668
-2.58	3.78918	1.32931	-1.46	1.25087	1.51938
-2.56	2.88408	0.69497	-1.40	2.80679	1.05562
-2.37	0.57023	0.30730	-1.39	5.96480	3.42027
-2.36	1.78956	0.06494	-1.30	1.18099	3.77793
-2.36	3.31677	3.13502	-1.30	1.71433	1.04826
-2.26	0.42055	0.29782	-1.27	2.06950	2.72921
-2.26	2.63246	2.55945	-1.20	1.66137	0.84337
-2.24	3.87889	1.31349	-1.20	1.64116	2.63843
-2.23	0.87752	0.65907	-1.17	1.13965	1.42286
-2.18	2.75083	0.77522	-1.15	1.54718	1.01103
-2.15	6.42476	2.58664	-1.15	2.33983	1.23748
-2.10	1.96951	1.31426	-1.10	1.59060	1.40036
-2.02	9.11233	9.37140	-1.05	1.45800	1.15064
-1.99	4.58732	0.57280	-1.00	1.54273	1.50841
-1.97	1.72778	0.74365	-1.00	1.63303	1.25915
-1.90	3.86802	1.66483	-0.95	1.61082	1.35853
-1.87	1.31529	0.41443	-0.91	0.70270	0.87733
-1.86	0.57118	1.15980	-0.90	1.57886	1.17544
-1.84	1.60713	0.86610	-0.90	1.41578	1.09163
-1.84	2.90574	2.18238	-0.90	1.53284	1.35723
-1.81	5.82262	3.54954	-0.90	0.98093	1.15913
-1.78	3.62630	1.02194	-0.85	0.98384	0.98938
-1.74	2.32864	1.07018	-0.85	1.20539	1.10124
-1.70	1.56444	1.04396	-0.85	0.93526	1.08400
-1.68	1.32544	1.08613	-0.80	1.38450	0.72081
-1.65	2.97342	2.23321	-0.80	1.06061	1.09688
-1.65	2.02114	1.15894	-0.80	1.45822	1.25477
-1.58	2.27959	0.91777	-0.75	1.54558	1.06257

是贫金属星中子俘获元素的主要提供者;而在金属丰度大于 -2 时,中小质量的 I a 型超新星¹⁾的 s 过程产量开始对星系化学演化有贡献.因此,可以推断,在金属丰度比 -1.1 更高的条件下,中子俘获元素的产量来自于 I a 型、II 型超新星和 AGB 星.而在金属丰度比 -1.1 小的情况下,应该至少还存在一个其他的产生场所^[17,18]可以产生轻中子俘获元素.目前认为至少存在两种可能的场所:一种是 s 过程弱分量对应的天体物理场所,这个场所极可能是大质量星氦燃烧中的氦核心;另一种可能的场所

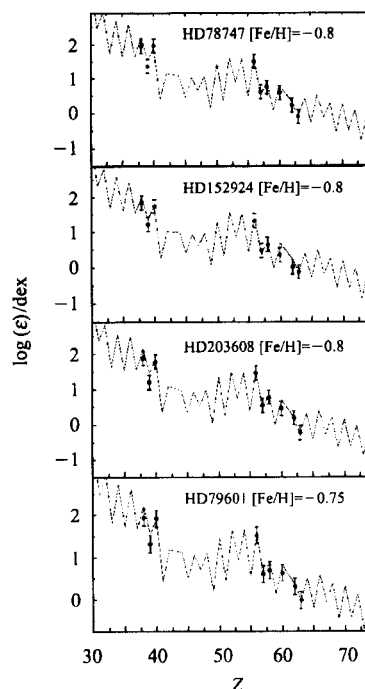


图 3 贫金属星元素丰度的拟合(续)

与 r 过程二分量机制^[19]有关——r 过程主要分量产生重中子俘获元素,弱分量产生轻元素,两个分量分别对应不同质量和频率的 II 型超新星.

另一方面,从表 1 看,64 颗贫金属星中有 53 颗星的分量系数满足 $C_r > C_s$ 的关系;其余 11 颗恒星中,只有 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.46$ 的 HD25532 和 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.2$ 的 HD194598 这两颗星的 $C_s - C_r > 1$,其他 9 颗星的 C_s 和 C_r 的数值相差不大.从这里不难看出,绝大多数贫金属星的中子俘获元素主要来自于 r 过程,而 s 过程只起次要作用.而且,在 $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.1$ 的情况下,r 过程分量系数与 s 过程主要分量的系数相差不大.这说明 r 过程与 s 过程对中子俘获元素的贡献相当.由此可以推断,在星际空间的金属丰度大于 -1.1 时,中小质量 AGB 星、I a 型超新星与 II 型超新星一起,在中子俘获元素的产生过程中发挥重要作用.另外,从表中还可以看到, $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ 的贫金属星的 C_r 远大于 C_s ,这个结果与文献^[13]的结论是一致的: $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ 的极贫金属星重元素产量基本上是纯 r 过程的贡献^[13].

在所有样本中,极贫金属星 CS22892-052 是最值得注意的例子.它的 $C_r \approx 45$, $C_s \approx 3.6$.而且,从对这颗星的拟合结果看,在没有考虑 s 过程强分量的情况下,理论计算得到的元素丰度可以很好地重

1) I a 型超新星是双星系统中已演化成白矮星的子星,通过吸积机制从其伴星处获得物质导致其质量超过临界质量而爆发形成.由于其伴星极可能是 AGB 星,因此它含有较多的 s 元素

现这颗星除 $\text{Th}^{1)}$ 以外的 s 过程第三峰(Pb 峰)元素的丰度. 这些证据说明, CS22892 - 052 中比 Ba 重的元素主要来源于纯 r 过程的贡献. 此外, 这颗星中比 Ba 轻的中子俘获元素的理论丰度并没有完全符合观测值, 要得到较好的拟合结果, 显然还需要考虑 s 过程弱分量或 r 过程弱分量的贡献.

4 小结

利用张波等提出的分量系数公式, 结合新的太阳系丰度数据, 对分量系数公式中的系数作了重新修正, 并对 64 颗贫金属星的中子俘获元素丰度进行了计算. 通过对贫金属星分量系数的分析, 以及理论计算结果与观测数据的比较, 得到以下结论: 第一, 绝大多数贫金属星的 r 过程分量系数大于 s 过程分量系数, 说明贫金属星中子俘获元素的主要来源确实是 r 过程, s 过程一般只起次级作用; $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ 的贫金属星的重中子俘获元素产量基本上来自于纯 r 过程. 第二, 重中子俘获元素与

轻中子俘获元素来自于不同的天体物理场所. 在金属丰度小于 -1.1 的情况下, 前者可能主要产生于 II 型超新星, 后者的大部分产量可能由 s 过程弱分量或 r 过程弱分量提供; 而当金属丰度大于 -1.1 时, 轻中子俘获元素与重中子俘获元素来自于相同的天体物理环境, 这些天体物理环境包括 Ia 型、II 型超新星和中小质量 AGB 星. 第三, 鉴于计算结果虽能拟合大部分贫金属星重中子俘获元素的观测丰度, 但不能得到所有样本星重中子俘获元素的观测丰度, 以及金属丰度小于 -1.1 时的轻中子俘获元素的观测丰度. 我们认为, 除了采用的太阳系元素丰度数据有误差外, 很可能是公式本身没有考虑其他核合成过程的缘故. 显然, 这个公式还有待进一步改进.

不管怎样, 从以上的计算分析中, 我们仍然得到了一些有关星系形成初期的物理环境及其化学演化过程的重要信息. 这对进一步约束恒星演化模型, 完善星系化学演化理论和检验元素核合成理论都具有重要意义.

参考文献 (References)

- Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A et al. Rev. Mod. Phys., 1957, **29**:547—650
- LI Guang-Lie, LI Long. Nucl. Phys. Rev., 1999, **16**:201—206 (in Chinese)
(厉光烈, 李龙. 原子核物理评论, 1999, **16**:201—206)
- 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)
- Gilroy K K, Sneden C, Pilachowski C A et al. Ap. J., 1988, **327**:298—320
- McWilliam A, Preston G W, Sneden C et al. Astrophys. J., 1995, **109**:2736—2756
- McWilliam A, Preston G W, Sneden C et al. Astrophys. J., 1995, **109**:2757—2799
- Sneden C, McWilliam A, Preston G W et al. Ap. J., 1996, **467**:819—840
- Cowan J J, Burris D L, Sneden C et al. Ap. J. Lett., 1995, **439**:51—54
- Busso M, Picchio G, Gallino R et al. Ap. J., 1988, **326**:196—207
- Cowan J J, Sneden C, Truran J W et al. Ap. J. Lett., 1996, **460**:115—118
- Sneden C, Cowan J J, Lawler J E et al. astro-ph/0303542
- ZHANG Bo, LI Ji, ZHANG Cai-Xia et al. Ap. J., 1999, **513**:910—918
- ZHANG Bo, ZHANG Yan-Xia, LI Ji et al. Chin. J. Astron. Astrophys., 2002, **2**:429—440
- Burris D, Pilachowski C A, Armandroff T E et al. Ap. J., 2000, **544**:302—319
- ZHANG Miao-Jing, ZHANG Bo, LI Guang-Lie. Chin. Phys. Lett., 2003, **20**:962—964
- Jehin E, Magain P, Neuforge C et al. Astron. Astrophys., 1999, **341**:241—255
- Sneden C, Cowan J J, Ivans I I et al. Ap. J. Lett., 2000, **533**:139—142
- Cameron A G W. Ap. J., 2001, **562**:456—469
- Wasserburg G J, QIAN Y Z. Ap. J. Lett., 2000, **529**:21—24

1) Th 的丰度与理论值不符, 是因为观测丰度本身存在较大的误差. 文献[11]中提到, 由于 CS22892 - 052 的 $[\text{C}/\text{Fe}]$ 相对较高, 它的 Th 谱线抽取不但受到 Th 的各种核素的影响, 同时也受到 CH 谱线的干扰

Neutron Capture Elements in Poor-Metal Stars*

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

1 (College of Physics and Information Technology, 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 means of the component coefficient equation and the updated data of abundances of the solar system, we calculate the element abundances of 64 poor-metal stars. The result shows that the rapid neutron capture process (r-process) is the main source of neutron capture elements in poor-metal stars. Besides, the yields of heavy neutron capture elements in stars whose metallicity is less than -2.5 may come from pure r-process. The producer of the heavy neutron capture elements may differ from that of the light.

Key words poor-metal, neutron capture, component coefficient, abundance

Received 9 May 2003

* Supported by Major State Basic Development Program (G20000774), CAS Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-N02), NSFC (19973002, 10147202, 10175074)