

两颗CEMP-s视单星化学元素的天体物理来源研究*

王 双¹ 杨国超^{1†} 张 璐² 李宏杰¹ 张 波^{3‡}

(1 河北科技大学理学院 石家庄 050018)

(2 河北师范大学数学科学学院 石家庄 050024)

(3 河北师范大学物理学院 石家庄 050024)

摘要 CS 30301-015和HE 1045+0226是两颗C元素和s-过程元素均超丰的贫金属(CEMP-s)星. 视向速度观测发现这两颗星可能为单星. 采用叠加与分解的方法探究这两颗星化学元素的天体物理来源能够更好地理解银河系早期化学演化提供线索. 计算结果表明: 这两颗星的轻元素和Fe族元素主要产生于大质量星的primary过程. 对于CS 30301-015, 中子俘获元素主要来自AGB (Asymptotic Giant Branch)星中的主要s-过程. Pb的显著超丰主要归因于主要s-过程的贡献(约占Pb观测丰度的99.8%). 需要更多的视向速度观测来确定这两颗星的轨道特征. 对于HE 1045+0226, $56 \leq Z$ (质子数) ≤ 62 的重中子俘获元素主要来源于主要s-过程; Eu主要来源于主要r-过程. 而轻中子俘获元素Y和Zr主要来自快速自转大质量星的primary弱s-过程, 这一核合成过程对HE 1045+0226的Y和Zr丰度的贡献分别约为69.8%和67.6%. 这从观测的角度证明弱s-过程能够在贫金属环境下发生.

关键词 恒星: 丰度, 恒星: 形成, 恒星: 化学组成特殊

中图分类号: P144; 文献标识码: A

1 引言

贫金属星是宇宙演化早期形成的恒星, 保留了第1代恒星以及银河系及近邻矮星系演化极早期的化学特征, 因此探究贫金属星化学元素的天体物理来源对于理解宇宙中元素的产生和银河系早期的化学演化历史具有重要意义^[1-2]. 一颗恒星的大气中某种元素的多少用丰度表示, 元素X的丰度定义为包含 10^{12} 个氢原子的物质中所含元素X原子个数 $\epsilon(X)$ 的对数值, 即 $\lg \epsilon(X) \equiv \lg(N_X/N_H) + 12.0$, 式中 N_X 和 N_H 分别为元素X和H的原子个数. 元素X和Y的相对丰度 $[X/Y] \equiv \lg(N_X/N_Y)_* - \lg(N_X/N_Y)_\odot$, 下标“*”代表某颗恒星, “ \odot ”代表太阳. 本文研究的贫金属星是指 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ ^[3]的恒星. 宇宙中Fe族

2020-11-22收到原稿, 2021-01-18收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11673007、11773009), 河北省自然科学基金项目(A2019208194)资助

[†]yanggc2010@126.com

[‡]zhangbo@hebtu.edu.cn

元素以及比其轻的金属元素主要通过恒星内部的核聚变产生; 而比Fe族元素更重的元素主要通过中子俘获过程产生. 基于原子核俘获中子和发生 β -衰变时标的相对长短, 中子俘获过程被分为慢中子俘获(s-)过程和快中子俘获(r-)过程^[4]. 由于天体物理环境及相关物理条件的不同, s-过程被进一步分为主要s-过程和弱s-过程. 主要s-过程主要发生在中、小质量星的渐近巨星支阶段, 此过程不仅产生轻中子俘获元素(如Sr、Y和Zr), 也产生重中子俘获元素(如Ba、La和Pb)^[5]; 弱s-过程主要发生在大质量星燃烧的He核和C壳层, 此过程主要产生轻中子俘获元素^[6-7]. 由于s-过程的元素产量具有secondary特性(其产量与恒星初始金属丰度近似正相关), 其对贫金属星元素丰度的贡献很小, 通常被忽略, 因此可认为大多数贫金属星的中子俘获元素主要由r-过程产生(值得注意的是, 这些贫金属星不包括位于双星系统中, 由于物质吸积导致s-过程元素超丰的恒星)^[8]. 然而Frischknecht等^[9-10]研究发现快速自转的大质量贫金属星中能够产生primary中子源(其产量与恒星的初始金属丰度无关), 因此能够发生primary弱s-过程.

目前人们对于r-过程的天体物理环境、种子核和中子源等物理信息还很不清楚, 一般认为与II型超新星爆发或中子星并合等剧烈的天体物理事件有关^[11-12]. 2017年以来, 高新激光干涉仪引力波天文台和室女座引力波探测器(LIGO/Virgo)以及哈勃空间望远镜(HST)等观测到中子星并合事件抛出La系等中子俘获元素, 这意味着中子星并合是r-过程元素产生的天体物理场所之一^[13-14]. 由于对r-过程的物理条件和产量不完全清楚, Arlandini等^[15]从太阳的观测丰度中减去s-过程丰度从而得到r-过程丰度. 根据贫金属星观测丰度的模式特征, r-过程被分为主要r-过程和弱r-过程^[16]. 基于典型主要r-过程星(CS 22892-052和CS 31082-001)和弱r-过程星(HD 122563和HD 88609)的观测丰度, Li等^[17]在2013年和Hansen等^[18]在2014年分别通过迭代得到了主要r-过程和弱r-过程丰度, 并证明两个r-过程产量具有primary特性.

大量贫金属星的观测研究发现, 存在大量C元素超丰的贫金属星(Carbon-Enhanced Metal-Poor, CEMP), 且其比例随着金属丰度降低而升高^[19-20]. 多年来, 由于CEMP星的中子俘获元素显示出不同的丰度特征, 且形成机制尚不完全确定, 因此这类贫金属星元素丰度特征的形成机制一直是天体物理领域的研究热点^[21-22]. 基于中子俘获元素的丰度模式, CEMP星被进一步分为4类^[3]: (1) CEMP-s星: $[\text{Ba}/\text{Fe}] > 1.0$, $[\text{Ba}/\text{Eu}] > 0.5$. 通常认为此类恒星处于双星系统中, 其超丰的s-过程元素来自其经历了渐近巨星支阶段的伴星^[23]. 但有些CEMP-s星被视向速度观测认定为单星. 这些CEMP-s视单星中子俘获元素丰度特征的形成机制还需进一步探究^[24]. (2) CEMP-r星: $[\text{Eu}/\text{Fe}] > 1.0$. 此类恒星的观测数据非常少. 目前仅有CS 22892-052被认定为CEMP-r星, 且这颗贫金属星没有表现出双星轨道特征^[25]. (3) CEMP-r/s星: $0.0 < [\text{Ba}/\text{Eu}] < 0.5$. 此类恒星元素丰度特征的形成机制仍处于争论中. 人们提出多种模型试图解释其Ba和Eu的双超丰现象, 但任何一种模型都不能完美地解释此类恒星元素丰度模式的形成^[26-27]. (4) CEMP-no星: $[\text{Ba}/\text{Fe}] < 0.0$. 此类恒星的观测样本中被认为属于宇宙中第2代恒星的较高(但数量仍然非常有限). 这些被认为属于第2代恒星的CEMP-no星可能形成于被第1代大质量星污染后的气体云中^[28].

2016年, 基于视向速度观测, Hansen等^[24]将4颗CEMP-s星认定为单星: CS 30301-015、HE 1045+0226、HE 0206-1916和HE 2330-0555. 2017年, Choplin等^[29]利用快速自

转大质量星的primary弱s-过程理论模型与这4颗CEMP-s视单星的元素丰度进行了比较, 讨论了这4颗CEMP-s星元素丰度的形成机制以及快速自转大质量星的primary弱s-过程产物对这4颗CEMP-s星元素丰度特征形成的影响. 但是单一的primary弱s-过程并不能很好地解释CS 30301-015的Sr、Y和Pb以及HE 1045+0226的Pr和Eu等元素丰度的超丰. Choplin等^[30]于2018年给出了不同物理参数下的快速自转大质量星的primary弱s-过程产量, 这为相关研究提供了帮助. 另外, Abate等^[31]利用双星演化模型分析了CEMP-s星的轨道周期, 他们提出这4颗CEMP-s视单星可能都是双星系统, 被认定为单星的原因可能是其轨道周期太长(> 10000 d)或轨道面倾角不利于观测. 但同时也指出他们的模型在长轨道周期双星的数量统计上与观测数据不一致.

贫金属星中子俘获元素的丰度模式特征一般是多个核合成过程产物累积的结果, 因此定量计算不同核合成过程对贫金属星元素丰度的贡献能够更准确地探究其天体物理来源, 从而为更全面地理解银河系早期的化学演化和不同类型恒星的形成过程提供线索^[32]. 在上文提到的4颗CEMP-s视单星中, 由于HE 0206-1916和HE 2330-0555元素丰度的观测数据较少, 尤其缺少Sr、Y和Zr等典型的轻中子俘获元素以及La、Eu等典型的重中子俘获元素丰度, 所以我们重点探究另外两颗CEMP-s视单星CS 30301-015和HE 1045+0226化学元素的天体物理来源. 本文第2节是针对这两颗样本星的丰度线索分析; 第3节利用叠加与分解的方法计算不同核合成过程对样本星元素丰度的相对贡献及相应核合成过程的分量丰度, 进而探究这两颗样本星化学元素的天体物理来源; 第4节是结论与讨论.

2 丰度线索

贫金属星的元素丰度模式蕴含了丰富的核合成信息, 探究贫金属星化学元素的天体物理来源有助于我们更全面地了解星系早期的元素合成过程. 为了得到样本星元素丰度特征的核合成线索, 我们分别将CS 30301-015 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.64$)和HE 1045+0226 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.20$)的观测丰度模式与7颗已被认定为处于双星系统中的CEMP-s星 ($-2.94 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.90$, 以下简称CEMP-s双星)的平均观测丰度模式进行比较, 比较结果在图1中给出. 其中, 对于某一元素X, CS 30301-015的观测丰度 $\lg \varepsilon(X)$ 取自文献[33-34]; HE 1045+0226的观测丰度 $\lg \varepsilon(X)$ 取自文献[35]. CEMP-s双星的观测丰度 $\lg \varepsilon(X)$ 取自文献[33-34, 36-38]. 不同的研究工作可能采用不同的太阳元素丰度值以及不同的元素丰度计算模型和方法. 由文献给出的 $\lg \varepsilon(X)$ 计算 $[X/\text{Fe}]$ 过程中, 我们统一采用Anders等^[39]于1989年给出的太阳元素丰度值. 对于样本星元素丰度的观测误差, 我们考虑了相应文献给出的大气参数(有效温度、表面重力、金属丰度和微观湍流速度)不确定性和谱线等值宽度的测量误差等因素, 将各因素所导致的丰度测量误差取平方和后开平方(即方和根)作为样本星元素丰度的观测误差. 这样在统一了太阳元素丰度参考值及考虑了不同的元素丰度测定方法造成的丰度测量误差之后, 我们通过比较图1中样本星观测丰度模式的差异或相似性分析其蕴含的丰度线索.

由图1可以看出, CS 30301-015元素丰度模式与CEMP-s双星的平均观测丰度模式相近, 这说明CS 30301-015与CEMP-s双星的中子俘获元素可能有相似的天体物理来源, 即CS 30301-015的中子俘获元素可能也是主要来自于主要s-过程. Abate等^[40]在2015年

研究了CEMP-s双星系统的物质交流和小质量AGB (Asymptotic Giant Branch)星的核合成过程. 基于双星演化和核合成模型, 他们提出AGB星产物贡献占主导的CEMP-s星轻s-过程元素与重s-过程元素的丰度比 $[ls/hs] < 0$, 其中ls采用Sr、Y和Zr的平均丰度, hs采用Ba、La和Ce的平均丰度. 由于CS 30301-015没有Zr的观测丰度, 因此针对此样本星, 我们用Sr和Y的平均丰度代表ls, Ba和La的平均丰度代表hs. 在此情况下, CS 30301-015的 $[ls/hs] = -0.85 (< 0)$. 这些丰度模式特征意味着CS 30301-015的中子俘获元素可能主要来自主要s-过程. 基于以上分析, 我们考虑用主要r-过程、弱r-过程和主要s-过程的叠加拟合CS 30301-015中子俘获元素的观测丰度.

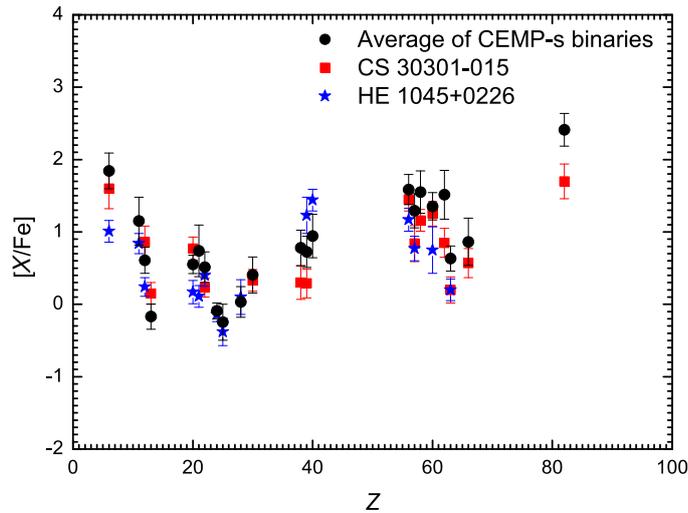


图1 $[X/Fe]$ 丰度模式的比较. 红色正方形和蓝色星形及误差棒分别代表样本星CS 30301-015^[33-34]和HE 1045+0226^[35]的观测丰度及相应误差. 黑色实心圆和误差棒代表7颗CEMP-s双星的平均观测丰度和平均误差, 其中CS 22880-074、HD 196944和CS 22942-019的数据取自文献[33-34]; CS 29512-073的数据取自文献[36]; HE 0336+0113和HE 2158-0348的数据取自文献[37]; HE 2138-3336的数据取自文献[38].

Fig. 1 Comparison of abundance patterns of $[X/Fe]$. The red squares with error bars refer to the observed elemental abundances of CS 30301-015^[33-34] and the corresponding errors. The blue stars with error bars are the observed elemental abundances of HE 1045+0226^[35] and the corresponding errors. The black filled circles with error bars refer to the averages of observed abundances of 7 CEMP-s binaries and the corresponding average errors. Therein, the data of CS 22880-074, HD 196944 and CS 22942-019 are from Refs. [33-34]; the CS 29512-073 data come from Ref. [36]; the data of HE 0336+0113 and HE 2158-0348 are from Ref. [37] and the data of HE 2138-3336 come from Ref. [38].

对于HE 1045+0226, 重中子俘获元素Ba、La、Nd和Eu的 $[X/Fe]$ 比CEMP-s双星的平均 $[X/Fe]$ 分别低约0.41、0.52、0.60和0.43 dex, 而轻中子俘获元素Y和Zr的 $[X/Fe]$ 比CEMP-s双星的平均 $[X/Fe]$ 分别高约0.51和0.50 dex, 这意味着, 与CEMP-s双星相比, HE 1045+0226的中子俘获元素可能有不同的天体物理来源. 基于快速自转大质量星的primary弱s-过程产量模型, Choplin等^[29]提出primary弱s-过程贡献占主导的CEMP-s星的 $[ls/hs] \gtrsim 0$. 基于凯克望远镜的高分辨率中阶梯光栅分光仪(High Resolution Echelle Spectrometer at the Keck telescope, HIRES/Keck)观测和Sr II的波长分别为4077 Å和4215 Å的吸收线, Cohen等^[35]没有测定HE 1045+0226的Sr元素丰度. Co-

hen等^[37]在测定由HIRES/Keck观测的16颗C星元素丰度时指出, 他们的很多样本星仅使用波长为4077 Å的吸收线测定Sr II丰度, 而波长为4215 Å的吸收线经常被CN分子吸收线混合. Cohen等^[41]在测定由HIRES/Keck观测的8颗天龙座矮椭圆星系中的贫金属星元素丰度时指出, 测定Sr II丰度使用的两条吸收线波长(4077 Å和4215 Å)均在蓝端, 而观测谱线在蓝端的信噪比很低. 因此针对此样本星, 我们用Y和Zr的平均丰度代表ls、Ba和La的平均丰度代表hs. 在此情况下, HE 1045+0226的[ls/hs] = 0.3 (> 0). 因此我们考虑用主要r-过程、弱r-过程、主要s-过程和快速自转大质量星的primary弱s-过程的叠加拟合HE 1045+0226中子俘获元素的观测丰度.

3 两颗样本星化学元素的天体物理来源研究

恒星的化学元素丰度反映了多个核合成过程的共同贡献, 因此分解一颗恒星的元素丰度能够详细地分析其背后蕴含的物理信息^[18]. 基于第2节的丰度线索, 我们采用丰度叠加与分解的方法, 分别计算不同核合成过程对这两颗CEMP-s星元素丰度的相对贡献及相应核合成过程的丰度分量, 进而探究这两颗CEMP-s星中子俘获元素的天体物理来源.

3.1 CS 30301-015

由第2节得到的关于CS 30301-015化学元素天体物理来源的线索, 此样本星的中子俘获元素丰度可能包含主要r-过程、弱r-过程和主要s-过程的贡献. 将轻元素、Fe族元素和中子俘获元素联立起来研究, 此样本星某一元素X的丰度可以用以下公式计算:

$$\varepsilon(X) = [C_{r,m}\varepsilon(X)_{r,m} + C_{pri}\varepsilon(X)_{pri} + C_{s,m}\varepsilon(X)_{s,m}] \times 10^{[Fe/H]}, \quad (1)$$

其中 $\varepsilon(X)_{r,m}$ 、 $\varepsilon(X)_{pri}$ 和 $\varepsilon(X)_{s,m}$ 分别代表主要r-过程、primary过程和主要s-过程的分量底数, $C_{r,m}$ 、 C_{pri} 和 $C_{s,m}$ 代表相应的分量系数, 这些分量系数可以揭示相应核合成过程的相对贡献. 其中, $\varepsilon(X)_{pri}$ 包括轻元素、Fe族元素和弱r-过程元素的丰度. 在贫金属环境下, 尽管轻元素、Fe族元素和弱r-过程元素的产生场所不同, 但它们都是由相似的天体物理事件(前身星质量 $M > 10 M_{\odot}$ 的II型超新星爆炸^[8])抛到宇宙空间, 从而对气体云产生贡献, 且它们的产量都具有primary特性, 因此可以把这些元素合并为1个分量: primary分量^[17]. 但大质量星内部核合成的产物中一些奇Z(质子数)元素(如Na和Al)的产量随恒星金属丰度升高呈升高趋势, 因此我们在拟合样本星的观测丰度时忽略奇Z元素Na和Al丰度^[42]. $\varepsilon(X)_{r,m}$ 和 $\varepsilon(X)_{pri}$ 取自文献^[17]; $\varepsilon(X)_{s,m}$ 取自Bisterzo等^[43]给出的主要s-过程产量(其中的AGB星模型参数如下: 初始质量 $M_{ini}^{AGB} = 1.5 M_{\odot}$ 、[Fe/H] = -2.6、¹³C袋效率(¹³C-pockets efficiency)为标准模型的1/6, 即ST/6), 已将其归算到Arlandini等^[15]给出的太阳中Ba元素的主要s-过程丰度; 弱s-过程分量底数 $\varepsilon(X)_{s,w}$ 取自文献^[7, 42].

计算丰度与观测丰度之间的差值用 χ^2 表示:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{[\lg \varepsilon(X)_{obs} - \lg \varepsilon(X)_{cal}]^2}{[\Delta \lg \varepsilon(X)_{obs}]^2 (K - K_{free})}, \quad (2)$$

其中, $\lg \varepsilon(X)_{obs}$ 和 $\lg \varepsilon(X)_{cal}$ 分别代表某一元素X的观测丰度和计算丰度, $\Delta \lg \varepsilon(X)_{obs}$ 代

表观测误差, K 代表拟合所用的元素个数, K_{free} 代表自由参数的个数. 通过寻找最佳拟合(即 χ^2 最小)的方法得到计算丰度. 如果样本星的观测丰度都能够被计算丰度很好拟合, 则样本星的观测元素来源于哪些核合成过程以及相应核合成过程的相对贡献比例就可以确定.

样本星CS 30301-015的观测丰度和计算丰度的最佳拟合结果在图2中给出. 由于分量系数由观测丰度约束, 计算误差通过观测误差的平均值得到(≈ 0.18 dex), 并在图中用虚线表示. 图2表明, 此样本星大多数元素的计算丰度很好地拟合了观测丰度, 且拟合误差在观测误差范围内(除了Ba丰度). 由分解结果可以看出, CS 30301-015的元素丰度模式可以被主要r-过程、primary过程和主要s-过程的共同贡献所解释.

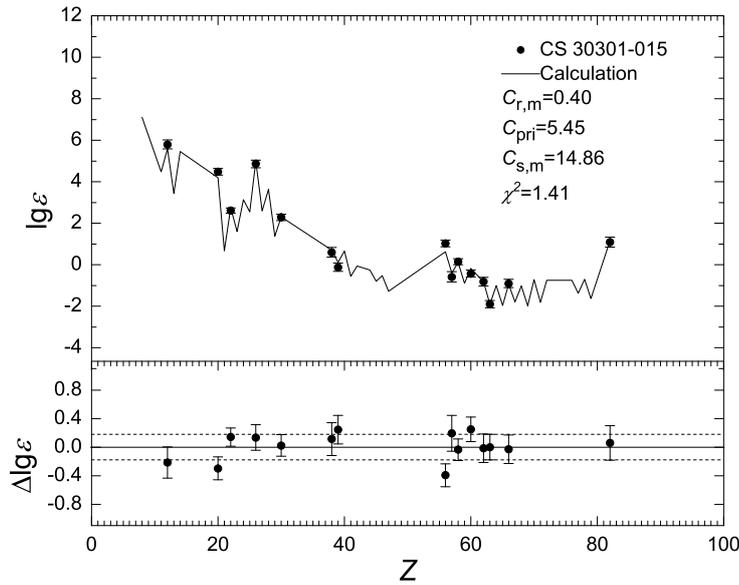


图 2 样本星CS 30301-015的最佳拟合结果. 在图的上部分, 实心圆代表观测丰度, 实线代表计算丰度. 在图的下部分, 实心圆代表拟合误差 $\Delta \lg \varepsilon(X) \equiv \lg \varepsilon(X)_{\text{cal}} - \lg \varepsilon(X)_{\text{obs}}$. 虚线代表计算误差.

Fig. 2 Best fitted results for the sample star CS 30301-015. In the top panel, the filled circles are the observed abundances and the solid line is the calculated abundances. In the bottom panel, the filled circles refer to the relative offsets, $\Delta \lg \varepsilon(X) \equiv \lg \varepsilon(X)_{\text{cal}} - \lg \varepsilon(X)_{\text{obs}}$. The dashed lines are the calculated errors.

为了进一步分析以上3种核合成过程对CS 30301-015元素丰度的相对贡献, 我们计算了此样本星不同元素的分量丰度, 计算结果如图3所示. 从图中可以看出, 对于CS 30301-015的轻元素和Fe族元素丰度, primary分量丰度显著高于主要r-过程和主要s-过程分量丰度. 这说明CS 30301-015的轻元素和Fe族元素丰度主要来自大质量星的primary过程. 对于中子俘获元素丰度, 主要s-过程分量丰度显著大于主要r-过程和弱r-过程分量丰度. 这说明CS 30301-015中子俘获元素的主要天体物理来源是主要s-过程, 即CS 30301-015的中子俘获元素主要来自AGB星产物的污染. 进一步确定这些主要s-过程产物究竟来自样本星形成时的气体云还是其伴星的物质交流(即此样本星是否确为单星)需要更多的视向速度观测.

由观测丰度可知, CS 30301-015的Pb显著超丰($[\text{Pb}/\text{Fe}] = 1.7$). Choplin等^[29]用

primary弱s-过程理论模型无法解释这一丰度特征. 由图2拟合结果可以看出, 我们对于此样本星中Pb的计算丰度很好地拟合了观测丰度. 由图3中Pb的各分量丰度可知, 主要s-过程对此样本星Pb的贡献达到约99.8%, 显著大于主要r-过程和弱r-过程的贡献. 因此, CS 30301-015的Pb超丰现象应该主要归因于主要s-过程的贡献.

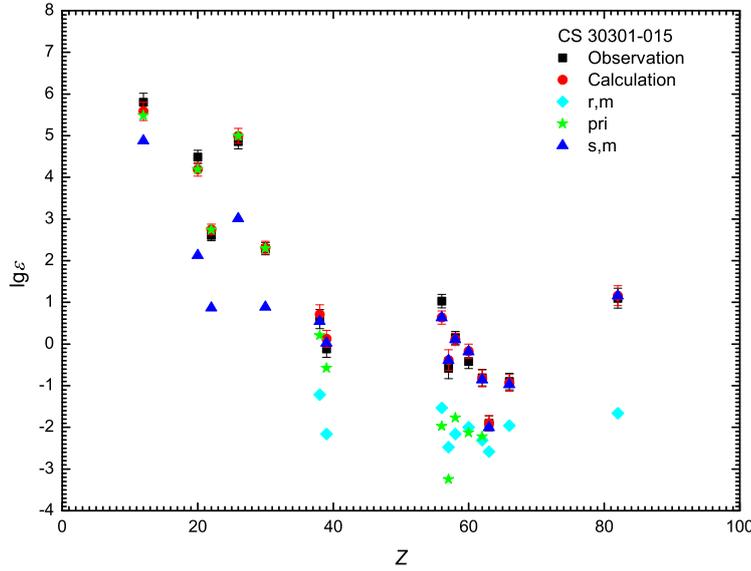


图3 样本星CS 30301-015化学元素的分量丰度. 黑色实心正方形和误差棒分别代表观测丰度和相应误差; 红色实心圆和误差棒分别代表计算丰度和相应误差. 青色菱形、绿色星形和蓝色向上三角形分别代表主要r-过程(r, m)、primary过程(pri)和主要s-过程(s, m)的分量丰度.

Fig. 3 Component abundances of chemical elements in the sample star CS 30301-015. The black filled squares with error bars refer to the observed abundances and the corresponding errors. The red filled circles with error bars are the calculated abundances and the corresponding errors. The cyan filled diamonds, green stars and blue up triangles refer to the abundances of main r-process (r, m), primary process (pri) and main s-process (s, m), respectively.

3.2 HE 1045+0226

由第2节得到的关于HE 1045+0226化学元素天体物理来源的线索, 我们在(1)式主要r-过程、primary过程和主要s-过程分量的基础上叠加快速自转大质量星的primary弱s-过程分量拟合此样本星的观测丰度. 因此, 样本星某一元素X的丰度用以下公式计算:

$$\varepsilon(X) = [C_{r,m}\varepsilon(X)_{r,m} + C_{pri}\varepsilon(X)_{pri} + C_{s,m}\varepsilon(X)_{s,m} + C_{s,w}\varepsilon(X)_{s,w}] \times 10^{[Fe/H]}, \quad (3)$$

式中 $\varepsilon(X)_{s,w}$ 代表primary弱s-过程的分量底数, $C_{s,w}$ 代表相应的分量系数. 其中 $\varepsilon(X)_{r,m}$ 和 $\varepsilon(X)_{pri}$ 取自文献[17], $\varepsilon(X)_{s,m}$ 取自文献[8]和[15], $\varepsilon(X)_{s,w}$ 取自Choplin等^[30]给出的快速自转大质量星中的primary弱s-过程产量(模型25s7B), 已将其归算到Raiteri等^[7]给出的太阳中Sr的弱s-过程丰度. 利用(2)–(3)式, 样本星HE 1045+0226的观测丰度和计算丰度的最佳拟合结果在图4中给出. 计算误差通过观测误差的平均值得到(≈ 0.16 dex), 并在图中用虚线表示. 图4表明, 此样本星的计算丰度很好地拟合了观测丰度, 且元素的拟合误差均在观测误差范围内. 从分解结果可以看出, HE 1045+0226的元素丰度模式可以被

主要r-过程、primary过程、主要s-过程和快速自转大质量星中的primary弱s-过程的共同贡献所解释.

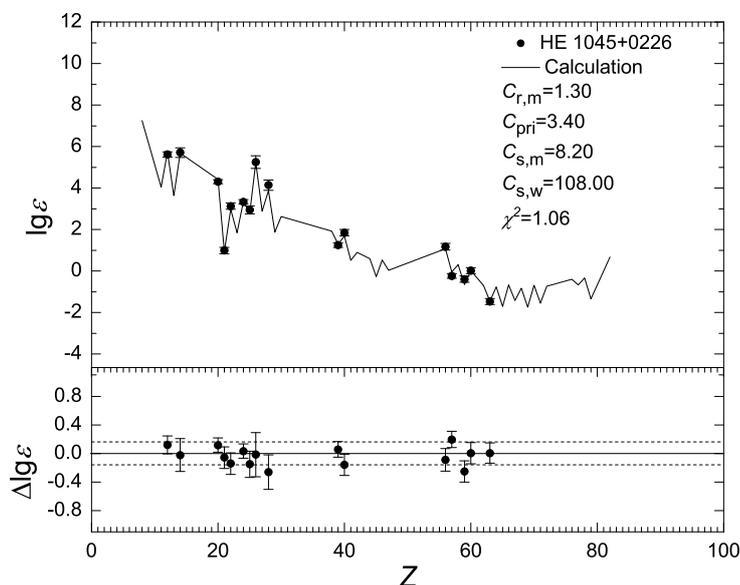


图 4 样本星HE 1045+0226的最佳拟合结果. 图例与图2一致.

Fig. 4 Best fitted results for the sample star HE 1045+0226. Symbols are the same as in Fig. 2.

为了进一步分析以上4个核合成过程对HE 1045+0226元素丰度的相对贡献, 我们计算了HE 1045+0226的分量丰度. 计算结果如图5所示. 由计算结果可知, 对于轻元素和Fe族元素, primary分量丰度显著高于主要r-过程、主要s-过程和primary弱s-过程分量丰度. 这说明HE 1045+0226的轻元素和Fe族元素主要来自大质量星的primary过程. 对于重中子俘获元素Ba、La、Pr和Nd, 主要s-过程的贡献显著大于主要r-过程、弱r-过程和primary弱s-过程, 这说明这些重中子俘获元素主要来自主要s-过程; 对于Eu元素, 主要r-过程的贡献最大, 这意味Eu主要来自主要r-过程. 而对于轻中子俘获元素Y和Zr, primary弱s-过程分量丰度显著高于主要r-过程、弱r-过程和主要s-过程分量丰度. 这说明HE 1045+0226的Y和Zr相对于Ba和La的显著超丰应主要归因于快速自转大质量星的primary弱s-过程贡献. 这一核合成过程对Y和Zr丰度的贡献分别约为69.8%和67.6%. 基于以上分析, 我们认为HE 1045+0226可能形成于被快速自转大质量星的primary弱s-过程产物污染后的气体云中.

2012年以来, Frischknecht等^[9-10]和Choplin等^[29-30]多个工作从理论的角度提出快速自转大质量星中能够发生primary弱s-过程. Yang等^[44]通过研究CEMP-no星ET 0097中子俘获元素的天体物理来源, 从观测的角度证明弱s-过程能够在贫金属环境下发生. 本工作通过对CEMP-s视单星HE 1045+0226中子俘获元素的天体物理来源研究为贫金属星环境下能够发生弱s-过程提供又一观测证据.

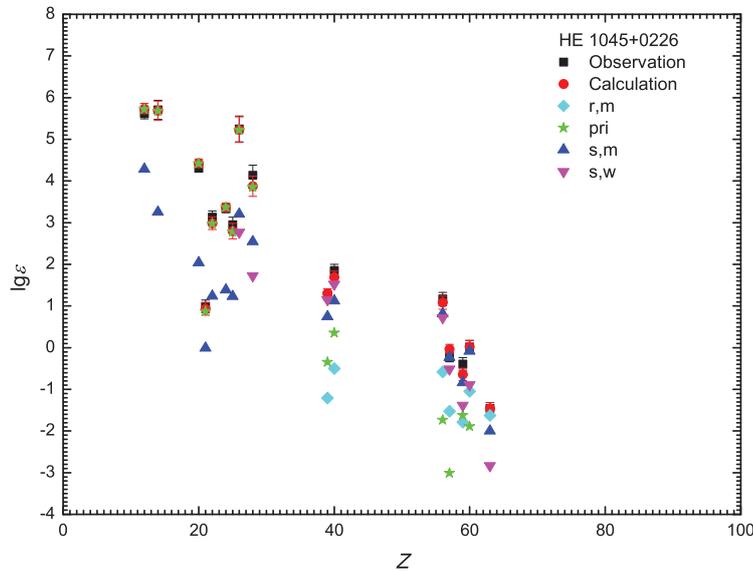


图 5 样本星HE 1045+0226化学元素的分量丰度. 品红色向下三角形代表primary弱s-过程(s, w)的分量丰度, 其他图例与图3一致.

Fig. 5 Component abundances of chemical elements in the sample star HE 1045+0226. The magenta down triangles refer to the abundances of primary weak s-process (s, w). Other symbols are the same as in Fig. 3.

4 结论与讨论

通常情况下, CEMP-s星被认为处于双星系统, 其超丰的s-过程元素来自其经历了渐近巨星支阶段的白矮星伴星. 但有一些CEMP-s星被视向速度观测认定为单星. 由于贫金属星的元素丰度特征一般是多个核合成过程产物累积的结果, 因此定量计算不同核合成过程对CEMP-s星元素丰度的贡献能够更准确地探究CEMP-s星化学元素的天体物理来源. 我们利用叠加与分解的方法分析两颗CEMP-s视单星CS 30301-015和HE 1045+0226的元素丰度特征, 探究了其不同元素的天体物理来源. 主要结论及讨论如下:

(1) CS 30301-015的元素丰度模式可以被主要r-过程、primary过程和主要s-过程的共同贡献所解释. 通过计算此样本星元素的分量丰度得出, CS 30301-015的轻元素和Fe族元素丰度主要产生于大质量星的primary过程; 中子俘获元素主要来自主要s-过程. 这意味着CS 30301-015的中子俘获元素主要来自AGB星产物的污染. 因此需要更多的视向速度观测进一步确定这些主要s-过程产物来自样本星形成时的气体云还是与其伴星的物质交流. 另外, 观测丰度显示CS 30301-015的Pb显著超丰. 由计算结果可知, 主要s-过程对Pb丰度的贡献达到约99.8%, 显著大于主要r-过程和主要s-过程. 因此,

CS 30301-015的Pb超丰现象应该主要归因于主要s-过程的贡献;

(2) HE 1045+0226的元素丰度模式可以被主要r-过程、primary过程、主要s-过程和快速自转大质量星的primary弱s-过程的共同贡献所解释. 通过计算HE 1045+0226的分量丰度得出, HE 1045+0226的轻元素和Fe族元素主要来自大质量星的primary过程; 重中子俘获元素Ba、La、Pr和Nd主要来自主要s-过程; Eu元素主要来自主要r-过程. 而轻中子俘获元素Y和Zr相对于重中子俘获元素Ba和La的显著超丰应主要归因于快速自转大质量星的primary弱s-过程贡献, 这一核合成过程对Y和Zr丰度的贡献分别约为69.8%和67.6%. 因此, 我们认为HE 1045+0226可能形成于被快速自转大质量星的primary弱s-过程产物污染后的气体云中;

(3)通常情况下, 由于 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 中子源具有secondary特性, 弱s-过程对 $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$ 的贫金属星的贡献可以被忽略^[8]. 这意味着弱s-过程贡献占主导的贫金属星应该极少. 然而Frischknecht等^[9]研究发现快速自转大质量贫金属星中能够产生primary弱s-过程元素, 且近年来“自转星模型”不断得到发展^[10, 30]. Yang等^[44]通过研究CEMP-no星ET 0097中子俘获元素的天体物理来源, 从观测的角度证明弱s-过程能够在贫金属环境下发生. 本工作通过对CEMP-s视单星HE 1045+0226化学元素的天体物理来源研究为贫金属星环境下能够发生弱s-过程提供又一观测证据;

(4)在贫金属星s-过程元素增丰机制的研究中, $[\text{ls}/\text{hs}]$ 被视为重要的丰度模式特征. Abate等^[40]建立的“AGB星模型”预测AGB星产物贡献占主导的CEMP-s星的 $[\text{ls}/\text{hs}] < 0$. 观测丰度显示, CS 30301-015的 $[\text{ls}/\text{hs}] = -0.85 (< 0)$, 我们通过对CS 30301-015元素丰度分解得到其中子俘获元素主要来自AGB星产物污染的结论. 此外, Choplin等^[29]建立的“自转星模型”预测primary弱s-过程贡献占主导的CEMP-s星的 $[\text{ls}/\text{hs}] \geq 0$. 观测丰度显示, HE 1045+0226的 $[\text{ls}/\text{hs}] = 0.3 (> 0)$, 我们通过分解计算得到其轻中子俘获元素Y和Zr相对于重中子俘获元素Ba和La的超丰应主要归因于快速自转大质量星贡献的结论. 因此, 在CEMP-s星中子俘获元素的天体物理来源研究中, 本工作从观测角度验证了将 $[\text{ls}/\text{hs}]$ 作为理论模型选择依据的可靠性.

我们希望本工作对两颗CEMP-s星CS 30301-015和HE 1045+0226观测丰度的分解计算能够为进一步分析CEMP-s星的形成机制提供有意义的线索. 若要得到这两颗以及更多CEMP-s星的物理和化学信息还需要更多的观测数据支持.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章质量有了显著提高. 感谢石家庄学院物理系韩万强副教授的帮助.

参 考 文 献

- [1] Sneden C, Cowan J J, Gallino R. *ARA&A*, 2008, 46: 241
- [2] Frebel A. *ARNPS*, 2018, 68: 237
- [3] Beers T C, Christlieb N. *ARA&A*, 2005, 43: 531
- [4] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. *RvMP*, 1957, 29: 574
- [5] Busso M, Gallino R, Lambert D L, et al. *ApJ*, 2001, 557: 802
- [6] Lamb S A, Howard W M, Truran J W, et al. *ApJ*, 1977, 217: 213
- [7] Raiteri C M, Gallino R, Busso M, et al. *ApJ*, 1993, 419: 207
- [8] Travaglio C, Gallino R, Arnone E, et al. *ApJ*, 2004, 601: 864

- [9] Frischknecht U, Hirschi R, Thielemann F K. *A&A*, 2012, 538: L2
- [10] Frischknecht U, Hirschi R, Pignatari M, et al. *MNRAS*, 2016, 456: 1803
- [11] Ji A P, Frebel A, Chiti A, et al. *Natur*, 2016, 531: 610
- [12] Kajino T, Aoki W, Balantekin A B, et al. *PrPNP*, 2019, 107: 109
- [13] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. *ApJ*, 2017, 848: L12
- [14] Côté B, Eichler M, Arcones A, et al. *ApJ*, 2019, 875: 106
- [15] Arlandini C, Käppeler F, Wisshak K, et al. *ApJ*, 1999, 525: 886
- [16] Wanaajo S, Kajino T, Mathews G J, et al. *ApJ*, 2001, 554: 578
- [17] Li H J, Shen X J, Liang S, et al. *PASP*, 2013, 125: 143
- [18] Hansen C J, Montes F, Arcones A. *ApJ*, 2014, 797: 123
- [19] Lee Y S, Suda T, Beers T C, et al. *ApJ*, 2014, 788: 131
- [20] Placco V M, Frebel A, Beers T C, et al. *ApJ*, 2014, 781: 40
- [21] Lucatello S, Beers T C, Christlieb N, et al. *ApJ*, 2006, 652: L37
- [22] Sharma M, Theuns T, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2018, 473: 984
- [23] Marsteller B, Beers T C, Rossi S, et al. *NuPhA*, 2005, 758: 312
- [24] Hansen T T, Andersen J, Nordström B, et al. *A&A*, 2016, 588: A3
- [25] Sneden C, Cowan J J, Lawler J E, et al. *ApJ*, 2003, 591: 936
- [26] Jonsell K, Barklem P S, Gustafsson B, et al. *A&A*, 2006, 451: 651
- [27] Abate C, Stancliffe R J, Liu Z W. *A&A*, 2016, 587: A50
- [28] Roederer I U, Placco V M, Beers T C. *ApJ*, 2016, 824: L19
- [29] Choplin A, Hirschi R, Meynet G, et al. *A&A*, 2017, 607: L3
- [30] Choplin A, Hirschi R, Meynet G, et al. *A&A*, 2018, 618: A133
- [31] Abate C, Pols O R, Stancliffe R J. *A&A*, 2018, 620: A63
- [32] Goswami P P, Goswami A. *JApA*, 2020, 41: 47
- [33] Aoki W, Norris J E, Ryan S G, et al. *PASJ*, 2002, 54: 933
- [34] Aoki W, Ryan S G, Norris J E, et al. *ApJ*, 2002, 580: 1149
- [35] Cohen J G, Christlieb N, Thompson I, et al. *ApJ*, 2013, 778: 56
- [36] Allen D M, Ryan S G, Rossi S, et al. *A&A*, 2012, 548: A34
- [37] Cohen J G, McWilliam A, Shectman S, et al. *AJ*, 2006, 132: 137
- [38] Placco V M, Frebel A, Beers T C, et al. *ApJ*, 2013, 770: 104
- [39] Anders E, Grevesse N. *GeCoA*, 1989, 53: 197
- [40] Abate C, Pols O R, Izzard R G, et al. *A&A*, 2015, 581: A22
- [41] Cohen J G, Huang W J. *ApJ*, 2009, 701: 1053
- [42] Li H J, Cui W Y, Zhang B. *ApJ*, 2013, 775: 12
- [43] Bisterzo S, Gallino R, Straniero O, et al. *MNRAS*, 2010, 404: 1529
- [44] Yang G C, Li H J, Liu N, et al. *Ap&SS*, 2016, 361: 317

Study of the Astrophysical Origins of Chemical Elements in Two Apparently-single CEMP-s Stars

WANG Shuang¹ YANG Guo-chao¹ ZHANG Lu² LI Hong-jie¹
ZHANG Bo³

(1 School of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018)

(2 School of Mathematical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024)

(3 College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024)

ABSTRACT CS 30301–015 and HE 1045+0226 are two metal-poor stars which show overabundance of both C and s-process elements (i.e., CEMP-s stars). The radial velocity observations suggest that these two CEMP-s stars have constant radial velocities and suggested that CS 30301–015 and HE 1045+0226 could be single stars. Study of the astrophysical origins of chemical elements in the two apparently-single CEMP-s stars can provide useful clues for better understanding the chemical evolution of the early Galaxy. Based on the superposition and decomposition calculations, we investigated the astrophysical origins of chemical elements in the two sample stars. We found that the lighter and Fe-group elements of these two sample stars are mainly produced by primary process in massive stars. For CS 30301–015, the neutron-capture elements dominantly originate from the main s-process in Asymptotic Giant Branch (AGB) stars. The high Pb abundance can be explained by the contribution of main s-process. The contributed fraction of main s-process to Pb is about 99.8%. More radial-velocity observations are needed to confirm the orbital features of this sample star. While for the other sample star HE 1045+0226, the heavier neutron-capture elements with $56 \leq Z \leq 62$ are mainly produced by main s-process and Eu mainly originate from main r-process, Z is the proton number. However, the lighter neutron-capture elements Y and Zr mainly come from the primary weak s-process occurring in fast rotation massive stars. The contributed fractions of the primary weak s-process to Y and Zr abundances of HE 1045+0226 are about 69.8% and 67.6%, respectively. This suggests that the apparently-single CEMP-s star HE 1045+0226 should have the footprints of primary weak s-process. The conclusions prove that weak s-process could occur in metal-poor environments.

Key words stars: abundances, stars: formation, stars: chemically peculiar