

# HD 140283元素丰度分析及弱r-过程 元素天体物理来源\*

马文娟<sup>1†</sup> 李宏杰<sup>2</sup> 张璐<sup>3</sup> 张波<sup>4‡</sup>

(1 沧州师范学院物理与信息工程学院 沧州 061001)

(2 河北科技大学理学院 石家庄 050018)

(3 河北师范大学数学与信息科学学院 石家庄 050024)

(4 河北师范大学物理科学与信息工程学院 石家庄 050024)

**摘要** HD 140283是一颗近邻极贫金属亚巨星, 形成于宇宙大爆炸初期, 被认为是迄今为止最古老的恒星之一, 同时它也是一颗典型的弱r-过程星, 对它的研究有助于深入理解宇宙早期演化、丰富元素核合成理论. 将HD 140283从C到Zn的观测丰度与单个超新星(SN)事件元素理论产量进行拟合, 得出HD 140283可能诞生于前身星质量为 $22.5 M_{\odot}$  (下标“ $\odot$ ”代表太阳)的超新星爆发污染的星云. 基于同样的方法, 研究了另外5颗典型弱r-过程星, 分别得出了污染产生这些恒星的气体云的超新星前身星质量, 进一步推测了弱r-过程可能发生的天体物理环境.

**关键词** 恒星: 极贫金属星, 恒星: HD 140283, 恒星: 丰度, 核合成: 弱r-过程

**中图分类号**: P144; **文献标识码**: A

## 1 引言

极贫金属星一般是年老恒星, 因丰度模式保留着星系演化早期的相关信息, 往往被视为宇宙的活化石, 研究其元素丰度分布模式对于理解星系化学演化、丰富元素核合成理论都起着重要作用. HD 140283被认为是宇宙中已知的最年老恒星之一, 精确确定HD 140283的年龄, 对于检测恒星和宇宙物理学的一致性具有重要意义<sup>[1]</sup>, 因此, 对该恒星的研究有助于了解宇宙的早期历史.

宇宙中重元素的核合成被归于两种不同的机制: 慢中子俘获过程(s-过程)和快中子俘获过程(r-过程)<sup>[2]</sup>, 观测证据和核合成理论表明这两种过程存在于完全不同的物理条件和天文环境. 由于连续的中子俘获经历的时间和 $\beta$ 衰变相比较长, s-过程始终发

2019-11-17收到原稿, 2020-03-18收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11673007、11403007), 河北省自然科学基金项目(A2019110051), 沧州市自然科学基金项目(197000003), 沧州师范学院校内基金(xnjj11910)资助

<sup>†</sup>mawenjuan123@126.com

<sup>‡</sup>zhangbo@hebtu.edu.cn

生在 $\beta$ -稳定谷附近,分为主要s-过程和弱s-过程.主要s-过程发生在中低质量恒星(约为 $1.3-8 M_{\odot}$ ,下标“ $\odot$ ”代表太阳)的AGB阶段,弱s-过程发生在大质量恒星的He核燃烧和C壳层燃烧阶段<sup>[3]</sup>.而r-过程一般发生在爆炸的宇宙环境,由于俘获了大量中子,原子核变得非常不稳定,这给r-过程元素起源的研究带来很多困难<sup>[4]</sup>.观测表明,一些极贫金属(EMP)晕星的重中子俘获元素(原子序数 $Z \geq 56$ )分布模式与太阳系r-过程元素分布模式一致<sup>[5]</sup>,产生这种丰度模式的过程称为“主要r-过程”<sup>[6]</sup>,典型的恒星如CS 22892-052,被称为“主要r-过程星”<sup>[7]</sup>.中子星并合被认为是最有可能产生主要r-过程的天体物理环境<sup>[8-10]</sup>.同时,一些研究者发现太阳r-过程丰度模式需要加入另外一种r-过程解释.在这种过程中,较轻中子俘获元素的产生多于较重中子俘获元素,称为lighter element primary process<sup>[11]</sup>或“弱r-过程”<sup>[12]</sup>.由于丰度模式与弱r-过程丰度模式特征一致,一些极贫金属星被认为是典型的弱r-过程星,如HD 122563<sup>[13-14]</sup>.弱r-过程的天体物理环境还不十分清楚<sup>[15]</sup>.总的来说,被弱r-过程污染的星云中 $[Eu/Fe] \sim -0.5$ ,这意味着Fe-族和较轻元素的产生不同于较重r-过程元素,而 $[Sr/Fe] \sim 0$ 暗示出弱r-过程元素的产生与Fe-族和较轻元素的来源存在一定关联<sup>[13-14]</sup>.

HD 140283被认为是已知宇宙中最年老的恒星之一,又因是太阳邻近亮星(视星等7.223),因而被广泛研究<sup>[1, 14]</sup>.2015年,Niu等人详细分析了HD 140283的元素丰度模式,确定它是一颗弱r-过程星,指出调查研究HD 140283的弱r-过程元素的天体物理来源能为理解早期星系的化学演化和核合成历史提供有意义的线索<sup>[14]</sup>.2017年,Yang等人研究了银河系r-过程重元素与Fe的相对丰度( $[r/Fe]$ )边界值问题,认为星际介质中 $[r/Fe]$ 的最低值取决于II型超新星(SNII)产生的Fe的污染<sup>[16]</sup>.因为弱r-过程星元素丰度可作为探索早期星系弱r-过程核合成条件的“探针”,这激励我们进一步调查弱r-过程星中元素丰度模式并尝试推测弱r-过程核合成的主要环境.

本文第2部分详细分析了典型的弱r-过程贫金属恒星HD 140283的观测元素丰度,将HD 140283观测元素丰度与Heger和Woosley<sup>[17]</sup>给出的单个SNII事件元素产量拟合,得出污染形成样本星星云的SNII前身星质量.在第3部分讨论了其他典型弱r-过程星Fe-族和较轻元素观测丰度,分别得出对应的SNII前身星质量.第4部分是本文结论.

## 2 HD 140283的元素丰度分析及Fe-族和较轻元素来源

HD 140283,太阳附近明亮的极贫金属亚巨星,被认为是目前已知银河系中最古老的恒星之一,并被广泛分析研究<sup>[1, 14, 18]</sup>.因为距离近、亮度高并且元素丰度和距离都有很好的观测,HD 140283可以作为“标准烛光”.精确确定HD 140283的年龄,对于检测恒星和宇宙物理学的一致性具有重要意义<sup>[1]</sup>.Niu等<sup>[14]</sup>在2015年研究了HD 140283的丰度模式,得出它的中子俘获元素丰度主要来自弱r-过程的贡献,可为探讨弱r-过程核合成的特征提供重要线索,也就是说要确定弱r-过程发生的SNII前身星质量,HD 140283的丰度模式是很好的研究对象,而且可视为来自于早期星系一个或仅仅几个超新星事件.

2010年,Heger和Woosley<sup>[17]</sup>(Heger & Woosley (2010))系统研究了零金属丰度 $10-100 M_{\odot}$ 的恒星演化,得出了这些恒星演化大部分以SNII爆发形式结束生命,文中给出了超新星爆发Fe-族及较轻元素各核素的理论产量.因此,假定古老恒星HD 140283诞生于被第1代恒星爆发污染的星云且产生于单个超新星事件,将HD 140283的元素观测丰

度与Heger & Woosley (2010)给出的超新星元素产量拟合(单星拟合), 可以确定污染形成HD 140283的星云的SNII的前身星质量, 以此推测HD 140283弱r-过程元素的来源.

拟合中包含了HD 140283从C到Zn的元素丰度, 其中C、Mg、Al、Si、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni的观测数据取自文献[19], 观测误差包含随机误差和系统误差(文献没有给出C的观测误差, 研究中取为所有元素中最大观测误差), 太阳丰度取自文献[20]. 由于文献[19]没有给出O和Zn的观测数据, 对于O和Zn, 我们分别采用了Bond等<sup>[1]</sup>和Roederer<sup>[21]</sup>给出的观测数据.

单星拟合采用Fortran编程, 首先由Heger & Woosley (2010)模型给出的零金属丰度10–100  $M_{\odot}$ 质量范围内每颗恒星各核素产量计算出Fe-族及较轻元素的理论丰度( $\lg Y_i$ , 即理论模型得出的包含 $10^{12}$ 个氢原子的物质中所含元素*i*的个数的对数值), 然后利用HD 140283 Fe-族及较轻元素观测丰度( $\lg \epsilon_i$ , 即观测得到的包含 $10^{12}$ 个氢原子的物质中所含元素*i*个数的对数值)进行拟合, 逐一去搜寻理论模型中每颗星的 $\chi^2$ 拟合值. 当 $\chi^2$ 最小时即为理论产量与观测值之间的最佳拟合值. 由最佳拟合结果, 查阅模型数据表, 可以得到最佳拟合对应的恒星质量, 也就是产生弱r-过程物质超新星的前身星质量. 拟合中 $\chi^2$ 计算公式为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\lg Y_i + c - \lg \epsilon_i)^2}{\sigma_i^2(n-f)^2}, \quad (1)$$

式中*i*代表从C到Zn的某种元素, *c*为引入的调节系数,  $\sigma_i$ 代表第*i*种元素的观测误差, *n*和*f*分别代表元素总数和自由参量个数.

拟合结果给出的最佳拟合值为 $\chi^2 = 1.27$ , 对应SNII的前身星质量 $M = 23 M_{\odot}$ , 爆发能 $E_0 = 10B$  ( $1B = 10^{51}$  erg), 如图1 (a)所示, 其中横坐标是原子序数, 纵坐标是元素丰度, 实心三角是由各元素理论产量得到的丰度, 圆点是样本星各元素观测丰度值. 分析发现, Al元素的理论产量明显高于观测丰度. 这是因为文献[19]中Al元素的观测丰度是局域热动平衡(LTE)丰度, 而极贫金属星元素丰度的确定会受非局域热动平衡(NLTE)的影响, Al元素的LTE与NLTE观测丰度差别比较大, 对于HD 140283这颗星, 其Al元素的NLTE丰度比LTE丰度高0.51 dex<sup>[22]</sup>. 而且, Shi等<sup>[23]</sup>和Andrievsky等<sup>[24]</sup>的研究表明HD 140283的Cu元素的NLTE与LTE丰度也有明显差别. 考虑到这些, 我们重新对HD 140283进行了计算, Al元素采用了Gehren等<sup>[22]</sup>给出的NLTE观测丰度, 并且Cu元素丰度采用了Shi等<sup>[23]</sup>给出的NLTE值, 结果明显要好一些, 如图1 (b)所示. 最佳拟合值为 $\chi^2 = 1.05$ , 对应的超新星前身星质量为 $22.5 M_{\odot}$ , 这意味着前身星质量为 $22.5 M_{\odot}$ 的超新星爆发能提供与HD 140283的Fe-族及较轻元素的观测丰度模式最好的匹配, 也暗示出弱r-过程星HD 140283可能形成于受前身星质量约 $22.5 M_{\odot}$ 的单个SNII爆发事件污染的星云.

### 3 弱r-过程元素的天体物理来源

关于弱r-过程核合成已有很多研究, 如: 2007年François等人的研究<sup>[25]</sup>, 2014年Hansen等人的研究<sup>[26]</sup>, 2015年Niu等人的研究<sup>[14]</sup>等. 而且, 天文观测已经发现了多颗弱r-过程星<sup>[1]</sup>, 但是弱r-过程元素的来源始终没有确定<sup>[15]</sup>. 2015年, Niu等<sup>[14]</sup>的研究发现

弱r-过程星元素丰度具有鲁棒性, 指出这种丰度鲁棒性可以被用来约束弱r-过程理论并调查恒星元素丰度的天体物理来源.

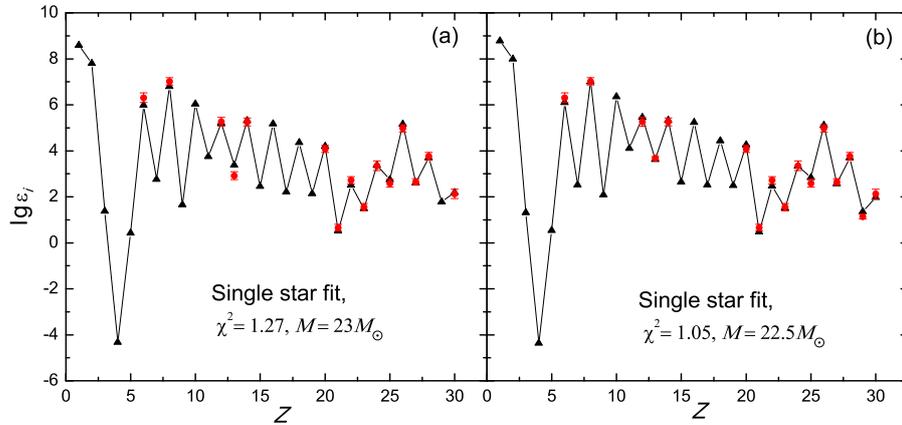


图 1 HD 140283 观测丰度模式与 Heger & Woosley (2010) 模型拟合结果. 圆点和误差棒分别表示 HD 140283 元素观测丰度和对应的误差. 实心三角表示 Heger & Woosley (2010) 给出的元素理论丰度.

Fig. 1 Abundance pattern of HD 140283 fitted by the Heger & Woosley (2010) models. The filled circles with error bars refer to the observed elemental abundances and the corresponding errors, respectively. The filled-up triangles refer to elemental abundances obtained by the theoretical yields of Heger & Woosley (2010) models.

2009年, Izutani等<sup>[27]</sup>研究了极贫金属星中轻中子俘获元素的产生机制, 指出可采用  $[\text{Sr}/\text{Ba}]$ 、 $[\text{Y}/\text{Eu}]$  两种元素丰度比作为主要r-过程星和弱r-过程星的判据. 典型的主要r-过程星 CS 22892-052 的  $[\text{Sr}/\text{Ba}] = -0.57$ 、 $[\text{Y}/\text{Eu}] = -1.16$ . 因此, 如果极贫金属星  $[\text{Sr}/\text{Ba}] > -0.57$  且  $[\text{Y}/\text{Eu}] > -1.16$ , 则可视作该星中元素丰度主要来自弱r-过程的贡献. 基于同样的方法, 我们选择了6颗典型的弱r-过程星: HD 122563<sup>[28]</sup>、HD 140283<sup>[19, 21]</sup>、HD 88609<sup>[28]</sup>、HD 4306<sup>[19]</sup>、BD+4°2621<sup>[29]</sup>、HD 237846<sup>[30]</sup> 作为弱r-过程星代表恒星.

采用与 HD 140283 单星拟合相同的方法, 我们研究了污染形成其余5颗弱r-过程星 (HD 122563、HD 88609、HD 4306、BD+4°2621、HD 237846) 气体云的 SNII 前身星质量. 研究中恒星元素丰度观测数据取自文献 [19, 28–30]. 每个样本星的单星拟合结果见图 2. 其中, HD 122563 的 Cu 元素的观测丰度采用了 Shi 等<sup>[23]</sup> 给出的 NLTE 的值. 由于没有找到 HD 88609 中 Cu 元素的 NLTE 观测丰度, 所以这颗星的拟合过程中忽略了 Cu 元素. 对于 HD 237846, 由于 Heger & Woosley (2010) 模型给出的 O 理论产量明显低于观测丰度, 对于该星的拟合忽略了 O 元素.

对 BD+4°2621、HD 237846、HD 4306、HD 88609、HD 122563 的拟合结果表明: 形成这些典型弱r-过程星的分子云受到过前身星质量分别为  $10.7 M_{\odot}$ 、 $13.4 M_{\odot}$ 、 $13.4 M_{\odot}$ 、 $13.4 M_{\odot}$ 、 $22.5 M_{\odot}$  的 SNII 爆发的污染, 由此可以推测弱r-过程可能主要发生在前身星为十几到二十几倍太阳质量的 SNII 爆发环境中, 这可以为研究弱r-过程核合成提供重要参考.

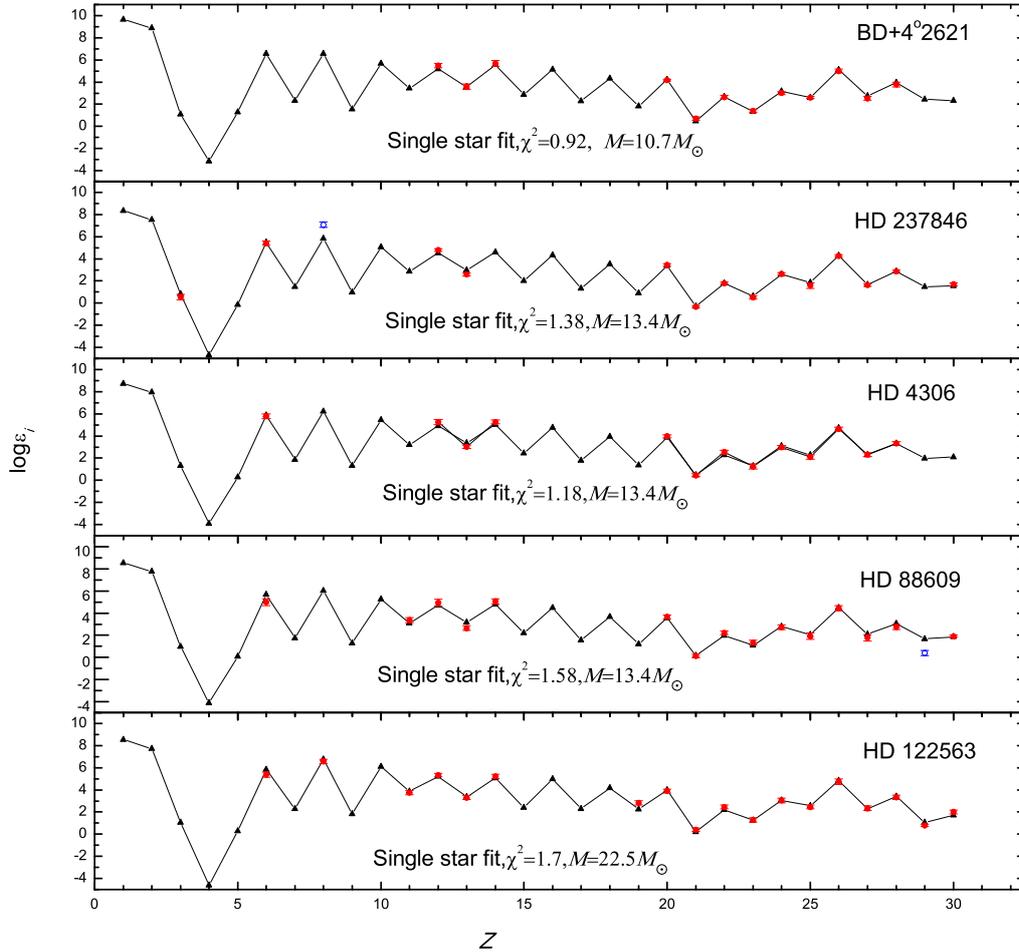


图2 5颗弱r-过程样本星丰度模式与Heger & Woosley (2010)模型单星拟合最佳拟合结果. 圆圈和误差棒表示拟合中忽略的特殊元素丰度. 图中其他符号同图1.

Fig. 2 Best fitting to the abundance pattern of our five weak r-process stars by a single SN model from Heger & Woosley (2010) models. The open circles and the error bars are the particular elements which is not used in the fitting. The other symbols are as Fig. 1.

## 4 结论

由于仍保留着早期星系中核合成特征, 极贫金属星元素丰度分布对约束低金属丰度环境下星系核合成理论起着重要作用. 因此, 对已获得的r-过程极贫金属星元素丰度观测数据进行分析研究有助于解决r-过程相关问题. 特别是低 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值的弱r-过程星可以为研究核坍缩超新星与弱r-过程的关系提供重要线索. 本文基于弱r-过程星HD 140283的观测丰度, 将观测元素丰度与Heger & Woosley (2010)给出的单个超新星事件

产量拟合, 讨论了被认为是迄今为止最古老恒星的HD 140283的来源, 接着详细分析了5颗典型弱r-过程贫金属星的Fe-族和较轻元素丰度, 采用最小 $\chi^2$ 拟合方法得出了相应的SNII前身星质量. 得到以下结论:

(1)星族II恒星HD 140283, 被认为是宇宙最年老的已知恒星之一, 对其研究能帮助确定宇宙年龄的下限. 假设HD 140283产生于单个超新星爆发事件, 通过将其观测元素丰度与Heger & Woosley (2010)给出的SNII爆发元素产量拟合探寻其SNII的前身星质量, 结果表明弱r-过程星HD 140283的弱r-过程元素来源于受前身星质量为 $22.5 M_{\odot}$ 的SNII爆发所污染的气体云. 这为研究第1代恒星形成和爆发机制提供了有用线索;

(2)基于BD+4°2621、HD 237846、HD 4306、HD 88609、HD 122563 5颗典型弱r-过程星的Fe-族及较轻元素观测元素丰度与Heger & Woosley (2010)给出的核素模型产量, 采用最小 $\chi^2$ 拟合方法, 得出污染形成这5颗极贫弱r-过程星的气体云的SNII的前身星质量分别为 $10.7 M_{\odot}$ 、 $13.4 M_{\odot}$ 、 $13.4 M_{\odot}$ 、 $13.4 M_{\odot}$ 、 $22.5 M_{\odot}$ ;

(3)在6颗极贫弱r-过程样本星中, 轻元素及Fe-族元素观测丰度呈现出很高的一致性, 这表明它们可能有相同的天体物理来源. 由6颗典型弱r-过程星拟合结果, 其弱r-过程元素可能来源于前身星为十几到二十几倍太阳质量的SNII爆发, 这也丰富了弱r-过程研究的理论体系.

由于受到已知极贫金属弱r-过程星数量的限制, 本文得到的发生弱r-过程的SNII前身星质量范围还不十分准确, 但我们的研究结果为建立早期星系轻元素和Fe-族元素的r-过程核合成理论模型提供了有力约束条件. 相信今后大量的极贫金属弱r-过程星元素丰度观测数据也会促进对早期星系弱r-过程核合成的理解.

## 参 考 文 献

- [1] Bond H E, Nelan E P, VandenBerg D A, et al. *ApJ*, 2013, 765: L12
- [2] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. *RvMP*, 1957, 29: 547
- [3] Busso M, Gallino R, Wasserburg G J. *ARA&A*, 1999, 37: 239
- [4] Sneden C, Cowan J J, Gallino R. *ARA&A*, 2008, 46: 241
- [5] Sneden C, Cowan J J, Ivans I I, et al. *ApJ*, 2000, 533: L139
- [6] Truran J W, Cowan J J, Pilachowski C A, et al. *PASP*, 2002, 114: 1293
- [7] Sneden C, Cowan J, Lawler J E, et al. *ApJ*, 2003, 591: 936
- [8] Thielemann F K, Eichler M, Panov I V, et al. *ARNPS*, 2017, 67: 253
- [9] Frebel A, Beers T C. *PhT*, 2018, 71: 30
- [10] Kajino T, Aoki W, Balantekin A B, et al. *PrPNP*, 2019, 107: 109
- [11] Travaglio C, Gallino R, Arnone E, et al. *ApJ*, 2004, 601: 864
- [12] Wanajo S, Ishimaru Y. *NuPhA*, 2006, 777: 676
- [13] Li H J, Ma W J, Cui W Y, et al. *PASP*, 2014, 126: 544
- [14] Niu P, Cui W Y, Zhang B. *ApJ*, 2015, 813: 56
- [15] Frebel A. *ARNPS*, 2018, 68: 237
- [16] Yang G C, Li H J, Liu N, et al. *PASP*, 2017, 129: 064201
- [17] Heger A, Woosley S E. *ApJ*, 2010, 724: 341
- [18] Gallagher A J, Ryan S G, García Pérez A E, et al. *A&A*, 2010, 523: A24
- [19] Honda S, Aoki W, Kajino T, et al. *ApJ*, 2004, 607: 474

- [20] Grevesse N, Noels A, Sauval A J. Proceedings of the Sixth (6th) Annual October Astrophysics Conference in College Park. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996: 117
- [21] Roederer I U. ApJ, 2012, 756: 36
- [22] Gehren T, Liang Y C, Shi J R, et al. A&A, 2004, 413: 1045
- [23] Shi J R, Yan H L, Zhou Z M, et al. ApJ, 2018, 862: 71
- [24] Andrievsky S, Bonifacio P, Caffau E, et al. MNRAS, 2018, 473: 3377
- [25] François P, Depagne E, Hill V, et al. A&A, 2007, 476: 935
- [26] Hansen C J, Montes F, Arcones A. ApJ, 2014, 797: 123
- [27] Izutani N, Umeda H, Tominaga N. ApJ, 2009, 692: 1517
- [28] Honda S, Aoki W, Ishimaru Y, et al. ApJ, 2007, 666: 1189
- [29] Johnson J. ApJS, 2002, 139: 219
- [30] Roederer I U, Sneden C, Thompson I B, et al. ApJ, 2010, 711: 573

## Element Abundance Analysis of HD 140283 and Astrophysics Sources of Weak r-process Elements

MA Wen-juan<sup>1</sup> LI Hong-jie<sup>2</sup> ZHANG Lu<sup>3</sup> ZHANG Bo<sup>4</sup>

(1 Department of Physics and Information Engineering, Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001)

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

(3 Department of Mathematics and Information Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024)

(4 Department of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024)

**ABSTRACT** HD 140283, a nearby extremely metal-poor subgiant star, formed shortly after the big bang, is thought to be the oldest star to date, and also a typical weak r-process star. Study of this star is of great significance for understanding the early history of the universe, and enriching the element nucleosynthesis theory. Based on the observed abundances of weak r-process star HD 140283 and theoretical yields of single supernova (SN), we fit the observational elemental abundances (from O to Zn) to the entire library of single SN yield, and derive that HD 140283 may have been born from a nebula polluted by the explosion of supernova whose progenitor mass is  $22.5 M_{\odot}$  (the subscript “ $\odot$ ” means the solar mass). Based on the same method, we study the other five typical weak r-process stars, and respectively derive the progenitor masses of supernova which have polluted the nebulas forming these stars. Furthermore, the possible astrophysics sources of weak r-process are inferred.

**Key words** stars: extremely metal-poor stars, stars: HD 140283, stars: abundance, nucleosynthesis: weak r-process