

贫金属富碳天琴RR变星的形成*

夏 晔[†] 张先飞[‡] 毕少兰 马旭东

(北京师范大学天文系 北京 100875)

摘要 贫金属富碳恒星(Carbon-Enhanced Metal-Poor, CEMP)是研究宇宙早期恒星性质和化学演化的极佳样本, 通常认为来自双星. 目前发现的贫金属富碳星中有9颗天琴RR变星(RR Lyrae star, RRL), 其中至少7颗未表现出任何双星特征. 传统双星物质转移模型不足以充分解释贫金属富碳天琴RR变星(CEMP-RR Lyrae)单星的形成. 之前研究表明氦白矮星和赫氏空隙星(HG)的并合模型可以解释部分富碳红巨星单星的碳增丰现象, 因此贫金属富碳星单星也可能来自氦白矮星和赫氏空隙星的并合模型渠道. 通过详细计算的氦白矮星和赫氏空隙星并合模型来检验这一演化渠道, 结果表明: 该并合模型在后续的演化过程中, 其重力加速度、温度、表面碳丰度均能与观测符合较好. 由此, 氦白矮星和赫氏空隙星并合模型极有可能是贫金属富碳天琴RR变星的形成渠道之一.

关键词 恒星: 丰度, 恒星: 变星: 天琴RR型星, 方法: 数据分析

中图分类号: P144; 文献标识码: A

1 引言

贫金属恒星($[\text{Fe}/\text{H}] < -1$)是宇宙演化早期形成的恒星, 通常被认为是第2代恒星的 最佳候选体, 它留存着宇宙中第1代恒星的化学遗迹. 因此, 贫金属星是研究宇宙早期恒星核合成与化学演化的极佳样本. 在贫金属恒星中, 有很大比例具有强碳增丰现象, 通常将 $[\text{C}/\text{Fe}] \geq 0.7$ 的贫金属恒星称为贫金属富碳星(Carbon-Enhanced Metal-Poor, CEMP)^[1]. 通常认为贫金属富碳星的富碳及其他元素成份来自双星演化, 由于物质转移被其渐近巨星伴星污染^[2-3].

天琴RR型变星(RR Lyrae star, RRL)是水平分支上的径向脉动变星, 它服从周光关系, 是重要的距离指示器, 其在银晕中的分布可以用于研究银河系形成历史. 通常天琴RR型变星的脉动周期为0.2–1.1 d, 温度在6100–7400 K之间, 质量范围为0.5–0.8 M_{\odot} , M_{\odot} 为太阳质量, 表面重力加速度无量纲对数值 $\lg(g/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}))$ (后面简写为 $\lg g$) 在2.5–3之间^[4]. 天琴RR型变星主要分为3类: RRab、RRc和RRd. RRab是基模脉动星, 其光学波段的振幅变化大, 且光变曲线不对称; RRc是一阶泛音脉动星, 具有小变幅且正弦对

2019-03-12收到原稿, 2019-04-10收到修改稿

*国家自然科学基金项目(10933002、11703001、11273007)资助

[†]201721160015@mail.bnu.edu.cn

[‡]zxf@bnu.edu.cn

称的光变曲线; RRd是同时具有上述两种光变特征的双模式脉动星. 大多数天琴RR型变星都是RRab型脉动星. Preston等^[5]证认了第1颗贫金属富碳天琴RR变星(CEMP-RR Lyrae)—TY Gru. 在他之后Kinman等^[6]证认了第2颗, 即SDSS J170733.93+585059 (简称为J1707+58). 近期Kennedy等^[7]新发现了7颗CEMP-RR Lyrae星. 但目前为止对处于双星系统中的CEMP-RR Lyrae星, 尚未有可靠的证认结果.

根据双星演化理论和通常的单星演化模型并不能形成CEMP-RR Lyrae的碳增丰壳层, 对于CEMP-RR Lyrae星的形成, 目前仍然缺乏合理的理论解释. Stancliffe等^[8]在 $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.3$ 下, 通过伴星从 $1 M_{\odot}$ 的渐近巨星(Asymptotic Giant Branch, AGB)上吸积 $0.1 M_{\odot}$ 物质的模型较为成功地拟合了中等碳增丰的贫金属RRL星TY Gru的元素丰度. Kennedy等^[7]将双星物质转移模型预测的碳丰度与CEMP-RR Lyrae星的观测碳丰度进行比较, 通过计算发现从 $1.5\text{--}2 M_{\odot}$ 的AGB星吸积约 $0.01 M_{\odot}$ 的物质后, 得到的碳丰度与大多数CEMP-RR Lyrae星的碳丰度较为符合. 这些理论解释都基于双星物质转移模型, 但是目前没有观测证据显示CEMP-RR Lyrae星处在双星系统中. Izzard等^[9]提出了氦白矮星和红巨星并合模型(HeWD+RG)以及氦白矮星和赫氏空隙星(HG)并合模型(HeWD+HG)的渠道, 这些渠道可以用来解释早型R型碳星. 早型R型碳星是碳星($\text{C}/\text{O} > 1$)的一种, 属于K型巨星, 其金属丰度与太阳类似, 没有慢中子元素增丰现象, 且都是单星. 这类星没有发生氦燃烧就拥有了碳增丰, 因此传统单星演化模型不能解释这一现象. 在此之后, Zhang等^[10]对HeWD+RG进行了进一步研究, 指出稍大质量的氦白矮星($0.4 M_{\odot}$)吸积小质量氦核($0.2 M_{\odot}$)红巨星的并合模型能形成早型R型碳星, 且模型预测的C、N、O和Li元素与观测相一致. CEMP-RR Lyrae星与早型R型碳星具有一些相似的特征, 即都是碳增丰单星, 且没有慢中子元素增丰, 不同点在于两者的金属丰度和演化状态不同. 因此CEMP-RR Lyrae单星非常有可能与早型R型碳星来自相同的演化渠道.

本文中, 我们尝试通过氦白矮星和赫氏空隙星的并合模型来解释贫金属富碳天琴RR变星的形成和碳增丰. 第2节主要介绍氦白矮星和赫氏空隙星并合模型; 第3节则是对氦白矮星和赫氏空隙星并合模型的演化和核合成结果进行分析和讨论; 第4节是对本文内容的总结和展望.

2 氦白矮星和赫氏空隙星并合模型

通过大样本恒星演化计算, Izzard等^[9]提出的双星并合模型可以解释早型R型碳星的形成, 主要形成机制是HeWD+RG并合, HeWD+HG并合渠道相对HeWD+RG并合渠道的贡献较小, 但通过HeWD+HG渠道形成的可能性随着金属丰度的降低而增加. Zhang等^[10]通过详细的恒星演化计算发现只有较大质量的氦白矮星($0.4 M_{\odot}$)吸积小质量氦核($0.2 M_{\odot}$)红巨星的并合模型才能产生早型R型碳星. 在这种模型中, 由恒星并合后氦燃烧层产生的氦闪耀所驱动形成的对流区会与外包层的氢对流区相接, 将氦燃烧层通过 3α 反应生成的碳带到恒星表面, 从而造成了恒星表面碳增丰现象. 对于小质量白矮星则不足以产生足够大的对流区来将新生成的碳带到表面而形成富碳性质. 但如果并合恒星是一颗氦核较小的HG星, 情况则会有所不同. 如图1所示, 当氦白矮星与HG星并合后, 由于赫氏空隙星的氦核足够小, 它被吸积到氦白矮星表面后, 由于燃烧的氦壳层

很薄, 所以该氦燃烧层几乎全对流, 与外部全对流的氢包层相接, 这个过程能够带出一定量的碳, 这样将形成富碳表面, 故此我们提出氦白矮星与赫氏空隙星的并合模型来解释CEMP-RR Lyrae星.

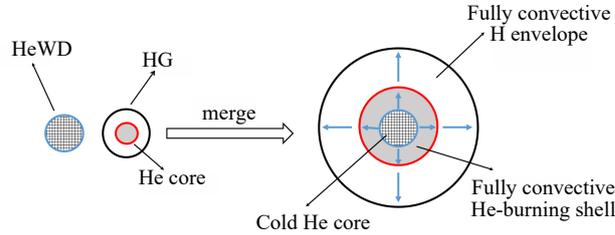


图 1 HeWD+HG并合模型的碳增丰原理图

Fig. 1 Illustrative diagram of carbon enhancement in the HeWD+HG merging model

我们利用恒星演化程序MESA^[11-12] (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) 10398版本对氦白矮星和赫氏空隙星的并合进行了计算. 并合恒星的计算方法与Zhang等^[10]文章中的一样, 只是模型对应的金属丰度和氦核质量不同. 第1步, 对金属丰度等于 10^{-4} 或 10^{-5} , 质量为 $2 M_{\odot}$ 的零年龄主序恒星进行演化计算, 演化到质量为 $0.3 M_{\odot}$ 时停止. 再将其氢包层完全去除, 形成一颗质量为 $0.3 M_{\odot}$ 的裸露氦核. 然后继续计算, 氦核将沿着白矮星冷却轨迹冷却至 $\lg(L/L_{\odot}) = -2$, L , L_{\odot} 分别是氦核光度和太阳光度, 生成 $0.3 M_{\odot}$ 的氦白矮星; 第2步, 令第1步形成的氦白矮星吸积与之化学组成一致的富氢物质, 形成并合恒星的中心核, 再进一步吸积与HG星外壳类似的富氢物质形成并合恒星外壳; 第3步, 计算并合恒星演化, 直到中心氦燃烧结束; 第4步, 通过MESA中的GYRE程序模块(恒星震动程序)计算恒星脉动情况^[13].

表1列出了模型的基本参数, 表1的第1列为模型金属丰度 z (此金属丰度与观测的CEMP-RR Lyrae星金属丰度近似), 第2列为氦白矮星质量, 第3列为HG星的氦核质量, 第4列为恒星并合后的最终质量, 第5列为模型计算得到的 $[C/Fe]$ (其中太阳的C和Fe元素丰度来自于Asplund等^[14]). 如表1所示, 模型的金属丰度为 10^{-4} 和 10^{-5} , 赫氏空隙星氦核质量为 $0.10 M_{\odot}$, 氦白矮星质量为 $0.30 M_{\odot}$, 两星并合过程中通过公共包层抛射导致并合恒星最终质量为 $0.50 M_{\odot}$ 或 $0.55 M_{\odot}$, 共4个并合模型. 计算中我们采用OPAL Type2不透明度表, 混合场参数 $\alpha_{MLT} = 2$, 且仅考虑对流混合.

表 1 模型基本参数和计算得到的 $[C/Fe]$ 值
Table 1 Fundamental parameters of models and calculated $[C/Fe]$

z	HeWD mass/ M_{\odot}	Core mass/ M_{\odot}	Final mass/ M_{\odot}	$[C/Fe]$
10^{-4}	0.30	0.10	0.50	0.71
			0.55	0.56
10^{-5}	0.30	0.10	0.50	2.20
			0.55	2.03

3 结果与讨论

为了与观测相比, 表2列出了CEMP-RR Lyrae星的基本参数, 所有样本都在 $-3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.4$ 和 $2.3 \leq \lg g < 2.9$ 范围里. 其中 T_{eff} 、 $\lg g$ 和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的误差范围分别是200 K、0.5和0.3, 表中第5列括号内的数字为 $[\text{C}/\text{Fe}]$ 的误差^[7]. 如图2所示, 样本的 $[\text{C}/\text{Fe}]$ 在误差内都落在了虚线之上(虚线的 $[\text{C}/\text{Fe}] = 0.7$), 均被认为是贫金属富碳恒星^[7]. 图2左上角的星是J1707+58, 样本中金属丰度最低的RRL星, 也是金属丰度最低的RRL星之一($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.92$). 另外, 图2也显示了随着 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的降低, $[\text{C}/\text{Fe}]$ 的值在增加的趋势, Lee等^[15]和Norris等^[16]文中也指出了 $[\text{C}/\text{Fe}]$ 与 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的这一趋势.

表 2 样本的基本参数
Table 2 Fundamental parameters of samples

Star	T_{eff}/K	$\lg(g/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}))$	$[\text{Fe}/\text{H}]$	$[\text{C}/\text{Fe}]$	Period /d
J1707+58 ^a	6250	2.80	-2.92	2.79 (0.41)	0.6780
TY Gru ^b	6250	2.30	-2.09	0.89 (0.15)	0.5700
IV Leo ^c	6609	2.82	-1.48	1.09 (0.20)	0.6358
LO Leo ^c	6394	2.85	-1.82	0.73 (0.25)	0.6069
LP Leo ^c	5882	2.61	-1.64	0.66 (0.20)	0.6492
v370 Vir ^c	6275	2.50	-2.11	1.36 (0.20)	0.6992
v408 Vir ^c	6216	2.81	-1.88	0.62 (0.3)	0.5858
ZZ Vir ^c	6538	2.54	-2.36	1.71 (0.25)	0.6841
WY Vir ^c	6354	2.81	-2.65	1.35 (0.30)	0.6093

^a Data are from Ref. [6]

^b Data are from Refs. [5, 8]

^c Data are from Ref. [7]

表2中共9颗星, 它们都属于天琴RR变星中的RRab型星, 其周期介于0.5–1 d之间^[6–7], 因此我们运用GYRE程序计算恒星脉动时采用的频率范围为10–30 μHz . J1707+58和TY Gru均是已证认的CEMP-s星(CEMP-s: 有慢中子元素增丰的CEMP星, $[\text{Ba}/\text{Fe}] > 1$), $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ 分别是1.23^[5], 2.83^[6], 且很有可能是双星, 形成于双星物质转移过程. 样本中的J1707+58最初由于径向速度变化幅度大, 被认为是双星^[17], 而Kinman等^[6]则认为这些速度变化是由于脉动造成的, 认为此星应该是一颗天琴RR变星. TY Gru具有布拉日科效应(Blazhko effect)^[5], 即光变曲线有振幅和相位调制现象, 这使得测量其质心的速度变得更加复杂, 更加难以确定其是否是双星. 到目前为止的观测都没有发现其具有双星特征^[18].

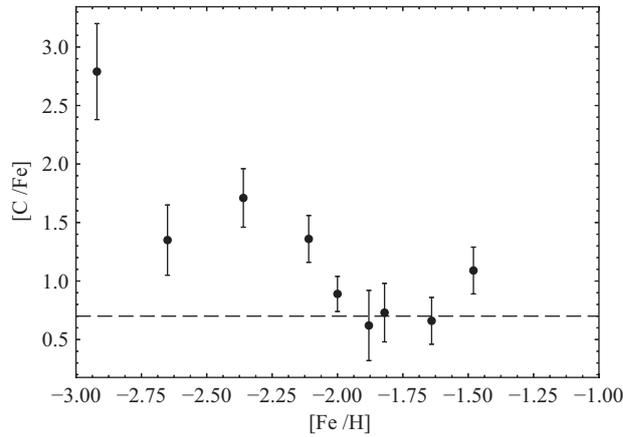


图2 样本在[C/Fe]-[Fe/H]图上的分布. 虚线的[C/Fe]值为0.7.

Fig. 2 Distribution of samples on [C/Fe]-[Fe/H] diagram. The dashed line shows the value of [C/Fe] = 0.7.

图3显示了4个模型在 $\lg T_{\text{eff}}-\lg g$ 图上的演化轨迹, 其中虚线是模型的演化轨迹, 演化轨迹从模型并合后开始到氦燃烧结束. 图3的左边对应金属丰度为 10^{-4} 的演化轨迹, 右边部分对应的是金属丰度为 10^{-5} 的演化曲线. 图3的上半部分则是最终并合质量为 $0.50 M_{\odot}$ 模型的演化轨迹, 下半部分则是并合后质量为 $0.55 M_{\odot}$ 模型的演化轨迹. 图中实线为模型周期与观测恒星周期区间一致的部分演化轨迹, 实心圆点为观测到的9颗天琴RR变星. 运用绝热分析决定模型的本征频率, 运用非绝热分析决定模型脉动的稳定性.

图4显示了并合模型预测的[C/Fe]丰度(黑色水平虚线)与观测的CEMP-RR Lyrae星[C/Fe]丰度的比较. 图中横坐标是恒星的名称, [Fe/H]从左到右逐渐增加. 图中黑色虚线上方的 10^{-5} 和 10^{-4} 代表模型的金属丰度, $0.50 M_{\odot}$ 和 $0.55 M_{\odot}$ 代表恒星并合后的最终质量. 如图4所示, 金属丰度越低的模型, 预测的[C/Fe]越高, 这一趋势与观测相符. 在并合模型计算中, 这样的趋势是因为并合恒星中燃烧的He壳层质量大致相同, 产生的碳质量也几乎一样, 而金属丰度越低的恒星其Fe元素含量越小, 因此金属丰度越低的并合模型造成的[C/Fe]值更大. 另外在相同金属丰度下, 质量越大的并合模型, 即外包层质量越大的模型, 其预测的[C/Fe]越小, 这是因为相同质量的碳物质混合进了恒星的外包层中, 外包层的质量越大碳稀释得越严重, 从而导致碳丰度的降低. 其中金属丰度为 10^{-4} , 最终并合质量为 $0.55 M_{\odot}$ 的模型产生的[C/Fe]丰度为0.56 (见表1第5列), 低于本文区别CEMP和非碳增丰恒星的标准值.

图4显示, 除J1707+58外, CEMP-RR Lyrae星的[C/Fe]丰度都落在了两个不同金属丰度模型预测的碳丰度之间, 模型预测的碳丰度与观测基本一致, 因此CEMP-RR Lyrae星有可能来自HeWD+HG并合渠道. 而金属丰度最低的J1707+58星的[C/Fe]则高于所有模型预测的[C/Fe]值, 其有可能来自其它质量范围的HeWD+HG并合或者双星演化.

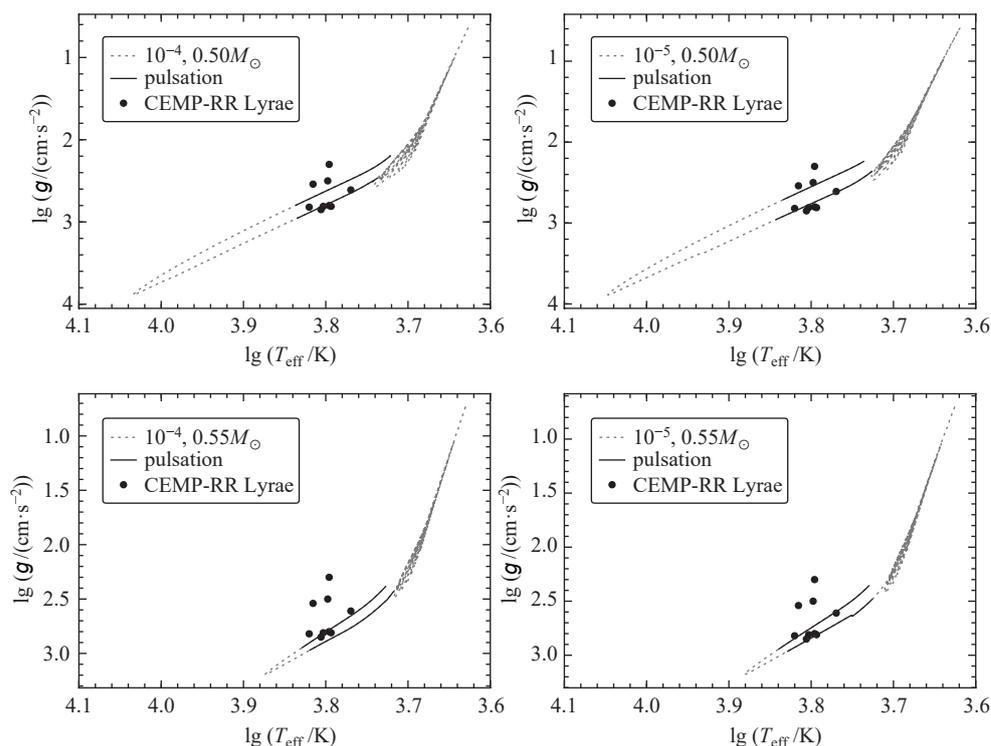


图 3 4个模型在 $\lg T_{\text{eff}}-\lg g$ 图上的演化轨迹. 虚线是模型的演化轨迹(10^{-4} 和 10^{-5} 代表模型的金属丰度, $0.50 M_{\odot}$ 和 $0.55 M_{\odot}$ 代表并合后模型的质量), 实线代表着有脉动的区域, 实心点表示CEMP-RR Lyrae星.

Fig. 3 Evolution tracks of the four models in the $\lg T_{\text{eff}}-\lg g$ plane. The gray dashed lines are evolution tracks of the models (10^{-4} and 10^{-5} represent the metallicity of the models, $0.50 M_{\odot}$ and $0.55 M_{\odot}$ represent the final mass of the mergers). The solid lines indicate the pulsation areas, and the solid points represent CEMP-RR Lyrae stars.

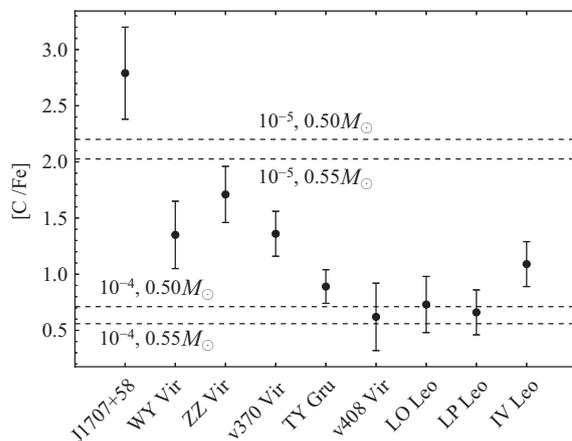


图 4 CEMP-RR Lyrae星与理论模型(黑色水平虚线)的[C/Fe]丰度的比较. 实心点是CEMP-RR Lyrae星的测量丰度.

Fig. 4 Comparison of [C/Fe] abundances of CEMP-RR Lyrae stars with theoretical models (black horizontal dashed lines). The solid points are measured values of CEMP-RR Lyrae stars.

目前9颗CEMP-RR Lyrae中有7颗都没有观测到慢中子元素增丰现象(主要是Ba元素增丰现象). 这些星没有Ba元素可能是由于对这些源进行观测时, 采用的光谱分辨率不够, 也可能是因为这几颗星本身就没有Ba元素. 文中模型的氦壳层最大温度大约为 $T \approx 1.58 \times 10^8$ K, 密度为 $3.98 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 和Zhang等^[10]文中模型的温度密度相似, 同样没有达到慢中子俘获过程发生所需的温度和密度($T > (2.2 - 3.5) \times 10^8$ K, $\rho > (1 - 3) \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[19-20]), 因此本文模型均不产生慢中子俘获元素. 样本中有两颗Ba元素增丰星, 即J1707+58和TY Gru, 其Ba元素来源仍需进一步研究.

4 结论

我们通过MESA恒星演化程序计算了金属丰度为 10^{-4} 和 10^{-5} 情况下的4个HeWD+HG并合模型, 并运用GYRE程序计算水平分支阶段的恒星脉动情况. 结果显示CEMP-RR Lyrae星的 $\lg T_{\text{eff}}$ 、 $\lg g$ 以及周期情况与理论模型演化较为一致. 通过理论模型计算的[C/Fe]与CEMP-RR Lyrae星的[C/Fe]相比较, 发现除了金属丰度最低的J1707+58外, 所有CEMP-RR Lyrae星的[C/Fe]都落在了模型预测的碳丰度之间. 另外, 模型预测的[C/Fe]值随着金属丰度的降低而增加这一趋势也与CEMP-RR Lyrae星的观测趋势一致, 未来针对CEMP-RR Lyrae星大样本的研究将能对这一趋势进行更好的研究和解读. 同时, 期待更多高精度的观测样本对这一理论模型进行更好的限制.

参考文献

- [1] Aoki W, Beers T C, Christlieb N, et al. *ApJ*, 2007, 655: 492
- [2] Masseron T, Johnson J A, Plez B, et al. *A&A*, 2010, 509: A93
- [3] Abate C, Pols O R, Karakas A I, et al. *A&A*, 2015, 576: A118
- [4] Smith H A. *RR Lyrae Stars*. Cambridge, Edinburgh: Cambridge University Press, 2004: 9-10
- [5] Preston G W, Thompson I B, Sneden C, et al. *AJ*, 2006, 132: 1714
- [6] Kinman T D, Aoki W, Beers T C, et al. *ApJL*, 2012, 755: L18
- [7] Kennedy C R, Stancliffe R J, Kuehn C, et al. *ApJ*, 2014, 787: 6
- [8] Stancliffe R J, Kennedy C R, Lau H H B, et al. *MNRAS*, 2013, 435: 698
- [9] Izzard R G, Jeffery C S, Lattanzio J. *A&A*, 2007, 470: 661
- [10] Zhang X F, Jeffery C S. *MNRAS*, 2013, 430: 2113
- [11] Paxton B, Bildsten L, Dotter A, et al. *ApJS*, 2011, 192: 3
- [12] Paxton B, Cantiello M, Arras P, et al. *ApJS*, 2013, 208: 4
- [13] Townsend R H D, Teitler S A. *MNRAS*, 2013, 435: 3406
- [14] Asplund M, Grevesse N, Sauval A J, et al. *ARA&A*, 2009, 47: 481
- [15] Lee Y S, Beers T C, Masseron T, et al. *AJ*, 2013, 146: 132
- [16] Norris J E, Yong D, Bessell M S, et al. *ApJ*, 2013, 762: 28
- [17] Aoki W, Beers T C, Sivarani T, et al. *ApJ*, 2008, 678: 1351
- [18] Preston G W. *PASA*, 2009, 26: 372
- [19] Raiteri C M, Busso M, Gallino R, et al. *ApJ*, 1991, 367: 228
- [20] Meyer B S. *ARA&A*, 1994, 32: 153

Formation of Carbon-Enhanced Metal-Poor RR Lyrae Stars

XIA Ye ZHANG Xian-fei BI Shao-lan MA Xu-dong

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

ABSTRACT Carbon-enhanced metal-poor stars (CEMPs) are considered to be related to the first generation of stars, and responsible for the chemical evolution of the early galaxy. More than half of them are in binaries, and could be explained by binary evolution, but the formation channel of them is still not fully understood. Of the hundreds of carbon-enhanced metal-poor stars, there are nine carbon-enhanced metal-poor RR Lyrae stars (CEMP-RR Lyrae) have been identified, and at least seven of them are very likely not binaries. The usual binary star evolution channel is difficult to produce such single star, particularly with enrich of carbon. One way in which such a single star might be formed is after the merger of a helium white dwarf with a Hertzsprung star. We use a stellar evolution code to calculate models of the remnants of the mergers, and find that the models can reproduce the observed distribution of such carbon-enhanced metal-poor single RR Lyrae stars in terms of their surface temperatures, gravities, and carbon abundances.

Key words stars: abundances, stars: variables: RR Lyrae, methods: data analysis