

氦白矮星与小质量主序星并合及脉动热亚矮星的形成*

马旭东[†] 张先飞

(北京师范大学天文系 北京 100875)

摘要 sdBV_{rs}型热亚矮星是一类特殊的热亚矮星, 观测显示它们同时具有p模和g模的脉动. 目前这一类热亚矮星的演化起源仍然缺乏完备的解释. 对氦白矮星与小质量主序星并合模型进行详细计算表明, 并合模型的结果符合sdBV_{rs}型热亚矮星的表面有效温度、重力加速度等观测特征, 并且能够激发出稳定的p模和g模脉动. 因此, 氦白矮星与小质量主序星并合是形成sdBV_{rs}型热亚矮星可能的渠道之一.

关键词 恒星: 形成, 亚矮星, 白矮星, 双星: 密近

中图分类号: P144; **文献标识码:** A

1 引言

热亚矮星是一类由燃烧的氦核和非常薄的氢壳层构成的小质量恒星, 大部分热亚矮星的质量在 $0.47 M_{\odot}$ 左右, M_{\odot} 为太阳质量, 其氢壳层质量通常小于 $0.01 M_{\odot}$ ^[1-2]. 由于热亚矮星氢壳层质量非常小, 因此在中心氦燃烧结束后, 热亚矮星并不会经历渐近巨星支阶段(Asymptotic Giant Branch, AGB), 而是直接演化成为白矮星(White Dwarf, WD)^[3]. 热亚矮星表面有效温度一般为20000–80000 K, 表面重力加速度 $lg [g/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})]$ 约为4.5–6.5^[4-5]. 在赫罗图上, 热亚矮星位于水平分支(Horizontal Branch, HB)的最蓝端, 因此也被称作极端水平分支星(Extreme Horizontal Branch, EHB)^[6]. 根据不同的恒星光谱类型, 热亚矮星一般分为: B型、O型以及OB型热亚矮星. 另外, 也可根据表面氦丰度(氦原子数目所占比例)的大小, 分为: 富氢($n_{\text{He}} < 10\%$), 富氦($n_{\text{He}} > 90\%$)以及中间富氦($10\% \leq n_{\text{He}} \leq 90\%$)热亚矮星^[1-2, 7-8].

一般认为, 热亚矮星是由一颗即将开始中心氦燃烧的红巨星损失掉几乎所有的氢壳层形成. 但如何损失掉如此大量的氢壳层却是恒星演化理论的一大难点. 研究发现, 对于单颗恒星, 如其为富金属恒星(大于太阳金属丰度), 当在赫罗图上演化至红巨星顶端阶段时, 其包层的束缚能为正, 由此可以通过超星风损失掉大部分包层物质形成热亚矮星^[9]. 但对于更低金属丰度的恒星, 通过单星渠道形成热亚矮星则较为困难. 同时观测表明, 超过半数以上的热亚矮星处于双星系统之中^[10-11], 其组成与分布特征与双星演化

2019-09-18收到原稿, 2019-11-28收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11703001), 中央高校基本科研业务费资助

[†]maxudong@mail.bnu.edu.cn

理论预言的结果相一致. 因此, 大多数热亚矮星均来自双星演化. 热亚矮星主要来自3种不同的双星演化渠道, 分别为: 公共包层物质抛射渠道、稳定洛希瓣物质交流渠道以及双氦白矮星并合渠道^[12-13]. 近年来, 还提出了许多更为细致的双星演化模型^[14-18]. 这些双星模型成功解释了热亚矮星的绝大部分观测特征.

在热亚矮星的观测特征中, 脉动特征与其内部结构直接相关, 并有助于理解其前身星性质. 目前已观测到的全部脉动热亚矮星在温度-重力加速度图上的分布如图1所示^[19]. 根据脉动频率的不同, 大多数脉动热亚矮星处于不同的两个区间: 短周期的p模脉动(sdBV_r, 周期约为80-400 s)^[20]和长周期的g模脉动(sdBV_s, 周期约为2500-7000 s)^[21]. 具有p模脉动的热亚矮星的有效温度大约为28000-35000 K, 表面重力加速度 $\lg[g/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})]$ 为5.2-6.1. 而具有g模脉动的热亚矮星有效温度以及表面重力加速度则一般低于具有p模脉动的热亚矮星. 除了这两类之外, 还有少量特殊的热亚矮星被观测到同时具有p模和g模脉动(sdBV_{rs})^[22-23]. 这些热亚矮星一般位于前两类脉动热亚矮星之间的温度边界上, 有效温度大约处于28000 K左右较窄的区间. 目前关于热亚矮星脉动机制的主要解释为铁镍元素主导的 κ 机制, 即在热亚矮星中, 其内部温度约 2×10^5 K壳层处, 当体元收缩密度上升时, 铁镍元素电离度将增大而导致不透明度增加, 从而吸收大量的内部辐射能量, 最终导致压强增大推动壳层向外膨胀. 随着壳层膨胀, 不透明度将会减小, 恒星辐射出的能量增加, 压强随之减小, 壳层再度回落收缩, 如此周期循环往复引发脉动^[24]. 虽然对热亚矮星的脉动激发机制有了较为充分的理解, 但对脉动热亚矮星的形成与演化渠道, 特别是对sdBV_{rs}这一类具有混合脉动模式的热亚矮星的形成机制仍不清楚, 有待进一步的研究.

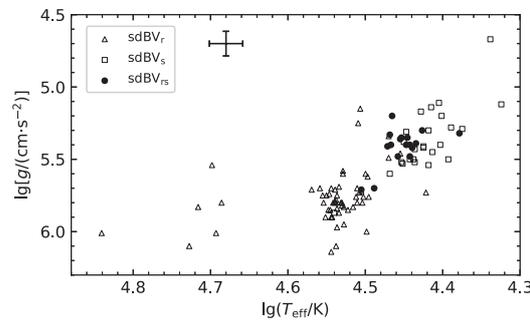


图1 脉动热亚矮星在表面有效温度(Effective Temperature, T_{eff})-重力加速度图上的分布. 三角为sdBV_r, 正方形为sdBV_s, 圆点为sdBV_{rs}, 误差棒为平均误差. 全部热亚矮星的数据来自参考文献[19].

Fig. 1 Distribution of the observed pulsating hot subdwarfs in the effective temperature (T_{eff})-surface gravity plane. Triangles represent sdBV_r, squares represent sdBV_s, and dots represent sdBV_{rs}. Error bar indicates an average error. All data of hot subdwarfs stars are from Ref.[19].

在之前的研究中, 部分由一颗氦白矮星与一颗小质量主序星(Main Sequence, MS)所构成的密近双星系统会发生并合并形成热亚矮星^[18]. 由此并合渠道所形成的热亚矮星其温度区间与sdBV_{rs}所处区间较为一致. 考虑到这一相似特征, 在本文中, 将对氦白矮星与小质量主序星所形成的热亚矮星所处温度范围以及脉动特征等进行研究, 探讨这一渠道是否能够形成sdBV_{rs}型脉动热亚矮星.

2 方法

根据Zhang等人的研究^[18], 当一颗氦白矮星与小质量主序恒星发生并合后, 所形成的并合产物与红巨星较为相似, 但中心氦核的简并度大于普通红巨星. 之后的演化与红巨星演化一样, 如图2所示为一颗并合后红巨星氢包层以及氦核质量随演化时间的变化, 靠近氦核表面的氢壳层不断燃烧生成氦附着在氦核上, 使得氦核质量不断增加. 而富氢包层由于星风损失以及氢燃烧导致质量逐渐减小. 当氦核增加到足够大时, 将发生一系列的氦闪耀, 并最终点燃中心氦核. 根据前身星质量的不同, 并合后恒星将形成4种不同类型的恒星, 分别是: 氦白矮星、中等富氢型热亚矮星、富氢型热亚矮星以及水平分支星. 图3显示了不同质量氦白矮星与主序星并合后的产物, 其中实心点代表并合后恒星将形成富氢型热亚矮星. 由于同时具有p模和g模脉动的sdBV_{rs}型热亚矮星主要为富氢型热亚矮星^[19], 因此, 在本文中对这11对并合模型进行了研究.

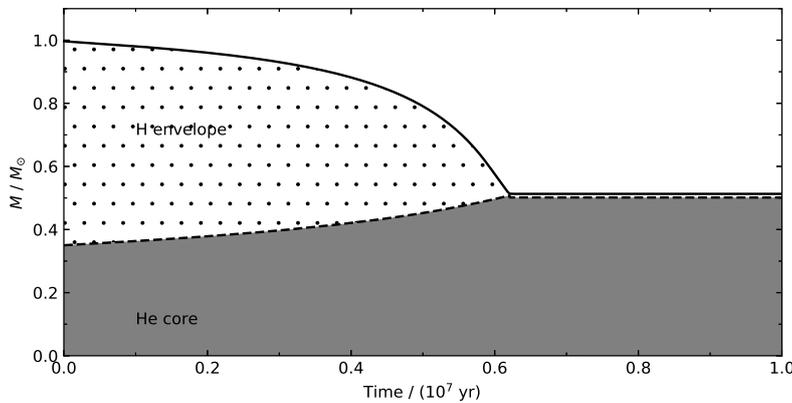


图 2 $0.350 M_{\odot}$ 白矮星与 $0.650 M_{\odot}$ 主序星并合模型 ($0.350 + 0.650 M_{\odot}$) 的氦核以及氢包层质量随演化时间的变化, 纵坐标代表由中心至表面的质量 (M), 点区域代表氢包层, 灰色区域代表氦核.

Fig. 2 The He core and H envelope mass of model $0.350 M_{\odot}$ WD + $0.650 M_{\odot}$ MS changes with the evolution time. The vertical coordinate represents the mass from centre to surface (M), the dotted area represents H envelope, and the grey area represents He core.

并合过程中由于双星质量和周期的不同, 会有不同程度的物质损失. 本文中, 为了考察具有不同质量氢壳层的并合恒星演化, 并将结果作为演化网格, 并未考虑并合过程中的质量损失. 我们使用恒星演化程序 MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics v9793^[25-28]) 对并合产物的演化进行了计算. 并合过程通过氦白矮星吸积富氢物质来实现^[18]. 本文在计算中, 氦白矮星质量的取值范围为 $0.250-0.400 M_{\odot}$, 质量间隔取 $0.025 M_{\odot}$. 吸积物质的成分与太阳金属丰度的主序恒星一致, 即氢丰度为 $X = 0.70$, 氦丰度为 $Y = 0.28$, 金属丰度为 $Z = 0.02$, 其中各金属组分依照 Grevesse 等人的模型 (scaled metal mixture)^[29] 来设置. 通常并合过程可根据吸积速率分为快并合、慢并合以及混合并合 (快+慢并合), 其中慢并合过程吸积速率大约为 $10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[14]. 根据 Zhang 等人的研究^[18], 对于白矮星与小质量主序恒星的并合, 当吸积速率不小于 $10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时氦白矮星与小质量主序星并合产物的演化并无明显区别. 由于白矮星与

小质量主序恒星的并合过程缺乏数值模拟结果, 其并合时标并不清楚. 在Zhang等^[18]以及本文的研究中, 假设这一过程时标与公共包层过程时标近似, 约为几天到几年^[30-32], 因此将吸积速率设置为 $1 M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$.

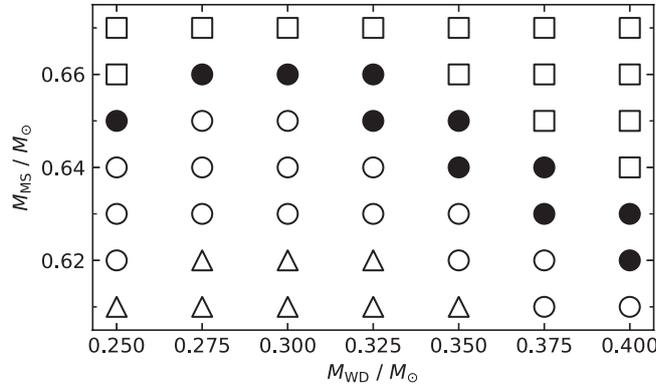


图 3 氦白矮星+主序星并合模型产物在白矮星质量(M_{WD})-主序星质量(M_{MS})图中的分布. 黑色实心点、空心圆、正方形和三角代表最终演化产物分别为富氢热亚矮星、中等富氢热亚矮星、水平分支星以及白矮星, 结果来自参考文献^[18].

Fig. 3 Distribution of the models of HeWD + MS merger remnants in the M_{WD} - M_{MS} plane. The black filled dots, circles, squares, and triangles indicate the mergers that result in hydrogen-rich hot subdwarfs, inter-mediate helium-rich hot subdwarfs, HB stars, and WD, respectively. Results are from Ref.^[18].

在并合之后的演化过程中, 恒星演化将伴随着星风物质损失, 其中红巨星阶段采用Reimers公式设定参数 $\eta_R = 0.5$, 渐近巨星支阶段根据Blöck公式设定参数 $\eta_B = 0.5$ ^[33-34]. 恒星混合长参数采用MESA中的以太阳为标准设定的值 $\alpha = 1.9179$ ^[25]. 在演化过程中, 恒星将发生氦闪, 其碳和氧的丰度在恒星的内部将发生变化, 由此采用了考虑了这一效应的OPAL Type 2不透明度表^[35-36]. 恒星大气外部边界条件使用爱丁顿灰大气模型. 在我们的模型中, 混合过程仅考虑对流区的对流效应和辐射区的元素扩散效应^[37]. 并合后形成的恒星为小质量恒星, 采用“agb.net”核反应网络, 能涵盖所有可能发生的核反应.

当并合产物演化至热亚矮星阶段后, 使用GYRE程序^[38]来确定该热亚矮星是否能激发出脉动以及相应的脉动参量. 然后将理论计算得到的结果与观测结果相比较.

3 结果

氦白矮星与小质量主序恒星并合之后的产物为一颗类红巨星, 其结构为一个简并的氦核被氢包层包裹着. 氢壳层燃烧生成的氦添加到氦核上使得氦核的质量逐渐增加, 而氢包层的质量则由于星风损失以及氢燃烧逐渐减小. 当氦核的质量累积到足够大之后, 氦核较外层的氦会被点燃, 并通过一系列的氦闪耀由外向内将中心氦核逐层点燃并解简并, 氦闪之间间隔的时标大约为 10^5 yr. 这一闪耀过程大约持续 10^6 yr, 氦闪到达氦核中心, 并开始中心氦燃烧. 中心氦燃烧阶段作为热亚矮星的主序阶段, 大约持续 10^7 yr^[18].

全部11个模型的最终演化结果如图4所示, 由图中可以看到有5个模型的演化轨迹与sdBV_{rs}型热亚矮星在温度-重力加速度图上匹配比较好, 这5个模型根据初始白矮星质量+主序星质量的形式分别为 $0.250 + 0.650$ 、 $0.275 + 0.660$ 、 $0.300 + 0.660$ 、 $0.325 +$

0.660以及 $0.350 + 0.650 M_{\odot}$. 符合sdBV_{rs}型热亚矮星分布的5个模型, 其总质量分别为0.484、0.493、0.499、0.506以及 $0.513 M_{\odot}$, 这一质量比大部分热亚矮星的质量 $0.47 M_{\odot}$ 略大. 外壳层质量分别为0.005、0.007、0.010、0.010以及 $0.012 M_{\odot}$.

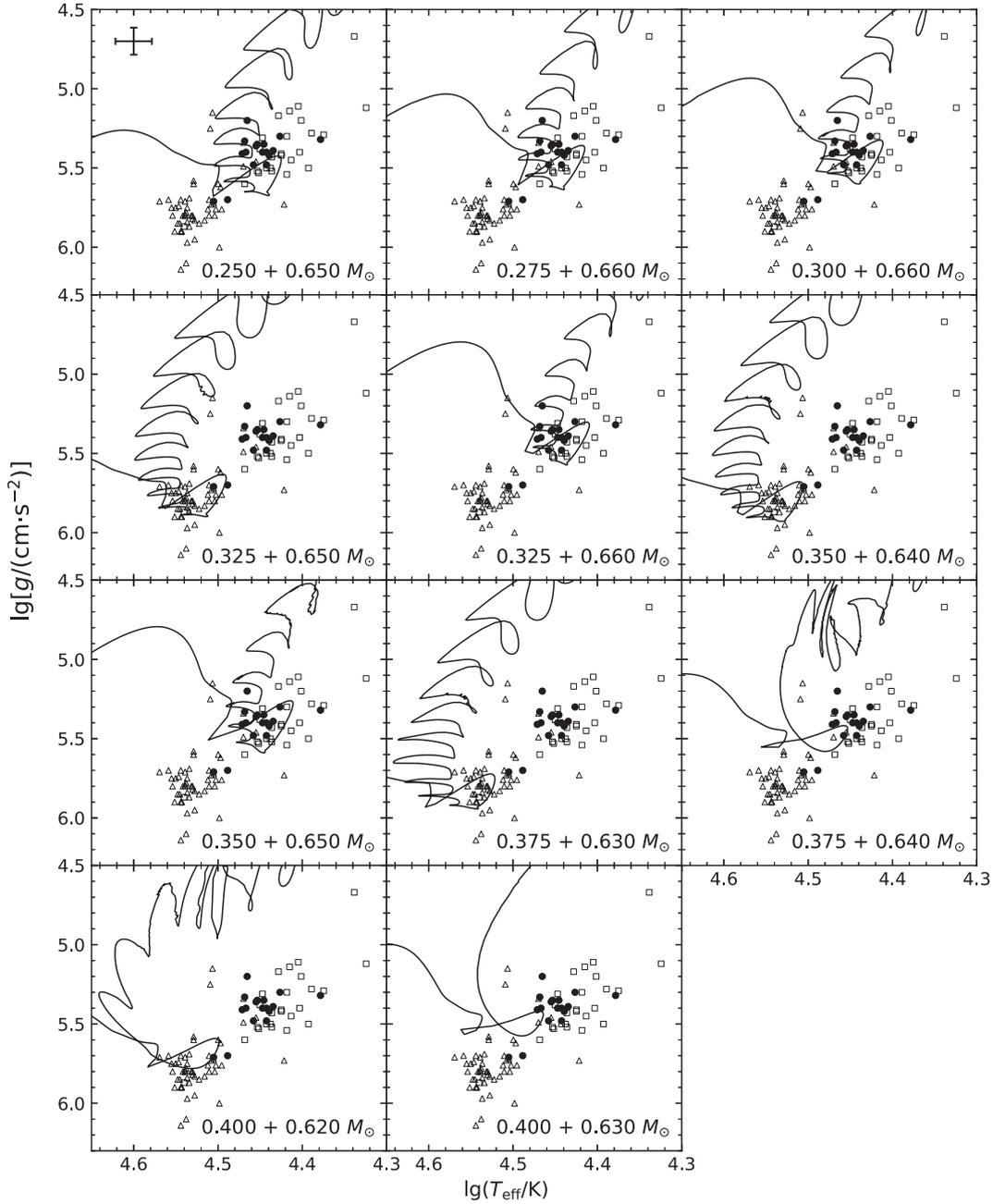


图 4 氦白矮星+主序星并合产物在有效温度-重力加速度图中的演化轨迹. 符号与图1相同.

Fig. 4 Evolutionary tracks in the surface gravity-effective temperature diagram of HeWD + MS merger remnants. The symbols are same to Fig.1.

剩余的6个模型, 由于并合的主序星质量更小, 演化形成的热亚矮星具有更薄的包层, 因此表面有效温度更高, 更接近sdBV_r热亚矮星所在的区域. 在不匹配的这6个模型中有5个模型的初始氦白矮星质量大于等于 $0.35 M_{\odot}$. 根据之前对氦白矮星与主序星并合模型的大样本演化的计算结果, 白矮星质量超过 $0.35 M_{\odot}$ 演化形成的热亚矮星的比例非常小^[18].

对能够形成sdBV_r热亚矮星的5个模型, 进一步计算和分析了其脉动性质. 通过GYRE程序, 分别计算了各个模型p模和g模球谐度 $l = 0, 1, 2$ 的脉动情况. 结果显示, 全部的5个模型在演化进入热亚矮星的壳层氦燃烧及中心氦燃烧阶段后都会显示出脉动的性质, 并且同时具有稳定的p模和g模脉动. 如图5所示为 $0.350 + 0.650 M_{\odot}$ 模型作为示例的脉动计算结果, 灰色圆圈表征了能激发p模脉动的演化, 灰色菱形表征了能激发g模脉动的演化.

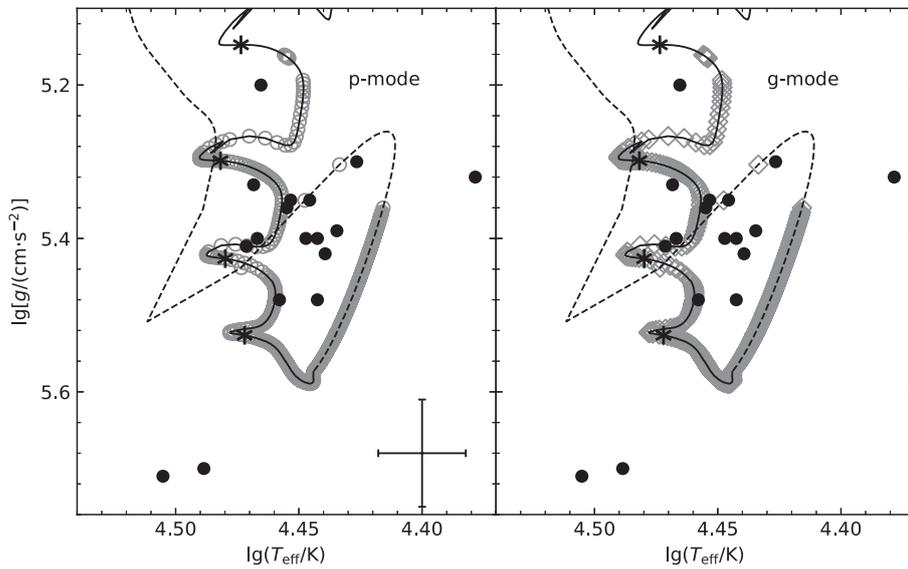


图 5 表面有效温度-重力加速度图上sdBV_r (黑色点)以及并合模型 $0.350 + 0.650 M_{\odot}$ 的演化轨迹. 左右两张图分别为p模和g模激发情况. 实线和虚线分别代表向内氦闪耀阶段和稳定氦核燃烧阶段. 灰色圆圈以及菱形分别代表具有p模或g模脉动激发的位置. 星号代表每一次氦闪的峰值的位置. 误差棒为平均误差.

Fig. 5 A surface gravity-effective temperature diagram showing the sdBV_r stars (black dots) and the evolutionary tracks for the $0.350 + 0.650 M_{\odot}$ merger model. The left and right panels are for p-mode and g-mode, respectively. The solid and dashed lines show the inwards helium flashes and post He core burning evolution, respectively. The grey circles and diamonds indicate the locations of excited modes of p-mode and g-mode, respectively. Asterisks correspond to the positions of each peak of He-flashes. Error bar indicates an average error.

4 总结与分析

氦白矮星与小质量主序星并合是形成热亚矮星的重要渠道之一, 本文中对这一模型是否能够形成同时具有p模和g模的sdBV_r型热亚矮星进行了详细研究和检验. 通过恒星演化程序MESA详细计算了氦白矮星与主序星并合模型的演化, 并使用GYRE程

序对每个模型的脉动稳定性进行了分析. 结合氦白矮星与小质量主序星并合的大样本演化结果, 显示并合模型的演化轨迹与大多数sdBV_{rs}型热亚矮星在温度-重力加速度图上的分布较为符合. 进一步的计算表明, 这些并合所形成的热亚矮星都能激发出稳定的p模和g模, 与sdBV_{rs}型热亚矮星脉动特征一致. 由此, 氦白矮星与小质量主序星并合是sdBV_{rs}型热亚矮星形成的可能渠道之一.

在本文的研究中, 对热亚矮星的演化仅考虑了较为简单的物理机制, 忽略了辐射悬浮等扩散过程. 因此, 在进一步研究中将详细研究各种细致物理过程对脉动的影响. 同时, 脉动的周期变化率与周期之比(\dot{P}/P)可以对演化模型进行更好的限制, 但鉴于观测较为困难, 目前该数据数量与准确性仍显不足, 因此并未在本文中进行研究. 随着观测数据的增加, 将在未来针对单颗热亚矮星脉动的变化情况进行更为深入的研究.

参考文献

- [1] Heber U. ARA&A, 2009, 47: 211
- [2] Heber U. PASP, 2016, 128: 082001
- [3] Dorman B, Rood R T, O'Connell R W. ApJ, 1993, 419: 596
- [4] O'Toole S J, Jordan S, Friedrich S, et al. A&A, 2005, 437: 227
- [5] Valyavin G, Bagnulo S, Fabrika S, et al. ApJ, 2006, 648: 559
- [6] Heber U, Kudritzki R P, Caloi V, et al. A&A, 1986, 162: 171
- [7] Naslim N, Jeffery C S, Behara N T, et al. MNRAS, 2011, 412: 363
- [8] Naslim N, Jeffery C S, Hibbert A, et al. MNRAS, 2013, 434: 1920
- [9] Han Z W, Chen X F, Lei Z X. AIP Conference Proceedings, 2013, 1314: 85
- [10] Napiwotzki R, Karl C A, Lisker T, et al. Ap&SS, 2004, 291: 321
- [11] Copperwheat C M, Morales-Rueda L, Marsh T R, et al. MNRAS, 2011, 415: 1381
- [12] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. MNRAS, 2002, 336: 449
- [13] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. MNRAS, 2003, 341: 669
- [14] Zhang X, Jeffery C S. MNRAS, 2012, 419: 452
- [15] Chen X F, Han Z W, Deca J, et al. MNRAS, 2013, 434: 186
- [16] Vos J, Ostensen R H, Marchant P, et al. A&A, 2015, 579: A49
- [17] Xiong H, Chen X, Podsiadlowski P, et al. A&A, 2017, 599: A54
- [18] Zhang X F, Hall P D, Jeffery C S, et al. ApJ, 2017, 835: 242
- [19] Holdsworth D L, Ostensen R H, Smalley B, et al. MNRAS, 2017, 466: 5020
- [20] Kilkeny D, Koen C, O'Donoghue D, et al. MNRAS, 1997, 285: 640
- [21] Green E M, Fontaine G, Reed M D, et al. ApJ, 2003, 583: L31
- [22] Oreiro R, Hernández F P, Ulla A, et al. A&A, 2005, 438: 257
- [23] Schuh S, Huber J, Dreizler S, et al. A&A, 2006, 445: L31
- [24] Jeffery C S, Saio H. MNRAS, 2006, 372: L48
- [25] Paxton B, Bildsten L, Dotter A, et al. ApJS, 2011, 192: 3
- [26] Paxton B, Cantiello M, Arras P, et al. ApJS, 2013, 208: 4
- [27] Paxton B, Marchant P, Schwab J, et al. ApJS, 2015, 220: 15
- [28] Paxton B, Schwab J, Bauer E B, et al. ApJS, 2018, 234: 34
- [29] Grevesse N, Sauval A J. SSRv, 1998, 85: 161
- [30] Ivanova N. Common Envelope: The Progress and the Pitfalls//Schmidtobreick L, Schreiber M R, Tappert C. Evolution of Compact Binaries. San Francisco: Astron. Soc. Pac., 2011: 91-105
- [31] Passy J C, De Marco O, Fryer C L, et al. ApJ, 2012, 744: 52
- [32] Ivanova N, Justham S, Nandez J L A, et al. Science, 2013, 339: 433
- [33] Bloeker T. A&A, 1995, 297: 727

- [34] Schindler J T, Green E M, Arnett W D. *ApJ*, 2015, 806: 178
[35] Iglesias C A, Rogers F J. *ApJ*, 1996, 464: 943
[36] Ferguson J W, Alexander D R, Allard F, et al. *ApJ*, 2005, 623: 585
[37] Thoul A A, Bahcall J N, Loeb A. *ApJ*, 1994, 421: 828
[38] Townsend R H D, Teitler S A. *MNRAS*, 2013, 435: 3406

Helium White Dwarf-main Sequence Star Merger and Formation of Pulsating Hot Subdwarf Stars

MA Xu-dong ZHANG Xian-fei

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

ABSTRACT sdBV_{rs} is a particular type of hot subdwarfs which have both p-mode and g-mode pulsations. It is unclear of the formation channel of such hot subdwarfs stars. The merger of a He core white dwarf (HeWD) with a main sequence (MS) star can produce a hot subdwarf. We propose that sdBV_{rs} may form from this channel. We compute the models of the remnants of some of these mergers, and perform detailed stability analysis. By comparing to observations, the evolutionary tracks of the remnants of mergers can match with the sdBV_{rs} in surface gravity-effective temperature diagram. These models also have both p-mode and g-mode pulsations been excited. Our result indicates that the merger of a HeWD with a MS star might be one of the formation channels of sdBV_{rs} stars.

Key words stars: formation, subdwarfs, white dwarfs (WDs), binaries: close