

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.01

利用 BSE 算法对 B 型热亚矮星的研究

王小刚^{1,2} 张奉辉^{1,3,4}

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650216; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 天体结构与演化实验室, 昆明 650216; 4. 云南省国际超新星研究重点实验室, 昆明 650216)

摘要: B 型热亚矮星被认为是一种具有非常薄氢壳层的中心氦核燃烧的恒星。观测上发现至少有一半的 B 型热亚矮星处于密近双星系统中, 因此一般认为其来源于双星相互作用。通过修改快速双星演化算法计算了稳定的洛希瓣物质转移、公共包层抛射以及双氦白矮星并合通道形成 B 型热亚矮星的参数空间。稳定的洛希瓣物质转移和公共包层抛射通道形成的 B 型热亚矮星质量分布在 $0.32 \sim 0.8M_{\odot}$ 之间, 并且在 $0.47M_{\odot}$ 附近有一个明显的峰值。双氦白矮星并合通道形成的 B 型热亚矮星质量分布在 $0.4 \sim 0.65M_{\odot}$ 之间, 其平均质量约为 $0.52M_{\odot}$ 。模拟得到的短周期和长周期 B 型热亚矮星双星系统轨道的轨道周期分布都能够与观测数据吻合。

关键词: B 型热亚矮星; 周期; 质量

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

B 型热亚矮 (hot subdwarf-B, sdB) 星是一种具有极薄氢壳层 ($< 0.02M_{\odot}$) 的中心氦核燃烧天体, 其质量约为 $0.47M_{\odot}$ ^[1, 2]。sdB 星具有很高的表面有效温度, 其位于赫罗图上水平分支的最蓝端, 在球状星团中也常被称为极端水平分支星。在天体物理的研究中, sdB 星是一类很重要的天体。sdB 星被认为是椭圆星系紫外反转的主要来源^[3]。由 sdB 星产生的紫外流量能够改变光谱能量分布的整体形状^[4], 并且影响恒星形成率的定标关系^[5, 6]。由一颗 sdB 星和大质量碳氧白矮星组成的密近双星系统可能是 Ia 型超新星前身星的候选体, 并且部分密近 sdB 星双星系统也是重要的引力波源^[7]。

由于 sdB 星的氢壳层很薄, 它们的前身星必须在点燃氦核之前丢失绝大部分的氢壳层。但是恒星的单星演化理论很难解释是什么机制主导了 sdB 星前身星如此多的质量损失。观测发现有接近一半的 sdB 星处在密近双星系统中^[8--12], 双星间的相互作用可能在 sdB 星

收稿日期: 2012-08-07; 修回日期: 2012-11-29

资助项目: 国家自然科学基金 (11973081)

通讯作者: 王小刚, wangxiaogang@ynao.ac.cn

的形成中发挥着重要作用^[13]。稳定的洛希瓣物质转移 (Roche lobe overflow, RLOF)、公共包层 (common envelope, CE) 抛射以及双氦白矮星 (helium white dwarf, He-WD) 并合三种通道是 sdB 星的主要形成渠道。一般认为, 稳定的 RLOF 通道形成的主要是长周期复合光谱的 sdB 星双星系统^[3, 14–18], 它们的轨道周期从几百天到超过一千天。密近的 sdB 星双星系统只能通过 CE 抛射通道形成^[3, 14, 19, 20], 大部分密近 sdB 星双星系统的伴星是白矮星、小质量主序星或者褐矮星, 它们围绕 sdB 星的轨道周期从几十分钟到几天。双 He-WD 并合通道能够形成 sdB 星单星^[3, 16, 21–25], 其质量分布在 $0.4 \sim 0.65M_{\odot}$ 之间^[26]。

Drew Clausen 等人^[27] 计算了通过稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星的轨道周期分布。然而他们的结果与 Schaffenroth 等人^[28] 和 Vos 等人^[17] 通过观测给出的短周期 sdB 星以及长周期 sdB 星的轨道周期分布似乎不能相符。另外, Drew Clausen 等人^[27] 并未研究双 He-WD 并合通道形成 sdB 星, Hurley 等人^[29] 虽然在文章中提到了总质量超过 $0.7M_{\odot}$ 时发生 $3\text{-}\alpha$ 反应, 从而摧毁整个双星系统, 但是却都让快速双星演化 (binary star evolution, BSE) 算法中的双 He-WD 并合形成了 Ia 型超新星。Drew Clausen 等人^[27] 通过 BSE 研究 sdB 星时仅粗略的给出了最小氦核燃烧质量公式, 并且没有给出通过稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星的星族特征。为了解决以前研究者所遗留的问题并详细的研究通过双星间的相互作用形成 sdB 星的参数空间分布, 我们利用修改的 BSE 计算了稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并合通道形成 sdB 星的轨道周期和质量等分布, 并将我们所得到的演化数据和现有的观测数据进行了对比。

本文的大纲如下: 第二部分我们介绍了 BSE 中双星演化成 sdB 星的一些参数设定。第三部分我们给出了修改 BSE 后通过不同模型对 sdB 星的研究结果。第四部分我们对研究结果进行了讨论与总结。

2 研究方法

2.1 修改 BSE 参数

我们使用的 BSE 双星演化代码来自于 Hurley 等人^[29, 30], 它是一种快速计算恒星演化的方法。在我们的模型中, 通过调节一些 BSE 参数设置以更好的研究 sdB 星的分布特征。我们在文章中仅给出了与 sdB 星相关的一些重要参数, 关于 BSE 其它参数及详细介绍请参考 Hurley 等人^[29] 的文章。

我们依据 sdB 星的相关研究设置了在红巨星顶端附近失去氢壳层后的最小氦核燃烧质量 $M_{\text{c}}^{\text{min}}$ 。在原来的 BSE 中, 具有太阳金属丰度 ($Z = 0.02$) 的零龄主序恒星的质量如果小于 $1.995M_{\odot}$, 它在红巨星顶端之前通过稳定的 RLOF 或 CE 失去氢壳层后并不会点燃氦核。而 D'Cruz 等人^[31] 的研究表明接近红巨星顶端时也可以点燃氦核。Han 等人^[3] 在双星形成 sdB 星的研究中给出了红巨星顶端的氦核质量 $M_{\text{c}}^{\text{tip}}$ 以及在其顶端附近失去氢壳层后能够点燃氦核的最小氦核质量 $M_{\text{c}}^{\text{min}}$ 。Drew Clausen 等人^[27] 依据 Han 等人^[3] 的结果利用公

式 $M_c^{\min} = 0.95M_c^{\text{tip}}$ 计算得到了相应的最小氦核燃烧质量 M_c^{\min} 。我们基于 Drew Clausen 等人 [27] 以及 Han 等人 [3] 的研究, 利用 BSE 重新计算了红巨星顶端氦核质量 M_c^{tip} , 并且利用 Han 等人 [3] 给出的 M_c^{\min} 与 M_c^{tip} 的比值系数得到了相应的 M_c^{\min} 。我们在图 1 中分别给出了红巨星顶端附近的最小氦核燃烧质量 M_c^{\min} 以及在红巨星顶端的氦核质量 M_c^{tip} 。

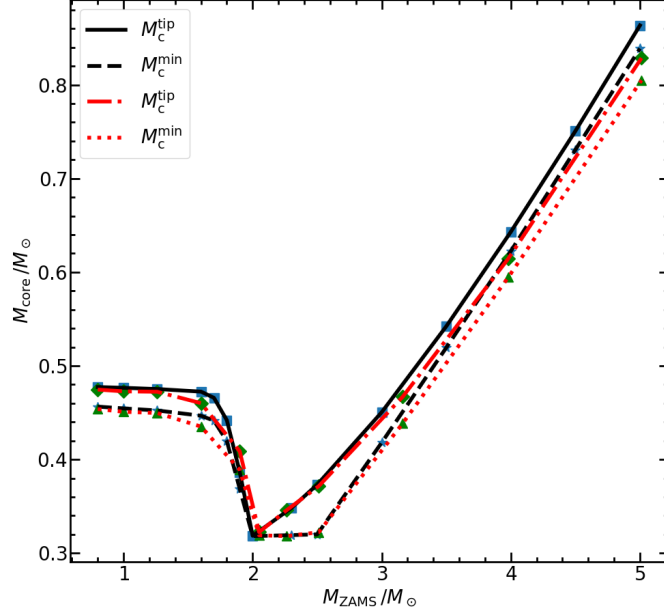


图 1 不同零龄主序质量下的 M_c^{tip} 和 M_c^{\min} 分布。黑色线为我们利用 BSE 给出的结果, 红色线为 Han 等人 [3] 给出的结果。

当双星中的主星充满了洛希瓣时, 主星和伴星的质量比 ($q = \frac{M_a}{M_b}$) 决定了物质转移是否动力学稳定。当 q 小于临界值比 q_{crit} 时发生稳定的 RLOF 过程, 否则系统将发生 CE 抛射。主星在赫氏空隙阶段开始发生稳定的 RLOF 的临界质量比 q_{crit} 被我们设置为 3.2 或 4.0 (分别为 Han 等人 [14] 和 Hurley 等人 [29] 的值)。而主星在红巨星阶段开始发生稳定的 RLOF 时的临界质量比由下列公式给出:

$$q_{\text{crit}} = 0.362 + \frac{1}{3(1 - \frac{M_{\text{cd}}}{M_{\text{d}}})}, \quad (1)$$

其中 M_{cd} 是主星的核质量。除了在模型中使用公式 (1) 给出的 q_{crit} 值外, 我们还给出了 $q_{\text{crit}} = 1.5$ 模型结果。

双星在稳定的 RLOF 过程中主星失去的一些物质可能不会被伴星完全吸积, 而是从双星系统中丢失, 因此我们在 BSE 中改变了这个过程的相应参数设置。在 BSE 默认的情况下, 处于主序或赫氏空隙阶段的伴星吸积的物质质量受其热时标的限制, 伴星所能增加的质量

与主星损失的质量的比值 f_{RLOF} 由下列公式给出:

$$f_{\text{RLOF}} = \min\left(1.0, 10 \frac{M_a}{M_d \tau_{\text{KH}a}}\right), \quad (2)$$

其中 M_a 表示伴星的质量, M_d 为主星的质量损失率, $\tau_{\text{KH}a}$ 表示伴星的 Kelvin–Helmholtz 时标。我们同时使用了由公式 (2) 所给出的 f_{RLOF} 以及 $f_{\text{RLOF}} = 0.5$ 来检验物质转移率的影响。

需要说明的是在 BSE 中 $\gamma = 1$ 表示物质带走了一个与系统轨道角动量成正比的特定角动量, $\gamma = -1$ 表示物质带走了与主星成比例的特定角动量, 以及 $\gamma = -2$ 表示物质带走了与伴星成比例的特定角动量三种情况。我们在模型中使用了 $\gamma=1, -1$ 的值。在模型中我们还分别给出了 α_{CE} 为 0.75、1.5 以及 3.0 的三个值用于研究 CE 抛射系数的影响。另外, Reimers 星风系数 η 被设置为 0.25。

2.2 双星间的参数设置

为了研究 sdB 星的分布特征, 我们使用大样本演化的方法同时演化了 10^6 组双星。对于每组双星中的主星质量 M_1 , 我们依据 Miller & Scalo^[32] 的初始质量函数 (initial mass function, IMF) 公式获得, 即

$$\xi(M_1) = \begin{cases} a_1 M_1^{-1.3}, & 0.1 \leq M_1/M_\odot \leq 0.5, \\ a_2 M_1^{-2.2}, & 0.5 \leq M_1/M_\odot \leq 1.0, \\ a_2 M_1^{-2.7}, & 1.0 \leq M_1/M_\odot \leq 100, \end{cases} \quad (3)$$

其中, M_1 以太阳质量 M_\odot 为单位, a_1 、 a_2 为归一化常数。

对于每组双星的伴星质量 M_2 , 我们依据双星间的均匀质量比 q ^[33, 34] 分布:

$$n(1/q) = 1, \quad (4)$$

给出我们的伴星质量 $M_2 = qM_1$, 其中 $0 \leq q \leq 1$ 。

双星间距分布呈现随间距增长而稳定上升, 并且到一定程度后呈现 $\lg a$ 的常数分布。即

$$an(a) = \begin{cases} \alpha_{\text{sep}} \left(\frac{a}{a_0}\right)^m, & a \leq a_0, \\ \alpha_{\text{sep}}, & a_0 < a < a_1, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\alpha_{\text{sep}} \approx 0.070$, $a_0 = 10R_\odot$, $a_1 = 5.75 \times 10^6 R_\odot$, $m \approx 1.2$ ^[35]。这种分布意味着在每个对数间隔内有相等数量的宽双星系统, 并且大约 50% 的是轨道周期小于 100 年的双星系统。另外, 我们在 BSE 中使用的金属丰度为太阳金属丰度, 并且给出最大演化年龄为 15Gyr。

3 研究结果

双星通过稳定的 RLOF、CE 抛射和双 He-WD 并合通道是形成 sdB 星的重要来源。在本文中, 我们通过修改 BSE 实现了双星中不同通道形成 sdB 星的演化过程, 通过计算大量双星的演化充分展示了 sdB 星的模拟分布并与观测数据进行了对比。下面是本文的研究结果。

3.1 模拟特征

为了更好的展示结果, 我们在表 1 中给出了通过 BSE 形成 sdB 星的模型参数以及各个通道所占的比例。第 1 列表示运行标识符, 第 2 ~ 8 列分别为运行中相关的重要参数, 第 9 ~ 13 列分别为双星中各个通道形成 sdB 星的占比。其中, 第 9 列给出了主星在红巨星阶段开始发生稳定的 RLOF 并形成 sdB 和主序伴星的占比, 第 10 列给出了主星在赫氏空隙阶段开始发生稳定的 RLOF 并形成的 sdB 和主序伴星的占比, 第 11 列给出了通过第一次 CE 抛射通道形成的 sdB 和主序伴星的占比, 第 12 列给出了通过第二次 CE 抛射通道形成的 sdB 星的占比, 此过程的伴星一般为白矮星, 第 13 列给出了主星和伴星分别在形成 He-WD 后并合形成单颗 sdB 星的占比, 第 14 列为这些通道得到的 sdB 星的样本总数。另外在表 1 中, 模型 1 ~ 6 为我们使用原始 BSE 得到的结果, 模型 7 ~ 12 为改变最小氦核燃烧质量得到的结果, 模型 13 ~ 18 为改变最小氦核燃烧质量与临界质量比的结果, 模型 19 ~ 24 为改变最小氦核燃烧质量、临界质量比以及物质转移率的结果, 模型 25 ~ 30 为改变临界质量比以及物质转移率的结果, 模型 31 ~ 36 为改变临界质量比的结果, 模型 37 ~ 42 为改变物质转移率的结果。并且上述每组中的 6 个模型分别是 CE 抛射系数为 0.75、1.5 和 3.0 以及轨道角动量损失因子为 1 和 -1 组合的结果。

我们在图 2 中展示了 8 个模型中不同通道形成 sdB 星的主星初始质量 M_{10} 与初始轨道周期 $\lg P_0$ 分布。需要说明的是我们并没有给出所有模型的图, 而是仅给出了对我们研究影响较大的 8 个模型的图, 并且我们将所有的双星偏心率设置为 $e = 0$, 即假设所有的双星轨道为圆轨道。从图 2 中可以看到形成 sdB 星的主星初始质量 M_{10} 几乎都小于 $5M_{\odot}$, 这是由于将 sdB 星的有效温度限制在 45000K 以下得到的。图 2 分别给出的是最原始 BSE 的模型 1、改变最小氦核燃烧质量的模型 7、改变临界质量比的模型 31、改变物质转移率的模型 37、将 CE 抛射系数由 0.75 增加至 1.5 的模型 21、将 CE 抛射系数增加至 3.0 的模型 23、在模型 23 基础上将角动量损失因子设为 -1 的模型 24 以及模型 17。

图 3 分别展示了上述 8 个模型中不同通道形成 sdB 星的伴星有效温度 $\lg T_{\text{eff}}$ 与轨道周期 $\lg P$ 分布, 其与图 2 中所表示的模型一一对应。图 3 中黑色实线框表示的是 Han 等人^[14]给出的最佳模型的分布。我们在这幅图中不仅给出了生成主序伴星的 $\lg T_{\text{eff}} - \lg P$ 分布, 还给出了通过第二次 CE 抛射通道形成白矮星伴星的 $\lg T_{\text{eff}} - \lg P$ 分布。在图 3 中通过将我们所得到的 sdB 星轨道周期分布与 Schaffenroth 等人^[28]的短周期 sdB 星和 Vos 等人^[17]数的长周期 sdB 星的轨道周期的观测据对比, 可以清楚的看到对于稳定的 RLOF 通道而言, 改变物质转移率使得其周期分布偏小。图 3 中的模型 1、模型 7、模型 37、模型 21、模型 23 以及

表 1 BSE 给出的 sdB 星计算结果

模型	α_{CE}	λ	γ	M_{He}	f_{RLOF}	q_{crit} (RGB)	q_{crit} (HG)	RLOF (RGB)	RLOF (HG)	CE1	CE2	Merger	样本总数
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
1	0.75	0.5	1	M_c^{tip}	BSE	BSE	BSE	0.67	58.26	4.39	31.71	4.97	1047
2	0.75	0.5	-1	M_c^{tip}	BSE	BSE	BSE	0.56	57.10	4.01	32.32	6.01	1247
3	1.50	0.5	1	M_c^{tip}	BSE	BSE	BSE	0.31	26.81	24.79	40.84	7.25	2275
4	1.50	0.5	-1	M_c^{tip}	BSE	BSE	BSE	0.28	28.02	22.67	40.65	8.38	2541
5	3.00	0.5	1	M_c^{tip}	BSE	BSE	BSE	0.20	17.07	38.00	32.18	12.56	3574
6	3.00	0.5	-1	M_c^{tip}	BSE	BSE	BSE	0.18	18.30	35.58	32.26	13.68	3890
7	0.75	0.5	1	M_c^{min}	BSE	BSE	BSE	0.81	29.58	47.28	19.27	3.05	2096
8	0.75	0.5	-1	M_c^{min}	BSE	BSE	BSE	0.76	31.29	44.22	19.78	3.96	2250
9	1.50	0.5	1	M_c^{min}	BSE	BSE	BSE	0.53	18.75	47.06	26.00	7.66	3211
10	1.50	0.5	-1	M_c^{min}	BSE	BSE	BSE	0.49	20.49	44.34	25.94	8.73	3435
11	3.00	0.5	1	M_c^{min}	BSE	BSE	BSE	0.40	13.45	51.40	24.19	10.59	4477
12	3.00	0.5	-1	M_c^{min}	BSE	BSE	BSE	0.36	14.83	49.03	24.00	11.78	4746
13	0.75	0.5	1	M_c^{min}	BSE	1.5	3.2	15.28	17.03	15.88	20.39	31.43	5145
14	0.75	0.5	-1	M_c^{min}	BSE	1.5	3.2	14.84	17.98	15.45	20.65	31.08	5289
15	1.50	0.5	1	M_c^{min}	BSE	1.5	3.2	13.25	14.77	20.05	23.37	28.56	5931
16	1.50	0.5	-1	M_c^{min}	BSE	1.5	3.2	12.85	15.56	19.44	23.60	28.56	6111
17	3.00	0.5	1	M_c^{min}	BSE	1.5	3.2	12.64	14.09	27.25	24.18	21.83	6111
18	3.00	0.5	-1	M_c^{min}	BSE	1.5	3.2	12.21	14.79	26.41	24.23	22.36	6430
19	0.75	0.5	1	M_c^{min}	0.5	1.5	3.2	24.18	15.18	16.36	12.54	31.74	3900
20	0.75	0.5	-1	M_c^{min}	0.5	1.5	3.2	17.78	17.36	13.78	17.15	33.93	4798
21	1.50	0.5	1	M_c^{min}	0.5	1.5	3.2	19.23	12.07	19.94	14.45	34.31	4905
22	1.50	0.5	-1	M_c^{min}	0.5	1.5	3.2	14.79	14.44	17.46	21.50	31.81	5768
23	3.00	0.5	1	M_c^{min}	0.5	1.5	3.2	16.81	10.55	26.40	16.88	29.35	5609
24	3.00	0.5	-1	M_c^{min}	0.5	1.5	3.2	13.46	13.15	23.97	23.28	26.15	6337
25	0.75	0.5	1	M_c^{tip}	0.5	1.5	3.2	18.29	20.19	1.03	19.65	40.84	3012
26	0.75	0.5	-1	M_c^{tip}	0.5	1.5	3.2	11.77	23.58	1.40	23.30	39.95	3867
27	1.50	0.5	1	M_c^{tip}	0.5	1.5	3.2	13.53	14.93	9.11	22.99	39.43	4071
28	1.50	0.5	-1	M_c^{tip}	0.5	1.5	3.2	9.07	18.19	7.98	30.69	34.08	5015
29	3.00	0.5	1	M_c^{tip}	0.5	1.5	3.2	11.59	12.79	18.41	24.88	32.33	4754
30	3.00	0.5	-1	M_c^{tip}	0.5	1.5	3.2	8.18	16.39	16.41	32.23	26.78	5563
31	0.75	0.5	1	M_c^{tip}	BSE	1.5	3.2	8.34	20.84	5.00	32.49	33.33	4198
32	0.75	0.5	-1	M_c^{tip}	BSE	1.5	3.2	8.01	22.00	4.82	32.53	32.65	4359
33	1.50	0.5	1	M_c^{tip}	BSE	1.5	3.2	6.84	17.10	11.37	36.54	28.16	5118
34	1.50	0.5	-1	M_c^{tip}	BSE	1.5	3.2	6.55	18.00	10.90	36.69	27.87	5329
35	3.00	0.5	1	M_c^{tip}	BSE	1.5	3.2	6.60	16.49	20.51	37.71	18.70	5306
36	3.00	0.5	-1	M_c^{tip}	BSE	1.5	3.2	6.28	17.26	19.66	37.53	19.26	5555
37	0.75	0.5	1	M_c^{tip}	0.5	BSE	BSE	1.66	64.30	6.05	25.11	2.87	661
38	0.75	0.5	-1	M_c^{tip}	0.5	BSE	BSE	0.69	63.97	4.34	27.54	3.46	1013
39	1.50	0.5	1	M_c^{tip}	0.5	BSE	BSE	0.83	31.98	40.86	23.70	2.63	1329
40	1.50	0.5	-1	M_c^{tip}	0.5	BSE	BSE	0.29	26.78	23.51	39.46	9.96	2420
41	3.00	0.5	1	M_c^{tip}	0.5	BSE	BSE	0.45	17.31	54.09	21.67	6.48	2455
42	3.00	0.5	-1	M_c^{tip}	0.5	BSE	BSE	0.18	16.59	35.47	34.09	13.67	3907

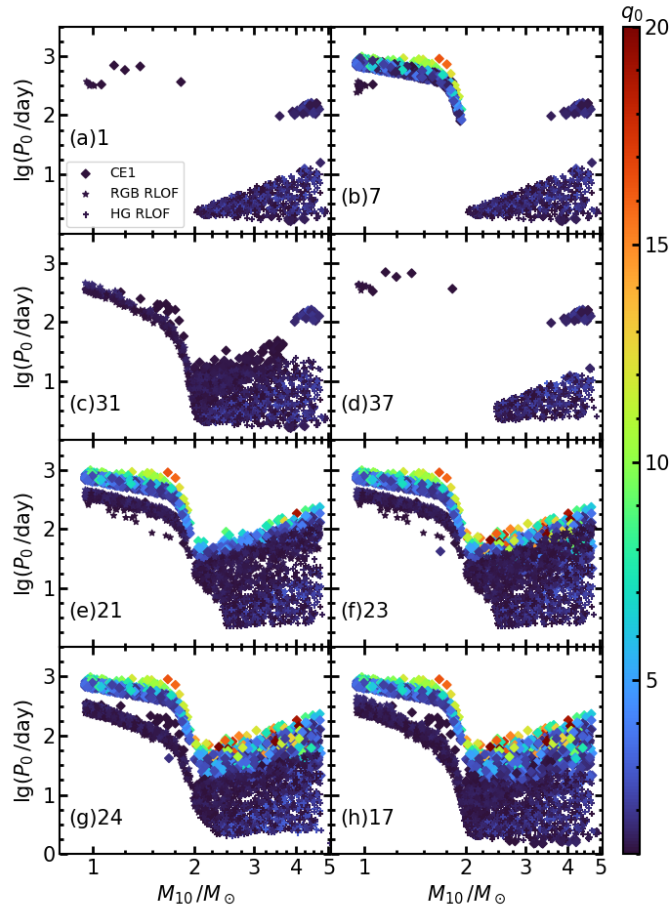


图 2 不同通道形成 sdB 星的主星初始质量 M_{10} 与初始轨道周期 $\lg P$ 分布。棱形表示通过 CE 抛射通道；加号以及星号表示稳定的 RLOF 通道；颜色棒表示主星和伴星的初始质量比。

模型 24 不所得到的轨道周期分布与长周期 sdB 星的观测数据并不相符。而模型 1、模型 31 以及模型 37 的轨道周期分布与短周期 sdB 星的观测数据也符合的不好。模型 17 所产生的长周期和短周期 sdB 星的轨道周期分布都能够和观测相符，因此我们选择模型 17 为最佳模型。

为了更好的验证模型 17，在图 4 中我们将得到的 sdB 星的轨道周期 $\lg P$ 以及伴星最小质量 $M_{2\min}$ 分布和观测数据进行了对比 [28, 36--40]。对于伴星最小质量，我们参考 Drew Clausen 等人 [27] 的方法，通过 $M_2 \sin^3 i$ 计算得到，其轨道倾角 i 选择 $0 \sim 90$ 度之间的随机分布值。从图 4 可以看到，模型 1、模型 31 以及模型 37 并不能满足观测数据的周期分布特征；对于通过第一次 CE 抛射通道得到的主序星伴星而言，模型 7 与主序星的观测数据周期分布也不符；另外，第二次 CE 抛射通道得到的白矮星伴星表明较小的 CE 抛射系数并不能产生和观测数据相符的轨道周期分布。我们结合图 3 中得到的结论，充分表明模型 17 可

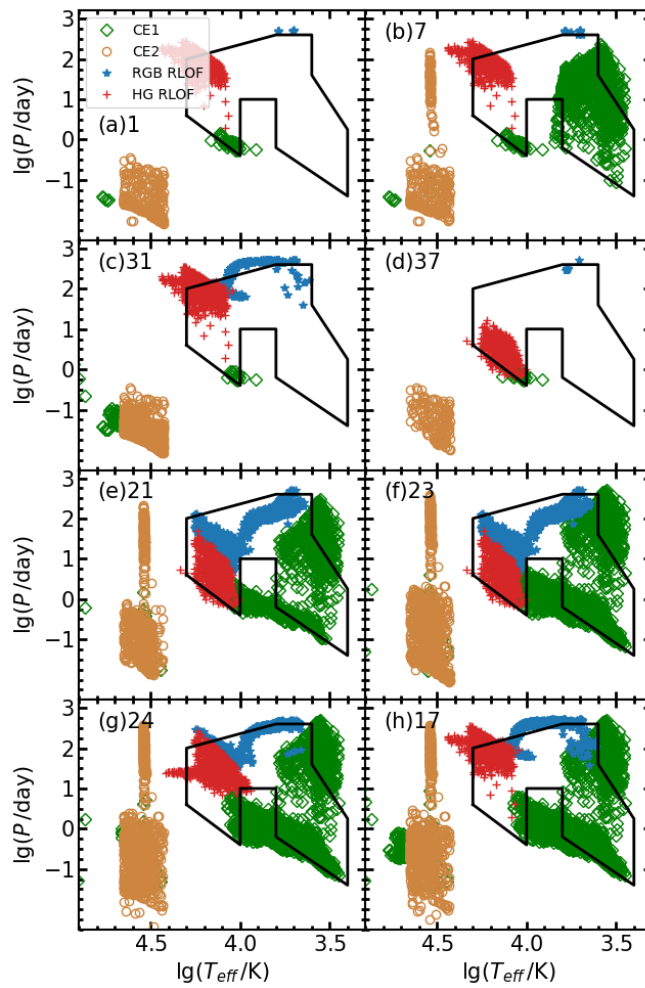


图 3 不同通道形成的 sdB 星伴星有效温度 $\lg T_{\text{eff}}$ 与轨道周期 $\lg P$ 分布。绿色菱形和橙色圆圈分别表示通过第一次 CE 抛射通道和第二次 CE 抛射通道，红色加号以及蓝色星型分别表示赫氏空隙和红巨星阶段稳定的 RLOF 通道。黑色实线框给出的是 Han 等人^[14]给出的伴星为主序星分布。

以作为最佳模型。

在图 5 中我们还将所得到的结果和观测数据给出的 sdB 星的有效温度 T_{eff} 和重力加速度的 $\log g$ 分布进行了对比。由于我们在 BSE 中统计数据时仅取了形成 sdB 星的初始点，其并不能准确体现 $T_{\text{eff}}\text{-}\log g$ 分布范围。因此我们给出了不同质量的 sdB 星在 $T_{\text{eff}}\text{-}\log g$ 图上的整个演化轨迹，并将它们的演化轨迹和观测数据做了比较。从图 5 可以看出，sdB 星在 $T_{\text{eff}}\text{-}\log g$ 图上的演化轨迹明显具有更高的有效温度和更大的重力加速度。这是由于 BSE 并不能给出真正意义的 sdB 星，而是将没有氢壳层的氦主序星作为 sdB 星导致的。

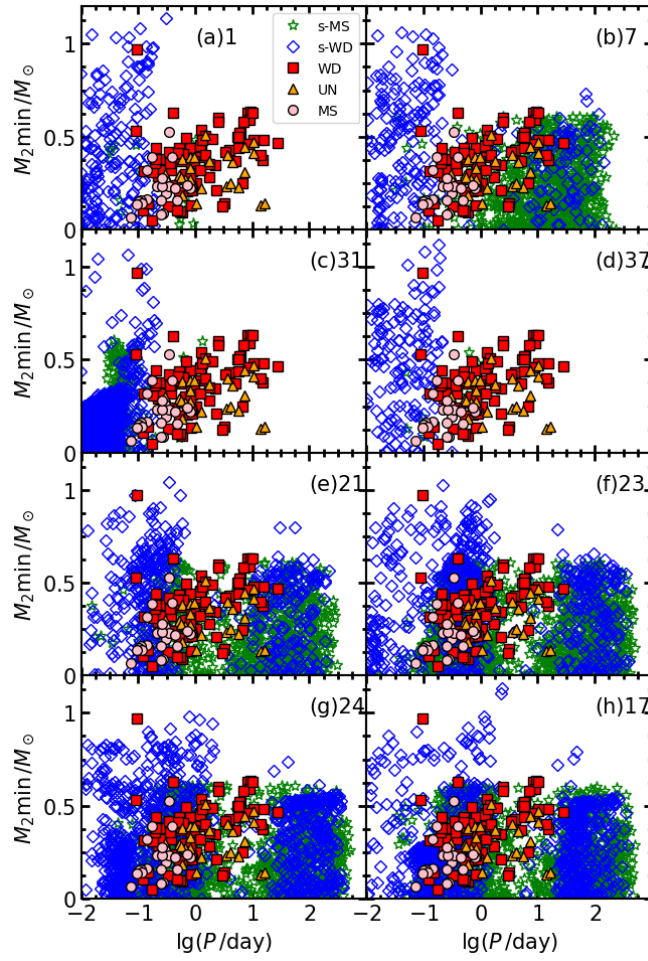


图 4 通过稳定的 RLOF 传质和 CE 通道形成 sdB 星的伴星轨道周期 $\lg P$ 与最小质量 $M_{2\min}$ 分布。蓝色的菱形与绿色的星型分别表示我们模拟的白矮星与主序星数据分布；红色的正方形、粉色的圆形以及橙色的三角形分别表示观测到的伴星为白矮星、主序星以及未知类型的数据分布。

3.2 统计分布

图 6 展示了各个模型形成的 sdB 星质量分布。黑色的柱状分布代表所有模型形成的 sdB 星总体质量分布，红色，绿色和蓝色的柱状分布分别展示了稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量分布。在最佳模型 17 中，稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量分布在 $0.32 \sim 0.8M_{\odot}$ 之间，双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量则是分布在 $0.4 \sim 0.65M_{\odot}$ 之间。Han 等人^[14]的结果表明在考虑观测选择效应的条件下通过稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量在 $0.47M_{\odot}$ 有一个明显的峰值，通过双 He-WD 星并合通道形成的 sdB 星质量广泛分布在 $0.4 \sim 0.65M_{\odot}$ 之间，并且平均质量约为 $0.52M_{\odot}$ 。模型 17 可以看出，我们所得到的 sdB 星质量分布可以很好的符合 Han 等人^[14]

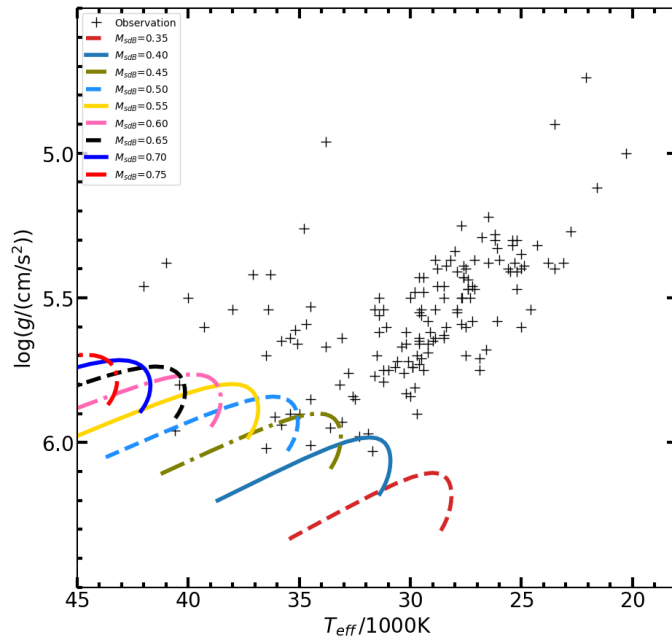


图 5 不同质量的 sdB 星演化轨迹以及观测得到的 sdB 星在 $T_{\text{eff}}\text{-log}g$ 图上的分布。不同线段表示不同质量的 sdB 星演化轨迹，加号表示观测数据分布

的结果。

在图 7 中我们不仅展示了各个模型中所有 sdB 星的总体周期分布，也展示了稳定的 RLOF、第一次 CE 抛射和第二次 CE 抛射通道形成的 sdB 星的周期分布。图 7 中对 CE 抛射通道进行了区分，因为第一次 CE 抛射形成的 sdB 星伴星为主序星，第二次 CE 抛射通道形成的 sdB 星伴星一般为白矮星。另外，一般认为短周期 sdB 星来源于 CE 抛射通道，长周期 sdB 星来源于稳定的 RLOF 通道，为了和观测数据做对比，我们也区分出了稳定的 RLOF 通道。Schaffenroth 等人^[28]在其图 17 中给出了 sdB 星短周期观测数据分布，其伴星为短周期主序星的周期分布在 2 小时到大约 1 天，伴星为白矮星的周期分布在大约 1 小时到 27 天，并且伴星为白矮星的周期在 1 天和 5 ~ 10 天左右分别有一个峰值。Vos 等人^[41]在其图 3 中给出了 sdB 星长周期观测数据分布，其周期大约分布在 400 到 1600 天。我们在图 7 的最佳模型 17 中给出了 sdB 星周期，其基本上可以符合他们观测数据中的周期分布。

4 讨论与总结

4.1 讨论

通过 BSE 得到的 sdB 星由于其算法本身存在的缺陷，因此并不能完全模拟出 sdB 星的所有特征。另外，由于观测效应的影响，目前已知的长轨道周期 sdB 星数量很少。对此我们

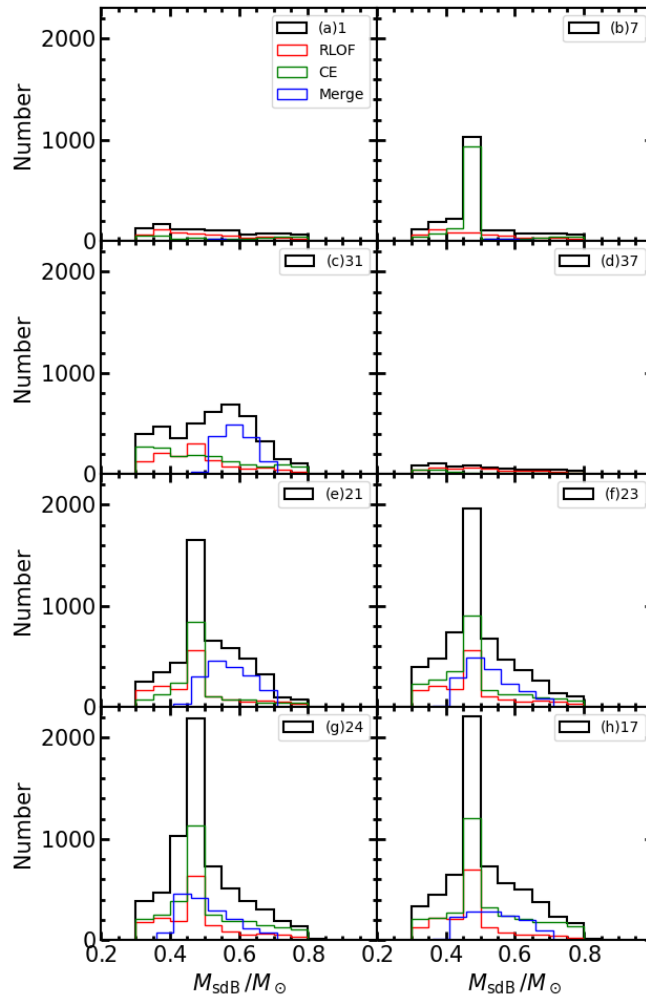


图 6 不同模型中形成的 sdB 星质量 M_{sdB} 分布, 红色的柱状分布表示稳定的 RLOF 通道形成的 sdB 星质量分布, 绿色的柱状分布表示 CE 抛射通道形成的 sdB 星质量分布, 蓝色的柱状分布表示双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星质量分布。黑色的柱状分布表示稳定的 RLOF、CE 抛射和双 He-WD 并合通道形成的 sdB 星整体质量分布。

进行以下几点讨论:

(1) 在 BSE 中我们将没有氢壳层的氦主序星作为 sdB 星。从图 5 可以看出, 这种没有氢壳层的 sdB 星导致其演化轨迹位于有效温度更高、重力加速度更大的位置, 而观测数据由于氢壳层的存在则是分布在有效温度更低、重力加速度更小的位置。我们将 BSE 得到的 sdB 星与 Han 等人^[3]图 2 中没有氢壳层的结果进行了相关比较, 如果考虑一个较小质量的氢壳层, 我们得到的结果能够和观测上给出的 sdB 星有效温度与重力加速分布相符。另外这种没有氢壳层的 sdB 星并不影响我们对质量、周期等分布的研究结果。

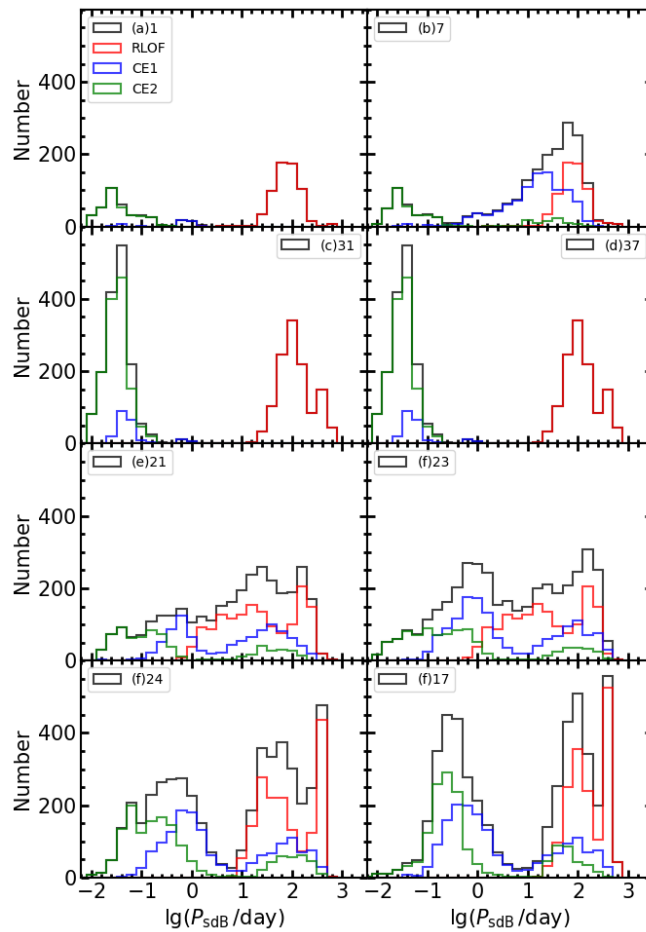


图 7 不同模型中形成的 sdB 星周期 $\lg P_{\text{sdB}}$ 分布。红色的柱状分布表示稳定的 RLOF 通道形成的 sdB 星周期分布，蓝色和绿色的柱状分布分别表示第一次 CE 抛射 (CE1) 和第二次 CE 抛射 (CE2) 通道形成的 sdB 星周期分布。黑色的柱状分布表示稳定的 RLOF、第一次 CE 抛射和第二次 CE 抛射通道形成的 sdB 星整体周期分布。

(2) 从图 7 的最佳模型 17 可以看出 BSE 中通过稳定的 RLOF 通道得到的 sdB 星周期都小于 1000 天，而 Vos 等人^[41] 观测数据表明目前观测到的长周期 sdB 星的周期达到了将近 1600 天。一方面由于 BSE 并不能详细计算物质转移过程，另一方面观测到的长周期 sdB 星样本较少，因此我们仅给出了更加符合稳定的 RLOF 通道形成 sdB 星的周期分布模型。此外，Chen 认为发生稳定的 RLOF 之前红巨星可能会首先发生大气层的物质转移，在这种情况下 sdB 星的轨道周期将会增加大概 10%。我们在 sdB 星的演化过程中并未考虑这种机制带来的影响，这有可能使得我们得到了一个偏小的轨道周期。

4.2 总结

我们通过修改 BSE 成功给出了双星中稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并合三种通道形成 sdB 星的参数空间分布, 并将我们所得的演化数据和观测数据进行了对比, 其总结如下:

(1) 修改 BSE 可以实现双星中稳定的 RLOF、CE 抛射以及双 He-WD 并合通道形成 sdB 星的演化。

(2) 通过 BSE 得到的 sdB 星有效温度 T_{eff} 分布在 25000 ~ 45000K 之间, 重力加速度 $\log g$ 分布在 5.5 ~ 6.5 cm/s^2 之间。考虑一个较小质量的氢壳层, 我们得到的结果能够和观测上给出的 sdB 星有效温度与重力加速分布相符。

(3) sdB 星的质量分布在 0.32 ~ 0.8 M_{\odot} 之间。其中, 稳定的 RLOF 和 CE 抛射通道形成的 sdB 星在 0.47 M_{\odot} 有一个明显峰值, 双 He-WD 并合形成的 sdB 星平均质量约为 0.52 M_{\odot} , 其质量分布和前人的研究结果符合的很好。

(4) 我们的最佳模型 17 给出的 sdB 星伴星为白矮星和主序星的轨道周期分布也能够和观测给出的结果相符合。

参考文献:

- [1] Heber U. *ARA&A*, 2009, 47(1): 211
- [2] Heber U. *PASP*, 2016, 128(966): 082001
- [3] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. *MNRAS*, 2002, 336(2): 449
- [4] Dale D A, Gil de Paz A, Gordon K D, et al. *ApJ*, 2007, 655(2): 863
- [5] Zhang F, Li L, Zhang Y, et al. *MNRAS*, 2012, 421(1): 743
- [6] Zhang F, Li L, Han Z, et al. *MNRAS*, 2013, 428(4): 3390
- [7] Kupfer T, Ramsay G, van Roestel J, et al. *ApJ*, 2017, 851(1): 28
- [8] Ferguson D H, Green R F, Liebert J. *ApJ*, 1984, 287: 320
- [9] Allard F, Wesemael F, Fontaine G, et al. *AJ*, 1994, 107: 1565
- [10] Thejll P, Ulla A, MacDonald J. *A&A*, 1995, 303: 773
- [11] Ulla A, Thejll P. *A&AS*, 1998, 132: 1
- [12] Aznar Cuadrado R, Jeffery C S. *A&A*, 2001, 368: 994
- [13] Pelisoli I, Vos J, Geier S, et al. *A&A*, 2020, 642: A180
- [14] Han Z, Podsiadlowski P, Maxted P F L, et al. *MNRAS*, 2003, 341(2): 669
- [15] Yu S, Li L. *A&A*, 2009, 503(1): 151
- [16] Hernández-Pérez F, Bruzual G. *MNRAS*, 2013, 431(3): 2612
- [17] Vos J, Vučković M, Chen X, et al. *MNRAS*, 2019, 482(4): 4592
- [18] Vos J, Bobrick A, Vučković M. *A&A*, 2020, 641: A163
- [19] Xiong H, Chen X, Podsiadlowski P, et al. *A&A*, 2017, 599: A54
- [20] Kramer M, Schneider F R N, Ohlmann S T, et al. *A&A*, 2020, 642: A97
- [21] Webbink R F. *ApJ*, 1984, 277: 355
- [22] Iben J, ICKO. *ApJ*, 1990, 353: 215
- [23] Saio H, Jeffery C S. *MNRAS*, 2000, 313(4): 671
- [24] Zhang X, Jeffery C S. *MNRAS*, 2012, 419(1): 452
- [25] Vos J, Pelisoli I, Budaj J, et al. *A&A*, 2021, 655: A43

- [26] Iben J, ICKO, Tutukov A V. ApJ, 1986, 311: 753
 [27] Clausen D, Wade R A, Kopparapu R K, et al. ApJ, 2012, 746(2): 186
 [28] Schafferoth V, Pelisoli I, Barlow B N, et al. A&A, 2022, 666: A182
 [29] Hurley J R, Tout C A, Pols O R. MNRAS, 2002, 329(4): 897
 [30] Hurley J R, Pols O R, Tout C A. MNRAS, 2000, 315(3): 543
 [31] D’Cruz N L, Dorman B, Rood R T, et al. ApJ, 1996, 466: 359
 [32] Miller G E, Scalo J M. ApJ, 1979, 41: 513
 [33] Mazeh T, Goldberg D, Duquennoy A, et al. ApJ, 1992, 401: 265
 [34] Shatsky N, Tokovinin A. A&A, 2002, 382: 92
 [35] Han Z, Podsiadlowski P, Eggleton P P. MNRAS, 1995, 272(4): 800
 [36] Maxted P F L, Heber U, Marsh T R, et al. MNRAS, 2001, 326(4): 1391
 [37] Morales-Rueda L, Maxted P F L, Marsh T R, et al. MNRAS, 2003, 338(3): 752
 [38] Copperwheat C M, Morales-Rueda L, Marsh T R, et al. MNRAS, 2011, 415(2): 1381
 [39] Kupfer T, Geier S, Heber U, et al. A&A, 2015, 576: A44
 [40] Schafferoth V, Barlow B N, Pelisoli I, et al. A&A, 2023, 673: A90
 [41] Vos J, Vučković M, Chen X, et al. MNRAS, 2019, 482(4): 4592

Study of hot subdwarf-B stars by the BSE algorithm

WANG Xiao-gang^{1,2}, ZHANG Feng-hui^{1,3,4}

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, 650216, PR China 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, PR China 3. Key Laboratory for structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Science, Kunming 650216, PR China 4. International Centre of Supernovae, Yunnan Key Laboratory, Kunming 650216, PR China)

Abstract: Hot subdwarf-B stars are generally considered to be helium-core-burning stars with extremely thin hydrogen envelopes. At least half of hot subdwarf-B stars are observationally found to be in dense close binary systems, which are generally believed to result from binary interactions. The parameter space for the formation of hot subdwarf-B stars from the stable Roche lobe overflow, common-envelope ejection, and double helium white dwarf merger channels is calculated by modifying the fast binary evolution algorithm. The mass distribution of hot subdwarf-B stars formed by the stable Roche lobe overflow and the common envelope ejection channel ranges between $0.32 \sim 0.8 M_{\odot}$, with a clear peak near $0.47 M_{\odot}$. The mass distribution of hot subdwarf-B stars formed by double helium white dwarfs merger channel ranges between $0.4 \sim 0.65 M_{\odot}$, with an average mass of about $0.52 M_{\odot}$. The orbital period distributions of both short-period and long-period hot subdwarf-B stars binary system tracks obtained from the simulations are able to match the observational data.

Key words: hot subdwarf-B stars; periods; mass