

## 宽黑洞双星如 Gaia BH1 形成的三重情景

A. GENEROZOV <sup>1</sup> AND H. B. PERETS <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technion - Israel Institute of Technology  
Haifa, 3200003, Israel

Submitted to ApJ

### 摘要

最近, 在盖亚数据中识别出几个非相互作用的黑洞-恒星双星系统。例如, Gaia BH1 中, 一个类似太阳的恒星围绕着一个黑洞以中等偏心率 ( $e=0.44$ ), 185 天轨道运行。这种轨道通过双星演化很难解释。当前的分离距离表明原初系统可能经历过共同包层阶段, 但共同包层应该将周期缩短到观测到的值以下。由于大多数大质量恒星形成于更高多重性系统中, 黑洞双星的前身更可能是三级演化的结果。这里我们展示这种系统确实可以通过在分层三级系统的演化过程中更容易地得到解释。von Zeipel-Lidov-Kozai 振荡或不稳定性可以推迟三级系统内部双星共同包层阶段的开始, 因此当它开始时黑洞前身和低质量恒星之间的分离更大, 导致更宽的双星形成。还有一些具有相似周期但偏心率更大的系统, 在这些系统中, 黑洞前身是三级系统内部分合并的结果。这样的合并导致了更为顶部沉重的黑洞质量函数。

*Keywords:* 二进制系统: 一般 - 黑洞物理学 - 恒星: 演化 - 恒星: 黑洞

### 1. 介绍

大约每千颗恒星中就有一颗会在其生命结束时变成黑洞(BH)。这意味着像银河系这样的星系应该包含约  $10^8$  个黑洞。然而, 我们只知道银河系中有大约一百个黑洞系统, 主要是通过研究 X 射线双星 (Corral-Santana et al. 2016; Fortin et al. 2023) 而得知的, 这只能识别近距离且相互作用的系统。

微透镜 (Lam et al. 2022; Mróz et al. 2022; Sahu et al. 2022)、光谱学 (Shenar et al. 2022) 和天体测量学 (Andrews et al. 2022; Shahaf et al. 2023) 可以用于识别孤立的黑洞或非相互作用的双星系统。这类系统探测了比 X 射线双星更广泛参数空间内的高质量

双星演化, 为黑洞诞生时的反冲速度分布和共同包层物理提供了重要的限制条件。

盖亚 DR3 包含了一些  $\times 10^5$  双星轨道解 (Gaia Collaboration et al. 2023a,b), 这促使了对天体测量黑洞双星 (Andrews et al. 2022; Shahaf et al. 2023; Chakrabarti et al. 2023; El-Badry et al. 2023a,b) 的搜索。迄今为止, 已经识别出两个明确的恒星-黑洞双星: 盖亚 BH1 和盖亚 BH2。盖亚 BH1 包含一颗 G 型主序星, 在一个 185.5 天的轨道上绕着一个  $9.32_{-0.21}^{+0.22} M_{\odot}$  黑洞运行。这颗恒星的轨道是中等偏心率,  $e = 0.44$  (Chakrabarti et al. 2023; El-Badry et al. 2023a)。Gaia BH2 包含一颗红巨星, 这颗红巨星围绕一个  $8.94 \pm 0.34 M_{\odot}$  黑洞运行, 轨道周期为 1276.7 天。这颗恒星的轨道也相当偏心, 偏心率为  $e = 0.52$  (El-Badry et al. 2023b)。轨道周期和偏心率的不确定性远小于 1%。

这些系统对孤立双星演化模型提出了挑战。一方面，当前的分离距离表明原初系统可能经历了共同包层演化的阶段。另一方面，一个共同包层会将双星周期缩短到低于观测值的程度。这种紧张关系可以通过引入异常大的共同包层效率 (Gaia BH1 为  $\alpha \approx 5$ ; El-Badry et al. 2023a) 来解决，或者假设黑洞的前身非常巨大以至于完全避免了红巨星阶段 (因此也避开了共同包层) (El-Badry et al. 2023b)。

在任何情况下，孤立的双星系统不是前体系统的最可能初始配置。至少 55% 的 O 型恒星主星有两个或更多伴星，其质量比为  $q \geq 0.1$  (Moe & Di Stefano 2017)。三合星中的恒星演化可能会导致各种新颖的演化通道，并产生不同类型双星和合并产物 (e.g. Perets & Fabrycky 2009; Perets & Kratter 2012; Antognini et al. 2014; Michaely & Perets 2014; Naoz 2016; Antonini et al. 2017; Rose et al. 2019; Toonen et al. 2020; Stegmann et al. 2022; Hamers et al. 2022; Toonen et al. 2022; Kummer et al. 2023; Shariat et al. 2023)。受此观察结果启发，我们检查了三合星演化是否能重现 Gaia 黑洞双星。我们发现，即使对于正常的共同包层效率 ( $\alpha = 1$ )，三合星也能再现 Gaia BH1 的观测周期和偏心率。

本文的其余部分组织如下。在 § 2 中，我们讨论了初始条件和演化三重星系统的程序。在 § 3 中，我们展示了我们对三重星系统合成的结果，并将其与双星系统合成的结果进行比较。在 § 4 中，我们讨论了形成率。在 § 5 中我们讨论了替代形成场景。我们在 § 6 中进行了总结。

## 2. 方法

### 2.1. 初始条件

我们使用从 Moe & Di Stefano (2017) 到初始化三元组的多个属性的经验分布，并进行了如下修改。

在 Gaia BH1 中的黑洞前身是  $\geq 20M_{\odot}$ ，而其伴星为  $0.93M_{\odot}$ 。因此，初始质量比为  $\lesssim 0.05$ 。对于如此低的质量比，双星属性的分布不受 Moe & Di Stefano (2017) 的约束。在这里，我们从他们的工作中推导出折线质量比分布，并延伸至褐矮星边界。这种外推影响了伴星周期的分布，如图 1 所示。

为了生成三元组，我们遵循以下程序：

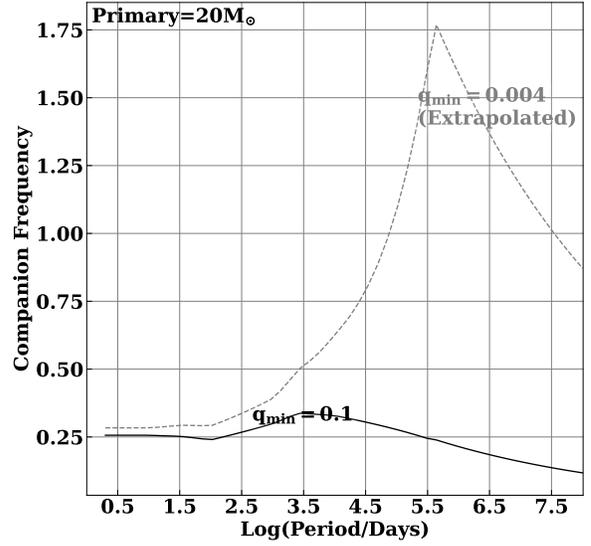


图 1. 实线黑线表示主星为  $20M_{\odot}$  时的伴星频率 (每十年轨道周期) 来自 Moe & Di Stefano (2017)。虚线灰色线显示了外推到棕矮星极限的伴星频率。

1. 我们在 18 和  $150 M_{\odot}$  之间绘制了一个主要质量，该质量来自一个  $m^{-2.3}$  分布 (对应于 Kroupa 或 Salpeter 质量函数)。
2. 然后我们从其伴星频率分布 (通过外推到较低的质量比来修改; 参见图 1) 为这个主质量生成两个伴星周期，步骤如下
  - (a) 我们首先生成周期的对数间隔箱。每个箱中的伴星概率是伴星频率乘以箱宽。
  - (b) 我们为每个区间 (从最短周期开始) 生成一个介于 0 和 1 之间的随机数。如果这个数字小于伴星概率，我们在该区间内生成一颗伴星 (其周期从对数均匀分布中抽取)。
  - (c) 同伴的离心率遵循 Moe & Di Stefano (2017) 中的分布。<sup>1</sup> 质量比是从外推的质量比分布中抽取的。

<sup>1</sup> 我们在最大偏心率的 80%， $1 - \left(\frac{\text{Period}}{2\text{days}}\right)^{-2/3}$ ，处包含一个转换点以确保偏心率分布是连续的。

(d) 我们继续直到得到一个三元组。为了简单起见, 在本研究中我们不允许出现四元组或更高阶的多重项。

为了形成类似盖亚黑洞的双星系统, 原初系统必须包含一颗低质量恒星。因此, 我们需要次星或第三星的质量在  $0.5$  到  $2 M_{\odot}$  之间。最后, 我们只考虑满足 (Mardling & Aarseth 2001) 稳定性标准的三体系统。

生成的三体系统初始轨道特性分布如图 2 所示。

## 2.2. 三重演化

我们使用 MSE (Hamers et al. 2021) 演化生成的三体系统。MSE 模型描述了层级多星系统 (双星、三星、四星或更高阶多重星) 的演化过程, 考虑了恒星之间的引力和双星相互作用以及恒星自身的演化。代码会根据系统的配置自动在求解长期运动方程和直接 N 体积分之间切换。因此 MSE 可以模拟演化的稳定和不安定阶段及其相关现象 (例如碰撞、逃逸、交换; 参见 Toonen et al. 2020, 2022 三星演化的概述)。

我们将每个系统演化的时间设定在 10 百万年到 10 十亿年之间 (隐含假设恒星形成速率是恒定的)。我们更新了 MSE 中的恒星风、遗迹质量和超新星踢出速度模型, 这些模型之前遵循的是 BSE (Hurley et al. 2002), 有些过时了, 现在更新为与 El-Badry et al. (2023a) 中的一致。经过这些更新后, 单颗恒星的演化在更新后的 MSE 和那里使用的双星种群综合代码 COSMIC (Breivik et al. 2020) 之间保持一致 (在百分之几的水平上)。<sup>2</sup>

作为对照, 我们还单独演化了通过 § 2 过程生成的双星系统。在可能的情况下, 我们将二进制和恒星演化的参数与之前使用 COSMIC 研究 Gaia BH1 (El-Badry et al. 2023a) 的研究相匹配。

在二元演化处理方面, MSE 和 COSMIC 之间存在一些差异, 这些差异不容易消除。例如, COSMIC 对于不稳定质量转移的开始有不同的规定。另一方面, MSE 有关于偏心质量转移的规定, 而这些规定在 COSMIC 中没有 (特别是 Hamers & Dosopoulou

2019 规定, 该规定从圆形轨道的质量连续转移平滑过渡到高偏心率轨道近日点处的质量瞬时转移)。

在这项工作中, 我们将共同包络效率 ( $\alpha$ ) 简单地设定为 1 或 5。我们还使用了来自 Fryer et al. (2012) 的回退调制踢处方。相比之下, 在 El-Badry et al. (2023a) 中, 共同包络效率和踢幅值是自由参数。对于每组参数, 我们初始化  $\sim 5 \times 10^5$  系统。

MSE 不适当地处理了共同包络阶段的超新星事件, 我们过滤掉了这类系统。这种情况仅发生在初始主序星为  $\sim 20 M_{\odot}$  的参数空间狭窄区域内, 并且在 AGB 阶段经历了共同包络。这样的主序星会形成  $\sim 3 M_{\odot}$  的黑洞。此过滤器不会影响我们关于 Gaia 类似黑洞系统的形成的结论或整体的黑洞双星形成。

## 3. 结果

图 3 的上部面板显示了最终进入黑洞-主序星双星系统 (周期为  $< 1300$  天) 的恒星的初始周期和偏心率, 这些系统经历了三体演化。图 4 和图 5 的上左面板显示了这些系统的最终黑洞质量和偏心率。上右面板显示了作为偏心率函数的最终周期。图 4 和图 5 中的双星系统不再以三体形式存在, 但这些系统中的恒星伴星是原初三体系统  $\sim 80\%$  中的第三颗星。图 3、图 4 和图 5 的底部面板显示了孤立演化双星的不同分布。

对于低共包络效率 ( $\alpha = 1$ ), 双星演化无法产生周期为  $\gtrsim 100$  天和中等偏心率 ( $e \lesssim 0.7$ ) 的系统, 如 Gaia BH1。另一方面, 三体演化可以产生这样的系统。

Gaia BH1 类系统由初始的主星和次星通过共同包层阶段形成。(我们定义一个 Gaia BH1 类系统为离心率在观测值的  $2/3$  到  $3/2$  倍之间, 而黑洞质量、次星质量和周期则在观测值的一半到两倍之间的系统。) 在双星中, 在共同包层之前, 分离度仅因恒星风的质量损失 (保持恒定的离心率) 而演化。因此, 共同包层发生在巨星阶段的开始。之后, 由于巨星质量损失, 分离度增加的速度远快于其半径的增大。在三体系统中, 次级星的离心率可以通过 von Zeipel-Kozai-Lidov 效应 (Kozai 1962; Lidov 1962; Naoz 2016) 演化。因此, 在某些情况下, 离心率可以在巨星阶段开始时减小, 然后再次增加, 使得共同包层发生在低质量恒星和黑洞前身之间分离度更大的时候,

<sup>2</sup> 更新后的代码可在 <https://github.com/alekseygenerozov/mse> 获取。请参见 Update\_winds 分支。

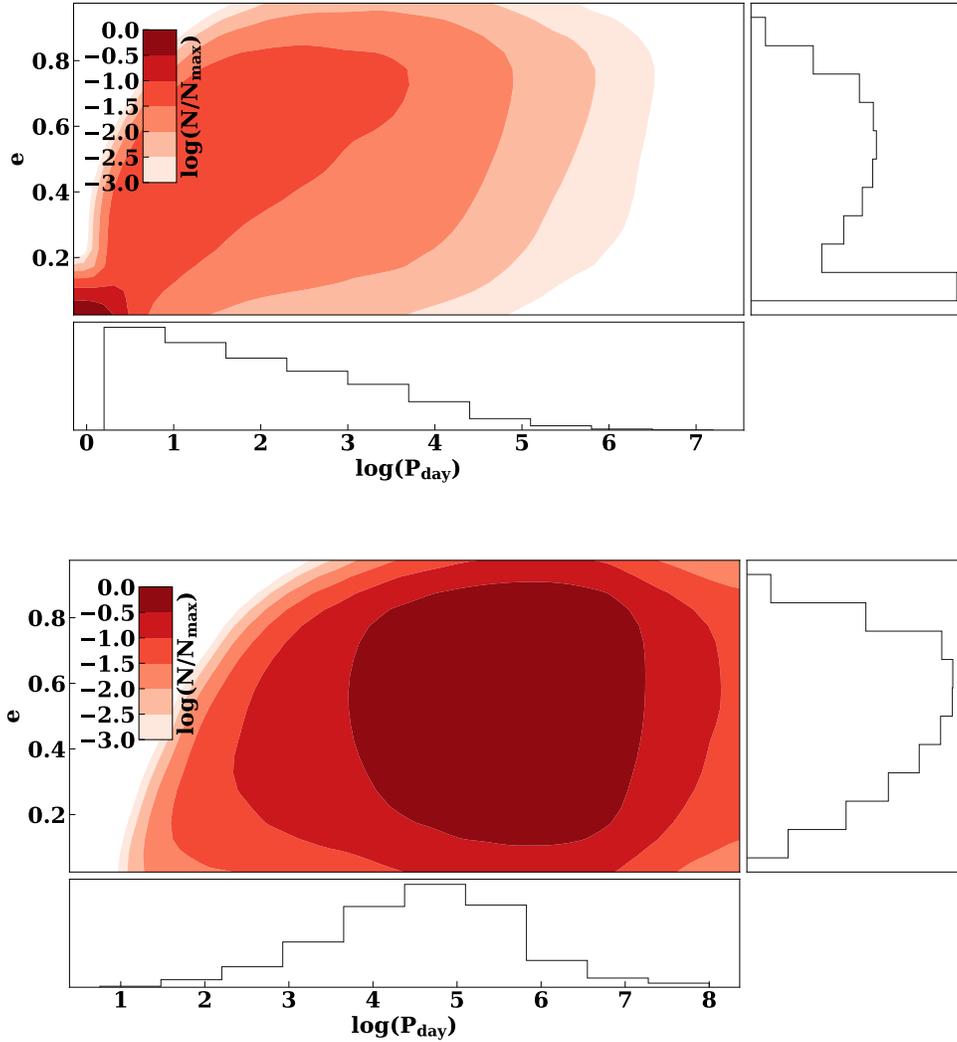


图 2. 初始三体系统内轨道（上）和外轨道（下）的半长轴及偏心率分布。这些分布基于 (Moe & Di Stefano 2017) (详见正文)。内部双星系统的半长轴分布比对数均匀更陡峭，主要是由于 Mardling & Aarseth (2001) 稳定性标准。

如图 6、7 和 8 所示。此外，恒星演化和质量损失可以引发并改变这种长期演化 (Perets & Kratter 2012; Michaely & Perets 2014)。或者，次级星的离心率可以通过三体演化动力学不稳定性 (TEDI) (Perets & Kratter 2012; Michaely & Perets 2014; Toonen et al. 2020; Hamers et al. 2022) 激发。在这种情况下，随着系统由于恒星演化而变得不太分层，恒星离心率被激发。这种类型的演化在图 9 中显示。<sup>3</sup>

<sup>3</sup> 图 8 至 图 10 中的例子来自一组独立的模拟，该模拟运行了  $10^7$  年，具有高输出频率以确保轨道数据采样良好。

其他形成渠道可能适用于对 Gaia BH1 类似双星的更广泛定义。例如，允许离心率和其他属性与 Gaia BH1 相差两倍。这种修改后的定义挑选出一个具有离心率  $\geq 0.7$  的独特双星种群。在大多数情况下 (68% 对于  $\alpha = 1$ ; 81% 对于  $\alpha = 5$ )，这样的双星是在内双星中的恒星合并后，再与初始的三级恒星发生共同包层之后形成的。这种演化在图 10 中有所说明。这种行为取决于对高质量恒星半径不确定的规定。事实上，高质量恒星 ( $\geq 50M_{\odot}$ ) 可能不会进入红巨星阶段 (参见 § 5)。确实，已经有人建议三重星系统中的恒星合并可以产生蓝色滞留双星 (Perets & Fabrycky 2009)。

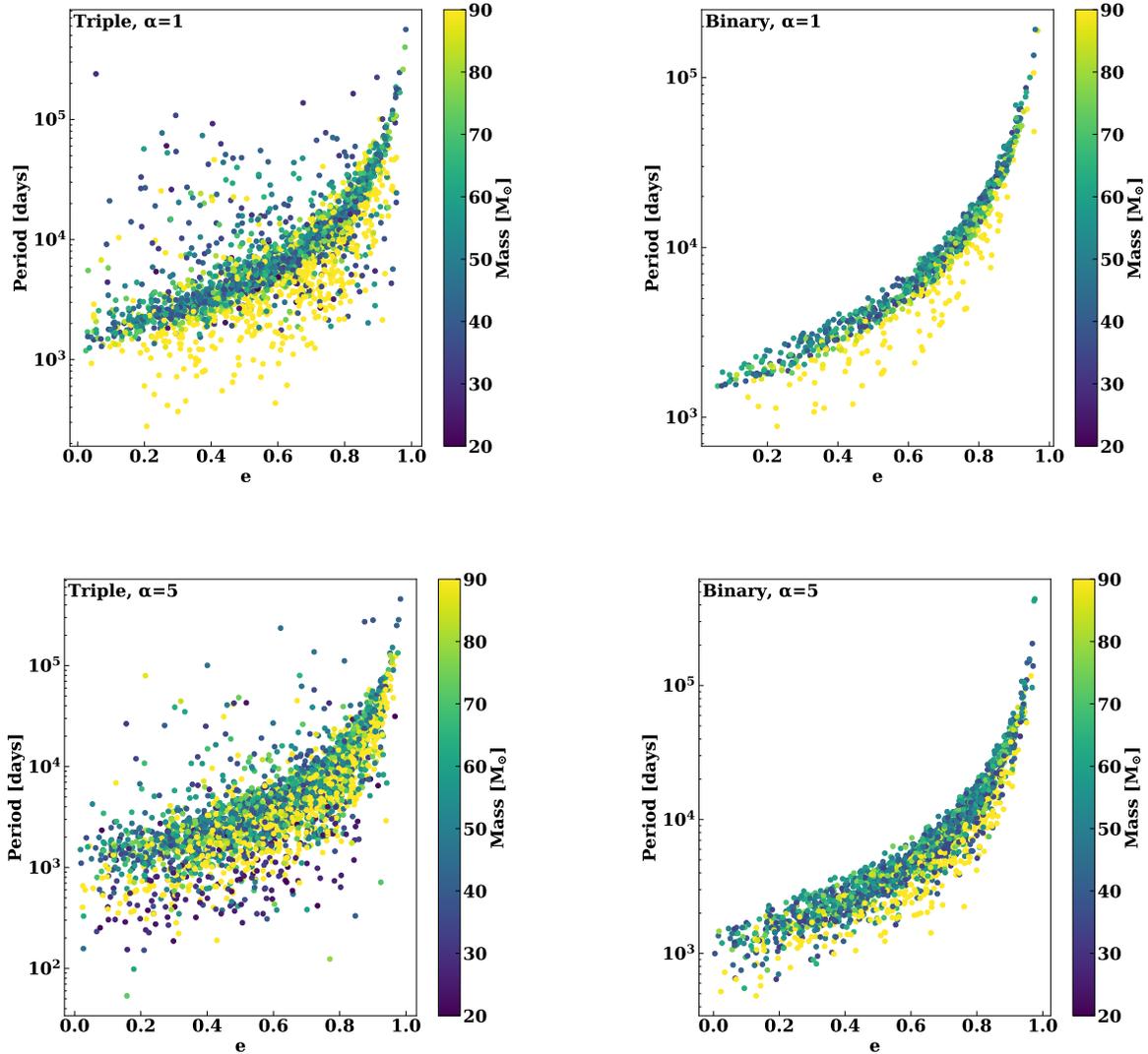


图 3. 初始周期和偏心率对于最终成为黑洞-主序星双星系统中的恒星，周期在三体演化（上）和双星演化（下）后为  $< 1300$  天。对于三体系统，恒星伴星最初 80% 的时间是第三颗星。

Rastello et al. (2023) 提出一种对 Gaia BH1 类似双星系统的替代定义，对其组成成分的质量有更严格的要求。特别地，他们要求黑洞的质量为  $8 - 12M_{\odot}$ ，伴星的质量为  $0.5 - 1.5M_{\odot}$ 。采用这一定义，在  $\alpha = 1$  中仅产生一个类似于 Gaia BH1 的系统。

合并使黑洞质量函数更加偏向高质端。图 11 显示了源自三重星系统和双星系统的黑洞-主序星二元系统的黑洞质量随周期的变化关系。对于双星初始条件，黑洞质量从未超过  $20M_{\odot}$ ，但对于  $\sim 10 - 30\%$  的三重星初始条件则超过了这个阈值。几乎所有拥有质量大于  $20M_{\odot}$  黑洞的主序星系统都有  $\geq 10^4$  天的周

期。产生质量大于  $20M_{\odot}$  的黑洞合并并非由第三颗伴星触发，因为即使移除它也发生这种情况。然而，在双星系统中，合并产物是一颗单独的恒星，因此未被纳入图 11 中的分布。此外，半长轴分布影响了大质量黑洞的生成。对于控制二进制（我们不应用 Mardling & Aarseth 2001 稳定性标准的情况），所有黑洞中只有  $\sim .006\%$  高于  $20M_{\odot}$ ，而对于三体系统这一比例为 3%。

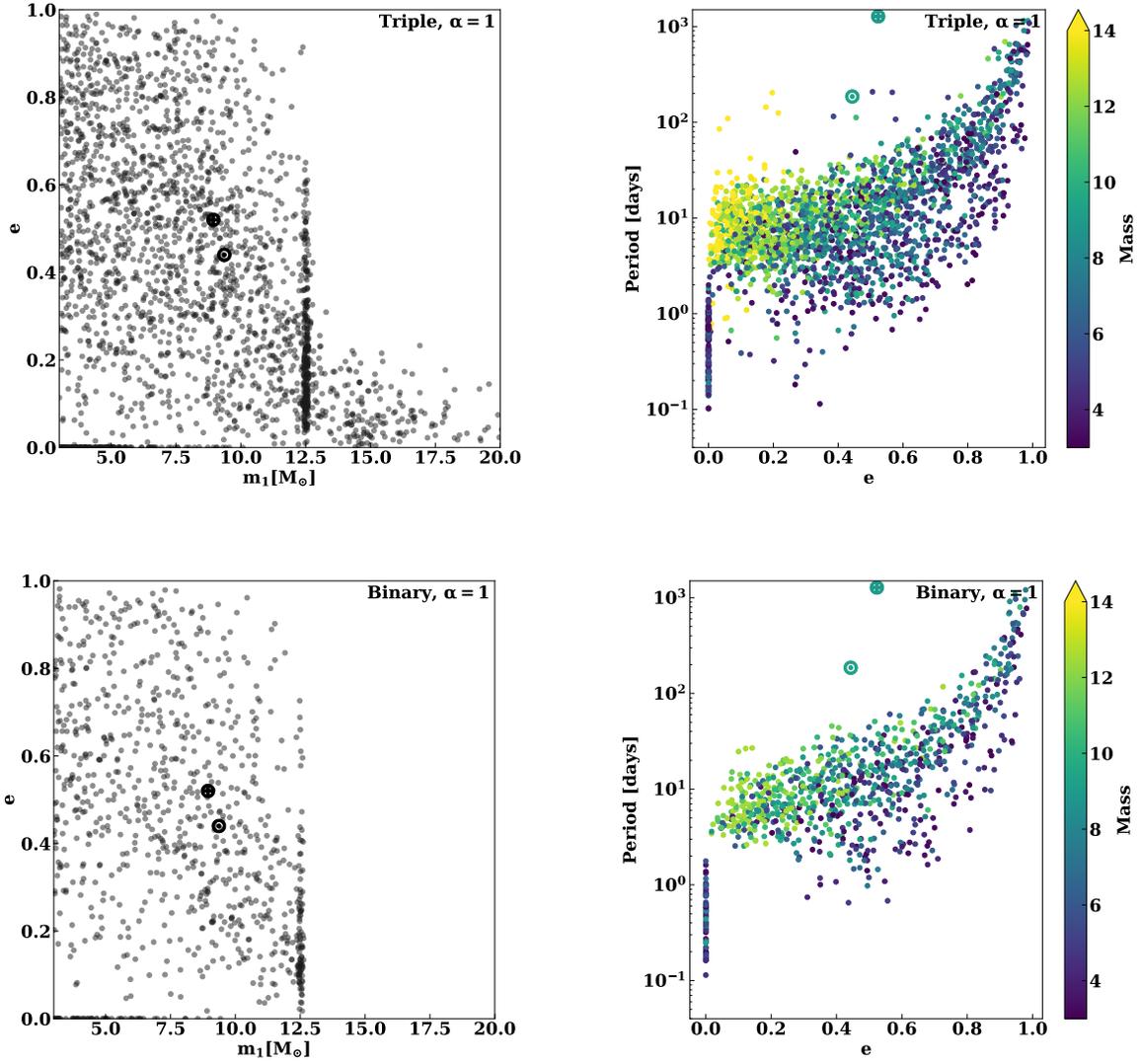


图 4. 左面板：偏心率作为主星质量的函数，对于在三体（顶部）和双星演化（底部）后生存下来的黑洞-主序星双星系统，在 <1300 天后的表现。右面板：周期作为偏心率的函数，对于生存下来的黑洞-主序星双星系统。圆点（加号）符号代表 Gaia BH1 (BH2)。与这里的模拟系统不同，Gaia BH2 拥有一颗红巨星伴星。

我们现在估计类似于 Gaia BH1 系统的三体 and 双星系统的形成效率。我们进行了大约  $10^6$  个额外的三体模拟和大约  $10^7$  个额外的双星模拟，以减少对速率估算的不确定性。为了效率，我们要求二级星在新三体模拟的  $\sim 1/2$  中介于  $0.5$  和  $2 M_{\odot}$  之间，考虑到从 § 到 3 的结果，在这些结果中所有 Gaia BH1 类似的双星都来自前身三体的内双星。

恒星族群中类似于 Gaia BH1 的双星系统的比例， $f_{\text{GBH}}$ ，是

$$f_{\text{GBH}} = f_{\text{O}} \times f_{\text{triple,binary}} \times \underbrace{f_{\text{solar}} \times f_{\text{eff}}}_{\tilde{f}_{\text{eff}}}. \quad (1)$$

这里， $f_{\text{O}}$  是恒星质量中黑洞前体的比例； $f_{\text{triple,binary}}$  是这些恒星的三重星（或双星）比例； $f_{\text{solar}}$  是具有伴星在  $0.5$  和  $2 M_{\odot}$  之间的大质量三重星（或双星）的比例； $f_{\text{eff}}$  是能够产生类似 Gaia BH1 的双星系统的此类系统比例。我们将最后两项归组为一个总体效率， $\tilde{f}_{\text{eff}}$ 。

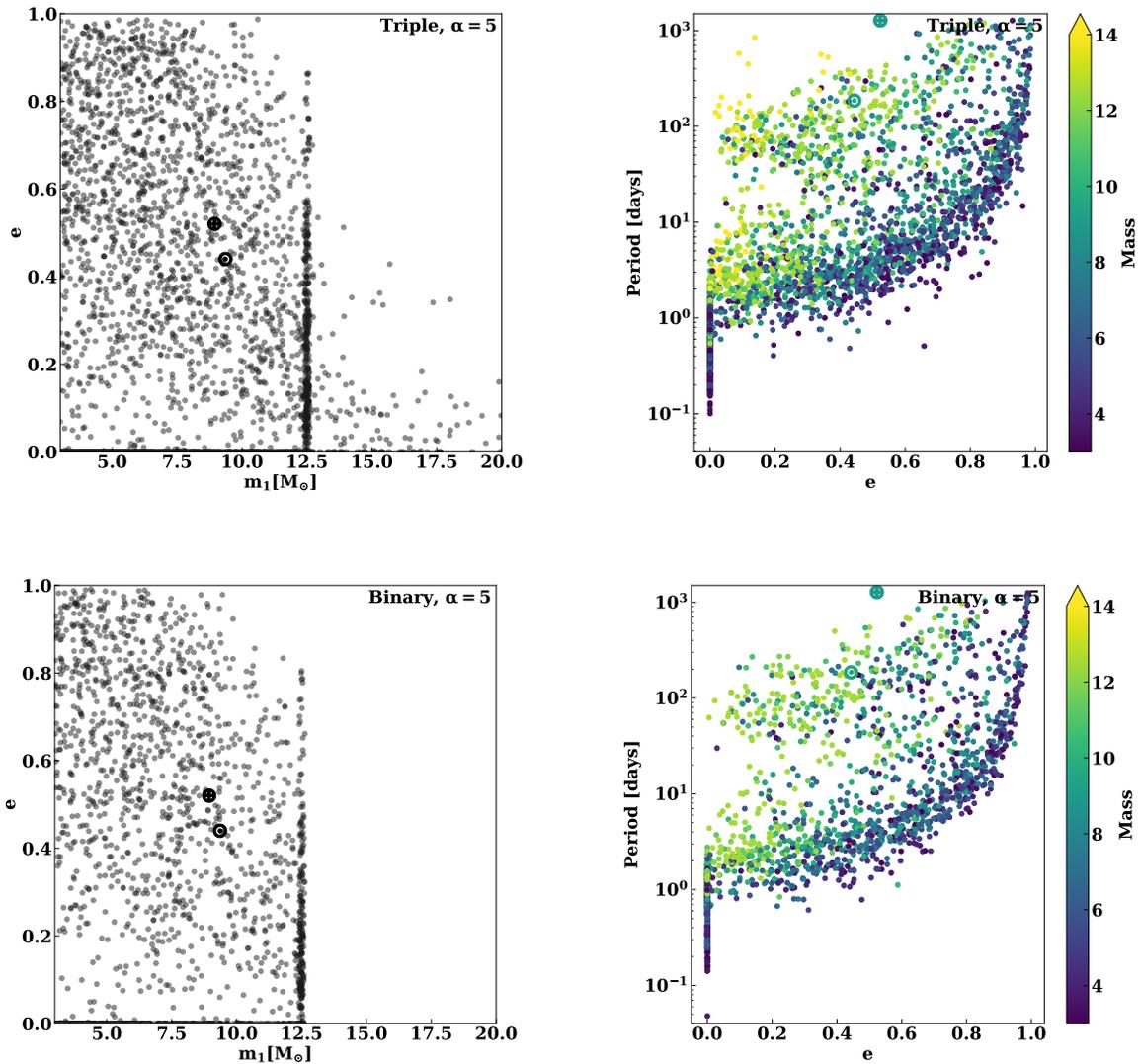


图 5. 与图 4 相同, 只是共同包络效率 ( $\alpha$ ) 为 5。

对于克罗帕质量函数,  $f_O$  是  $\approx 3.6 \times 10^{-3} M_{\odot}^{-1}$  (假设所有大于  $18 M_{\odot}$  的质量的恒星都形成了黑洞)。最巨大的恒星大多位于三重星系统或多倍星系统中 (Moe & Di Stefano 2017)。然而, 多倍星的具体分布高度不确定, 特别是对于质量比  $q < 0.1$  的情况。我们未指定  $f_{\text{triple, binary}}$ , 尽管  $f_{\text{triple}}$  可能是数量级为一的。  $f_{\text{solar}} \approx 0.26$  (0.12) 对于三元组 (二进制) 基于外推的 Moe & Di Stefano (2017) 分布。<sup>4</sup> 最后, 从上一节的结果中估计  $f_{\text{eff}}$ 。

<sup>4</sup>  $f_{\text{solar}} \approx$  三重星系统中的内 binaries 为 0.093。

形成效率汇总于表 1 中, 针对三合星和双星系统。对于三合星而言, 效率至少比双星高几个因子。然而, 对于  $\alpha = 5$ , 这种增强主要归因于我们初始条件下三合星中类太阳恒星的比例更大 (方程 1 中的  $f_{\text{solar}}$  项)。除此之外, 三合星在产生类似 Gaia BH1 的双星方面并不比双星更有效对于  $\alpha = 5$ 。总体而言, 每形成一个太阳质量的恒星最多可以有  $2.9 \times 10^{-7}$  个类似的 Gaia BH1 双星系统。

先前的工作估计了开放星团中黑洞-主序星双星系统的形成率 (Rastello et al. 2023; Di Carlo et al. 2023; Tanikawa et al. 2024)。例如, Rastello et al. (2023) 发现开放星团的形成效率为  $\sim 2 \times$

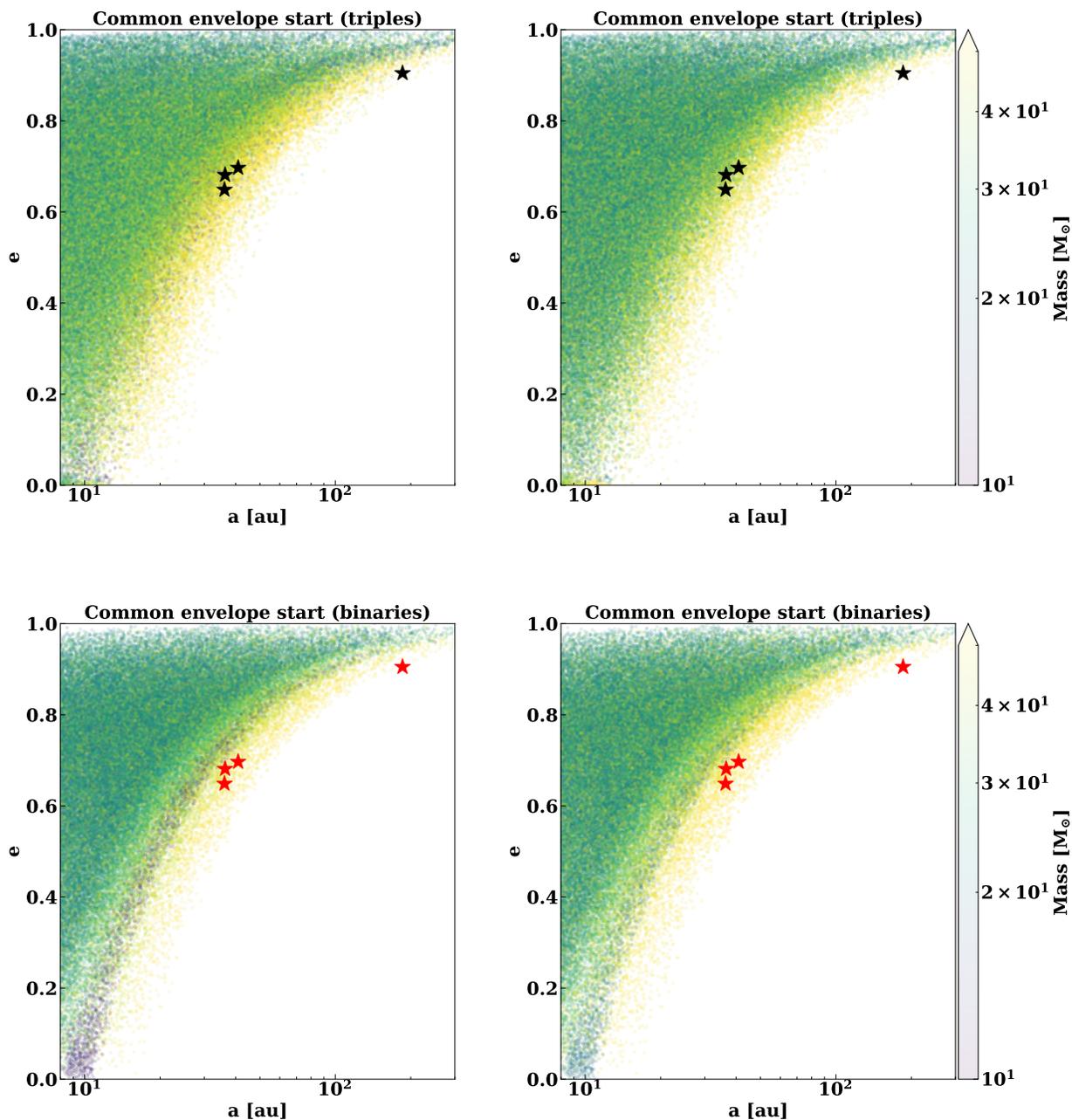


图 6. 偏心率作为在共同包层阶段开始时半长轴的函数，对于三体系统（第一行）和双星系统（第二行）。对于三体系统，我们显示了最内侧双星在最后一个共同包层阶段的轨道元素。颜色表示在共同包层开始时的主要质量（左侧）以及初始条件下的主要质量（右侧）。黑色星号对应于最终演化为类似 Gaia BH1 双星的三体系统（参见正文中的定义）。为了进行比较，我们在底部面板中用红色重新绘制了顶部面板中的星标点。

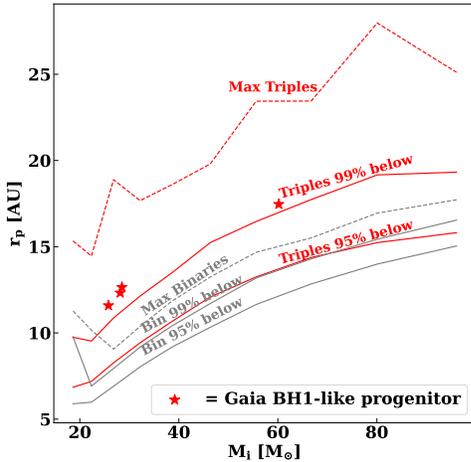


图 7. 在共同包络开始时, 近日点最大值作为初始主星质量的函数对于双星系统 (虚线, 灰色) 和三体系统 (红色, 虚线)。红色星星对应形成类似 Gaia BH1 双星系统的模型三体系统。实线轮廓包围了 95%-99% 的模型三体或双星系统。

$10^{-7} M_{\odot}^{-1} M_{\odot}^{-1}$ 。这在三体系统最大形成效率的两倍范围内。其他参考文献给出了不同的速率 (如  $2 \times 10^{-6} M_{\odot}^{-1}$  在 Tanikawa et al. 2024 中), 但这主要是由于对 Gaia BH1 类似双星的不同定义所致。

我们现在估计所有黑洞-主序星双星系统的形成效率。之前, Di Carlo et al. (2023) 发现每单位恒星形成的孤立双星演化 (开放星团) 中存在  $4.2 \times 10^{-7}$  ( $1.2 \times 10^{-5}$ ) 个黑洞-主序星双星系统 (周期不超过 10 年<sup>5</sup>)。Tanikawa et al. (2024) 获得了类似的结果。为了与这些结果进行比较, 我们进行了没有限制伴星质量的额外双星和三体模拟。这些模拟中黑洞-主序星双星系统 (周期小于 10 年) 的形成效率汇总于表 2 中。

三体系统中 BH-MS 双星系统的形成效率相比双星系统提高了几倍。<sup>6</sup> 这种增强主要是由于在三体初始条件下低质量伴星的比例较大, 与双星系统相比。总体而言, 场外三体系统在形成 BH-MS 双星系统方面与开放星团具有竞争力。

<sup>5</sup> 更广泛的系统将无法被盖亚探测到。

<sup>6</sup> 从隔离演化形成的 BH-MS 效率比在 Di Carlo et al. 2023 中高一个数量级, 这主要是由于初始质量比分布的不同。

表 1. Gaia BH1 类双星系统的形成效率。

Multiple-type	$\alpha$	
	$\tilde{f}_{\text{eff}}^a$	$f_{\text{GBH}}/f_{\text{triple,binary}}^b$
	$(M_{\odot}^{-1})$	
Triple	1	
$0.50 - 1.3 \times 10^{-6}$	$1.8 - 4.6 \times 10^{-9}$	
Binary	1	
$1 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-11}$	
Triple	5	
$3.7 - 7.9 \times 10^{-5}$	$1.3 - 2.9 \times 10^{-7}$	
Binary	5	
$1.5 - 2.5 \times 10^{-5}$	$5.2 - 9.0 \times 10^{-8}$	

NOTE—泊松不确定性是  $\sim 10\%$ , 除了第二行。在那里, 速率估计基于单一的 BH1 类系统, 因此不确定性约为 1。

<sup>a</sup> 类似盖亚 BH1 的双星系统由巨大的三重星或双星系统形成。范围显示了不同定义下类似盖亚 BH1 的双星系统的不确定性。较小的效率对应于 Rastello et al. (2023) 中的定义。对于较大的效率, 一个类似的盖亚 BH1 系统是指偏心率在观测系统因子 1.5 之内的系统, 而黑洞质量、次星质量和周期则在观测系统因子两倍之内。

<sup>b</sup> 类似 Gaia BH1 的双星系统每  $M_{\odot}$  形成的恒星, 除以大质量恒星三体 (或双星分数)。

#### 4.1. 盖亚黑洞 2

El-Badry et al. (2023b) 报告了 Gaia BH2 的发现: 一个周期为 1277 天, 偏心率为 0.52 的黑洞-红巨星系统。黑洞的质量是  $8.94 \pm 0.34 M_{\odot}$ , 而伴星是一颗  $\sim 1 M_{\odot}$  红巨星。

对于共同包层效率,  $\alpha = 1$  ( $\alpha = 5$ ), 我们的三体种群合成产生了 0 (3) 个类似 Gaia BH2 的系统。这些系统是由内双星合并后, 经历共同包层形成的。然后, 主星和伴星演化成黑洞和红巨星。这表明每形成一颗恒星, 就有  $\lesssim 7 \times 10^{-9}$  个类似 Gaia BH2 的系统。此

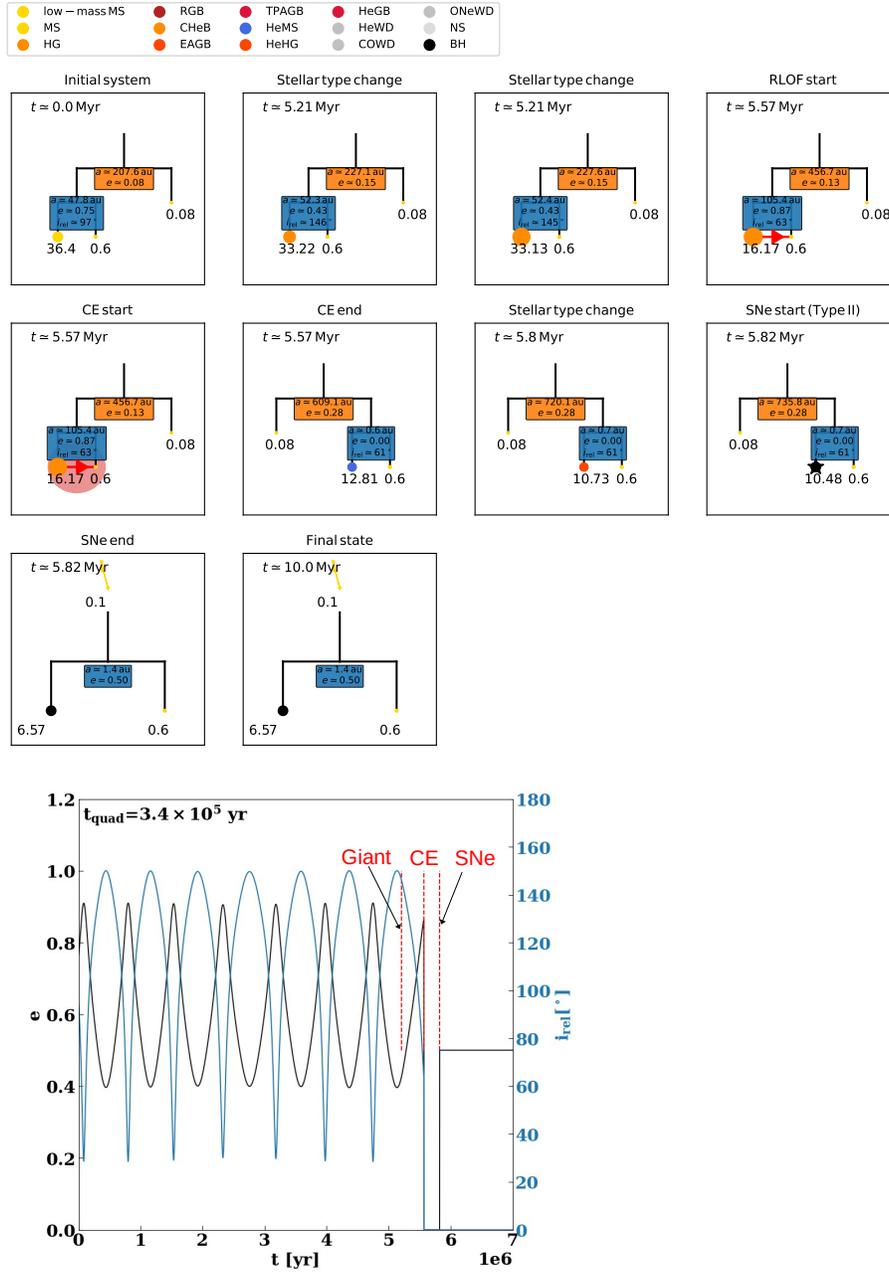


图 8. 示例三重系统演化结果为一个类似 Gaia BH1 的双星系统。上图展示了恒星和双星系统的演化，使用了移动图表。下图展示了偏心率和倾角随时间的变化。这些元素的演化是由于 von Zeipel-Lidov-Kozai 效应所致。作为参考，我们在下图中显示了四极 Kozai 时标 (Antognini 2015; Naoz 2016)。

外，我们所有的类似 Gaia BH2 的系统都比观测到的系统更偏心，并且偏心率  $\geq 0.7$ 。对于孤立双星， $\alpha = 1$  没有类似 Gaia BH2 的双星，而对于  $\alpha = 5$ ，形成效率比三体小一个数量级  $\sim$ 。

我们的模型表明，为了重现类似 Gaia BH2 的双星系统，即使是对于三体系统，也需要较大的共同包层效率。然而，由于样本数量较少，每单位恒星形成

中类似 Gaia BH2 系统的比例上限并不严格。(我们已经对  $1.2 \times 10^6$  个系统进行了  $\alpha = 1$  次运行，在 95% 的置信水平下给出了  $2.4 \times 10^{-9} M_{\odot}^{-1}$  的比例上限)。总体而言，需要更多的模拟来测试通过三体系统产生 Gaia BH2 的可能性。

## 5. 替代方案

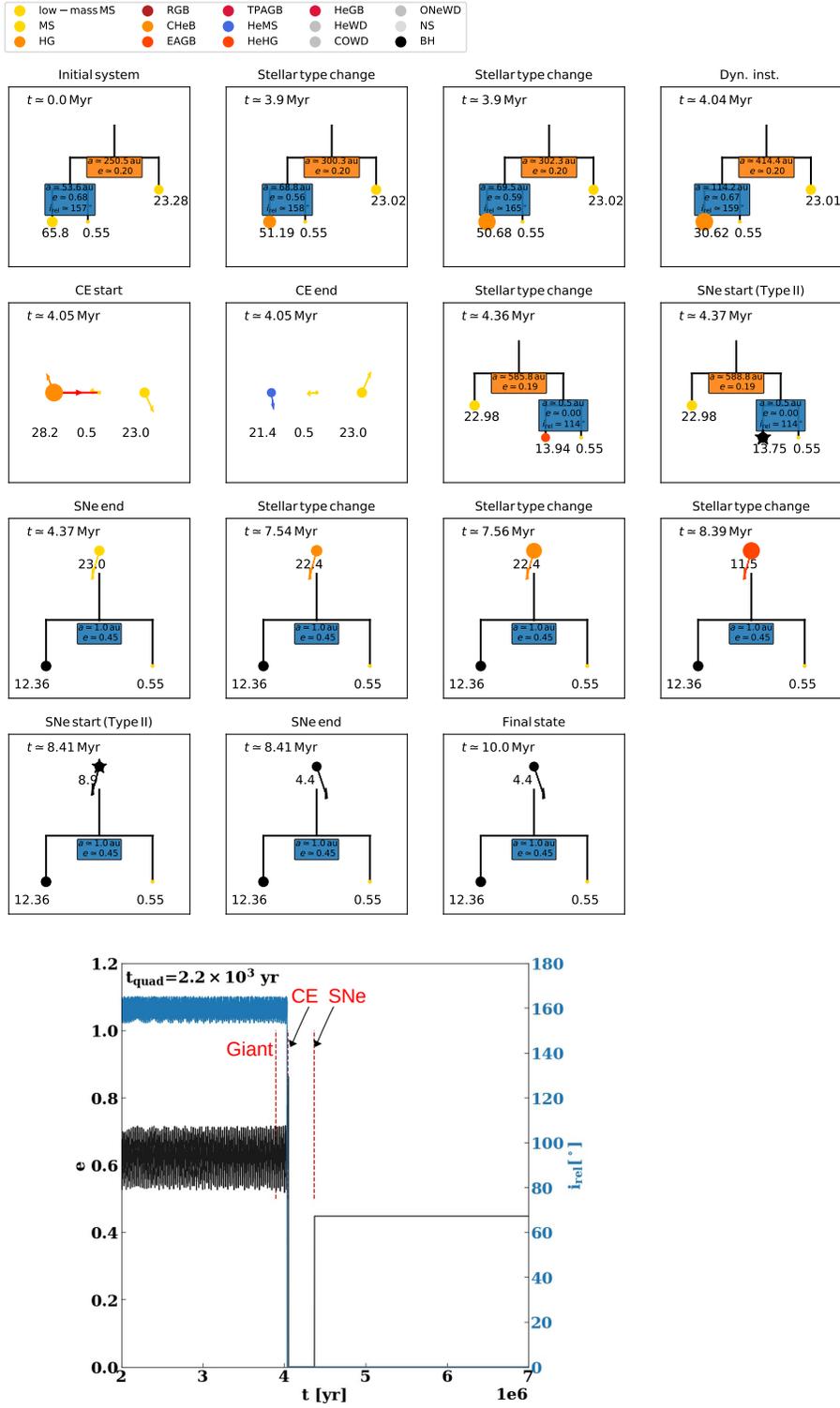


图 9. 与图 8 相同, 只是在这种情况下, 在经历了三体演化动力学不稳定 (TEDI) 之后形成了类似 Gaia BH1 的双星系统。

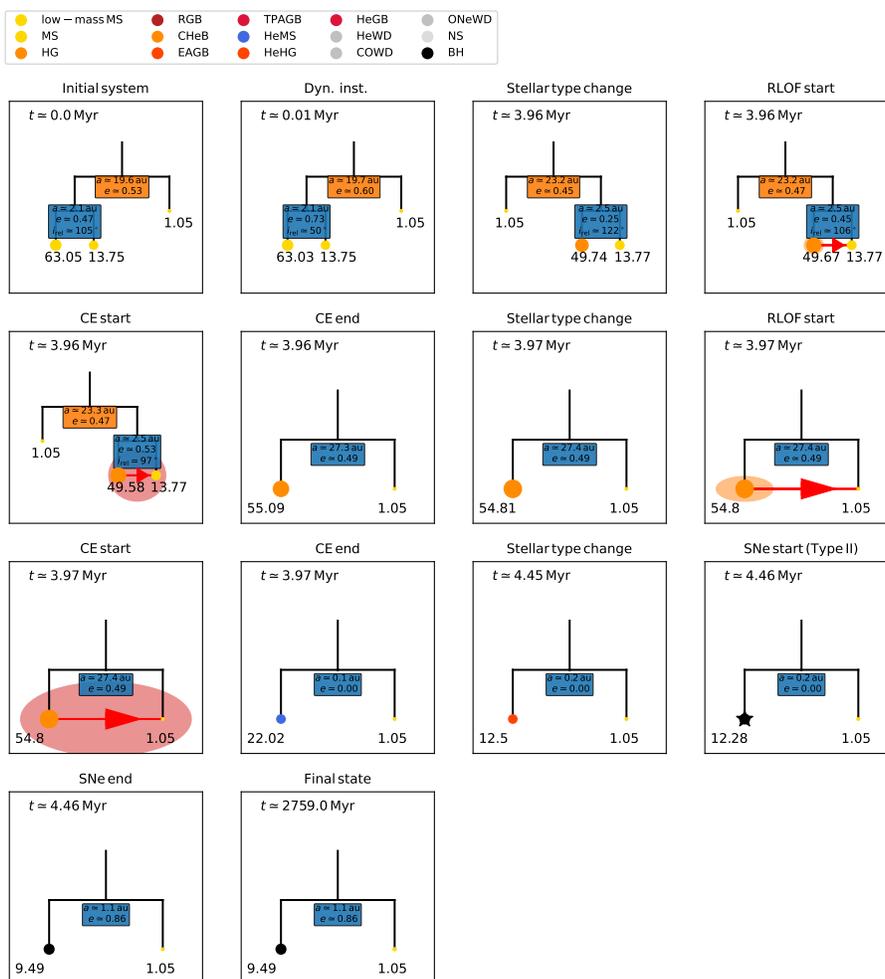


图 10. 黑洞-主序星双星系统的形成，经过两个共同包层阶段。

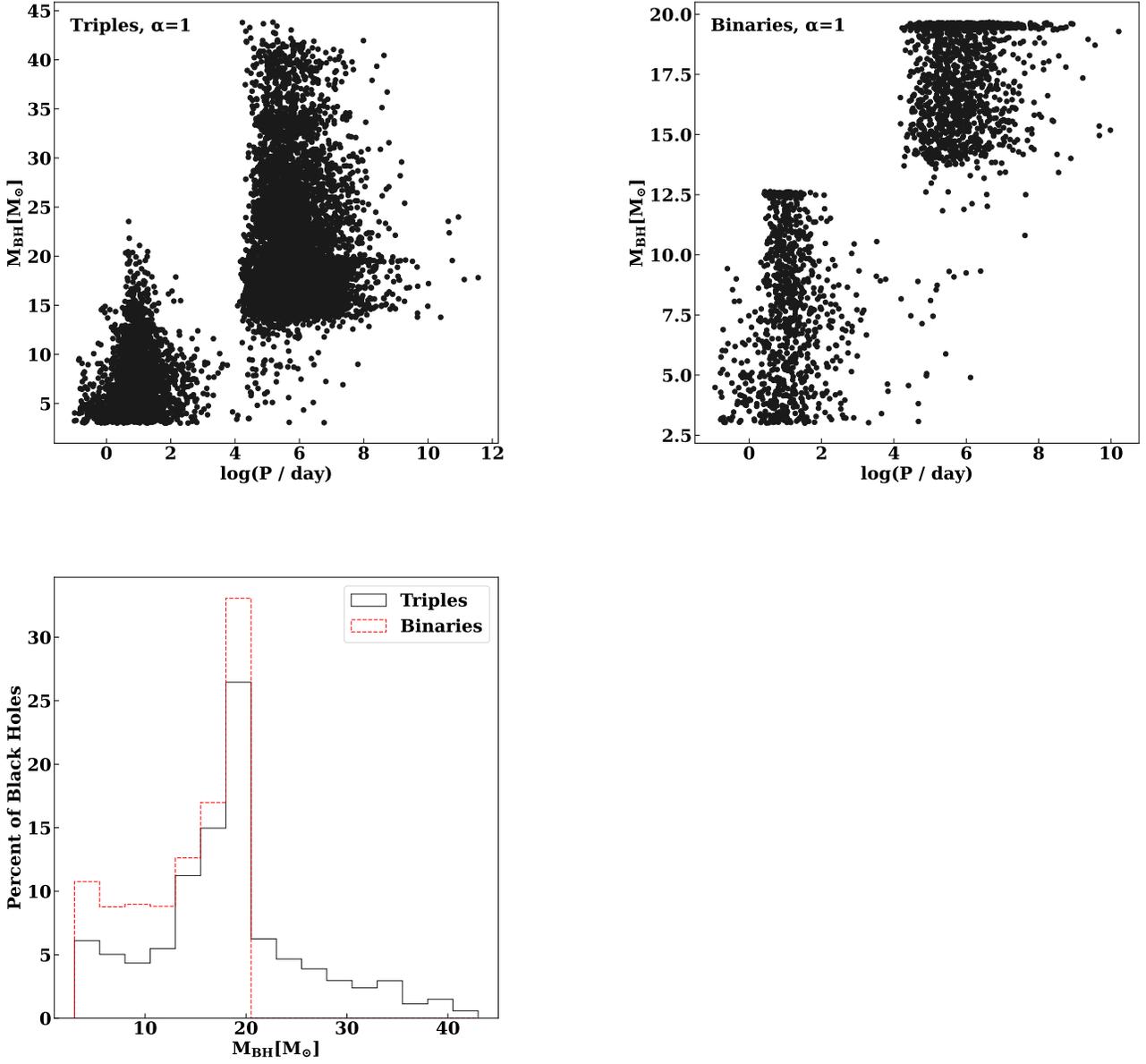


图 11. 质量与对数周期 (以天为单位) 对于来自三合星的黑洞主序双星 (左上角) 和双星 (右上角)  $\alpha = 1$ 。底部面板显示了每个系统的 BH 质量分布。由于内部双星中的合并, 三合星产生了更偏向高质量端的黑洞质量函数。

除了已经讨论的情况外, 还有一些观测到的盖亚黑洞双星系统的替代方案。我们在此进行描述以确保完整性。

首先, 这些系统可能由一个非常巨大的主星 ( $\geq 50M_{\odot}$ ) 和一颗类似太阳的伴星 (El-Badry et al. 2023b) 组成。如此巨大的主星可能永远不会变成红超巨星 (Humphreys & Davidson 1994; Smith & Conti 2008; Higgins & Vink 2019)。这种行为未被我们的模

型捕捉到。在这种情况下, 考虑到 Gaia BH1/BH2 不必经历共同包层阶段, 观测到的周期很容易再现。

其次, 三重星系统中内部两颗恒星之间的相互作用可能阻止了其中任意一颗恒星成为巨星 (Justham et al. 2014)。这可能导致围绕双黑洞系统的低质量第三颗恒星的质量较低 (El-Badry et al. 2023a)。这种行为没有被我们的模型捕捉到。在我们对三重星的综合分析中, 仅有包含双黑洞和低质量第三颗恒星的系统

表 2. 周期小于 10 年的黑洞-主序星 (BH-MS) 双星系统的形成效率。

Multiple-type	$\alpha$
$\tilde{f}_{\text{eff}}^a$	$f_{\text{BH-MS}}/f_{\text{triple,binary}}^b$
$(M_{\odot}^{-1})$	
Triple	1
$2.1 \times 10^{-3}$	$7.5 \times 10^{-6}$
Binary	1
$5.5 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-6}$
Triple	5
$4.1 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-5}$
Binary	5
$1.3 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-6}$

<sup>a</sup> 每颗大质量三重星或双星形成的 BH-MS 联星。

<sup>b</sup> 每形成  $M_{\odot}$  颗恒星对应的 BH-MS 双星系统, 除以大质量恒星的三体 (或双星分数)。

具有  $\gtrsim 10^5$  天的周期。因此, 它们比观测到的系统宽得多。

## 6. 讨论与总结

最近, 在盖亚数据中识别出了一些候选黑洞恒星双星系统: Gaia BH1 和 Gaia BH2。前者是一颗类似于太阳的主序星, 围绕一个  $9.32M_{\odot}$  黑洞运行, 轨道周期为 185.5 天; 而后者则是一颗红巨星, 在围绕一个  $8.94M_{\odot}$  黑洞运行的轨道上, 其轨道周期为 1277 天。这些系统很难用孤立双星来解释, 可能需要不寻常的共同包层演化 (El-Badry et al. 2023a) 和/或其他情景, 包括在星团中形成。

在这里, 我们考虑这样的系统形成的三体情景。由于观测得知, 大多数黑洞前体处于三体或多于三体的多重系统中 (Moe & Di Stefano 2017), 因此这比双星前体情景更有可能。

我们的主要结果总结如下:

1. 三重演化允许在中等偏心率下形成更宽的黑洞主序星系统, 因为长期的偏心率振荡或不稳定性使得这些系统能够在比双星情况下更远的距离进入共同包层。
2. 因此, 对于较小的共同包层效率 (例如  $\alpha = 1$ ), 可以产生与 Gaia BH1 周期相当的系统, 不过每颗太阳质量只能生成少量  $\times 10^{-9}$ 。对于  $\alpha = 5$ , 双星和三体系统都可以产生类似 Gaia BH1 的系统。由于初始条件中低质量伴星的比例较大, 三体系统的形成效率 ( $\sim 10^{-7} M_{\odot}^{-1}$ ) 高出几倍。对于  $\alpha = 5$ , 在三体系统中的类似 Gaia BH1 系统的形成效率与开放星团文献估计值相当。此外, 集群中的三体动力学可能会增强这些环境中的形成效率。这部分内容留待未来研究。
3. Gaia BH2 可能需要更大的共同包层效率, 即使在三体情景中也是如此。然而, 需要更多的模拟来测试这一点。
4. 形成效率对于周期为  $< 10$  年的 BH 主序双星来说, 三体系统的形成效率比二元系统高出 3 - 4 倍。再次强调, 这很可能是由于我们在初始条件下拥有更大比例的低质量伴星, 而不是动态差异所致。在三体通道中形成的 BH-MS 系统的最大形成效率与开放星团相当。
5. 来自三合星的 BH 主序双星比来自双星的具有更重顶峰的 BH 质量函数, 这是由于内双星中的合并。例如, 对于一个初始为双星的情况, BH 的质量永远不会超过  $20M_{\odot}$ , 但在  $\sim 10 - 30\%$  的初始三合星情况下会超过这一阈值。几乎所有质量大于  $20M_{\odot}$  的 BH 主序双星都有周期  $\geq 10^4$  天。在孤立的情况下, 这样的宽双星不会导致任何强烈的相互作用, 也不会形成 X 射线双星。然而, 在场中的飞越相遇可以驱动这些双星进入相互作用 (Michaely & Perets 2016)。在星团中, 如此宽的双星会被破坏 (软双星), 但 BH 可能会被交换到其他双星中, 并且甚至可能成为通过 GW 螺旋波合并的 BH-BH 双星的一部分。因此, 这些系统中升高的 BH 质量会影响 GW 源的整体质量函数。原则上, 飞越也可能扰动三合星演化

的阶段 (Michaely & Perets 2019, 2020; Shariat et al. 2023)。然而, 在我们的情况下, 大多数三合星在与大质量主星寿命相当的时间尺度上被破坏。

6. 观测到的恒星中高比例的三重和四重多重性, 以及我们的结果等表明, 使用双星群体合成来模拟大质量恒星和黑洞可能系统地提供错误的演化情景。

### 致谢

我们感谢匿名审稿人提供的建设性报告。我们感谢 Sara Rastello、Ataru Tanikawa 和 Sukanya

Chakrabarti 建议了有用的参考文献。我们感谢 Ugo Niccolò Di Carlo 和 Katelyn Breivik 提供有关他们为 Gaia BH 双星进行的双星种群综合计算的信息。AG 在 Technion 的工作得到了 Zuckerman Fellowship 的资助。

*Software:* astropy (The Astropy Collaboration et al. 2018), Matplotlib (Hunter 2007), NumPy, SciPy (Virtanen et al. 2020), MSE (Hamers et al. 2021), COSMIC (Breivik et al. 2020)

### REFERENCES

- Andrews, J. J., Taggart, K., & Foley, R. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2207.00680, doi: [10.48550/arXiv.2207.00680](https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.00680)
- Antognini, J. M., Shappee, B. J., Thompson, T. A., & Amaro-Seoane, P. 2014, MNRAS, 439, 1079, doi: [10.1093/mnras/stu039](https://doi.org/10.1093/mnras/stu039)
- Antognini, J. M. O. 2015, MNRAS, 452, 3610, doi: [10.1093/mnras/stv1552](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1552)
- Antonini, F., Toonen, S., & Hamers, A. S. 2017, ApJ, 841, 77, doi: [10.3847/1538-4357/aa6f5e](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6f5e)
- Breivik, K., Coughlin, S., Zevin, M., et al. 2020, ApJ, 898, 71, doi: [10.3847/1538-4357/ab9d85](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9d85)
- Chakrabarti, S., Simon, J. D., Craig, P. A., et al. 2023, AJ, 166, 6, doi: [10.3847/1538-3881/accf21](https://doi.org/10.3847/1538-3881/accf21)
- Corral-Santana, J. M., Casares, J., Muñoz-Darias, T., et al. 2016, A&A, 587, A61, doi: [10.1051/0004-6361/201527130](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527130)
- Di Carlo, U. N., Agrawal, P., Rodriguez, C. L., & Breivik, K. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2306.13121, doi: [10.48550/arXiv.2306.13121](https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.13121)
- El-Badry, K., Rix, H.-W., Quataert, E., et al. 2023a, MNRAS, 518, 1057, doi: [10.1093/mnras/stac3140](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3140)
- El-Badry, K., Rix, H.-W., Cendes, Y., et al. 2023b, MNRAS, 521, 4323, doi: [10.1093/mnras/stad799](https://doi.org/10.1093/mnras/stad799)
- Fortin, F., García, F., Simaz Bunzel, A., & Chaty, S. 2023, A&A, 671, A149, doi: [10.1051/0004-6361/202245236](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245236)
- Fryer, C. L., Belczynski, K., Wiktorowicz, G., et al. 2012, ApJ, 749, 91, doi: [10.1088/0004-637X/749/1/91](https://doi.org/10.1088/0004-637X/749/1/91)
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., et al. 2023a, A&A, 674, A1, doi: [10.1051/0004-6361/202243940](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940)
- Gaia Collaboration, Arenou, F., Babusiaux, C., et al. 2023b, A&A, 674, A34, doi: [10.1051/0004-6361/202243782](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243782)
- Hamers, A. S., & Dosopoulou, F. 2019, ApJ, 872, 119, doi: [10.3847/1538-4357/ab001d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab001d)
- Hamers, A. S., Perets, H. B., Thompson, T. A., & Neunteufel, P. 2022, ApJ, 925, 178, doi: [10.3847/1538-4357/ac400b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac400b)
- Hamers, A. S., Rantala, A., Neunteufel, P., Preece, H., & Vynatheya, P. 2021, MNRAS, 502, 4479, doi: [10.1093/mnras/stab287](https://doi.org/10.1093/mnras/stab287)
- Higgins, E. R., & Vink, J. S. 2019, A&A, 622, A50, doi: [10.1051/0004-6361/201834123](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834123)
- Humphreys, R. M., & Davidson, K. 1994, PASP, 106, 1025, doi: [10.1086/133478](https://doi.org/10.1086/133478)
- Hunter, J. D. 2007, Computing in Science & Engineering, 9, 90, doi: [10.1109/MCSE.2007.55](https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55)
- Hurley, J. R., Tout, C. A., & Pols, O. R. 2002, MNRAS, 329, 897, doi: [10.1046/j.1365-8711.2002.05038.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05038.x)
- Justham, S., Podsiadlowski, P., & Vink, J. S. 2014, ApJ, 796, 121, doi: [10.1088/0004-637X/796/2/121](https://doi.org/10.1088/0004-637X/796/2/121)
- Kozai, Y. 1962, AJ, 67, 591, doi: [10.1086/108790](https://doi.org/10.1086/108790)
- Kummer, F., Toonen, S., & de Koter, A. 2023, A&A, 678, A60, doi: [10.1051/0004-6361/202347179](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347179)
- Lam, C. Y., Lu, J. R., Udalski, A., et al. 2022, ApJL, 933, L23, doi: [10.3847/2041-8213/ac7442](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac7442)
- Lidov, M. L. 1962, Planet. Space Sci., 9, 719, doi: [10.1016/0032-0633\(62\)90129-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(62)90129-0)
- Mardling, R. A., & Aarseth, S. J. 2001, MNRAS, 321, 398, doi: [10.1046/j.1365-8711.2001.03974.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.03974.x)
- Michaely, E., & Perets, H. B. 2014, ApJ, 794, 122, doi: [10.1088/0004-637X/794/2/122](https://doi.org/10.1088/0004-637X/794/2/122)
- . 2016, MNRAS, 458, 4188, doi: [10.1093/mnras/stw368](https://doi.org/10.1093/mnras/stw368)
- . 2019, ApJL, 887, L36, doi: [10.3847/2041-8213/ab5b9b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab5b9b)
- . 2020, MNRAS, 498, 4924, doi: [10.1093/mnras/staa2720](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2720)

- Moe, M., & Di Stefano, R. 2017, *ApJS*, 230, 15, doi: [10.3847/1538-4365/aa6fb6](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa6fb6)
- Mróz, P., Udalski, A., & Gould, A. 2022, *ApJL*, 937, L24, doi: [10.3847/2041-8213/ac90bb](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac90bb)
- Naoz, S. 2016, *ARA&A*, 54, 441, doi: [10.1146/annurev-astro-081915-023315](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081915-023315)
- Perets, H. B., & Fabrycky, D. C. 2009, *ApJ*, 697, 1048, doi: [10.1088/0004-637X/697/2/1048](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1048)
- Perets, H. B., & Kratter, K. M. 2012, *ApJ*, 760, 99, doi: [10.1088/0004-637X/760/2/99](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/2/99)
- Rastello, S., Iorio, G., Mapelli, M., et al. 2023, *MNRAS*, 526, 740, doi: [10.1093/mnras/stad2757](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2757)
- Rose, S. C., Naoz, S., & Geller, A. M. 2019, *MNRAS*, 488, 2480, doi: [10.1093/mnras/stz1846](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1846)
- Sahu, K. C., Anderson, J., Casertano, S., et al. 2022, *ApJ*, 933, 83, doi: [10.3847/1538-4357/ac739e](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac739e)
- Shahaf, S., Bashi, D., Mazeh, T., et al. 2023, *MNRAS*, 518, 2991, doi: [10.1093/mnras/stac3290](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3290)
- Shariat, C., Naoz, S., Hansen, B. M. S., et al. 2023, *ApJL*, 955, L14, doi: [10.3847/2041-8213/acf76b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acf76b)
- Shenar, T., Sana, H., Mahy, L., et al. 2022, *Nature Astronomy*, 6, 1085, doi: [10.1038/s41550-022-01730-y](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01730-y)
- Smith, N., & Conti, P. S. 2008, *ApJ*, 679, 1467, doi: [10.1086/586885](https://doi.org/10.1086/586885)
- Stegmann, J., Antonini, F., & Moe, M. 2022, *MNRAS*, 516, 1406, doi: [10.1093/mnras/stac2192](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2192)
- Tanikawa, A., Cary, S., Shikauchi, M., Wang, L., & Fujii, M. S. 2024, *MNRAS*, 527, 4031, doi: [10.1093/mnras/stad3294](https://doi.org/10.1093/mnras/stad3294)
- The Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Sipőcz, B. M., et al. 2018, *AJ*, 156, 123, doi: [10.3847/1538-3881/aabc4f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabc4f)
- Toonen, S., Boekholt, T. C. N., & Portegies Zwart, S. 2022, *A&A*, 661, A61, doi: [10.1051/0004-6361/202141991](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141991)
- Toonen, S., Portegies Zwart, S., Hamers, A. S., & Bandopadhyay, D. 2020, *A&A*, 640, A16, doi: [10.1051/0004-6361/201936835](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936835)
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. 2020, *Nature Methods*, 17, 261, doi: [10.1038/s41592-019-0686-2](https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2)