

球状星团中的黑洞

成忠群^{1,2}

(1. 武汉大学物理科学与技术学院天文学系, 武汉 430072;

2. 武汉大学-国家天文台联合天文中心, 武汉 430072)

摘要: 黑洞是宇宙中极端物理研究的实验室, 探测黑洞是目前国际最前沿的科学目标之一。球状星团是银河系中年老的自引力束缚天体系统, 内部包含上百万颗恒星, 恒星密度很高。球状星团中已经观测到存在几百颗脉冲星天体, 但至今黑洞是否存在于球状星团中依然是个未解之谜。球状星团中在中心可能存在一颗中等质量黑洞, 黑洞质量范围是一千到一万倍太阳质量。同时球状星团中可能存在大量的恒星级黑洞, 这些黑洞的存在将影响球状星团的演化, 并在球状星团中形成一些特殊天体, 从而可以被天文观测设备观测和证实。本文将重点阐述在球状星团中黑洞存在的可能观测特征及对球状星团性质的影响。黑洞与寄主球状星团通过动力学耦合在一起, 球状星团是形成黑洞 X 射线双星和引力波源的重要场所, 同时黑洞会改变寄主星团的动力学结构与演化进程。因此搜寻 X 射线源, 探测引力波信号, 研究球状星团的特征是探测球状星团中黑洞的重要天文证据。

关键词: 黑洞; 球状星团

DOI: 10.48014/cpr.20230527001

引用格式: 成忠群. 球状星团中的黑洞[J]. 中国物理学评论, 2023, 1(1): 1-11.

0 引言

恒星级黑洞(BH)是大质量恒星演化的产物之一, 星族合成理论预言银河系中存在高达 $10^8 \sim 10^9$ 量级的恒星级黑洞。然而, 绝大多数的黑洞都处于孤立状态, 或处于伴星同样已演化成致密天体的双星系统中^[1], 这使得它们难以被天文观测所发现。只有约 $10^3 \sim 10^4$ 颗黑洞具有一颗光学伴星^[2], 从而能通过测量光学伴星的轨道调制信号对黑洞进行动力学证认。如果光学伴星恰好能充满洛希瓣, 外溢的物质被黑洞吸积后将产生强烈的 X 射线辐射, 形成 X 射线双星(XRBs)。目前银河系中已证认的黑洞 X 射线双星(BH-XRBs)有二十多颗, 加上候选体一共有七十多颗。

球状星团是银河系中年老($t > 10^{10}$ yr)的自引力束缚天体系统。星团中可见恒星的数目介于 10^3

$\sim 10^7$ 之间, 它们在引力的作用下高度聚集, 恒星密度在星团中心核球区域甚至能高达 $\sim 10^6 M_{\odot} pc^{-3}$ 。此外, 由于年龄极为古老, 目前球状星团中能观测到的主序恒星的质量普遍都要小于主序转折恒星质量($M_{TO} \approx 0.7 - 0.9 M_{\odot}$), 而质量大于 M_{TO} 的恒星都已演化成白矮星、中子星或黑洞。尽管中子星与黑洞在超新星爆发形成时有可能获得一个额外的 kick 速度并逃离出球状星团, 但理论计算表明, 每个球状星团中仍有大量的中子星与恒星级黑洞能被星团的引力势阱所滞留, 具体数目主要取决于超新星的 kick 速度、寄主星团的总质量、金属丰度与逃逸速度。与星系场中的黑洞不同, 球状星团中即使处于孤立状态的黑洞也能通过动力学过程捕获伴星, 形成 XRBs 或引力波源。球状星团因此为研究黑洞的形成与演化提供了重要舞台。本文将结合理论与观测进展对此作一个简要介绍。

通讯作者 Corresponding author: 成忠群, 16685724@qq.com

收稿日期: 2023-05-31; 录用日期: 2023-06-25; 发表日期: 2023-09-28

1 球状星团的动力学演化与中心能源机制

在致密的星团环境中,恒星之间频繁且随机的引力散射将逐渐抹去它们的初始运动学信息,并使恒星的动能逐渐均分。这种由引力散射主导的过程也被称为两体弛豫过程,它是驱动星团动力学演化的基本物理过程。球状星团中两体弛豫时标主要取决于恒星的密度 $\rho(r)$ 与速度弥散 $\sigma(r)$ 的径向分布^[3]:

$$t_{rel}(r) \propto \frac{\sigma(r)^3}{G^2 m \rho(r) \ln \Lambda} \quad (1)$$

其中, G 为万有引力常数, m 是散射天体的质量,库伦对数 $\ln \Lambda \approx \ln(N/100)$, N 为星团中天体的总数。在星团中心,恒星密度 ρ 可以比星团外围高出数个量级,这表明动力学过程能以极高的速率进行。例如,球状星团核球中的两体弛豫时标为 $t_{rc} \approx 10^6 - 10^9 \text{ yr}$, 它们往往远低于半光半径处的两体弛豫时标 ($t_{rh} \approx 10^8 - 10^{10} \text{ yr}$) 以及星团的绝对年龄。在两体弛豫过程驱动下,不同质量天体之间的能量均分过程将进一步在星团内部产生质量演化分层现象:即质量大的天体将损失动能逐渐下沉到星团引力势阱中心,而小质量天体将获得动能扩散到星

团外围,推动星团向外扩张甚至逃逸出球状星团。更为重要的是,作为具有负比热容的自引力束缚系统,两体弛豫过程将在球状星团中产生从内向外的能量净外流,如果星团内部没有有效的能量补充机制,这必然引起星团中心核球收缩与恒星密度升高,而两体弛豫时标的缩短又将进一步加剧星团的能量外流,因而迅速引发星团的引力热坍缩!

显然,球状星团能稳定存在上百亿年以上表明它们中心必然存在某种高效的能源产生机制,它能为星团的动力学演化注入能量并维持其稳定的动力学结构。由于双星系统具有轨道束缚能 ($E_b = -Gm^2/2a$), 人们推测双星将是球状星团动力学演化能量来源的关键因素。由于双星比普通单星略重,在质量演化分层效应下,它们将更容易下沉到星团致密的核球中参与密近动力学碰撞。在碰撞过程中双星轨道间距 a 的变化将伴随着轨道束缚能的吸收与释放。特别地, a 的演化将遵守 Hills-Heggie 定理^[4,5]:即硬双星 ($|E_b| > m\langle\sigma^2\rangle/2$) 经动力学碰撞后倾向于向星团释放能量,轨道间距收缩变得更硬;软双星 ($|E_b| < m\langle\sigma^2\rangle/2$) 经动力学碰撞后倾向于从星团吸收能量,轨道间距扩张变得更软或者被瓦解(图 1)。更妙的是,双星的碰撞截面

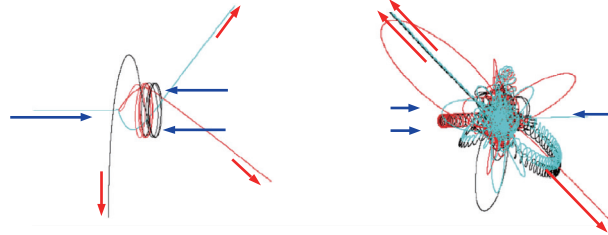


图 1 双星密近碰撞轨道间距变化示意图。左图中恒星之间的碰撞动能(蓝色与红色箭头分别示意碰撞前后恒星的碰撞速度与抛射速度)大于双星轨道束缚能,碰撞吸收恒星动能将双星瓦解,恒星运动速度降低;右图中恒星之间的碰撞动能小于双星的轨道束缚能,入射恒星在碰撞中被双星捕获形成不稳定的束缚三体系统。不稳定束缚三体系统瓦解时以更高的速度抛射出一颗恒星,新产生的双星也获得了较大的反弹速度。与入射双星相比,出射双星的轨道间距大大降低,碰撞过程提取了双星轨道束缚能。此碰撞中入射恒星(蓝绿色曲线)还替换了原双星系统中的一颗子星(红色曲线)

Fig. 1 Schematic diagram of the variation of orbital spacing in a close collision between binary stars. In the left figure, the kinetic energy of the collision between the stars (the blue and red arrows indicate the collision velocity and ejection velocity of the stars before and after the collision, respectively) is larger than the orbital binding energy of the binary, and the collision absorbs the kinetic energy of the stars to collapse the binary, and the stellar motion velocity decreases; in the right figure, the kinetic energy of the collision between the stars is smaller than the orbital binding energy of the binary, and the incident stars are caught by the binary to form the unstable bound three-body system in the collision. The unstable bound three-body system collapses by ejecting a star at a higher velocity, and the newly generated binary also gains a higher rebound velocity. The orbital spacing of the outgoing binary star is greatly reduced compared to the incoming binary star, and the collision process extracts the binary's orbital binding energy. The incident star in this collision (blue-green curve) also displaces a substar in the original binary system (red curve)

近似是与 a 成正比的 ($A_b \propto a/\sigma^2$), 因此硬双星的轨道演化过程与寄主星团的动力学演化是能互相匹配自适应的: 随着硬双星轨道间距 a 的分布范围越来越小, 星团收缩核球与增加中心恒星密度都将有利于加快硬双星的碰撞频率, 提高碰撞产能率。鉴于这个物理过程与主序恒星内部的氢燃烧产能机制十分相似, 文献中也将球状星团中动力学碰撞提取硬双星轨道束缚能的过程称为“双星燃烧”过程^[6]。

2 “双星燃烧”过程与其天体物理产物

显然, 球状星团中的“双星燃烧”过程将能迅速拉近双星系统的轨道间距, 加剧两颗子星之间的相互作用过程并产生许多奇异的天体。例如, 密近主序双星之间的潮汐耦合能有效锁定它们的轨道运动与恒星自转运动, 从而放大恒星磁场并将主序双星系统转化为色球活动双星 (ABs)。对于含有巨星的双星, “双星燃烧”过程也能加速它们的物质交流进程, 使之迅速演化为激变变星 (CVs) 系统。此外, 恒星演化理论认为星团中质量大于 M_{TO} 的恒星都已脱离了主序 (MS), 进入了巨星支或已经演化成了致密天体。然而在几乎所有的球状星团中都能找到质量大于 M_{TO} 的主序蓝离散星 (BSS)。尽管孤立主序双星演化中的物质交流或并合过程也能形成蓝离散星, 但在一些星团中却发现质量大于 $2M_{TO}$ 的蓝离散星。这表明星团中“双星燃烧”过程不仅能加速主序双星的演化进程, 促使它们提前发生物质交流与并合, 某些恒星甚至能多次参与“双星燃烧”过程, 从而实现显著的质量增长。

此外, 理论计算还表明, 在双星与单星的密近碰撞过程中, 如果入射单星的质量大于双星中的子星, 入射单星将以极大的概率置换掉原双星系统中质量较小的子星, 与另一颗子星形成一个全新的双星系统。这种置换碰撞将在球状星团中产生大量的奇异天体。例如, 球状星团中孤立的白矮星、中子星和黑洞等致密天体也可以通过与主序双星发生置换碰撞而形成激变变星 CVs、小质量 X 射线双星 (LMXBs), 以及毫秒脉冲星 (MSPs) 等 (图 2)。尤其是, 如果置换碰撞能多次发生, 则有可能形成完全由两颗致密天体组成的密近双星系统, 它们将是研究致密天体物理性质、引力理论、引力辐射等

重大问题的理想天体。

通过射电、光学、紫外线以及 X 射线等波段的观测搜寻与证认, 目前人们已在银河系球状星团中发现了五颗 BH-LMXBs 候选体^[9-12], 三颗 BH-MS 双星^[13,14], 二十余颗 NS-LMXBs (爆发光度 $L_X \geq 10^{34} \text{ erg/s}$) 和大量宁静态 LMXB ($L_X < 10^{34} \text{ erg/s}$) 候选体, 超过 250 颗 MSPs, 以及一对双中子星 (DNS) 系统。这些天体的数目与银河系星系场中发现的总数目相比大约只低一个数量级。然而, 考虑到所有银河系球状星团的累计质量为 $\sim 10^8 M_\odot$, 它要远小于银河系恒星的总质量 ($\sim 10^{11} M_\odot$), 不难发现以上奇异天体在球状星团中的诞生率要比整个银河系星系场高出两个数量级, 这充分证明了“双星燃烧”过程在球状星团动力学演化中的重要性。

3 “黑洞燃烧”与动力学形成纯引力波源

球状星团中“双星燃烧”过程的产物理论上都有可以通过电磁辐射观测到。然而, 星团中的黑洞也可以通过动力学碰撞形成密近的双黑洞 (BBH) 系统。双黑洞原则上是电磁辐射不可见的, 它们只有在旋近与并合时才有可能被引力波探测器发现。因此, 有的文献中也将动力学碰撞提取双黑洞系统轨道束缚能的过程称为“黑洞燃烧”过程^[15], 其特征产物是纯引力波源。从球状星团动力学演化的角度来讲, “黑洞燃烧”过程的优先级可能要远比“双星燃烧”过程更高。

首先, 对双星系统中黑洞质量的测量结果表明, 恒星级黑洞的质量分布要远大于白矮星、中子星以及球状星团中其它的普通恒星。由于质量演化分层效应的存在, 恒星级黑洞将率先沉聚到球状星团的引力势阱中心, 并在星团中心形成一个主要由黑洞组成的子星团。此黑洞子星团将主导着星团中的动力学碰撞过程, 成为球状星团动力学演化中的主要能量来源^[16]。其次, 由于置换碰撞过程对天体质量的依赖性, 孤立的黑洞在与其他双星碰撞时将有极大的概率置换掉其中质量较小的子星, 因而“黑洞燃烧”过程可以抑制“双星燃烧”过程的产物。理论计算表明, 球状星团中恒星级黑洞的数目越多, 动力学形成 DNS、LMXBs、MSPs、BSS 等天体的数目就越少^[17-19]。

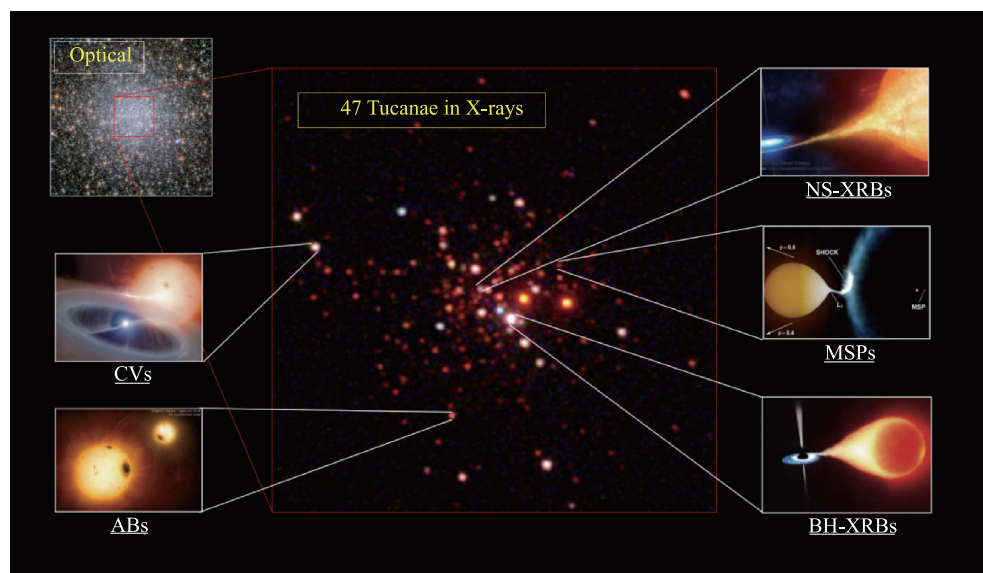


图 2 球状星团杜鹃座 47 (47 Tucanae/NGC 104) 的光学 (Telescope/HST) 与 X 射线 (Telescope/Chandra) 深度曝光图像。X 射线成像数据显示, 杜鹃座 47 中许多的主序双星系统都被“双星燃烧”过程转化成了密近双星系统, 因此在星团的中心形成了大量的微弱 X 射线电源。结合射电、光学、紫外与 X 射线等多波段光变数据, 人们在此星团中证认出了一个 BH-XRB 和多颗 NS-XRBs 候选体、数十颗 MSPs 和 CVs, 以及大量 ABs 等奇异天体。本图中杜鹃座 47 的 X 射线成像数据引用于文献^[7], 部分 X 射线源证认来自于文献^[8]

Fig. 2 Optical (Telescope/HST) and X-ray (Telescope/Chandra) depth-exposure images of the globular cluster 47 Tucanae (47 Tucanae/NGC 104). X-ray imaging data show that many of the main-sequence binary systems in 47 Tucanae were converted into dense binary systems by the “binary burning” process. The process converted many of the main-sequence binary systems in 47 Azalea into close binary systems, resulting in the formation of a large number of faint X-ray sources at the center of the cluster. Combining radio, optical, ultraviolet and X-ray light-variation data, a BH-XRB and several NS-XRBs candidates, dozens of MSPs and CVs, as well as a large number of exotic objects such as ABs have been recognized in this cluster. The X-ray imaging data of 47 Azalea in this figure are cited in Ref^[i], and some of the X-ray source identification is from Ref^[ii]

除了能有效形成纯引力波源外, 致密星团中“黑洞燃烧”过程的另一个重要特征是并合后的黑洞还可能继续参加动力学碰撞, 周而复始地重复并合过程并快速增加质量 (图 3), 形成中等质量黑洞 (IMBH) 乃至超大质量黑洞 (SMBH)。决定黑洞质量增长的因素之一是“黑洞燃烧”过程中的动力学抛射。当双黑洞与第三天体发生密近碰撞时, 双黑洞的轨道间距越小, 动力学碰撞过程就越剧烈 (双星的轨道束缚能提取效率 $\Delta |E_b| \propto |E_b|$), 碰撞结束时双黑洞就将受到的更大的反冲速度。此外, 双黑洞并合时非对称的引力辐射也可能对并合后的黑洞产生一个反冲速度^[20], 这些过程都可能将黑洞抛射出球状星团, 中止“黑洞燃烧”循环以及质量增长过程。

从以上原理出发, 不难看出致密星团环境中黑

洞通过动力学碰撞与并合增长质量的过程还高度依赖于寄主星团的逃逸速度。有关黑洞质量与其环境共同演化最著名的例子来自于近邻星系中的 SMBH, 即星系中心 SMBH 的质量 M 与其寄主星系核球中恒星的弥散速度 σ 高度相关。如果将此 M - σ 关系延伸到低质量端, 将暗示着球状星团中也能形成中 IMBH。然而, 无论是通过直接探测 IMBH 吸积气体所产生的射电^[21] 或 X 射线辐射^[22], 还是通过间接测量 IMBH 与寄主星团的动力学耦合效应^[23], 人们仍然没有在银河系球状星团中找到 IMBH 存在的确凿证据^[24]。

4 黑洞与寄主星团的动力学耦合及其可观测效应

尽管黑洞对星团的动力学演化意义重大, 人们

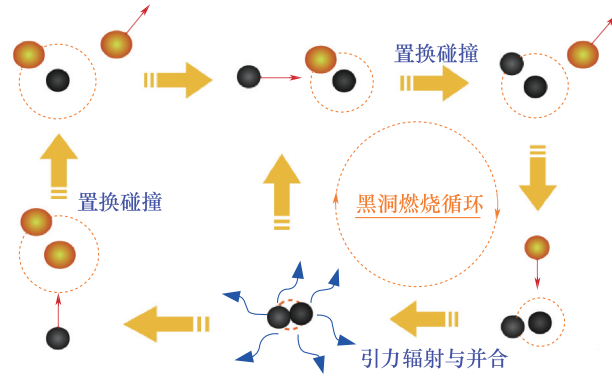


图3 球状星团中的黑洞燃烧示意图。经过两次置换碰撞,星团中的恒星级黑洞能将一颗主序双星系统转化为双黑洞系统。双黑洞系统的动力学碰撞过程一方面能为球状星团的演化提供能量,也能有效形成纯引力波源天体。如果黑洞在碰撞或并合过程中不被抛射出寄主星团,黑洞燃烧过程将能在星团中循环往复地进行下去,实现黑洞质量的显著增长

Fig. 3 Schematic of a black hole burning in a globular cluster. After two permutation collisions, a stellar black hole in a cluster can transform a main sequence binary system into a binary black hole system. The kinetic collision process of a binary black hole system can not only provide energy for the evolution of globular clusters, but also effectively form pure gravitational wave source objects. If the black holes are not ejected from the host clusters during the collision or merger process, the black hole burning process can continue cyclically in the clusters, achieving a significant increase in the black hole mass

对银河系球状星团中是否还存在大量恒星级黑洞却有着比较曲折的认识过程。早期的 N 体模拟显示,恒星级黑洞通过质量演化分层效应沉聚到星团中心后,形成的黑洞子星团将更加致密,两体弛豫时标也要远远小于寄主星团的两体弛豫时标,因此系统可能是动力学不稳定(Spitzer 不稳定性)的^[25]。黑洞子星团将迅速演化到引力热坍缩,并在坍缩过程中产生大量的密近双黑洞,双黑洞与其他黑洞的动力学碰撞将导致几乎所有的黑洞在 $\sim 10^9$ 年内被抛射出球状星团^[26,27]。这导致长期以来人们都倾向于认为银河系球状星团中不存在大量恒星级黑洞。直到近十多年来通过射电与 X 射线观测在多个球状星团中发现了多颗 BH-LMXB 候选体^[9-12],特别是通过光学视向速度法在同一个星团(NGC 3201)中发现了 3 对 BH-MS 双星^[13,14]。考虑到观测选择效应,这些发现说明恒星级黑洞仍然能大量存在于银河系球状星团中。

造成上述差异的一个原因可能是 N 体模型过于简化。受限于计算能力,早期的 N 体模拟粒子总数普遍较小($N \sim 10^4$)且粒子质量分布模型简单,由少量恒星级黑洞组成的黑洞子星团在寄主星团中心形成后,来不及与寄主星团中的普通恒星达成热耦合,自身就会发生引力热坍缩。近十余年来人们开始具备模拟 $N \sim 10^{5-6}$ 系统的能力,并能合理地

考虑恒星、双星的演化过程以及它们产生的恒星级黑洞质量分布。计算显示大量黑洞可以和寄主星团长期共存演化超过 10^{10} 年^[28,29],模拟演化的关键特征之一是恒星级黑洞之间也能产生质量演化分层现象:少数大质量黑洞将聚集在星团中心形成双黑洞系统,它们能通过“黑洞燃烧”过程为整个星团提供能量,有效地抑制黑洞子星团的引力热坍缩;而绝大多数质量较小的黑洞都将以单星的方式存在,它们在星团中的径向分布更为延展,能与寄主星团中的普通恒星充分混合并达成有效的热耦合,这将抑制 Spitzer 不稳定的发生。在整个演化过程中,动力学过程优先将大质量的黑洞抛射出球状星团,这不会造成整个星团动力学结构的巨大变化,因而系统是能够长期稳定存在的^[30]。

在观测上如何限定球状星团中的黑洞一直是此领域的研究难点。通过测量并拟合球状星团中可见恒星的引力质量与速度弥散径向分布,是人们推断星团中是否还存在不可见 IMBH 或大量恒星级黑洞并估算它们引力质量的常见方法之一^[31]。然而,球状星团中恒星的速度弥散很低($\sigma \sim 10 \text{ km/s}$),而不可见天体的引力质量占比又很小($\sim 10^{-2}$ 量级),这导致测量精度不高且难以推广到大多数球状星团。目前利用此方法只能对少数太阳系附近的球状星团进行观测限制。一些

作者提议可以利用背景恒星与寄主星团中黑洞产生的微引力透镜现象来限制球状星团中恒星级黑洞的数目与性质。然而,此方法需要对致密的星团核球进行充分的解析成像,并辅以长期(以年为时标)的连续测光观测,才有可能在包含多达数千颗恒星级黑洞的星团中检测到微引力透镜信号^[32]。

黑洞与球状星团动力学耦合所产生的可观效应,或许可以帮助解决此问题。首先,恒星级黑洞与寄主星团的动力学耦合将显著地改变星团的结构参数。模拟显示,“黑洞燃烧”过程产生的能量将能有效地驱动寄主星团中的可见恒星不断向外膨胀^[33,34],导致星团具有较大的核球半径与较小的中心恒星密度,星团的动力学年龄也显得更年轻^[35,36]。反之,当星团中的恒星级黑洞慢慢被耗尽,可见恒星将逐渐向中心收缩,直到演化成动力学年老的中心坍缩球状星团^[37]。此外,恒星级黑洞子星团与寄主星团中质量较重可见天体之间的引力散射也能有效地抑制它们的质量演化分层效应。如果没有黑洞子星团,星团中质量较大的天体,例如 BSS、LMXB、MSPs、CVs 以及主序双星等,都将下沉并聚集到星团的中心。即使是普通上半主序恒星,它们在星团中的径向分布与下半主序恒星也会有所差异。数值模拟表明,恒星级黑洞的数目越多,寄主星团中上半主序恒星与下半主序恒星就混合得越均匀,反之则能观测到两者之间也能产生明显的质量演化分层现象,其程度与恒星级黑洞的数目成反比^[38]。利用这些原理,结合动力学模拟对星团的观测结果进行拟合,人们估算许多银河系球状星团中仍然存在着大量的恒星级黑洞,它们的数目在可以高达数百颗,总质量介于 $10^0 \sim 10^3 M_\odot$ 之间^[39,40]。

再者,正如前文所述,双星的置换碰撞高度依赖于入射天体的质量。由于恒星级黑洞的质量要大于球状星团中的其他天体,因而黑洞子星团的存在将有效抑制寄主星团中的“双星燃烧”过程,并导致其形成产物丰度的降低。观测发现许多球状星团累计的 X 射线辐射率要比银河系星系场低,这表明星团中许多原初主序双星都被动力学作用破坏了,导致它们不能通过正常的双星演化通道形成激变变星和磁活动双星^[41,42],产生与银河系星系场相

当的 X 射线辐射率。这些星团普遍是动力学年轻且中心恒星密度很低的球状星团,因此原初双星的瓦解过程很可能与黑洞的存在有关。最后,由于球状星团中心产生的能量都将全部用来驱动星团外围不断膨胀,因此,球状星团与寄主星系的潮汐剥离效应也可以用来帮助鉴定星团中是否存在“黑洞燃烧”产能过程的观测证据之一。

作为典型例子,球状星团 Omega Centauri 是目前银河系中已知的质量最大的星团($M \sim 3.6 \times 10^6 M_\odot$)。恒星速度径向分布测量表明 Omega Centauri 中可能包含高达 $\sim 1.6 \times 10^5 M_\odot$ 的不可见引力物质,它们极有可能是由大量恒星级黑洞组成的^[31]。X 射线观测发现球状星团 Omega Centauri 中 X 射线源空间分布弥散,且 X 射线源的丰度要远低于银河系星系场以及其他球状星团,这证明 Omega Centauri 中可见天体的质量演化分层效应以及“双星燃烧”过程都明显被黑洞子星团抑制了。然而,作为一个中心恒星密度较低的球状星团,Omega Centauri 绕银心逆行运动的轨道周期为 $\sim 0.2 \text{ Gyr}$,其要远小于星团中心核球的两体弛豫时标($t_{rc} \sim 4 \text{ Gyr}$)。此外,偏心轨道运动预计 Omega Centauri 在远银心点的潮汐半径($R_t \sim 200 \text{ pc}$)要比在近银心轨道处($R_t \sim 70 \text{ pc}$)大三倍左右,但观测发现 Omega Centauri 当前在远银心轨道附近却有着显著的潮汐剥离星流^[43]。这些观测证据说明黑洞子星团必然主导着 Omega Centauri 中心的产能过程,“黑洞燃烧”注入的能量正不断驱动着星团 Omega Centauri 的外围快速膨胀,使它即使处在远银心轨道上也能产生潮汐剥离星流^[44]。另一个典型例子是球状星团 Palomar 5。尽管 Palomar 5 的总质量较小($M \sim 1.34 \times 10^4 M_\odot$),星团中心核球恒星密度也很低($\rho_c \sim 0.16 M_\odot \text{ pc}^{-3}$),但 Palomar 5 却有着银河系中最蔚为壮观的潮汐剥离星流^[45]。数值模拟显示恒星级黑洞占据着 Palomar 5 大约 20% 的总质量,“黑洞燃烧”过程正在驱动着星团快速膨胀,导致大量普通恒星被银河系潮汐作用快速剥离出 Palomar 5^[46]。未来的引力波探测器或许能帮助观测验证这些球状星团中的“黑洞燃烧”过程,并进一步检测它们的“燃烧”纯引力波源产物。

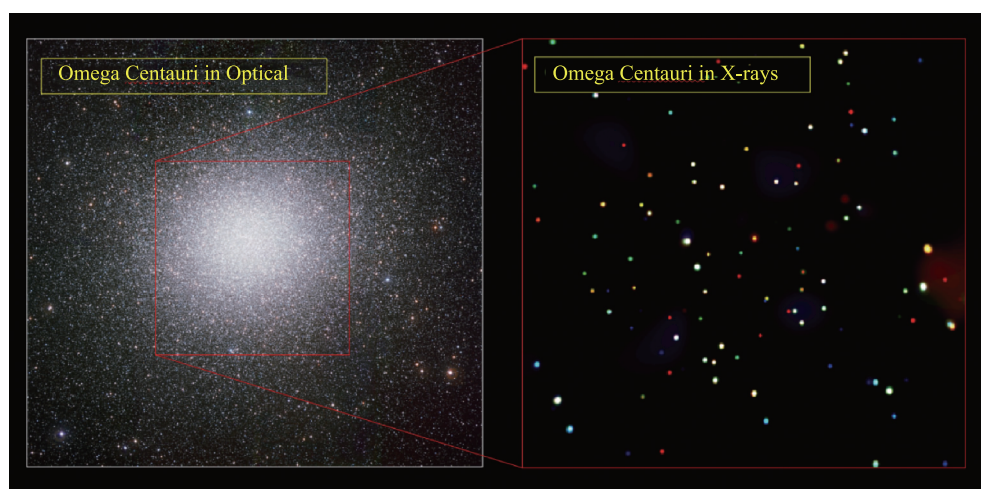


图4 银河系球状星团 Omega Centauri/NGC 5139 的光学 (Telescope/MPG/ESO 2.2-metre telescope) 与 X 射线 (Telescope/Chandra) 深度曝光图像。恒星速度弥散径向分布测量显示 Omega Centauri 中不可见引力物质的占比高达 $\sim 4.5\%$, 它们极有可能是由大量恒星级黑洞组成的。X 射线观测显示 Omega Centauri 中微弱 X 射线源 (主要是 CVs 和 ABs) 空间分布弥散且丰度要比银河系星场以及其他球状星团都要低, 这暗示着由大量恒星级黑洞组成的黑洞子星团不仅能抑制 Omega Centauri 中的双星燃烧过程, 还抑制了此星团中可见天体的质量演化分层现象

Fig. 4 Optical (Telescope/MPG/ESO 2.2-metre telescope) and X-ray (Telescope/Chandra) depth-exposure images of the Galactic globular cluster Omega Centauri/NGC 5139. Stellar velocity dispersive radial distribution measurements show that Omega Centauri contains up to $\sim 4.5\%$ of invisible gravitational material, which is most likely composed of a large number of stellar black holes, and X-ray observations show that the spatial distribution of faint X-ray sources (mainly CVs and ABs) in Omega Centauri is diffuse and less abundant than that in the Milky Way galactic field as well as other globular clusters, suggesting that black hole subclusters composed of a large number of stellar black holes, not only suppress the binary burning process in Omega Centauri, but also inhibit the mass-evolutionary stratification of the visible objects in this cluster

5 结论

黑洞本质上是电磁辐射不可见的天体, 天文观测中对黑洞的研究往往要借助于其吸积过程产生的电磁辐射为信使, 或其引力场对伴星的轨道调制信号, 对背景天体辐射的引力透镜效应, 乃至其与致密天体旋近并合产生的引力辐射等。在球状星团中, 黑洞则能与其寄主星团通过动力学作用高度耦合在一起, 致密的星团环境一方面为黑洞捕获其他天体形成 X 射线双星、引力波源乃至中等质量黑洞等天体提供了绝佳的场所, 另一方面黑洞的动力学过程也能深刻地改变寄主星团的动力学结构与演化进程, 并影响星团中可见双星的演化、空间分布、丰度等特征, 这反过来也为研究黑洞在球状星团中的动力学演化过程带来许多观测可能。

利益冲突: 作者声明无利益冲突。

参考文献 (References)

- [1] Shao Y, Li X. -D. Population synthesis of black hole binaries with compact star companions [J]. The Astrophysical Journal, 2021, 920: 81.
<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac173e>
- [2] Shao Y, Li X. -D. Population Synthesis of Black Hole Binaries with Normal-star Companions. I. Detached Systems, The Astrophysical Journal, 2019, 885, 151.
<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab4816>
- [3] Heggie, D. & Hut, P. The Gravitational Million-Body Problem: A Multidisciplinary Approach to Star Cluster Dynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 372.
<https://doi.org/10.1063/1.1768676>
- [4] Hills J. G. Encounters between binary and single stars and their effect on the dynamical evolution of stellar systems. The Astronomical Journal, 1975, 80, 809.
<http://dx.doi.org/10.1086/111815>

- [5] Heggie D. C. Binary Evolution in Stellar Dynamics, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1975, 173, 729.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/173.3.729>
- [6] Fregeau J. M., Gurkan M. A., Joshi K. J., Rasio F. A. "Monte Carlo Simulations of Globular Cluster Evolution. III. Primordial Binary Interactions", *The Astrophysical Journal*, 2003, 593, 772.
<http://dx.doi.org/10.1086/376593>
- [7] Cheng, Z., Li, Z., Li, X., et al. Exploring the Mass Segregation Effect of X-Ray Sources in Globular Clusters: The Case of 47 Tucanae, *The Astrophysical Journal*, 2019, 876, 59.
<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab1593>
- [8] Bao, T., Li, Z., & Cheng, Z. Periodic X-ray sources in the massive globular cluster 47 Tucanae: Evidence for dynamically formed cataclysmic variables, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, 521, 4257.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stad836>
- [9] Strader J., Chomiuk L., Maccarone T. J., et al. Two stellar-mass black holes in the globular cluster M22, *Nature*, 2012, 490, 71.
<https://doi.org/10.1038/nature11490>
- [10] Chomiuk L., Strader J., Maccarone T. J., et al. A radio-selected black hole X-ray binary candidate in the milky way globular cluster M62, *The Astrophysical Journal*, 2013, 777, 69.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/777/1/69>
- [11] Miller-Jones J. C. A., Strader J., Heinke C. O., et al. Deep radio imaging of 47 Tuc identifies the peculiar X-ray source X9 as a new black hole candidate, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 453, 3918.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stv1869>
- [12] Shishkovsky L., Strader J., Chomiuk L., et al. The MAVERIC Survey: A Red Straggler Binary with an Invisible Companion in the Galactic Globular Cluster M10, *The Astrophysical Journal*, 2018, 855, 55.
<http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aaadb1>
- [13] Giesers B., Dreizler S., Husser T., -O., et al. A detached stellar-mass black hole candidate in the globular cluster NGC 3201, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 475, L15.
<https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx203>
- [1] Giesers B., Kamann S., Dreizler S., et al. A stellar census in globular clusters with MUSE: Binaries in NGC 3201, *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 632, A3.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936203>
- [15] Kremer K., Ye C. S., Chatterjee S., Rodriguez C. L., Rasio F. A. The Role of "black hole burning" in the evolution of dense star clusters, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2020, 351, 357.
<https://doi.org/10.1017/S1743921319007269>
- [16] Breen P. G., Heggie D. C. Dynamical evolution of black hole subsystems in idealized star clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 432, 2779.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stt628>
- [17] Kremer K., Ye C. S., Rui N. Z., Weatherford N. C., Chatterjee S., et al. Modeling Dense Star Clusters in the Milky Way and Beyond with the CMC Cluster Catalog, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2020, 247, 48.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab7919>
- [18] Ye C. S., Fong W. fai, Kremer K., et al. On the Rate of Neutron Star Binary Mergers from Globular Clusters, *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 888, L10.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab5dc5>
- [19] Ye C. S., Kremer K., Chatterjee S., Rodriguez C. L., Rasio F. A. Millisecond Pulsars and Black Holes in Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 2019, 877, 122.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1b21>
- [20] Holley-Bockelmann K., Gültekin K., Shoemaker D., Yunes N. Gravitational Wave Recoil and the Retention of Intermediate-Mass Black Holes, *The Astrophysical Journal*, 2008, 686, 829.
<https://doi.org/10.1086/591218>
- [21] Tremou E., Strader J., Chomiuk L., Shishkovsky L., et al. The MAVERIC Survey: Still No Evidence for Accreting Intermediate-mass Black Holes in Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 2018, 862, 16.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac9b9>
- [22] Su Z., Li Z., Hou M., Zhang M., Cheng Z. The Galactic Center: A Study of Stellar Dynamics, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 516, 1788.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stac2345>
- [23] Kiziltan B., Baumgardt H., Loeb A. An intermediate-mass black hole in the centre of the globular cluster 47 Tucanae, *Nature*, 2017, 542, 203.
<https://doi.org/10.1038/nature21361>
- [24] Mann C. R., Richer H., Heyl J., Anderson J., et al. A Multimass Velocity Dispersion Model of 47 Tucanae Indi-

- cates No Evidence for an Intermediate-mass Black Hole, *The Astrophysical Journal*, 2019, 875, 1.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0e6d>
- [25] Spitzer L. Equipartition and the Formation of Compact Nuclei in Spherical Stellar Systems, *The Astrophysical Journal Letters*, 1969, 158, L139.
<http://dx.doi.org/10.1086/180451>
- [26] Kulkarni S. R., Hut P., McMillan S. Stellar black holes in globular clusters, *Nature*, 1993, 364, 421.
<https://doi.org/10.1038/364421a0>
- [27] Sigurdsson S., Hernquist L. Primordial black holes in globular clusters, *Nature*, 1993, 364, 423.
<https://doi.org/10.1038/364423a0>
- [28] Morscher M., Umbreit S., Farr W. M., Rasio F. A. Retention of stellar-mass black holes in globular clusters, *The Astrophysical Journal Letters*, 2013, 763, L15.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/763/1/L15>
- [29] Wang L., Spurzem R., Aarseth S., et al. The DRAGON simulations: globular cluster evolution with a million stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458, 1450.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stw274>
- [30] Morscher M., Pattabiraman B., Rodriguez C., Rasio F. A., Umbreit S. The dynamical evolution of stellar black holes in globular clusters, *The Astrophysical Journal*, 2015, 800, 9.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/800/1/9>
- [31] Baumgardt H., He C., Sweet S. M., Drinkwater M., et al. No evidence for intermediate-mass black holes in the globular clusters ω Cen and NGC 6624, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 488, 5340.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stz2060>
- [32] Zaris, J., Veske, D., Samsing, J., et al. Constraining Black Hole Populations in Globular Clusters Using Microlensing: Application to Omega Centauri, *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 894, L9.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab89a3>
- [33] Mackey A. D., Wilkinson M. I., Davies M. B., Gilmore G. F. The effect of stellar-mass black holes on the structural evolution of massive star clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 2007, 379, L40.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2007.00330.x>
- [34] Mackey A. D., Wilkinson M. I., Davies M. B., Gilmore G. F. Black holes and core expansion in massive star clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, 386, 65.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13052.x>
- [35] Giersz M., Askar A., Wang L., Hypki A., Leveque A., Spurzem R. MOCCA survey data base- I. Dissolution of tidally filling star clusters harbouring black hole subsystems, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 487, 2412.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stz1460>
- [36] Arca Sedda, M., Askar, A., & Giersz, M. MOCCA-Survey Database - I. Unravelling black hole subsystems in globular clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 479, 4652.
<https://doi.org/10.1093/mnras/sty1859>
- [37] Kremer K., Rui N. Z., Weatherford N. C., et al. White Dwarf Subsystems in Core-Collapsed Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 2021, 917, 28.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac06d4>
- [38] Weatherford, N. C., Chatterjee, S., Rodriguez, C. L., et al. Predicting Stellar-mass Black Hole Populations in Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 2018, 864, 13.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad63d>
- [39] Askar A., Arca Sedda M., Giersz M. MOCCA-SURVEY Database I: Galactic globular clusters harbouring a black hole subsystem, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 478, 1844.
<https://doi.org/10.1093/mnras/sty1186>
- [40] Weatherford N. C., Chatterjee S., Kremer K., Rasio F. A. A Dynamical Survey of Stellar-mass Black Holes in 50 Milky Way Globular Clusters, *The Astrophysical Journal*, 2020, 898, 162.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9f98>
- [41] Cheng, Z., Li, Z., Xu, X., et al. "The Galactic Center: A Study of Stellar Dynamics and Black Hole Populations", *The Astrophysical Journal*, 2018, 869, 52.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaeb1e>
- [42] Heinke, C. O., Ivanov, M. G., Koch, E. W., et al. The X-ray emissivity of low-density stellar populations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 492, 5684.
<https://doi.org/10.1093/mnras/staa194>
- [43] Ibata, R. A., Bellazzini, M., Malhan, K., et al. Identification of the long stellar stream of the prototypical mas-

- sive globular cluster ω Centauri, *Nature Astronomy*, 2019, 3, 667.
<https://doi.org/10.1038/s41550-019-0751-x>
- [44] Cheng Z, Li Z, Wang W, Li X, Xu X. Exploring the Mass Segregation Effect of X-Ray Sources in Globular Clusters. IV. Evidence of Black Hole Burning in ω Centauri, *The Astrophysical Journal*, 2020, 904, 198.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbdfe>
- [45] Odenkirchen M, Grebel E. K, Rockosi C. M, Dehnen W, et al. Detection of Massive Tidal Tails around the Globular Cluster Palomar 5 with Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data, *The Astrophysical Journal Letters*, 2001, 548, L165.
<https://doi.org/10.1086/319095>
- [46] Gieles M, Erkal D, Antonini F, Balbinot E, Penarrubia J. A supra-massive population of stellar-mass black holes in the globular cluster Palomar 5, *Nature Astronomy*, 2021, 5, 957.
<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01392-2>

Black Holes in Globular Clusters

CHENG Zhongqun^{1,2}

(1. Department of Astronomy, School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. WHU-NAOC Joint Center for Astronomy, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: Black holes are the laboratory for extreme physics research in the universe, and the detection of black holes is one of the most cutting-edge international scientific goals at present. Globular clusters are old, self-gravity-bound object systems in the Milky Way that contain millions of stars with a high stellar densities inside. Hundreds of pulsar objects have been observed in globular clusters, but the existence of black holes in globular clusters remains an unsolved mystery. A globular cluster may have an intermediate-mass black hole at its centre, with masses ranging from 1,000 to 10,000 times solar masses. At the same time, there may be a large number of stellar black holes in globular clusters, which will affect the evolution of globular clusters and form some special objects in globular clusters, which can be observed and confirmed by astronomical observation equipment. This paper will focus on the possible observational features of the presence of black holes in globular clusters and their effects on the properties of globular clusters. Black holes are coupled with their host globular clusters through dynamics, which are important sites for the formation of black hole X-ray binaries and gravitational wave sources, and black holes change the dynamical structure and evolutionary processes of their host clusters. Therefore, searching for X-ray sources, detecting gravitational wave signals, and studying the characteristics of globular clusters are important astronomical evidence for detecting black holes in globular clusters.

Keywords: Black holes; globular clusters

DOI: 10.48014/cpr.20230527001

Citation: CHENG Zhongqun. Black holes in globular clusters[J]. Chinese Physics Review, 2023, 1(1): 1-11.

Copyright © 2023 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

