



天鹅座X-1中的恒星级黑洞的新测量

王善钦*

广西大学物理科学与工程技术学院, 广西相对论天体物理重点实验室, 南宁 530004

*联系人, E-mail: shanqinwang@gxu.edu.cn

收稿日期: 2021-05-10; 接受日期: 2021-05-17; 网络出版日期: 2021-07-13

国家自然科学基金(编号: 11963001)资助项目

摘要 对恒星级黑洞的研究是当前天体物理学最重要的课题之一。过去几十年, 天文学家通过对X射线双星的观测与来自双黑洞并合产生的引力波信号, 确定了一些恒星级黑洞并确定了它们的一些物理性质。最近, 一个团队重新测定了X射线双星天鹅座X-1的精确距离, 并在此基础上确定了其中的黑洞V1357 Cyg的质量、自转及其他重要性质。这项新的研究表明V1357 Cyg的质量为 $(21.2 \pm 2.2) M_{\odot}$, 是截至目前被发现的质量最大的位于X射线双星中的黑洞。它的质量挑战了当前的大质量双星演化模型。未来对类似的位于X射线双星中的黑洞的精确测量将进一步加深人们对恒星演化模型与恒星级黑洞物理性质的理解。

关键词 恒星级黑洞, X射线双星, 恒星演化模型

PACS: 04.70.Bw, 97.60.Lf, 97.80.Jp, 87.23.-n

黑洞是宇宙中最致密的天体之一, 其存在性是广义相对论的必然推论之一^[1]。根据质量大小, 当前已经被观测证实的黑洞分为三大类: 恒星级黑洞、中等质量黑洞与超大质量黑洞。2020年的诺贝尔物理学奖被授予研究黑洞形成理论^[1]与银河系中心“大质量致密天体”^[2,3]的三位学者——人们普遍认为, 银河系中心的大质量致密天体是超大质量黑洞。他们的工作促进了人类对引力与时空本质的理解^[4]。

这三类黑洞中, 恒星级黑洞具有特殊的重要性: 它们并合后会形成中等质量黑洞, 它们的吸积与并合最终形成了超大质量黑洞。当前的恒星演化理论^[5]认为, 大质量恒星演化到后期, 可能爆发为超新星, 留下中子星或恒星级黑洞。最近的一些观测与研究表明^[6,7],

一部分大质量恒星演化到后期, 可能不经历超新星爆发, 直接塌缩为恒星级黑洞。

寻找恒星级黑洞的方法有两大类: 通过X射线双星的观测与引力波的观测。利用前者, 天文学家确认了一些恒星级黑洞并得到了它们的一些重要参数; 利用后者, 地面上的引力波探测器(如LIGO, VIRGO)探测到至少56例引力波^[8], 其中大多数为黑洞-黑洞双星系统并合事件发出。

在这些被确认的恒星级黑洞中, 位于天鹅座X-1(Cygnus X-1)中的黑洞V1357 Cyg具有特殊的重要性: 它是第一个被认为是恒星级黑洞的天体^[9,10], 也是被研究得最多的恒星级黑洞。但是, 由于天鹅座X-1的距离长期以来无法被精确地确定(范围在1.8–2.4 kpc^[11]),

引用格式: 王善钦. 天鹅座X-1中的恒星级黑洞的新测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 099532
Wang S-Q. New measurement for the stellar mass black hole in Cygnus X-1 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 099532, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0139](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0139)

据此计算出的V1357 Cyg的质量范围的不确定性也较大.

2011年, Reid等人^[12]使用甚长基线阵列(The Very Long Baseline Array, VLBA)测出天鹅座X-1的视差为 (0.54 ± 0.03) mas, 据此得到其距离为 $1.86^{+0.12}_{-0.11}$ kpc; Orosz等人^[13]测出V1357 Cyg与其伴星HDE 226868的质量分别为 $(14.8 \pm 1.0) M_{\odot}$ 与 $(19.2 \pm 1.9) M_{\odot}$, 这意味着V1357 Cyg确实是一个恒星级黑洞; Gou等人^[14]测出V1357 Cyg的无量纲自转速度 a^* 超过0.92.

2013年, GAIA卫星测出了天鹅座X-1的视差是 (0.42 ± 0.03) mas, 加上约0.05 mas的零点校正值, 得到的视差为 (0.47 ± 0.04) mas, 是VLBA得到的值的0.87倍, 据此计算出的距离为此前的1.15倍. 距离的变化会使这个系统被推断出来的众多物理参数发生变化.

为解决这个矛盾, Miller-Jones等人用VLBA重测天鹅座X-1的视差, 并重新计算对应的物理参数. 2021年2月19日, Miller-Jones等人^[15]宣布: 天鹅座X-1的距离为 $2.22^{+0.18}_{-0.17}$ kpc, 是此前Reid团队得到的值的1.2倍, 与GAIA组得到的距离吻合.

结合过去的数据, Miller-Jones等人计算出V1357 Cyg与其伴星的质量分别为 $(21.2 \pm 2.2) M_{\odot}$ 与 $40.6^{+7.7}_{-7.1} M_{\odot}$, 分别是此前值的1.4倍与2倍. 这意味着, V1357 Cyg的质量大于M33 X-7中黑洞的质量($(15.65 \pm 1.45) M_{\odot}$)^[16], 是位于X射线双星中质量最大的黑洞. 此外, Miller-Jones等人还推断出天鹅座X-1的半长轴为 (0.160 ± 0.013) AU.

V1357 Cyg是由一颗质量为 $55\text{--}75 M_{\odot}$ 的大质量恒星演化而来^[17]. 由于其伴星的金属丰度约为太阳金属丰度的2倍, 可推测出其前身星的金属丰度也较高, 星风损失率较大, 最后不可能形成如此高质量的黑洞. 此外, 由于这颗黑洞的极限吸积率为 $2 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, 而V1357 Cyg形成的时间可能只有数万年^[18], 因此其吸积的物质不超过 $0.01 M_{\odot}$, 对V1357 Cyg质量的影响可忽略.

为解决此问题, Neijssel等人^[17]假定: V1357 Cyg的

前身星与其伴星同时启动核心的氢聚变反应; 主星的氢在演化早期被伴星吸积, 在氦核心内部启动氦聚变反应后露出氦包层, 成为一颗氦星. 氦星的核心持续聚变为铁核, 并塌缩为黑洞V1357 Cyg; 在这个过程中, 伴星始终为氢主序星.

以此图景为基础, Neijssel等人^[17]使用双星演化代码得到的V1357 Cyg前身星的星风损失率比此前的理论值低5%–40%. 假定它的金属丰度为0.03, 则它演化到末期时的质量为 $22 M_{\odot}$. 另一方面, 此前的观测已表明它在死亡时喷发出的物质不超过 $2 M_{\odot}$. 因此, 可以推断出它最终形成的黑洞质量可以超过 $20 M_{\odot}$. 由于它死亡前的喷发并不猛烈, 它喷发出的物质会被伴星有效地吸积.

根据最新的质量值与过去的X射线观测数据, Miller-Jones等人^[15]计算出V1357 Cyg的 a^* 超过0.9696, 成为同类黑洞中的记录保持者. 此前的理论研究^[19,20]表明, 静止黑洞吸积的物质质量必须至少等于其初始质量, 才可使 a^* 从0变为接近1. V1357 Cyg吸积的总质量不超过 $0.01 M_{\odot}$, 远小于当前测出的总质量. 为解释 a^* 的演化, Zhao等人^[21]使用完全相对论性薄盘模型拟合了热盘成分, 证明不考虑反力矩作用时, V1357 Cyg的 a^* 的值可以超过0.9985.

对天鹅座X-1及其中的黑洞V1357 Cyg的一系列新研究不仅使人类得到了天鹅座X-1的更精确距离, 更让人类认识到V1357 Cyg的特殊之处: 它不仅是X射线双星中的最大黑洞, 也是自转最快的黑洞.

同样重要的是, 它的质量挑战了当前的恒星演化模型, 证明当前的恒星演化模型可能高估了大质量恒星的星风损失率. 如果星风损失率可比当前主流模型预测的星风损失率低, 那么一些位于低红移宇宙处的、金属丰度中等的恒星最终也会形成较大质量黑洞, 这样的黑洞并合会发射出高频率引力波.

将来对类似的X射线双星的物理性质的精确测量将进一步提升人们对恒星级黑洞的认识, 从而加深人类对恒星演化模型与恒星级黑洞的理解.

参考文献

- Penrose R. Gravitational collapse and space-time singularities. *Phys Rev Lett*, 1965, 14: 57–59
- Eckart A, Genzel R. Observations of stellar proper motions near the Galactic Centre. *Nature*, 1996, 383: 415–417
- Ghez A M, Duchêne G, Matthews K, et al. The first measurement of spectral lines in a short-period star bound to the galaxy's central black hole:

- A paradox of youth. *Astrophys J*, 2003, 586: L127–L131, arXiv: [astro-ph/0302299](#)
- 4 Yu Q. Black holes and the supermassive compact object at the galactic center: Multi-arts of thought and nature. *Innovation*, 2020, 1: 100063, arXiv: [2012.03815](#)
- 5 Heger A, Fryer C L, Woosley S E, et al. How massive single stars end their life. *Astrophys J*, 2003, 591: 288–300, arXiv: [astro-ph/0212469](#)
- 6 Adams S M, Kochanek C S, Gerke J R, et al. The search for failed supernovae with the Large Binocular Telescope: Confirmation of a disappearing star. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 468: 4968–4981, arXiv: [1609.01283](#)
- 7 Basinger C M, Kochanek C S, Adams S M, et al. The search for failed supernovae with the large Binocular Telescope: N6946-BH1, still no star. arXiv: [2007.15658](#)
- 8 Wu S C, Cao Z J. GW190412: Gravitational wave from an unequal mass binary black hole with precession. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 129532
- 9 Webster B L, Murdin P. Cygnus X-1—A spectroscopic binary with a heavy companion? *Nature*, 1972, 235: 37–38
- 10 Bolton C T. Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868. *Nature*, 1972, 235: 271–273
- 11 Ziolkowski J. Evolutionary constraints on the masses of the components of the HDE 226868/Cyg X-1 binary system. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 358: 851–859, arXiv: [astro-ph/0501102](#)
- 12 Reid M J, McClintock J E, Narayan R, et al. The trigonometric parallax of Cygnus X-1. *Astrophys J*, 2011, 742: 83, arXiv: [1106.3688](#)
- 13 Orosz J A, McClintock J E, Aufdenberg J P, et al. The mass of the black hole in Cygnus X-1. *Astrophys J*, 2011, 742: 84, arXiv: [1106.3689](#)
- 14 Gou L, McClintock J E, Reid M J, et al. The extreme spin of the black hole in Cygnus X-1. *Astrophys J*, 2011, 742: 85, arXiv: [1106.3690](#)
- 15 Miller-Jones J C A, Bahramian A, Orosz J A, et al. Cygnus X-1 contains a 21-solar mass black hole—Implications for massive star winds. *Science*, 2021, 371: 1046–1049, arXiv: [2102.09091](#)
- 16 Orosz J A, McClintock J E, Narayan R, et al. A 15.65-solar-mass black hole in an eclipsing binary in the nearby spiral galaxy M 33. *Nature*, 2007, 449: 872–875, arXiv: [0710.3165](#)
- 17 Neijssel C J, Vinciguerra S, Vigna-Gómez A, et al. Wind mass-loss rates of stripped stars inferred from Cygnus X-1. *Astrophys J*, 2021, 908: 118, arXiv: [2102.09092](#)
- 18 Russell D M, Fender R P, Gallo E, et al. The jet-powered optical nebula of Cygnus X-1. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 376: 1341–1349, arXiv: [astro-ph/0701645](#)
- 19 Bardeen J M, Carter B, Hawking S W. The four laws of black hole mechanics. *Commun Math Phys*, 1973, 31: 161–170
- 20 Thorne K S. Disk-accretion onto a black hole. II. Evolution of the hole. *Astrophys J*, 1974, 191: 507–520
- 21 Zhao X, Gou L, Dong Y, et al. Re-estimating the spin parameter of the black hole in Cygnus X-1. *Astrophys J*, 2021, 908: 117, arXiv: [2102.09093](#)

New measurement for the stellar mass black hole in Cygnus X-1

WANG Shan-Qin^{*}

*Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, School of Physical Science and Technology, Guangxi University,
Nanning 530004, China*

The study on stellar mass black holes is an important issue in astrophysics. Over the past decades, astronomers have confirmed some stellar mass black holes and determined their physical properties via the observations of the X-ray binaries and the gravitational waves emitted from the mergers of binary black holes. Recently, a research team re-measured the precise distance of Cygnus X-1 (an X-ray binary) and subsequently derived the values of the mass, spin, and other properties of the black hole V1357 Cyg in Cygnus X-1. The results show that the mass of Cygnus X-1 is $(21.2 \pm 2.2) M_{\odot}$, indicating that V1357 is the most massive stellar mass black hole in X-ray binaries, thus challenging the existing models of massive stellar binary evolution. The future precise measurements of similar black holes in X-ray binaries would further deepen our understanding of the stellar evolution models as well as the physical properties of stellar mass black holes.

stellar mass black holes, X-ray binary stars, stellar evolution models

PACS: 04.70.Bw, 97.60.Lf, 97.80.Jp, 87.23.-n

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0139](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0139)