

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.04.07

双黑洞并合与黑洞逆向吸积

阎玮琛, 赵天宇, 曹周键

(北京师范大学 天文系, 北京 100875)

摘要: 黑洞是广义相对论预言的天体, 也是很多天文现象, 如类星体、活动星系核、喷流、吸积盘的中心引擎。根据广义相对论, 宇宙中的黑洞可以由质量和自旋两个参数来描述。对比黑洞质量的测定, 自旋的测量较为困难。但自旋的方向与很多天文现象密切相关。如果黑洞自旋方向与吸积盘的转动方向一致, 将形成正向吸积的天文现象; 反之, 如果黑洞自旋的与吸积盘的转动方向相反, 将形成逆向吸积的天文现象。利用宽线区尺度与光学光度之间的关系, 最近的研究发现了逆向吸积的可能候选体。利用双黑洞并合的物理图像提出了一种逆向吸积的物理形成机制, 并定量计算了相关的逆向吸积盘形成率。发现了超大质量双黑洞系统的质量比分布与类星体逆向吸积盘的形成率之间存在定量关系, 该定量关系可以通过未来的空间引力波探测以及逆向吸积盘的探测进行检验。

关键词: 双黑洞并合; 数值相对论; 黑洞逆向吸积

中图分类号: P145.8 **文献标识码:** A

1 引 言

类星体、活动星系核等很多天文学现象都与黑洞相关。根据黑洞的唯一性定理^[1], 描述黑洞的主要物理量包括质量和自旋。通过测量围绕黑洞运动的恒星的参数、比较黑洞附近恒星与远处恒星的速度差异、观测环绕黑洞的炙热发光带电气体盘的运动, 以及观测黑洞附近环绕的冷却气体云的动态性^[2]等方法可以估算黑洞的质量。与黑洞质量的影响相比, 自旋的影响范围较小, 所以观测上通常很难限制自旋参数。黑洞自旋的测量方法包括连续谱拟合法^[3]、Fe 谱线法^[4], 通过潮汐瓦解事件给出的X射线准周期震荡 (quasi-periodic oscillation, QPO) 来估算^[5]等。当黑洞的周围有吸积盘存在时, 我们可以用黑洞自旋参数的正负号代表黑洞自旋与吸积盘的转动方向是否一致: 一致为正, 否则为负^[3]。如果黑洞自旋与吸积盘的转动方向一致, 人们称之为正向吸积; 反之被称为逆向吸积^[6]。在已有的文献中, 人们观测到的都是正向吸积。但最近王凯等人^[7]利用宽线区尺度与光学光度之间的关系, 发现逆向吸

收稿日期: 2019-02-18; 修回日期: 2019-04-02

资助项目: 国家自然科学基金 (11690023, 11622546); 中央高校基本科研业务费专项资金

通讯作者: 曹周键, zjcao@amt.ac.cn

积的候选体。

本文用双黑洞并合的物理图像来讨论逆向吸积的形成机制^[8]，本文还研究了超大质量黑洞及其吸积的问题。双黑洞在万有引力作用下相互旋绕靠近，然后并合。在旋绕阶段，双黑洞的相互绕转产生一个轨道角动量。双黑洞各自的自旋方向可能与这个轨道角动量方向一致，也可能相反。更一般地，自旋方向还可能与轨道角动量方向成某个任意角度^[9]。对于携带吸积盘的黑洞，通过吸积接收吸积盘的角动量，黑洞自旋方向往往会越来越接近吸积盘角动量方向。文献 [6] 的结果表明，对于某些吸积模式、吸积盘的尺度及吸积盘的质量，黑洞吸积不到自身质量的 20%，黑洞的自旋方向即可变成同吸积盘角动量方向一致。但即使对于改变黑洞自旋方向较慢的吸积盘情况，当黑洞吸积自身质量超过 120% 后，黑洞的自旋方向也基本与吸积盘角动量方向一致。另外，吸积盘施加在黑洞上的引力磁力矩也会让黑洞自旋方向接近吸积盘角动量方向^[10]。基于这个物理事实，我们假定，双黑洞在相互靠近前，黑洞的自旋方向已经与吸积盘角动量方向一致^[11]。

双黑洞在靠近过程中，首先是两个吸积盘相互接触，然后是两个黑洞扫过吸积盘区域并继续靠近。这时吸积盘物质被分成三个区域：(1) 围绕两个黑洞的部分，被称为环绕盘 (circumbinary disk)；(2) 分别围绕两个黑洞的两个迷你盘 (mini disks)^[12]；(3) 在双黑洞旋绕过程中，迷你盘物质被黑洞迅速吸收，然后消失，从而形成双黑洞绕转区域与外围环绕盘间的一个相对于黑洞引力半径较大的空洞区域。双黑洞在这个空洞区域内进行几乎真空环境下的后期旋进和并合。我们假设大质量黑洞携带的吸积盘质量也较大，而大质量吸积盘的角动量将主导环绕盘的角动量，所以环绕盘的角动量方向与大质量黑洞的自旋方向一致。等到两个黑洞并合以后，并合大黑洞形成。并合大黑洞的自旋由之前双黑洞的轨道角动量和它们的各自自旋共同决定^[9]。所以，一般说来并合大黑洞的自旋方向与之前两个黑洞的自旋方向都不一样，形成自旋反转 (spin flip) 的现象^[13]。

在并合黑洞慢慢稳定下来之后，原来的环绕盘物质旋绕并掉向并合黑洞，然后形成吸积盘。如果并合黑洞的自旋方向与双黑洞中大黑洞的自旋方向一致，从而与环绕盘角动量方向一致，即与并合黑洞吸积盘的角动量方向一致，就会生成正向吸积盘；反之，逆向吸积盘就会生成。这就是双黑洞并合形成逆向吸积盘的物理机制。在第 2 章中，我们讨论在双黑洞并合形成的吸积盘系统中，反向吸积盘占有所有吸积盘系统的百分比。我们称之为逆向吸积盘的形成率。然后在第 3 章中我们讨论该定量结果在天文观测方面的应用。

本文在公式记号方面继承数值相对论界的记号习惯，并且使用几何单位制^[9]。在该单位制中，万有引力常数和光速都为 1， $G = c = 1$ 。

2 双黑洞并合物理图像下逆向吸积的形成率

基于广义相对论的动力学描述，双黑洞旋进、并合的整个过程被双黑洞的初始状态完全决定。对应地，并合过程所释放引力波，并合黑洞的动量、自旋等都被双黑洞的初始状态完全决定。虽然该动力学过程极其复杂，但数值相对论经过几十年的发展，我们已找到该动力

学过程的一些物理规律。并合黑洞的自旋由下式得到^[9]:

$$\begin{cases} \chi = \chi^0 + \chi^0 \eta (t_4 \chi^0 + t_5 \eta + t_0) + \eta (2\sqrt{3} + t_2 \eta + t_3 \eta^2) \\ q = \frac{m_2}{m_1}, \chi^0 = \frac{\chi_1 q^2 + \chi_2}{1 + q^2} \eta = \frac{q}{(1 + q)^2}, \\ t_0 = -2.8904, t_2 = -3.5171, t_3 = 2.5763, t_4 = -0.1229, t_5 = 0.4537 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, m_1 是双黑洞系统中的主黑洞质量, m_2 是次黑洞质量, 所以 $m_1 > m_2$ 。 η 是对称化质量比, χ_1, χ_2 分别是双黑洞系统中的主、次黑洞无量纲自旋参数。如果黑洞的自旋角动量为 S , 质量为 M , 则其无量纲自旋参数为 $\frac{S}{M^2}$ 。 χ 是并合黑洞的无量纲自旋参数, 参数 t_0, t_2, t_3, t_4 和 t_5 是数值相对论研究结果给出的拟合参数值^[14-17]。

在式 (1) 中, 我们只考虑了双黑洞系统中主、次黑洞自旋方向与轨道角动量平行或者反平行的情形。简化的第一个原因: 在双黑洞进入引力波辐射主导过程之前, 双黑洞的自旋-自旋相互作用^[18] 以及自旋-环绕盘相互作用^[10] 等会让双黑洞的自旋方向接近与轨道角动量方向平行或者反平行。上述简化的第二个原因: 对于双黑洞自旋方向与轨道角动量成任意角度的物理情形, 虽然自旋与轨道的相互作用会引入轨道平面和黑洞自旋方向的进动, 从而带来复杂性, 但其对并合产物黑洞的自旋方向影响并不大^[19-25]。定量地讲, 并合产物黑洞的自旋方向与初始双黑洞轨道平面法向的夹角不会超过 10° ^[23]。

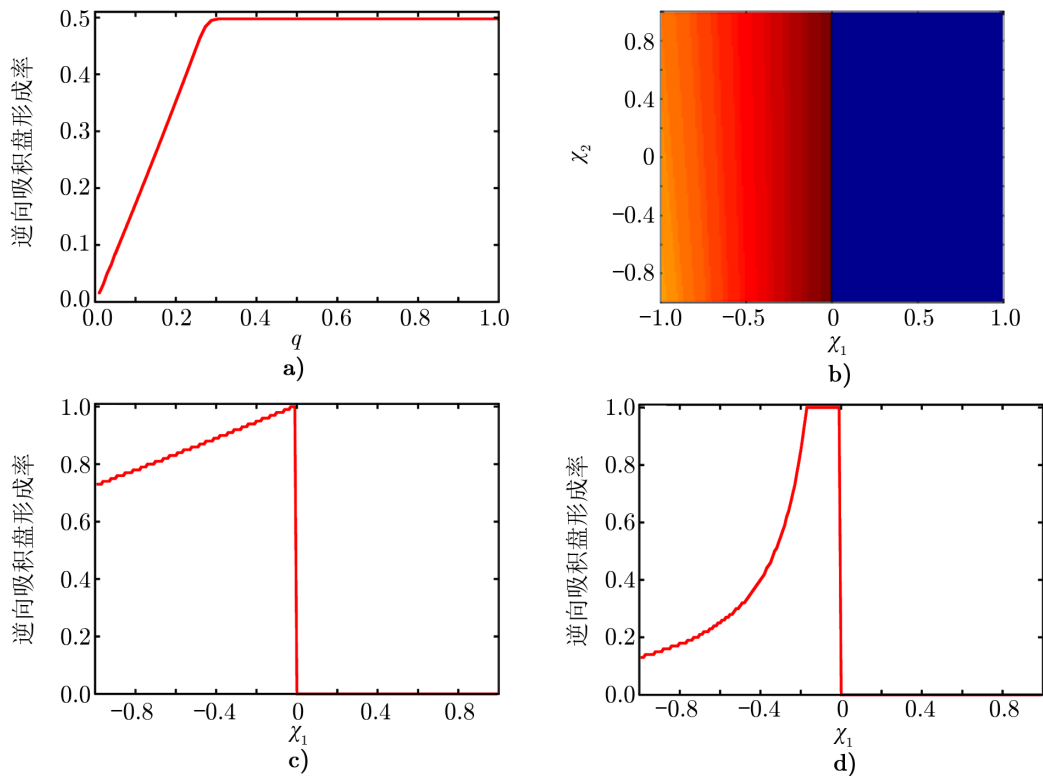
对于我们考虑的双黑洞系统中主、次黑洞自旋方向与轨道角动量的方向平行或者反平行的情形, 黑洞无量纲自旋参数的正负号是按轨道角动量方向来设定的。双黑洞自旋方向与轨道角动量方向一致, 则黑洞自旋参数为正, 反之为负; 这与第 1 章提到的用吸积盘角动量方向来设定正负不同, 这样的设定没有实质影响, 即使吸积盘不存在, 这里的描述也适用。根据前面的描述和我们的设定, 只要 $\chi\chi_1 < 0$, 则生成逆向吸积盘, 反之为正向吸积盘。

我们定义, 逆向吸积盘的形成率为双黑洞并合后形成的逆向吸积盘占双黑洞并合后形成的所有吸积盘系统的百分比, 表示为:

$$W \equiv \frac{N_R}{N}, \quad (2)$$

其中, N 代表由双黑洞并合形成的总吸积盘数目, N_R 代表由双黑洞并合形成的逆向吸积盘数目。对于给定质量比的双黑洞系统, 我们假设 $\chi_{1,2}$ 均匀分布在区间 $|\chi_{1,2}| < \chi_{\max}$ 。如果只是考虑裸奇点的物理限制, 我们有 $\chi_{\max} = 1$ ^[1]。如果考虑吸积动力学和并合动力学的限制, 我们有 $\chi_{\max} = 0.998$ ^[26]。在图 1a) 中, 我们研究 $\chi_{\max} = 0.998$ 情形下不同质量比双黑洞并合系统对应的逆向吸积盘形成率。对于 $\chi_{\max} = 1$ 的情形, 所得结果与 $\chi_{\max} = 0.998$ 几乎一样。从图 1a) 可知, 当质量比 $q > 0.3$ 时, 逆向吸积盘与正向吸积盘各占一半; 当质量比变小时, 正向吸积盘更容易形成。在图 1b) 中, 我们给定 χ_1 和 χ_2 , 研究不同质量比双黑洞并合系统对应的逆向吸积盘形成率。这里对于给定 χ_1 和 χ_2 , 我们假定双黑洞系统的质量比均匀分布在区间 $q_{\min} < q < 1$ 。

人们预期星系并合带来的超大质量双黑洞并合都具有 1:1 到 1:20 之间的质量比^[27], 即 $0.05 < q < 1$ 。此时的逆向吸积盘的形成率为逆向吸积盘占有所有不同质量比双黑洞系统的百



注: a) 不同质量比双黑洞系统的逆向吸积盘形成率; b) 和 c) 假设双黑洞质量比按参数 q 均匀分布于 $(0.05, 1)$, 取值不同时自旋参数双黑洞系统的逆向吸积盘形成率; c) $\chi_2 = 0$ 时, 取不同自旋参数时双黑洞系统的逆向吸积盘形成率, 相当于 b) 中 $\chi_2 = 0$ 的截线。d) 与 c) 类似, 但这里假设双黑洞质量比按参数 $1/q$ 均匀分布于 $(1, 20)$ 。

图 1 不同质量比双黑洞并合系统对应的逆向吸积盘形成率

分比。我们研究了 $q_{\min} = 0.05$ 的情况, 结果如图 1b) 所示, 即逆向吸积盘的形成率与次黑洞的自旋取值 χ_2 基本无关。另外当主黑洞自旋方向与轨道角动量的一致时, 即 $\chi_1 > 0$, 最后是形成正向吸积盘。这是因为并合黑洞的自旋主要由主黑洞自旋与轨道角动量决定, 所以当这两者符号一样时, 并合黑洞的自旋方向也一定与它们一致, 故形成正向吸积盘。当 $\chi_1 < -0.5$ 时, 主黑洞自旋对并合黑洞自旋的影响超过轨道角动量的影响, 导致并合黑洞的自旋方向与主黑洞自旋方向一致, 从而形成正向吸积盘。相反, 当 $-0.2 \lesssim \chi_1 < 0$ 时, 轨道角动量对并合黑洞自旋的影响超过主黑洞自旋的影响, 导致并合黑洞的自旋方向与主黑洞自旋方向相反, 从而形成逆向吸积盘。

对于超大质量双黑洞系统的质量比, 人们至今还没有给出非常明确的定论^[28-31]。因为超大质量双黑洞系统的质量比分布依赖于超大质量黑洞的占有率、超大质量黑洞的质量与所在星系间相关性随红移的演化, 以及宿主星系能承载的双黑洞并合系统的质量比下限。关于 q_{\min} , 我们研究过 $q_{\min} = 0.05$ 和 $q_{\min} = 0$ 的情形, 所得正向吸积盘的形成率基本没有差别。但我们发现, 不同超大质量双黑洞系统的质量比分布却对逆向吸积盘形成率影响很大。

作为对比, 我们研究了双黑洞质量比按参数 q 均匀分布和双黑洞质量比按参数 $1/q$ 均匀分布两种情况。所得结果如图 1b)–d) 所示。

把图 1b) 的结果与相应的超大质量双黑洞系统的质量比分布作为权重乘积并积分, 我们就可以得到超大质量双黑洞系统并合形成逆向吸积盘的百分比, 表示为:

$$W = \int_{q_{\min}}^1 f(q)\rho(q)dq, \quad (3)$$

其中, $f(q)$ 表示图 1b) 所示函数, $\rho(q)$ 是超大质量双黑洞系统的质量比分布函数。超大质量双黑洞系统并合形成逆向吸积盘的百分比 W 分别为 44.3% 和 22.2%, 与图 1c) 和 d) 的情形相对应。如果取 $q_{\min} = 0.01$, 则按参数 q 均匀分布和按参数 $1/q$ 均匀分布的 W 分别为 42.9% 和 6.8%。与文献 [7] 的结果对比, 王凯等人从共 849 个样本中发现 13 个类星体逆向吸积的候选体, 所占百分比约为 1.5%。但这个结果与我们的理论结果无法相比较, 因为超大质量双黑洞系统的质量比分布函数不清楚。

利用本文所提出的逆向吸积双黑洞并合物理形成机制, 我们基本上给出了超大质量双黑洞系统的质量比分布与类星体逆向吸积盘形成率。我们预期类星体逆向吸积盘占有吸积盘的百分比将很快被观测得到^[7]。而随着脉冲星计时阵列对低频引力波探测数据的积累 (如 FAST 的部分科学任务和 SKA 计划) 和空间引力波探测计划的实施, 包括 LISA、太极^[32] 和天琴^[33] 等, 超大质量双黑洞系统的质量比分布也将被观测而确定。到时这两者的一致性, 可用来检验本文所提出的逆向吸积双黑洞并合物理形成机制是否是类星体逆向吸积盘形成的主要方式。

3 结论和讨论

黑洞最早是广义相对论从理论上预言的天体。到目前为止, 人们已经观测到很多黑洞, 包括利用引力波探测到的双黑洞并合^[9]。人们认为每个星系中心都存在一个超大质量黑洞。根据广义相对论的理论结果, 黑洞可以用质量和自旋两个参数来描述。人们已提出一些比较好的方法对黑洞质量进行测量, 但对于黑洞自旋, 目前测量方法的鲁棒性还较差。利用连续谱拟合方法^[3] 和 Fe 谱线方法^[4] 观测的黑洞自旋方向都与其外的吸积盘转动方向一致, 即都是正向吸积盘。至今, 人们还未直接探测到黑洞自旋方向与吸积盘转动方向相反的逆向吸积盘。最近, 王凯等人^[7] 利用宽线区尺度与光学光度之间的关系发现了逆向吸积盘的候选体。

逆向吸积盘的形成是一个有趣和重要的天体物理问题。本文利用双黑洞并合的物理图像提出一种逆向吸积盘的形成机制。如果双黑洞并合所形成的黑洞的自旋方向与初始双黑洞中主黑洞的相反, 逆向吸积盘便会形成。本文不仅详细阐明了该物理过程, 还定量计算了各种物理情况下逆向吸积盘的形成率。我们的结果表明, 超大质量双黑洞系统的质量比分布会主导类星体逆向吸积盘的形成率。我们的理论分析可以把超大质量双黑洞系统的质量比分布与类星体逆向吸积盘的形成率定量地联系起来。这样的定量关系可以利用将来的观测结果对本文所提出的逆向吸积盘形成机制给出检验。

对于超大质量双黑洞系统的质量比分布,我们只是讨论了均匀分布的简单假设。实际上在进入引力辐射主导前的双黑洞旋进早期,小黑洞导致的强吸积流会让小黑洞质量较迅速地增加,从而使得双黑洞的质量比更趋向于1:1^[34]。另外,Gergely等人^[35, 36]认为, $1/3 < q < 1$ 的超大质量双黑洞并合系统占20%, $1/30 < q < 1/3$ 的超大质量双黑洞并合系统占40%,和 $1/1000 < q < 1/30$ 的超大质量双黑洞并合系统占40%。因此,目前超大质量双黑洞系统的质量比分布还是未解决的一个天体物理问题。正是因为这个问题未解决,我们所得到的理论结果还不能与文献[7]的初步观测结果进行对比。

在逆向吸积盘形成以后,黑洞自旋方向会受到吸积物质长期演化的影响,观测到的逆向吸积盘形成率也会受到这个长期演化的影响,所以观测到的逆向吸积盘比例可能会与我们在本文得到的逆向吸积形成率有所偏差。但由于黑洞自旋方向被吸积物质长期演化所影响,因此演化过程相对于我们提出的逆向吸积双黑洞并合机制的想法来说是一个独立的问题,可以在以后的研究中单独考虑。如果黑洞自旋及其方向被吸积物质带来的长期演化对观测到的逆向吸积盘比例的影响很大,则可以把我们本文的结果叠加上长期演化影响得到最终逆向吸积的事件率,再与观测到的逆向吸积盘形成率进行比较。

致谢

感谢北京师范大学天文系的高鹤教授和厦门大学的刘彤教授在相关问题上的有益讨论。

参考文献:

- [1] 梁灿彬,周彬. 微分几何入门与广义相对论. 北京: 科学出版社, 2009
- [2] Davis T A, Bureau M, Cappellari M, et al. *Nature*, 2013, 494: 328
- [3] Gou L, McClintock J E, Remillard R A, et al. *ApJ*, 2014, 790(1): 29
- [4] Liu J, Gou L, Yuan W, et al. *MNRAS*, 2014, 437: L76
- [5] Pasham D R, Remillard R A, Fragile P C, et al. *Science*, 2019, 363: 531
- [6] 汪定雄. *天文学报*, 2000, 41: 15
- [7] 王凯,黄正鹏,王建民. *天文学报*, 2018, 59: 44
- [8] 张学金,杜璞,王建民. *天文学报*, 2009, 50: 233
- [9] 曹周键,都志辉. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47: 010405
- [10] Barausse E. *MNRAS*, 2012, 423: 2533
- [11] Dotti M, Colpi M, Pallini S, et al. *ApJ*, 2013, 762: 68
- [12] Yan C S, Lu Y, Dai X, et al. *ApJ*, 2015, 809: 117
- [13] Campanelli M, Lousto C O, Zlochower Y, et al. *Phys Rev D*, 2006, 75: 229
- [14] Rezzolla L, Barausse E, Dorband E N, et al. *Phys Rev D*, 2008, 78: 044002
- [15] Tichy W, Marronetti P. *Phys Rev D*, 2008, 78: 081501
- [16] Barausse E, Rezzolla L. *ApJ*, 2009, 704: L40
- [17] Healy J, Lousto C O, Zlochower Y. *Phys Rev D*, 2014, 90: 104004
- [18] Kesden M, Sperhake U, Berti E. *Phys Rev D*, 2010, 81: 084054
- [19] Lousto C O, Zlochower Y. *Phys Rev D*, 2014, 89: 104052
- [20] Varma V, Gerosa D, Stein L C, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 011101
- [21] Gerosa D, Kesden M. *Phys Rev D*, 2016, 93: 124066

- [22] Zlochower Y, Lousto C O. Phys Rev D, 2015, 92: 024022
- [23] Hofmann F, Barausse E, Rezzolla L. ApJ, 2016, 825: L19
- [24] Barausse E. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 228: 012050
- [25] Lousto C O, Campanelli M, Zlochower Y, et al. Classical and Quantum Gravity, 2010, 27: 114006
- [26] Kesden M, Lockhart G, Phinney E S. Phys Rev D, 2010, 82: 124045
- [27] D’Orazio D J, Haiman Z, MacFadyen A. MNRAS, 2013, 436: 2997
- [28] Volonteri M, Haardt F, Madau P. ApJ, 2003, 582: 559
- [29] Sesana A, Haardt F, Madau P, et al. ApJ, 2005, 623: 23
- [30] Sesana A, Roedig C, Reynolds M T, et al. MNRAS, 2012, 420: 860
- [31] Lippai Z, Frei Z, Haiman Z. ApJ, 2009, 701: 360
- [32] Gong X, Xu S, Bai S, et al. Classical and Quantum Gravity, 2011, 28: 094012
- [33] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33: 035010
- [34] Farris B D, Duffell P, MacFadyen A I, et al. ApJ, 2014, 783: 134
- [35] Gergely L Á, Biermann P L, Caramete L I. Classical and Quantum Gravity, 2010, 27: 194009
- [36] Gergely L Á, Biermann P L. arXiv e-prints, 2012: 1208.5251

Binary Black Hole Merger and Retrograde Accretion onto Black Hole

YAN Wei-chen, ZHAO Tian-yu, CAO Zhou-jian

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

Abstract: Black holes are objects predicted by general relativity theory. Black holes are also the central engines of many astronomical phenomena, including quasars, active galactic nuclei, jets, accretion disks and so on. General relativity indicates that black holes in the universe can be described by two parameters: mass and spin. Compared with the measurement of black hole’s mass, spin measurement is more difficult. However, the direction of spin is closely related to many astronomical phenomena. If the spin of a black hole coincides with the rotation direction of the accretion disk, a positive accretion disk will be formed; if the spin of a black hole is opposite to the rotation direction of the accretion disk, a reverse accretion astronomical phenomenon will be formed. The continuum spectrum fitting method and the ferrography method are widely used in the spin measurement for black holes. No plausible candidates for the reverse accretion disk have been found by these methods. However, recent studies have identified potential candidates for reverse accretion disks based on the analysis of the relationship between the responsivity weighted radius of the broad line region and optical luminosity ($R - L$ relation). In this paper, a physical mechanism of reverse accretion disks formation is proposed based on the physical picture of the black

hole mergers. And we have calculated the relative formation rates of reverse accretion disks. Interestingly, we find a quantitative relationship between the mass ratio distribution of supermassive binary black hole systems and the formation rate of quasar retrograde accretion disks. This quantitative relationship can be tested by future gravitational wave detection through space-based detectors and retrograde accretion disk detection.

Key words: binary black hole merger; numerical relativity; retrograde accretion

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ., MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献（按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出）。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，请从本刊网站 (<http://202.127.29.4/twxjz/index.htm>) 下载排版模版。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

《天文学进展》编辑部

2019年12月