



超大质量黑洞吸积盘中的高能中微子辐射研究进展及展望

王凯

华中科技大学物理学院天文学系, 武汉 430074

E-mail: kaiwang@hust.edu.cn

2024-06-07 收稿, 2024-08-07 修回, 2024-08-09 接受, 2024-08-12 网络版发表

国家自然科学基金(12003007)和中央高校基本科研业务费专项资金(2020kfyXJJS039)资助

摘要 活动星系核超大质量黑洞吸积盘中被认为包含着丰富的恒星和致密星以及它们构成的双星系统, 其在吸积盘上的演化会产生不同类型的天体物理爆发现象, 产生包含引力波、电磁辐射和高能中微子的多信使信号. 其中, 高能中微子在研究超大质量黑洞吸积盘中天体物理爆发过程中可以起到重要作用. 本文简要综述了近些年来活动星系核超大质量黑洞吸积盘上不同天体物理暂现源爆发过程中的高能中微子辐射研究进展, 内容包括吸积盘中双恒星级黑洞并合遗迹黑洞吸积气体物质形成的喷流和外流星风、伽马射线暴和超新星在与盘物质作用过程中的高能中微子生成, 并总结了对这些源的多信使探测, 最后展望了下一代高能中微子探测器对理解超大质量黑洞吸积盘中天体物理过程的机遇.

关键词 吸积盘, 超大质量黑洞, 高能中微子, 引力波, 暂现源

近年来, 活动星系核吸积盘上的天体物理活动现象因其所处环境的独特性引起天体物理学界的浓厚兴趣. 研究表明, 活动星系核的超大质量黑洞吸积盘可能包含大量的主序恒星以及包括白矮星、中子星和恒星级黑洞等致密天体. 这些恒星和致密天体的形成途径有两种: 一种是它们可能从星系核心区域的星团被吸积盘捕获并进入其中^[1]; 另一种是它们可能在吸积盘的外层通过引力不稳定性形成, 并逐步迁移至吸积盘的内部区域, 最终演化为致密天体^[2,3]. 活动星系核的吸积盘富含气体物质, 为其中的恒星和致密天体的演化、吸积以及迁移提供了一个特别的环境. 这些丰富的恒星和致密天体在吸积盘内部区域的聚集, 显著增加了它们相遇的概率并进而形成双星系统^[4]. 同时, 吸积盘上的气体也加速了双星系统的动力学演化, 导致更快速的并合事件的发生^[5,6]. 因此, 在活动星系核的

吸积盘上, 大质量恒星的死亡以及恒星与致密天体或致密天体之间的碰撞或并合事件会频繁发生.

在活动星系核吸积盘上, 气体通常比星际介质热得多, 密度也更高, 这导致吸积盘上的恒星演化与普通恒星有显著差异^[7]. 这些恒星会迅速变成大质量恒星(质量大于100太阳质量), 进而经历核塌缩过程, 形成致密星. 因此, 吸积盘上大质量恒星的核塌缩过程可能引发超新星爆发^[8]和长伽马射线暴事件^[9]. 此外, 恒星和致密星之间的并合或碰撞也可能导致不同类型的暂现源现象, 例如双白矮星并合或白矮星吸积诱导的塌缩过程形成的Ia型超新星爆发^[10]、双中子星并合形成的短伽马射线暴和千新星爆发^[11], 以及恒星级黑洞引发的潮汐瓦解事件^[12]等. 吸积盘上的恒星级黑洞吸积过程可能诱发Bondi爆炸过程^[13], 同时也可以建立恒星级黑洞吸积盘-喷流系统, 进而喷流或者外流物质与盘

引用格式: 王凯. 超大质量黑洞吸积盘中的高能中微子辐射研究进展及展望. 科学通报, 2025, 70: 398–410

Wang K. Research progress and prospects of high-energy neutrino radiation in supermassive black hole accretion disks (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 398–410, doi: [10.1360/TB-2024-0611](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0611)

上物质作用形成可探测暂现源信号^[14,15]。除了暂现电磁信号,吸积盘上如双中子星、中子星-黑洞、双黑洞等双致密星并合过程同时也会产生引力波信号。

吸积盘上的暂现天体物理过程覆盖了大部分已知宇宙中的天体物理过程,它们在正常环境中展现出独特的光变和光谱特征,而在吸积盘致密的气体区域发生的暂现源将导致更为特殊的观测信号。人们期待从吸积盘上观测到这些不同类型的暂现源的电磁辐射信号。吸积盘上发生的这些暂现源,由于其类型、吸积盘结构以及在吸积盘上的位置等因素的差异,会产生不同类型的暂现源信号,同时携带更多关于活动星系核内部区域的信息。尽管吸积盘上暂现源过程的电磁信号备受期待且受到广泛研究^[16],但在明亮的活动星系核吸积盘中是否能够证认这些信号仍存在争议。例如,如果暂现源抛出物与盘上物质的相互作用较弱,其伴随的电磁辐射信号可能会较弱,因此在明亮、高光度的活动星系核中很难被观测到^[17]。在这种情况下,只能期望在低光度的活动星系核中观测到这些暂现源信号。吸积盘以及活动星系核内部区域环境非常复杂,存在喷流以及外流物质,也包含了如吸积盘、冕、宽线区等的低能辐射场,电磁信号通常会被散射、吸收或者热化,其中高能波段的伽马射线由于受到低能辐射场的吸收作用甚至无法从活动星系核区逃脱。

另外,这些吸积盘上的天体物理活动会产生不同类型的激波,这些激波可以通过扩散激波加速过程加速粒子到高能区域。加速的高能宇宙线质子可以与周围的低能质子(质子-质子碰撞)或者光子场(光介子生成过程)发生反应生成 π 介子,其中中性的 π^0 会衰变成两个伽马光子,而带电的 $\pi^\pm$ 介子会衰变成不同的轻子成分,过程如下^[18,19]:

$$p + p / \gamma \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \rightarrow 2\gamma, \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \end{cases} \quad (1)$$

其中会产生高能中微子辐射。高能中微子因其只参与弱相互作用,可以很容易地从星系核区复杂的环境中逃脱出来,成为一个独特且有效的信使。

本文系统梳理了活动星系核吸积盘上不同天体物理过程产生的高能中微子辐射^[20-24],结合高能中微子的多信使手段来研究活动星系核吸积盘上天体物理活动进行讨论,展望了未来高能中微子探测器的多信使

联合研究对该方向的促进作用。

1 吸积盘上双黑洞并合引力波成协高能中微子

恒星级质量的双黑洞并合事件已经成为地基引力波探测器(如LIGO、Virgo和KAGRA)最重要的观测目标之一^[25]。未来的引力波探测器将显著增加双黑洞并合事件的观测数量,预计每年可达 $10^4 \sim 10^5$ 个,因此成为最重要的天体物理研究对象之一^[26]。然而,双黑洞并合通常不会直接产生除引力波之外的其他信使信号,这导致对双黑洞并合过程、环境等的研究缺乏更多的有效手段。若双黑洞并合过程发生于吸积盘上,吸积盘上丰富的气体物质使得双黑洞并合产生引力波信号的同时,可以产生电磁以及高能中微子信号。2020年,Zwicky Transient Facility (ZTF)在活动星系核J124942.3+344929中发现了和双黑洞并合引力波事件GW190521可能成协的光学耀发ZTF19abanrhr^[27],被认为可能是起源于活动星系核吸积盘上的双黑洞并合过程,这极大地激发了研究人员对于吸积盘上双黑洞并合的研究兴趣。

吸积盘上双黑洞绕转并合的过程中会一边吸积盘上物质并产生辐射驱动的外流,这些外流会造成最后并合遗迹黑洞周围形成一个空腔。遗迹黑洞在并合过程中由于不对称性会获得一个反弹速度,重新进入一片完整气体的吸积盘上区域,然后吸积周围气体物质^[15]。气体吸积过程中,Blandford-Znajek (BZ)喷流会在遗迹黑洞的吸积过程中形成,并与吸积盘上气体物质相互作用形成喷流-茧(jet-cocoon)结构。在这个结构中会形成不同的激波,包括喷流与吸积盘物质作用形成的正向激波和反向激波,以及喷流准直过程中的准直激波和喷流内部速度不均匀导致的内激波(图1)^[20]。

文献[20]考虑了该过程中激波动力学以及高能中微子的生成过程。双黑洞并合之后的遗迹黑洞的吸积率极高,按Bondi-Hoyle-Lyttleton (BHL)吸积率估计为^[28,29]

$$\dot{m}_{\text{BHL}} = \frac{4\pi G^2 m_{\text{rBH}}^2 \rho_0}{v_{\text{rel}}^3}, \quad (2)$$

其中, G 为万有引力常数, m_{rBH} 是合并后的遗迹黑洞质量, ρ_0 为盘上气体密度, $v_{\text{rel}} = \sqrt{v_k^2 + c_s^2}$ 包含了遗迹黑洞在并合后的反冲速度 v_k 和吸积盘气体声速 c_s 。实际的吸积率可能偏离BHL吸积,其可以参数化表示



图1 喷流在活动星系核吸积盘上传播示意图^[20]. 最右侧标出了正向激波(forward shock)、反向激波(reverse shock)、准直激波(collimation shock)和内激波(internal shock)的典型位置

Figure 1 Schematic pictures of jet propagation in the active galactic nucleus disk^[20]. The typical locations of forward shock, reverse shock, collimation shock and internal shock are presented in the right-most panel

$\dot{m} = f_{\text{acc}} \dot{m}_{\text{BHL}}$, f_{acc} 为修正因子. 喷流的动能光度可以和此吸积率建立联系, 即 $L_j = \eta_j \dot{m} c^2$, η_j 为吸积转换到喷流的效率. 所以, 喷流动能光度可以写为

$$L_j \approx 5.0 \times 10^5 L_{\text{Edd}} f_{\text{acc}} \frac{\eta_j}{0.5} \frac{\rho_0}{10^{-10} \text{g cm}^{-3}} \times \frac{m_{\text{rBH}}}{100 M_{\text{Sun}}} \left(\frac{v_{\text{rel}}}{250 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-3} \text{erg s}^{-1}, \quad (3)$$

其中, $L_{\text{Edd}} = 4\pi G m_{\text{rBH}} m_p c / \sigma_T \approx 1.26 \times 10^{40} (m_{\text{rBH}}/100 M_{\text{Sun}}) \text{erg s}^{-1}$ 为遗迹黑洞的爱丁顿光度, c 为光速, m_p 为质子质量, σ_T 为汤姆孙散射截面, M_{Sun} 为太阳质量. 通过估算, 不管是吸积率还是喷流的动能光度, 在这种条件下都远超遗迹黑洞的爱丁顿光度.

在喷流与吸积盘上物质作用的过程中形成了几种类型的激波, 需要评估这些激波能否有效地进行粒子加速过程. 扩散激波加速粒子的一个前提条件是该激波是无碰撞激波, 使得加速出来的粒子能够有效保存最终到达高能区域, 而不能通过粒子间的相互碰撞过程很快损失. 这对于产生加速高能粒子进而产生高能中微子至关重要. 其中, 正向激波通常是辐射主导激波, 即其中的粒子相互碰撞频繁. 加速出来的粒子会很快地通过碰撞损失能量, 进而无法有效地把粒子加速到高能, 也无法产生后续的高能中微子^[30,31]. 反向激波、准直激波和内激波均可以在其附近区域进行有效粒子加速, 产生高能质子, 进而发生强子反应过程(包括质子-质子碰撞和光介子生成过程)生成高能中微子^[20]. 加速出来的高能质子光度通常参数化引入, 即 $L_p = \varepsilon_p L_j$, 典型的参数化因子 $\varepsilon_p = 0.1$. 高能质子分布形式通常采用幂律形式, 即 $dN/dE_p = A E_p^{-p}$, 其中

$A = L_p / \int_{E_{p,\text{min}}}^{E_{p,\text{max}}} E_p \frac{dN}{dE_p} dE_p$ 为归一化因子. 加速的最大能量 $E_{p,\text{max}}$ 由加速过程和其他的能量损失过程的平衡得到, 其加速时标可以写为 $t_{p,\text{acc}} = E_p / e B c$, 而涉及的能量损失过程主要包含质子同步辐射、质子逆康普顿散射、质子-质子碰撞过程、光介子生成过程、Bethe-Heitler对生成过程($p + \gamma \rightarrow p + e + e^+$)和绝热冷却过程. 通过评估其加速时标与冷却时标, 可以估算出加速能量可以接近极高能宇宙射线的能量段(约 10^{20}eV)^[20], 从而可以生成南极IceCube中微子探测器探测能段的PeV中微子($1 \text{PeV} = 10^{15} \text{eV}$). 在这些冷却过程中, 吸积盘上高密度的气体和辐射场使得高能质子参与的强子反应过程的效率很高, 即质子-质子碰撞过程和光介子生成过程是主导的质子冷却过程, 所以加速出来的高能质子通常会通过强子反应通道最终全部损失产生高能的中微子. 简单考虑强子过程生成的中性 π^0 介子和带电的 $\pi^{\pm}$ 介子生成比例为1:1, 而 $\pi^{\pm}$ 最终生成的4种粒子(电子和3种中微子)均分能量, 可以得到有3/8的质子能量最终转化到高能中微子. 在上面的参数情况下, 中微子的辐射光度可以达到 $L_\nu \approx 2.6 \times 10^{40} \text{erg s}^{-1}$, 这是一个相当可观的中微子辐射量.

需要注意的是, 高能中微子的生成极大地依赖于遗迹黑洞的吸积率、在吸积盘上的位置、喷流与吸积盘的夹角以及吸积盘的性质等实际情况. 目前的研究还主要集中在简化的模型之下, 比如考虑双黑洞并合的遗迹黑洞位于吸积盘垂直方向的中心、位于径向方向的迁移束缚带(约在 $10^3 \sim 10^4$ 超大质量黑洞的施瓦西半径 $R_{\text{Sch}} = 2GM_{\text{SMBH}}/c^2$), 喷流与盘面垂直, 以及简化

的吸积盘气体分布形式. 同时, 喷流的持续时间也将显著影响中微子的生产率, 因为在固定的喷流动能光度下, 喷流持续时间越长也就表明有更多的能量提供给喷流, 进而生成更多的中微子. 目前的研究还无法很好地限制喷流的持续时间. 文献[13]提出这么高的BHL吸积率可能是无法长时间持续的, 恒星级黑洞吸积过程中形成的外流可以重新在吸积盘上打开一个气体空腔区域, 使得吸积无法再次进行. 这种情况下, 恒星级黑洞的吸积只能持续约 10^5 s, 周围物质再次汇聚到黑洞周围才能进行下次有效的吸积过程, 使得整个吸积过程是片段性和周期性的.

通常来说, 从单个事件中认证中微子是困难的. 我们可以考虑宇宙中所有吸积盘上双黑洞并合的贡献, 其通常以弥散中微子背景的形式呈现, 可以写为

$$E_\nu^2 \Phi_\nu(E_\nu) = f_b \int_0^{z_{\max}} R_0 f(z) F(E_\nu) \frac{dV}{dz} dz, \quad (4)$$

其中, z 为红移, $f_b = \theta_j^2/2$ 为张角为 θ_j 的喷流的集束修正因子, $F(E_\nu)$ 为单个源的中微子辐射总能量, $dV/dz = c/4\pi H_0/(1+z)^2/\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}$. 在标准的 Λ CDM宇宙模型下, 哈勃常数 $H_0 = 67.8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.692$, $\Omega_m = 0.308$ [32]. R_0 为 $z=0$ 处吸积盘上双黑洞并合事件率, $f(z)$ 为其红移分布函数. 通常吸积盘上的双黑洞并合事件率以及其红移分布函数都是非常不清楚的, 这对估算其对弥散中微子背景的贡献带来了极大的不确定性. 虽然我们对吸积盘上双黑洞并合的红移分布还不清楚, 但因其不是来自大质量恒星死亡过程, 通常不能采用恒星形成率的红移分布形式. 因为存在双星并合过程的时间延迟, 更可能的是与起源于双致密星并合的短伽马射线暴的红移分布形式相同. 文献[33]通过模拟相对于恒星形成历史附加一个双星并合过程的时间延迟, 给出了一个参考的函数形式, 考虑对数分布形式的时间延迟模型如下:

$$f(z) = \left[(1+z)^{5.7\eta} + \left(\frac{1+z}{0.36} \right)^{1.3\eta} + \left(\frac{1+z}{3.3} \right)^{-9.5\eta} + \left(\frac{1+z}{3.3} \right)^{-24.5\eta} \right]^{1/\eta}, \quad (5)$$

其中, $\eta = -2$. 考虑不同 R_0 和吸积修正因子 f_{acc} , 吸积盘上双黑洞并合对于全天中微子的贡献如图2所示[20,34,35]. 此外, 研究人员还尝试通过南极IceCube对弥散中微子背景的观测反过来限制吸积盘上双黑洞并合的事件率,

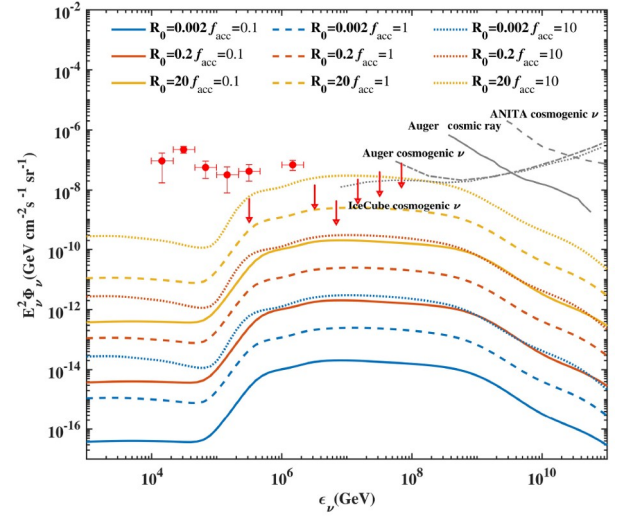


图2 不同局地双黑洞并合事件率和吸积修正因子下, 吸积盘上双黑洞并合遗迹黑洞喷流贡献的全味弥散中微子流量[20]. 红色的数据点和上限表示南极IceCube观测的弥散中微子流量[34,35]. 灰色的线表示不同设备对于极高能中微子的90%观测上限

Figure 2 All-flavor diffuse neutrino fluence contributed from remnant black hole jets after binary black hole mergers in accretion disks for diverse local event rates and accretion rates[20]. Red points and upper limits are the observed diffuse neutrino fluence by IceCube[34,35]. The gray lines are 90% upper limit of the ultra-high-energy neutrino for diverse instruments

这对理解这类爆发现象有很大的帮助作用[20].

文献[36]研究了吸积盘上恒星级质量黑洞(不一定是来自双黑洞并合的遗迹黑洞)喷流与吸积盘物质作用过程中形成的高能电磁、中微子以及宇宙线辐射. 其整体的作用过程类似上面的描述, 也是BZ吸积形成喷流与吸积盘物质作用形成激波, 加速粒子到高能, 进而产生宇宙线、电磁辐射以及高能中微子. 不同的地方是, 文献[36]更侧重研究不同宇宙线指数、能量分配因子和喷流洛伦兹因子等参数对不同辐射过程的影响, 而文献[20]更侧重研究双黑洞并合引力波与高能中微子的联合探测. 前者通过扫描不同的参数(主要是磁能分配因子、电子能量分配因子、质子能量分配因子、质子能谱指数和喷流洛伦兹因子)空间, 发现在乐观的参数情况下, 吸积盘上伽马射线暴对弥散中微子背景的贡献可以达到相当大的比例.

除了小角度的集束喷流之外, 遗迹黑洞在吸积盘上吸收物质的过程中也会形成宽角度的辐射驱动的外流星风[37~39]. 这些外流星风在生成与双黑洞并合引力波成协的高能中微子和电磁信号中扮演着重要角色. 与喷流不同的是, 这些星风通常具有亚相对论性的速

度,并且在与吸积盘上的物质相互作用时,它们的动力学演化过程表现出完全不同的特征.和喷流另外一个不同点就是,外流星风没有集束效应,是宽角度范围的,所以其产生的高能中微子更加可能证认到与双黑洞并合引力波信号成协(不像喷流必须对准地球,才能接收到喷流产生的中微子).在目前双黑洞并合引力波事件探测仍然较少的情况下,探测成协的宽角度星风与吸积盘上物质作用产生的高能中微子无疑是一个更好的对象.

文献[21]研究了遗迹黑洞外流星风在吸积盘上传播的动力学过程以及该过程中的高能中微子辐射.遗迹黑洞的快速星风(可以达到 $\sim 0.1c$)与吸积盘物质相互作用时,会形成正向和反向的激波.这些激波将带电粒子加速到高能区域,并随后与盘上的物质和辐射场发生质子-质子碰撞以及光介子生成过程,进而产生高能伽马射线和高能中微子.对于单个爆发源,黑洞星风与吸积盘物质作用相比于喷流与吸积盘物质作用生成的高能中微子辐射较低,所以对于单个爆发事件,从中证认高能中微子变得更困难.然而,考虑到临近的(10 Mpc之内)黑洞星风与吸积盘物质作用过程中高能中微子辐射还是比较可观的,其可以被南极IceCube中微子探测器有效地捕获.而且,星风几乎是准各向同性的,其对全天弥散中微子背景的贡献在乐观的参数下依然可观,但是也极度依赖于前面提到的一些参数的不确定性,如遗迹黑洞在盘上的位置分布、星风持续时间、星风的动能光度和吸积盘气体分布等.在假设星风光度具有式(3)的形式、红移分布具有式(5)的形式情况下,针对不同的超大质量黑洞质量(对应于不同的吸积盘,参考文献[21]附录)和局地的双黑洞并合事件率,给出了遗迹黑洞外流星风与吸积盘物质作用过程对全天弥散中微子的贡献(图3).

2 吸积盘上伽马射线暴和超新星爆发产生的高能中微子

伽马射线暴是宇宙中最剧烈的天体爆发现象之一,长期以来被认为是高能宇宙射线和中微子起源的重要天体之一[40,41].伽马射线暴可以根据伽马射线爆发时标简单分成两类:一类是爆发持续时标大于2 s的长伽马射线暴,一类是持续时标小于2 s的短暴[42].长伽马射线暴通常认为起源于大质量恒星的死亡,而短伽马射线暴则是由于双致密星并合(双中子星并合或中子星-黑洞并合)[42].活动星系核吸积盘上存在大量的恒星

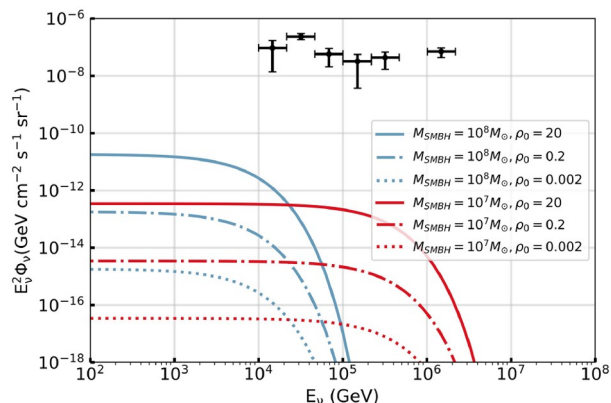


图3 不同局地双黑洞并合事件率和超大质量黑洞质量下,吸积盘上双黑洞并合遗迹黑洞外流星风贡献的全味弥散中微子流量[21].所有遗迹黑洞吸积形成外流在吸积盘上的位置都被假定发生在1000超大质量黑洞施瓦西半径,且吸积修正因子 $f_{\text{acc}}=0.1$.黑色的数据点表示南极IceCube观测的弥散中微子流量[34]

Figure 3 All-flavor diffuse neutrino fluence contributed from remnant black hole winds after binary black hole mergers in accretion disks for diverse local event rates and super-massive black hole masses at 1000 R_{Sch} with $f_{\text{acc}}=0.1$ [21]. Black points are the observed diffuse neutrino fluence by IceCube[34]

和双致密星系统,必然会发生伽马射线暴的过程.基于IceCube对普通环境伽马射线暴中的高能中微子辐射的累计观测分析,普通环境中伽马射线暴的高能中微子辐射已经被严格限制,要求其对全天弥散中微子的贡献不超过1%,进而限制了伽马射线暴喷流的强子负载率和强子反应效率等[43,44].然而,这并不意味着吸积盘上的伽马射线暴的高能中微子辐射是可以忽略的.首先,伽马射线暴喷流通常会被阻塞在吸积盘物质中[22],其伽马射线辐射会与吸积盘上热气体物质频繁散射进而热化并趋于热平衡,最终与盘辐射的典型能量相当($\sim$ 几十eV)[45].即使对于高光度且长时标伽马射线暴能够形成激波突破[46],其大于约10 MeV的伽马射线辐射依然会被吸积盘、冕、宽线区等的低能辐射场辐射吸收进而电磁级联到keV~MeV能量段[47,48].这导致吸积盘上伽马射线暴爆发过程的伽马射线通常难以逃出复杂的吸积盘和星系核区环境,进而难以证认其伽马射线爆发现象,所以原则上无法限制吸积盘上伽马射线暴中的高能中微子辐射.其次,不同于普通环境中的伽马射线暴喷流,吸积盘上丰富的气体和辐射场可以为强子反应提供额外的靶粒子,这可以极大提高强子反应的效率,从而产生可观的次级高能中微子辐射.

文献[22]仔细研究了活动星系核吸积盘上伽马射

线暴中产生的高能中微子。与上一节介绍的吸积盘上双黑洞并合遗迹黑洞的喷流情况不同的是,对于伽马射线暴,其喷流通常动能光度更高(各向同性动能光度可以达到 $10^{51} \sim 10^{54} \text{ erg s}^{-1}$),但是持续的时标却短得多(长伽马射线暴可以在几秒到几百秒,短伽马射线暴在零点几秒左右^[36])。吸积盘上喷流持续时标的长短对喷流能否冲出盘上物质环境至关重要。对于双黑洞并合遗迹黑洞的喷流持续时标可以大于 10^5 s ,而即使是典型的长伽马射线暴,其中心引擎天体也仅为喷流供能至多几百秒,这导致前者可以冲出吸积盘物质形成突破,而后者则被阻塞在吸积盘气体物质之中^[22]。虽然伽马射线暴喷流被阻塞在吸积盘气体物质之中,但是其反向激波、内激波等依然可以有效地进行粒子加速过程,强子反应过程产生的高能中微子可以不受阻挡地逃出来。一般来说,长伽马射线暴比短伽马射线暴的高能中微子流量更大,主要是因为长伽马射线暴的总能量更高,可以更多地转移到加速的质子以及生成的中微子。

假定伽马射线暴典型能量为 10^{53} erg 、持续时标为 30 s ,发生在一个中盘密度为 $10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ 且垂向为高斯密度分布的吸积盘上,径向爆发位置为 $500 R_{\text{Sch}}$,且假设吸积盘上伽马射线暴和普通环境中伽马射线暴一样遵循恒星形成历史的红移分布^[49],文献^[22]给出了长伽马射线暴对于弥散中微子背景的贡献(图4)。然而,活动星系核吸积盘上长伽马射线暴的爆发率目前还没有很好地限制。在极端情况下,取事件率为 $100 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (接近经典的低光度伽马射线暴事件率, $\sim 164_{-65}^{+98} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ ^[33]),吸积盘上长伽马射线暴几乎可以贡献约100%的弥散中微子背景。然而,若取事件率为 $10 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$,其贡献程度将降低到约10%。

吸积盘上的超新星爆发过程同样会产生伴随的高能中微子。超新星爆发时会抛出抛射物,抛射物在与吸积盘物质作用的过程中可以产生激波。抛射物也是几乎各向同性并且速度可以达到0.1倍的光速,这与双黑洞并合遗迹黑洞的外流星风有些类似,区别在于后者是持续性注入而超新星抛射物是一次性抛出。这也会引起二者在吸积盘上的动力学行为的不同。另外,吸积盘上的超新星可以是双白矮星并合或者单白矮星吸积导致的Ia型超新星,也可以是大质量恒星核塌缩死亡过程对应的核塌缩超新星。超新星抛射物与吸积盘物质的作用类似于早期研究的超新星抛射物与星周介质的

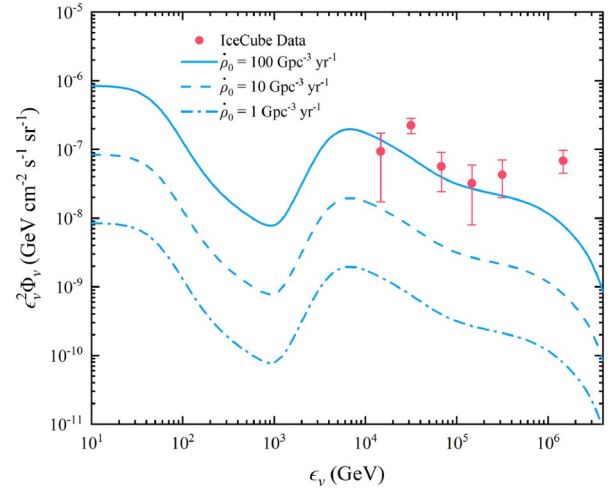


图4 吸积盘上不同长伽马射线暴事件率贡献的全味弥散中微子流量^[22]。局地事件率分别采用了100(实线)、10(虚线)、1(虚点线) $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 。红色的数据点表示南极IceCube观测的弥散中微子流量^[34]

Figure 4 Expected all-flavor diffuse neutrino fluence contributed from choked long gamma-ray bursts in accretion disks as a function of neutrino energy^[22]. Three local event rates are considered: 100 (solid line), 10 (dashed line), and 1 $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (dashed-dotted line). The red points are observed diffuse neutrino fluence measured by IceCube^[34]

相互作用^[31],后者通常伴随显著的粒子加速过程,可以产生非热电磁辐射并被认为是IceCube探测的全天弥散中微子的重要贡献源。吸积盘上物质气体更加致密,电磁辐射通常被热化而以热辐射形式呈现。

文献^[23]研究了Ia型和核坍缩型超新星抛射物与吸积盘物质的相互作用,计算了该过程中正向激波的动力学以及该过程生成的高能中微子。在超新星抛射物与吸积盘物质的作用过程中,前期阶段激波都是辐射主导的激波,粒子无法进行有效加速。在激波突破时刻之后,正向激波开始变成无碰撞激波,粒子加速得以进行。激波突破发生在光子的扩散速度约等于激波速度的位置,即 $c / \tau(h_{\text{bo}}) \approx v_s(h_{\text{bo}})$,其中 $v_s(h_{\text{bo}})$ 为激波突破高度位置 h_{bo} 处的激波速度,光深 $\tau(h_{\text{bo}}) = \int_{h_{\text{bo}}}^{+\infty} \kappa \rho(h) dh$ 为吸积盘垂直方向 h 上累计的光深, $\kappa = 0.34 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 对应于类太阳组分气体的电子散射常数。激波突破之后加速出来的高能质子可以与盘上物质和辐射场进行有效的反应,进而生成高能中微子。

由于盘上物质的高密度,通常的激波突破位置已经非常靠近典型的盘高的边缘($\sim 10^{14} \text{ cm}$),所以激波进行加速和强子反应的时间一般很有限,产生的高能中

微子流量也明显受到限制。激波冲出盘物质之后, 还有很大的动能未进行耗散。活动星系的中心区域通常非常复杂, 通过对临近活动星系核的观测, 它们通常存在着极强的物质抛出形成外流(或盘风)。针对超大质量黑洞-吸积盘系统吸积过程的数值模拟也表明存在强烈的外流^[50,51]。这些由超大质量黑洞-吸积盘系统抛出的外流携带着活动星系核较大部分的能量, 通过“负反馈”(negative feedback)影响着其宿主星系的演化^[51]。所以, 理解这些外流对整个宇宙中星系的演化也至关重要。基于活动星系中心X射线吸收线蓝移的观测, 外流的速度可以从每秒几百公里到亚相对论性的0.1~0.25倍光速^[52~55]。这些外流不可避免地影响着活动星系核吸积盘周围气体的密度分布。可以想象, 活动星系核吸积盘上如果发生一个超新星爆发, 超新星抛射物在与吸积盘上物质作用之后必然将与盘周的外流继续发生相互作用, 这将会对激波突破后的高能中微子辐射产生极大影响。

文献[24]研究了超新星抛射物冲出吸积盘之后与超大质量黑洞吸积盘盘风物质的作用。冲出吸积盘后, 超新星抛射物持续与盘周物质作用, 进一步损耗能量进行粒子加速并进行强子反应过程生成高能中微子。研究表明, 中微子的生成得到了极大的提高, 相比文献[23]可以提高超过10倍(图5)。在临近密度(盘物质密度等于超大质量黑洞盘风物质密度的临界密度) $\rho_c = 10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$ 、盘风物质密度随高度衰减的指数为 $\alpha = -1.5$ 这种乐观的柱对称下, Ia型超新星对弥散中微子的贡献上限可以接近20%。其他情况下, 贡献的程度会较低, 参见图5。其实, 盘周物质不仅对于超新星抛射物的高能中微子产出提升显著, 对于上节所提的吸积盘上恒星级黑洞喷流和星风外流的中微子生成也会产生促进作用。

3 多信使探测

吸积盘上的双黑洞并合会产生引力波信号, 其喷流和星风在与吸积盘物质作用过程中也会产生伴随的电磁信号和高能中微子信号, 所以其是潜在的引力波、电磁辐射和高能中微子3种信使的天体物理源。文献[15]和[14]分别研究了双黑洞并合之后遗迹黑洞的外流星风和喷流与吸积盘物质作用过程中的电磁辐射, 这些电磁辐射通常以热辐射的形式呈现。遗迹黑洞外流星风在激波突破时刻的辐射温度可以表示为

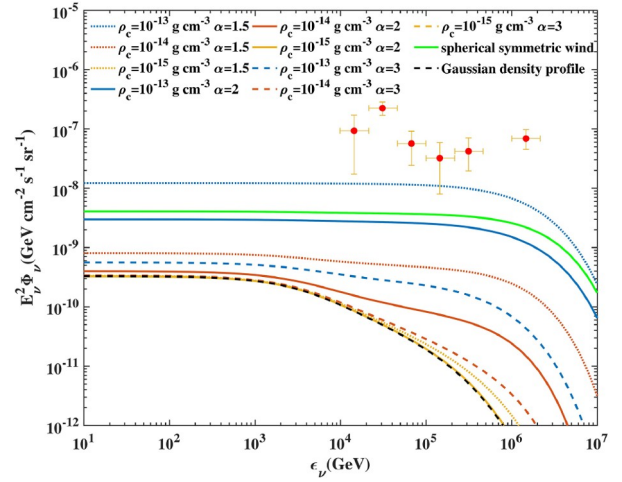


图5 对于不同超大质量黑洞形成的外部星风物质, 活动星系核吸积盘上Ia型超新星爆发贡献的全味弥散中微子流量上限^[24]。黑色的虚线表示没有外部星风物质时, 吸积盘物质为高斯密度分布形式情况下的高能中微子流量。红色的数据点表示南极IceCube观测的弥散中微子流量^[34]

Figure 5 The upper limits of expected all-flavor diffuse neutrino fluxes contributed from supernova Ia in active galactic nuclei for diverse external winds from super-massive black holes^[24]. The black dashed line represents the expected high-energy neutrino flux for disk materials following a pure Gaussian density profile without the circumdisk medium. The red points are observed astrophysical diffuse neutrino background by IceCube^[34]

$$T_{\text{ph}} \approx \left(9 \rho_{\text{br}} v_{\text{br}}^2 / 4 a_{\text{rad}} \right)^{1/4} \\ \approx 1.3 \times 10^6 \text{ K} \left(\frac{\rho_{\text{br}}}{10^{-10} \text{ g cm}^{-3}} \right)^{-1/4} \left(\frac{v_{\text{br}}}{10^9 \text{ cm s}^{-1}} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

其中, ρ_{br} 为激波突破位置的气体密度, v_{br} 为激波突破的速度, a_{rad} 为斯特藩-玻尔兹曼常数。对应的典型辐射峰值能量为 $E_{\text{br}} = k_{\text{b}} T_{\text{ph}} \approx 100 \text{ eV}$, 辐射光度为 $L_{\text{br}} \approx 3 \times 10^{44} \text{ erg/s}$ 。其辐射光度和盘辐射的光度($\sim 10^{44} \text{ erg/s}$)相当, 但峰值能量比盘辐射(几十电子伏特)更高^[56]。文献[14]研究了遗迹黑洞喷流与吸积盘物质作用过程的喷流、喷流-茧、盘-茧等不同结构的激波突破, 发现它们的典型辐射能量段分别落在硬X射线、软X射线和极紫外波段, 且依赖于不同的双黑洞并合位置、超大质量黑洞质量以及遗迹黑洞的反冲速度, 其典型的持续时间分别为0.2~400、300~8000、 $10^4 \sim 10^5 \text{ s}$ 。除了极紫外光子会被其宿主星系的气体 and 尘埃所吸收, 无法被观测到, X射线波段可以被Swift-XRT^[57]、Chandra^[58]以及我国的EP望远镜^[59]从活动星系核的背景辐射中证认出来。除了遗迹黑洞的喷流和外流星风, 文献[13]探讨了遗迹黑洞快速吸积过程中可能产生Bondi爆炸, 形

成吸积盘物质中的激波突破并产生软X射线的信号。

关于引力波和高能中微子联合探测, 文献[20]模拟了3万个吸积盘上随机双黑洞并合事件, 考虑引力波信号是各向同性而喷流产生的高能中微子是集束的, 考虑不同的双黑洞质量分布以及红移分布, 计算了吸积盘上双黑洞并合引力波和高能中微子的联合探测率. 文献[20]考虑不同引力波探测器和高能中微子探测器的性能, 引力波信号信噪比超过8和中微子探测器探测数目超过1个即认为实现了引力波和高能中微子的联合探测. 基于目前并没有探测到双黑洞并合引力波和高能中微子成协的探测, 他们给出吸积盘上双黑洞并合的事件率上限 $R < 3 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$. 这个结果极大地提高了早期对于吸积盘上双黑洞并合事件率的上限, 如文献[60]给出的 $10^{-3} \sim 10^4 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 和文献[61]给出的 $0.02 \sim 60 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$. 通过LIGO/Virgo给出的双黑洞并合的总事件率, 即 $R = 53.2^{+58.5}_{-28.8} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ [62], 可以看出吸积盘上的双黑洞并合只占总的双黑洞并合的一小部分. 但需要注意的是, 文献[20]给出的结果依赖于参数的选取, 不同的参数值可能造成不一样的结论.

超新星抛射物以及伽马射线暴喷流形成的茧在吸积盘中的激波突破时也可以产生电磁辐射. 文献[8]研究了不同前身星在吸积盘上进行超新星爆炸时所产生的光变曲线, 这些辐射通常落在光学和紫外波段. 文献[63]研究了吸积盘上双中子星并合过程中喷流与吸积盘物质的作用, 作用过程中喷流能量耗散在吸积盘物质中形成茧结构. 其形成的茧最终可以在吸积盘上形成激波突破, 在茧的能量为 10^{50} erg 、半张角为 10° 、吸积盘中心位置处密度为 $10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ 、盘物质密度分布为高斯形式、盘典型高度为 10^{10} cm (对应吸积盘径向位置 $500R_{\text{Sch}}$)的典型情况下, 茧在激波突破时的电磁信号会在并合约0.15天后出现在X射线波段, 在小于红移0.5的距离上可以被我国EP望远镜探测到. 针对双中子星并合, 其还会产生引力波和高能中微子, 同样是引力波、电磁辐射、高能中微子三信使源. 文献[22]计算了不同引力波和中微子探测器对于吸积盘上双中子星和中子星-黑洞并合引力波信号和高能中微子信号的联合探测率, 在最乐观的情况下小于约每年1个联合探测.

4 总结与展望

随着南极IceCube中微子探测器的运行, 高能中微子的探测已经成为研究天体物理的重要手段. 根据目

前的IceCube南极中微子天文台的观测, 耀变体TXS 0506+056、临近的活动星系NGC 1068以及部分潮汐瓦解事件(如潮汐瓦解事件AT2019dsg和中微子事件IC-191001A、AT2019fdr、IC-200530A等)中存在较高置信度的成协高能中微子探测[64-66](有观测表明银河系盘面上可能也存在高能中微子超出[67]). 其中, 耀变体TXS 0506+056在2015年前后有明显的中微子信号超出, 形成一次为期六个月的中微子爆发[68]. 整个中微子爆发期间探测到了 13 ± 5 个中微子数目, 不过奇怪的是, 在中微子流量很高的情况下, 电磁辐射却处于宁静期[69]. 这与强子过程通常产生相当比例的高能中微子和电磁辐射不符, 令人感到困惑. 无独有偶, NGC 1068中观测到的中微子流量也比伽马射线流量高许多[65], 这让研究人员认为NGC 1068中的高能中微子也产生于星系核的内部区域, 进而抑制观测到的伽马射线流量[47,70]. 此外, 潮汐瓦解事件也发生在超大质量黑洞附近, 与高能中微子成协的潮汐瓦解事件通常也表现出较低的伽马射线流量特征(与一些理论模型预言的一致, 如潮汐瓦解事件喷流阻塞过程[71-73]或者潮汐瓦解事件外流与云团的作用[74]). 除了上面提到的所证认的可能与某一个天体源成协的高能中微子事件, IceCube探测到绝大部分的高能中微子还是以弥散中微子背景的形式呈现出来, 无法与某一个具体的源对应, 其也存在前面提到的相比理论预期而言弥散中微子背景比弥散伽马射线背景流量高的情况.

综合以上观测特征, 我们有理由相信高能中微子可能产生于能抑制伽马射线流量的复杂环境, 也更倾向于产生于星系的核区附近. 当然活动星系核吸积盘是一个很可能的候选区域, 是非常值得被研究的对象之一. 对吸积盘上天体物理活动所产生的中微子的研究, 可以帮助我们更好地理解吸积盘上的天体物理爆发动力学、吸积盘的性质等. 高能中微子的探测将是天体物理源加速宇宙射线最直接的证据, 能帮助我们回答宇宙射线起源的百年未解之难题, 还能通过多信使多波段电磁辐射的结合来研究吸积盘上天体物理源的性质, 解答如其中的粒子加速、辐射区的成分、辐射机制等重要的天体物理难题.

吸积盘上不同天体物理过程的典型高能中微子产出如表1所示. 对于双黑洞并合遗迹黑洞, 单个事例喷流所产生的高能中微子非常显著, 而外流星风产生中微子期望较低. 此外, 吸积盘上双黑洞并合事件率的极大不确定性也导致其对弥散中微子背景的贡献不确定

表 1 吸积盘上不同天体物理过程产生的典型高能中微子辐射^{a)}

Table 1 Typical high-energy neutrino fluence from diverse astrophysical activities within AGN disks

天体	典型能量(erg)	单个事件(100 Mpc)IceCube探测个数	事件率(Gpc ⁻³ yr ⁻¹)	弥散中微子背景贡献程度
并合遗迹黑洞喷流 ^[20]	$\sim 10^{52}$	~ 10	0.002~20 ^[75]	10 ⁻³ %~10%
并合遗迹黑洞星风 ^[21]	$\sim 10^{52}$	~ 0.003	0.002~20 ^[75]	10 ⁻⁵ %~0.1%
长伽马射线暴 ^[22]	$\sim 10^{53}$	~ 1.5	$< \sim 1$ ^[76]	$< \sim 5\%$
短伽马射线暴 ^[22]	$\sim 10^{51}$	~ 0.01	$< \sim 460$ ^[77]	$< \sim 2\%$
Ia型超新星 ^[23]	$\sim 10^{51}$	~ 0.006	$< \sim 5000$ ^[77]	$< \sim 3\%$
核塌缩超新星 ^[23]	$\sim 3 \times 10^{51}$	~ 0.01	$< \sim 100$ ^[78]	$< \sim 1\%$

a) 假设不同天体物理过程在吸积盘的位置均发生在 10^3 超大质量黑洞施瓦西半径处, 吸积盘中心密度为 $10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$ 且垂直方向为高斯气体分布形式, 探测方向垂直于吸积盘, 喷流张角为0.2弧度, 对于恒星级黑洞, 吸积率因子 $f_{\text{acc}}=1$

性范围很大. 虽然遗迹黑洞外流星风贡献中微子比例低于其喷流, 但如果未来通过引力波探测到近距离的吸积盘上双黑洞并合事件, 这样的事例数目必然不会多, 喷流因其集束效应, 对于这些数目少的临近事例可能不落在视场内, 而外流星风因其各向同性, 可以更好地研究引力波-中微子成协. 对于单个事例, 长伽马射线暴因其典型能量更大, 相比短伽马射线暴和超新星可以产生更大的中微子探测数日期望, 但考虑到它们不同的事件率, 其对弥散中微子背景贡献的上限是相当的. 同时, 因吸积盘上确切的伽马射线暴和超新星的事件率也有很大的不确定性, 导致目前给出的弥散中微子贡献都是上限. 将来通过多信使探测, 对吸积盘上天体物理活动的事件率的更清晰限制, 能够帮助我们回答它们对于全天弥散中微子背景的更严格的限制. 除了表1中所列的天体物理过程, 还有诸如恒星级黑洞对恒星的潮汐瓦解事件^[79]以及恒星级黑洞的Bondi爆炸^[13]等天体物理过程的高能中微子产出, 需要更详细地研究. 即使针对表1中所列的天体物理源, 高能中微子的研究还远远不够, 目前的计算都是基于一定的模型简化, 实际情况更为复杂. 比如, 超大质量黑洞吸积盘的具体形式, 天体物理源在吸积盘径向和垂向的实际分布情况, 吸积盘上天体物理源的质量函数、光度

函数和红移演化分布, 天体物理源爆发与吸积盘的夹角等, 都还不清楚, 还需要进行更细致的研究.

就高能中微子观测方面, 目前运行的IceCube已经超过16年, 性能明显不足. 根据理论计算, 高能中微子的探测是多信使探测的一个短板^[20]. 比如上文提到的吸积盘上的双黑洞并合引力波和高能中微子的探测, 文献^[20]发现更好性能的引力波探测器并不能显著提高引力波-中微子的联合探测率, 而更好性能的高能中微子探测器(如IceCube第二代探测器, 即IceCube-Gen2)相比IceCube可以显著提高引力波-中微子的联合探测率. 这表明限制多信使探测的主要原因是中微子探测器的性能, 而其他探测器的性能对于包含高能中微子的多信使探测是过剩的. 根据规划, 国际上在运行的IceCube中微子探测器也计划升级为第二代的IceCube-Gen2中微子探测器, 另外还有部分建成或在筹备中的KM3Net^[80]、ARA^[81]、ARIANNA^[82]等一批高能中微子探测器. 国内也有一批筹备中的中微子探测设备, 如GRAND极高能中微子探测器^[83]、HUNT中微子探测器^[84]、南海中微子探测器^[85]. 我们期待着相关的设备将极大地促进中微子天文学的发展, 并帮助我们更深入地理解超大质量黑洞吸积盘上的天体物理活动过程.

参考文献

- 1 Syer D, Clarke C J, Rees M J. Star-disc interactions near a massive black hole. *Mon Not R Astron Soc*, 1991, 250: 505–512
- 2 Chang S J, Heo J E, Mille F D, et al. Formation of Raman scattering wings around H α , H β , and P α in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2015, 814: 98
- 3 Goodman J, Tan J C. Supermassive stars in quasar disks. *Astrophys J*, 2004, 608: 108–118
- 4 Cantiello M, Jermyn A S, Lin D N C. Stellar evolution in AGN disks. *Astrophys J*, 2021, 910: 94
- 5 Baruteau C, Cuadra J, Lin D N C. Binaries migrating in a gaseous disk: Where are the Galactic center binaries? *Astrophys J*, 2011, 726: 28
- 6 Bartos I, Kocsis B, Haiman Z, et al. Rapid and bright stellar-mass binary black hole mergers in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2017, 835: 165

- 7 Hamann F, Ferland G. Elemental abundances in quasistellar objects: Star formation and galactic nuclear evolution at high redshifts. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1999, 37: 487–531
- 8 Li F L, Liu Y, Fan X, et al. Core-collapse supernova explosions in active galactic nucleus accretion disks. *Astrophys J*, 2023, 950: 161
- 9 Woosley S E, Heger A. The progenitor stars of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2006, 637: 914–921
- 10 Luo Y, Wu X J, Zhang S R, et al. White dwarf–white dwarf collisions in AGN discs via close encounters. *Mon Not R Astron Soc*, 2023, 524: 6015–6023
- 11 Ren J, Chen K, Wang Y, et al. Interacting kilonovae: Long-lasting electromagnetic counterparts to binary mergers in the accretion disks of active galactic nuclei. *Astrophys J Lett*, 2022, 940: L44
- 12 Yuan C, Murase K, Guetta D, et al. GeV signatures of short gamma-ray bursts in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2022, 932: 80
- 13 Wang J M, Liu J R, Ho L C, et al. Accretion-modified stars in accretion disks of active galactic nuclei: Slowly transient appearance. *Astrophys J Lett*, 2021, 911: L14
- 14 Chen K, Dai Z G. Electromagnetic counterparts powered by kicked remnants of black hole binary mergers in AGN disks. *Astrophys J*, 2024, 961: 206
- 15 Kimura S S, Murase K, Bartos I. Outflow bubbles from compact binary mergers embedded in active galactic nuclei: Cavity formation and the impact on electromagnetic counterparts. *Astrophys J*, 2021, 916: 111
- 16 Tagawa H, Kimura S S, Haiman Z, et al. Observable signature of merging stellar-mass black holes in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2023, 950: 13
- 17 McKernan B, Ford K E S, Bartos I, et al. Ram-pressure stripping of a kicked hill sphere: Prompt electromagnetic emission from the merger of stellar mass black holes in an AGN accretion disk. *Astrophys J Lett*, 2019, 884: L50
- 18 Kelner S R, Aharonian F A, Bugayov V V. Energy spectra of gamma rays, electrons, and neutrinos produced at proton-proton interactions in the very high energy regime. *Phys Rev D*, 2006, 74: 034018
- 19 Kelner S R, Aharonian F A. Energy spectra of gamma rays, electrons, and neutrinos produced at interactions of relativistic protons with low energy radiation. *Phys Rev D*, 2008, 78: 034013
- 20 Zhou Z H, Wang K. High-energy neutrino emission associated with GWs from binary black hole mergers in AGN accretion disks. *Astrophys J Lett*, 2023, 958: L12
- 21 Ma Z P, Wang K. High-energy neutrinos from outflows powered by the kicked remnants of binary black hole mergers in active galactic nucleus accretion disks. *Astrophys J*, 2024, 970: 127
- 22 Zhu J P, Wang K, Zhang B, et al. High-energy neutrinos from choked gamma-ray bursts in active galactic nucleus accretion disks. *Astrophys J Lett*, 2021, 911: L19
- 23 Zhu J P, Wang K, Zhang B. High-energy neutrinos from stellar explosions in active galactic nuclei accretion disks. *Astrophys J Lett*, 2021, 917: L28
- 24 Zhou Z H, Zhu J P, Wang K. High-energy neutrino production from AGN disk transients impacted by the circum-disk medium. *Astrophys J*, 2023, 951: 74
- 25 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GWTC-1: A gravitational-wave transient catalog of compact binary mergers observed by LIGO and Virgo during the first and second observing runs. *Phys Rev X*, 2019, 9: 031040
- 26 Maggiore M, Broeck C V D, Bartolo N, et al. Science case for the Einstein telescope. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, 2020(3): 050
- 27 Graham M J, Ford K E S, McKernan B, et al. Candidate electromagnetic counterpart to the binary black hole merger gravitational-wave event S190521g. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 251102
- 28 Comerford T A F, Izzard R G, Booth R A, et al. Bondi–Hoyle–Lyttleton accretion by binary stars. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 490: 5196–5209
- 29 Wang J M, Liu J R, Ho L C, et al. Accretion-modified stars in accretion disks of active galactic nuclei: Gravitational-wave bursts and electromagnetic counterparts from merging stellar black hole binaries. *Astrophys J Lett*, 2021, 916: L17
- 30 Murase K, Thompson T A, Lacki B C, et al. New class of high-energy transients from crashes of supernova ejecta with massive circumstellar material shells. *Phys Rev D*, 2011, 84: 043003
- 31 Wang K, Huang T Q, Li Z. Transient high-energy gamma-rays and neutrinos from nearby Type II supernovae. *Astrophys J*, 2019, 872: 157
- 32 Ade P A R, Aghanim N, Arnaud M, et al. Planck 2015 results. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A13
- 33 Sun H, Zhang B, Li Z. Extragalactic high-energy transients: Event rate densities and luminosity functions. *Astrophys J*, 2015, 812: 33
- 34 Aartsen M G, Abraham K, Ackermann M, et al. A combined maximum-likelihood analysis of the high-energy astrophysical neutrino flux measured with icecube. *Astrophys J*, 2015, 809: 98
- 35 Aartsen M G, Abbasi R, Ackermann M, et al. Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube. *Nature*, 2021, 591: 220–224
- 36 Tagawa H, Kimura S S, Haiman Z. High-energy electromagnetic, neutrino, and cosmic-ray emission by stellar-mass black holes in disks of active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2023, 955: 23

- 37 Jiang Y F, Stone J M, Davis S W. A global three-dimensional radiation magneto-hydrodynamic simulation of super-eddington accretion disks. *Astrophys J*, 2014, 796: 106
- 38 Ohsuga K, Mori M, Nakamoto T, et al. Supercritical accretion flows around black holes: Two-dimensional, radiation pressure-dominated disks with photon trapping. *Astrophys J*, 2005, 628: 368–381
- 39 Sądowski A, Narayan R, Penna R, et al. Energy, momentum and mass outflows and feedback from thick accretion discs around rotating black holes. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 436: 3856–3874
- 40 Waxman E. Cosmological gamma-ray bursts and the highest energy cosmic rays. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 386–389
- 41 Wang K, Liu R Y, Dai Z G, et al. Hadronic origin of prompt high-energy emission of gamma-ray bursts revisited: In the case of a limited maximum proton energy. *Astrophys J*, 2018, 857: 24
- 42 Zhang B. *The Physics of Gamma-Ray Bursts*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
- 43 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Search for prompt neutrino emission from gamma-ray bursts with IceCube. *Astrophys J*, 2015, 805: L5
- 44 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Extending the search for muon neutrinos coincident with gamma-ray bursts in IceCube data. *Astrophys J*, 2017, 843: 112
- 45 Shang Z, Brotherton M S, Wills B J, et al. The next generation atlas of quasar spectral energy distributions from radio to X-rays. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 196: 2
- 46 Zhang H H, Zhu J P, Yu Y W. Propagation of GRB relativistic jets in AGN disks and its implication for GRB detection. 2024, arXiv: 2406.10904
- 47 Huang Y H, Wang K, Ma Z P. High-energy neutrino emission from NGC 1068 by outflow-cloud interactions. 2024, arXiv: 2406.14001
- 48 Das A, Zhang B T, Murase K. Revealing the production mechanism of high-energy neutrinos from NGC 1068. 2024, arXiv: 2405.09332
- 49 Yüksel H, Kistler M D, Beacom J F, et al. Revealing the high-redshift star formation rate with gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2008, 683: L5–L8
- 50 King A, Pounds K. Powerful outflows and feedback from active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2015, 53: 115–154
- 51 Laha S, Reynolds C S, Reeves J, et al. Ionized outflows from active galactic nuclei as the essential elements of feedback. *Nat Astron*, 2021, 5: 13–24
- 52 Pounds K A, Reeves J N, King A R, et al. A high-velocity ionized outflow and XUV photosphere in the narrow emission line quasar PG1211+143. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 345: 705–713
- 53 Blustin A J, Page M J, Fuerst S V, et al. The nature and origin of Seyfert warm absorbers. *Astron Astrophys*, 2005, 431: 111–125
- 54 McKernan B, Yaqoob T, Reynolds C S. A soft X-ray study of type I active galactic nuclei observed with Chandra high-energy transmission grating spectrometer. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 379: 1359–1372
- 55 Mizumoto M, Nomura M, Done C, et al. UV line-driven disc wind as the origin of UltraFast Outflows in AGN. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 503: 1442–1458
- 56 Pringle J E. Accretion discs in astrophysics. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1981, 19: 137–160
- 57 Burrows D N, Hill J E, Nousek J A, et al. The Swift X-Ray Telescope. *Space Sci Rev*, 2005, 120: 165–195
- 58 Weisskopf M C, Tananbaum H D, Van Speybroeck L P, et al. Chandra X-Ray Observatory (CXO): Overview. *Proc SPIE*, 2000, 4012: 2
- 59 Yuan W, Zhang C, Feng H, et al. Einstein Probe—A small mission to monitor and explore the dynamic X-ray Universe. 2015, arXiv: 1506.07735
- 60 McKernan B, Saavik Ford K E, Bellovary J, et al. Constraining stellar-mass black hole mergers in AGN disks detectable with LIGO. *Astrophys J*, 2018, 866: 66
- 61 Tagawa H, Haiman Z, Kocsis B. Formation and evolution of compact-object binaries in AGN disks. *Astrophys J*, 2020, 898: 25
- 62 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Binary black hole population properties inferred from the first and second observing runs of advanced LIGO and advanced Virgo. *Astrophys J Lett*, 2019, 882: L24
- 63 Zhu J P, Zhang B, Yu Y W, et al. Neutron star mergers in active galactic nucleus accretion disks: Cocoon and ejecta shock breakouts. *Astrophys J Lett*, 2021, 906: L11
- 64 Aartsen M, Ackermann M, Adams J, et al. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science*, 2018, 361: eaat1378
- 65 Abbasi R, Ackermann M, Adams J, et al. Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. *Science*, 2022, 378: 538–543
- 66 Stein R, Velzen S, Kowalski M, et al. A tidal disruption event coincident with a high-energy neutrino. *Nat Astron*, 2021, 5: 510–518
- 67 Abbasi R, Ackermann M, Adams J, et al. Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane. *Science*, 2023, 380: 1338–1343
- 68 Aartsen M, Ackermann M, Adams J, et al. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science*, 2018, 361: 147–151
- 69 Padovani P, Giommi P, Resconi E, et al. Dissecting the region around IceCube-170922A: The blazar TXS 0506+056 as the first cosmic neutrino source. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 480: 192–203
- 70 Inoue Y, Khangulyan D, Doi A. On the origin of high-energy neutrinos from NGC 1068: The role of nonthermal coronal activity. *Astrophys J Lett*,

- 2020, 891: L33
- 71 Wang X Y, Liu R Y. Tidal disruption jets of supermassive black holes as hidden sources of cosmic rays: Explaining the IceCube TeV-PeV neutrinos. *Phys Rev D*, 2016, 93: 083005
 - 72 Zheng J H, Liu R Y, Wang X Y. Choked jets in expanding envelope as the origin of the neutrino emission associated with tidal disruption events. *Astrophys J*, 2023, 954: 17
 - 73 Yang Q R, Zheng J H, Liu R Y, et al. Choked precessing jets in tidal disruption events and high-energy neutrinos. *Astrophys J Lett*, 2024, 970: L8
 - 74 Wu H J, Mou G, Wang K, et al. Could TDE outflows produce the PeV neutrino events? *Mon Not R Astron Soc*, 2022, 514: 4406–4412
 - 75 Gröbner M, Ishibashi W, Tiwari S, et al. Binary black hole mergers in AGN accretion discs: Gravitational wave rate density estimates. *Astron Astrophys*, 2020, 638: A119
 - 76 Jermyn A S, Dittmann A J, Cantiello M, et al. Stellar evolution in the disks of active galactic nuclei produces rapidly rotating massive stars. *Astrophys J*, 2021, 914: 105
 - 77 McKernan B, Ford K E S, O’Shaughnessy R. Black hole, neutron star, and white dwarf merger rates in AGN discs. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 498: 4088–4094
 - 78 Grishin E, Bobrick A, Hirai R, et al. Supernova explosions in active galactic nuclear discs. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 507: 156–174
 - 79 Yang Y, Bartos I, Gayathri V, et al. Hierarchical black hole mergers in active galactic nuclei. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 181101
 - 80 Aiello S, Akrame S E, Ameli F, et al. Sensitivity of the KM3NeT/ARCA neutrino telescope to point-like neutrino sources. *Astropart Phys*, 2019, 111: 100–110
 - 81 Anker A, Baldi P, Barwick S W, et al. White Paper: ARIANNA-200 high energy neutrino telescope. 2020, arXiv: [2004.09841](#)
 - 82 Allison P, Archambault S, Bard R, et al. Recent results from the Askaryan radio array. 2019, arXiv: [1907.11125](#)
 - 83 Álvarez-Muñiz J, Alves Batista R, Balagopal V A, et al. The Giant Radio Array for Neutrino Detection (GRAND): Science and design. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 219501
 - 84 Huang T Q, Cao Z, Chen M, et al. Proposal for the high energy neutrino telescope. In: Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference, PoS (ICRC2023), 2023, 444: 1080
 - 85 Ye Z P, Hu F, Tian W, et al. A multi-cubic-kilometre neutrino telescope in the western Pacific Ocean. 2020, arXiv: [2207.04519](#)

Summary for “超大质量黑洞吸积盘中的高能中微子辐射研究进展及展望”

Research progress and prospects of high-energy neutrino radiation in supermassive black hole accretion disks

Kai Wang

Department of Astronomy, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

E-mail: kaiwang@hust.edu.cn

In recent years, with the operation of a series of gravitational wave, high-energy neutrino, and electromagnetic radiation telescopes, astronomical research has entered the era of multi-messenger research. It is believed that the accretion disks around supermassive black holes in active galactic nuclei contain a wealth of stars and compact stars, as well as binary systems they form, whose evolution on the accretion disk can produce various types of astrophysical phenomena, generating multi-messenger signals including gravitational waves, electromagnetic radiation, and high-energy neutrinos. The astrophysical activities on the accretion disks of active galactic nuclei have aroused great interest in the astrophysical community due to the uniqueness of their environment. The accretion disks and the nuclear environment of active galactic nuclei are very complex, and high-energy neutrinos can easily escape from such a complex environment, becoming a unique and effective messenger to help us understand the astrophysical burst processes in the accretion disk.

This paper briefly reviews the research progress of high-energy neutrino radiation for the different astrophysical transient sources within the accretion disks of active galactic nuclei in recent years, including the jets and winds formed by the remnant black hole of binary stellar-mass black holes in the accretion disk, and the high-energy neutrino production in the interaction process of gamma-ray bursts and supernovae with disk matter. Especially for the process of binary black hole mergers and the short gamma-ray burst process of binary neutron star mergers, which is an important target for ground gravitational wave detector, if they occur on the accretion disk, they can also produce considerable high-energy neutrino radiation. For the joint detection of gravitational waves and high-energy neutrinos, current gravitational wave detection equipment and neutrino detectors have made some searches, but there are no associated detection results yet. The successful joint detection of gravitational waves and high-energy neutrinos in the future will undoubtedly be an important advancement in the field of astrophysics. The long gamma-ray bursts and supernovae that occur on the accretion disk can accelerate high-energy particles during the interaction of their jets or ejecta with the disk material. The rich gas and radiation field on the accretion disk can provide additional target particles for hadronic reactions, which can greatly improve the efficiency of hadronic reactions, thereby producing considerable high-energy neutrino radiation. We are also looking forward to detecting associated electromagnetic radiation and high-energy neutrino radiation for these sources.

This paper summarizes the typical neutrino detection expectations produced by different astrophysical processes and their contribution to the diffuse neutrino background. Currently, the information on various astrophysical processes on the accretion disk, including event rate, location and redshift evolution, is still very unclear, leading to a large range of uncertainty in their contribution to the diffuse neutrino background. However, we can combine the current observations of diffuse neutrino radiation by the IceCube neutrino detector to constrain the burst information of various astrophysical processes on the accretion disk. With the operation of the next generation of higher performance neutrino detectors, we are looking forward to the relevant equipment helping us to understand the astrophysical activity process on the accretion disk of supermassive black holes more deeply and promoting the development of neutrino astronomy.

accretion disk, supermassive black hole, high-energy neutrino, gravitational wave, transient source

doi: [10.1360/TB-2024-0611](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0611)