

活动星系核吸积盘内灾变性爆发事件的电磁和高能中微子信号

朱锦平^{1,2*}, 俞云伟^{3,4}, 张冰^{5,6}

1. School of Physics and Astronomy, Monash University, Clayton 3800, Australia

2. OzGrav: The ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery, Clayton 3800, Australia

3. 华中师范大学天体物理研究所, 武汉 430079

4. 华中师范大学夸克与轻子物理教育部重点实验室, 武汉 430079

5. Nevada Center for Astrophysics, University of Nevada, Las Vegas 89154, USA

6. Department of Physics and Astronomy, University of Nevada, Las Vegas 89154, USA

* 联系人, E-mail: jin-ping.zhu@monash.edu

2024-06-13 收稿, 2024-11-25 修回, 2024-11-28 接受, 2024-11-28 网络版发表

国家重点研发计划(2021YFA0718500)、空间站工程巡天空间望远镜首批科学研究课题(CMS-CSST-2021-A12)和国家自然科学基金(12393811)资助

摘要 双黑洞并合引力波事件GW190521及其疑似位于活动星系核(active galactic nucleus, AGN)吸积盘内的电磁对应体的发现掀起了针对AGN盘内灾变性爆发事件研究的热潮. 与通常的灾变性爆发事件不同, 由于AGN盘中的环境相对致密, 盘内爆发事件往往会造成强烈的激波, 使得这些爆发事件常常伴随着剧烈的激波突破和激波冷却辐射, 显著影响其观测特征. 同时, 激波的存在也会导致非热辐射和高能中微子的产生. 本文将详细评述当前关于盘内爆发事件的多波段辐射和高能中微子辐射的研究现状, 并总结目前相关研究面临的问题与未来可能的发展方向.

关键词 活动星系核吸积盘, 超新星, 双致密星并合, 伽马射线暴, 电磁对应体, 高能中微子

活动星系核(active galactic nucleus, AGN)是宇宙中一类极其明亮的天体, 位于星系中心, 由中心超大质量黑洞(supermassive black hole, SMBH)周围吸积盘落入黑洞时的引力能释放所驱动^[1]. 大量研究表明, 恒星和致密天体(包括白矮星、中子星和黑洞)可能普遍存在于超大质量黑洞周围的AGN吸积盘中, 它们可能起源于盘周围的星团并被盘捕获^[2~5], 也可能直接形成于盘内^[6~12]. 这些恒星和致密天体在AGN盘内演化、吸积与轨道迁移^[13~23], 它们的聚集增加了天体相遇的概率, 再加上盘物质的摩擦作用^[24~27], 使得大量双星系统得以形成. 因此, AGN吸积盘是恒星与致密天体发生并合或碰撞事件的摇篮^[25~39]. 与此同时, 由于对盘物质

的吸积, AGN盘中的大质量恒星也极易发生灾变性的爆发^[36,40~42]. 这些发生于AGN盘中的灾变性并合和爆发事件将由于所处相对致密的环境而与发生于普通星际介质中的情况存在显著差异, 具有独特的观测特征. 本文将总结和评述目前有关AGN盘内灾变性事件的多波段电磁辐射和高能中微子辐射的研究现状.

1 AGN盘内灾变性爆发事件的电磁信号特征

1.1 AGN盘内的类超新星爆发

AGN吸积盘内发生类超新星爆发时, 它们的抛射物与盘物质的相互作用将在碰撞面构成激波化区域.

引用格式: 朱锦平, 俞云伟, 张冰. 活动星系核吸积盘内灾变性爆发事件的电磁和高能中微子信号. 科学通报, 2025, 70: 411–422

Zhu J-P, Yu Y-W, Zhang B. Electromagnetic and high-energy neutrino signals from catastrophic explosion events in active galactic nucleus accretion disks (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 411–422, doi: [10.1360/TB-2024-0631](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0631)

在激波化区域前方, 正向激波在吸积盘中传播, 而后方则有反向激波减缓抛射物的速度. 考虑到AGN盘的光学厚属性, 上述激波相互作用将长时间发生于盘的光子扩散面(光子扩散面即指光子向外扩散的时标与激波动力学时标相等的位置)以内, 对应光深 $\tau > c/v_{\text{sh}}$, 其中 c 和 v_{sh} 代表光速和激波的速度. 此时的激波在物理属性上属于辐射调制激波(激波在介质中传播时, 可以将其动能转化为波后物质的内能进而产生辐射. 但在波前介质足够光学厚的情况下, 辐射扩散的速度可能还赶不上激波运动的速度, 使得辐射始终被束缚在激波附近. 因此, 当电子在激波上下游穿越时, 会由于逆康普顿散射而损失能量, 从而使其无法得到持续的加速, 进而无法产生非热辐射. 这类激波被称作radiation-mediated shock, 根据上述物理内涵, 我们建议将其翻译为“辐射调制激波”). 在这种情况下, 位于盘外的观测者实际上将无法看到任何来自爆发事件的电磁辐射(这一定程度上类似于在几百米的水下引爆一颗核弹, 对于处在水面上的观测者而言, 通常无法直接看到核弹爆发产生的火球辐射, 而只能看到爆炸冲击波推出水面的巨大水柱). 要一直到激波到达光子扩散面时, 观测者才可能看到激波辐射的突破. 激波突破辐射发

生的延迟时间、持续时间以及峰值亮度与AGN中心超大质量黑洞的质量和爆发事件在盘中发生的位置相关, 因此辐射特征存在多样性^[35,36]. 对于相同爆发能量的盘内类超新星爆发, 如果它们在更大质量黑洞周围且在更靠盘外侧的位置上爆发, 导致的激波突破的延迟时间和持续时间会更长, 但峰值亮度相对可能更低. Zhu等人^[35,36]最早预言了盘内千新星和超新星爆发导致的激波突破现象(图1). 对于发生在盘内的一般超新星而言, 激波突破的延迟时间主要在几小时到几十天范围内, 峰值光度主要在 $10^{43}\sim 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ 范围内, 辐射则位于紫外波段到软X射线波段, 一般高于吸积盘自身的辐射光度. Grishin等人^[41]通过数值模拟研究盘内超新星爆发, 也获得了类似的结论.

正向激波与吸积盘物质的相互作用是持续发生的, 被激波扫积的盘物质会慢慢消耗激波的动能并将其转化为内能. 在激波突破发生后, 激波相互作用产生的热光子会持续扩散出来, 形成所谓的相互作用辐射^[43]. 随着激波从辐射调制激波转变为无碰撞激波, 相互作用的辐射也将热辐射逐渐转变为非热辐射. 此外, 随着光子扩散面逐渐进入激波化区域的深处, 累积在里面无法扩散的能量将逐步以辐射的形式释放, 形成激波

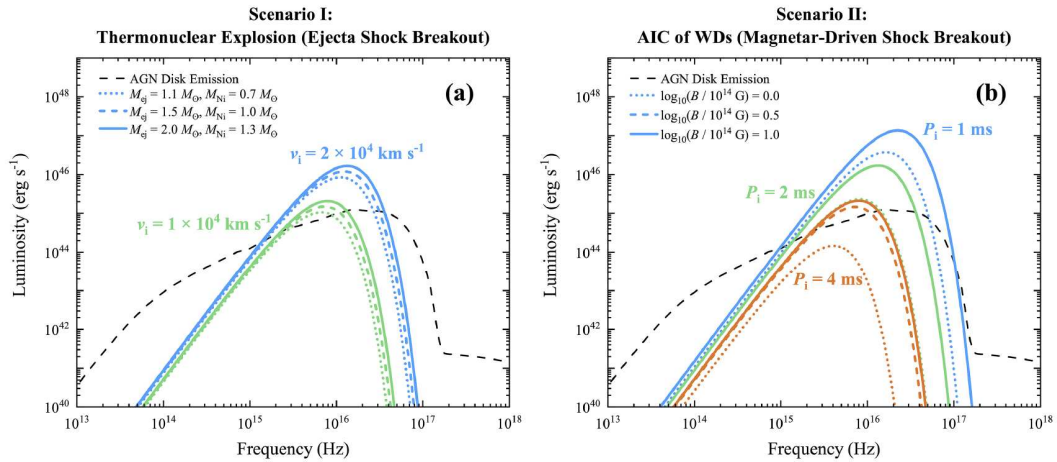


图1 盘内白矮星以Ia型超新星爆发(a)或以吸积塌缩爆发并产生磁陀星(b)造成激波突破时刻的光谱. 爆发位置位于 $10^8 M_{\odot}$ 超大质量黑洞吸积盘的迁移束缚轨道中. 对于(a)图, 实线、虚线和点线代表抛射物分别为 $2.0 M_{\odot}$ 、 $1.5 M_{\odot}$ 和 $1.1 M_{\odot}$ 倍的爆发, 蓝色线和绿色线则代表抛射物初始速度分别为1000和2000 km s^{-1} 的爆发. 对于(b)图, 实线、虚线和点线代表新生磁陀星的磁场大小分别为 10^{14} 、 3×10^{14} 和 10^{15} G, 蓝色、绿色和橙色线则代表磁陀星的初始旋转周期大小分别为1、2和4 ms. 黑色虚线为 $10^8 M_{\odot}$ 的AGN的光谱^[36]. Copyright © 2021, AAS

Figure 1 Spectra from the ejecta shock breakout via type Ia supernova explosions (a) and magnetar-driven shock breakout via accretion-induced collapse explosions (b) caused by the white dwarfs embedded in AGN accretion disks. The locations of explosions are assumed to be at the migration traps around $10^8 M_{\odot}$ SMBH. For Figure (a), the solid, dashed, and dotted lines are for fixed ejecta masses of $2.0 M_{\odot}$, $1.5 M_{\odot}$, and $1.1 M_{\odot}$, respectively. The blue and green lines are for initial ejecta velocities of 1000 and 2000 km s^{-1} , respectively. For Figure (b), the solid, dashed, and dotted lines are for newborn magnetars formed after accretion-induced collapses with magnetic field strengths of 10^{14} , 3×10^{14} , and 10^{15} G, respectively. The blue, green, and orange lines are for newborn magnetars with initial rotation periods of 1, 2, and 4 ms. The black dashed lines represent the AGN spectrum of $10^8 M_{\odot}$ SMBH^[36]. Copyright © 2021, AAS

冷却辐射^[44]。为了准确描述激波突破及其后的辐射性质, 我们需要细致考虑辐射调制激波的动力学演化。这一问题已在超新星领域得到了广泛研究, 特别是针对发生于致密环境介质中的超新星。具体来说, 若将环境介质的密度分布记为幂律形式(即 $\rho \propto r^{-n}$), 则超新星抛射物和介质相互作用产生的动力学将与幂指数 n 直接相关^[45,46]。一般认为, 在 $n < 3$ 的环境介质中, 正向激波将持续减速; 而在 $n \geq 3$ 的情况下, 正向激波处的气体内能会转换成动能, 使得激波加速, 最终使整个激波化区域的厚度变得不可忽略并具有一定的速度分布。对于AGN吸积盘而言, 如果它的压强以气体压为主导, 则其垂直盘面的密度分布可以用高斯分布来描述, 也就是 $\rho = \rho_0 \exp(-z^2/2H^2)$, 其中 z 是离盘中心平面的距离, ρ_0 为盘中心平面处的密度, H 为盘标高^[47]。对应于一般的AGN盘结构参数, 激波发生突破时速度约为 $v_{sh} \sim 0.01c$, 对应的位置高度大概是 $z \sim 4H$, 因此相应的激波动力学演化大概可分为两个阶段。在 $z \leq 2H$ 处, 其密度衰减会比 $\rho \propto r^{-3}$ 更为缓慢, 因而其动力学演化方程可简单采用激波跳跃条件来构造。但对于 $z \geq 2H$ 处而言, 因为密度衰减将变得极为陡峭, 相应的动力学演化也将变得较为复杂, 激波将可能从减速状态过渡为加速(图2), 且激波区域的宽度也会在中后期扩张。

Ren等人^[37]考虑激波相互作用产热的能量以及放射性物质衰变的能量从内部扩散, 在假设整个激波速度一致的前提下, 讨论了盘内千新星抛射物的潜在光变曲线。Li等人^[42]和Wang等人^[48]基于能量从中心扩散的超新星与星周物质相互作用模型, 分别研究了盘内核塌缩超新星和千新星与吸积盘碰撞产生的辐射。Grishin等人^[41]将超新星激波突破和激波冷却辐射模型从适用于密度呈幂律分布的星周物质模型, 扩展到了密度呈高斯分布的吸积盘模型。其理论预测的相互作用辐射和激波冷却辐射的光变曲线与通过数值模拟得到的结果相一致, 通常紧跟着激波突破辐射之后, 缓慢下降并甚至持续数百天时间(图3)。Grishin等人^[41]的工作中并未明确指出激波突破辐射和激波冷却辐射哪个更为重要。考虑到激波在穿越盘内高密度区域时会积累大量能量, 而在激波突破后, 由于吸积盘密度迅速下降, 激波在相互作用时损失能量的速率也会快速减慢, 因此我们认为激波冷却辐射将贡献大部分的辐射能量。随着光子扩散面穿过整个激波化物质并进入到抛射物中, 爆发事件自身的辐射得以显现, 这类辐射的能量主

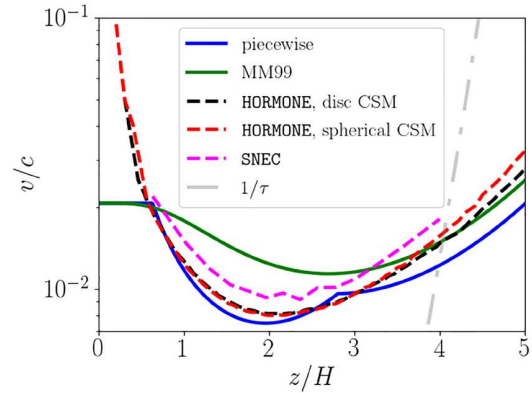


图2 激波在气体压强为主导的吸积盘内运动时速度随距离的演化。这里假设爆发事件为一般1a型超新星, 且事件发生在离 $10^7 M_\odot$ 超大质量黑洞 10^3 个史瓦西半径处。蓝色和绿色实线为理论结果。红色虚线为一维数值模拟结果。黑色虚线和紫色虚线为二维模拟结果。灰色虚线为激波突破位置^[41]。Copyright © 2021, Evgeni Grishin and Alexey Bobrick

Figure 2 Velocity evolution of shock in gas-dominated accretion disk. Here, the explosion event is assumed to be normal Ia supernova occurring 10^3 Schwarzschild radius away from a $10^7 M_\odot$ SMBH. The colorful lines represent the results based on different theories and simulations. The blue and green solid lines are for theoretical results. The red dashed line is for one-dimensional results. The black dashed line and violet dashed line are for two-dimensional results. The gray dashed line represents the location of shock breakout^[41]. Copyright © 2021, Evgeni Grishin and Alexey Bobrick

要来源于放射性物质衰变或者恒星级黑洞、中子星等中心引擎的能量注入。Zhu等人^[36]发现由于激波扫积吸积盘的物质的包裹, 类超新星自身辐射导致的光变曲线将会被压平, 且达峰时间更晚, 整体的辐射也更加偏红。此外, 吸积盘的热辐射可能会影响到晚期盘内类超新星爆发的观测。Zhang等人^[38]提出盘内超新星抛射物在离开吸积盘面后, 会再受到中心超大质量黑洞引力的影响, 重新被拽回吸积盘。被引力拽回吸积盘的物质会与吸积盘发生碰撞, 产生明亮的X射线波段的暂现源。

1.2 AGN盘内的伽马射线暴

早在1999年, Cheng和Wang^[28]就提出了一个前瞻性的观点: AGN的吸积盘中可能会孕育伽马暴。具体来看, AGN盘内的恒星一方面可以通过吸积使其自转加快^[16]; 另一方面, AGN盘内的恒星在吸积质量增长后可能拥有巨大和强烈的对流核, 使得吸积的氢元素会快速转移到恒星内部进行核反应, 形成更重的氦元素。到了AGN恒星寿命晚期, 恒星自身的辐射光度会

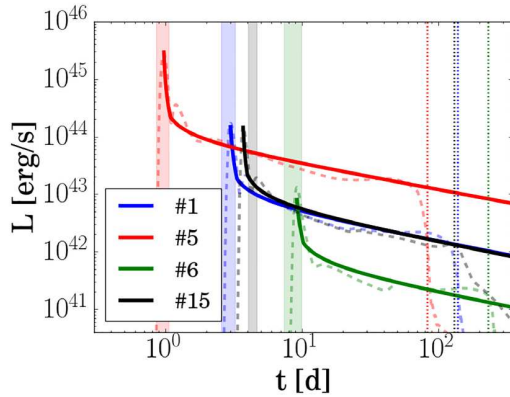


图 3 激波突破后相互作用辐射和激波冷却辐射的光变曲线. 不同颜色实线和虚线分别代表解析结果和模拟结果. 这里假设爆发事件为一般超新星, 且事件发生在离 $10^7 M_{\odot}$ 超大质量黑洞 10^3 个史瓦西半径处. 蓝色线、红色线、绿色线代表爆发能量分别为 10^{51} 、 10^{50} 和 10^{52} erg的抛射物质量为 $1.3 M_{\odot}$ 的超新星爆发导致的光变曲线. 黑色线则假设爆发能量为 10^{51} erg, 且抛射物为 $10 M_{\odot}$. 阴影区域代表激波突破时的区域^[41]. Copyright © 2021, Evgeni Grishin and Alexey Bobrick

Figure 3 Lightcurves of interaction emissions and shock cooling emissions after the shock breakouts. Different solid lines and corresponding dashed lines represent semi-analytical and numerical results. Here, the explosion event is assumed to be normal supernova occurring 10^3 Schwarzschild radius away from a $10^7 M_{\odot}$ SMBH. The blue, red, and green lines represent lightcurves caused by $1.3 M_{\odot}$ explosions with energies of 10^{51} , 10^{50} , and 10^{52} erg. The black line is for ejecta mass of $10 M_{\odot}$ and explosion energy of 10^{51} erg. The shadow regions are the locations of the shock breakouts^[41]. Copyright © 2021, Evgeni Grishin and Alexey Bobrick

显著增加, 逐渐阻碍恒星进一步吸积AGN盘的气体. 同时, 随着恒星演化和质量增加, 星风也会更加强烈, 恒星的物质损失率最终可能会超过吸积率, 使得外层氢、氦物质会快速损失. 因此, AGN恒星可能会经历类似化学均匀演化过程^[15,49]. 这些特殊演化行为使得盘内恒星很可能最终成为具有极快旋转的致密氦星(即沃尔夫拉叶星), 具有与长伽马暴前身星非常相似的特征^[50~52]. 这使得它们在发生超新星爆发时很可能在核心形成一颗高速旋转且高度磁化的中子星或黑洞, 从而驱动极端相对论性的喷流^[53]. 与此同时, 基于对短伽马暴现象的认识, 我们也可以期待相对论性喷流同样极易产生于AGN盘内普遍发生的致密天体并合和碰撞事件(主要包括双中子星并合和中子星-黑洞并合)^[31], 伴随着引力波事件的发生. 不过, 鉴于AGN盘内致密的环境, 这些相对论性喷流是否能如通常一样产生伽马暴瞬时辐射和余辉辐射则有待商榷.

如前面讨论超新星抛射物的运动一样, 相对论性

喷流在AGN盘内运动时, 会在喷流前方形成激波化区域(即喷流头), 包括扫积盘物质的正向激波和减速喷流物质的反向激波. 喷流头的结构和动力学演化特征决定于正反激波区域之间的力学平衡^[54,55], 因而主要和喷流的光度、截面以及介质密度相关, 其综合参数可写为 $\tilde{L} \approx L_j / \Sigma \rho_j c^3$, 其中 L_j 为喷流的光度, Σ_j 为喷流头的横截面大小, ρ_j 为喷流的密度, c 为光速^[54,56]. 喷流头动力学对参数 $\tilde{L}$ 的依赖情况可参考表1. 具体来说, 当喷流能量密度远大于吸积盘物质的能量密度时, 喷流头将具有相对论性的速度, 反之则只会以非相对论性速度或准相对论性速度运动. 在这个过程中, 喷流头的物质会由于其自身的压强而向垂直喷流运动的方向扩张, 其在喷流头随动系扩散速度可由其声速来大致表征. 因此, 当喷流头本身并不具有相对论性速度的情况下, 侧向膨胀可能会变得显著而形成包裹喷流的茧, 影响喷流的结构(使其准直)和演化. 最后, 当反向激波还未穿过整个喷流时, 喷流头会突破吸积盘表面. 对于喷流最终能够成功冲破AGN盘的情况, 一旦通道被打开, 后续的喷流物质就可以自由传播, 因而其辐射效应将与普通伽马暴类似, 观测者可以看到瞬时辐射和余辉辐射. Perna等人^[57]指出, 当中心黑洞的质量较低时($M_{\text{SMBH}} \sim 10^6 M_{\odot}$), 且伽马暴爆发位置离中心黑洞较近时, 盘内伽马暴爆发更容易造成这种情况. 需要说明的是, 由于吸积盘密度比星周介质高很多, 盘内伽马暴导致的余辉辐射演化会快很多. Huang等人^[58]则研究了喷流突破之后在吸积盘大气中运动时产生的余辉辐射. 此外, Yuan等人^[59]提出, 双中子星并合之前或许可以清除吸积盘轨道附近的气体. 这种情况下, 观测者也可以看到正常的伽马暴和余辉辐射.

当反向激波穿过整个喷流时, 喷流头仍未触及吸积盘的表面, 那么这个喷流就可以被认为是被AGN盘气体室塞(choke)了. 由于盘内伽马暴更容易出现在迁移束缚轨道以及在盘更外侧的恒星形成区, 导致大部分盘内发生的伽马暴喷流将会被室塞, 因此人们更加关心喷流在AGN盘中室塞情况下的辐射特征. Perna等人^[57]提出, 伽马暴喷流在室塞前会产生余辉辐射, 因而盘外观测者将会看到从盘内扩散出来的余辉辐射. Wang等人^[60]和Kathirgamaraju等人^[61]则详细考虑了喷流在吸积盘内运动时产生的扩散的余辉辐射. 然而, 常常被忽略的一个重要的物理条件是, 由于在盘内运动的伽马暴喷流头处的激波为辐射调制激波, 而不是无

表 1 喷流结构和喷流头速度

Table 1 Jet structure and velocity of the jet head

参数	准直喷流	未准直喷流
	$\tilde{L} < 1$	$1 \ll \tilde{L} < \theta_0^{-4/3}$
$\tilde{L}$	$\left(\frac{L_j}{\rho_d t^2 \theta_0^4 c^5}\right)^{2/5}$	$\left(\frac{L_j}{\rho_d t^2 \theta_0^4 c^5}\right)^{2/5}$
喷流头速度	非相对论或准相对论速度	相对论速度
喷流张角大小	$\tilde{L}^{1/4} \theta_0^2$	$\tilde{L}^{3/4} \theta_0^2$
		θ_0

a) θ_0 为初始喷流张角

碰撞激波, 此时电子的加速是不被允许的, 因此伽马暴在激波突破前也就无法产生扩散的余辉辐射。

喷流在室塞以后, 整个喷流遗迹(包括喷流及其扫积物)的演化将非常类似于超新星抛射物的演化。有所区别的是, Zhu等人^[35,62]和Zhang等人^[63]的计算表明, 对于发生在迁移束缚轨道处(即 $10^3 \sim 10^5$ 个超大黑洞半径)的伽马暴, 喷流发生室塞的位置常常仅处于整个盘高的 $1/10 \sim 1/100$, 此时的喷流头仍具有准相对论性乃至相对论性的运动速度, 远高于超新星抛射物的情况。这种室塞的伽马暴与前述类超新星爆发的情况相似, 在激波到达突破位置之前, 我们将无法看到相应的激波余辉辐射以及由于喷流内耗散而产生的伽马射线瞬时辐射。因此, 从与普通伽马暴的余辉相比较的角度来看, 可受到关注的辐射主要包括激波突破以及突破后的两个阶段。Zhu等人^[35]的计算表明, 激波突破一般发生在X射线波段(图4), 故其观测一般会受到吸积盘自身辐射的影响, 可被爱因斯坦探针等X射线巡天望远镜捕捉到。对于双中子星并合等事件而言, 激波突破信号可作为非常有效的AGN引力波事件的电磁对应体, 帮助证认事件起源。对于激波突破后的辐射, 其一, 当激波运动在光子扩散面和光球面之间时, 观测者可以看到明亮的激波相互作用辐射和激波冷却辐射。此时, 激波已转变为无碰撞激波, 电子可以加速产生非热辐射。然而, 由于盘物质的吸收和光子的扩散, 这时观测者看到的将会是暗弱的扩散余辉辐射, 其性质仍将十分不同于普通的伽马暴余辉。这一阶段的持续时间高度和亮度依赖于光子扩散面和光球面的距离, 其实也就决定于此时的激波速度。其二, 当激波运动到光球层以外时, 观测者才可能看到正常的余辉辐射, 但此时由于激波为非相对论性激波, 产生的余辉将更像是晚期的发生在星周介质内伽马暴的余辉。

Levan等人^[64]在一遥远星系中心发现了一个长伽马暴(GRB 191019A)。Lazzati等人^[65]认为这可能是来源

于AGN盘内伽马暴直接的瞬时辐射, 并进一步提出其辐射持续时间在扩散过程中被拉长, 因而其本征持续时间较短, 很可能起源于双中子星并合^[66]。不过, 根据前面的动力学分析, Levan等人^[64]的论断仍然存在理论上的挑战。其一, 喷流的内耗散过程很可能发生于AGN盘的深处, 相应的辐射扩散会受到极大的抑制和损耗, 并且在辐射密度极大的情况下喷流是否能够通过内激波产生非热辐射显然也是存疑的。其二, 即使瞬时辐射是在激波突破之后才发生(可能性较小), 光子的扩散过程也将使得光变曲线变得较为平滑, 而难以形

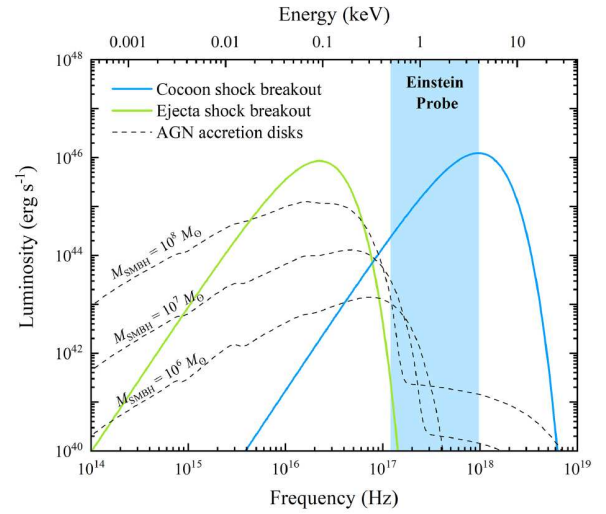


图 4 短伽马暴喷流室塞后扫积物质的激波突破(蓝色实线)和千新星抛射物的激波突破(绿色实线)。事件假设发生在离 $10^8 M_\odot$ 超大质量黑洞 10^3 个史瓦西半径处。黑色虚线为不同超大质量黑洞AGN的辐射。蓝色阴影部分为爱因斯坦探针的探测范围^[35]。Copyright © 2021, AAS

Figure 4 Choked short-duration gamma-ray burst jet shock breakout after sweeping up AGN disk material (blue solid line) and kilonova ejecta shock breakout (green solid line) for neutron star mergers in AGN accretion disks. The neutron star mergers are assumed to occur at 10^3 Schwarzschild radius away from a $10^8 M_\odot$ SMBH. The black dashed lines represent the AGN spectra for different masses of SMBH. The blue shadow region is the nominal detection bandpass of the Einstein Probe mission^[35]. Copyright © 2021, AAS

成观测到的多脉冲光变结构。

1.3 盘内的单个黑洞活动和双黑洞并合

一般情况下,由于周围缺少气体,单个黑洞和双黑洞并合通常认为不会产生任何电磁对应体。然而,如果单个黑洞或双黑洞系统发生在AGN吸积盘内,通过与盘内气体的相互作用,可以产生可观测的电磁信号^[25,67]。早期的工作通常认为吸积盘内单个黑洞或双黑洞系统会持续通过吸积,在盘内打开一个缺口,从而可以直接看到盘内黑洞通过吸积造成的X射线波段辐射。然而,这种不间断的吸积会造成两个严重的问题:(1)吸积盘内黑洞会在AGN存活的时间内快速成长,变为中等质量黑洞,甚至是超大质量黑洞;(2)吸积盘内如果存在多个致密天体,会很快将吸积盘气体抽干。Wang等人^[18]、Chen等人^[21]和Tagawa等人^[20]提出,盘内黑洞的极/超爱丁顿吸积可能会导致剧烈的爆发,将会吹散黑洞周围的气体并阻碍吸积。Wang等人^[18]和Chen等人^[21]认为是由恒星级黑洞吸积盘驱动的盘风导致的爆发,而Tagawa等人^[20]则认为单个黑洞可以通过Blandford–Znajek效应^[68]产生喷流,喷流在AGN吸积盘中运动产生的茧会驱散黑洞周围气体。每次黑洞的爆发结束之后,盘内气体将会缓慢地填充黑洞周围的空隙,直至充满空隙导致下一次周期性爆发的发生。这种反馈机制的存在,使得盘内黑洞的质量不会迅速地增长,且导致这些黑洞绝大部分时间会嵌入在吸积盘内,通常无法直接看到它们吸积导致的直接的辐射,而会产生类似于第1.1节提到的盘内类超新星爆发的图像。Liu等人^[69]基于Wang等人^[18]的模型,系统性地研究了盘内黑洞爆发后,在吸积盘不同位置处导致的相互作用辐射,以及激波离开盘进入到宽线区域产生的非热辐射。Tagawa等人^[70]则系统性地讨论了盘内黑洞喷流突破后导致的激波突破辐射,以及激波随后穿越盘物质导致的非热辐射。相比于盘内单个黑洞,盘内双黑洞系统则会通过环绕在系统周围的吸积盘产生盘风,导致爆发^[32]。系统中单个黑洞周围则会产生微型吸积盘,从而通过Blandford–Znajek效应^[68]产生喷流。盘内双黑洞系统导致的观测效应将会类似于盘内单个黑洞导致的观测效应。

盘内双黑洞并合也可能产生强烈的可观测电磁信号。在引力波第三次观测运行周期内,美国的LIGO和欧洲Virgo组成的合作组发现了一例高质量双黑洞并合系统GW190521,其两个黑洞的质量分别是 $85_{-14}^{+21}M_{\odot}$

和 $66_{-18}^{+17}M_{\odot}$,最终形成了一个中等质量黑洞^[71]。有趣的是,Graham等人^[72]通报了一例由ZTF (Zwicky Transients Factory)望远镜发现的光学电磁对应体ZTF19abnhr,疑似与GW190521双黑洞并合事件在空间和时间上成协。该电磁对应体在GW190521触发后约34天被侦测到,持续约40多天,可能发生于AGN J124942.3 + 344929中。McKernan等人^[73]提出,双黑洞并合后遗留下的黑洞可能会由于引力波的不对称辐射获得一定的速度。盘内被新生黑洞引力束缚的气体,会跟着黑洞一起运动,与吸积盘发生相互作用产生热能,并可能从吸积盘中扩散出来,产生可观测的热辐射。该模型早期被用来解释GW190521疑似成协电磁对应体的起源。Wang等人^[26]则预言盘内双黑洞并合之后可以通过新生黑洞的盘风产生剧烈的爆发,或通过Blandford–Znajek效应产生喷流,最终导致明亮的可观测的多波段信号。Kimura等人^[67]认为,在双黑洞并合发生之前,轨道附近的气体会被清除。高速运动的新生黑洞会进入到盘中,并通过超爱丁顿吸积产生强烈的盘风,进而导致激波突破辐射。Chen等人^[74]和Rodríguez-Ramírez等人^[75]提出并合后的新生黑洞进入盘中也可能产生喷流,造成喷流或茧的激波突破辐射和激波冷却辐射。Tagawa等人^[76]则提出双黑洞并合发生在空隙中,并合之后喷流可能会改变方向,从而撞上吸积盘物质。Tagawa等人^[77]在另一篇工作中系统性讨论了在盘不同位置处的双黑洞并合后,茧激波的突破辐射和激波冷却辐射的光学光变曲线。盘风或喷流释放的能量与所在盘的位置和黑洞的自旋大小等相关,因此会存在多样性,这也使得盘内黑洞爆发或双黑洞并合产生的电磁对应体存在复杂的多样性。一般来说,文献中普遍预言盘内黑洞爆发或双黑洞并合导致的激波突破会在紫外到X射线波段,通常位于更大质量超大质量黑洞吸积盘的更外侧,电磁信号持续时间和延迟时间会更长。

文献中普遍预言盘内单个黑洞爆发或双黑洞并合都可以产生喷流,需要说明的是,这些喷流与盘内伽马暴喷流的动力学演化会有一定差别。相比伽马暴喷流,双黑洞并合导致的喷流光度一般要低,但可以持续更长的时间。由于较低的光度,茧的压强通常会将喷流高度准直,且喷流导致的动能绝大部分会进入到茧的物质中。此外,较低的光度也使得喷流头的速度一般只能达到非相对论性或准相对论性速度,很难达到极端相对论性速度。

2 AGN盘内爆发事件的高能中微子暴

激波的传播过程在宏观上是把抛射物的动能逐渐转化为内能的过程，而在微观上则可能实现对带电粒子的加速。具体来讲，当大量带电粒子从各个不同方向与运动中的磁化等离子体团块发生碰撞时，如果带电粒子基本上不与团块粒子发生碰撞而只受到磁场的作用，那么在统计平均上这些带电粒子将因为与这块磁云的碰撞而得到加速(即二阶费米加速机制)。在激波情况下，激波上下游的区域原则上均可视为运动的磁云，因而当带电粒子每穿过一次激波面，平均而言都可以得到一次加速(且因为每次都是迎头碰，加速效率更高，即为一阶费米加速机制)。因此，激波被广泛认为是非热辐射和宇宙线的主要来源。当然，上述过程的前提是加速过程中的粒子不会因为碰撞而损失能量，所以对于辐射调制激波而言，其对粒子的加速作用会由于粒子与光子的频繁碰撞而受到抑制。如前所述，对于AGN盘内发生的各类灾变性爆发事件，其所驱动的激波在发生突破后将最终转化为无碰撞激波，从而实现对带电粒子的加速。其能够实现最高加速能力取决于减速过程和动力学过程，这些过程与系统的磁场强度和尺度等因素有关。一般来说，对于加速后的电子和质子而言，前者主要冷却过程是辐射冷却，一般认为将贡献主要的非热电磁辐射，而后者主要冷却过程则包括非弹性强子核散射反应(pp ，即 $p+p \rightarrow \pi^\pm, K^\pm$)、Bethe-Heither过程($p+\gamma \rightarrow p+e^++e^-$)和光介子产生过程($p\gamma$ ，即 $p+\gamma \rightarrow n, \pi^+$)。通过强子过程(pp 和 $p\gamma$ 过程)及其后的介子衰变，激波将能够向外辐射能量超过TeV~PeV的高能伽马射线和高能中微子，可被IceCube(冰立方)等高能中微子探测器探测到。

对于AGN盘内的正向激波而言，由于波前的吸积盘物质密度非常高， pp 过程可能会主导高能中微子的产生^[78]。通过对比加速时标(即 $t_{\text{acc}} = \eta \epsilon_p / eBc$ ，其中对Bohm近似有 $\eta = 20c^2 / 3v_s^2$ ， v_s 为激波速度， ϵ_p 为质子的能量， e 为电子带电量， $B = \sqrt{4\pi\epsilon_B \rho_d v_s^2}$ 为激波化AGN物质的磁场大小， $\epsilon_B \approx 0.01$ 为通常采用的磁能占比)和 pp 过程的减速时标(即 $t_{pp} = 1 / [(\rho_s / m_p) \kappa_{pp} \sigma_{pp} c]$ ，其中 $\rho_s = 4\rho_d$ 为激波化AGN物质的密度， m_p 为质子质量， $\kappa_{pp} \approx 0.5$ 为高能质子每次碰撞损失的能量比例， $\sigma_{pp} \approx 5 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$ 为 pp 反应截面)，即 $t_{\text{acc}} \approx t_{pp}$ ，质子的

最高能量可以达到 $\epsilon_p^{\text{max}} \approx 9.4 \times 10^2 \text{ TeV} \rho_{d,-13}^{-1/2} v_{s,9}^3$ ，因此AGN盘内类超新星爆发导致的激波可以产生PeV左右的高能质子。而此后 pp 反应生成的高能中微子的能量约为质子能量的5%左右，即AGN盘内类超新星爆发可以产生最高10 TeV左右的高能中微子，但最高能量与类超新星在盘中爆发位置和密度等高度相关。在第1.1节中，我们介绍了超新星周介质和吸积盘的气体密度分布。Zhu等人^[78]发现，由于激波在突破后吸积盘的密度下降速度远快于星周介质，因此由盘内类超新星爆发导致的中微子暴的光度相比IIn型超新星会迅速下降，但最终导致的中微子通量谱会非常相似(图5)。他们指出IceCube探测器对盘内类超新星的直接探测距离通常仅有几个Mpc，在这个范围内仅有数个AGN，因此盘内超新星的中微子暴很难被直接观测到。

Zhu等人^[62]提出，盘内伽马暴也可能是宇宙中高能中微子的来源之一。盘内伽马暴的正反激波演化过程

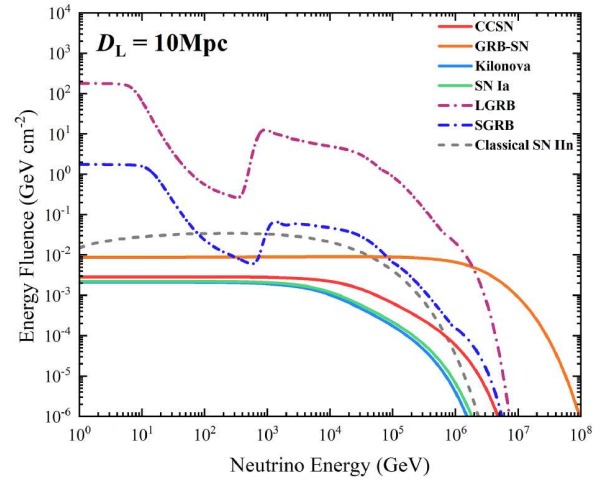


图5 不同种类盘内类超新星导致的所有味道中微子谱(实线)以及长伽马暴、短伽马暴导致的所有味道中微子谱(虚-点线)。红色实线、橙色实线、蓝色实线、绿色实线、紫色点虚线和深蓝色点虚线分别代表核塌缩超新星、伽马暴成协超新星、千新星、Ia型超新星、长伽马暴和短伽马暴在AGN吸积盘内爆发时导致的中微子谱。灰色虚线为一般IIn型超新星导致的中微子谱^[62,78]。Copyright © 2021, AAS

Figure 5 Energy fluences of all-flavor neutrino from different AGN stellar explosions (solid lines) and gamma-ray bursts in AGN accretion disks (dashed-dotted lines). The red solid line, orange solid line, blue solid line, green solid line, violet dashed-dotted line, and deep blue dashed-dotted line represent neutrino spectra caused by core-collapse supernova, gamma-ray burst associated supernova, kilonova, Type Ia supernova, long-duration gamma-ray burst, and short-duration gamma-ray burst occurring in AGN disks, respectively. The gray dashed line represents the neutrino spectrum caused by a normal Type IIn supernova^[62,78]. Copyright © 2021, AAS

已在第1.2节中简单叙述. Zhu等人^[62]认为, 喷流在室塞之前, 喷流头后方的反向激波可以允许以费米机制加速产生最高能量约为数10 PeV的高能质子(图6), 并与喷流头处的热光子经过 $p\gamma$ 反应产生可观测的TeV~PeV高能中微子. 在相同距离下, 对比盘内类超新星中微子暴的通量谱, 盘内伽马暴导致的中微子暴的谱会高2~4个量级(图5), 因此直接的探测深度甚至可以达到100 Mpc. 但由于盘内伽马暴导致的中微子暴存在较强的视角依赖, 其探测率与盘内类超新星的中微子暴可能差不多.

第1.3节介绍了盘内单个恒星级黑洞和双黑洞并合导致的爆发事件和它们产生喷流的演化特征. Tagawa等人^[79]假设盘内单个黑洞周围会形成空腔, 此时黑洞吸积产生的喷流可以直接从空腔中出来. 对于离中心超大黑洞比较近的黑洞, 它们吸积导致的喷流的内激波可能可以允许费米加速的发生, 并产生高能中微子. Tagawa等人^[79]指出, 盘内恒星级黑洞产生的高能中微子通常只能贡献极少部分的宇宙中微子背景. Zhu^[80]则提出, 盘内双黑洞并合导致的喷流也可以产生高能中微子. 双黑洞并合产生中微子的物理过程类似于盘内

伽马暴, 即质子将会在喷流头的反向激波处被加热, 与喷流头的热光子通过 $p\gamma$ 过程产生高能中微子. 不同的是, 双黑洞并合产生的喷流一般可以从吸积盘表面成功突破, 高能中微子在突破之前都会一直产生. 因此, 高能中微子的最终通量大小更多取决于喷流突破所需的时间, 即与吸积盘的厚度密切相关. Zhu基于GW190521起源于AGN盘中的假设, 发现GW190521如果发生在盘的外围(见Tagawa等人^[76]基于电磁对应体对GW190521位置的限制), 且喷流张角对着地球, 将有可能被IceCube中微子探测器探测到. 然而, 由于AGN盘内双黑洞并合导致的喷流通常会被高度准直, 且事件率密度较低, Zhu^[80]给出IceCube探测器对起源于AGN盘内通道的双黑洞并合中微子暴的探测率小于0.2个每年.

下一代中微子望远镜如IceCube-Gen2探测器、国内的海铃计划(TRIDENT)与高能水下中微子探测器(HUNT)都能够达到IceCube探测器有效探测体积10倍以上, 对有效探测面积提高4.6倍或以上. 因此, 相比于IceCube探测器, 下一代中微子望远镜的探测深度和对中微子源的探测数目将会分别提高2.2倍和10倍或以上. 尽管如此, 由于AGN吸积盘内类超新星爆发导致的中微子暴一般流量非常低, 下一代中微子望远镜仍然较难观测到这类中微子暴. 但是多年的数据积累可能可以对AGN类超新星爆发的事件率有一定的限制, 从而直接限制AGN以及AGN类超新星形成的参数模型^[62]. 而对于AGN盘内通道的双黑洞并合中微子暴, 探测率则可以达到最高2个每年^[80], 因此在未来很有可能可以实现AGN中双黑洞并合引力波、电磁和中微子暴的联合多信使观测.

3 总结与展望

由于AGN盘中的环境相对致密, 盘内爆发事件往往会驱动导致强烈的激波, 影响这类暂现源的光学辐射特征. 激波的存在也使得这类爆发事件可以导致独特的非热辐射特征以及产生高能中微子暴. 本文总结并评述了目前关于盘内灾变性剧烈爆发事件多波段辐射和高能中微子辐射的研究现状.

由于目前高能中微子探测能力的限制, 盘内爆发事件的电磁辐射更容易被现有的探测设备所观测到. 理论预言AGN盘内爆发事件会导致明亮的激波突破辐射, 光变曲线随后由相互作用辐射以及激波冷却辐射主导, 晚期则可能看到爆发源由放射性物质衰变或中

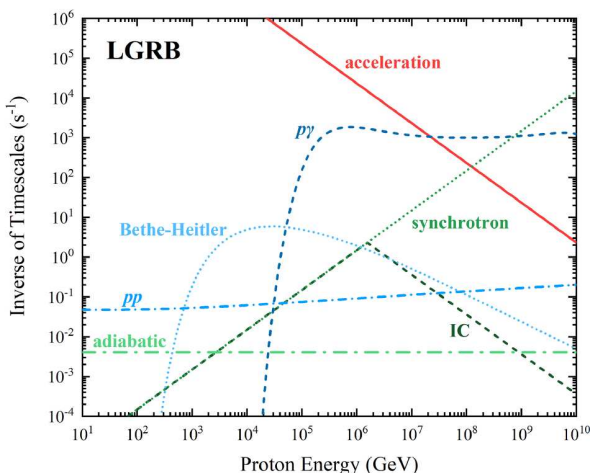


图6 对于AGN吸积盘中长伽马暴质子加速时标和冷却时标的倒数的对比. 考虑了以下过程: 费米加速(红色实线)、 $p\gamma$ (蓝色虚线)、Bethe-Heitler效应(蓝色点线)、 pp (蓝色点-虚线)、逆康普顿散射(IC, 绿色虚线)、同步辐射(绿色点线)和绝热冷却(绿色点-虚线)^[62]. Copyright © 2021, AAS

Figure 6 Inverse of proton acceleration and cooling timescales as a function of proton energy in the jet head frame for a classical LGRB in AGN accretion disks. Acceleration (red solid), $p\gamma$ (blue dashed), Bethe-Heitler pair production (blue dotted), pp (blue dashed-dotted), inverse-Compton (IC, green dashed), synchrotron radiation (green dotted), and adiabatic cooling (green dashed-dotted) processes are considered^[62]. Copyright © 2021, AAS

心引擎供能导致的辐射。对AGN盘内爆发事件的理论研究和数值模拟,揭示了它们的光变曲线特征,尤其是亮度和持续时间等特征参数,与发生在星系中心的潮汐瓦解事件和II型超新星可能类似。此外,理论估计的盘内爆发事件的事件率密度与潮汐瓦解事件的事件率密度相似,因此不排除有一些盘内爆发事件被证认为潮汐瓦解事件或II型超新星,或一些盘内爆发事件的观测数据已被记录在巡天望远镜的数据库中。未来对盘内爆发事件电磁辐射特征进行更加具体的研究,从而去证认这些爆发事件是非常有必要的。盘内爆发

事件的辐射与激波的演化密切相关,但文献中对盘内激波演化的研究普遍忽视了激波厚度的演化和速度梯度分布,未来研究需要更加详细地从理论和数值的角度给出更加具体的盘内激波的演化。目前对盘内爆发事件的研究主要停留在一维角度,而这些爆发事件更需要从二维角度进行考量,这使得数值模拟变得不可或缺。由于盘的密度和厚度跨度非常大,我们或许在未来需要建立起盘内爆发事件的多波段光变曲线和光谱演化的模板库,以方便观测上对这类爆发事件进行证认。

参考文献

- 1 Lynden-bell D. Galactic nuclei as collapsed old quasars. *Nature*, 1969, 223: 690–694
- 2 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
- 3 Artymowicz P, Lin D N C, Wampler E J. Star trapping and metallicity enrichment in quasars and active galactic nuclei. *Astrophys J*, 1993, 409: 592–603
- 4 Fabj G, Nasim S S, Caban F, et al. Aligning nuclear cluster orbits with an active galactic nucleus accretion disc. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 499: 2608–2616
- 5 MacLeod M, Lin D N C. The effect of star–disk interactions on highly eccentric stellar orbits in active galactic nuclei: A disk loss cone and implications for stellar tidal disruption events. *Astrophys J*, 2020, 889: 94–106
- 6 Kolykhalov P I, Syunyaev R A. The outer parts of the accretion disks around supermassive black holes in galaxy nuclei and quasars. *Soviet Astron Lett*, 1980, 6: 357–361
- 7 Shlosman I, Begelman M C. Evolution of self-gravitating accretion disks in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 1989, 341: 685–691
- 8 Goodman J, Tan J C. Supermassive stars in quasar disks. *Astrophys J*, 2004, 608: 108–118
- 9 Wang J M, Ge J Q, Hu C, et al. Star formation in self-gravitating disks in active galactic nuclei. I. Metallicity gradients in broad-line regions. *Astrophys J*, 2011, 739: 3
- 10 Wang J M, Du P, Baldwin J A, et al. Star formation in self-gravitating disks in active galactic nuclei. II. Episodic formation of broad-line regions. *Astrophys J*, 2012, 746: 137–163
- 11 Dittmann A J, Miller M C. Star formation in accretion discs and SMBH growth. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 493: 3732–3743
- 12 Fan X, Wu Q. *In situ* star formation in accretion disks and explanation of correlation between the black hole mass and metallicity in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2023, 944: 159–169
- 13 McKernan B, Ford K E S, Lyra W, et al. Intermediate mass black holes in AGN discs - I. Production and growth. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 425: 460–469
- 14 Bellovary J M, Low M M M, McKernan B, et al. Migration traps in disks around supermassive black holes. *Astrophys J Lett*, 2016, 819: L17
- 15 Dittmann A J, Cantiello M, Jermyn A S. Accretion onto stars in the disks of active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2021, 916: 48–60
- 16 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: 105–119
- 17 Pan Z, Yang H. Supercritical accretion of stellar-mass compact objects in active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2021, 923: 173–186
- 18 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
- 19 Perna R, Tagawa H, Haiman Z, et al. Accretion-induced collapse of neutron stars in the disks of active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2021, 915: 10–20
- 20 Tagawa H, Kimura S S, Haiman Z, et al. Can stellar-mass black hole growth disrupt disks of active galactic nuclei? The role of mechanical feedback. *Astrophys J*, 2022, 927: 41–56
- 21 Chen K, Ren J, Dai Z G. The role of outflow feedback on accretion of compact objects in accretion disk of active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2023, 948: 136–154
- 22 Kaaz N, Schröder S L, Andrews J J, et al. The hydrodynamic evolution of binary black holes embedded within the vertically stratified disks of

- active galactic nuclei. *Astrophys J*, 2023, 944: 44–60
- 23 Grishin E, Gilbaum S, Stone N C. The effect of thermal torques on AGN disc migration traps and gravitational wave populations. *Mon Not R Astron Soc*, 2024, 530: 2114–2132
- 24 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
- 25 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: 165–173
- 26 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
- 27 Yang Y, Bartos I, Fragione G, et al. Tidal disruption on stellar-mass black holes in active galactic nuclei. *Astrophys J Lett*, 2022, 933: L28
- 28 Cheng K S, Wang J. The formation and merger of compact objects in the central engine of active galactic nuclei and quasars: Gamma-ray burst and gravitational radiation. *Astrophys J*, 1999, 521: 502–508
- 29 Stone N C, Metzger B D, Haiman Z. Assisted inspirals of stellar mass black holes embedded in AGN discs: Solving the ‘final au problem’. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 464: 946–954
- 30 Yang Y, Bartos I, Gayathri V, et al. Hierarchical black hole mergers in active galactic nuclei. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 181101
- 31 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
- 32 Tagawa H, Haiman Z, Kocsis B. Formation and evolution of compact-object binaries in AGN disks. *Astrophys J*, 2020, 898: 25–62
- 33 Li Y P, Dempsey A M, Li S, et al. Orbital evolution of binary black holes in active galactic nucleus disks: A disk channel for binary black hole mergers? *Astrophys J*, 2021, 911: 124
- 34 Li Y P, Dempsey A M, Li H, et al. Hot circumsingle disks drive binary black hole mergers in active galactic nucleus disks. *Astrophys J Lett*, 2022, 928: L19
- 35 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
- 36 Zhu J P, Yang Y P, Zhang B, et al. Thermonuclear explosions and accretion-induced collapses of white dwarfs in active galactic nucleus accretion disks. *Astrophys J Lett*, 2021, 914: L19
- 37 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
- 38 Zhang S R, Luo Y, Wu X J, et al. Electromagnetic signatures of white dwarf collisions in AGN discs. *Mon Not R Astron Soc*, 2023, 524: 940–951
- 39 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
- 40 Moranchel-Basurto A, Sánchez-Salcedo F J, Chametla R O, et al. Supernova explosions in accretion disks in active galactic nuclei: Three-dimensional models. *Astrophys J*, 2021, 906: 15–28
- 41 Grishin E, Bobrick A, Hirai R, et al. Supernova explosions in active galactic nuclear discs. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 507: 156–174
- 42 Li F L, Liu Y, Fan X, et al. Core-collapse supernova explosions in active galactic nucleus accretion disks. *Astrophys J*, 2023, 950: 161–172
- 43 Chevalier R A, Fransson C. Emission from circumstellar interaction in normal Type II supernovae. *Astrophys J*, 1994, 420: 268–285
- 44 Nakar E, Sari R. Early supernovae light curves following the shock breakout. *Astrophys J*, 2010, 725: 904–921
- 45 Waxman E, Shvarts D. Second-type self-similar solutions to the strong explosion problem. *Phys Fluids A-Fluid Dyn*, 1993, 5: 1035–1046
- 46 Kushnir D, Waxman E. Closing the gap in the solutions of the strong explosion problem: An expansion of the family of second-type self-similar solutions. *Astrophys J*, 2010, 723: 10–19
- 47 Netzer H. *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 48 Wang S N, Lü H J, Yuan Y, et al. Ejecta–circumstellar medium interaction in high-density environment contribution to kilonova emission: Application to GRB 191019A. *Astrophys J*, 2024, 963: 156–163
- 49 Cantiello M, Jermyn A S, Lin D N C. Stellar evolution in AGN disks. *Astrophys J*, 2021, 910: 94–115
- 50 Yoon S C, Langer N. Evolution of rapidly rotating metal-poor massive stars towards gamma-ray bursts. *Astron Astrophys*, 2005, 443: 643–648
- 51 Woosley S E, Heger A. The progenitor stars of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2006, 637: 914–921
- 52 Hu R C, Zhu J P, Qin Y, et al. Formation of fast-spinning neutron stars in close binaries and magnetar-driven stripped-envelope supernovae. 2023, arXiv: 2301.06402
- 53 Zhang B. *The Physics of Gamma-Ray Bursts*. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
- 54 Matzner C D. Supernova hosts for gamma-ray burst jets: Dynamical constraints. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 345: 575–589
- 55 Matsumoto T, Kimura S S. Delayed jet breakouts from binary neutron star mergers. *Astrophys J Lett*, 2018, 866: L16
- 56 Bromberg O, Nakar E, Piran T, et al. The propagation of relativistic jets in external media. *Astrophys J*, 2011, 740: 100–111

- 57 Perna R, Lazzati D, Cantiello M. Electromagnetic signatures of relativistic explosions in the disks of active galactic nuclei. [Astrophys J Lett](#), 2021, 906: L7
- 58 Huang B Q, Liu T, Li X Y, et al. GRB afterglows with energy injections in AGN accretion disks. [Astrophys J](#), 2024, 967: 67–76
- 59 Yuan C, Murase K, Guetta D, et al. GeV signatures of short gamma-ray bursts in active galactic nuclei. [Astrophys J](#), 2022, 932: 80–88
- 60 Wang Y H, Lazzati D, Perna R. The emergence of diffused gamma-ray burst afterglows from the discs of active galactic nuclei. [Mon Not R Astron Soc](#), 2022, 516: 5935–5944
- 61 Kathirgamaraju A, Li H, Ryan B R, et al. Afterglows from binary neutron star post-merger systems embedded in AGN disks. 2023, arXiv: [2311.03571](#)
- 62 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
- 63 Zhang H H, Zhu J P, Yu Y W. Propagation of gamma-ray burst relativistic jets in active galactic nucleus disks and its implication for gamma-ray burst detection. [Astrophys J](#), 2024, 976: 63
- 64 Levan A J, Malesani D B, Gompertz B P, et al. A long-duration gamma-ray burst of dynamical origin from the nucleus of an ancient galaxy. [Nat Astron](#), 2023, 7: 976–985
- 65 Lazzati D, Perna R, Gompertz B P, et al. GRB 191019A: A short gamma-ray burst in disguise from the disk of an active galactic nucleus. [Astrophys J Lett](#), 2023, 950: L20
- 66 Lazzati D, Soares G, Perna R. Prompt emission of γ -ray bursts in the high-density environment of active galactic nucleus accretion disks. [Astrophys J Lett](#), 2022, 938: L18
- 67 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: 111–120
- 68 Blandford R D, Znajek R L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. [Mon Not R Astron Soc](#), 1977, 179: 433–456
- 69 Liu J R, Wang Y L, Wang J M. Accretion-modified stars in accretion disks of active galactic nuclei: Observational characteristics in different regions of the disks. 2024, arXiv: [2405.02855](#)
- 70 Tagawa H, Kimura S S, Haiman Z, et al. Observable signatures of stellar-mass black holes in active galactic nuclei. [Astrophys J Lett](#), 2023, 946: L3
- 71 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. GW190521: A binary black hole merger with a total mass of $150 M_{\odot}$. [Phys Rev Lett](#), 2020, 125: 101102
- 72 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
- 73 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
- 74 Chen K, Dai Z G. Electromagnetic counterparts powered by kicked remnants of black hole binary mergers in AGN disks. [Astrophys J](#), 2024, 961: 206–218
- 75 Rodríguez-Ramírez J C, Bom C R, Fraga B, et al. Optical emission model for Binary Black Hole merger remnants travelling through discs of Active Galactic Nuclei. [Mon Not R Astron Soc](#), 2023, 527: 6076–6089
- 76 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: 13–32
- 77 Tagawa H, Kimura S S, Haiman Z, et al. Shock cooling and breakout emission for optical flares associated with gravitational-wave events. [Astrophys J](#), 2024, 966: 21–36
- 78 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
- 79 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: 23–36
- 80 Zhu J P. High-energy neutrinos from merging stellar-mass black holes in active galactic nuclei accretion disc. [Mon Not R Astron Soc-Lett](#), 2024, 528: L88–L95

Summary for “活动星系核吸积盘内灾变性爆发事件的电磁和高能中微子信号”

Electromagnetic and high-energy neutrino signals from catastrophic explosion events in active galactic nucleus accretion disks

Jin-Ping Zhu^{1,2*}, Yun-Wei Yu^{3,4} & Bing Zhang^{5,6}

¹ School of Physics and Astronomy, Monash University, Clayton 3800, Australia

² OzGrav: The ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery, Clayton 3800, Australia

³ Institute of Astrophysics, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

⁴ Key Laboratory of Quark and Lepton Physics (Central China Normal University), Ministry of Education, Wuhan 430079, China

⁵ Nevada Center for Astrophysics, University of Nevada, Las Vegas 89154, USA

⁶ Department of Physics and Astronomy, University of Nevada, Las Vegas 89154, USA

* Corresponding author, E-mail: jin-ping.zhu@monash.edu

Active galactic nuclei (AGN) are a type of extremely bright astronomical objects in the universe, located at the centers of some galaxies. They are driven by the gravitational energy released as matter from the surrounding accretion disk falls into the central supermassive black hole. Numerous studies have shown that stars and compact objects (including white dwarfs, neutron stars, and black holes) may commonly exist within the AGN accretion disk around supermassive black holes. These stars and compact objects might originate from star clusters around the disk and be captured by it, or they might form *in situ* within the disk. These stars and compact objects evolve, accrete, and migrate within the AGN disk, increasing the probability of celestial encounters. Additionally, the friction from the disk material facilitates the formation of numerous binary systems. Therefore, AGN accretion disks serve as cradles for merger or collision events of stars and compact objects. Meanwhile, due to the accretion of disk material, massive stars in AGN disks are also prone to catastrophic explosions. These catastrophic mergers and explosion events occurring in AGN disks will exhibit significant differences from those occurring in the ordinary interstellar medium due to the relatively dense environment, possessing unique observational characteristics. Consequently, AGN accretion disks are the birthplaces of mergers or collision events of stars and compact objects. Moreover, due to the accretion of disk material, massive stars in AGN disks are highly susceptible to catastrophic explosions. These catastrophic mergers and explosion events occurring within AGN disks could have unique differences from those occurring in the ordinary interstellar medium due to the relatively dense environment, and will exhibit unique observational features.

The discovery of the binary black hole merger, GW190521, by the LIGO-Virgo Collaboration in the third gravitational-wave observing run and its plausible associated optical electromagnetic counterpart, ZTF19abnrhr, located within the accretion disk of an AGN ignited interest in catastrophic explosion events within AGN disks in recent. Unlike typical catastrophic explosion events in the interstellar medium, those occurring within AGN disks often generate powerful shocks due to their dense surrounding environment. Consequently, these explosion events always produce bright shock breakout and shock cooling emissions, which could significantly affect their observational signatures and can be observed by present optical survey projects. Furthermore, the shocks can accelerate charged particles to generate cosmic rays, leading to non-thermal emissions by accelerated electrons, as well as the production of TeV-PeV neutrinos by accelerated protons. These high-energy astrophysical neutrinos can be triggered by IceCube Neutrino Observatory and next generation high-energy neutrino facility. This paper aims to provide a comprehensive review of current research on multi-wavelength radiation and high-energy neutrino emission from disk explosion events, while also summarizing the challenges and potential future directions in this field.

active galactic nuclei accretion disk, supernova, compact binary coalescence, gamma-ray burst, electromagnetic counterpart, high-energy neutrino

doi: [10.1360/TB-2024-0631](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0631)