

高能中微子辐射背景对潮汐瓦解事件黑洞质量限制的研究

杨里程

厦门大学天文系, 福建 厦门
Email: yanglc0824@qq.com

收稿日期: 2021年4月16日; 录用日期: 2021年5月19日; 发布日期: 2021年5月26日

摘要

潮汐瓦解事件(简称TDE)是一种发生在黑洞周围的高能天体物理事件, 它被认为是探测宁静星系中心黑洞的探针, 同时也是高能宇宙线和高能中微子的辐射源之一。在本文中, 我们首先假设IceCube观测上的高能中微子辐射背景源于潮汐瓦解事件, 通过构建潮汐瓦解事件产生的高能中微子辐射模型, 拟合观测数据, 对发生潮汐瓦解事件的黑洞质量参数空间和物理性质进行限制。最优拟合模型表明, 黑洞质量区间为 $10^4 \sim 10^5 M_{\odot}$ 时, 喷流型TDE所产生的高能中微子辐射贡献了观测上辐射背景能量峰值处的主要流量。这意味着喷流型TDE与黑洞质量大小的反相关关系, 以及这也暗示着也许依旧存在大量具有喷流的潮汐瓦解事件尚未被发现。此外, 该最优模型首次定量地给出, 质量区间涵括中等质量黑洞范围的随红移演化的黑洞质量函数, 其大小正比于 $(1+z)^{-2.667}$ 。

关键词

潮汐瓦解事件, 高能中微子, 中等质量黑洞, 黑洞质量函数

Constraints on TDE Black Hole Mass by Diffused High Energy Neutrino Background

Licheng Yang

Department of Astronomy, Xiamen University, Xiamen Fujian
Email: yanglc0824@qq.com

Received: Apr. 16th, 2021; accepted: May 19th, 2021; published: May 26th, 2021

Abstract

Tidal Disruption Event (TDE) is one of the high-energy astrophysical events that occur around black holes. They are considered as probes of detecting black holes at the centers of quiescent galaxies, as well as sources of high-energy cosmic rays and high-energy neutrinos. In this paper, we firstly assume that the high-energy neutrino flux background observed by IceCube collaboration originated from TDEs. By constructing the TDE-produced high-energy neutrino model and fitting it to observation data, we constrain the lower limit of black hole mass and other black hole mass dependent parameters which are related to the jet fraction of TDEs and redshift-evolved black hole mass function. Our optimal model shows that when the TDE mass lies in the range of $10^4 M_{\odot} \sim 10^5 M_{\odot}$, the high-energy neutrino flux produced by jet TDEs, which dominantly contributes the peak flux of neutrino background. It also implies an anti-correlation between jet fraction of TDEs and their black hole mass, this may indicate that a large number of jet-TDEs at the low-mass end are still unveiling. In addition, our model also firstly gives the redshift-dependent evolutionary index of black hole mass function, which covers the intermediate mass range that is greater than $10^4 M_{\odot}$, its value is proportional to $(1+z)^{-2.667}$.

Keywords

Tidal Disruption Event, High-Energy Neutrino Background, Intermediate Mass Black Hole, Black Hole Mass Function

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

潮汐瓦解事件(Tidal Disruption Event, 简称 TDE)是黑洞邻近区域的暂现事件, 通常被认为是探测宁静星系中心黑洞的探针。当某颗恒星运行至足够接近黑洞, 它的轨道半径小于潮汐瓦解半径时, 在强大潮汐力的作用下, 该恒星将被瓦解。理论上认为, 大约一半的恒星残骸将以极高的速度被抛出, 剩下的物质在黑洞引力作用下, 重新回落、吸积[1]。在此过程中, 它向外发出多波段辐射[2] [3] [4], 其典型的光变曲线遵循 $L \propto t^{-5/3}$ [5] [6]。迄今为止, 人们已发现数量超过 80 个的 TDE 及其候选者¹。但在这些候选者中, 仅少数 TDE 被认证为存在相对论性喷流结构, 例如 Swift J1644 + 57 [7]和 Swift J2058.4 + 0516 [8]。形成喷流结构的原因, 可能与磁场、黑洞质量或自旋等因素有关[9] [10]。此外, 这些相对论性喷流具有极高的能量, 被认为是天然的高能粒子加速器。前人研究表明, 这类 TDE 产生的高能粒子以及高能中微子, 能一定程度上解释高能宇宙线辐射背景[11]和高能中微子辐射背景[12]。与此同时, TDE AT2019dsg 被确定为是中微子事件 IceCube-191001A 的辐射源[13], 进一步从观测上验证了 TDE 与高能中微子间的相关性。

高能中微子是研究高能天体物理的重要信息载体, 它具有优于高能宇宙线或光子的不与磁场和空间介质相互作用的性质, 所以中微子在传播过程中具有良好的准直性, 可用于精确地反向追踪辐射源的空间位置以及对该源的相关天体物理过程进行研究。在天体物理中, 高能中微子的辐射机制通常有两种[14],

¹<https://tde.space/>.

分别是质子-质子(pp过程),或者质子-光子(p γ 过程)的相互作用,经过中间产物 π^+ 介子衰变为中微子。在观测上, IceCube 团队经过6年的持续观测,扣除掉大气中微子背景后,得到能量位于60 TeV~10 PeV 区间的各向同性的高能中微子事例,称之为 High Energy Starting Events (HESE)中微子[15]。

正如前文所述, TDE 被视为高能中微子背景的辐射源之一[11][12]。依据[16]的分析表明,在发生潮汐瓦解的过程中,若有相对论性喷流产生,物质在激波中被加速、向外传播的过程中发生 p γ 相互作用,从而产生 PeV 能量量级的中微子。考虑到由于生成高能中微子过程中伴生的高能 γ 光子,所以 γ 光子应该被 Fermi Lat 的观测所限制。根据[7][16]的观点,由于双 γ 光子湮灭生成电子对机制(Pair production mechanism)所限制,要求光深 $\tau_{\gamma\gamma}$ (100 MeV) > 1 [16]。在这样的星系中心环境下,虽然光子被囚禁,但中微子可以逃逸出来。对于 HESE 各向同性的高能中微子辐射背景,应是来自空间各方向源的贡献,它们依赖于黑洞的质量函数。所以可能存在部分喷流 TDE,受限于光深等因素尚未被发现,于是高能中微子提供了一个有效的观测渠道。因此,利用高能中微子辐射背景的研究,可用于限制 TDE 黑洞质量的参数空间。

在本篇文章中,我们首先假设 HESE 高能中微子辐射背景均源于潮汐瓦解事件,构建潮汐瓦解事件产生的高能中微子辐射模型,通过拟合 HESE 中微子辐射背景,研究不同黑洞质量量级的 TDE 产生的高能中微子流量对该辐射背景的贡献。同时根据最佳拟合模型,给出 TDE 黑洞质量的下限、喷流 TDE 比例函数和黑洞质量函数随红移演化指数。接下来于第二小节先介绍我们的模型。第三小节介绍 HESE 观测数据和本文使用的拟合方法。接着是最佳拟合模型和计算结果,以及最后是对本文内容的简单总结。

2. 高能中微子辐射能谱

理论上, TDE 模型生成中微子流量的大小与其黑洞质量和红移有关[16],所以对于各向同性的高能中微子背景而言,可以看成各个中微子辐射源在黑洞质量和红移空间的积分[14]。我们将喷流 TDE 产生的高能中微子背景改写成:

$$\varepsilon_\nu^2 \Phi_\nu(\varepsilon_\nu) = \frac{c}{4\pi H_0} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} dM \int_0^{z_{\max}} \frac{\dot{\rho}(\varepsilon_\nu, z, M)}{\sqrt{\Omega_M (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} dz \quad (1)$$

本文中涉及宇宙学的计算均基于 Λ CMD 冷暗物质宇宙学模型框架,即 $H_0 = 70$ km/s/Mpc, $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ 。此外 ε_ν 代表频率为 ν 的中微子能量, c 代表真空中光速, M 代表黑洞质量, z 表示红移。

公式(1)中 $\dot{\rho}(\varepsilon_\nu, z, M)$ 表示质量为 $M \sim M + dM$ 的 TDE 产生的中微子能流密度。它的大小与四个因素的乘积相关,分别为单个喷流型 TDE 的高能中微子辐射能谱、喷流 TDE 的比例函数、TDE 的发生率和不同红移处黑洞的质量函数,具体写为:

$$\dot{\rho}(\varepsilon_\nu, z, M) = \varepsilon_\nu^2 \phi_\nu(\varepsilon_\nu, z, M) \times f_j(M) \times \dot{N}_{\text{TDE}}(M) \times \varphi(z, M) \quad (2)$$

上式等号右边第一项表示,给定某个黑洞质量为 M 的 TDE 在红移 z 处产生的高能中微子能谱,即文献[16]中公式(10)。在这基础之上,利用[12]中表2的“Lumi scaling case”转换关系,将描述喷流 TDE 的三个参数(t_ν, Γ, L_x , 参数代表的物理含义与[12]中相同)转换为黑洞质量的依赖函数。同时额外考虑宇宙学红移效应对流量的影响($\propto (1+z)^{-3}$),和参考系变换带来的等效的各向同性能量 E_x 正比于 $(1+z)^{-1}$ 的修正系数[12]。

$f_j(M)$ 代表喷流 TDE 的比例函数。考虑到在观测上,只有喷流张角指向地球视线方向时,才能喷流 TDE 才能被观测到。所以,根据文献[12]喷流 TDE 比例系数可表示为喷流张角沿视线方向的指向因子 $2\Gamma^{-2}$ 与归一系数 η_0 的乘积, η_0 通常取值为0.1 [12]。然而,目前观测认证的具有喷流结构的 TDE 样本数目有限,对于这类群体的统计性质以及触发产生喷流的关键因素我们还知之甚少。此外,相较于前人的研

究, 我们的研究还发现, f_j 与黑洞质量有紧密的相关关系。因此在本文中, 我们假设 f_j 与黑洞质量呈指数变化关系, 同时设 η_0 、 α_f 为自由变量用以拟合模型。表达式如下:

$$f_j(M) = \frac{\eta_0}{2\Gamma^2} \left(\frac{M}{10^6 M_\odot} \right)^{\alpha_f} \quad (3)$$

\dot{N}_{TDE} 是发生 TDE 的概率。TDE 可以看成黑洞引力场捕获恒星的过程, 理论上依据 loss-cone 动力学估算 TDE 发生概率[17] [18], 大小为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ yr}^{-1} \cdot \text{gal}^{-1}$ 。然而, 由于 M - σ 关系为观测的经验关系, 一般适用黑洞质量区间下限设为 $10^5 M_\odot$ 。在考虑质量低至 $10^4 M_\odot$ 量级的黑洞以及核星团对 TDE 发生概率的增强作用后[19]:

$$\dot{N}_{\text{TDE}}(M) = 4 \times 10^{-5} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-0.14} \text{ yr}^{-1} \cdot \text{gal}^{-1} \quad (4)$$

从上式中可以看出, TDE 发生率与黑洞质量成反比, 所以理论上期望在矮星系中更容易发现更多的 TDE。然而在目前所观测到的 TDE 样本中, 多数发生 TDE 的黑洞质量在 $10^5 M_\odot \sim 10^7 M_\odot$ 的量级, 极少数黑洞质量为 $10^4 M_\odot$ 量级的 TDE 被观测到[20]。这种观测样本与理论预期之间的矛盾, 可能来自于观测能力的限制。于是为了进一步验证低质量端 TDE 的贡献, 我们将公式(1)中 M_{\min} 作为可变参数, 用于研究不同质量区间 TDE 对辐射背景的贡献, 参考[12], 本文中设 $M_{\max} = 10^{7.5} M_\odot$ 。

$\varphi(z, M)$ 代表黑洞的质量函数。黑洞的质量函数用以描述不同红移处、不同黑洞质量间隔内黑洞数目的分布, 因而直接反映了黑洞与星系共同演化的历史。然而, 受限于观测灵敏度, 目前黑洞质量函数多为超大质量黑洞的质量函数, 其质量区间为 $10^5 M_\odot \sim 10^9 M_\odot$, 对中等质量黑洞的质量函数知之甚少。对于小于质量端黑洞的分布情况认知尚浅。基于前人的工作, 文章[21]首次推导出本地宇宙 ($z \leq 0.1$) 中覆盖部分中等质量范围的黑洞质量函数。其函数如下:

$$\log_{10}(\varphi(M)) = c_1 + c_2 \log_{10}(M/M_\odot) + c_3 \exp(\log_{10}(M/M_\odot)) \quad (5)$$

其中系数 $c_1 = -2.13$ 、 $c_2 = -0.098$ 、 $c_3 = -0.00011$ 。由于该质量函数的推导基于本地宇宙空间的观测数据而推导的, 所以并不适用于高红移空间。对于高红移处的黑洞质量函数, 前人的工作给出数值解[22]。然而, 这类数值解仅面向 $10^6 M_\odot$ 超大质量黑洞, 依然无法描述中等质量黑洞在高红移处的分布。但值得注意的是, 这些质量函数的大小随着红移增加而减小, 大约以 $(1+z)^{-3} \sim (1+z)^{-2}$ 趋势下降[22]。同时考虑到观测流量反比于距离平方规律, 所以 TDEs 对中微子背景流量贡献总体趋势, 可以认为随着红移的增加而减少。因此, 基于上述考虑, 在本文中我们假设随红移演化的黑洞质量函数 $\varphi(z, M)$, 以本地宇宙的质量函数 $\varphi(M)$ 为基准[21], 以 $(1+z)^{-\alpha_z}$ 指数函数演化。这里我们将该指数 α_z 设置为自由参数, 用以研究高红移处黑洞质量函数的分布情况。具体表达式如下:

$$\varphi(z, M) = \varphi(M) \times (1+z)^{-\alpha_z} \quad (6)$$

3. HESE 观测数据和模型拟合

本文采用 IceCube 六年的 HESE 观测数据[15] [23]进行模型拟合, 具体数值参考[23]中的表 1。进一步, 我们假设 HESE 观测数据为理论上限值, 设置 η_0 、 α_f 、 α_z 为模型自由参数, 取值范围分别是: $0.1 \leq \eta_0 \leq 10$, $0 \leq \alpha_z \leq 4$, $-1 \leq \alpha_f \leq 1$ 。此外, 设置三组不同的 M_{\min} 作为对照模型, 研究不同黑洞质量区间 TDE 对高能中微子辐射背景的贡献。用卡方拟合观测数据, 取卡方值最小的参数组合作为最优组合。卡方定义如下:

$$\chi^2 = \sum_i^N \left(\frac{\Phi_{\nu,i}^{mod} - \Phi_{\nu,i}^{obs}}{\mathcal{E}_i^{obs}} \right)^2$$

其中 $\Phi_{\nu,i}^{mod}$ 表示模型(公式 1)的理论计算值, $\Phi_{\nu,i}^{mod}$ 和 \mathcal{E}_i^{obs} 分别表示高能中微子观测值及其误差, 如文献[23]中表 1 第二列和第三列所示。下标 i 表示第 i 个数据点, N 代表数据点总数。

4. 结论

4.1. 三种模型

我们考虑三种对照模型, 设置 M_{min} 分别等于 $10^4 M_{\odot}$ 、 $10^5 M_{\odot}$ 和 $10^6 M_{\odot}$ 。通过卡方拟合, 我们分别找到了三组最佳拟合参数, 如表 1。

Table 1. Best-fitted parameters of three cases

表 1. 最佳拟合参数组合

No.	Cases ($M_{min} =$)	η_0	α_f	α_c	χ_{min}^2
1	$10^4 M_{\odot}$	1.701	0.026	2.667	5.999
2	$10^5 M_{\odot}$	1.194	-0.897	4.0	8.576
3	$10^6 M_{\odot}$	10.0	-1.0	0.0	16.131

分别将这三组参数代入模型, 公式(1)~(6), 计算高能中微子能谱, 如图 1 所示。首先, 图 1 一方面很直观地反映出, 相比于其他两个模型, 模型 1 (红色实线)更能拟合观测数据。而模型 2 和模型 3 的理论计算值已经超过了观测值, 显然与观测不相符。另一方面, 这也能反映出, 在我们的模型中, 中等质量黑洞 TDE 产生高能中微子辐射通量, 对背景的贡献不可忽视。

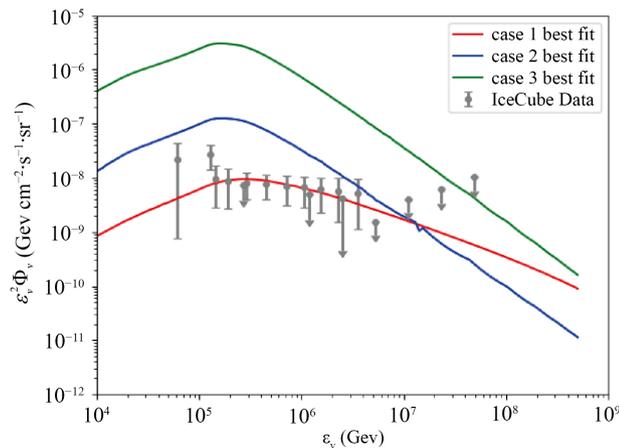


Figure 1. High-energy neutrino spectrum of three cases

图 1. 三组最佳拟合模型高能中微子能谱对比图

4.2. 最优模型

这里我们选择最佳拟合的模型 1 做进一步分析。为了方便下文描述, 我们将模型 1 称为最优模型。首先, 为了进一步分析中等质量黑洞在我们模型中扮演的重要作用, 我们将最优模型的能谱(图 1 中红色实线), 根据不同的质量区间分别计算产生流量大小。如图 2 所示, 绿色、蓝色、黄色的单点划线分别代

表黑洞质量量级为 $10^4 M_\odot$ 、 $10^5 M_\odot$ 和大于 $10^6 M_\odot$ 的不同质量区间产生的中微子流量贡献大小。从图上可以直观的看出，中微子能量位于 100 TeV~1 PeV 能量区间的峰值流量，主要由 $10^4 M_\odot \sim 10^5 M_\odot$ 量级的 TDE 所贡献(绿色和黄色单点划线)；相反，超大质量黑洞 TDE 的对高能中微子辐射背景贡献较少。

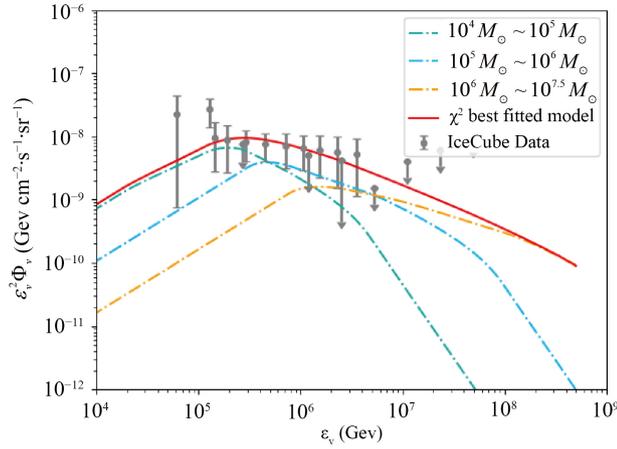


Figure 2. The best-fitted model component analysis
图 2. 最优模型的成分分析图

其次，将最优模型的 η_0 和 α_f ，以及“Lumi scaling case”中 Γ 转换关系式[12]，代入公式(3)并整理，我们得到了喷流 TDEs 比例函数：

$$f_j(M) = 8.505 \times 10^{-3} \left(\frac{M}{10^6 M_\odot} \right)^{-0.374} \quad (7)$$

当 $M = 10^6 M_\odot$ 时，计算可得 $f_j = 8.505 \times 10^{-3}$ ，满足文献[24]中基于观测分析的限制，即 $3 \times 10^{-3} < f_j < 1$ 。公式(7)中的指数等于-0.374，这意味着在 TDEs 中，随着 M 的增加， f_j 比例减少。这种反相关关系或许与不同质量区间的流量贡献比例直接相关。然而，由于当前缺乏中等质量黑洞 TDE 的观测样本，它仍然需要依赖今后的天文巡天观测数据，予以参数空间的进一步限制及验证。

对于随红移演化的黑洞质量函数，最优模型质量函数表明， $\varphi(z, M) \propto (1+z)^{-2.667}$ 。这意味着随着时间的演化，从高红移空间到低红移空间，黑洞质量函数逐渐增加。对于超大质量黑洞而言，这种演化趋势与观测和数值计算均一致；而对于中等质量黑洞而言($10^4 M_\odot \sim 10^6 M_\odot$)，虽然受限于现有观测能力，并无准确的定论。但这种演化指数可以理解为是，在中微子辐射背景约束下，我们模型给出的，在 0 到 1 的红移空间中，正比于 $(1+z)^{-2.667}$ 的平均演化趋势。为了进一步证明这一点，我们将最优模型的红移积分上、下限分别改为 $z = 3$ 和 1，保持其他参数不变，结果如图 3 所示。红色实线仍然代表最佳拟合模型时，洋红色实线代表红移空间为 1~3 时模型计算得到的高能中微子流量大小。相比于最优模型，后者小了将近两个数量级，基本可以看做忽略不计。总而言之，这种演化趋势会导致中微子辐射通量在高红移处减少，这也与前文的定性分析自洽。

5. 总结

潮汐瓦解事件是探测中等质量黑洞的重要渠道，也是高能中微子辐射来源之一。在这篇论文中我们从理论模型的预言与观测现状之间的矛盾出发，首次构建了覆盖部分中等质量范围的 TDE 高能中微子辐射模型。通过拟合 HESE 高能中微子辐射背景，分析得到了对中等质量黑洞的分布及其对高能中微子辐

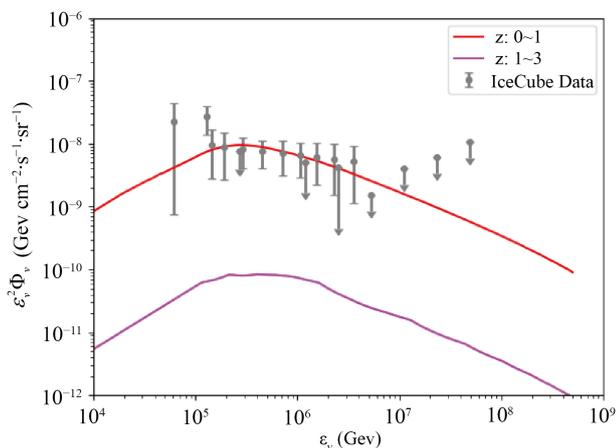


Figure 3. Comparison of high-energy neutrino flux between higher and lower redshift

图 3. 高红移与低红移的高能中微子流量对比图

射背景的贡献、理论上喷流 TDE 的比例系数和黑洞质量函数随红移演化性质进行限制。首先，最优模型发现中等质量黑洞 TDE 对辐射背景占主要贡献，这一定程度上与低质量端 TDE 喷流比例函数有关，这也暗示着仍有大量此类天体尚未被观测到。期望将来更高灵敏度的巡天观测带来更多的观测样本，能进一步地限制该模型的参数空间。同时该模型首次给出了覆盖 $10^4 M_{\odot} \sim 10^5 M_{\odot}$ 的质量区间的黑洞质量函数随红移演化的函数关系，相较于前人数值计算得到的黑洞质量函数，这应理解为是在我们最优模型限制之下，红移处于 0~1 空间内的近似函数关系。

致 谢

感谢厦门大学黄峰老师对本论文的指导。

参考文献

- [1] Rees, M.J. (1988) Tidal Disruption of Stars by Black Holes of 106-108 Solar Masses in Nearby Galaxies. *Nature*, **333**, 523-528. <https://doi.org/10.1038/333523a0>
- [2] Dai, L., McKinney, J.C., Roth, N., *et al.* (2018) A Unified Model for Tidal Disruption Events. *The Astrophysical Journal Letters*, **859**, L20. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aab429>
- [3] Auchettl, K., Guillochon, J. and Ramirez-Ruiz, E. (2017) New Physical Insights about Tidal Disruption Events from a Comprehensive Observational Inventory at X-Ray Wavelengths. *The Astrophysical Journal Letters*, **838**, 149. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa633b>
- [4] van Velzen, S., Gezari, S., Hammerstein, E., *et al.* (2020) Seventeen Tidal Disruption Events from the First Half of ZTF Survey Observations: Entering a New Era of Population Studies. *The Astrophysical Journal Letters*, **908**, 4V. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc258>
- [5] Komossa, S. (2015) Tidal Disruption of Stars by Supermassive Black Holes: Status of Observations. *Journal of High Energy Astrophysics*, **7**, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jheap.2015.04.006>
- [6] Piran, T. and Krolik, J. (2012) Time Scales in Tidal Disruption Events. *European Physical Journal Web of Conferences*, **39**, Article No. 02006. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20123902006>
- [7] Burrows, D.N., Kennea, J.A., Ghisellini, G., *et al.* (2011) Relativistic Jet Activity from the Tidal Disruption of a Star by a Massive Black Hole. *Nature*, **476**, 421-424. <https://doi.org/10.1038/nature10374>
- [8] Cenko, S.B., Krimm, H.A., Horesh, A., *et al.* (2012) Swift J2058.4+0516: Discovery of a Possible Second Relativistic Tidal Disruption Flare? *The Astrophysical Journal Letters*, **753**, Article No. 77. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/753/1/77>
- [9] Tchekhovskoy, A., Metzger, B.D., Giannios, D., *et al.* (2014) Swift J1644+57 Gone MAD: The Case for Dynamically Important Magnetic Flux Threading the Black Hole in a Jetted Tidal Disruption Event. *Monthly Notices of the Royal*

- Astronomical Society*, **437**, 2744-2760. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2085>
- [10] Curd, B. and Narayan, R. (2019) GRRMHD Simulations of Tidal Disruption Event Accretion Discs around Supermassive Black Holes: Jet Formation, Spectra, and Detectability. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **483**, 565-592. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3134>
- [11] Biehl, D., Boncioli, D., Lunardini, C. and Winter, W. (2018) Tidally Disrupted Stars as a Possible Origin of Both Cosmic rays and Neutrinos at the Highest Energies. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 10828. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29022-4>
- [12] Lunardini, C. and Winter, W. (2017) High Energy Neutrinos from the Tidal Disruption of Stars. *Physical Review D*, **95**, Article ID: 123001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.123001>
- [13] Stein, R., van Velzen, S., Kowalski, M., *et al.* (2020) A High-Energy Neutrino Coincident with a Tidal Disruption Event.
- [14] Becker, J.K. (2008) High-Energy Neutrinos in the Context of Multimessenger astrophysics. *Physics Reports*, **458**, 173-246. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2007.10.006>
- [15] IceCube Collaboration, Aartsen, M.G., Ackermann, M., *et al.* (2017) The IceCube Neutrino Observatory—Contributions to ICRC 2017 Part II: Properties of the Atmospheric and Astrophysical Neutrino Flux.
- [16] Wang, X.-Y., Liu, R.-Y., Dai, Z.-G., *et al.* (2011) Probing the Tidal Disruption Flares of Massive Black Holes with High-Energy Neutrinos. *Physical Review D*, **84**, Article ID: 081301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.84.081301>
- [17] Merritt, D. (2013) Loss-Cone Dynamics. *Classical and Quantum Gravity*, **30**, Article ID: 244005. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/30/24/244005>
- [18] Stone, N.C. and Metzger, B.D. (2016) Rates of Stellar Tidal Disruption as Probes of the Supermassive Black Hole Mass Function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **455**, 859-883. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2281>
- [19] Pfister, H., Volonteri, M., Lixin Dai, J. and Colpi, M. (2020) Enhancement of the Tidal Disruption Event Rate in Galaxies with a Nuclear Star Cluster: From Dwarfs to Ellipticals. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **497**, 2276-2285. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1962>
- [20] Wevers, T., Stone, N.C., van Velzen, S., *et al.* (2019) Black Hole Masses of Tidal Disruption Event Host Galaxies II. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **487**, 4136-4152. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1602>
- [21] Gallo, E. and Sesana, A. (2019) Exploring the Local Black Hole Mass Function below 106 Solar Masses. *The Astrophysical Journal Letters*, **883**, L18A. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab40c6>
- [22] Shankar, F., Weinberg, D.H. and Miralda-Escudé, J. (2009) Self-Consistent Models of the AGN and Black Hole Populations: Duty Cycles, Accretion Rates, and the Mean Radiative Efficiency. *The Astrophysical Journal Letters*, **690**, 20-41. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/690/1/20>
- [23] Pandey, M., Majumdar, D. and Halder, A. (2019) IceCube PeV Neutrino Events from the Decay of Superheavy Dark Matter: An Analysis.
- [24] De Colle, F. and Lu, W. (2019) Jets from Tidal Disruption Events. *New Astronomy Reviews*, **89**, Article ID: 101538. <https://doi.org/10.1016/j.newar.2020.101538>