

黑洞潮汐撕裂恒星事件及其回响

蒋凝[†] 王挺贵 窦立明

(中国科学技术大学天文学系 合肥 230026)

2017-10-08收到

[†] email: jnac@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180501

Tidal disruption events and their echoes

JIANG Ning[†] WANG Ting-Gui DOU Li-Ming

(Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘要 超大质量黑洞普遍存在于星系中心, 当星系中一颗恒星运动足够靠近黑洞时, 会被黑洞的潮汐力撕裂瓦解, 产生一个主要能量在软 X 射线到紫外的耀发事件, 称为恒星潮汐撕裂事件(TDE)。作为黑洞特殊的爆发性吸积事件, TDE 正成为蓬勃发展的时域天文的主要研究目标之一。虽然 TDE 很罕见, 但它蕴含的巨大科学价值逐渐引起了人们的兴趣和关注, 有助于理解黑洞吸积相关的物理。除此之外, TDE 照射在黑洞周围星际介质上还会产生气体和尘埃的回响信号, 不仅为探测星系核区的星际介质环境提供了有效手段, 还揭示了一种全新的探测 TDE 的途径, 尤其是被尘埃遮蔽的源。作者基于此做出了一系列开创性的前沿研究。

关键词 超大质量黑洞, 恒星潮汐撕裂事件, 星际介质, 时域天文

Abstract Supermassive black holes are widely believed to be present in the center of massive galaxies. When a star passes too close to the black hole, it will be tidally disrupted and partially accreted, producing a flash of radiation over an energy range from soft X-ray to UV, which is called a tidal disruption event (TDE). As a special form of accretion, a TDE is one of the key topics of the explosively growing field of time-domain astronomy. Although TDEs are rare, they have aroused great interest because they can serve as a unique laboratory to study various physics problems associated with black holes. Moreover, the gas and dust echoes of TDEs not only provide us with a novel method to probe the interstellar medium in the vicinity of black holes, but also signify a new approach to detect new TDEs, particularly those obscured by dust. We report our series of advances in this field.

Keywords supermassive black hole, tidal disruption event, interstellar medium, time-domain astronomy

1 星系中心的怪兽——超大质量黑洞

黑洞是广义相对论预言的一类独特的时空结构, 在中心存在奇点, 它存在一个视界面, 进入面内的所有物质包括光都无法逃脱最终落到奇点。目前已知的黑洞可以分为两大类: 第一类质量在几倍到几十倍太阳质量之间, 称作恒星级黑

洞; 另一类质量在几百万到几十亿太阳质量之间, 称作超大质量黑洞, 位于星系的中心。恒星级黑洞首先由理论预言其存在, 是大质量恒星死亡留下的产物, 它通过吸积伴星的物质产生明亮的 X 射线辐射而被观测到。超大质量黑洞的物理起源并不明确, 它最初是为了解释类星体巨大的能量输出而被理论家提出。人们喜欢把超大质量



图1 星系核心区富尘埃环境下的TDE的艺术想象图。超大质量黑洞周围被尘埃环环绕,当恒星过于靠近黑洞,近于潮汐半径时会被黑洞撕裂瓦解,其周围尘埃会吸收此过程产生的紫外光学高能光子并在红外波段产生回响信号(来自NASA/JPL-Caltech)

黑洞比作怪兽,一方面是因为它吞噬物质的能力令人惊叹,类星体发出的光甚至比整个星系千亿颗恒星加起来都还要亮;另一方面,它完全出乎了所有理论预言家的意料,不像恒星级黑洞在人们寻找它们四分之一世纪之前就被预告存在了。

虽然超大质量黑洞最初是以类星体的形式进入人们视野中,然而在近邻宇宙,大部分黑洞是宁静的,并不在猛烈地吞噬物质。此外,作为类星体中心引擎能量来源的理论需求引入,还不足以直接证明超大质量黑洞的存在。黑洞的直接影响体现在时空结构,即动力学效应上。从上世纪90年代中期开始到现在,国际上有两个小组,分别用美国夏威夷的凯克望远镜和欧洲南方天文台位于智利的甚大望远镜对银河系中心(人马座A*)进行了连续的高分辨率观测。他们应用新兴的自适应光学技术有效克服了大气抖动效应的干扰,分辨了单颗恒星的运动。通过对恒星运动轨迹的追踪,重构银心附近的引力势,发现星系中心存在一个密度极高的区域,最合理的解释就是一个质量大约为四百万个太阳质量的黑洞^[1]。这是目前超大质量黑洞存在的最强证据,也是质量测量最为精确的。随着哈勃太空望远镜的上天(1990年)以及地面自适应光学技术的持续发展,更多针对近邻星系中心附近的恒星动力学和气体动力学观测表明超大质量黑洞不仅普遍存在,而且黑洞质量与寄主星系核球的性质(如恒星质量、光度、恒星速度弥散等)存在紧密的相关性,暗示它们很

可能是共同成长与演化的,这是目前天文中最前沿的热点问题之一^[2]。

2 不鸣则己 一鸣惊人——恒星潮汐撕裂事件及其丰富的科学价值

基于星系中心普遍存在超大质量黑洞的事实,我们自然会想到一个有趣的问题,如果恒星因某种因素偏离了轨道游荡到黑洞附近,会发生什么?我们知道当一个物体向黑洞运动时,它受到的引力作用越来越强,与此同时,它所受到的潮汐力影响也会越来越显著。恒星本身是一个自束缚引力系统,然而当它受到的潮汐力超过其自束缚引力时,恒星会被潮汐力撕裂瓦解。简单分析表明,撕裂过程中大约一半物质以外流的形式甩出黑洞的引力势范围,另一半物质落入黑洞形成短暂的接近于爱丁顿光度的吸积盘。吸积持续的时标一般几个月到几年,辐射的峰值频率在软X射线到紫外波段,光度随着时间以 $-5/3$ 次方的幂律形式衰减^[3, 4]。这种事件被称为恒星潮汐撕裂事件,英文为Tidal Disruption Event,简称为TDE(图1)。

TDE作为超大质量黑洞的一种短暂吸积事件,十分罕见,目前我们才仅仅发现几十例候选者。理论上给出的TDE发生率为平均每个星系一万年到十万年才发生一次,其中在矮星系中的发生率相对更高一些。最早的一批TDE在上世纪90年代由ROSAT X射线巡天发现,表现为星系中心产生的剧烈耀发信号。后来Chandra和XMM-Newton X射线卫星上天后发现更多类似的事例。除了X射线,随后在GALEX紫外巡天数据里也发现了几个候选者。这些发现与理论预期的TDE辐射主要集中在软X射线到紫外是一致的,然而它们所依赖的观测覆盖的天区和采样频率都都有限,并且它们的认证完全依赖于光变曲线。最近几年,得益于地面光学望远镜的大视场巡天项目的陆续开展,如美国的帕洛马瞬变源工厂(PTF)、泛星计划(PanSTARRS)、卡特林那实时瞬变源巡天(CRTS)、全天自动超新星巡天

(ASAS-SN)项目等, 时域天文蓬勃发展, TDE的发现数量明显呈现增加趋势^[5]。这些巡天的早期发现也触发了哈勃太空望远镜的紫外光谱观测, 通过对这些源的紫外谱线分析与理论比较, 我们(中国科学技术大学王挺贵团队)发现产生谱线的气体来自恒星中心核反应产物的确切证据, 证实恒星撕裂事件发生^[6]。所谓时域天文, 主要基于高时间分辨率的观测, 发现和宇宙中一些极端的、罕见的天文现象(如超新星、伽玛暴、系外行星等)以及其他常见的光变现象(如AGN光变等)。TDE作为黑洞特殊的短暂吸积活动产生的爆发现象, 也是时域天文的主要研究目标之一。随着未来大型综合巡天望远镜(LSST)时代的到来, TDE的发现和预期将实现新的飞跃。

TDE虽然罕见, 但它是研究黑洞吸积物理的理想天然实验室, 跟踪整个系统的演化能给我们多方面的启示, 有巨大的研究价值。首先, TDE是宁静星系中心超大质量黑洞存在的可靠探针, 尤其是矮星系中的低质量黑洞和非近邻星系中心的黑洞。介于恒星级黑洞与超大质量黑洞之间的, 即黑洞质量在几百倍到几十万倍太阳质量这个范围的, 我们一般也称为中等质量黑洞, 它们很可能是超大质量黑洞的种子黑洞^[7]。这些黑洞由于质量相对较小, 探测起来也更加困难, 目前发现的数目还很少。目前真正有动力学测量的中等质量黑洞仅有NGC4395, 大约为30万个太阳质量; 其余的都是基于AGN活动特征利用经验关系推测的, 有很大的不确定性。根据超大质量黑洞与寄主星系的共同演化模型, 中等质量黑洞主要存在于矮星系中。理论上TDE在矮星系中发生率更高, 因此TDE可以作为一种新的常规手段探测矮星系中的黑洞。发现更多的中等质量黑洞, 填补恒星级黑洞与超大质量黑洞之间的鸿沟, 对研究超大质量黑洞的形成与增长、与寄主星系的共同演化等至关重要。

其次, TDE对于我们理解与黑洞吸积相关的物理很有帮助。除了

撕裂恒星形成的短暂吸积, 更一般的, 超大质量黑洞会持续吸积周围的星际介质, 形成活动星系核(active galactic nuclei, 简称为AGN), 前面所说的类星体就是AGN的一类。黑洞处在AGN状态下的活动周期非常长(一般认为长达几千万年), 我们几乎不可能观测到吸积的点火或熄灭过程。与之相比, TDE的活动时标非常短, 通常只有几个月到几年。原则上, 只要TDE发现足够早, 观测采样足够频繁, 我们能看到从无到有再到无的整个吸积过程, 这将有助于我们理解吸积盘的形成、演化与消亡。另外, 大约10%的AGN是射电噪的, 即带有射电喷流, 能延伸到星系甚至星系团尺度, 是超大质量黑洞对寄主星系最重要的反馈形式之一。类似的, 少数TDE也发现有射电喷流发射出来(如SwiftJ1644^[8])。喷流的产生机制是AGN中的一个难题, 对TDE中喷流的动态研究能极大地推动对此问题的理解。

值得指出的是, TDE能为探测非活动星系中的双黑洞系统提供独一无二的手段。根据等级成团宇宙学模型, 星系并合也必然导致黑洞并合, 宇宙中应该存在大量的双黑洞系统。北京大学刘富坤教授领导的研究团队致力于对双黑洞系统TDE的理论研究。2009年在他们发表的工作中曾经预言, 当互相绕转的双黑洞之一潮汐撕裂恒星并产生X射线闪耀暴发时, 由于另外一个黑洞对气体流的破坏性扰动作用(引力拖拽效应), 流向第一个黑洞的气体会暂时性被剥夺从而暂停向暴发提供燃料, 导致X射线闪耀出现突然下跌至暗黑

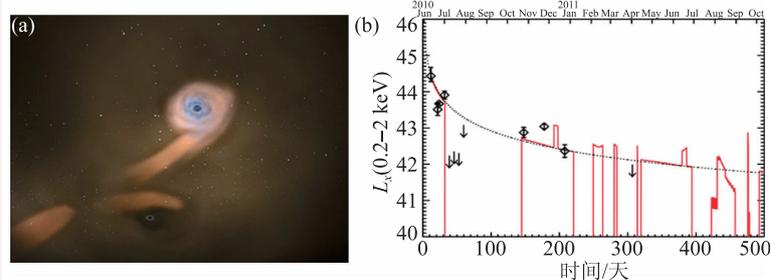


图2 (a)超大质量双黑洞TDE的艺术想象图。一颗恒星被主黑洞撕裂成细长气体流, 流向黑洞形成吸积盘产生X射线辐射。当次黑洞绕转到气体流附近(但不穿过)时, 产生的破坏性引力扰动作用使部分气体流飞离, 留下一段空隙。X射线光变曲线则相应地出现突然下跌直至黑暗的现象(绘图: ESA-C. Carreau); (b)星系SDSS J120136.02+300305.5中双黑洞TDE的X射线光变曲线的完整重构

然后恢复现象(图 2(a))^[9]。2010 年, XMM-Newton 卫星捕捉到一例来自大熊座星 SDSSJ120136.02+300305.5 的耀发事件, 长期的跟踪观测表明, 该天体的光变曲线除遵循典型的 TDE 模型之外, 中间突然出现截断, 随后又突然重现(图 2(b))。2014 年刘富坤团队运用他们的双黑洞 TDE 模型成功解释了这个一度让人困惑的现象^[10]。在此之前, 所有双黑洞都是通过 AGN 特征搜寻的, 这是第一次在普通星系中发现双黑洞存在的强烈证据, 引起了广泛的国际关注。

此外, TDE 还能为黑洞自旋的测量提供机会。对大于 1 亿倍太阳质量的史瓦西黑洞, 恒星的潮汐瓦解半径在黑洞视界以内, 无法被观测到, 除非是带有自旋的克尔黑洞。ASASSN-15lh 此前被认为是一颗超亮超新星, 而且是迄今发现最亮的超新星, 爆发位置很靠近星系中心。然而它的光变曲线很特别, 出现了变暗再增亮的反常特征, 去年的一项工作指出在 TDE 的框架下可以解释它怪异的光变行为。根据黑洞核球相关性推测的 ASASSN-15lh 寄主星系的黑洞质量高达 3 亿倍太阳质量, 因此必须是克尔黑洞, 假设被撕裂恒星为太阳大小, 得到的自旋为 0.68^[11]。黑洞自旋目前依然是极难测量的参数, 因此, 利用大质量黑洞中发生的 TDE 我们能对黑洞自旋参数做出一定的限制。随着未来对 TDE 物理更加深入的理解和有望获得更加丰富的观测数据(如完美采样的多波段光变曲线), 我们甚至能对黑洞自旋做出精确测量。

众所周知, 引力波探测获得了 2017 年的诺贝尔物理学奖, 人类观测宇宙的新窗口已经被打开了。TDE 自然也会产生引力波, 虽然不在现阶段激光干涉引力波天文台(LIGO)的频率范围内, 但是作为激光干涉空间天线(LISA)的主要观测目标之一, 我们有理由对 TDE 引力波探测的未来前景保持期待。结合引力波与电磁波信号, TDE 更加全面丰富的细节物理必将展现在我们眼前。

3 气体与尘埃的回响

以上我们介绍了很多 TDE 的重要科学价值和

潜在用途, 主要体现在黑洞的引力效应和吸积物理过程。其实不单如此, 假如把 TDE 比作为漆黑的夜晚划过的一道闪电, 我们不仅仅能看到闪电, 还会看到被闪电照亮的物体。不同星系中的黑洞活动性差别很大, 这是不是由于星系核区环境的显著不同造成的呢? 不幸的是, 除了非常邻近的星系, 当代望远镜还不足以直接空间分辨这么小的尺度(pc 尺度, 1 pc 等于 3.26 光年)。山重水复疑无路, 柳暗花明又一村。TDE 为我们提供了一个绝佳的机会, 黑洞周围被 TDE 照亮的气体和尘埃会相对 TDE 本身产生一个时间上延迟的响应, 在光谱和红外辐射上留下痕迹。这个响应信号的产生形式很像回音, 我们习惯的将其称为“回光”(light echo), 或者气体与尘埃的回响。由于 TDE 时标很短, 可以看作是一个脉冲, 我们看到的回响信号就是脉冲卷积星际介质分布之后的结果。我们不仅能通过时间延迟定出星际介质的空间尺度, 甚至还能推测出它们的空间几何分布形式。

TDE 辐射的光子能量主要集中在软 X 射线到紫外, 如果黑洞周围存有气体, 它们会不可避免的被这些高能光子电离, 然后再复合产生发射线, 包括宽线和窄线, 这就是所谓的气体回响信号。与 AGN 显著区别的是, 这些信号随着 TDE 的光度变化而迅速演化。此外, 被 TDE 照射的气体还会产生一些高电离冕线。所谓的冕线, 因在太阳的日冕中发现而得名, 需要很高的电离度, TDE 刚好能激发出这些冕线。马普地外研究所 Komossa 博士与中国科学技术大学周宏岩、王挺贵教授等人合作, 在星系 SDSSJ095209.56+214313.3 中首次发现了冕线与巴尔默线迅速演化的信号, 暗示电离源是迅速变化的, 极有可能是 TDE 的闪耀照射到气体的响应^[12]。随后王挺贵教授等人从 SDSS 光谱库中搜寻了带有高电离冕线特征的星系, 最终找到 7 个目标, 后续的光谱观测显示其中 4 个源的冕线显著变弱甚至消失(图 4(a)), 被认为是证据很强的 TDE 候选者^[13, 14]。为了产生如此强的冕线, TDE 必须发生在富含冷气体的环境中, 这与它们的寄主星系是盘主导的星系是一致的。利用 TDE 的气体回响, 不仅能帮助我们搜寻 TDE, 还为我们提供了一种新的诊断核

区的气体环境的手段。

与气体回响信号类似，黑洞周围的尘埃也会吸收TDE产生的紫外、光学光子，被加热后在中红外波段再辐射，我们称之为尘埃的红外回响信号(图1)。德克萨斯大学奥斯汀分校的鲁文宾等人通过对简易的一维辐射转移模型计算发现，尘埃辐射的峰值在中红外波段(3—10 μm)，强度取决于尘埃的覆盖因子，对于距离较近的TDE有望被现在的红外望远镜探测到^[15]。红外回响信号有助于我们测量TDE过程中黑洞吸积释放的总能量，更好的理解黑洞吸积过程，同时还几乎是现阶段了解宁静星系核区亚pc尺度尘埃分布的唯一有效手段，因此有十分重要的意义。

受此理论预言的启发，我们从2016年开始系统地开展了搜寻TDE红外回响方面的工作。首选研究目标是ASASSN-14li，它于2014年底被ASAS-SN

巡天发现，是目前距离地球最近(约90兆pc)，也是研究最为细致的TDE。利用2016年3月NASA广域红外巡天探测器(WISE)释放的数据库，我们在3.4 μm和4.6 μm两个波段都探测到显著的红外光变(图3(a))。红外探测到变亮的时间仅仅是光学发现后的36天，如果以理论模型推测的峰值时间为准，红外延迟了大约一百天。此时的尘埃的黑体温度也略比升华温度高，意味着尘埃确实离黑洞非常近(仅约0.3光年)。通过尘埃的辐射平衡，可以确定红外辐射所需的TDE热光度与观测值基本一致，进一步证实了

探测到的红外辐射来自TDE加热尘埃后的再辐射^[16]。这是国际上首次在TDE中探测到可靠的尘埃红外回响信号，为TDE的研究打开了中红外这个全新的观测窗口。受益于ASASSN-14li被国际上多个小组的多波段连续监测，我们还作出了目前为止波段覆盖最全的(从X射线到射电)准同时能谱分布，第一次填补了中红外这个极其重要的缺口(图3(b))。与此同时，美国约翰霍普金斯大学van Velzen博士领衔的另一个小组也开展了类似的工作，他们在3个TDE候选者中探测到疑似的红外回响信号，然而只在一个波段探测到且显著度明显不如ASASSN-14li^[17]。这两项工作被NASA官网作为研究亮点，以“黑洞吞噬恒星的回声被发现”为题报道，并被多家媒体转载，引起了广泛关注。

星系中的气体与尘埃一般是混合的，因此尘

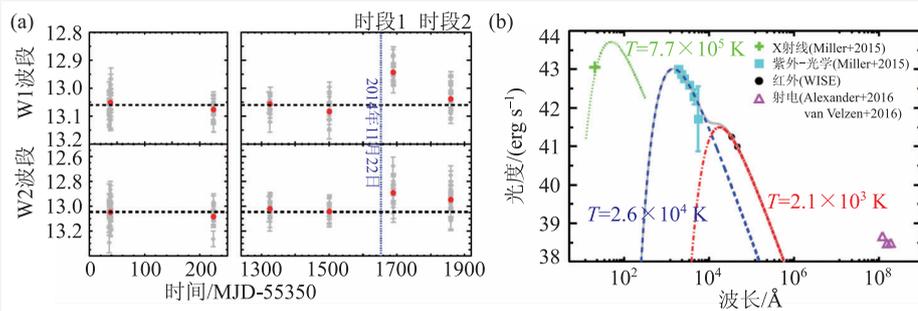


图3 (a)近邻的著名TDE目标ASASSN-14li 3.4 μm(上)和4.6 μm(下)的中红外光变曲线；(b)时刻1时刻的全波段能谱分布，第一次填补了中红外波段的辐射的空白，它来自尘埃吸收再辐射的回响信号

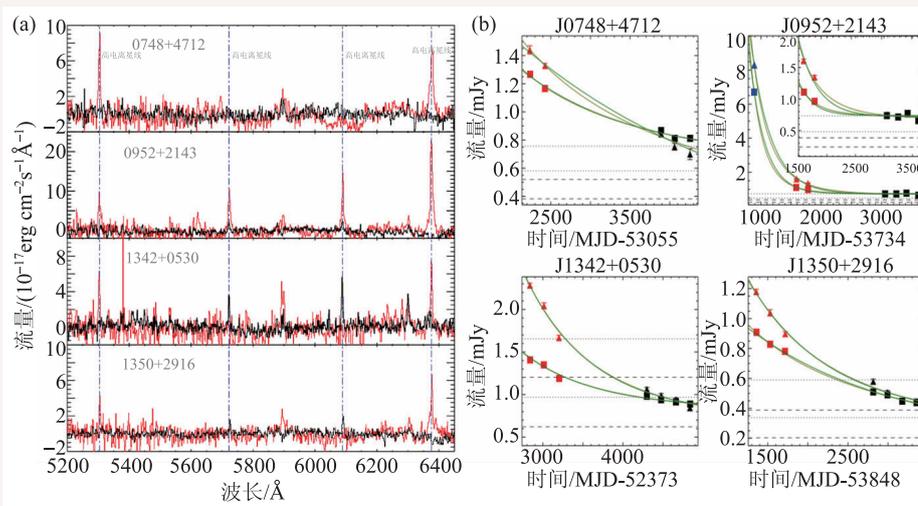


图4 (a)极强冕线源的光学光谱变化，几年之内冕线显著变弱甚至消失(从红色到黑色)；(b)瞬变冕线源的中红外光变曲线

埃回响和气体回响很可能是相互联系的。基于这样的思路,我们随后检查了上面提到的4个具有瞬变冕线特征的TDE候选者的WISE光变曲线,所有源无一例外的表现出长时标的红外衰减(图4(b)),同样可以解释为TDE的尘埃回响^[18]。这个工作表明红外回响信号在TDE发生十年(甚至更长时间)之后仍然能够被探测到,强烈暗示它们在气体和尘埃丰富的环境下非常普遍和显著。尘埃回响信号甚至可能比光学更加显著和持久,这为研究者探测受尘埃严重遮蔽的此类事件提供了极佳的观测窗口。

TDE的红外回响还为探测星系核区的尘埃量甚至几何分布提供了难得的机会。2017年3月英国谢菲尔德大学Tadhunter等人在《自然·天文》上报了极亮红外星系F01004-2237中发现的一例特殊的TDE,其光学波段衰减持续的时间更长,在闪耀发生几年后仍然维持在一个较高的水平,即相比爆发之前有明显的残余流量;与其他TDE的寄主星系相反,其恒星形成活动剧烈^[19]。我们检查它的红外光变曲线发现,它在光学爆发前后处在宁静状态,而此后的3—6年持续增亮,这与之前发现的TDE红外回响信号的表现形式有显著差异。通过分析研究,红外持续增亮现象可以由黑洞周围3光年左右的尘埃环吸收再辐射的回响信号来解释^[20]。有趣的是,这一模型也可以同时解释F01004-2237的光学残余流量——即来自尘埃的散射光子。由此我们还预言了这个源近期可以观测到的一些现象,如中红外光度迅速衰减(已被证实),光学偏振信号等。这项工作被美国天文学会刊物研究亮点网站选为研究亮点,以“一颗垂死恒星的回声”为题报道。

尘埃回响不仅为我们探究核区环境提供了利器,也能将那些被传统搜寻方法漏掉的TDE从尘埃的紧密包裹中挖掘出来,这对解决当前TDE的一些关键疑难问题可能会起到四两拨千斤的作用。观测上统计的TDE发生率比理论预言的要低至少一个量级,而且出人意料的更倾向于发生在后星爆星系(或者所谓的E+A星系)中^[21]。虽然一些理论尝试通过星系并合触发恒星形成,双黑洞显著增大恒星损失锥从而提高TDE发生率来解

释,但我们却又很少在星爆星系中发现TDE,这就产生了矛盾。一种可能的解释是星爆星系中发生的TDE大部分是受尘埃遮蔽的,从而被以前的搜寻方法遗漏了,这与星系并合会导致气体与尘埃内流到核区的基本图像是一致的。我们正在开展基于红外回响信号系统搜寻尘埃遮蔽TDE的项目,期望在不久的将来能在解决这些问题上做出突破。

4 TDE研究的未来图景

伴随着时域天文的兴起,TDE的研究方兴未艾。除了前文提到的已开展多年的那些地面巡天,刚刚从PTF升级的ZTF(兹维基瞬变源巡天)项目已于今年正式开始运行。ZTF每小时就能扫描3750平方度的天空,30 s单次曝光深度约为20.5等(g和R波段),每年对北天每个区域覆盖约300次,超越了之前所有时域巡天的能力。更值得期待的,LSST将从2022年开始在u, g, r, i, z, y六个波段对近两万平方度的天区做十年的重复观测(LSST望远镜设想图见图5(a)),预计每个天区在每个波段会被观测大约100—200次。尤其是,LSST单次15 s曝光深度就能达到24.5等(r波段),有能力发现大量更远更暗的TDE。2010年出版的美国天文未来十年规划白皮书里保守估计,LSST每年至少会发现大约130例TDE(图5(b)),这是目前发现的所有TDE数目总和的好几倍^[22]。稍乐观的估计更是指出LSST每年会发现大约4000例事件。因此,可以确信LSST运行之后几乎每晚都有TDE被发现,这也为后续认证和监测提出了巨大挑战。

再将目光转向国内,中国科学院战略性先导专项规划的“十三五”空间科学任务之一爱因斯坦探针(Einstein Probe,简称EP)卫星也将TDE作为它的一个主要科学目标^[23]。TDE耀发时主要能段在软X射线及紫外,而EP覆盖0.5—4 keV的软X射线波段,同时具有大视场及高灵敏度,可以开展快速时域巡天监测,因此非常契合TDE的探测与监测,预计每年将发现100例左右TDE事件。此外,目前探测到的TDE中,很少有上升和

峰值阶段的观测数据。EP 的观测模式决定其一天之内可以对同一天区进行多次观测，从而可以发现爆发初期的 TDE，提供从上升—峰值—下降的完整光变曲线。这对我们理解 TDE 早期的物理过程、喷流和吸积盘冕的产生都具有重要作用。极早阶段探测 TDE，还有利于触发其他设备的多波段快速跟踪。

5 总结

恒星潮汐撕裂事件(TDE)作为超大质量黑洞的一种特殊的吸积事件，是正在蓬勃发展的时域天文的主要研究目标之一。虽然 TDE 很罕见，但它蕴含的巨大的科学价值逐渐引起了人们的兴趣和关注。它不仅可以作为普通星系中超大质量黑洞，尤其是矮星系中的黑洞存在的可靠探针，而且其独特的暂现的物理过程为我们研究黑洞吸积物理(吸积盘的形成与消失，喷流产生等)提供了天然的实验室。此外它对探测普通星系中双黑洞、黑洞自旋、引力波等提供了绝佳的机会。

我们在 TDE 的研究中开辟蹊径，利用 TDE 照射在黑洞周围星际介质上产生的回响信号在国际上率先做出了一系列富有原创性的成果，

参考文献

[1] Kormendy J, Ho L C. *ARA&A*, 2013, 51: 511
 [2] Genzel R, Eisenhauer F, Gillessen S. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82: 3121
 [3] Phinney E S. *The Center of the Galaxy*, 1989, 136: 543
 [4] Rees M J. *Nature*, 1988, 333: 523
 [5] Komossa S. *Journal of High Energy Astrophysics*, 2015, 7: 148
 [6] Yang C, Wang T, Ferland G J *et al.* *ApJ*, 2017, 846: 150
 [7] Greene J E. *Nature Communications*, 2012, 3: 1304
 [8] Bloom J S, Giannios D, Metzger B D *et al.* *Science*, 2011, 333: 203
 [9] Liu F K, Li S, Chen X. *ApJL*, 2009, 706: L133
 [10] Liu F K, Li S, Komossa S. *ApJ*, 2014, 786: 103
 [11] Leloudas G, Fraser M, Stone N C *et al.* *Nature Astronomy*, 2016, 1: 0002

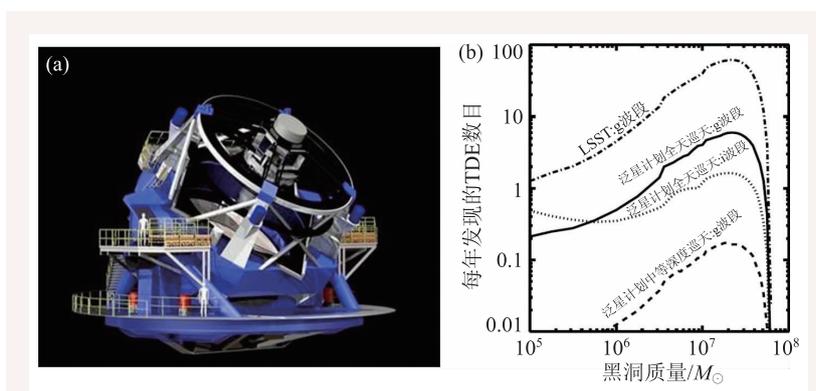


图5 (a)下一代大视场巡天望远镜LSST, 将于2022年正式开始观测; (b)2010年出版的美国天文未来十年规划白皮书里保守估计LSST每年发现的TDE数目和不同黑洞质量的关系

推动了这一领域的发展。我们在近邻 TDE 目标源 ASASSN-14li 中第一次探测到显著的尘埃红外回响信号；首先系统的搜寻并确诊了 4 个光学光谱有瞬变极强冕线特征(气体回响)的源，并探测到成协的长时标尘埃回响信号；在极亮红外星系 F01004-2237 中，我们发现了特殊的长期红外增强并成功解释为尘埃环的尘埃回响。TDE 的回响不仅为探测星系核区的星际介质环境提供了有效方法，还提示研究者可以利用回响信号探测新的 TDE，尤其是被尘埃遮蔽的源。

从国内国际正在和即将开展的项目(如 ZTF、LSST 和 EP 等)来判断，我们有理由相信 TDE 研究的黄金时代即将到来。

[12] Komossa S, Zhou H, Wang T *et al.* *ApJL*, 2008, 678: 13
 [13] Wang T G, Zhou H Y, Komossa S *et al.* *ApJ*, 2012, 749: 115
 [14] Yang C W, Wang T G, Ferland G *et al.* *ApJ*, 2013, 774: 46
 [15] Lu W, Kumar P, Evans N J. *MNRAS*, 2016, 458: 575
 [16] Jiang N, Dou L, Wang T *et al.* *ApJL*, 2016, 828: 14
 [17] van Velzen S, Mendez A J, Krolik J H *et al.* *ApJ*, 2016, 829: 19
 [18] Dou L, Wang T, Jiang N *et al.* *ApJ*, 2016, 832: 188
 [19] Tadhunter C, Spence R, Rose M *et al.* *Nature Astronomy*, 2017, 1: 0061
 [20] Dou L, Wang T, Yan L *et al.* *ApJL*, 2017, 841: 8
 [21] Arcavi I, Gal-Yam A, Sullivan M *et al.* *ApJ*, 2014, 793: 38
 [22] Gezari S, Strubbe L, Bloom J S *et al.* 2009, astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, 2010
 [23] Yuan W, Zhang C, Feng H *et al.* 2015, arXiv: 1506.07735