引力波爆发事件的电磁对应体的探测

高鹤^{1*}, 范锡龙^{2*}, 吴雪峰³, 张冰^{4,5,6}, 孙惠^{4,5,7}

1. 北京师范大学天文系, 北京 100875;

2. 湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 武汉 430205;

3. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008

4. 北京大学物理学院, 北京 100871;

5. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871;

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

7. 中国科学院国家天文台, 中国科学院空间天文与技术重点实验室, 北京 100012

*联系人, 高鹤, E-mail: gaohe@bnu.edu.cn; 范锡龙, E-mail: fanxulong@outlook.com

收稿日期: 2017-9-23; 接受日期: 2017-12-18; 网络发表日期: 2018-01-29

国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845800)、国家自然科学基金(批准号: 11543005, 11603003, 11633001)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052100)资助

摘要 双黑洞并合产生的引力波信号由第二代地面激光干涉仪引力波探测器Advanced LIGO第一次直接探测到, 开启了探索宇宙的一个崭新的窗口. 伴随着Advanced LIGO科学运行期的继续运行, 以及未来几年其他第二代探测器, 例如Advanced Virgo, LIGO-India的陆续建设和投入使用, 将有越来越多的引力波信号被探测到. 最新的双中子星并合引力波事件的电磁对应体被探测到, 极大地丰富了引力波天文学的科学内容, 人类进入全新的多信使天文时代, 例如: 提高引力波源及其宿主星系空间位置精度估计, 确定引力波源的红移、破除引力波模型中的简并参数, 确定引力波事件前身天体的物理环境以及其产生的物理机制、测量宇宙学参数等等. 由于引力波探测器的定位能力较差(Advanced LIGO~十至几百平方度), 探测引力波事件电磁对应体对大视场高能观测设备提出了迫切需求. 爱因斯坦探针具有大视场、高灵敏度、全天观测、快速指向能力和数据下传等方面的优势, 特别是其大视场和高灵敏度, 为引力波事件电磁对应体的探测提供了一个理想的观测平台. 爱因斯坦探针的成功运行, 将促进引力波天文学和引力波宇宙学的发展, 并且使我国在引力波源的电磁波对应体研究方面处于国际领先的地位.

关键词 引力波, 伽玛射线, X射线

PACS: 95.85.Sz, 95.85.Pw, 95.85.Nv

引用格式: 高鹤, 范锡龙, 吴雪峰, 等. 引力波爆发事件的电磁对应体的探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039504

Gao H, Fan X L, Wu X F, et al. Detection of electromagnetic counterpart for gravitational wave bursts (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039504, doi: [10.1360/SSPMA2017-00273](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00273)

1 简介

1.1 引力波的探测

根据爱因斯坦1915年提出的广义相对论^[1], 引力可以等效成时空曲率. 建立在四维时空的黎曼(Riemann)几何学的基础上, 广义相对论将引力的效应描述成时空曲率与物质的能量动量之间的联系, 即: 时空告诉物质如何运动, 物质告诉时空如何弯曲. 这一理论预言质量分布的变化将引起时空曲率的改变, 这种时空的扰动会以波动的形式自由传播, 即引力波, 其传播速度为光速. 我们可以形象地称之为时空的“涟漪”(Ripples).

引力波存在的间接证据在20世纪70, 80年代由美国物理学家泰勒(J. Taylor)和休尔斯(R. Hulse)对脉冲双星公转轨道的衰减的射电观测发现^[2,3]. 该工作荣获1993年诺贝尔物理学奖. 引力波频谱一般根据不同探测手段划分成4个频带: 极低频(Extremely Low Frequency, 10^{-8} – 10^{-15} Hz)、甚低频(Very Low Frequency, 10^{-9} – 10^{-7} Hz)、低频(Low Frequency, 10^{-4} –1 Hz)和高频(High Frequency, 1– 10^4 Hz). 对它们探测分别主要用宇宙微波背景辐射、脉冲星计时阵列、空间引力波探测器和地面引力波探测器^[4]. 地面直接探测高频引力波的努力可以追溯到20世纪60年代, 当时韦伯(J. Weber)制造了世界上第一个引力波探测器——共振棒^[5]. 此后, 新一代的激光干涉仪探测器取代了共振棒式的探测器, 成为了引力波探测器的主流. 21世纪初, 几个大型的激光干涉仪引力波探测器分别建成并投入使用, 主要有: 美国的LIGO^[6], 包括位于利文斯顿(Livingston)的一个臂长为4 km和位于汉福德(Hanford)的两个臂长分别为4和2 km的干涉仪; 位于意大利比萨(Pisa)附近, 由意大利和法国联合建造的臂长为3 km的Virgo^[7]. 尽管并没有直接探测到引力波信号, 相关的数据分析已经获得了针对某些引力波源的重要观测限制, 例如引力波数据给出的关于Crab脉冲星参数上限已经低于spin-down给出的上限^[8].

目前, 升级后的第二代探测器aLIGO已经开始进入科学运行. 其重要的探测目标信号包括双致密天体并合(双中子星、中子星-黑洞、双黑洞并合)产生的引力波. aLIGO已经成功探测到多个引力波探测信号: 包括双黑洞并合以及双中子星并合产生的引力波^[9–14]. 不仅如此, 双中子星并合引力波信号的多波段电磁对

应体已被探测到^[15]. 到2020年左右, 包括aLIGO, Virgo, LIGO-India的引力波探测器网络将达到设计灵敏度, 并能探测到平均距离200 Mpc以内的双中子星并合所产生的引力波信号. 目前理论估计的探测率具有比较大的不确定性, aLIGO预期每年探测到0.4–400个双中子星并合所产生的引力波信号, 最可能的探测率为每年~40个^[16,17].

引力波信号的直接探测让我们更加深刻地理解引力理论等基础物理问题. 同时引力波能够提供一个认识宇宙的新窗口. 利用高频引力波的观测我们可以直接“窥探”黑洞的形成、双中子星/黑洞系统的并合, 探索快速旋转的中子星以及了解超新星爆炸的内部过程等等. 同时, 探测产生于极早期宇宙的原初引力波将揭开大爆炸初期的宇宙面貌. 正如观测天文学从可见光扩展到全波段, 从而极大地拓展人类的视野那样, 引力波天文学也将在21世纪掀起一场认识宇宙以及基础物理的革命^[18,19].

1.2 引力波事件电磁对应体探测的科学意义

基于引力波(也包括中微子)和电磁波联合探测来开展天文学和宇宙学研究, 将开辟一个新兴的重要交叉学科方向, 即多信使天文学. 根据引力波信号到达地面探测器网络中不同探测器的时间差, 可以对引力波源进行空间定位^[17]. 在第二代探测器运行的前两年, 典型天空定位能力在几百平方度^[20]. 地球尺度的限制使地面探测器网络的空间定位能力的极限为~10平方度. 因此, 探测引力波源的电磁对应体, 进而为引力波源精确定位, 将是多信使天文学的关键一步. 无论引力波源的电磁对应体信号如何, 认证它们共同的宿主星系又会使得三者的空间定位相互佐证. 即便在还没有探测到引力波的电磁对应体时, 关于引力波源-引力波事件电磁对应体-宿主星系的多信使天文学研究已经取得了丰硕的成果. 例如, 目前已经排除了伽玛暴GRB070201和GRB051103^[21,22]的前身星是分别位于M31和M81中的双中子星并合的可能性. 最新的引力波与电磁波联合探测事件中, 电磁波的探测帮助确定了引力波源的天体物理起源以及宿主星系类型, 有助于我们回答诸如“双致密星并合事件及其电磁对应体(例如短伽马暴)是不是更倾向于发生在年老星团?”等问题^[23].

多信使天文学的意义还在于联合探测可以对引力

波源及其电磁对应体进行更多角度的理解, 这种多类信号的联合观测将有利于打破单纯各自模型中的参数简并、减小参数空间, 从而揭示更多的物理过程的本质^[18]. 例如, 电磁对应体或者其宿主星系的观测将大大缩小引力波源空间位置和距离的参数空间范围, 从而提高了引力波参数估计的精度. 这不仅加快了数据处理速度, 更提高了其他参数的估计精度. 尤其是电磁波观测可以得到红移测量, 这将打破常规引力波参数估计计算中质量-红移简并, 为利用引力波事件研究宇宙学提供了更多可能性. 另一方面, 引力波数据能给出光度距离和视向角的估计, 提供了直接估算电磁对应体绝对光度和喷流张角所必须的信息^[24,25].

作为天体物理和宇宙学研究的重要工具, 多信使的联合观测将开辟天文学的全新时代. 其中一个重要的应用是引力波宇宙学. 引力波源(如双中子星并合)可以用来作为标准铃声(Standard Sirens)来测量宇宙的几何和膨胀^[26], 由此可以用来检验宇宙学模型、测量宇宙学参数、研究暗能量和暗物质^[27,28]. 其基本思想如下: 从双星系统辐射的引力波的振幅和相位数据中, 可以独立地估计该引力波源的光度距离. 需要指出的是, 这种确定距离的方法成功地避免了普通的天文学测距中存在的“宇宙阶梯距离”带来的不确定性, 从而大大减小了其带来的系统误差. 如果成功观测到引力波源的电磁对应体, 将使其宿主星系的红移测量成为可能, 从而得到全新的宇宙学距离-红移关系的测量.

天文学发展至今, 电磁波段是发展最完善、理论研究最透彻的观测窗口, 也是现有探测手段与探测仪器最丰富的窗口. 无论是要证认引力波源的天体物理起源, 还是对其物理性质开展进一步的研究, 都需要通过对引力波源伴随产生的电磁信号的联合探测来完成. 因此, 从引力波天文学的角度上讲, 引力波事件电磁对应体观测研究的意义可相比于引力波信号的直接探测.

1.3 EP在该领域的探测优势

由于引力波事件电磁对应体探测的意义和价值, 近年来, 引力波与电磁波的联合探测受到国际上越来越多的关注. LIGO和VIRGO科学组织已经着手建立与多波段地面和空间望远镜的合作关系来共同开展这一重要方向的联合研究(<http://www.ligo.org/scientists/>

GWEMalerts.php). 其中, 最具有科学潜力的是宽视场的监视器类型的巡天设备, 如LSST(光学)和LOFAR(射电). 爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)为引力波事件电磁对应体的探测提供了一个理想的观测平台. 由于具有大视场、高灵敏度、工作在高能X射线波段、全天观测、快速后随指向观测能力和数据下传等方面的优势, EP卫星具有探测引力波爆发源电磁对应体的巨大潜力. EP对X射线源可以精确定位到几十角秒或者更好, 使得通过多波段后随观测其宿主星系并测量其红移成为可能. 目前国际上在轨运行的X和伽马射线探测器视场太小, 或者灵敏度较低, 或能段偏高, 都不适合探测引力波事件电磁对应体^[29]. 而目前国际上还没有大视场的X射线卫星项目立项. 如果EP能够在2020年左右发射运行, EP将加入全球的引力波与电磁波协调观测研究组织, 并将成为这一国际联合体中的一个重量级的设备. 可以预期, 通过与国际上的引力波探测器的联合观测, 有望获得高回报的科学成果. EP将大大促进引力波天文学和引力波宇宙学的发展, 并且使我国在引力波源的电磁波对应体研究方面处于国际领先的地位.

2 引力波事件伴随的电磁波辐射的理论模型预期

目前普遍认为, 探测率最高的高频引力波事件为双致密星并合, 在此, 我们主要论述目前理论上比较成熟的双中子星并合产生的电磁波辐射. 其他高频引力波源也可能伴随EP能探测到的电磁波辐射, 此类未预测源的探测将带来更多的科学成果. 此外低频引力波源, 例如超大质量黑洞并合也能产生EP所能探测的电磁波辐射^[30,31]. 鉴于未来空间引力波项目的不确定性, 我们在此暂不讨论低频引力波源.

对于升级后的第二代引力波探测器, 根据目前的预测, 其最可能探测到的引力波源及其电磁对应体为双中子星并合所产生引力波事件. 因此, 双中子星并合成为最为重要、也是近年来研究最多的引力波候选源之一, 天体物理界对这一天体物理过程伴随产生的电磁辐射信号的研究变得越来越热(图1).

研究表明, 中子星并合过程会产生什么样的电磁信号主要取决于并合后的产物是什么^[32]. 一般将并合后产物分成两个部分: 第一部分称之为“中心天体”,

图 1 (网络版彩图)双致密星并合构想图. 图取自<http://www.ligo.org/science/GW-Inspiral.php>

Figure 1 (Color online) Imaginative illustration of double compact star merger. This figure is taken from <http://www.ligo.org/science/GW-Inspiral.php>.

是两个中子星的主要物质并合后产生的新天体; 第二部分称之为“并合抛射物”, 是在中子星并合的过程中由于强大的离心力被抛出的、以非相对论速度接近各向同性地向外运动的物质, 其质量约为 10^{-4} – 10^{-2} 太阳质量, 速度约为0.1–0.3倍的光速^[33].

理论上, 中心天体有4种演化途径^[34]: 1) 直接坍缩成黑洞; 2) 产生一个非常短暂存在的超大质量中子星, 并在10–100 ms后进一步坍缩成黑洞; 3) 产生一个长时标存在的大质量中子星, 之后随着自转能量的损失(通过电磁辐射或引力波辐射)最终坍缩成黑洞; 4) 产生一个稳定存在的中子星.

若中心天体经历前两种途径, 双中子星并合伴随的电磁辐射将主要有3种起源(图2)^[35]: 第一, 新形成的黑洞吸积周围物质并产生沿黑洞自转轴方向的极端相对论性喷流, 由此产生短伽玛射线暴及其多波段余辉辐射^[36,37]; 第二, Li和Paczynski^[38]提出, 由于上述的抛射物中富含中子, 因此会存在大量的放射性元素, 这些元素在衰变的过程中将产生类似超新星过程的光学辐射(以下称之为“黑洞驱动并合新星”), 该辐射成分大约持续几天; 第三, 非相对论运动的并合抛射物与周围星际介质相互作用产生长时间(几年)持续的射电辐射^[39].

若中心天体经历后两种途径, 即产生一个长时标存在的大质量中子星, 由于在并合之前两个中子星经历开普勒绕转, 最终形成的中子星一定是高速旋转的, 其自转周期应接近毫秒量级. 如此快速的旋转或引起磁场放大效应, 因此新生成的中子星很有可能是一个“毫秒磁星”^[40,41]. 在这种情况下, 由于磁星在快速旋转过程中通过坡印廷流向外释放能量, 双中子星并合伴随的电磁辐射性质将发生很大变化(图3). 首先, 如果此时仍然存在短伽玛射线暴及其余辉的话, 余辉阶段的辐射性质将由于晚期的能量注入发生变化, 如X射线光变曲线中出现平台效应等^[42,43]. 其次, 如果后期产

生的坡印廷流注入到上文提到的抛射物中, 一方面将加热并合抛射物, 其加热效率远远大于放射性元素衰变的加热效率, 因此前面提到的并合新星将会更亮(以下称之为“磁星驱动并合新星”), 其辐射波段主要集中在紫外波段, 时间同样是天的量级, 在光学、X射线波段也会有较强的信号^[44]. 更为显著的效应是, 这一注入将大大增加抛射物的总能量及其运动速度, 使其与星际介质相互作用而产生相对论性激波, 并由此产生非常强的多波段电磁辐射^[32]. 其中, X射线峰值强度将出现在几小时到几天之内, 其辐射强度可达到 $10^{-9} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (假设引力波源距离为~300 Mpc, 下同)光学波段的峰值同样出现在几小时到几天之内, 最亮时可达R波段11等; 射电辐射峰值时刻出现的较晚, 但其亮度远远超过了上文黑洞情形下的长时标射电辐射. 最后, 如果后期产生的坡印廷流没有物质阻挡, 经过一定距离的传播, 它将通过自身的磁耗散过程直接产生X射线辐射, 其辐射强度可达 $10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 峰值出现在几小时到几天之内^[45,46].

如上所见, 根据双中子星并合产生的中心天体不同的演化途径, 其所伴随的电磁辐射性质也有很大的不同. 最新的研究表明^[47], 如果河外星系中的双中子星系统质量分布与观测到的银河系内的分布相同, 基于现有的短伽玛射线暴的观测数据, 可以预言双中子星并合事件将有60%的情况下产生毫秒磁星, 而40%的情况下产生黑洞. 若该结论正确的话, 双中子星并合所伴随的电磁爆发辐射将会很丰富(多波段)且明亮, 被探测到的可能性极大.

这里需要特别指出的是, 无论是中心产物为黑洞还是中子星, 都可能产生短伽玛暴, 而由于短伽玛暴的喷流张角问题, 大部分短暴的喷流张角并不在我们的视线上, 直接探测到与引力波暴成协的短伽玛暴的几率应该较小, 除非短伽玛暴的喷流是结构化的大张角喷流. 然而短伽玛暴的偏轴X射线余辉辐射被探测到的概率相对较高^[48], 将是EP等X射线望远镜的主要探测目标之一.

3 EP探测前景及预期成果

3.1 EP对引力波事件电磁对应体的探测前景

从现有模型中不难发现, X射线将是最理想的探测引力波事件电磁对应体辐射的波段. 对于双中子星

图 2 (网络版彩图)双中子星并合中心产物为黑洞情况下电磁信号成分示意图. 图取自Metzger和Berger^[35]

Figure 2 (Color online) Summary of potential electromagnetic counterparts of NS-NS mergers with black holes as postmerger products. This figure is taken from Metzger and Berger^[35].

图 3 (网络版彩图)双中子星并合中心产物为磁星情况下电磁信号成分示意图. 图取自Gao等人^[32]

Figure 3 (Color online) Summary of potential electromagnetic counterparts of NS-NS mergers with magnetars as post-merger products. This figure is taken from Gao et al.^[32].

并合事件, 在中心天体为长时间存在的超大质量中子星的情况下, 在任何方向的观测者都将会看到较强的X射线辐射. 如果中心天体为黑洞, 短伽马射线暴的X射线(正轴或偏轴)余辉辐射也有可能被捕捉到.

一般来说, 对引力波事件电磁对应体的探测有两个策略: 1) 在引力波信号触发地面探测器后, 电磁波

段望远镜(如X射线卫星)快速对准引力波源方向并在引力波探测器给出的位置误差范围内进行快速搜索, 以期捕捉到电磁对应体. 由于第二代引力波探测器的定位精度只有几十到几百平方度, 最理想的要求是电磁波望远镜具有相匹配的瞬时视场. EP的3600平方度的大视场完全满足这一要求. 2) 利用大视场望远镜, 在大的天区范围内与引力波探测器(可探测全天各个方向)进行联合监测, 实时探测与引力波事件同时(或准同时)发生的暂现源. 如果暂现源落在引力波源的位置误差范围内, 则作为引力波事件电磁对应体的候选体. 对于没有被探测器在轨触发的较弱的暂现源, 也可以通过后期数据处理并与引力波事件的比对来发现. 这种模式下, 探测到电磁对应体的概率正比于望远镜的瞬时视场的大小. EP的视场为全天1/11, 因此引力波事件落入EP视场的概率为1/11. 对EP而言, 以上两种观测策略都可以同时开展. 但考虑到EP卫星数据上传一般可能有几个小时的延迟, 后者做出发现的可能性更大. 除此之外, 最新的研究表明^[49]在一些短伽马暴后期存在X射线与光学的同时增亮现象, 多波段数据可以用双中子星并合产生磁星情形下的电磁对应体模型完美解释. 利用EP对更多的短伽马暴进行晚期的X射线监测可以在更大的样本中搜选类似样本, 从而为寻找磁星的产生提供一个新的思路和方法.

由此可见, 一个大视场、高灵敏度的X射线卫星将是探测引力波事件电磁对应体的最佳设备, 具有很大的探测概率. 一旦探测到与引力波事件伴随的X射线信号, 将能确认引力波的探测结果, 并为引力波源准确定位, 使得进一步开展多波段的跟踪观测及红移测量成为可能, 实现对这一天体物理现象的多窗口多波段联合探测. 此外, EP卫星上配置的跟踪观测X射线望远镜(FXT)也可以快速地开展自主的X射线跟踪观测.

3.2 预期成果及科学意义

利用EP实现引力波信号与电磁信号的联合探测, 其意义无疑是巨大的. 从天体物理方面来讲: 1) 通过电磁波与引力波的联合探测(即使没有探测到任何引力波事件电磁对应体), 并利用观测到的X射线信号及其他可能观测到的多波段信息, 我们可以确定中心天体的演化途径, 进而对双中子星质量分布, 高压高密情况下的物态方程等获得更深刻的理解; 2) 如果并合

产物确定为中子星, 我们可以充分利用电磁辐射的流量值推算出该中子星的磁场与自转周期, 可以对中子星表面磁场放大机制、自转能损耗机制等开展深入研究; 3) 通过研究观测到的X射线信号, 可以得到并合抛射物的质量等信息, 并通过与数值模拟结果的对比, 对相关的引力理论进行限制; 4) 通过比对引力波事件电磁对应体的辐射特征与短伽马射线暴的余辉特征, 进而证实或证伪短伽马射线暴双中子星并合起源理论.

在引力波宇宙学方面, 随着双中子星并合引力波与电磁信号源联合探测的样本累积, 可以通过独立测量的红移-距离关系来研究宇宙的膨胀行为. aLIGO和AdV预期将探测到几百Mpc内双中子星并合事件并测量光度距离. 如果其中一部分的事件能探测到电磁波对应体并测量其宿主星系的红移, 按照目前的理论估计, 如果有30个左右的联合探测事件, 就能将哈勃常数限制到~1%的精度^[50]. 这个精度的实现取决于能否有如此多的联合观测事件发生, 以及快速准确定位引力波的电磁对应体及其宿主星系. 为了克服引力波定位误差比较大带来的精确定位宿主星系的困难, 可以利用引力波源(及其电磁对应体)的一些候选宿主星系的红移分布信息, 50个第二代引力波探测器时代的中子星-中子星并合事件也能限制哈勃常数到<10%的精度^[51].

长远来看, 这一新的宇宙学探测方法有着巨大的运用前景. 以建议中的爱因斯坦望远镜(Einstein Telescope)为代表的第三代引力波探测器, 预计能探测红移2以上的双中子星并合引力波(每年能够探测到的引力波源数量将达到百万的量级), 将在真正意义上开展引力波天文学研究. 该方法甚至可以用来限制暗能量的状态方程^[52], 根据弱引力透镜对引力波源的放大效应来区分暗能量与修改引力模型等^[53]. 研究表明, 用引力波标准铃声的方法来研究暗能量, 在未来十几年之内完全可以达到甚至超过同时期的其他方法(例如SNIa, BAO, Weak Lensing等). 例如, 可以使得暗能量的状态参数的不确定度小于5%的水平^[22].

4 结论

对引力波事件的电磁对应体的探测具有重要的科

学意义, 将开辟引力波天文学和多信使天文学的新时代. EP的大视场、高灵敏度、观测能段和灵活的观测模式为引力波事件电磁对应体的探测提供了一个理想的观测平台, 预期将成为国际上该领域最为强大的观测设备之一.

让我们用一段关于EP与第二代引力波探测器同时运行的畅想来结束我们的报告. 设想在2020年左右, 第二代引力波探测器能够探测几百Mpc以内的双中子星并合引力波, 届时EP也已经发射运行. 预期会出现两种情形.

情形一: 某一时刻引力波探测器被触发, EP的视场恰好覆盖了引力波信号发生的天区, 并且探测到了一个X射线暂现源. EP对X射线源进行了快速准确的定位, 并将位置信息发给其他光学和射电等多波段望远镜. 预期的多波段电磁信号相继被探测到, 引力波数据也证实了磁星是并后的中心天体. 结合探测到的引力波与电磁信号, 对双中子星并合事件相关的物理参数, 如双中子星质量、抛射物质量、磁星自转周期、磁星表面磁场、高压高密情况下的物态方程等等给出很好的限制. 随着样本的积累, 引力波宇宙学(哈勃常数测量)等新兴学科得到突破性发展.

情形二: 某一时刻引力波探测器被触发, EP的视场恰好覆盖了引力波信号的误差范围, 但是并没有X射线信号被探测到. 这意味着中心天体很可能不是磁星, 后期的引力波数据或许有能力进一步证实中心产物为黑洞. 极深的光学观测和射电观测或许(很小可能)可以看到一个非常暗弱的电磁信号, 尤其是在射电波段要经过多年的观测才能够判断出所观测到的信号究竟是否为引力波伴随的瞬变源. 如果多次(甚至每次)观测都是如此, 将可以基本排除磁星作为中心天体的可能性, 进而对高压高密情况下的物态方程进行限制. 故事可能不如情形一精彩, 但是仍然可以得出非常重要的科学结论.

综上所述, 在引力波天文学早期发现的时代, EP如果能够成功运行, 将做出重要的、甚至是突破性的贡献, 对许多未知的天体物理问题给出前所未有的启示. EP将促进引力波天文学的发展, 并且使我国在引力波事件的电磁波对应体研究领域处于国际领先地位.

参考文献

- 1 Einstein A. Sitzungsberichte der Physikalisch-mathematischen Klasse. Berlin: Preuss Akad Wiss, 1916. 688
- 2 Hulse R A, Taylor J H. A deep sample of new pulsars and their spatial extent in the galaxy. *Astrophys J*, 1975, 201: L55–L59
- 3 Taylor J H, Weisberg J M. A new test of general relativity—Gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16. *Astrophys J*, 1913, 253: 908–920
- 4 Cutler C, Thorne K. An overview of gravitational-wave sources. In: Proceedings of the 16th International Conference on General Relativity and Gravitation, edited by Bishop N T, S. Maharaj N. Singapore: World Scientific, 2002. 72
- 5 Weber J. Evidence for discovery of gravitational radiation. *Phys Rev Lett*, 1969, 22: 1320–1324
- 6 Abbott B P, Abbott R, Adhikari R, et al. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory. *Rep Prog Phys*, 2009, 72: 076901, arXiv: [0711.3041](#)
- 7 Acernese F, Alshourbagy M, Amico P, et al. Status of Virgo. *Class Quantum Grav*, 2008, 25: 114045
- 8 Abbott B, Abbott R, Adhikari R, et al. Beating the spin-down limit on gravitational wave emission from the Crab pulsar. *Astrophys J*, 2008, 683: L45–L49, arXiv: [0805.4758](#)
- 9 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102, arXiv: [1602.03837](#)
- 10 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 241103, arXiv: [1606.04855](#)
- 11 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Binary black hole mergers in the first Advanced LIGO observing run. *Phys Rev X*, 2016, 6: 041015, arXiv: [1606.04856](#)
- 12 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170104: Observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 221101, arXiv: [1706.01812](#)
- 13 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170814: A three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 141101
- 14 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- 15 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *Astrophys J*, 2017, 848: L12
- 16 Abadie J, Abbott B P, Abbott R, et al. Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors. *Class Quantum Grav*, 2010, 27: 173001, arXiv: [1003.2480](#)
- 17 Abbott B P, Abbott B P, Abbott B P, et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo. *Living Rev Relativ*, 2016, 19: 1, arXiv: [1304.0670](#)
- 18 Sathyaprakash B S, Schutz B F. Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves. *Living Rev Relativ*, 2009, 12: 2, arXiv: [0903.0338](#)
- 19 Fan X L, Hendry M. Multimessenger astronomy. arXiv: [1509.06022](#)
- 20 Singer L P, Price L R, Farr B, et al. The first two years of electromagnetic follow-up with Advanced LIGO and Virgo. *Astrophys J*, 2014, 795: 105, arXiv: [1404.5623](#)
- 21 Abbott B, Abbott R, Adhikari R, et al. Implications for the origin of GRB 070201 from LIGO observations. *Astrophys J*, 2008, 681: 1419–1430, arXiv: [0711.1163](#)
- 22 Abadie J, Abbott B P, Abbott T D, et al. Implications for the origin of GRB 051103 from LIGO observations. *Astrophys J*, 2012, 755: 2, arXiv: [1201.4413](#)
- 23 Fan X L, Messenger C, Heng I S. Enhancing gravitational wave astronomy with galaxy catalogues. In: Sopuerta C, ed. Gravitational Wave Astrophysics. Astrophysics and Space Science Proceedings, vol 40. Cham: Springer, 2015. 35–42
- 24 Fan X L, Messenger C, Heng I S. A Bayesian approach to multi-messenger astronomy: Identification of gravitational-wave host galaxies. *Astrophys J*, 2014, 795: 43, arXiv: [1406.1544](#)
- 25 Nissanke S, Holz D E, Hughes S A, et al. Exploring short gamma-ray bursts as gravitational-wave standard sirens. *Astrophys J*, 2010, 725: 496–

- 514, arXiv: [0904.1017](#)
- 26 Schutz B F. Determining the Hubble constant from gravitational wave observations. *Nature*, 1986, 323: 310–311
- 27 Zhu Z H, Fujimoto M K, Tatsumi D. Determining the cosmic equation of state using future gravitational wave detectors. *Astron Astrophys*, 2001, 372: 377–380
- 28 Zhao W, van den Broeck C, Baskaran D, et al. Determination of dark energy by the Einstein Telescope: Comparing with CMB, BAO, and SNIa observations. *Phys Rev D*, 2011, 83: 023005, arXiv: [1009.0206](#)
- 29 Chu Q, Howell E J, Rowlinson A, et al. Capturing the electromagnetic counterparts of binary neutron star mergers through low-latency gravitational wave triggers. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 459: 121–139, arXiv: [1509.06876](#)
- 30 Tanaka T, Haiman Z, Menou K. Witnessing the birth of a quasar. *Astron J*, 2010, 140: 642–651, arXiv: [1004.5411](#)
- 31 Shields G A, Bonning E W. Powerful flares from recoiling black holes in quasars. *Astrophys J*, 2008, 682: 758–766, arXiv: [0802.3873](#)
- 32 Gao H, Ding X, Wu X F, et al. Bright broadband afterglows of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *Astrophys J*, 2013, 771: 86, arXiv: [1301.0439](#)
- 33 Hotokezaka K, Kiuchi K, Kyutoku K, et al. Mass ejection from the merger of binary neutron stars. *Phys Rev D*, 2013, 87: 024001, arXiv: [1212.0905](#)
- 34 Lasky P D, Haskell B, Ravi V, et al. Nuclear equation of state from observations of short gamma-ray burst remnants. *Phys Rev D*, 2014, 89: 7302, arXiv: [1311.1352](#)
- 35 Metzger B D, Berger E. What is the most promising electromagnetic counterpart of a neutron star binary merger? *Astrophys J*, 2012, 746: 48, arXiv: [1108.6056](#)
- 36 Berger E, Kulkarni S R, Fox D B, et al. Afterglows, redshifts, and properties of *Swift* gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2005, 634: 501–508
- 37 Gehrels N, Sarazin C L, O’Brien P T, et al. A short γ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift $z = 0.225$. *Nature*, 2005, 437: 851–854
- 38 Li L X, Paczyński B. Transient events from neutron star mergers. *Astrophys J*, 1998, 507: L59–L62
- 39 Nakar E, Piran T. Detectable radio flares following gravitational waves from mergers of binary neutron stars. *Nature*, 2011, 478: 82–84, arXiv: [1102.1020](#)
- 40 Dai Z G, Wang X Y, Wu X F, et al. X-ray flares from postmerger millisecond pulsars. *Science*, 2006, 311: 1127–1129
- 41 Gao W H, Fan Y Z. Short-living supermassive magnetar model for the early X-ray flares following short GRBs. *Chin J Astron Astrophys*, 2006, 6: 513–516
- 42 Zhang B, Mészáros P. Gamma-ray burst afterglow with continuous energy injection: Signature of a highly magnetized millisecond pulsar. *Astrophys J*, 2001, 552: L35–L38
- 43 Fan Y Z, Xu D. The X-ray afterglow flat segment in short GRB 051221A: Energy injection from a millisecond magnetar? *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2006, 372: L19–L22
- 44 Yu Y W, Zhang B, Gao H. Bright “merger-nova” from the remnant of a neutron star binary merger: A signature of a newly born, massive, millisecond magnetar. *Astrophys J*, 2013, 776: L40–40, arXiv: [1308.0876](#)
- 45 D’Orazi V, Lucatello S, Lugaro M, et al. Fluorine variations in the globular cluster NGC 6656 (M22): Implications for internal enrichment timescales. *Astrophys J*, 2013, 763: 22, arXiv: [1210.7854](#)
- 46 Sun H, Zhang B, Gao H. X-ray counterpart of gravitational waves due to binary neutron star mergers: Light curves, luminosity function, and event rate density. *Astrophys J*, 2017, 835: 7, arXiv: [1610.03860](#)
- 47 Gao H, Zhang B, Lü H J. Constraints on binary neutron star merger product from short GRB observations. *Phys Rev D*, 2016, 93: 044065, arXiv: [1511.00753](#)
- 48 Xiao D, Liu L D, Dai Z G, et al. Afterglows and Kilonovae associated with nearby low-luminosity short-duration gamma-ray bursts: Application to GW170817/GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 850: L41
- 49 Gao H, Zhang B, Lü H J, et al. Searching for magnetar-powered merger-novae from short GRBs. *Astrophys J*, 2017, 837: 50, arXiv: [1608.03375](#)
- 50 Nissanke S, Kasliwal M, Georgieva A. Identifying elusive electromagnetic counterparts to gravitational wave mergers: An end-to-end simulation. *Astrophys J*, 2013, 767: 124, arXiv: [1210.6362](#)
- 51 Del Pozzo W, Grover K, Mandel I, et al. Testing general relativity with compact coalescing binaries: Comparing exact and predictive methods to compute the Bayes factor. *Class Quantum Grav*, 2014, 31: 205006, arXiv: [1408.2356](#)

- 52 Camera S, Nishizawa A. Beyond concordance cosmology with magnification of gravitational-wave standard sirens. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 1103, arXiv: [1303.5446](https://arxiv.org/abs/1303.5446)

Detection of electromagnetic counterpart for gravitational wave bursts

GAO He^{1*}, FAN XiLong^{2*}, WU XueFeng³, ZHANG Bing^{4,5,6} & SUN Hui^{4,5,7}

¹ *Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

² *Department of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China;*

³ *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

⁴ *Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

⁵ *Kavli Institute of Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;*

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

⁷ *Key Laboratory of Space Science and Technology, National Astronomical Observatories of China, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*

The direct detection of gravitational waves (GWs) was recently achieved by the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) team, which opened a new era of gravitational wave astronomy. With the operation of Advanced LIGO to scientific operation period, and in the next few years the other second generation detectors, such as Advanced Virgo and LIGO-India continuing to be built and put into use, there will be more and more GW signals being detected. Recently, GW signals from NS-NS merger and its electromagnetic (EM) counterpart have also been detected. Because of the faint nature of GW signals, detecting an EM emission signal coincident with a GW signal in both trigger time and spatial direction is essential to confirm the astrophysical origin of the GW signals and study the astrophysical properties of the GW sources (e.g. host galaxy, distance). Due to the poor localization ability of GW wave detectors (Advanced LIGO ~ 10 – 100 of square degrees), the detection of EM counterpart for GW events with large field of view high energy observational equipment is an urgent demand. Einstein Probe (EP) has a large field of view, all day long observation ability, high sensitivity, fast slewing and pointing capability, fast data downloading and other advantages, provides an ideal facility for the detection of EM counterpart for GW events. The successful operation of the Einstein Probe will promote the development of gravitational wave astronomy and gravitational wave cosmology, and make China in the international leading position for the study of the EM counterpart for the GW source.

gravitational wave, gamma-rays, X-rays

PACS: 95.85.Sz, 95.85.Pw, 95.85.Nv

doi: [10.1360/SSPMA2017-00273](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00273)