



贝叶斯引力波多信使天文学

范锡龙*

湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 武汉 430205

*联系人, E-mail: fanxilong@outlook.com

收稿日期: 2018-04-03; 接受日期: 2018-04-13; 网络出版日期: 2018-06-11

国家自然科学基金(编号: 11673008)和中国科学院战略性先导专项(B类)(编号: XDB23040100)资助项目

摘要 对于双黑洞、双中子星并合引力波及其电磁对应体、宿主星系的观测开启了引力波多信使天文学时代。本文简要介绍引力波、电磁对应体、宿主星系联合观测在提高信号探测效率、增加对波源物理性质的理解、挖掘波源群族性质等方面的基本概念, 重点介绍一个贝叶斯引力波天文学框架处理上述问题的方法和此框架在引力波-宿主星系、引力波-短伽玛暴联合观测方面的应用。

关键词 引力波, 伽玛射线暴, 星系

PACS: 04.50.Kd, 04.30.Tv, 98.62.-g

1 简介

第一次直接探测到双黑洞并合引力波^[1]开启了一个全新的天文学时代: 引力波天文学时代。Advanced LIGO 与 Advanced Virgo 公布的双中子星并合引力波探测结果^[2], 以及世界上众多望远镜对于这个双中子星并合电磁对应体、宿主星系的观测^[3]开启了引力波多信使天文学时代。引力波与电磁/中微子信号的联合观测构成了多信使天文学的重要分支, 将对天文学、物理学和宇宙学产生深远的影响。在双中子星并合引力波GW170817探测之前, 引力波与伽玛暴^[4-9]与光学暂现源^[10,11]与中微子^[12,13]的联合观测都已经开展。这种联合观测带来的好处是多方面的。对于引力波来说, 电磁对应体的确定可以减少引力波搜索参数空

间, 进而提升引力波探测的灵敏度^[14]。对于电磁波/中微子来说, 确定的引力波信号将触发其对于对应体的搜索。联合探测还有利于更好地理解信波源前身星的性质^[15,16], 更加丰富对于引力波结果的科学解读^[17,18], 增加对于哈勃常数的限制^[19,20], 以及更加严格的检验广义相对论与基础物理问题^[21-23]等。利用双中子星并合引力波GW170817、短伽玛暴GRB170817A、千新星SSS17a 及其宿主星系NGC4993 的数据, 人们现在可以确定短伽玛暴、千新星的前身星(双中子星并合)^[3], 推算前身星^[24]、并合后产物^[25]的物理性质, 限制引力波速度以及检验等效原理^[26], 增加对宇宙中重元素起源^[27]、哈勃常数^[28]以及宇宙中这类引力波信号叠加后产生的引力波背景的认识^[29](详情请参见本专题“引力波事件GW170817 的电磁对应体”一文^[30])

引用格式: 范锡龙. 贝叶斯引力波多信使天文学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 079804

Fan X L. Bayesian approach to gravitational wave multi-messenger astronomy (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 079804, doi: [10.1360/SSPMA2018-00102](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00102)

贝叶斯理论是目前全球引力波研究领域采用的主流数据处理方法之一。使用贝叶斯参数估计分析产生于双中子星或者黑洞的引力波信号可以确定双星的空间位置、距离、双星总质量和轨道参数^[31], 获取中子星状态方程^[32]; 分析孤立脉冲星发射的连续引力波信号可以限制中子星的椭率^[33–35]; 探测引力波暴^[36]与引力波背景^[37,38]等。贝叶斯模型选择方法还被用于分析大质量核塌缩恒星起源超新星的引力波信号^[39]、检验广义相对论^[40]、区分噪声类型^[41]等。

已有不少精彩的综述涉及引力波天文学^[42,43]、引力波物理学^[44,45]、多信使天文学^[46–48]与引力波数据处理^[49]。包含引力波在内的多信使天文学领域正在蓬勃发展阶段, 学者们也刚刚开始使用贝叶斯理论研究引力波多信使问题(例如文献[50–53])。本文只涉及地基引力波探测器的引力波源, 主要介绍贝叶斯引力波天文学基本框架及其在天体物理学中的几个应用。

2 引力波简介

引力波产生于波源整体的宏观运动, 因此引力辐射所揭示的信息与电磁辐射观测到的不同, 主要是源宏观尺度的信息。例如对于一个双星绕转系统发射的引力波观测可以获得双星轨道的倾角, 这类关于波源运动的宏观信息通常无法从电磁辐射观测中取得。因为引力波源于天体的整体运动, 引力波波长与波源尺度差不多, 这使得我们通常不能像利用电磁波那样对波源进行拍照成像, 而是类似声波分析那样直接从波形分析波源的性质。通常引力波仪器响应不像电磁波仪器那样具有较好的方向性, 这表明我们能观测到天空任何方位的源, 当然代价是单靠一个仪器很难定位。第二代引力波探测器网络对于引力波波源定位天区有几平方度乃至几十平方度^[54]。引力波与激光干涉仪相互作用产生的可探测物理量应变(Strain) h 与引力波源的距离成反比($h \sim 1/d_L$)^[55], 而大部分电磁波直接观测量是流量, 随着 $1/d_L^2$ 变小。这就意味着较小仪器灵敏度的提高就可以获得很多的源, 例如对距离敏感度的一倍, 我们能看到的源所在体积变为原来的8倍。

引力波信号按照搜索类型主要分为引力波暴^[14,56,57]、双星并合引力波^[58]、连续引力波^[59,60]和随机引力波背景^[61]4类。双星系统因为发射引力波损失能量而旋近直至并合。成员星为中子星或者黑洞的致密双星系统是我们了解最清楚的引力波源^[62]。在双星旋近的最后阶段, 引力波频率升高到地面探测器最敏感的频段^[55]。连续引力波源, 例如非球对称质量(或质量流)分布的快速旋转孤立中子星产生的引力波具有周期性^[63]。普遍认为大质量星体短时间内的剧变(例如超新星爆发)会产生引力波暴。由于复杂未知的初始条件和强引力场解(不论是解析解还是数值解)获得的困难, 目前引力波的波形还具有很大的不确定度^[64]。宇宙中以上所有天体产生的引力波的叠加产生了随机引力波背景^[65]。这些天体源产生的引力波背景可以看作是宇宙演化初期产生的原初引力波背景^[66]的前景噪声。也有一些信号, 比如中子星不稳定性产生的“短暂-连续信号”(Transient-CW Signal), 例如文献[67], 双星并合后生成不同类型的新致密天体^[68]发射的“并合后引力波”(Post-merger Gravitational Waves)具有多种特性, 针对它们的搜索发展出了特殊的方法^[59,67,69]。

本文主要介绍与双星并合引力波相关的多信使天文学。在稳定相位近似下^[70], 无自旋圆轨道双致密星绕转的频域波形为

$$\tilde{h}(f) = \sqrt{\frac{5}{24}}\pi^{-2/3}Q(\varphi)\frac{\mathcal{M}^{5/6}}{d_L}f^{-7/6} \times e^{-i\{\Psi(f)-2\pi f(t_c-\frac{\bar{\eta}(\alpha,\beta)^r}{c})-\phi_c\}} \quad (1)$$

使用 $c = G = 1$ 单位。我们定义质量为 $\mathcal{M} = M\eta^{3/5}$, 其中总质量记为 $M = m_1 + m_2$, 质量比为 $\eta = m_1m_2/M^2$, 双星质量分别为 m_1 和 m_2 , d_L 为光度距离。 $\Psi(f)$ 是引力波随频率变化的相位, 决定于系统的质量参数、自旋参数以及潮汐效应参数等更多体现波源物理性质的参数(具体函数关系请参见文献[32])。另外还有一个与频率有关的相位正比于并和时刻 t_c 与引力波到达某个坐标点和测器位置(\vec{r})的时间差。 Φ_c 是双星并合时的相位角。 $Q(\varphi)$ 取决于引力波探测器对于引力波的响应, 是4个角度的函数 $\varphi = (\alpha, \beta, \iota, \psi)$, 其中 α 和 β 是源的空间坐标, ι 和 ψ 分别是双星轨道平面

相对视线方向倾角和极化角.

更多详细的引力波波形, 例如非圆轨道、考虑双星的自旋等复杂情况可以参见文献[71, 72]. 双致密星并合后的黑洞的发射铃宿信号, 根据无毛定理, 这个信号只决定于最终黑洞的质量和自旋 [73]. 目前人们使用匹配滤波方法 [49, 70], 在贝叶斯参数估计数据处理框架下获取所有参数的信息 [31].

值得指出的是, 引力波的这些参数对于多信使天文学不同的问题来说, 不是平权的. 如果我们只关心电磁对应体的触发盲搜索或者离线搜索, 那么引力波到达时刻 t_c 是最重要的. 如果在线及时搜索电磁对应体, 那么我们可能还需要空间坐标 $\{\alpha, \beta\}$ 和位置 d_L . 本文把 $\{t_c, \alpha, \beta, d_L\}$ 称为“联合探测参数”, 其他参数称为“内秉物理参数”. 几个引力波低延迟探测流水线都可以非常迅速地获取“联合探测参数”的信息 [74–77], 而不依赖于复杂而耗时的贝叶斯参数估计方法对于所有参数的获取. 一些物理问题也可以只依赖于这些“联合探测参数”的确定, 例如多信使信号对于弱等效原理的检测就仅仅利用了引力波与短伽玛暴的到达地球的时间差(引力波方面仅仅使用 t_c) [22, 26, 78]. 当然, 如果需要探索更多引力波与电磁波所体现的内在物理联系, 那么就需要精确地知道更多“内秉物理参数”的信息. 例如利用引力波测量到的中子星质量联合星族合成模型, 人们就可以推断双中子星的前身星系统的“超新星踢”(SN kicks), 前身星质量, 前-超新星半长轴等性质 [24], 结合中子星状态方程可以推断动力学抛射物 [27] 等(具体理论介绍请参见本专题双星演化“双致密星引力波源的形成” [79], 与电磁对应体理论“引力波事件GW170817 的电磁对应体” [30]). 下一节我们将从数据处理需求出发, 介绍多信使联合探测和联合探索波源物理性质这两类问题的基本框架, 以及此框架在天体物理学中的几个应用. 具体细节请参见文献[52, 53, 80].

3 多信使联合观测

引力波多信使天文学基本上涉及三类观测: 引力波与其电磁波(或中微子)对应体、宿主星系; 涉及回答两类基本问题: 引力波与其对应体是否是统

一物理起源? 引力波与电磁波对应体及其宿主星系的共同观测可以对哪些问题有更好的理解? 确定一个引力波信号和其电磁波信号对应体的位置将会提供联合两类观测的首要信息. 对于用电磁波跟踪观测引力波事件的研究来说, 引力波源定位的准确度和精度直接影响电磁波望远镜的搜索效率. 引力波干涉仪探测器对天空中几乎所有位置的信号都响应, 这带来的后果是我们很难靠单个探测器确定引力波源的方位. 通过分析引力波信号到达地面上不同位置处探测器的时间, 联合探测器组成网络可以提高引力波源的定位能力 [31, 81–83]. 然而地球的尺度限制了这项技术的能力: 计划中的探测器网络也只能把引力波源定位在数十平方度之内 [54]. 于是, 我们面临着一个重要的问题: 引力波波源在哪里? 传统天文学能帮助我们克服这个问题. 首先, 剧烈天体演化过程在发射引力波的同时往往也发射电磁辐射. 比如两个中子星并合过程除去发射引力波, 并合后会发射伽玛射线、X射线、可见光等电磁波 [84, 85]. 如果我们探测到伴随着引力波信号的电磁波信号, 那么有着良好空间定位能力的电磁波望远镜(从光学到伽玛射线探测器)将大大提高波源的定位能力. 另外, 几乎所有的天体都被认为在星系里面. 如果我们能看到引力波波源的宿主星系, 那么我们也就更好的确定引力波源的位置 [53, 86, 87].

除去相互印证共同起源, 联合观测更重要的在于对引力波源及其电磁波对应体、宿主星系进行更多角度、更深层次的理解, 从而大大提高各类数据的科学应用价值. 引力波波源及其电磁波对应体的物理性质需要经过参数估计, 特别是对于“内秉物理参数”的估计来获取. 对于引力波探测来说, 参数估计是估计观测到的引力波信号特征(振幅、波形等), 并且把这些特征和产生引力波波源的天体物理特征(前身星的质量、自旋、空间位置等)及其引力波产生机制联系起来. 需要指出的是, 很多引力波产生机制涉及很多天文学、物理学基础问题(例如中子星r模不稳定性, 广义相对论框架下的两体问题等)还没有被很好的理解, 一些电磁波和引力波产生机制模型的一些参数也是兼并的(例如大质量恒星的核塌缩被认为会产生长伽玛暴, Ib/c型超新星和引力波). 多信使观测, 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.例如,电磁波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(例如文献[88]).另外,电磁波观测可以得到红移测量,这将打破引力波参数估计中质量-红移简并^[19].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波对应体绝对光度和喷流张角所必须的信息(例如文献[52,89]).

上述问题可以用一个引力波多信使观测大三角来描述^[80].如图1所示,首先,如果相互印证共同起源,那么引力波源及其电磁波对应体、宿主星系就必须具有相同的共同参数,例如空间位置.更深层的物理取决于每两类天体之间的联系.比如在引力波-电磁波对应体的一个清楚的物理联系就是双中子星并合提供了引力波与电磁波的能量源.与电磁波宿主星系(例如文献[90-92])已经有了很好的研究不同,目前仅仅观测到一个引力波源的宿主星系^[3],引力波宿主星系的更多性质将是未来更多引力波事件被发现后,在群族性质方向重要的课题(参见第4节).在这个观测大三角的图景下,我们需要一个数学方法来获取共同参数的信息以实现联合探测,获取其他有内秉联系的物理参数以探究二者之间物理联系.

基于上述目标,我们在贝叶斯概率理论框架下,

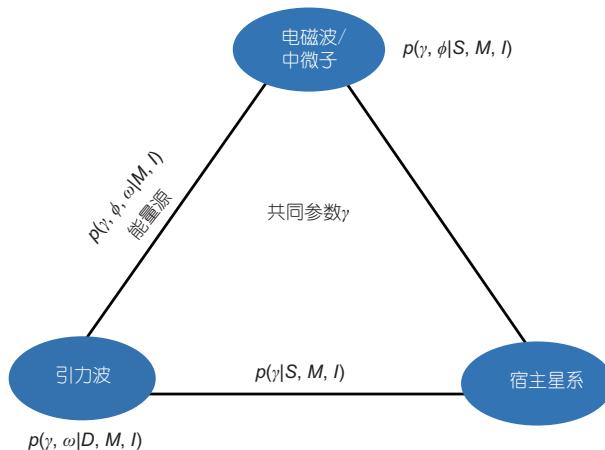


图1 (网络版彩图) 引力波多信使观测大三角

Figure 1 (Color online) Multi-messenger observational triangle.

提出了一个联合两个独立观测量来限制理论参数的贝叶斯多信使数据处理基本框架^[52,53].对于电磁波数据 \mathbf{S} ,和引力波数据 \mathbf{D} ,我们把参数集合分为三部分:电磁波和引力波共同有的参数集合为 γ ,电磁波和引力波分别独有的参数集合为 ϕ 和 ω .我们的目标是在所有参数 $\theta = (\gamma, \phi, \omega)$ 先验知识 $p(\gamma, \omega, \phi | I)$ 的基础上,利用最新的电磁波数据 \mathbf{S} 和引力波数据 \mathbf{D} 获取所有参数 θ 的后验估计 $p(\theta | \mathbf{S}, \mathbf{D}, I)$.其他的信息,包括模型信息包含在 I 中.用贝叶斯理论描述这个问题:

$$p(\theta | \mathbf{S}, \mathbf{D}, I) = \frac{p(\gamma, \omega, \phi | I) p(\mathbf{D} | \gamma, \omega, I) p(\mathbf{S} | \gamma, \phi, I)}{p(\mathbf{S}, \mathbf{D} | I)}. \quad (2)$$

可以看到,联合似然函数可分解为独立的电磁波似然函数 $p(\mathbf{S} | \gamma, \phi, I)$ 和引力波似然函数 $p(\mathbf{D} | \gamma, \omega, I)$ 的乘积.电磁波和引力波似然函数分别只依赖于它们各自独有的参数集合和共同参数集合.针对不同的问题,我们可以边缘化其他参数,只保留我们感兴趣参数的信息.

目前,引力波和电磁波的数据处理是分别进行的,按照公式(2)重新进行联合数据处理十分困难而且没有必要.最方便的联合处理数据方式是直接利用引力波和电磁波已经分别经过各自数据处理后得到的结果.引力波数据处理的结果是引力波参数的后验概率.而不同电磁波数据处理的方式十分不同,有的使用贝叶斯方法提供参数的后验概率,有的仅仅提供最大似然估计.因此针对不同的问题,应该把公式(2)按照不同的方式展开.需要特别注意是,引力波数据处理给出的参数后验概率已经包含了共同参数和引力波独有参数的先验概率 $p(\gamma, \omega | I)$,因此在进行联合数据分析的时候必须确保共同参数的先验概率 $p(\gamma | I)$ 只使用一次.

双星并合引力波数据处理的结果是引力波参数后验概率(参见文献[31]).在此后验概率的基础上,我们简介两个联合电磁波-引力波联数据,分别获取共同参数、电磁波独有参数的例子.

3.1 引力波-宿主星系

引力波定位问题是贝叶斯多信使数据处理基本框架第一个应用例子:两个独立观测量为

引力波数据和星系列表, 共同的参数就是引力波源和其宿主星系的空间位置和距离. 引力波对于空间定位的估计非常不精确, 借助星系列表十分有助于确定引力波宿主星系. 在这个问题中我们不关心电磁波(星系)的独有参数 ϕ , 而仅仅利用电磁波(星系)的观测数据 S 与模型 M 对于共同参数 γ 的估计信息(“多信使先验函数”, 见下文), 因此我们把问题简化为

$$\begin{aligned} & p(\gamma, \omega | D, S, M, I) \\ = & \frac{p(D|I)p(\gamma, \omega | D, M, I)p(\gamma | S, M, I)}{p(D|S, M, I)p(\gamma | I)}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $p(\gamma, \omega | D, M, I)$ 是引力波数据处理给出的引力波参数的后验概率. M 是我们的模型, 通过我们称之为“多信使先验函数” $p(\gamma | S, M, I)$ 对宿主星系的确定产生影响. 可以看到分母上的共同参数的先验概率 $p(\gamma | I)$ 确保了我们可以直接使用引力波参数的后验概率 $p(\gamma, \omega | D, M, I)$.

“多信使先验函数” $p(\gamma | S, M, I)$ 包含了我们对于引力波宿主星系的理解. 首先, 我们可以假定引力波源在星系中. 这个模型假设与星系列表的完备性一起决定了我们对于共同位置参数的初步估计. 如果星系列表是完备的, 那么我们就认为引力波源不在这些星系中的概率为零. 电磁对映体的搜索就只需要关注星系列表的星系就可以了. 接下来的问题就是哪一个星系更有可能是宿主星系. 这需要通过引入另外的只跟星系列表有关的参数. 最明显的参数可能就是星系光度, 因为星系的光度与星系质量相关度很高(例如文献[93]), 而越大质量的星系具有引力波源的数量就越多, 因此也更可能是宿主星系. 除去这些, 我们可以根据星系演化和星族合成理论考虑更多因素来设定一个引力波源出现在某个星系的可能性, 例如星系的形态和金属丰度. 最后, 在宇宙学距离上的引力波源会调整我们上述假设, 在那种情况下, 我们必须考虑引力波天体源的演化效应(参见本专题中双星系统演化“双致密星引力波源的形成”^[79]).

特别需要指出公式(3)的一个优势: 想使用更为物理和复杂的“多信使先验函数” $p(\gamma | S, M, I)$, 我们不需要重新处理引力波数据, 这是因为上面关于“多

信使先验函数”的讨论没有涉及引力波观测. 我们只需要更新 $p(\gamma | S, M, I)$ 然后乘以引力波对于共同参数的后验概率 $p(\gamma, \omega | D, M, I)$ 就可以更新多信使对于共同参数以及引力波独有参数的认知.

在只考虑星系B波段光度和星系列表完备性的情况下, 8000个对于第二代探测器网络来说探测概率最大的中子星对并合发射的引力波信号的数值模拟结果显示: (1) 我们可以~ 99% 的确定某些引力波源的宿主星系, 其空间位置和距离也就随之确定; (2) 然而对于大部分第二代探测器网络可观测的双星引力波源来说(~平均光度距离200 Mpc), 目前的星系列表(主要为Gravitational Wave Galaxy Catalog^[94])完全不能满足电磁对映体搜索的需求, 我们必须建立一个新的全天、更深的星系列表以满足即将到来的引力波天文学时代的需求. 目前几个适用于引力波电磁对应体搜索的星系列表正在建立(例如Galaxy List for the Advanced Detector Era (<http://aquarius.elte.hu/glade/index.html>))

如果我们能确定宿主星系就在星系列表中, 那么宿主星系候选体的距离分布能提高引力波源光度距离 d_L 这个引力波独有参数的估计精度, 这有助于打破引力波数据处理中“光度距离 d_L -视向夹角 ι ”这对简并参数, 提高对于引力波独有参数的限制. 在数学上, 就是公式(3)里面的共同参数 γ 边缘化:

$$\begin{aligned} p(\omega | D, S, M, I) = & \frac{p(D|I)}{p(D|S, M, I)} \\ & \times \int d\gamma \frac{p(\gamma, \omega | D, M, I)p(\gamma | S, M, I)}{p(\gamma | I)}, \end{aligned} \quad (4)$$

可以看到, 因为有电磁波对于 γ 的限制 $p(\gamma | S, M, I)$, 联合数据处理的结果不等于仅仅引力波参数后验概率 $p(\gamma, \omega | D, M, I)$ 对于 γ 的边缘化. ω 在这个例子中就是视向夹角 ι . 如图2所示, 联合每个宿主星系候选体的概率以及其位置信息后, 引力波源距离的后验概率分布在正确的注入位置处非常尖锐, 相应的视向夹角的后验概率分布变窄了许多.

这种引力波-星系联合观测的结果还可以被用于宇宙学中: 引力波宿主星系确定后, 我们就能利用光学望远镜观测到其红移. 这个红移和从引力

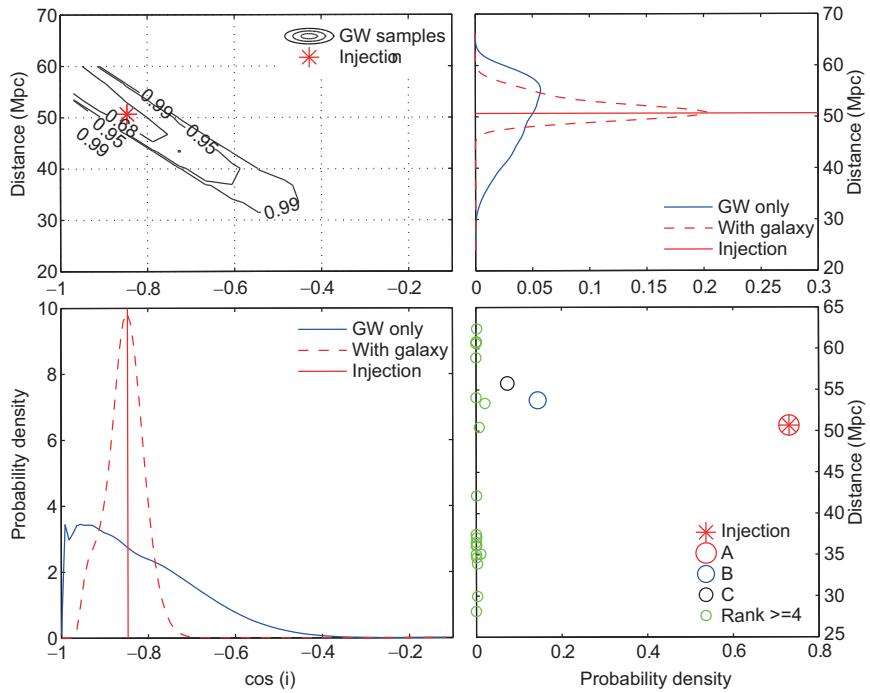


图 2 (网络版彩图)利用引力波宿主星系候选体信息打破“光度距离 d_L -视向夹角 i ”参数间简并. 来自于文献[53]

Figure 2 (Color online) An example showing the reduction in the degeneracy between distance and inclination angle i . From ref. [53].

波数据得到光度距离是利用“距离-红移关系”研究宇宙学问题的基本要素. 联合宿主星系候选体的红移以及引力波提供的光度距离可以估算哈勃常数 [19,95] (详情请见本专题“引力波标准汽笛与宇宙学” [96]). 我们提供的提高宿主星系候选体估计的方法可以减少上述方法的统计误差.

在大量引力波波源宿主星系被观测到后, 我们的贝叶斯引力波天文学框架还能回答另外一个更有趣的问题: 什么样的星系更可能是引力波波源的宿主星系? 在技术上, 我们可以通过贝叶斯模型选择方法来判断哪个具体的“多信使先验函数” $p(\gamma|S, M, I)$ 更加真实地反应数据. 在利用更多真实数据做这个分析之前, 我们可以探讨一下不同的“多信使先验函数” $p(\gamma|S, M, I)$ 假设会如何影响联合探测. 详细的“多信使先验函数”包含对于引力波、电磁对对应体、宿主星系的所有先验知识. 例如双星并合引力波-短伽玛暴的事件概率与星系的哪些物理量有关, 而这些物理量在不同的红移和环境中与哪些可观测量有关. 相关研究都刚刚开始. 目前大家比较确信双星并合引力波-短伽玛暴事件概

率正比于星系的年老星系星族的质量, 而K波段的光度比较好地表征年老星族的质量(例如文献[97]). 另外, 星系的形态和金属丰度对于双星并合引力波事件概率(例如文献[98–100])以及长伽玛暴(可能和引力波暴相关)的事件概率(例如文献[92])也有比较大的影响. 因为包含星系形态以及金属丰度的完备星系列表的缺失, 我们仅仅基于Updated Nearby Galaxy Catalog(只覆盖~ 10 Mpc 之内范围) [101]对于不同波段光度表征双中子星并合引力波事件概率的效果进行了测试. 我们发现基于K波段和B波段的设计的不同的“多信使先验函数”在选择引力波宿主星系上没有很大区别. 这意味着, 在寻找电磁对应体的时候, 我们可以不考虑星系颜色的区别, 这将大大简化不同波段的望远镜寻找同一个引力波事件的方法. 未来更远距离的引力波及其宿主星系数据可以检验这个结果.

3.2 引力波-短伽玛暴

目前估算短伽玛暴的光度主要需要探测到

短伽玛暴宿主星系对应的红移. 而被用来确定短伽玛暴宿主星系的短伽玛暴余辉的探测是非常困难的, 导致~ 30% 的宿主星系被确定(https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/)^[84]. 双中子星并合被认为是短伽玛暴的前身星. 双星并合引力波观测可以直接估计波源的光度距离和双星绕转轨道倾角, 这为估算短伽玛暴的能量提供了一个新的不依赖于宿主星系观测的探针. 在这个问题中, 电磁波(短伽玛暴)独有的参数 ϕ 可以包括短伽玛暴信号到达探测器时刻, 信号持续时间, 光谱参数, 喷流张角 θ_{jet} 等等. 需要注意的是, 如果假定双星并合过程系统的角动量方向不会改变, 那么喷流张角与视向角就有如下关系: 只要短伽玛暴和引力波信号被联合探测到, 那么喷流张角就一定要大于视向角. 早前的天文观测表明短伽玛暴是高度集束的, 例如 $5^\circ < \theta_{\text{jet}} < 30^\circ$ ^[84]. 利用这个喷流张角先验的信息以及喷流张角与视向角的关系(对应于公式(2)中的 $p(\gamma, \omega, \phi|I)$), 在联合数据的时候, 我们就能很好限制视向角从而打破引力波数据处理中“光度距离 d_L -视向夹角 ι ”这对简并参数^[52, 89, 102, 103], 为引力波-短伽玛暴系统提供更加精确的光度距离估计^[52]. 在假定电磁波独有的参数 ϕ 只包含喷流张角和内秉光度情况下, 我们就可以边缘化公式(2)中的其他参数, 获得不依赖于宿主星系观测的短伽玛暴的光度. 我们的结果^[52]显示引力波-短伽玛暴联合观测对于短伽玛暴光度的估计在两倍误差范围内和短伽玛暴-宿主星系结果一致.

以上联合多信使数据处理仅仅利用了引力波数据提供光度距离这个共同参数的信息. 理论研究表明, 并合双中子星并合后可能产生不同产物(黑洞或者大质量磁星), 从而对应不同的光学对应体(巨新星/并合新星(kilonova/Mergernova))(参见综述^[84, 84]). 不同的产物产生的引力波将会有所区别, 比如具有更多物理性质的大质量磁星会比由无毛定理限制的黑洞产生更为丰富的引力波波形细节. 对于这类问题的研究就需要利用引力波的独有参数的信息以及我们对于这些独有参数与电磁波信号独有参数之间关系的理论认知. 上面介绍的贝叶斯多信使框架公式(2)提供了一个研究这种引力波-电磁波多类数据联合分析的途径, 对于不同的问题,

我们只需赋予电磁波信号独有参数 ϕ 更多物理意义以及借助更多理论模型理解 $p(\gamma, \omega, \phi|I)$.

4 群族性质

伴随着第二代地面探测器网络的持续运行, 以及未来的第三代地面引力波探测器的实施, 越来越多的引力波、电磁对应体信号将使得我们可以探究引力波源群族(Population)信息. 例如我们可以利用并合双星中的中子星和黑洞的质量分布研究恒星演化的细节^[104, 105] (例如Binary Fraction), 黑洞自旋分布可以用来探究双黑洞系统形成机制^[106]. 更进一步, 更多的引力波与其电磁波对应体和他们的宿主星系的确定也可以让我们回答更广泛的天体物理学问题, 例如短伽玛暴/千新星是不是全部产生于双中子星并合, 短伽玛暴/千新星的光度函数, 双中子星并合后直接变成黑洞还是存在稳定大质量磁星阶段, 是不是所有的双黑洞系统都存在于低金属丰度区域, 双中子星并合过程对于星系重金属丰度的贡献等等. 以上问题都需要联合单个观测证据与群族之间的性质. 另外, 利用一些参数化的群族性质还可能提高引力波信号的探测概率, 并且提供研究深层物理机制的线索. 例如脉冲星群族的椭率分布信息就可能提高连续引力波的探测概率以及限制中子星的状态方程^[33], 利用群族双致密星并合信号的集合(Stacking), 可以提取黑洞铃宿高阶模^[107]、中子星潮汐效应参数^[108]. 在贝叶斯数据处理框架里, 这些群族信息可以被超参数描述. 这类研究都在进行中.

事实上, 某些最基本的群组信息可以通过联合探测事件率就可以获得. 例如利用某段时间内探测到双中子星并合引力波和短伽玛暴的个数这类探测信息就可以获得关于短伽玛暴群组张角的基本信息^[103, 109, 110]. 如果宇宙中短伽玛暴的张角 θ_{jet} 符合一定的分布, 那么观测到的短伽玛暴事件率 R_{grb} 和双中子星并合事件率 R_{gw} 之间就有如下关系:

$$R_{\text{grb}} = \epsilon <(1 - \cos \theta_{\text{jet}})> R_{\text{gw}}, \quad (5)$$

其中方括号代表张角的群组平均值, ϵ 是双中子星并合产生短伽玛暴的效率. 因此根据观测事件概率, 我

们就可以获取张角 θ_{jet} 和 ϵ 的信息. 目前 ϵ 是非常不确定的, 可以利用贝叶斯方法把它边缘化后得到我们关心的张角信息 [110].

5 结论

引力波多信使天文学时代刚刚拉开序幕, 越来越多的引力波、电磁对应体及其宿主星系的探测将

会更新我们对于物理学、天文学、宇宙学许多问题的认识. 贝叶斯理论提供了一个理解这些问题的数据处理框架. 我们相信未来利用贝叶斯理论分析的引力波多信使数据可以提供在中子星状态方程、超新星爆发机制、脉冲星不稳定机制、致密星演化过程、星系形成与演化、宇宙演化历史以及检验广义相对论等方面的新启示. 我们期待未知引力波信号的发现所展示的宇宙新图景.

致谢 感谢审稿人对本文提出的修改意见.

参考文献

- 1 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
- 2 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
- 3 Keenan R P, Oey M S, Jaskot A E, et al. Haro 11: Where is the lyman continuum source? *Astrophys J*, 2017, 848: 12
- 4 Evans P A, Fridriksson J K, Gehrels N, et al. Swift follow-up observations of candidate gravitational-wave transient events. *Astrophys J Suppl Ser*, 2012, 203: 28
- 5 Kanner J, Camp J, Racusin J, et al. Seeking counterparts to advanced ligo/virgo transients with swift. *Astrophys J*, 2012, 759: 22
- 6 Aasi J, Abadie J, Abbott B P, et al. Search for long-lived gravitational-wave transients coincident with long gamma-ray bursts. *Phys Rev D*, 2013, 88: 122004
- 7 Blackburn L, Briggs M S, Camp J, et al. Techniques for targeted Fermi-GBM follow-up of gravitational-wave events. ArXiv: [1303.2174](https://arxiv.org/abs/1303.2174)
- 8 Abadie J, Abbott B P, Abbott R, et al. Search for gravitational waves associated with gamma-ray bursts during LIGO science run 6 and virgo science runs 2 and 3. *Astrophys J*, 2012, 760: 12
- 9 Abbott B P, Abbott R, Acernese F, et al. Search for gravitational-wave bursts associated with gamma-ray bursts using data from LIGO science run 5 and Virgo science run 1. *Astrophys J*, 2010, 715: 1438–1452
- 10 Aasi J, Abadie J, Abbott B P, et al. First searches for optical counterparts to gravitational-wave candidate events. *Astrophys J Suppl Ser*, 2014, 211: 7
- 11 Abadie J, Abbott B P, Abbott R, et al. Implementation and testing of the first prompt search for gravitational wave transients with electromagnetic counterparts. *Astron Astrophys*, 2012, 539: A124
- 12 Bartos I, Finley C, Corsi A, et al. Observational constraints on multimessenger sources of gravitational waves and high-energy neutrinos. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 251101
- 13 Ando S, Baret B, Bartos I, et al. Colloquium: Multimessenger astronomy with gravitational waves and high-energy neutrinos. *Rev Mod Phys*, 2013, 85: 1401–1420
- 14 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. First targeted search for gravitational-wave bursts from core-collapse supernovae in data of first-generation laser interferometer detectors. *Phys Rev D*, 2016, 94: 102001
- 15 Kobayashi S, Meszaros P. Gravitational radiation from gamma-ray burst progenitors. *Astrophys J*, 2003, 589: 861–870
- 16 Yokozawa T, Asano M, Kayano T, et al. Probing the rotation of core-collapse supernova with a concurrent analysis of gravitational waves and neutrinos. *Astrophys J*, 2015, 811: 86
- 17 Clark J, Heng I S, Pitkin M, et al. Evidence-based search method for gravitational waves from neutron star ring-downs. *Phys Rev D*, 2007, 76: 043003
- 18 Hayama K, Desai S, Mohanty S D, et al. Searches for gravitational waves associated with pulsar glitches using a coherent network algorithm. *Class Quantum Grav*, 2008, 25: 184016
- 19 Schutz B F. Determining the Hubble constant from gravitational wave observations. *Nature*, 1986, 323: 310–311
- 20 Biesiada M. Gravity waves, gamma-ray bursts and the Hubble constant. *Mon Not R Astron Soc*, 1996, 283: 977–982

- 21 Yunes N, O'Shaughnessy R, Owen B J, et al. Testing gravitational parity violation with coincident gravitational waves and short gamma-ray bursts. *Phys Rev D*, 2010, 82: 064017
- 22 Wu X F, Gao H, Wei J J, et al. Testing Einstein's weak equivalence principle with gravitational waves. *Phys Rev D*, 2016, 94: 024061
- 23 Shao L, Sennett N, Buonanno A, et al. Constraining nonperturbative strong-field effects in scalar-tensor gravity by combining pulsar timing and laser-interferometer gravitational-wave detectors. *Phys Rev X*, 2017, 7: 041025
- 24 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. On the progenitor of binary neutron star merger GW170817. *Astrophys J*, 2017, 850: L40
- 25 Rodríguez-Kamenetzky A, Carrasco-González C, Araudo A, et al. The highly collimated radio jet of hh 80-81: Structure and nonthermal emission. *Astrophys J*, 2017, 851: 16
- 26 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 848: L13
- 27 Toriumi S, Takasao S. Numerical simulations of flare-productive active regions: δ -sunspots, sheared polarity inversion lines, energy storage, and predictions. *Astrophys J*, 2017, 850: 39
- 28 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. *Nature*, 2017, 551: 85–88
- 29 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Implications for the stochastic gravitational-wave background from compact binary coalescences. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 091101
- 30 Geng J J, Xiao D, Wang S Q, et al. Electromagnetic counterparts to the gravitational wave event GW170817 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 079802 [耿金军, 肖笛, 王善钦, 等. 引力波事件GW170817的电磁对应体. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 079802]
- 31 Veitch J, Vecchio A. Bayesian coherent analysis of in-spiral gravitational wave signals with a detector network. *Phys Rev D*, 2010, 81: 062003
- 32 Agathos M, Meidam J, Del Pozzo W, et al. Constraining the neutron star equation of state with gravitational wave signals from coalescing binary neutron stars. *Phys Rev D*, 2015, 92: 023012
- 33 Fan X, Chen Y, Messenger C. Method to detect gravitational waves from an ensemble of known pulsars. *Phys Rev D*, 2016, 94: 084029
- 34 Pitkin M. Prospects of observing continuous gravitational waves from known pulsars. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415: 1849–1863
- 35 Prix R, Krishnan B. Targeted search for continuous gravitational waves: Bayesian versus maximum-likelihood statistics. *Class Quantum Grav*, 2009, 26: 204013
- 36 Lynch R, Vitale S, Essick R, et al. Information-theoretic approach to the gravitational-wave burst detection problem. *Phys Rev D*, 2017, 95: 104046
- 37 Mandic V, Thrane E, Giampaolis S, et al. Parameter estimation in searches for the stochastic gravitational-wave background. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 171102
- 38 Romano J D, Cornish N J. Detection methods for stochastic gravitational-wave backgrounds: A unified treatment. *Living Rev Relativ*, 2017, 20: 2
- 39 Logue J, Ott C D, Heng I S, et al. Inferring core-collapse supernova physics with gravitational waves. *Phys Rev D*, 2012, 86: 044023
- 40 Del Pozzo W, Veitch J, Vecchio A. Testing general relativity using Bayesian model selection: Applications to observations of gravitational waves from compact binary systems. *Phys Rev D*, 2011, 83: 082002
- 41 Littenberg T B, Cornish N J. Bayesian inference for spectral estimation of gravitational wave detector noise. *Phys Rev D*, 2015, 91: 084034
- 42 Press W H, Thorne K S. Gravitational-wave astronomy. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1972, 10: 335–374
- 43 Sathyaprakash B S, Schutz B F. Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves. *Living Rev Relativ*, 2009, 12: 2
- 44 Berti E, Barausse E, Cardoso V, et al. Testing general relativity with present and future astrophysical observations. *Class Quantum Grav*, 2015, 32: 243001
- 45 Cai R G, Cao Z, Guo Z K, et al. The gravitational-wave physics. *Natl Sci Rev*, 2017, 4: 687–706
- 46 Chassande-Mottin E, Hendry M, Sutton P J, et al. Multimessenger astronomy with the Einstein Telescope. *Gen Relativ Gravit*, 2011, 43: 437–464
- 47 Andersson N, Baker J, Belczynski K, et al. The transient gravitational-wave sky. *Class Quantum Grav*, 2013, 30: 193002
- 48 Fan X, Hendry M. Multimessenger astronomy. ArXiv: [1509.06022](#)
- 49 Jaranowski P, Królak A. Gravitational-wave data analysis. Formalism and sample applications: The Gaussian case. *Living Rev Relativ*, 2012, 15: 4
- 50 Blackburn L, Briggs M S, Camp J, et al. High-energy electromagnetic offline follow-up of Ligo-Virgo gravitational-wave binary coalescence candidate events. *Astrophys J Suppl Ser*, 2015, 217: 8
- 51 Zhu X J, Thrane E, Osłowski S, et al. Inferring the population properties of binary neutron stars with gravitational-wave measurements of spin. ArXiv: [1711.09226](#)
- 52 Fan X, Messenger C, Heng I S. Probing intrinsic properties of short gamma-ray bursts with gravitational waves. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 181102

- 53 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
- 54 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with advanced LIGO and advanced Virgo. *Living Rev Relativ*, 2016, 19: 1
- 55 Thorne K S. Gravitational Radiation. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 330–458
- 56 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. First search for gravitational waves from known pulsars with advanced LIGO. *Astrophys J*, 2017, 839: 12
- 57 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. All-sky search for short gravitational-wave bursts in the first advanced LIGO run. *Phys Rev D*, 2017, 95: 042003
- 58 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
- 59 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. All-sky search for long-duration gravitational wave transients in the first Advanced LIGO observing run. *Class Quantum Grav*, 2018, 35: 065009
- 60 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. All-sky search for periodic gravitational waves in the O1 LIGO data. *Phys Rev D*, 2017, 96: 062002
- 61 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Upper limits on the stochastic gravitational-wave background from advanced LIGO's first observing run. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 121101
- 62 Postnov K A, Yungelson L R. The evolution of compact binary star systems. *Living Rev Relativ*, 2014, 17: 3
- 63 Zimmermann M, Szedenits E. Gravitational waves from rotating and precessing rigid bodies—Simple models and applications to pulsars. *Phys Rev D*, 1979, 20: 351–355
- 64 Fryer C L, New K C B. Gravitational waves from gravitational collapse. *Living Rev Relativ*, 2011, 14: 1
- 65 Regimbau T, Mandic V. Astrophysical sources of a stochastic gravitational-wave background. *Class Quantum Grav*, 2008, 25: 184018
- 66 Maggiore M. Gravitational wave experiments and early universe cosmology. *Phys Rep*, 2000, 331: 283–367
- 67 Levin Y, van Hoven M. On the excitation of f modes and torsional modes by magnetar giant flares. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 418: 659–663
- 68 Metzger B D, Kilonovae. *Living Rev Relativ*, 2017, 20: 3
- 69 Keitel D. Robust semicoherent searches for continuous gravitational waves with noise and signal models including hours to days long transients. *Phys Rev D*, 2016, 93: 084024
- 70 Dhurandhar S V, Sathyaprakash B S. Choice of filters for the detection of gravitational waves from coalescing binaries. II. Detection in colored noise. *Phys Rev D*, 1994, 49: 1707–1722
- 71 Blanchet L. Gravitational radiation from post-Newtonian sources and inspiralling compact binaries. *Living Rev Relativ*, 2014, 17: 2
- 72 Arun K G, Iyer B R, Sathyaprakash B S, et al. Parameter estimation of inspiralling compact binaries using 3.5 post-Newtonian gravitational wave phasing: The nonspinning case. *Phys Rev D*, 2005, 71: 84008
- 73 Vishveshwara C V. Scattering of gravitational radiation by a Schwarzschild black-hole. *Nature*, 1970, 227: 936–938
- 74 Singer L P, Price L R. Rapid Bayesian position reconstruction for gravitational-wave transients. *Phys Rev D*, 2016, 93: 024013
- 75 Klimenko S, Vedovato G, Drago M, et al. Method for detection and reconstruction of gravitational wave transients with networks of advanced detectors. *Phys Rev D*, 2016, 93: 042004
- 76 Usman S A, Nitz A H, Harry I W, et al. The PyCBC search for gravitational waves from compact binary coalescence. *Class Quantum Grav*, 2016, 33: 215004
- 77 Cannon K, Cariou R, Chapman A, et al. Toward early-warning detection of gravitational waves from compact binary coalescence. *Astrophys J*, 2012, 748: 136
- 78 Wei J J, Zhang B B, Wu X F, et al. Multimessenger tests of the weak equivalence principle from GW170817 and its electromagnetic counterparts. *J Cosmol Astropart Phys*, 2017, 2017: 035–035
- 79 Chen X F, Li Y, Han Z W. The formation of double compact objects as gravitational wave sources (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 079803 [陈雪飞, 李焱, 韩占文. 双致密星引力波源的形成. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 079803]
- 80 Fan X, Messenger C, Heng I S. Enhancing Gravitational Wave Astronomy with Galaxy Catalogues. In: *Astrophysics and Space Science Proceedings, Gravitational Wave Astrophysics*. Cham: Springer, 2015. 40: 35
- 81 Wen L, Fan X, Chen Y. Geometrical expression of the angular resolution of a network of gravitational-wave detectors and improved localization methods. *J Phys-Conf Ser*, 2008, 122: 012038
- 82 Wen L, Chen Y. Geometrical expression for the angular resolution of a network of gravitational-wave detectors. *Phys Rev D*, 2010, 81: 082001
- 83 Fairhurst S. Source localization with an advanced gravitational wave detector network. *Class Quantum Grav*, 2011, 28: 105021
- 84 Metzger B D, Berger E. What is the most promising electromagnetic counterpart of a neutron star binary merger? *Astrophys J*, 2012, 746: 48

- 85 Gao H, Zhang B, Wu X F, et al. Possible high-energy neutrino and photon signals from gravitational wave bursts due to double neutron star mergers. *Phys Rev D*, 2013, 88: 043010
- 86 Nuttall L K, Sutton P J. Identifying the host galaxy of gravitational wave signals. *Phys Rev D*, 2010, 82: 102002
- 87 Hanna C, Mandel I, Vossen W. Utility of galaxy catalogs for following up gravitational waves from binary neutron star mergers with wide-field telescopes. *Astrophys J*, 2014, 784: 8
- 88 Harry I W, Fairhurst S. Targeted coherent search for gravitational waves from compact binary coalescences. *Phys Rev D*, 2011, 83: 084002
- 89 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
- 90 Fong W, Berger E, Chornock R, et al. Demographics of the galaxies hosting short-duration gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2013, 769: 56
- 91 Fynbo J P U, Malesani D, Jakobsson P. Long gamma-ray burst host galaxies and their environments. ArXiv: [1301.4908](#)
- 92 Fan X L, Yin J, Matteucci F. The nature of long-GRB host galaxies from chemical abundances. *Astron Astrophys*, 2010, 521: A73
- 93 Courteau S, Cappellari M, de Jong R S, et al. Galaxy masses. *Rev Mod Phys*, 2014, 86: 47–119
- 94 White D J, Daw E J, Dhillon V S. A list of galaxies for gravitational wave searches. *Class Quantum Grav*, 2011, 28: 085016
- 95 Del Pozzo W. Inference of cosmological parameters from gravitational waves: Applications to second generation interferometers. *Phys Rev D*, 2012, 86: 043011
- 96 Zhao W. Gravitational-wave standard siren and cosmology (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 079805 [赵文. 引力波标准汽笛与宇宙学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 079805]
- 97 Maraston C. Evolutionary synthesis of stellar populations: A modular tool. *Mon Not R Astron Soc*, 1998, 300: 872–892
- 98 Belczynski K, Dominik M, Bulik T, et al. The effect of metallicity on the detection prospects for gravitational waves. *Astrophys J*, 2010, 715: L138–L141
- 99 Fryer C L, Belczynski K, Wiktorowicz G, et al. Compact remnant mass function: Dependence on the explosion mechanism and metallicity. *Astrophys J*, 2012, 749: 91
- 100 O’Shaughnessy R, Kalogera V, Belczynski K. Binary compact object coalescence rates: The role of elliptical galaxies. *Astrophys J*, 2010, 716: 615–633
- 101 Karachentsev I D, Makarov D I, Kaisina E I. Updated nearby galaxy catalog. *Astron J*, 2013, 145: 101
- 102 Seto N. Prospects of LIGO for constraining inclination of merging compact binaries associated with three-dimensionally localized short-hard GRBs. *Phys Rev D*, 2007, 75: 024016
- 103 Chen H Y, Holz D E. Gamma-ray-burst beaming and gravitational-wave observations. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 181101
- 104 O’Shaughnessy R. Data-driven methods to explore a large space of computationally costly compact binary progenitor models. *Phys Rev D*, 2013, 88: 084061
- 105 Stevenson S, Ohme F, Fairhurst S. Distinguishing compact binary population synthesis models using gravitational wave observations of coalescing binary black holes. *Astrophys J*, 2015, 810: 58
- 106 Farr W M, Stevenson S, Miller M C, et al. Distinguishing spin-aligned and isotropic black hole populations with gravitational waves. *Nature*, 2017, 548: 426–429
- 107 Yang H, Yagi K, Blackman J, et al. Black hole spectroscopy with coherent mode stacking. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 161101
- 108 Yang H, Paschalidis V, Yagi K, et al. Gravitational wave spectroscopy of binary neutron star merger remnants with mode stacking. *Phys Rev D*, 2018, 97: 024049
- 109 Clark J, Evans H, Fairhurst S, et al. Prospects for joint gravitational wave and short gamma-ray burst observations. *Astrophys J*, 2015, 809: 53
- 110 Williams D, Clark J A, Williamson A R, et al. Constraints on short, hard gamma-ray burst beaming angles from gravitational wave observations. *Astrophys J*, 2018, 858: 79

Bayesian approach to gravitational wave multi-messenger astronomy

FAN XiLong^{*}

Department of Physics and Mechanical Electrical Engineering, Hubei University Of Education, Wuhan 430205, China

The detection of gravitational waves from black hole binary mergers, gravitational waves from binary neutron star mergers, its counterparts and host galaxy open the new ear of gravitational wave multi-messenger astronomy. We briefly introduce the role of joint observations of gravitational waves, electromagnetic observations, host galaxies in studies of higher detection efficiency, better characterisation of the signal progenitor, richer interpretation of source population properties. We summarise a Bayesian approach to multi-messenger astronomy for above topics and its applications of joint observations of gravitational waves-short gamma-ray burst, gravitational waves-host galaxies.

gravitational waves, gamma-ray burst, galaxy

PACS: 04.50.Kd, 04.30.Tv, 98.62.-g

doi: [10.1360/SSPMA2018-00102](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00102)