



引力波数据分析: 无模板搜索

许雨蒙^{1*}, 刘玉孝^{2,3}, 胡彬⁴, 王刚⁵

1. 苏黎世大学物理学院, 苏黎世 8057, 瑞士;

2. 兰州理论物理中心, 量子理论及应用基础教育部重点实验室, 甘肃省理论物理重点实验室, 兰州大学, 兰州 730000;

3. 兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000;

4. 北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875;

5. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

*联系人, E-mail: yumeng.xu@physik.uzh.ch

收稿日期: 2024-08-29; 接受日期: 2024-10-22; 网络出版日期: 2024-11-15

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203003, 2021YFC2203001)、国家自然科学基金(编号: 12247101, 12333001)和111计划(编号: B20063)资助项目

摘要 自2015年Advanced LIGO首次探测到双黑洞并合事件GW150914以来, 引力波天文学取得了快速发展. 截至第三阶段运行, 已成功探测到93个引力波事件. 随着引力波探测器的不断改进和新一代探测器的出现, 我们的宇宙观测能力将进一步拓宽. 本文以相干瞬态波管cWB为例, 探讨引力波无模板搜索的核心算法及事件置信度的计算, 并简要分析其在高离心率致密双星并合、核塌缩超新星、双曲轨道相遇、脉冲星自转突变、微引力透镜及引力波回声等各种引力波源中的应用. 最后, 本文展望机器学习在引力波无模板搜索中的未来应用, 以及模块化、Python化的PycWB搜索管线在未来空间引力波探测中的扩展.

关键词 引力波数据分析, 无模板搜索, 相干瞬态波

PACS: 04.30.Db, 04.30.Nk, 04.80.Nn, 95.75.Wx, 95.85.Sz

1 引言

2015年9月14日, Advanced LIGO地面激光干涉仪首次观测到源自双黑洞并合的引力波事件GW150914^[1], 标志着引力波天文学的开启. 自此之后, 引力波领域迎来了近十年的快速发展, 各种类型的引力波源相继被发现. 另一个里程碑发生在Advanced LIGO和Advanced Virgo的第二阶段运行(O2), 探测器网络在2017年8月17日观测到了双中子星并合引力波事件GW170817^[2]. 在这一并合事件中, 不止是该事件

产生的引力波被探测到, 其所产生的电磁对应体在伽马射线、X射线、紫外、光学、远红外和射电频段也被多个天文望远镜分别观测到, 成为目前为止最成功的多信使天文学事件. 多波段的观测也为测量引力波速度及其他物理量提供了前所未有的精度和约束. 在LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)的第三阶段运行(O3)中, GW190514^[3]的探测为我们提供了双黑洞合并形成中等质量黑洞(IMBH)的证据, 其中一个黑洞更是暗示了生对不稳定性超新星(PISN)质量间隙中存在黑洞的可能. 此外, GW200105和GW200115^[4]这两个事件

引用格式: 许雨蒙, 刘玉孝, 胡彬, 等. 引力波数据分析: 无模板搜索. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 230407

Xu Y M, Liu Y X, Hu B, et al. Gravitational wave data analysis: Unmodeled search (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 230407, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0361

证实了潜在黑洞和中子星合并的存在. 在O1到O3期间, LVK共探测到了93个引力波事件, 预计在O4期间将会发现3倍于O3的事件数量^[5,6]. 不断提高的引力波探测器灵敏度和下一代地面引力波探测器(如Einstein Telescope^[7]和Cosmic Explorer^[8])以及空间引力波探测器(如太极^[9]、天琴^[10]和LISA^[11])将不断扩展我们所能观测引力波的宇宙范围和波源频段. 未来可能发现的新类型的波源将会加深我们对宇宙学、基础物理和天体物理的理解.

与此同时, 更高的灵敏度和更大的频率范围也会带来新的挑战. 用引力波研究天体物理、宇宙学和引力理论的基础是在探测器数据中搜索微弱的引力波信号. 然而, 复杂、难以预测且非稳态的噪声对引力波信号的搜索带来了巨大的挑战. 因此, 我们需要高灵敏度和高可靠性的数据处理管线(Pipeline). 目前, 地基引力波探测对于双致密星并合信号的搜索方法分为基于模板的搜索(Modeled Search), 如PyCBC^[12-14], GstLAL^[15], MBTA^[16]和SPIIR^[17], 以及不依赖模板的搜索(Unmodeled Search), 如相干瞬态波(coherent WaveBurst, cWB)^[18]和BayesWave^[19]. 基于模板的搜索采用匹配滤波(Matched Filtering)方法, 将数据与引力波波形的模板库进行匹配并计算信噪比^[20]. 这种方法在处理已知波形模型的信号时效果显著. 然而, 目前仍有许多引力波源由于形成机制不明确或模拟困难, 没有准确的波形模板, 如超新星爆发、脉冲星自旋突变、双曲轨道相遇等; 抑或是像微引力透镜效应这样的在传播路径上产生的次级效应, 由于透镜体的空间分布的随机性, 几乎不可能精确建模^[21,22]. 即使对于致密双星并合, 虽然在大部分的参数空间已有非常精确的引力波计算模型, 但现有模型在处理高离心率($e > 0.3$)轨道绕转波源时仍存在不足^[23]. 因此, 不依赖模板的搜索方法在引力波数据分析中起着至关重要的补充作用.

同时, 一部分无模板搜索的引力波事件可能会伴随电磁信号, 如核塌缩超新星和脉冲星自转突变. 核塌缩超新星的电磁信号和中微子观测, 结合引力波数据, 能够揭示超新星爆发的细节和塌缩机制^[24]. 而脉冲星自转突变的引力波信号可以提供关于脉冲星内部结构和自转机制的信息^[25]. 此外, 在高离心率致密双星并合和双曲轨道相遇等事件中, 引力波的独特特征可以为双星系统的形成渠道提供新的证据^[26]. 无模板搜索

不仅将加深我们对这些天体物理过程的理解, 也将为多信使天文学研究开辟新的方向.

在无模板搜索中, cWB是最常用的数据处理管线之一. cWB算法在引力波天文学的发展中起到了重要作用. 它不依赖于特定的波形模型, 而是依赖于探测器网络中产生的相干能量来探测引力波信号. cWB在首例引力波信号GW150914探测中发挥了关键作用, 并在探测如GW190521这样瞬态(Transient)引力波爆信号中表现出色. cWB算法被LIGO-Virgo-KAGRA合作组广泛用于各种引力波瞬态搜索, 包括双黑洞并合、双中子星并合、核塌缩超新星、中等质量黑洞搜索, 以及其他短持续时间(小于1 s)和长持续时间(几秒到几百秒)的瞬态信号搜索.

本文在第2节将以cWB为例简要介绍其无模板搜索的核心算法. 在第3节中, 本文将引出引力波搜索中的两个重要概念: 背景估计和统计显著性. 第4节将讨论几种常见的无模板搜索的波源, 并给出当前搜索的进展. 第5节将介绍机器学习在无模板搜索中的应用, 第6节则展望未来无模板搜索的发展方向. 最后, 本文将进行总结与展望.

2 cWB搜索算法

cWB是通过引力波信号在不同探测器中的相干性来搜索引力波信号的工具, 因此cWB并不局限于已知的信号形态. cWB目前包括cWB2G和cWBXP两个版本. cWB2G基于Wilson-Daubechies-Meyer (WDM)小波变换及超额能量(Excess-Power)的像素选择方法^[27], cWBXP基于wavescan时频域变换算法及交叉能量(Cross-Power)的像素选择方法^[28]. 两者在核心算法上基本一致, 本文主要以cWB2G为例.

cWB等大部分无模板搜索算法的核心之一是时频域分析, 即将多个引力波探测器的时域信号投影到时频域中, 生成二维的时频域像素(Pixel)图. cWB搜索的核心流程如图1所示, 即通过时频域变换, 选择超过能量阈值的时频域像素, 并根据选择的参数对相近的像素进行聚类(Clustering)^[29]. 每个事件可以由多个聚类组成, 通过似然概率分析, 可以得到每个事件的一组统计参数, 包括cWB信噪比 ρ 、中心频率 f_0 和网络相关性 c_{cor} 等.

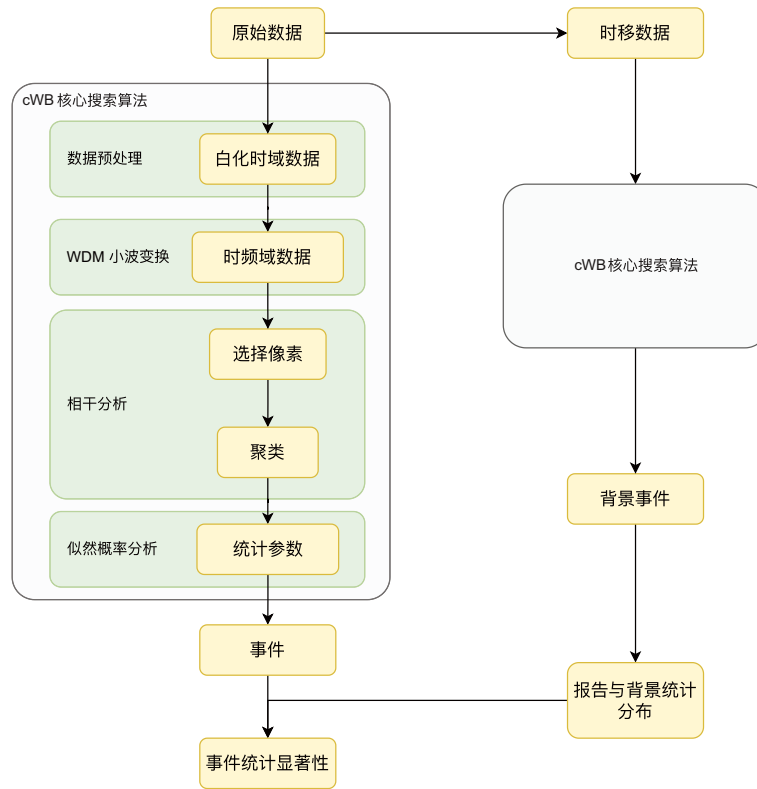


图 1 (网络版彩图) cWB搜索算法流程图. 左侧显示的是对零时移数据的搜索流程, 右侧则为对时移数据(背景数据)的搜索流程. 由于二者使用的核心算法相同, 右侧流程图中省略了具体的核心算法步骤. 通过对背景数据进行统计分析, 我们可以计算出原始数据中每个事件的统计显著性

Figure 1 (Color online) cWB search algorithm workflow. On the left side, it depicts the search process for zero-lag data, while on the right side, it shows the search process for time-shifted data (background). Since both searches utilize the same core algorithm, the detailed steps of the core algorithm are omitted in the right-side workflow. The statistical significance of each event can be determined from the distribution obtained from the background data.

2.1 WDM小波变换和时频域

WDM小波变换的基底是正交的, 其变换后的时频域信号遵循能量守恒, 其变换也是可逆的, 并且转换后的数据样本彼此独立. 这种特性让我们可以相对容易地使用聚类算法选择时频域像素, 并可以通过逆变换将选择的像素重构成时域信号, 以进行进一步分析. WDM变换的基函数在时间和频率上都是局部化的, 可以更准确地捕捉信号的时间-频率特征. WDM变换不仅有快速离散实现, 还能够在不增加额外计算成本的情况下提供信号的正交部分, 在需要快速准确地分析信号的幅度和相位信息的应用中有独特的优势. 同时, WDM还可以通过多分辨率分析, 提取信号的不同尺度上的特征, 适用于处理包含多尺度特征的信号, 如双黑洞并合.

图2展示了时域(上图)和时频域(下图)中的同一个双黑洞并合的引力波信号. 可以看到, 在时频域中, 引力波信号频率随时间的变化被清晰地展现出来. 随着两个黑洞逐渐靠近, 引力波信号的频率相应地增加, 且在并合阶段释放出大部分能量. 右侧图则展示了即使存在噪声的情况下, WDM在信号白化后依然能非常清晰地展现其频率和时间特征.

2.2 时频域像素选择和聚类

由于时频分析的测不准原理, 时间精确度和频率精确度不可能同时满足. 不同信号在时频域中有不同特征, 例如双黑洞并合的旋近阶段频率变化不大, 但是在时间尺度上更长, 因此具有较高时间分辨率的变换能更好地描绘信号的特征. 而在并合阶段,

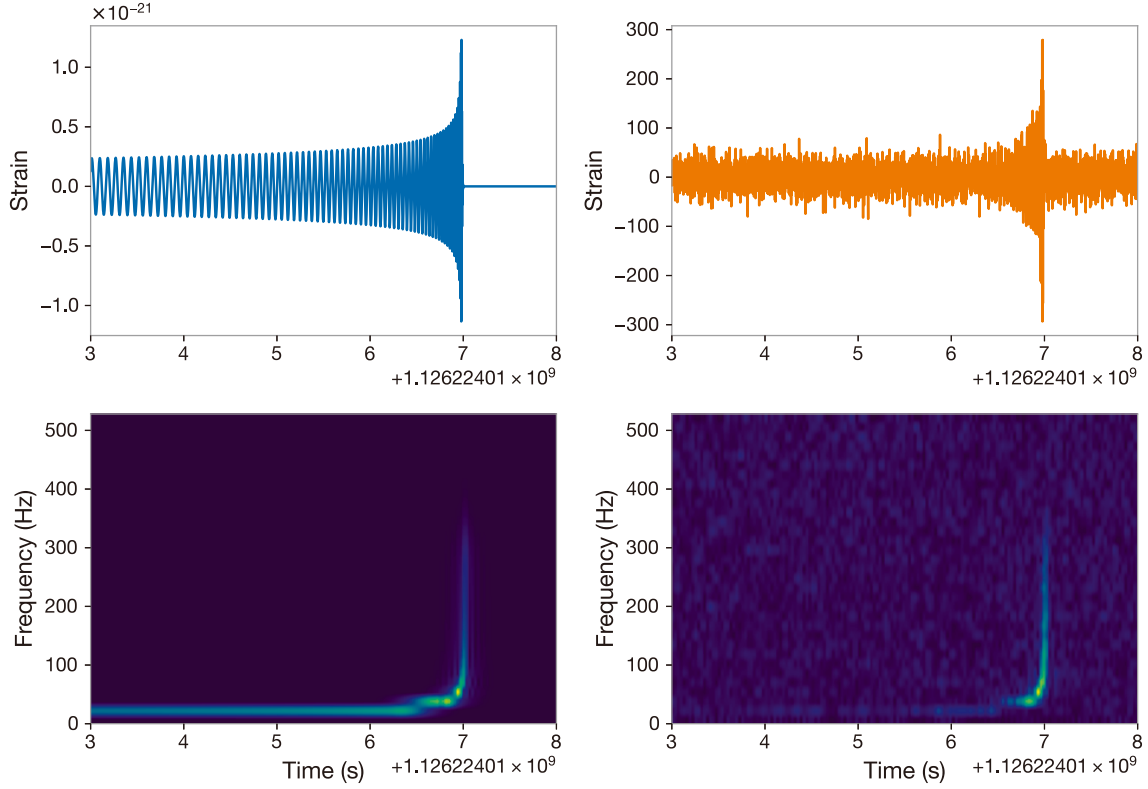


图 2 (网络版彩图)左侧的两个图显示了由两个质量均为 $30M_{\odot}$ 且无自旋无离心率的双黑洞并合所产生的引力波信号, 右侧图则是包含相同引力波信号和Advanced LIGO噪声的数据. 上图为时域波形和数据, 下图为对应的时频域图

Figure 2 (Color online) The panels on the left column display the gravitational wave signal generated by $30M_{\odot}$ - $30M_{\odot}$ binary black holes coalescence with zero spin and zero eccentricity, and the right panels show the same gravitational waves signal with the Advanced LIGO noise data. The top panels represent the waveform and data in the time domain, while the bottom panels depict the corresponding signal in the time-frequency domain.

时间非常短, 但是在频率上变化非常大, 因此选择具有更高频率分辨率的变换更好. 为了提取不同尺度的引力波信号特征, cWB采用了多分辨率分析(Multi-Resolution Analysis, MRA)方法, 即使用多种时域-频域分辨率的WDM小波变换将同一个信号转换为时频域信号.

将信号变换到时频域后, cWB将计算每个分辨率的能量阈值(Energy Threshold), 并挑选出高于此阈值的像素. 随后, cWB将根据设定的时间间隔(Tgap)及频率间隔(Fgap)对选择的像素进行聚类. 不同的间隔设置可以提高对不同信号的灵敏度, 例如长时(Long Duration)、高频(High Frequency)信号. 聚类过的像素簇会通过多层标准筛选, 包括像素簇总的探测器网络能量等, 以减少计算负担, 进而可分析更长时间的背景数据.

2.3 似然概率分析

被聚类的像素称为像素簇(Cluster). 我们需要对像素簇进行似然概率(Likelihood)分析, 以确定该像素簇是否为一个事件(Event/Trigger), 并获得该事件的诸多统计参数以进行统计排序. 似然概率 L 由以下公式定义:

$$L \equiv \ln \frac{P(\{\tilde{\mathbf{d}}\} | \{\tilde{\mathbf{h}}\})}{P(\{\tilde{\mathbf{d}}\} | \{0\})} = \frac{1}{2} \sum_k \left[|\tilde{\mathbf{d}}[k]|^2 - |\tilde{\mathbf{d}}[k] - \mathbf{F}[k]\tilde{\mathbf{h}}[k]|^2 \right], \quad (1)$$

其中, k 为像素簇中像素的序号, $\tilde{\mathbf{d}}$ 为白化后的单个像素在探测器网络中的数据, $\tilde{\mathbf{h}}$ 为白化后的单个像素中的引力波信号, $\mathbf{F}$ 为探测器网络响应的矩阵形式. 集合 $\{\tilde{\mathbf{d}}\}$ 与 $\{\tilde{\mathbf{h}}\}$ 为其对应的 N 个像素数据与引力波信号. 探测器

中的噪声 $\tilde{\mathbf{n}} = \tilde{\mathbf{d}} - \mathbf{F}\tilde{\mathbf{h}}$ 通常被假设为满足高斯分布, 因此, D 个探测器组成的网络中存在引力波信号 $\tilde{\mathbf{h}}$ 的概率可以表示为

$$P(\tilde{\mathbf{d}} | \tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} |\tilde{\mathbf{d}} - \mathbf{F}\tilde{\mathbf{h}}|^2 \right]. \quad (2)$$

$P(\{\tilde{\mathbf{d}}\}|\{0\})$ 为探测器数据中不存在引力波信号, 即 $\tilde{\mathbf{h}} = 0$ 的概率. 上述两个概率的比值描绘了在信号存在的假设下, 数据 $\tilde{\mathbf{d}}$ 中的“噪声”是否有更高的概率满足高斯分布.

在引力波探测器的数据中, 我们无法事先知晓数据的引力波信号 $\tilde{\mathbf{h}}$. 所以 cWB 采取寻找满足 $\left. \frac{\partial L}{\partial \tilde{\mathbf{h}}} \right|_{\tilde{\mathbf{h}}=\tilde{\mathbf{h}}_{\max}} = 0$ 的最大似然信号 $\tilde{\mathbf{h}}_{\max}$. 由式(1), 我们可以解出最大似然信号:

$$\tilde{\mathbf{h}}_{\max} = (\mathbf{F}^\dagger \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^\dagger \tilde{\mathbf{d}}. \quad (3)$$

我们可以用最大似然信号 $\tilde{\mathbf{h}}_{\max}$ 来定义探测器网络相干能量 E_{cor} :

$$E_{\text{cor}} \equiv 2L(\tilde{\mathbf{h}}_{\max}) = \sum_k \tilde{\mathbf{d}}^\dagger \mathbf{P}^{\text{GW}} \tilde{\mathbf{d}}, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{P}^{\text{GW}} \equiv \mathbf{F}(\mathbf{F}^\dagger \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^\dagger$ 为映射算符. 探测器所测量的总能量为

$$E_{\text{tot}} = \sum_k |\tilde{\mathbf{d}}|^2, \quad (5)$$

是一个非相干的物理量, 其只包含自相关项. 我们可以得到零流(Null Stream, 对应数据流 Data Stream)能量:

$$E_{\text{null}} \equiv E_{\text{tot}} - E_{\text{cor}} = \sum_k \tilde{\mathbf{d}}^\dagger \mathbf{P}^{\text{null}} \tilde{\mathbf{d}}, \quad (6)$$

其中, $\mathbf{P}^{\text{null}} \equiv \mathbf{I} - \mathbf{P}^{\text{GW}}$, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵. 由此, 我们可以进一步根据相干能量占总能量的比例定义相干系数:

$$c_{\text{cor}} = \frac{E_{\text{cor}}}{(|E_{\text{cor}}| + E_{\text{null}})}. \quad (7)$$

N 个引力波探测器的网络信噪比 ρ 可以通过 c_{cor} 和 E_{cor} 定义:

$$\rho = \sqrt{\frac{c_{\text{cor}} E_{\text{cor}} N}{N - 1}}. \quad (8)$$

上述计算得到的等效相关信噪比 ρ 、网络相干系数 c_{cor} 和像素似然概率加权平均得到的中心频率 f_0 等统计参数¹⁾ 共同提供了每个事件的量化描述. 由于引力波探测器参考系的选择具有规范自由度, 为了简化计算, 通常会在主极化参考系(Dominant Polarization Frame, DPF)中计算上述物理量^[30].

3 背景估计与统计显著性

由于引力波探测器数据中的噪声是非稳态的, 其仪器或环境噪声可能会和引力波信号类似. 在搜索到事件后, 我们需要确定其统计显著性. 为此, 我们需要对背景进行分析, 以确定假信号的概率(False Alarm Probability, FAP).

3.1 数据时移与背景估计

背景估计通常是在数据中不存在信号时, 应用相同的信号搜索算法进行搜索, 从而得到“假信号”, 并对其分布进行统计. 但在引力波观测中, 由于引力波与其他物质的相互作用极其微弱, 引力波信号无法被屏蔽. 虽然目前引力波事件数目比较少, 但其有可能存在于任意时刻的数据中. 因此, 在观测中, 我们通常采取如图3数据时移(Time-Shift)的方式, 将另一个或多个探测器的数据平移 δt 的时间. δt 应大于引力波在探测器1和探测器2之间传播的最大时长, 以打破真信号的相干性, 从而得到没有“引力波信号”存在的纯背景.

在数据时移产生的背景中搜索会产生源自噪声的假“相干”信号, 可以通过对这些假信号的探测器网络相干信噪比 η_c 进行排序, 从而得到背景假信号的统计分布. 当对没有时移的原始数据进行搜索时, 可以根据搜索到的每个事件的 η_c , 查找出背景假信号分布相应的假信号频率(False Alarm Rate, FAR), 通常用单位 yr^{-1} 来表示. 背景假信号由于其离散和稀疏的特性, 通常满足泊松分布, 我们可以在假信号频率的基础上计算出假信号概率从而可以估计每个事件的置信度.

3.2 搜索效率

搜索效率是评估数据处理管线以及调整搜索参数的重要方式. 在实践中, 我们通过在背景中注入不同信

1) 完整参数参照 cWB 文档 <https://gwburst.gitlab.io/documentation/latest/html/running.html#trigger-parameters>.

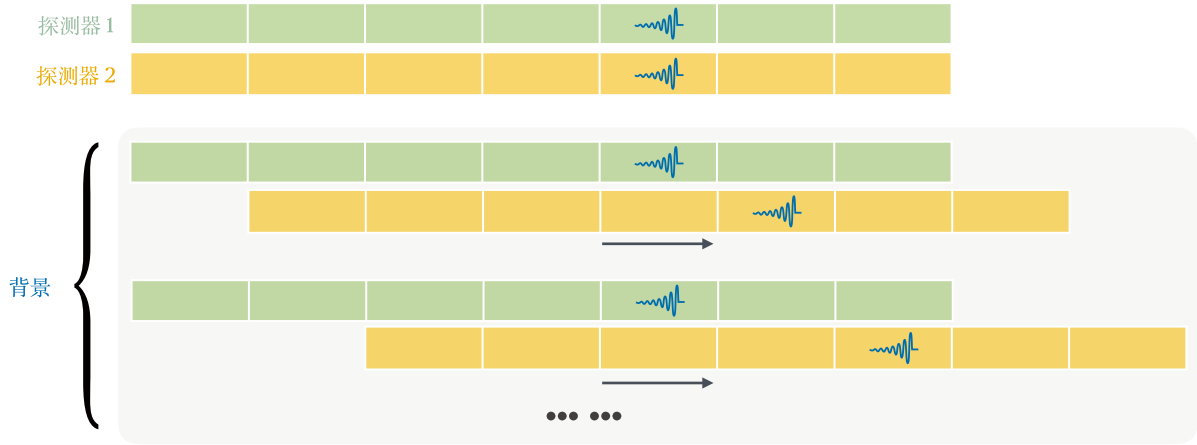


图 3 (网络版彩图)通过时移技术生成背景数据的过程示意图. 本示意图以两个探测器为例. 绿色和黄色色块表示一段时长的引力波探测器数据, 蓝色波形表示数据中的引力波信号. 通过对探测器数据进行时移处理, 平移步长应当超过引力波信号在两个探测器之间的传播时间. 因此真正的引力波信号之间的相干性被打破. 通过不断地时移, 几十天的引力波背景可以产生几十年甚至上百年的背景数据. 对于更多的探测器, 可以用同样的方法产生更长时间的背景

Figure 3 (Color online) Diagram of the background data generation process using time-shifting techniques. This example illustrates the use of two detectors. The green and yellow blocks represent segments of gravitational wave detector data, while the blue waveform icon represents the gravitational wave signal within the data. By applying time shifts to the detector data, the arrival times of gravitational wave signals in the two detectors exceed the time required for a photon to travel between them. This breaks the coherence of the true gravitational wave signals. Through continuous time-shifting, several days of gravitational wave background can generate decades or even centuries of background data. The same method can be used to produce even longer background data for more detectors.

号源并进行搜索, 来评估数据处理管线对各种信号的搜索效率. 搜索效率可以有多种量化方式, 其中常用的一种模型不依赖的方式为

$$h_{\text{rss}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (h_+^2(t) + h_\times^2(t)) dt}, \quad (9)$$

h_+ 和 $h_\times$ 为注入信号的两个极化模式. 当一个引力波信号的频率范围比较窄的时候, 其能量可以通过其中心频率 f_0 和距离 r_0 估计,

$$E_{\text{GW}} = \frac{\pi^2 c^3}{G} r_0^2 f_0^2 h_{\text{rss}}^2. \quad (10)$$

在无模板搜索中, 搜索效率的估计一般是通过在背景噪声中注入如图4所示的不同中心频率、频率带宽以及 h_{rss} 的正弦高斯波形(Sine Gaussian)和白噪声突发波形(White Noise Burst)作为标准测试信号. 随后对其进行搜索, 并找出可以搜索到50%注入信号数量对应的 h_{rss} 大小作为比较标准, 通常称为 $h_{\text{rss}50}$. $h_{\text{rss}50}$ 越小表示该参数设置或该数据管线对测试信号更灵敏.

4 典型引力波波源

无模板搜索方法不依赖精确的引力波模板, 可以搜索和研究多种尚未充分理解和建模的引力波波源, 包括但不限于高离心率致密双星并合、核塌缩超新星、双曲轨道相遇、脉冲星自转突变、微引力透镜以及引力波回声. 这些引力波源各自具有独特的物理特征, 并在天体物理学或宇宙学中具有重要意义. 无模板搜索能够为我们提供更多关于这些现象的关键约束和新的理解. 我们将进一步介绍几种典型搜索对象及其相关的研究进展.

4.1 高离心率致密双星并合与双曲轨道相遇

对于致密双星并合, 现有引力波波形模型, 如有效单体(Effective One-Body, EOB)^[31,32], IMRPhenom^[33] 和 NRsurrogate^[34] 等计算的精确度越来越高, 覆盖的参数空间也越来越大, 离心率参数也逐渐被纳入这些模型之中^[23,35,36]. 然而高离心率($e > 0.3$)的椭圆轨道并合尚无精确模型. 离心率是致密双星并合中非常

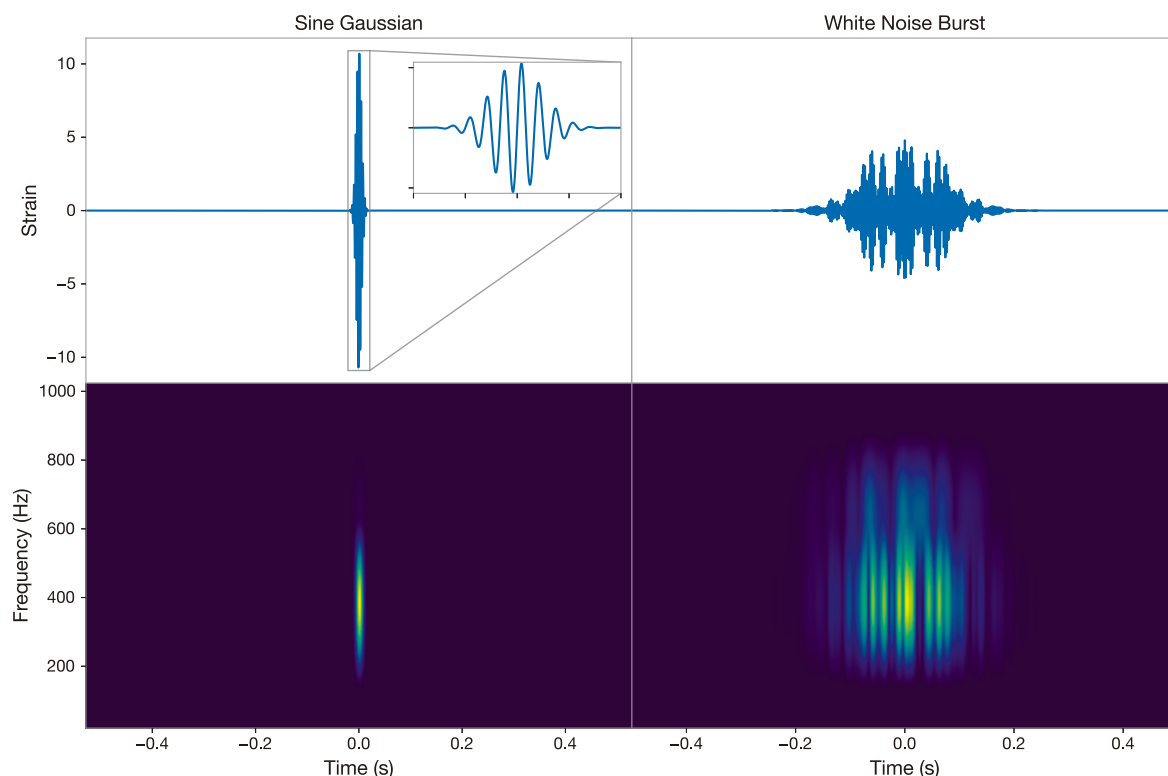


图 4 (网络版彩图)左侧为正弦高斯波形(Sine Gaussian), 右侧为白噪声突发波形(White Noise Burst). 左侧正弦高斯波形参数为 $f = 300$ Hz, $Q = 9$, 右侧白噪声突发波形中心频率为 400 Hz. 每个时域信号对应的下图为其时频域中的表示

Figure 4 (Color online) On the left side of the figure is a sine Gaussian waveform, and on the right side is a white noise burst waveform. The sine Gaussian waveform is generated with parameters $f = 300$ Hz, $Q = 9$, the white noise burst waveform on the right is generated with a central frequency of 400 Hz. The time-frequency domain plots in the lower panels are the wavelet representation of the corresponding time-domain signal.

重要的参数, 其存在可以为双星系统的可能形成渠道(Formation Channel)提供新的证据. 大多数天体物理模型预测, 当有离心率的双星系统进入当前地面引力波探测器的频段(高于 20 Hz)时, 离心率会圆化到 0.2 以下 [37–39]. 但另一些天体物理模型也提出了高离心率双星系统的可能形成机制 [40–42]. 这些双星系统即使在并合阶段, 也会保持非常高的离心率. 虽然这类双星系统相对稀少, 但它们的发现将为我们深入探究和理解双星系统的形成机制提供新的视角和思路 [26].

此外, 现有对致密双星并合引力波信号的搜索模板库中通常不包括离心率(e)这一参数, 这是为了提升对常见圆轨道双星系统的检测灵敏度. 研究表明, 在长信号和离心率小于 0.6 的情况下, 使用无离心率模板库的 PyCBC 对信号的灵敏度仍然较高, 但对于更高的离心率和大质量双星, 模板不依赖的搜索管线 cWB 具有更好的搜索效率 [43].

双曲轨道相遇是另一类非常有趣的引力波源. 当两个致密天体相遇, 但由于距离太远或动能太大而无法形成束缚系统时, 其轨迹类似于散射, 离心率 $e > 1$ [44–47]. 这类事件可能存在于星系核心和球状星团等恒星密度较高的区域 [48, 49]. 双曲轨道相遇的存在可以为引力波源的形成通道提供更多证据. 当两个双曲轨道相遇的天体距离最近时, 它们通过引力波释放的能量达到峰值, 此时能量会在短时间内呈现出明显的爆发性特征. 由于其波形类似于现有地面引力波探测器中的短促瞬态噪声(Blip Glitch), 其特征为时间短、能量集中. 因此, 将双曲轨道相遇产生的引力波信号从该类噪声中区分出来存在一定的困难. 研究发现, 对无模板搜索重建的引力波时域波形使用 autoencoder 神经网络算法可以提高区分短促瞬态噪声和双曲轨道相遇的能力 [50]. 研究同时用该优化算法对 O3 数据进行了搜索, 暂未发现双曲轨道相遇事件.

4.2 超新星

核塌缩超新星(Core-Collapse Supernova, CCSN)是另一类备受关注的引力波信号源. 核塌缩超新星SN1987A的电磁波段信号和中微子都被观测到过^[51,52]. 相比于电磁波段, 中微子和引力波信号具有独特的优势. 电磁波段信号产生于超新星核心的几千公里之外, 而中微子和引力波信号则来自塌缩的超新星核心, 其携带的信息可以为核心塌缩的动力学和机制提供新的线索^[24,53].

LIGO-Virgo合作组在O1和O2观测期间对20 Mpc距离内的已知核塌缩超新星进行了针对性的搜索^[54]. 由于超新星爆发的时间窗口和天空方位是已知的, 针对性的搜索可以提高数据处理管线的灵敏度. 虽然未在数据中发现任何显著的引力波事件, 但该研究对几种常见的核塌缩超新星模型提供了搜索距离上限的约束.

核塌缩超新星通常伴随着电磁信号的发射, 但自转轴与观测方向的偏差过大等因素可能导致电磁信号无法被观测到. 因此, 现有地面引力波探测器在每个运行阶段都进行了全天域搜索^[55-57]. 搜索同样未发现显著的核塌缩超新星事件, 但这些研究探究了多种不同的核塌缩超新星模型的搜索效率. 结果显示, 目前LIGO-Virgo对这类信号的搜索距离范围仅约1 kpc.

4.3 脉冲星自转突变

脉冲星以其稳定的自转特性为天文学提供了一种天然的标准时钟^[58-60]. 然而, 研究发现脉冲星可能会出现自转突变(Pulsar Glitch)现象, 这种现象表现为脉冲星的自转频率会突然增加, 随后逐渐衰减^[61]. 一部分脉冲星自转突变的能量会通过引力波释放, 但其机制目前尚不明确. 主流模型主要分为两类: 地壳破裂(Crust Fracture, “星震”)和超流体与地壳相互作用(Superfluid-Crust Interactions)^[62]. 不同模型给出了不同的引力波能量和波形, 因此这些事件的引力波观测可以对脉冲星自转突变的模型提供重要的约束. 同时, 研究表明, 由于引力波不像电磁信号一样受视向角度限制, 引力波探测器可以作为脉冲星自转突变的另一种观测手段^[63].

在initial LIGO 2006年第五次科学运行(S5)期间,

脉冲星PSR J0835-4510 (又称Vela)发生了自转突变. 随后LIGO合作组对自转突变期间的引力波数据进行了信号搜索, 在假设其引力波信号为铃宕信号的情况下, 用贝叶斯方法对其最大振幅给出了 6.3×10^{-21} 的约束^[64]. 在Advanced LIGO O3期间的全天域搜索中, 文献^[57,65]研究了地面引力波探测器对两种经典物态方程下脉冲星自转突变的探测灵敏度.

4.4 引力波记忆效应

引力波的非线性记忆效应是一种永久的时空位移现象, 可以解释为由引力波本身的辐射所生成的引力波分量^[66-70]. 这一效应并不是一个单纯的引力波现象, 其存在可能揭示了引力理论和量子理论之间的关联. 引力波记忆效应是“红外三角”(Infrared Triangle)的其中一角, 这一概念模型将引力波记忆与Bondi-Metzner-Sachs (BMS)对称性和软引力子定理紧密联系在一起^[71-73]. 除了位移记忆效应, 引力波的记忆效应还包括自旋记忆效应^[74,75]和质心记忆效应^[76]两种类型.

非线性记忆效应可以用于在特定参数空间中区分中子星-黑洞并合与双黑洞并合^[77]. 在存在物质效应的情况下, 非线性记忆效应还显示出区分双中子星并合、双黑洞并合和中子星-黑洞并合的能力^[78]. 同时非线性记忆效应还可以在参数估计中打破双黑洞系统光度距离和倾角的简并性, 可以更准确地测量波源的光度距离^[79]. 文献^[80,81]还研究了天琴对引力波记忆效应的探测能力.

引力波记忆效应的能量密度与频率成反比. 这意味着大部分记忆效应的能量集中在低频区域. 对于LIGO所探测到的双黑洞引力波事件, 其记忆效应的主要能量位于低于LIGO最低探测频率的范围内, 因此当前的地面引力波探测器很难探测到这些记忆效应. 然而, 这一特性为那些超出地面引力波探测器最高频率范围的波源提供了新的可能性. 对于一些频率超出探测器极限的高频引力波源, 如原初黑洞, 虽然无法探测到其直接产生的高频引力波, 但其低频记忆效应可能被探测器捕获. 这类探测对象通常被称为“孤立记忆效应”(Orphan Memory). 文献^[82]利用Advanced LIGO的O3观测数据进行搜索, 但未发现任何显著的孤立记忆效应. 此外, 该研究还首次采用这种方法对总质

量 $M_{\text{tot}} \leq 0.4M_{\odot}$ 的双黑洞并合率进行了估算, 从而提供了新的约束.

4.5 微引力透镜

当引力波在传播路径上遇到大质量天体, 如星系、星系团、暗物质晕、“流浪”黑洞(Free Floating Black Hole)等, 其波形会发生改变. 在几何光学近似下, 当引力波源与前景的透镜天体在后者的爱因斯坦半径范围内对齐的话, 引力波的传播路径会发生偏折和劈裂, 形成引力波的多像系统. 一个引力波信号会被劈裂成多个信号, 根据不同的光程长度先后到达探测器. 这些现象与电磁波的透镜现象类似. 更有趣的是, 当透镜天体的质量相当于或低于 $10^5 M_{\odot}$ 除以引力波频率时, 透镜的波动光学现象开始显现出来, 会产生干涉和衍射现象 [83–87]. 这种现象在电磁透镜系统中是无法被观测到的. 利用引力波透镜的这一独特效应, 我们可以用来探寻小质量天体, 如中等质量黑洞、“流浪”黑洞等.

真实的透镜天体往往并非孤立点质量或连续质量分布, 而是有许多离散的小质量天体集合而成. 例如星系透镜系统, 在暗物质基础(可视为连续质量分布)之上又有 20% 左右的质量是离散的恒星贡献的. 这些恒星就可以被当作是一个个“子”透镜体. 引力波在穿过这些子透镜体时会产生衍射和干涉效应, 从而对引力波信号产生畸变. 由于这些透镜产生的光线偏折角在微角秒级别, 因此被称为微引力透镜. 依据波动光学的特性, 这些畸变信号会十分地依赖于微引力透镜体(恒星)在空间中的分布, 而这些恒星的空间分布又是十分随机的. 因此, 对微引力透镜效应进行理论建模是十分困难的 [21, 22]. 对于这种信号, cWB 则是一个十分适合的选择. 有研究指出 [88], 利用 cWB 与模板匹配方法所得到的波形的不匹配度来筛选疑似引力波透镜事例对于第三代地面引力波探测器是行之有效的, 该方法的效率可以达到 10% 左右.

4.6 引力波回声

双黑洞绕转并合可以分为三个阶段: 旋近、并合和铃宕. 其中, 最后的铃宕阶段蕴含了关于最终形成黑洞的结构的关键信息. 铃宕阶段的信号通常由准正规模式(Quasinormal Mode, QNM)组成 [89, 90]. 准正规模式

是一组具有离散的准正规频率的振荡衰减模式. 出现离散频率是由于在黑洞的事件视界和无穷远处施加了辐射边界条件. 在经典理论中, 准正规模式可以反映黑洞视界附近的时空结构. 经典黑洞模型中的引力涨落有效势有且仅有一个势垒, 因此引力波信号振幅在铃宕阶段单调衰减. 然而, 也存在其他非单势垒情况, 比如黑洞视界附近的量子结构(例如火墙 [91, 92])可能会在视界附近形成额外的势垒. 此外, 对于没有视界的致密天体, 如虫洞 [93, 94] 和引力星 [95] 等, 其引力涨落的有效势中也可能会存在多个势垒. 高维理论, 例如在额外维模型中, 引力涨落的有效势在额外维方向也可能存在多个势垒 [96, 97]. 在这种情况下, 虽然准正规模式仍具有离散的准正规频率, 但其中一些模式的衰减速度相对较慢, 这可能导致信号中出现多个脉冲峰. 这是由于信号被这些势垒多次反射, 产生散射共振效应. 具有共振频率的信号成分将会准束缚在多势垒形成的准势阱中. 这种现象会导致引力波信号中出现多个相似的信号峰值, 称为引力波回声 [98–100]. 引力波回声的探测为探索新的时空结构和寻找奇异星体提供了新的途径, 具有重要意义.

文献 [101] 对双黑洞并合后不久(回声与并合的间隔大于或等于 1 s)的引力波回声信号进行了搜索, 研究对象为 GWTC-3 目录 [5] 中高信噪比的双黑洞并合事件. 搜索结果未发现超出噪声统计显著性的事件, 此外该研究还对引力波回声的振幅上限进行了约束.

5 机器学习在搜索中的应用

引力波数据一直受到 glitch 噪声的困扰. 虽然不同探测器内的 glitch 噪声是独立的, 但是由于 glitch 噪声的强度非常大, 往往会和其他探测器的噪声产生伪相关, 进而被错误识别为潜在的引力波事件. 因此, 无模板搜索框架通常会通过检测结果并手动调节统计参数的剔除(Veto)机制, 以减少重构事件中的噪声. 这种剔除机制对提高事件的统计学显著性非常有效. 但是由于用于描述事件统计结果的参数非常多, 形成了高维的参数空间, 手动设置阈值只能在每个一维参数空间内剔除事件, 会存在剔除阈值边界附近的引力波信号的风险. 此外, 选择剔除阈值需要大量的时间对数据结果进行检查并选择, 在选择不同的探测器网络或更改其他设置之后, 都需要重复此过程.

对于这类高维空间的数据分类, 机器学习可以提供更好的解决方案. XGBoost和GMM是LIGO-Virgo信号搜索中主要使用的两种机器学习方法^[102–104]. XGBoost是一种基于决策树的梯度提升算法^[105]. 通过逐步优化损失函数构建多个决策树, 提高模型的预测精度. 在cWB搜索中, XGBoost可以用于构建一个多维参数空间的分类器, 将噪声事件和潜在的引力波事件区分开来. GMM是一种利用概率密度函数来聚类的算法. 其假设数据点是由多个高斯分布组成, 通过最大期望算法来估计高斯分布的参数. 在cWB搜索中, GMM可以用于建模噪声和信号的分布, 通过计算事件属于噪声或信号的概率来进行分类.

除了更高效地压制噪声和提高灵敏度, 机器学习算法的应用为无模板搜索带来了新的方法: 模型辅助搜索(Model-Informed Search). 这种方法不同于传统的完全不依赖模板的搜索和基于模型的搜索. 模型辅助搜索通过将待搜索的模型注入机器学习的训练集中, 使机器学习算法能够更好地识别这些模型的特征. 由于不直接依赖模型, 对于许多没有精确引力波模型的波源, 模型中的误差不会显著降低搜索效率. 文献^[106]详细讨论了机器学习在空间引力波搜索中的其他应用.

6 无模板搜索的未来与PycWB

无模板搜索在地面引力波探测中发挥了不可替代的作用. 在空间引力波探测中, 我们将面临更多的挑战, 包括新的波源类型、轨道复杂且难以建模的波源、长持续时间的信号、重叠信号以及不稳定的噪声背景等问题. 因此, 非依赖模板的搜索和模板辅助搜索将成为空间引力波探测中的重要组成部分.

此外, 随着机器学习算法的持续发展, 它们可以与当前的搜索算法更加紧密地结合, 从而进一步提高搜索效率, 减少人为剔除信号和对能量阈值的限制, 避免错过如引力波回声和记忆效应等微弱特征.

上述这些未来的应用场景需要我们对搜索管线进行持续的优化和开发. 然而, 由于缺乏易于理解和维护的软件, 目前无模板搜索和波形重建算法的开发与使用, 主要限于那些深入理解软件底层架构并精通C/C++等编程语言的研究人员. 由于编程语言和框

架的限制, 现有的搜索管线难以与机器学习算法相融合, 因此机器学习算法目前仅在搜索后的统计分析中使用.

选择合适的编程语言对科学软件的设计和使用至关重要. Python因其广泛的应用和便捷的开发特性, 正逐渐成为引力波数据分析的默认编程语言, 吸引了更多科研工作者参与其中. 基于Python的引力波形模型(如pySEOBNR^[107]和gwsurrogate^[108])、参数估计软件(如BILBY^[109]和PyCBC-inference^[110])以及引力波背景搜索软件(如pygwb^[111])的出现, 证明了这一趋势. 同时, 像PyCBC^[112]这样的引力波数据分析管线也成功得到了广泛的应用.

开发模块化且基于Python的解决方案, 将有助于推动该领域的广泛参与和进步. PycWB^[113]是首个尝试将cWB重新模块化并用Python语言重写的项目. 未来, PycWB将逐步把机器学习融入核心算法中, 以进一步提升引力波搜索的波源类型覆盖范围和灵敏度, 并且还计划增加对空间引力波探测器的支持.

7 总结与展望

自2015年Advanced LIGO探测器首次直接观测到双黑洞并合的引力波事件以来, 引力波天文学取得了快速且显著的进展. 探测器灵敏度的提升以及多信使天文学的发展, 为我们理解宇宙中的极端现象提供了前所未有的机会. 无模板搜索, 尤其是时频域相干信号搜索算法cWB, 在处理未知或复杂信号时表现优异, 为探测未知波源和扩展已知波源的参数空间提供了重要支持. 随着下一代地面引力波探测器Einstein Telescope, Cosmic Explorer以及空间引力波探测器LISA、太极和天琴的推进, 我们有望在更广的频段中以更高的信噪比探测到更多种类的引力波事件. 这将为引力波数据分析带来新的机遇和挑战. 无模板搜索将在其中扮演更加重要的角色. 同时, 机器学习的发展也为无模板搜索在抑制噪声和提高信号识别能力方面提供了强大助力. PycWB对cWB的模块化和Python化努力, 将有助于推动数据分析算法的发展, 促进引力波天文学的进步. 这些进展将为我们在宇宙学、基础物理和天体物理领域提供更为丰富的理解, 开辟新的研究路径和探索空间.

参考文献

- 1 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO. *Phys Rev D*, 2016, 93: 122003
- 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 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. GW190521: A binary black hole merger with a total mass of $150M_{\odot}$. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 101102
- 4 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. Observation of gravitational waves from two neutron star-black hole coalescences. *Astrophys J Lett*, 2021, 915: L5
- 5 Abbott R, Abbott T D, Acernese F, et al. GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run. *Phys Rev X*, 2023, 13: 041039
- 6 Abbott R, Abbott T D, Acernese F, et al. Population of merging compact binaries inferred using gravitational waves through GWTC-3. *Phys Rev X*, 2023, 13: 011048
- 7 Punturo M, Abernathy M, Acernese F, et al. The Einstein telescope: A third-generation gravitational wave observatory. *Class Quantum Grav*, 2010, 27: 194002
- 8 Reitze D, Adhikari R X, Ballmer S, et al. Cosmic Explorer: The U.S. contribution to gravitational-wave astronomy beyond LIGO. *Bull Am Astronom Soc*, 2019, 51: 35
- 9 Hu W R, Wu Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity. *Natl Sci Rev*, 2017, 4: 685–686
- 10 Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: A space-borne gravitational wave detector. *Class Quantum Grav*, 2016, 33: 035010
- 11 Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. Laser interferometer space antenna. arXiv: 1702.00786
- 12 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
- 13 Nitz A H, Dal Canton T, Davis D, et al. Rapid detection of gravitational waves from compact binary mergers with PyCBC Live. *Phys Rev D*, 2018, 98: 024050
- 14 Dal Canton T, Nitz A H, Gadre B, et al. Real-time search for compact binary mergers in Advanced LIGO and Virgo's third observing run using PyCBC Live. *Astrophys J*, 2021, 923: 254
- 15 Cannon K, Caudill S, Chan C, et al. GstLAL: A software framework for gravitational wave discovery. arXiv: 2010.05082
- 16 Aubin F, Brighenti F, Chierici R, et al. The MBTA pipeline for detecting compact binary coalescences in the third LIGO-Virgo observing run. *Class Quantum Grav*, 2021, 38: 095004
- 17 Chu Q, Kovalam M, Wen L, et al. SPIIR online coherent pipeline to search for gravitational waves from compact binary coalescences. *Phys Rev D*, 2022, 105: 024023
- 18 Drago M, Klimentenko S, Lazzaro C, et al. Coherent WaveBurst, a pipeline for unmodeled gravitational-wave data analysis. *SoftwareX*, 2021, 14: 100678
- 19 Cornish N J, Littenberg T B. BayesWave: Bayesian inference for gravitational wave bursts and instrument glitches. *Class Quantum Grav*, 2015, 32: 135012
- 20 Owen B J, Sathyaprakash B S. Matched filtering of gravitational waves from inspiraling compact binaries: Computational cost and template placement. *Phys Rev D*, 1999, 60: 022002
- 21 Shan X, Li G, Chen X, et al. Wave effect of gravitational waves intersected with a microlens field: A new algorithm and supplementary study. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 239511
- 22 Shan X, Chen X, Hu B, et al. Microlensing bias on the detection of strong lensing gravitational wave. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2024, 67: 269511
- 23 Ramos-Buades A, Buonanno A, Khalil M, et al. Effective-one-body multipolar waveforms for eccentric binary black holes with nonprecessing spins. *Phys Rev D*, 2022, 105: 044035
- 24 Mezzacappa A, Zanolin M. Gravitational waves from neutrino-driven core collapse supernovae: Predictions, detection, and parameter estimation. arXiv: 2401.11635
- 25 Haskell B, Jones D I. Glitching pulsars as gravitational wave sources. *Astropart Phys*, 2024, 157: 102921
- 26 Steinle N, Kesden M. Pathways for producing binary black holes with large misaligned spins in the isolated formation channel. *Phys Rev D*, 2021, 103: 063032

- 27 Necula V, Klimentenko S, Mitselmakher G. Transient analysis with fast Wilson-Daubechies time-frequency transform. *J Phys-Conf Ser*, 2012, 363: 012032
- 28 Klimentenko S. Wavescan: Multiresolution regression of gravitational-wave data. arXiv: [2201.01096](#)
- 29 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions. *Phys Rev D*, 2016, 93: 122004 [Addendum: *Phys Rev D*, 2016, 94: 069903]
- 30 Sutton P J, Jones G, Chatterji S, et al. X-Pipeline: An analysis package for autonomous gravitational-wave burst searches. *New J Phys*, 2010, 12: 053034
- 31 Buonanno A, Damour T. Effective one-body approach to general relativistic two-body dynamics. *Phys Rev D*, 1999, 59: 084006
- 32 Cao Z J, Du Z H. Numerical relativity and gravitational wave astronomy (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 010405 [曹周键, 都志辉. 数值相对论与引力波天文学. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47: 010405]
- 33 Khan S, Husa S, Hannam M, et al. Frequency-domain gravitational waves from nonprecessing black-hole binaries. II. A phenomenological model for the advanced detector era. *Phys Rev D*, 2016, 93: 044007
- 34 Blackman J, Field S E, Scheel M A, et al. A surrogate model of gravitational waveforms from numerical relativity simulations of precessing binary black hole mergers. *Phys Rev D*, 2017, 95: 104023
- 35 Cao Z, Han W B. Waveform model for an eccentric binary black hole based on the effective-one-body-numerical-relativity formalism. *Phys Rev D*, 2017, 96: 044028
- 36 Liu X, Cao Z, Zhu Z H. A higher-multipole gravitational waveform model for an eccentric binary black holes based on the effective-one-body-numerical-relativity formalism. *Class Quantum Grav*, 2022, 39: 035009
- 37 Samsing J. Eccentric black hole mergers forming in globular clusters. *Phys Rev D*, 2018, 97: 103014
- 38 Gondán L, Kocsis B, Raffai P, et al. Eccentric black hole gravitational-wave capture sources in galactic nuclei: Distribution of binary parameters. *Astrophys J*, 2018, 860: 5
- 39 Antonini F, Toonen S, Hamers A S. Binary black hole mergers from field triples: Properties, rates, and the impact of stellar evolution. *Astrophys J*, 2017, 841: 77
- 40 Tagawa H, Kocsis B, Haiman Z, et al. Eccentric black hole mergers in active galactic nuclei. *Astrophys J Lett*, 2021, 907: L20
- 41 Silsbee K, Tremaine S. Lidov-Kozai cycles with gravitational radiation: Merging black holes in isolated triple systems. *Astrophys J*, 2017, 836: 39
- 42 Liu B, Lai D. Enhanced black hole mergers in binary-binary interactions. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 483: 4060–4069
- 43 Gadre B, Soni K, Tiwari S, et al. Detectability of eccentric binary black holes with PyCBC and cWB pipelines during the third observing run of LIGO-Virgo-KAGRA. arXiv: [2405.04186](#)
- 44 Capozziello S, de Laurentis M, de Paolis F, et al. Gravitational waves from hyperbolic encounters. *Mod Phys Lett A*, 2008, 23: 99–107
- 45 De Vittori L, Jetzer P, Klein A. Gravitational wave energy spectrum of hyperbolic encounters. *Phys Rev D*, 2012, 86: 044017
- 46 Bini D, Gericcio A. Frequency domain analysis of the gravitational wave energy loss in hyperbolic encounters. *Phys Rev D*, 2021, 104: 104019
- 47 Gröbner M, Jetzer P, Haney M, et al. A note on the gravitational wave energy spectrum of parabolic and hyperbolic encounters. *Class Quantum Grav*, 2020, 37: 067002
- 48 Gondán L, Kocsis B. High eccentricities and high masses characterize gravitational-wave captures in galactic nuclei as seen by Earth-based detectors. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 506: 1665–1696
- 49 Rasskazov A, Kocsis B. The rate of stellar mass black hole scattering in galactic nuclei. *Astrophys J*, 2019, 881: 20
- 50 Bini S, Tiwari S, Xu Y, et al. Search for hyperbolic encounters of compact objects in the third LIGO-Virgo-KAGRA observing run. *Phys Rev D*, 2024, 109: 042009
- 51 Karovska M, Nisenson P, Papaliolios C, et al. Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud. *IAU Circulars*, 1987, 4316: 1
- 52 Janka H T. Neutrino emission from supernovae. arXiv: [1702.08713](#)
- 53 Li H B, Shao L J, Xu R X. Gravitational wave bursts from core-collapse supernovae (in Chinese). *Prog Astron*, 2021, 39: 511–521 [李洪波, 邵立晶, 徐仁新. 核心坍缩型超新星致引力波暴. *天文学进展*, 2021, 39: 511–521]
- 54 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Optically targeted search for gravitational waves emitted by core-collapse supernovae during the first and second observing runs of Advanced LIGO and Advanced Virgo. *Phys Rev D*, 2020, 101: 084002
- 55 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
- 56 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. All-sky search for short gravitational-wave bursts in the second Advanced LIGO and Advanced Virgo run. *Phys Rev D*, 2019, 100: 024017

- 57 Abbott R, Abbott T D, Acernese F, et al. All-sky search for short gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run. *Phys Rev D*, 2021, 104: 122004
- 58 Ryba M F, Taylor J H. High-precision timing of millisecond pulsars. I—Astrometry and masses of the PSR 1855 + 09 system. *Astrophys J*, 1991, 371: 739
- 59 Ryba M F, Taylor J H. High-precision timing of millisecond pulsars. II—Astrometry, orbital evolution, and eclipses of PSR 1957 + 20. *Astrophys J*, 1991, 380: 557
- 60 Kaspi V M, Taylor J H, Ryba M F. High-precision timing of millisecond pulsars. 3: Long-term monitoring of PSRs B1855+09 and B1937+21. *Astrophys J*, 1994, 428: 713
- 61 Radhakrishnan V, Manchester R N. Detection of a change of state in the pulsar PSR 0833-45. *Nature*, 1969, 222: 228–229
- 62 Haskell B, Melatos A. Models of pulsar glitches. *Int J Mod Phys D*, 2015, 24: 1530008
- 63 Lopez D, Tiwari S, Drago M, et al. Prospects for detecting and localizing short-duration transient gravitational waves from glitching neutron stars without electromagnetic counterparts. *Phys Rev D*, 2022, 106: 103037
- 64 Abadie J, Abbott B P, Abbott R, et al. Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar. *Phys Rev D*, 2011, 83: 042001
- 65 Lopez D. Search for short-duration transient gravitational waves emitted by neutron star glitches. *Annalen der Physik*, 2024, 536: 2200142
- 66 Christodoulou D. Nonlinear nature of gravitation and gravitational-wave experiments. *Phys Rev Lett*, 1991, 67: 1486–1489
- 67 Payne P N. Smarr's zero-frequency-limit calculation. *Phys Rev D*, 1983, 28: 1894–1897
- 68 Blanchet L, Damour T. Hereditary effects in gravitational radiation. *Phys Rev D*, 1992, 46: 4304–4319
- 69 Wiseman A G, Will C M. Christodoulou's nonlinear gravitational-wave memory: Evaluation in the quadrupole approximation. *Phys Rev D*, 1991, 44: R2945–R2949
- 70 Thorne K S. Gravitational-wave bursts with memory: The Christodoulou effect. *Phys Rev D*, 1992, 45: 520–524
- 71 Geroch R, Winicour J. Linkages in general relativity. *J Math Phys*, 1981, 22: 803–812
- 72 Ludvigsen M. Geodesic deviation at null infinity and the physical effects of very long wave gravitational radiation. *Gen Relat Gravit*, 1989, 21: 1205–1212
- 73 Strominger A, Zhiboedov A. Gravitational memory, BMS supertranslations and soft theorems. *J High Energy Phys*, 2016, 1: 86
- 74 Nichols D A. Spin memory effect for compact binaries in the post-Newtonian approximation. *Phys Rev D*, 2017, 95: 084048
- 75 Pasterski S, Strominger A, Zhiboedov A. New gravitational memories. *J High Energy Phys*, 2016, 12: 053
- 76 Nichols D A. Center-of-mass angular momentum and memory effect in asymptotically flat spacetimes. *Phys Rev D*, 2018, 98: 064032
- 77 Tiwari S, Ebersold M, Hamilton E Z. Leveraging gravitational-wave memory to distinguish neutron star-black hole binaries from black hole binaries. *Phys Rev D*, 2021, 104: 123024
- 78 Lopez D, Tiwari S, Ebersold M. Gravitational wave memory of compact binary coalescence in the presence of matter effects. *Phys Rev D*, 2024, 109: 043039
- 79 Xu Y, Rosselló-Sastre M, Tiwari S, et al. Enhancing gravitational wave parameter estimation with nonlinear memory: Breaking the distance-inclination degeneracy. *Phys Rev D*, 2024, 109: 123034
- 80 Sun S, Shi C, Zhang J, et al. Detecting the gravitational wave memory effect with TianQin. *Phys Rev D*, 2023, 107: 044023
- 81 Sun S, Shi C, Zhang J, et al. Bayesian analysis of the gravitational wave memory effect with TianQin. *Phys Rev D*, 2024, 110: 024050
- 82 Ebersold M, Tiwari S. Search for nonlinear memory from subsolar mass compact binary mergers. *Phys Rev D*, 2020, 101: 104041
- 83 Oguri M. Strong gravitational lensing of explosive transients. *Rep Prog Phys*, 2019, 82: 126901
- 84 Mao S. Astrophysical applications of gravitational microlensing. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 947–972
- 85 Dai L, Li S S, Zackay B, et al. Detecting lensing-induced diffraction in astrophysical gravitational waves. *Phys Rev D*, 2018, 98: 104029
- 86 Guo X, Lu Y. Convergence and efficiency of different methods to compute the diffraction integral for gravitational lensing of gravitational waves. *Phys Rev D*, 2020, 102: 124076
- 87 Sun Y R, Wang R J, Lin S J, et al. Cosmology application of the astrophysics originated gravitational wave (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2022, 52: 289504 [孙彦如, 王仁杰, 蔺是杰, 等. 天体物理起源引力波的宇宙学应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 289504]
- 88 Shan X, Chen X, Hu B, et al. Microlensing sheds light on the detection of strong lensing gravitational waves. arXiv: 2301.06117
- 89 Vishveshwara C V. Scattering of gravitational radiation by a schwarzschild black-hole. *Nature*, 1970, 227: 936–938
- 90 Kokkotas K D, Schmidt B G. Quasi-normal modes of stars and black holes. *Living Rev Relativ*, 1999, 2: 2
- 91 Almheiri A, Marolf D, Polchinski J, et al. Black holes: Complementarity or firewalls? *J High Energy Phys*, 2013, 2: 62

- 92 Saravani M, Afshordi N, Mann R B. Empty black holes, firewalls, and the origin of Bekenstein-Hawking entropy. *Int J Mod Phys D*, 2015, 23: 1443007
- 93 Cardoso V, Franzin E, Pani P. Is the gravitational-wave ringdown a probe of the event horizon? *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 171101 [Erratum: *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 089902]
- 94 Bueno P, Cano P A, Goelen F, et al. Echoes of Kerr-like wormholes. *Phys Rev D*, 2018, 97: 024040
- 95 Visser M, Wiltshire D L. Stable gravastars—An alternative to black holes? *Class Quantum Grav*, 2004, 21: 1135–1151
- 96 Gremm M. Four-dimensional gravity on a thick domain wall. *Phys Lett B*, 2000, 478: 434–438
- 97 Zhu C C, Chen J, Guo W D, et al. Gravitational echoes from braneworlds. arXiv: [2406.16256](#)
- 98 Cardoso V, Pani P. Tests for the existence of black holes through gravitational wave echoes. *Nat Astron*, 2017, 1: 586–591
- 99 Cardoso V, Hopper S, Macedo C F B, et al. Gravitational-wave signatures of exotic compact objects and of quantum corrections at the horizon scale. *Phys Rev D*, 2016, 94: 084031
- 100 Cardoso V, Pani P. Testing the nature of dark compact objects: A status report. *Living Rev Relativ*, 2019, 22: 4
- 101 Miani A, Lazzaro C, Prodi G A, et al. Constraints on the amplitude of gravitational wave echoes from black hole ringdown using minimal assumptions. *Phys Rev D*, 2023, 108: 064018
- 102 Mishra T, O'Brien B, Gayathri V, et al. Optimization of model independent gravitational wave search for binary black hole mergers using machine learning. *Phys Rev D*, 2021, 104: 023014
- 103 Gayathri V, Lopez D, R. s. P, et al. Enhancing the sensitivity of transient gravitational wave searches with Gaussian mixture models. *Phys Rev D*, 2020, 102: 104023
- 104 Smith L, Ghosh S, Sun J, et al. The enhancement of Gaussian mixture modelling as an application to the coherent WaveBurst algorithm in the search for short gravitational wave transients. arXiv: [2407.16414](#)
- 105 Chen T, Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco, 2016. 785–794
- 106 He W, Minghui D U, Peng X U, et al. Challenges in space-based gravitational wave data analysis and applications of artificial intelligence. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2024, 54: 270403
- 107 Mihaylov D P, Ossokine S, Buonanno A, et al. pySEOBNR: A software package for the next generation of effective-one-body multipolar waveform models. arXiv: [2303.18203](#)
- 108 Field S, Galley C, Blackman J. GWSurrogate: An easy-to-use interface to gravitational wave surrogate models. *APS April Meet Abstr*, 2018, 2018: G14.005
- 109 Ashton G, Hübner M, Lasky P D, et al. Bilby: A user-friendly Bayesian inference library for gravitational-wave astronomy. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 241: 27
- 110 Bicer C M, Capano C D, De S, et al. PyCBC Inference: A Python-based parameter estimation toolkit for compact binary coalescence signals. *Publ Astron Soc Pac*, 2019, 131: 024503
- 111 Renzini A I, Romero-Rodríguez A, Talbot C, et al. pygwb: A Python-based library for gravitational-wave background searches. *Astrophys J*, 2023, 952: 25
- 112 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
- 113 Xu Y, Tiwari S, Drago M. PycWB: A user-friendly, modular, and python-based framework for gravitational wave unmodelled search. *SoftwareX*, 2024, 26: 101639

Gravitational wave data analysis: Unmodeled search

XU YuMeng^{1*}, LIU YuXiao^{2,3}, HU Bin⁴ & WANG Gang⁵

¹*Physik-Institut, University of Zurich, Zurich 8057, Switzerland;*

²*Lanzhou Center for Theoretical Physics, Key Laboratory for Quantum Theory and Applications of the Ministry of Education, Key Laboratory of Theoretical Physics of Gansu Province, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

³*School of Physics Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

⁴*School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

⁵*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*

**Corresponding author (email: yumeng.xu@physik.uzh.ch)*

Since the first detection of the binary black hole merger event GW150914 in 2015, gravitational wave astronomy has rapidly advanced, with 93 gravitational wave events detected until O3. The continuous improvement of gravitational wave detectors and the emergence of a new generation of detectors will expand our ability to observe the universe. This study uses the cWB pipeline as an example to explore the core algorithms of unmodeled gravitational wave searches and the computation of background and event significance. Furthermore, we briefly review its applications for various gravitational wave sources, including high-eccentricity compact binary mergers, core-collapse supernovae, hyperbolic encounters, pulsar glitches, microlensing, and echoes. Finally, this study discusses the future applications of machine learning in unmodeled gravitational wave searches and the possible adaption of the modular, Python-based PycWB pipeline for future space-based gravitational wave detectors.

gravitational wave data analysis, unmodeled search, cWB

PACS: 04.30.Db, 04.30.Nk, 04.80.Nn, 95.75.Wx, 95.85.Sz

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0361](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0361)