

SN2023IXF 的距离是否够近，足以探测到其引力波信号？

引言

恒星坍缩是能量最剧烈的天体物理现象之一。该现象发生在质量大约是8倍太阳质量以上的大质量星演化至生命末期。星体内部的氢聚变为氦，继而氦聚变为碳等；依此类推。依据泡利不相容原理，核聚变反应产生的电子气体简并压平衡着引力。随着核心收缩，星体温度和密度增加，直到其核心物质以铁为主。当核心质量超过1.4倍太阳质量（记作 M_{\odot} ）的**钱德拉塞卡极限**时，**电子简并压**不足以继续抗衡引力，核心在瞬间向内坍缩。此过程产生中子和中微子。当密度达到核密度时，坍缩停止，向内坠落的物质触核反弹，形成一个最终停滞的激波。由于中微子加热、**物质对流**和/或**长期吸积激波不稳定性**（standing accretion shock instability; SASI）的作用，当激波重新激发时，会将星体外层物质抛射出去，形成通过光学望远镜观察到的超新星。这种类型的超新星被称为**核心坍缩超新星**（core collapse supernova; CCSN）。

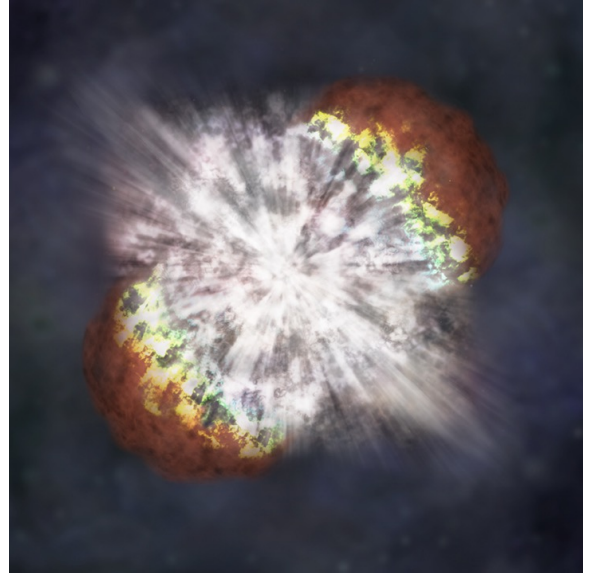


图 1: 超新星（艺术描述图），宇宙中能量最剧烈的的现象之一、大质量星的最终命运。图片来源：NASA/CXC/M.Weiss

多年以来，恒星坍缩被认为是引力辐射的来源之一。由于坍缩的物理过程相当复杂，对其引力波（gravitational wave; GW）辐射的预测较难，而探测到引力波将能获得大量关于坍缩动力学的信息。然而，引力波信号预计会非常微弱，比双中子星或双黑洞并合发出的信号弱数个数量级。只有发生在银河系或**本星系群**中的星系的近邻 CCSN，才会产生足够强的引力辐射，并被美国 LIGO 探测器、意大利的 Virgo 探测器和日本的 KAGRA 探测器组成的地面探测器网络探测到。但不幸的是，CCSN 的爆发率非常低。平均而言，每个星系每世纪仅出现数次。在大麦哲伦云（距离50千秒差距，约16.3万光年）观测到的 SN1987A 仍是本近域宇宙中最新纪录的 CCSN 事件。为了扩大潜在探测源的数量，LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 合作组正在搜寻约3000万光年范围内（相当于比近邻的仙女座星系远10倍）CCSN 的引力波信号。

出版物中的数据图表

关于这些数据图表的具体生成方法及更多详细信息，请参阅开放获取的**预印本**论文。

更多信息:

访问我们 www.ligo.org
 的网站: www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

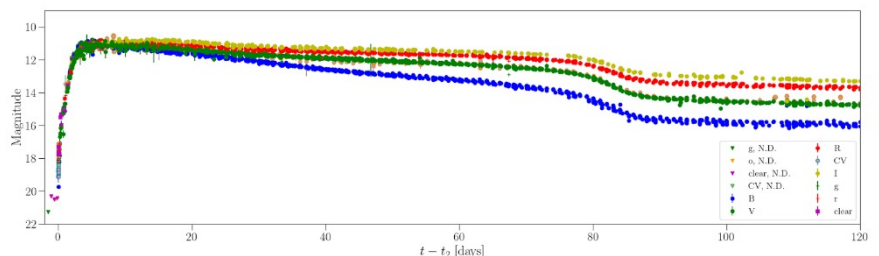


图 2: SN 2023ixf 在120天观测周期内不同测光波段的光变演化过程。

为什么 SN2023ixf 对引力波天文学来说很有趣？

SN2023ixf 是由天文爱好者板垣公一 (Koichi Itagaki) 于 2023 年 5 月 19 日发现的，位于宿主星系梅西叶101 (M101，亦称风车星系) 的 II 型超新星。值得感兴趣的是，该事件距离我们相对较近——6.7兆秒差距 (2180万光年)。这是在 LVK 探测器采集数据期间发现的最近 CCSN 之一。这为搜寻可能存在的引力波对应体提供了绝佳机会。与在相似距离的星系中发现的 SN2017eaw 相比较，2023年两个 LIGO 探测器的灵敏度已较 2017 年提升 2-3 倍。

当 SN2023ixf 发生时，两个 LIGO 探测器处于运行状态，但仍处于 LIGO-Virgo-KAGRA 合作组第四轮观测正式运行 (5 月 24 日) 前的调整阶段。因此，在 SN2023ixf 坍缩发生时，两个 LIGO 探测器并未持续观测。

但是，我们如何确定坍缩发生的具体时间呢？SN2023ixf 已被众多光学、X射线和射电望远镜跟踪观测。作为一个典型的 CCSN，其光变曲线显示：超新星被发现后约五天攀升至峰值，随后进入持续约一个月的平台期 (参见图 2)。得益于丰富的观测数据，激波突围时间 (即光首次出现的时间) 已被较准确估算。然而，这仍无法揭示坍缩发生时间，因为坍缩和激波突围之间存在一个取决于坍缩星体性质的时间延迟。大量来自地面望远镜、哈勃太空望远镜和斯皮策太空望远镜在发现前对 M101 的成像观测表明，SN2023ixf 的前身星应是一颗多尘埃的变星红超巨星，其质量估计在 8 到 20 倍太阳质量之间。由于其前身星质量存在高度不确定性，这意味着恒星坍缩可能早在激波突围发生前 5 天就已开始。在这个时间窗口内，两个 LIGO 探测器——汉福德 (H1) 和利文斯顿 (L1)——仅仅同时采集了总时长的 15% 的时间。

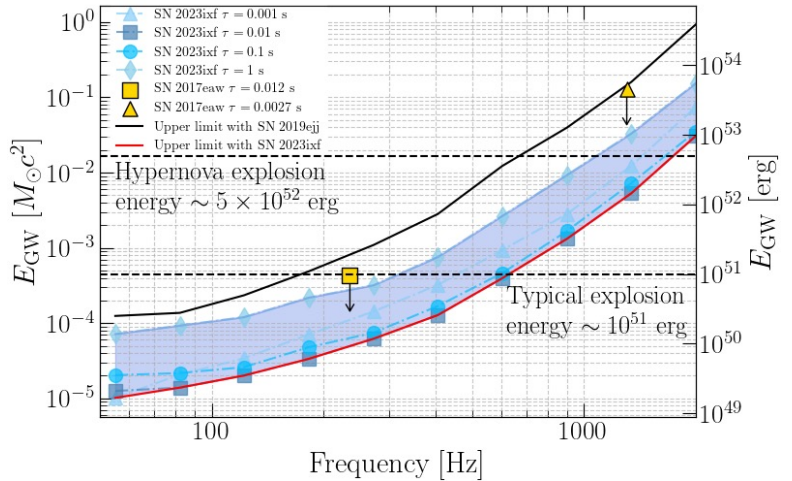


图 3: 以太阳质量乘以光速平方 ($M_{\odot}c^2$) 或尔格 (erg) 为单位的 GW 能量随棒模式信号频率变化的函数 (探测效率为 50%，日误报率 2.1 次)。蓝色阴影区域包含持续时间从数毫秒到 1 秒的不同棒模式信号的结果 (信号持续时间由图例中 τ 参数表示)。黄色方框和三角形标记代表基于 SN2017eaw 数据得到的 GW 能量上限。黑色线展示了从 SN2019ejj 观测中获得的最佳限制。水平虚线标注着标准超新星和极超新星的典型电磁辐射能量量级。

我们发现了什么？

CCSN 产生的 GW 信号很复杂，其波形需通过考虑广义相对论作为引力框架的流体动力学模拟程序进行预测。该预测依赖于未知的前身星参数。因此，匹配滤波技术在此类信号搜寻中并不适用。相反地，我们采用一种叫做相干波爆 (coherent WaveBurst; cWB-XP) 的算法。该算法针对频率覆盖约 20Hz 到 2kHz 区间的短时信号 (≤ 1 秒)，基于至少两个探测器的数据做相关性分析，。

在坍缩可能发生的五天时间窗口内，未发现有趣的事件候选者。确切地说，最显著的事件的误报概率为 76%，表明信号很可能源于噪声。GW 信号的缺失可能归于以下两因素：1) 坍缩发生时，两个 LIGO 探测器未处于观测模式 (有效数据覆盖率为 15%)；2) 辐射的 GW 信号太弱。我们估计，即使采用数值相对论中最乐观的模型预测，当前探测器的有效探测范围仅能覆盖至约 15 万光年处的大麦哲伦云。这比 SN2023ixf 距离近两个数量级。

我们学到了什么？

我们并未探测到与 SN2023ixf 成协的引力波信号。但若假设坍缩发生时，两个 LIGO 探测器处于观测模式，我们可以推算出可被 GW 探测器探测到时对应的坍缩能量阈值。当然，这一推算高度依赖于超新星爆发机制：前身星是否在旋转？物质对流是否足够强烈以激发原中子星（proto-neutron star; PNS）的基本模式？SASI 是否增强了中微子加热？磁场对信号放大是否起主导作用？鉴于这些机制尚未明确，本研究考虑一个简单的旋转三轴椭球体模型（类似于橄榄球形态）的引力波辐射来模拟核心坍缩时可能出现的棒模式不稳定性。SN2023ixf 将该类事件可能释放的能量上限提升近一个数量级。对低频引力波辐射的灵敏度分析表明（如图3所示），当辐射能量达到 $10^{-5} M_{\odot} c^2$ 量级时，相对应的系统可被探测到（50%的探测效率，误报率为76%）。该阈值需与 CCSN 数值模拟的预测进行对比：辐射能量的范围相当宽，从 $10^{-10} M_{\odot} c^2$ （较低能量的非旋转前身星）到 $10^{-6} M_{\odot} c^2$ （高速旋转源）。其中，能量已经根据著名的爱因斯坦方程 $E=mc^2$ 换算为太阳质量。从辐射能量来看，这意味着对像 SN2023ixf 这样的 CCSN 事件，当前探测灵敏度仍较爆发机制预测的最低能量相差数个数量级。

棒模式 GW 信号的振幅可通过非对称因子（即椭率）进行参数化表征。如图4所示，椭率随引力波信号频率和持续时间的变化呈现一定的分布范围。对于持续时间最长的信号（图中对应 $\tau=1s$ ），我们得到了目前对椭率最严格的限制结果：在最低搜索频率处椭率上限为 10^3 ，在 2 kHz 时为 1.04。这一结果较第三次观测运行时发现的 SN 2019ejj 事件对应的限制得到了提升。

前景

尽管 SN2023ixf 是近年来引力波搜寻记录中最令人关注的 CCSN 事件之一。但不幸的是，该事件爆发时，地面引力波探测器网络并非一直处于运行状态，我们仅获取到可能发生坍缩过程的总时长 15% 的数据。这使我们错失了探测良机。

若假设坍缩发生时恰逢两个 LIGO 探测器处于观测模式，SN 2023ixf 可有效限制引力波辐射模型的参数空间。然而，基于当前这一代 GW 探测器，能探测到 CCSN 对应引力波信号的最好前景是在本星系群内搜寻。

（简体中文翻译：赵俊杰，邵立晶）

了解更多信息：

访问我们的网站：

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

免费获取完整科学论文的预印本，请点击 [此处](#) 或 [访问arXiv.org](#) 阅读。

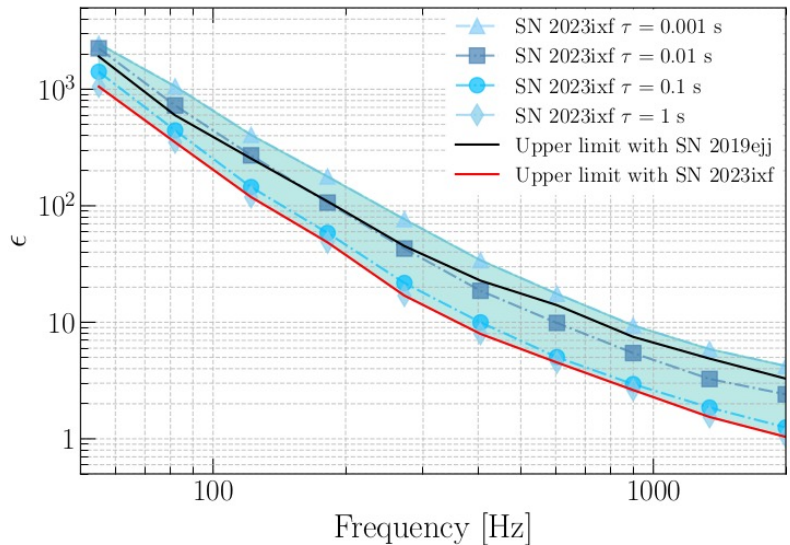


图 4：对 PNS 椭率的限制。图内描述了椭率作为棒模式信号频率的函数（设置探测效率为 50%，日误报率 2.1 次）。阴影区域反映了图例中 τ 参数表征的不同 GW 信号持续时间的结果。椭率参数代表星体形状偏离正球体的程度。当前最好的限制结果出现在较高频率的 GW 信号上。

术语表

钱德拉塞卡极限 (Chandrasekhar limit)：理论上，白矮星能够维持其形态的质量上限。若质量超过该值 ($1.4 M_{\odot}$)，电子简并压将无法抗衡引力，星体会进一步坍缩成中子星或黑洞。

电子简并气体 (Degenerate electron gas)：被限制在有限体积内、具有高密度的电子气体。

泡利不相容原理 (Pauli exclusion principle)：在量子力学中，泡利不相容原理指出，具有半整数自旋（即费米子）的两个全同粒子无法同时占据相同的量子态。该原理由奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利在 1925 年针对电子体系首次提出。

核心坍缩超新星 (Core collapse supernova)：当大质量星的核心在引力作用下坍缩时发生的爆发事件，导致超新星爆发。该过程释放出巨大能量，通常会形成中子星或黑洞作为残留天体。

本星系群 (Local group)：由银河系、仙女座大星系和三角座星系等超过 50 个星系构成，它们通过引力相互束缚，空间分布范围约达 1000 万光年。

II 型超新星 (Type II supernova)：大质量星生命末期发生的一类恒星爆发现象。这些超新星光谱具有氢元素发射线特征，并通常伴随着引力辐射。

长期吸积激波不稳定性 (Standing Accretion Shock Instability; SASI)：坍缩后数百毫秒内，已停滞的激波波前大尺度晃动，显著影响对流。

光变曲线 (Light curve)：描述天体释放光强度随时间演化的图示。光强度通常在特定的频率范围内测量。

激波突围 (Shock breakout)：前向激波突破恒星光球时产生的光子，是核心坍缩超新星的首个可检测电磁信号。

红超巨星 (Red supergiant)：宇宙中体积最大的恒星，属于超巨星光度类别。

匹配滤波 (Matched filter)：使用互相关方法探测含噪声数据中的模式或信号的处理方法。它被用于探测由合并致密双星系统释放的引力波信号（引力波波形是解析已知的）。

棒模式不稳定性 (Bar-mode instability)：在快速旋转星体或恒星坍缩残留天体中发生的一种现象。它是一种旋转不稳定性，其中星体或核心形状偏离球对称，并呈现出棒状结构。

原中子星 (Proto-neutron star)：质量小于约 20 倍太阳质量的星体坍缩后的核心残留物。其物质密度约为 $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ ，量子温度高达 50 兆电子伏特。