

超新星 SN2023IXF 是否近到能偵測到其重力波輻射？

前言

恆星坍縮是宇宙中最強大的天文現象之一。當質量大於約 8 倍太陽質量的大質量恆星走到生命週期的終點時，就會發生坍縮。氫融合成氦，然後氦融合成碳，依此類推。這些核融合反應會產生電子氣體，根據**包立不相容原理**，其壓力會抵抗星體自身的重力作用。隨著恆星核心收縮，溫度和密度不斷升高，直到核心主要由鐵組成。當核心的質量超過**錢德拉塞卡極限**（即 1.4 倍太陽質量，記作 1.4M_☉）時，**簡併電子**壓力已無法支撐核心，導致核心在短短不到一秒內坍縮。此過程會產生中子和微中子。當核心密度達到原子核的密度時，坍縮便會停止，而落入內部的物質會反彈而形成衝擊波，但該衝擊波最初會停滯不前。當微中子加熱、**物質對流**和/或**靜態吸積衝擊波不穩定性**（SASI）將衝擊波重新啟動時，衝擊波會將恆星的外層炸射出去，產生在光學望遠鏡中可觀測到的超新星。這種類型的超新星被稱為**核心坍縮超新星**（Core Collapse Supernova, CCSN）。恆星坍縮超新星長久以來一直被認為是重力波輻射的來源之一。然而，由於坍縮的起源涉及非常複雜的物理機制，因此其重力波輻射難以準確預測。如果能夠成功偵測到這些重力波，將能提供大量有關坍縮動力學的重要資訊。然而，重力波訊號預計會非常微弱，比起兩顆中子星或兩顆黑洞合併時發出的訊號，其強度小上數個數量級。只有發生在銀河系或**本星系群**內的核心坍縮超新星才能發出足夠強的重力波輻射，使其能夠被目前的地面探測器網絡偵測到。這些探測器包括美國的 LIGO（雷射干涉引力波天文台）、義大利的 Virgo 探測器，以及日本的 KAGRA。不幸的是，核心坍縮超新星的發生率非常低。平均而言，每個銀河系每個世紀大約僅發生幾次。截至目前，1987 年在大麥哲倫星雲（距離 50 kpc 或 163,000 光年）觀測到的 SN1987A，仍然是我們本地宇宙中最新的一顆核心坍縮超新星。為了增加可能的探測源數量，LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 合作計畫正致力於搜尋來自更遙遠核心坍縮超新星的重力波訊號，範圍擴展至約 3,000 萬光年，這是距離鄰近仙女座星系約 10 倍的距離。

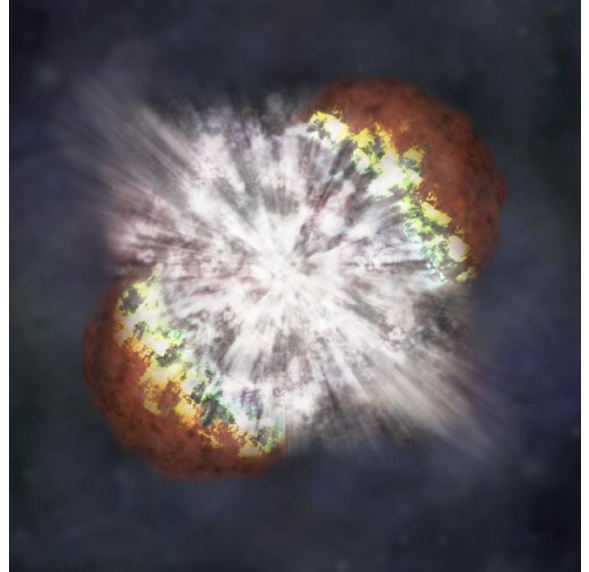


圖 1：一顆超新星的藝術示意圖，這是最強大的天文現象之一，也是大質量恆星的最終命運。圖片來源：NASA/CXC/M.Weiss

延伸閱讀：

拜訪我們的網站
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



點[這裡](#)觀看原始英文版科學摘要

論文中的圖

如需更多有關這些圖片及其製作方式的資訊，請參閱免費提供的期刊[預印本](#)。

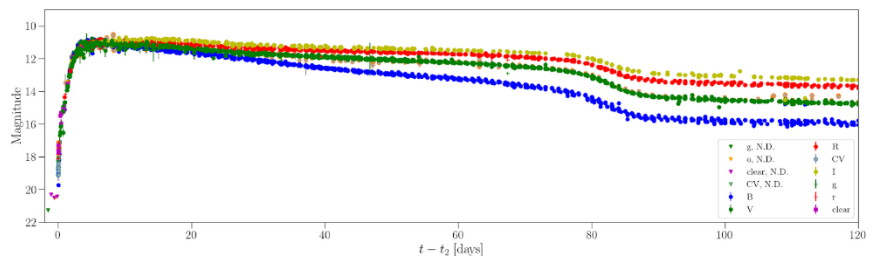


圖 2：超新星 SN 2023ixf 的**光變曲線**，涵蓋不同測光波段，觀測時間長達 120 天。

為何 SN2023ixf 對重力波天文學具有研究價值？

SN 2023ixf 是一顆第 II 型超新星，由業餘天文學家板垣公一於 2023 年 5 月 19 日發現，所在的母星系為渦狀星系（Messier 101，亦稱 M101）。SN 2023ixf 之所以值得關注，是因為它發生的距離相對較近。該超新星位於 6.7 百萬秒差距（Mpc），即約 2,180 萬光年遠，是 LVK 探測器運行期間發現的最近的核心坍縮超新星之一，為尋找可能的重力波對應體提供了極佳機會。SN 2023ixf 可與 SN 2017eaw 相比，後者發生在幾乎相同的距離內的另一個星系。然而，當時的 LIGO 探測器靈敏度僅為 2023 年的 1/2 至 1/3，即比現在低 2 到 3 倍。當 SN 2023ixf 發生時，兩台 LIGO 探測器雖然處於運行狀態，但仍然處於調試階段，尚未正式進入 LVK 合作計畫的第四次觀測運行（O4），該運行於 2023 年 5 月 24 日正式開始。因此，在 SN 2023ixf 坍縮發生的關鍵時刻，兩台 LIGO 探測器並未能夠持續進行觀測。

但是，我們如何確定核心坍縮發生的確切時間呢？SN 2023ixf 已被多個光學、X 射線和電波望遠鏡進行後續觀測。作為典型的**核心坍縮超新星**，其**光變曲線**顯示，在發現後約 5 天達到最大亮度，之後進入持續約 1 個月的高原期（詳見圖 2）。由於擁有大量觀測數據，科學家能夠對**衝擊波爆發**（shock breakout）的時間（即首次可見光出現的時刻）進行相當準確的估計。然而，這並不代表坍縮發生的時間。這是因為坍縮與衝擊波波爆發之間存在時間延遲，而該延遲時間取決於核心坍縮的恆星性質。來自地面望遠鏡、哈伯太空望遠鏡（HST）和史匹哲太空望遠鏡（Spitzer）的 M101 星系在超新星爆發前的影像數據顯示，SN 2023ixf 的前身星可能是一顆多塵埃、光度可變的**紅超巨星**，其質量估計在 8 至 20 倍太陽質量之間。然而，這種質量的不確定性使得坍縮可能發生在衝擊波爆發前最長 5 天。在這段時間內，兩台 LIGO 探測器（漢福德 H1 和 利文斯頓 L1）僅有 15% 的時間同時在運行並收集數據。

我們發現了什麼？

核心坍縮超新星的重力波訊號非常複雜，只能透過以廣義相對論作為重力框架的流體力學模擬來預測。然而，這些預測依賴於其原恆星的參數，而這些參數通常是未知的。因此傳統的**匹配濾波**（matched filter）技術並不適用。取而代之的是，我們使用**協調波爆**（Coherent Wave Burst; cWB-XP）演算法，該演算法能在至少兩個探測器的數據中尋找相關性，並假設重力波訊號為短暫訊號（最長約 1 秒），頻率範圍在約 20Hz 至 2kHz 之間。

在坍縮可能發生的 5 天時間窗口內，並未發現任何值得關注的候選事件。更具體地說，最顯著的事件其誤報率（false alarm probability）高達 76%，因此極有可能是數據噪音。沒有偵測到重力波訊號的原因可能是坍縮發生時，兩台 LIGO 探測器並未處於觀測模式（只覆蓋了 15% 的時間）。另一個原因則可能是 SN 2023ixf 所發出的重力波訊號過於微弱，難以被偵測。我們的估算顯示，即便根據數值相對論模型最樂觀的預測，可偵測的重力波訊號最遠也只能達到約 15 萬光年外的大麥哲倫星雲（Large Magellanic Cloud, LMC）。這個距離比 SN 2023ixf 近了兩個數量級，因此 SN 2023ixf 產生的重力波訊號極有可能無法被目前的探測器捕捉到。

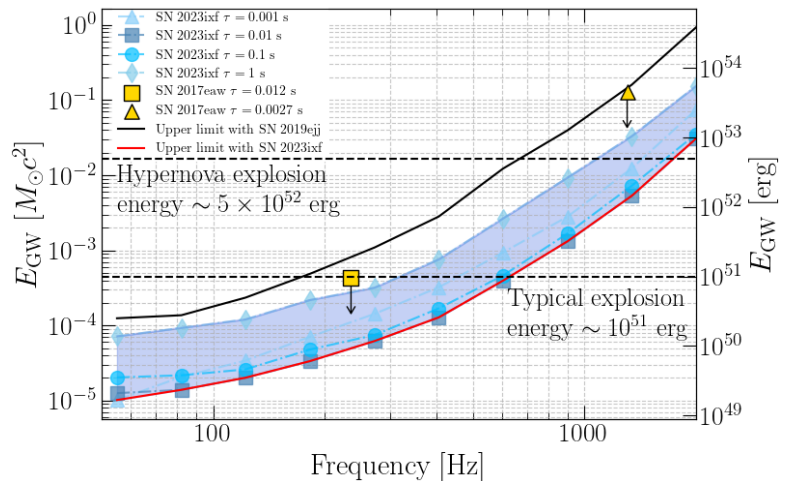


圖 3：重力波能量（以太陽質量乘以光速平方或爾格（erg）為單位）隨棒模式（bar-mode）訊號頻率變化的關係圖，偵測效率為 50%，誤報率為每天 2.1 次。藍色陰影區域代表不同持續時間（從數毫秒到 1 秒）的棒模式訊號所對應的結果。圖例中的參數 τ 表示訊號的持續時間。黃色方形與三角形標記代表根據 SN 2017eaw 數據所約束的重力波能量範圍。黑色曲線表示來自 SN 2019ejj 的最佳約束結果。水平虛線分別顯示標準超新星與極超新星（hypernova）的典型電磁輻射能量範圍。

我們學到了什麼？

我們並未偵測到與 SN 2023ixf 相關的重力波訊號。但如果假設坍縮發生時兩台 LIGO 探測器均處於觀測模式，我們可以估算坍縮必須達到多高的能量才能被重力波探測器偵測到。當然，這一結果取決於超新星爆炸機制：前身星是否在旋轉？物質對流是否足夠強大，以激發**原中子星(Proto-neutron star)**的基本模式？靜態吸積衝擊波不穩定性是否增強了微中子加熱？磁場是否在增強訊號方面發揮了作用？由於我們無法確定這些條件，我們考慮一個簡單的旋轉三軸橢球體（類似於橄欖球）作為模型，以模擬**棒模式不穩定性(Bar-mode instability)**，這種不穩定性在某些核心坍縮模擬中可能出現。SN 2023ixf 使我們能夠對此類事件可能釋放的重力波能量上限的約束提升近一個數量級。若假設重力波訊號以低頻率輻射，我們對 $10^{-5} M_{\odot}c^2$ 級別的能量變化具有敏感度（如圖 3 所示）。此能量對應於50% 偵測效率、76% 誤報機率的條件下可能被探測到的訊號。這一結果需要與核心坍縮超新星數值模擬的預測結果進行比較：非旋轉原恆星的低能坍縮所發出的重力波能量約為 $10^{-10} M_{\odot}c^2$ ，而高度旋轉的前身星則可達 $10^{-6} M_{\odot}c^2$ 。這些能量均以太陽質量 (M_{\odot}) 與愛因斯坦質能方程 $E=mc^2$ 進行度量。換句話說，即便對於 SN 2023ixf 這類核心坍縮事件而言，我們目前的重力波探測能力仍與最低能量的超新星爆炸機制預測相差數個數量級。

棒模式 (bar-mode) 重力波訊號的振幅可透過非對稱因子來參數化，這個因子也稱為橢圓率。圖 4 顯示了一系列重力波訊號頻率與持續時間所對應的橢圓率。對橢圓率最嚴格的限制來自持續時間最長的訊號，其範圍從最低搜尋頻率的 10^3 到 2 kHz 處的 1.04。這一結果相較於第三次觀測運行 (O3) 期間發現的 SN 2019ejj，顯著改進了先前的橢圓率限制。

展望

雖然 SN 2023ixf 是近年來最具研究價值的**核心坍縮超新星**之一，特別是在搜尋重力波輻射方面，但不幸的是，它發生時地面重力波探測器網絡並未完全運行，導致我們僅能獲取 15% 可能坍縮時刻的重力波數據。這大幅降低了探測到重力波訊號的機率。假設坍縮發生時兩台 LIGO 探測器均處於觀測模式，SN 2023ixf 可用來約束重力波輻射模型的參數空間。然而，根據目前這一代重力波探測器的能力，最有可能偵測到的還是發生在本星系內的核心坍縮超新星。

延伸閱讀：

拜訪我們的網站：

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

在**這裡**或是 [arXiv](https://arxiv.org) 閱讀完整且免費的科學文章預印本。

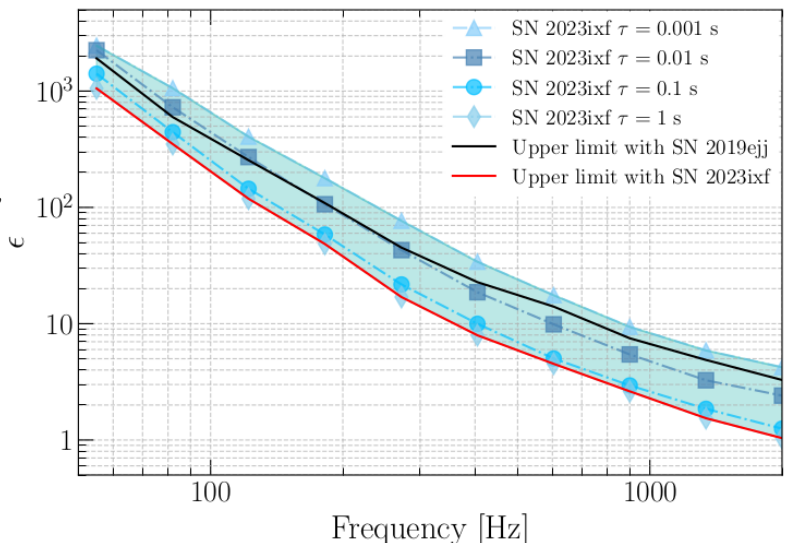


圖 4：原中子星 (PNS) 橢圓率 (ellipticity) 限制，作為棒模式 (bar-mode) 重力波 (GW) 訊號頻率的函數，條件設定為50% 偵測效率與每天 2.1 次的誤報率。陰影區域包含來自不同 GW 訊號持續時間 (τ 參數，見圖例) 的結果。橢圓率參數表示訊號源的形狀偏離理想球體的程度。對高頻 GW 訊號的限制最為嚴格。

科學名詞字彙

錢德拉塞卡極限 (Chandrasekhar limit)：白矮星所能維持自身穩定的理論最大質量。當其質量超過 1.4 倍太陽質量時，電子簡併壓不足以抵抗引力，使得恆星核心進一步坍縮成中子星或黑洞。

簡併電子氣體 (Degenerate electron gas)：高密度電子氣體，其中電子被限制在有限體積內並滿足量子力學簡併條件。

包立不相容原理 (Pauli exclusion principle)：在量子力學中，包立不相容原理指出，兩個具有半整數自旋 (費米子) 的相同粒子不能同時佔據相同的量子態。該原理於 1925 年由奧地利物理學家沃夫岡·包立 (Wolfgang Pauli) 首次提出，最初用於描述電子的行為。

核心塌縮超新星 (Core collapse supernova, CCSN)：當大質量恆星的核心在引力作用下坍縮時，發生的劇烈爆炸事件，通常伴隨大量能量釋放，並可能留下中子星或黑洞作為殘骸。

本星系群 (Local Group)：包含超過 50 個星系的星系群，其中包括銀河系、仙女座星系和三角座星系其範圍約 1,000 萬光年。

I 型超新星 (Type I supernova)：大質量恆星生命週期結束時發生的恆星爆炸。這類超新星的光譜中含有氫譜線，通常伴隨重力波輻射的產生。

靜態吸積衝擊波不穩定性 (Standing Accretion Shock Instability, SASI)：核心坍縮後，停滯的衝擊波前緣會產生大尺度的振盪運動，該過程持續數百毫秒，並可能影響超新星爆炸的對流過程。

光變曲線 (Light curve)：顯示天體光強度隨時間變化的曲線。通常測量特定頻率波段內的光強度變化，用於研究超新星、變星等天體的演化。

衝擊波爆發 (Shock breakout)：當超新星爆炸的衝擊波穿透其前身星的光球層 (stellar photosphere) 時，釋放出的第一批可見光子，標誌著核心坍縮超新星的首個可偵測電磁訊號。

紅超巨星 (Red supergiant, RSG)：宇宙中體積最大的恆星之一，屬於超巨星光度分類，通常是大質量恆星在晚期演化階段的形態。

匹配濾波 (Matched filter)：訊號處理技術，透過交叉相關從含噪聲數據中識別特定模式。該技術廣泛應用於重力波探測，特別用於分析雙黑洞或雙中子星合併的已知波形。

棒模式不穩定性 (Bar-mode instability)：快速旋轉的恆星或坍縮後的殘骸中可能出現的現象，恆星或核心形狀偏離球形，呈現棒狀結構，此類不穩定性可導致顯著的重力波輻射。

原中子星 (Proto-neutron star, PNS)：質量小於約 20 倍太陽質量的恆星坍縮後所形成的核心殘骸。其密度可達 10^{14} g/cm^3 ，溫度高達 50 MeV/電子，是中子星誕生前的過渡階段。