

轉吧！中子星：探索未知雙中子星的連續重力波

中子星是超新星爆炸的產物，是原始質量介於10到25倍太陽質量的恆星演化殘骸。這些緻密星體的半徑約為十公里，質量則與太陽相似，是我們所能觀測到最極端的環境之一。探討這些緻密星體的結構與組成是現今非常活躍的一個跨領域研究，結合許多粒子物理與天文物理社群的努力。

這些極端緻密（或是高密度）的星體也是一種有趣的實驗室來驗證相對論效應，譬如重力輻射。LIGO 與 Virgo 也成功的偵測到數個**雙中子星合併**的重力波事件。其中GW170817甚至也偵測到所對應的電磁波輻射，是第一個結合重力波與光的多信使觀測。

連續重力波是另一種探索快速旋轉中子星內部結構的方式。擁有非對稱外型的中子星理論上可以以許多的方式存在：外殼的瑕疵，內部結構的擾動震盪，或因為對稱軸與旋轉軸偏移造成的徑動。當中子星快速旋轉，這些結構的形變將以連續重力波的方式輻射。這種形式的重力波強度比雙中子星合併所產生的重力波強度還要弱上數個數量級，但可以持續非常長的時間（數個月到年），因此長時間的數據疊加可以提升訊雜比。

尋找這類型的訊號可以透過已知的可能訊號源來分類，譬如說「鎖定搜尋」針對電磁波觀測已知位置與旋轉頻率的中子星；「直接搜尋」則尋找天空某處可能有未知中子星的所在。這次的研究我們採用「全天搜尋」的結果。「全天搜尋」代表我們在天空所有位置尋找未知中子星的連續重力波，尤其是來自雙星系統的中子星。

孤立中子星所預期的訊號是一個很長的持久波，其頻率透過電磁波或重力波輻射帶走能量而緩慢的減小。這樣的**消旋**(spindown)效應在我們所考慮的中子星分佈中慢到可以忽略。從地球上

重力波偵測器的角度來看，訊號因為地球每日的自轉與公轉而呈現頻率的調變。這樣的訊號在雙星系統中則又會變得更複雜，必須要考慮訊號源與伴星相對移動所造成的**都卜勒頻率調變**。

在這次的搜尋中，我們運用**霍夫轉換**的一種變化方法稱作「BinarySkyHough」來分析**頻譜**數據。頻譜可以告知我們觀測運行中最顯著的頻率資訊。基本的概念是連續重力波的訊號會在光譜中顯示一種非常特殊的調變，如圖1中所示。根據不同目標源的物理特性（譬如旋轉頻率、天空位置），我們可以用一組參數來描述這些頻率調變。因此尋找連續重力波就同等於在辨認數據中的特別頻率軌跡。

由於必須考慮描述雙星軌道形狀的軌道參數，我們必須要考慮比孤立中子星更多的參數。這樣會讓一般的搜尋演算法造成一些問題，也會讓計算資源變得難以處理。一個簡單的方法是利用**圖形處理器(GPUs)**來平行處理一些簡單的計算達到加速的效果。

我們使用LIGO 與 Virgo 在第三次聯合觀測的前期觀測資料（從2019年四月到九月的數據）來搜尋重力波偵測器最靈敏的波段裡的未知中子星在雙星裡的連續重力波訊號。結果我們沒有發現任何連續重力波訊號的證據，但我們可以透過研究模擬數據分佈的回復程度來估算這次搜尋的靈敏度。靈敏度可以想像成是我們的搜尋方法所能找到最弱的重力波振幅。在我們所分析的參數範圍中，我們找到目前最好的靈敏度，最弱可偵測的振幅比過往的估計還要低了60%。

我們可以用這些分析結果來詮釋兩項天文物理有趣的問題：我們可以搜尋到離地球多遠的目標？在我們搜尋的範圍內，連續重力波的波源允許多大的星體形變？圖2與圖3總結了一個連續重

力波源在不同重力波頻率中所允許的最遠距離與最強形變。同前面所述，我們不考慮連續重力波源的消旋。這樣的假設給定了一個中子星最大形變的絕對極限，表現在圖中的陰影區。換句話說，如果沒有其他的平衡機制，我們可以排除陰影區的結果，因為這些區域暗示了更強的消旋速率。中子星**吸積**其伴星的物質是一個可能的機制來平衡消旋。這些結果顯示LIGO 與 Virgo 儀器靈敏度的提升，讓我們對中子星有了更多的了解，也更靠近數值模擬的預測結果。

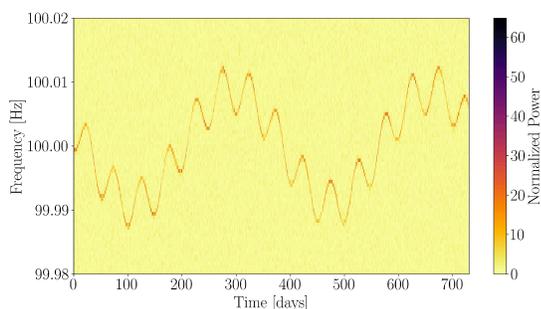


圖 1: 模擬一個強烈連續重力波在光譜圖中的例子。在這個例子中，中子星以每秒旋轉50次的速度繞行一個週期為50天的伴星。整體的頻率約為100赫茲是旋轉頻率的兩倍。週期約為365天最寬的震盪代表了因為地球繞行太陽所產生的都卜勒調變。週期50天較窄的震盪則是因為連續重力波源與伴星互繞的頻率。數據的長度（兩年）比這次搜尋（六個月）的時間還要長單純只是說明的用途。

了解更多:

拜訪我們的網站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

在[這裏](#)閱讀完整科學論文的預印本。在[這裏](#)閱讀關於連續重力波的簡介。

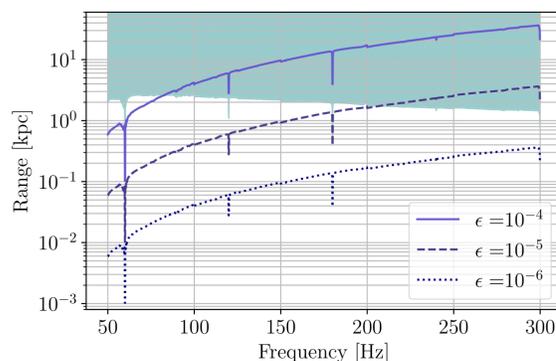


圖 2: 本次研究在不同頻率所對應的最大可能距離。不同曲線表示不同中子星變形程度（橢圓扁率）所對應的數值。較強的變形與較高的頻率則會有較強的連續重力波，允許我們搜尋到更遠的波源。陰影區則對應到超過本次研究所尋找的消旋速率（假設沒有其他平衡機制）。做為參考，已知最近的中子星距離我們約為 0.1 kpc。

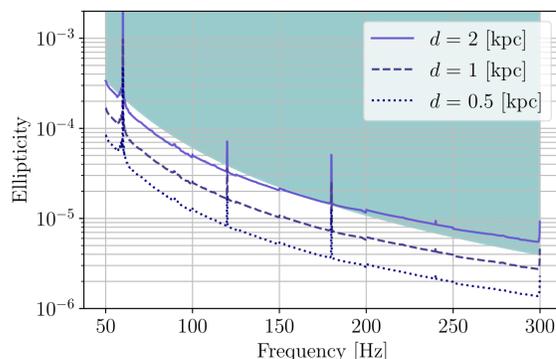


圖 3: 搜尋範圍中在不同頻率所允許的最強中子星變形。不同的曲線表現中子星的形變如何產生可偵測的連續重力波。因為重力波強度隨著距離而衰減，較近的訊號源必須有較弱的橢圓扁率。陰影區則對應到超過本次研究所尋找的消旋速率（假設沒有其他平衡機制）。

詞彙表

- 中子星 (Neutron star): 質量約為10到25倍太陽質量的恆星在經歷超新星爆炸後的殘骸。典型的中子星質量約為1-2倍太陽質量半徑約為10-15公里，是目前所發現最緻密的星體之一。
- 連續重力波 (Continuous gravitational wave): 持久連續的重力波輻射，請參閱[本文](#)來進一步了解。
- 橢圓扁率 (Ellipticity): 用來測量一個物體離球型多遠，用赤道平面的變形量與垂直方向的變形量的比值來定義。
- 消旋 (Spindown): 一個旋轉中子星透過重力波或電磁波輻射損失能量而旋轉變慢的速度。
- 都卜勒偏移 (Doppler shift): 波源與觀測者之間因為相對速度而造成頻率的改變。
- 雙星系統 (Binary system): 一對天體因為重力互相吸引而束縛在一起。
- 霍夫轉換 (Hough transform): 一種檢驗圖片中特定形狀的演算法，譬如本文描述的光譜圖。
- 頻譜圖 (Spectrogram): 視覺上來展現頻率組成隨時間的變化圖。
- 圖形處理器 (Graphics Processing Unit; GPU): 特別用來平行處理大量數據的一種特殊硬體。
- 吸積 (Accretion): 兩顆互繞星體之間因為重力而有物質的轉移。
- 千秒差距 (Kiloparsec; kpc): 一千秒差距。一[秒差距](#)是一個天文上長度的單位約等於三光年或是三十一兆公里。