

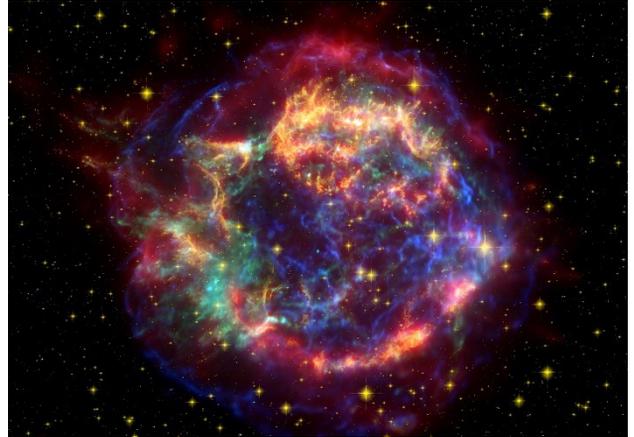
搜尋O3初期數據年輕超新星殘骸的連續重力波

核心坍縮超新星是**大質量恆星**死亡時的一場毀滅性爆炸。爆炸後殘留一個被包圍在殘骸中的緻密星體—**中子星**（見圖一）。隨著時間增加，超新星殘骸可以延伸至數**光年**但中心的中子星大小則只有約30公里，質量約為1.4倍的太陽質量。中子星是宇宙間最緻密的星體之一，它的組成與內含的物理也是最迷人與未解的物理難題，啟發許多不同領域研究者的興趣，包含天文物理、核物理、粒子物理、與凝態物理。對於**LIGO**與**Virgo**來說，中子星很重要因為它們是**連續重力波**的可能訊號源。在近期的一篇論文中，我們透過2019年開始六個月的數據來尋找銀河系中15個年輕超新星殘骸的連續重力波。這六個月的數據是重力波偵測器第三次連續觀測的前半段數據，也稱作O3a。

儘管**瞬發**的重力波爆發已經開始司空見慣，連續重力波仍然未被觀測到。這是因為相比於短暫卻強大的瞬發重力波爆發，連續重力波非常微弱也比較難與雜訊區別。我們必須要很有耐心地收集長時間的訊號才能偵測到符合我們訊號模型微弱的連續重力波。在這次研究中我們搜尋快速旋轉中子星所產生的連續重力波。任何偏離完美與均勻球的變形都會產生頻率為兩倍旋轉頻率的重力波。越多的偏移則產生越強的**重力波應變**（也就是越強的訊號）。我們稱這樣的星星是「三軸的」因為這可以類比於三維的橢球，或是橄欖球。

在我們的銀河系中有很多超新星殘骸。我們挑選了其中15個超新星殘骸，年齡介於100到10,000年且旋轉頻率未知。我們針對年輕的超新星殘骸因為年輕的中子星比較有機會有不均勻的形變。年輕的中子星也轉得比較快可以產生較強的重力波應變。但因為我們不知道這些中子星的轉速，我們要搜尋較廣泛的一個頻率範圍。年輕的中子星也透過旋轉來釋出旋轉能量導致轉的變慢（消旋），也此我們也需要考慮可能的消旋速度。最後，透過孤立中子星的旋轉頻率觀測，我們也發現旋轉頻率有一些微弱但隨機的變化。

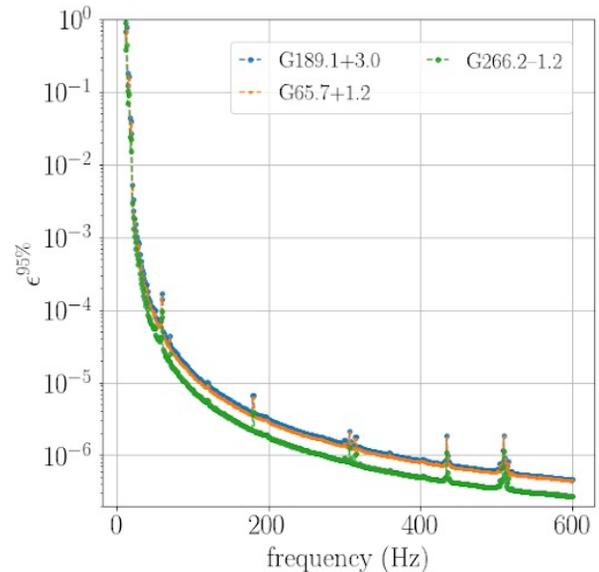
在標準的搜尋方法（也稱作協調搜尋）裡，我們建立了一組可能的訊號模板並掃描觀測時間中的數據檢測是否有與模板吻合。如果我們找到了適當的訊號模板且沒有太多的模板數，我們可以說這個協調搜尋對數據很敏感。然而我們有十五個不知頻率範圍的目標，且旋轉頻率可能有微小且隨機的變動。在這樣的情境下，協調搜尋變得在計算上非常困難。因此我們改用三個半協調搜尋的方法來搜尋O3早期的數據。「半」協調搜尋是指透過協調搜尋來搜尋一小區塊的數據然後再整合到整個觀測時間。



圖一：仙后座A (Cassiopeia A) 超新星殘骸。本次搜尋的年輕超新星殘骸之一。圖片版權：NASA/JPL-Caltech/Krause et al.

論文中的圖片

關於圖片中更多的資訊以及如何產生這些圖可以參閱期刊的[預印本](#)。



圖二：論文中部分目標分析中子星橢圓率 ϵ 的95%上限值。橫軸是偵測的重力波頻率；縱軸是橢圓率的95%上限值。綠色(G266.2-1.2)、藍色(G189.1+3.0)與橘色(G65.7+1.2)曲線代表我們可能偵測到的最低橢圓率。這是中子星可有的橢圓率的上限值（如果中子星更橢圓，我們則可以偵測到）。

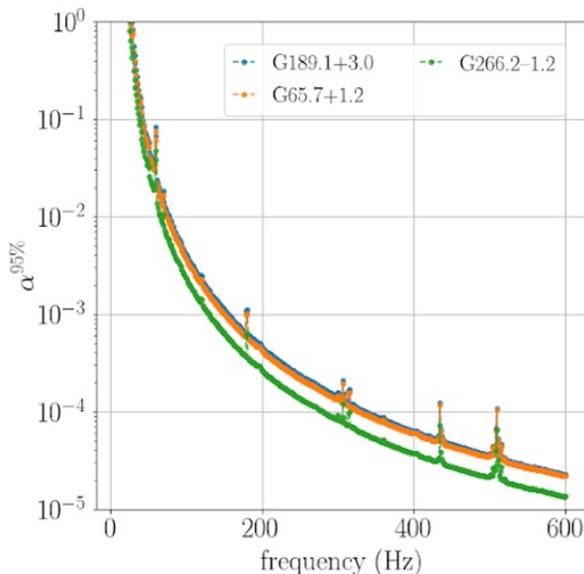
較小區塊的數據代表需要較少的模板來尋找，因此半協調搜尋在計算上較為有效率。我們嘗試了三種半協調搜尋的方法來尋找O3早期數據的連續重力波：一種針對靈敏度最佳化；一種針對快速改變的訊號最佳化；最後一種則對一個特殊的天文物理模型最佳化。這三種搜尋方法都沒有找到任何的連續重力波。

沒有訊號不代表沒有結果。我們仍然可以估計我們這次搜尋的訊號靈敏度並進而推測星體的一些特性。快速旋轉的中子星會散發連續重力波；越多的形變則有越強的訊號。透過設定一些訊號強度的極限，我們可以反推中子星形變強度的上限。中子星不對稱性的測量參數是其橢圓率 ϵ 。不同的中子星模型可以預測不同的橢圓率上限，但是數值都約為 $\epsilon < 10^{-6}$ 。在圖二中我們描繪了三個目標的橢圓率極限。縱軸為這次研究所找到的橢圓率的95%上限值。橫軸則為對應的重力波頻率，可以有兩種方法影響其橢圓率。其一，在特定頻率下重力波的應變程度會隨著橢圓率越高越強。其二，LIGO與Virgo的儀器靈敏度也是隨著頻率而改變，因此重力波應變程度的上限也會受到頻率不同而有影響。雖然如此，我們仍然可以推論橢圓率是低於理論上限($\epsilon < 10^{-6}$)的。隨著靈敏度的提升，我們可以藉此排除一些不合理的中子星物理模型。

三軸中子星並不是中子星唯一產生連續重力波的方法。中子星旋轉也可以透過r模式震盪來產生連續重力波，其震盪參數可以用震幅 α 來描述。其震盪的理論上限值約為 $\alpha < 10^{-3}$ 。透過橢圓中子星所產生的重力波應變程度上限可以轉換成 α 的上限值（見圖三）。圖三中的縱軸表示 α 值的95%的信賴上限值，橫軸則為重力波頻率。我們發現三個目標超過150赫茲的頻率其 α 值皆小於千分之一($\alpha < 10^{-3}$)，也限制了這些星體r模式振幅的上限強度。

隨著持續收集數據與方法的進步，首次偵測到連續重力波的機率也跟著提升。在那之前我們可以用未偵測到的數據來限制其物理模型並提升我們搜尋的靈敏度。

在[這裡](#)閱讀完整的科學論文的預印本。



圖三：r模式震盪震幅 α 在本文研究論文中部分目標與分析的95%上限值。橫軸是偵測的重力波頻率；縱軸是震幅的95%上限值。綠色(G266.2-1.2)，藍色(G189.1+3.0)，與橘色(G65.7+1.2)曲線代表我們可能偵測到的最低震幅。這是中子星可有的r模式震盪上限值（如果中子星有更強r模式震盪，我們則可以偵測到）。

拜訪我們的網站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



詞彙表

連續重力波(Continuous gravitational wave): 有著連續與接近固定頻率的重力波訊號。不同於雙黑洞合併只有短暫與快速提升頻率的重力波訊號（請參閱[此文](#)）。

橢圓率(Ellipticity): 用來測量一個物體有多偏離球形。用垂直與水平平面中有多大的相對變形來定義。

光年(Light-year): 光行走一年的距離，是一個距離單位。一光年約為9.46百億公里。

LIGO雷射重力波干涉儀 (LIGO): LIGO是位於美國的一對重力波偵測器。其中一個位於路易斯安那州，另一個則在華盛頓州。兩個偵測器都是屬於雷射干涉儀，臂長為四公里。

大質量恆星(Massive star): 大質量恆星為質量約為八倍太陽質量以上的恆星。只有大質量恆星有機會形成中子星並伴隨著超新星爆炸。較低質量的恆星演化末期則會變成白矮星。

中子星(Neutron star): 大質量恆星坍縮後形成的高密度的星體。一個典型的中子星質量約為地球的百萬倍但是大小卻只有約三十公里。

R模式(R-modes): 中子星內部流體所形成的一種波，其頻率跟星體的自轉頻率相當。年輕中子星的R模式頻率是LIGO與Virgo所能偵測到的頻率。

靈敏度(Sensitivity): 描述一個儀器能偵測到訊號的能力。擁有較弱雜訊的偵測器能偵測到更弱的訊號，也可以說有較高的靈敏度。

應變(Strain): 兩個測量點之間因為重力波通過時空擾動所造成的距離改變幅度。就算是很強的重力波訊號通過地球時所造成的重力波應變仍然是非常小，約小於 10^{-21} 。

超新星 (Supernova): 一場突然變亮然後漸漸變暗消失的猛烈爆炸。一個超新星爆炸約可媲美整個星系的光亮。超新星有很多不同的種類，有些來自大質量恆星的坍縮，有些來自兩顆白矮星的碰撞。

瞬變重力波 (Transient gravitational waves): 短暫又強烈的重力波劇烈事件，譬如來自雙中子星合併。大部分瞬變重力波事件只在偵測器出現幾秒鐘或是更短。

上限值 (Upper limit): 某些量值的上限值（譬如重力波應變程度）代表我們能偵測到95%信心值的最小數值。因此如果我們仍未偵測到，代表有95%的信心沒有任何訊號源能產生高於這個數值的訊號。

Virgo處女座重力波偵測器 (Virgo): 是一個位於義大利的地面重力波干涉儀偵測器。