

## 毫秒脈衝星的山岳？

目前所有被偵測到的重力波訊號均來自雙黑洞和雙中子星合併系統，但旋入的雙星系統並不是產生重力波的唯一途徑：中子星的自旋也能發出重力波。中子星的旋轉速度很快，但可能會隨著釋放重力波而慢慢減速。這個過程被稱為自轉減慢 (spin-down)。因減慢的幅度相當低，故中子星的自轉頻率幾乎恆定。而被中子星旋動所牽引的重力波訊號也因而非常穩定，一般被歸類為“連續波”的一種。在過往的重力波觀測中，雖然還沒有找到連續波訊號，但已經對快速旋轉的中子星的重力波振幅設置了嚴格的上限。圖一為中子星雙星系統的構想圖。

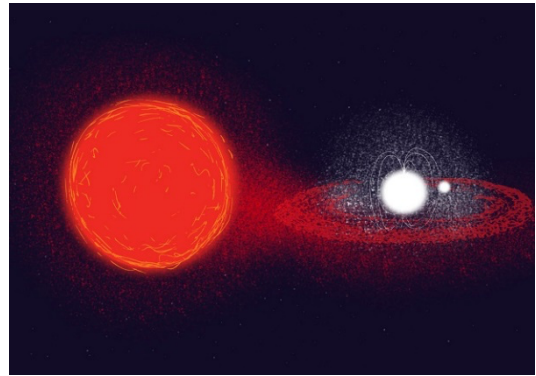
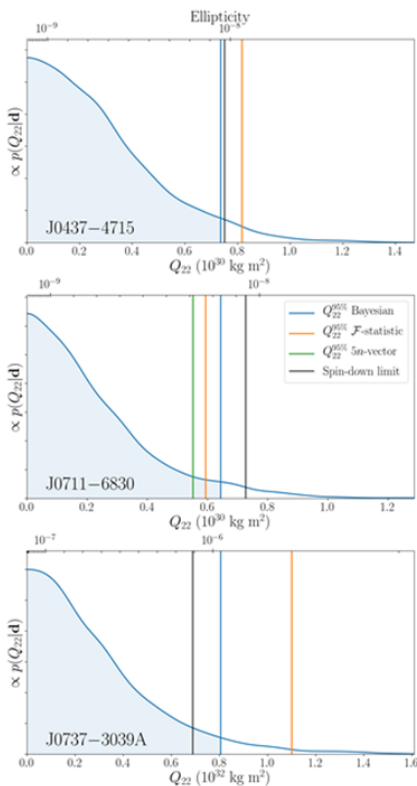


圖1：這是毫秒脈衝星PSR J1023 + 0038的想象圖（右側帶有磁力線的白色物體）。它通過吸積盤（紅色環繞著脈衝星）從其伴星（左側的紅色物體）中提取物質。圖片來源：歐洲航天局（ESA）。

脈衝星是旋轉的中子星，並且是一個非常準確的時鐘：它們的電波和X光脈衝有著驚人的規律。透過高精度天文觀測測量這些脈衝的到達時間，我們可以精準地監測它們的自旋變化。

但是，我們對引起頻率變化和自轉減慢的物理機制不甚了解，導致脈衝的到達時間跟預期有微小的偏差。重力波觀測可以幫助解釋這些變化。



要產生連續的重力波，脈衝星的旋轉必須不對稱。最簡單的成因是從星體表面隆起的“山”。造成這種變形的原因有很多：中子星在超新星中誕生後，“高山”可能會被“凍結”在星體的表面或核心中。它們也可能是由掉落在星體上的物質或者通過極大的磁場所產生。基於不同的輻射機制，重力波可以以相同或兩倍於星體的自轉頻率產生。第一種情況是中子星在自旋時擺動或具有一個未完全鎖定在恆星殼的超導核心，導致其內部密度分佈錯配；第二種情況是由任何不對稱的變形所引起。

對於這一次連續重力波的偵測分析，我們沒有針對特定機制所產生的重力波進行檢測，而是期望先尋找以任何型式出現的連續訊息，再探究其物理機制。從雷波、X光以及伽瑪射線的天文觀測，我們可以得知許多脈衝星的精確位置、自轉頻率、自轉減慢等，大大提高我們未來偵測到連續重力波訊號的機會。

圖2（論文的圖2）：基於這些新發現，對三顆再生脈衝星的質量四極矩 $Q_{22}$ 和橢圓率（變形水平）的限制。曲線是貝氏事後分布，因此在數據和模型假設的情況下，四極矩兩個值之間的曲線下面積是真實值在該範圍內的概率。黑色垂直線代表每個脈衝星的自轉減慢極限，彩色垂直線代表四極矩或橢圓率低於某個值的95%可信度。當四極矩（或橢圓率）的上限測量值（彩色垂直線）位於黑線的左側時，表示自轉減慢極限已被超過。對於距離358光年遠的脈衝星J0711-6830，完美球形赤道產生的畸變被限制為小於人類頭髮的寬度！

對於這些脈衝星的測量，一個重要的目標是超越其“自轉減慢極限”。這個極限就是假設中子星的自轉減慢全都轉換為重力波，而超越這極限就是儀器的靈敏度能夠測量到振幅更小的重力波。一旦搜索達到此靈敏度，我們便可以探索重力波輻射機制的物理，並且有機會檢測到重力波。

這一次研究我們使用雷射干涉重力波天文台(LIGO)與處女座干涉儀(Virgo)在第一次，第二次和第三次觀測期間所獲得的數據，並假設重力波的訊號是中子星旋轉頻率的一倍或兩倍，來限制來自五個脈衝星的連續重力波訊號。儘管我們沒有檢測到任何訊號，但儀器的靈敏度，足以讓我們首次超越其中兩顆脈衝星的自轉減慢極限。值得注意的是，它們是“毫秒脈衝星”，這意味著它們旋轉得非常快。由於重力波的發射在愈高的頻率下變得愈有效，因此這些快速旋轉的中子星不需要大幅度變形即可產生可檢測到的重力波。事實上，我們發現脈衝星J0711-6830的赤道位於約358光年遠，與一個完美的球體相比，其變形程度不會超過人類的頭髮的寬度！這些上限可以在圖2和圖3中更詳細地看到。

對於旋轉較慢的脈衝星，例如蟹狀星雲(Crab)脈衝星和船帆座(Vela)脈衝星，它們需要更大的變形才能生成可檢測的訊號。相比之下，變形較小的星體更容易形成並能承受中子星極強的重力，因此，對重力波天文物理來說，超越毫秒脈衝星的自轉減慢極限是非常重要的突破。

### 延伸閱讀：

- 網頁：[www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- 完整的科學論文
- 一篇由 Michael Kramer 寫的關於脈衝星的回顧文章 (PDF 檔, 1.2 MB)
- 瀏覽 NASA 的“Imagine the Universe!”有關脈衝星的文章

瀏覽我們的網頁：

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

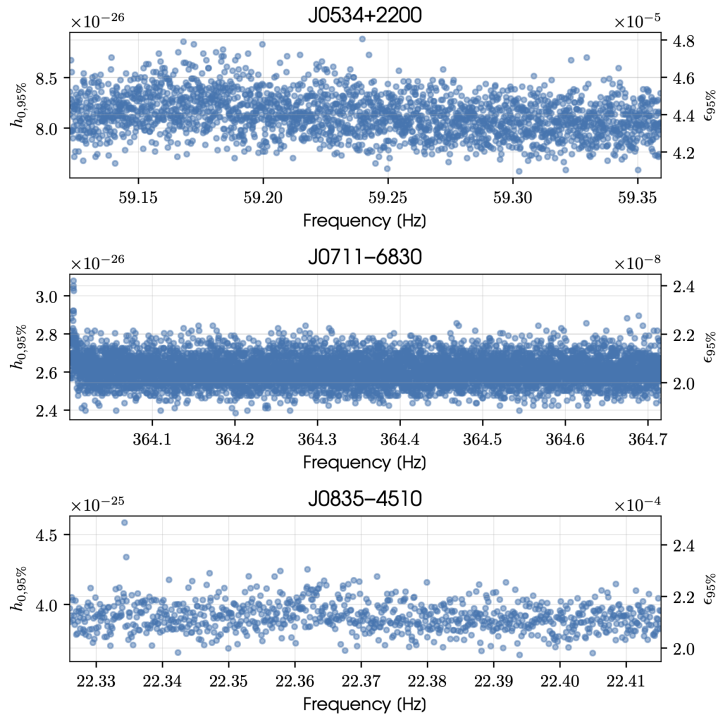


圖3 (論文的圖6)：透過窄頻分析的三個脈衝星的重力波振幅 $h_0$ 和橢圓率 $\epsilon$ 的95%可信水平上限。從上到下，是蟹狀星雲脈衝星，一顆被超越其自轉減慢極限的毫秒脈衝星和船帆座脈衝星的上限。

### 專用詞彙

**雷射干涉重力波天文台 (LIGO)：**雷射干涉引力波天文台 (LIGO) 是美國的一對重力波探測器。一個位於路易斯安那州利文斯頓附近，另一個位於華盛頓州漢福德附近。這兩個探測器是大型雷射干涉儀，各有兩條互相垂直直達4公里長的臂，目的是測量由經過的重力波對臂長產生的相對變化。

**處女座干涉儀 (Virgo)：**位於意大利比薩附近的重力波探測器。是一座擁有臂長3公里的雷射干涉儀。

**靈敏度 (Sensitivity)：**描述探測器檢測訊號的能力。具有較低雜訊水平的探測器能夠檢測到較弱的訊號，也可以說有較高的靈敏度。

**自轉減慢 (Spin-down)：**脈衝星是旋轉的中子星，其自轉速度（也稱為自旋）隨時間降低（相當於旋轉週期增加）。

**自轉減慢極限 (Spin-down limit)：**假設來自脈衝星旋轉時損失的所有旋轉動能都轉為重力輻射，我們可測量的重力波振幅的極限。這需要知道脈衝星的精確距離，而實際上脈衝星的距離的不確定性可達約兩倍。但是，我們知道脈衝星還有其他損耗能量的方式，如通過磁偶極輻射，因此該值實際上是星體預期重力波訊號的上限。

**觀測期間 (Observing run)：**重力波探測器採集數據的時段。

**應變 (Strain)：**由傳遞的重力波所引起的時空變形，使兩個測量點的間距變化非常微小。即使是最強的重力波，到達地球的應變通常小於 $10^{-21}$ 。

**上限 (Upper limit)：**在與數據保持一致的同時，描述一些量值可以具有的最大值。在這裡，我們感興趣的是可觀測到的星體的最大四極矩（這與到達地球的信號的固有重力波應變幅度有關）。我們使用95%的可信水平上限，即在真實數據裡，該量值低於此上限的可能性為95%。

**毫秒脈衝星 (Millisecond pulsar)：**快速旋轉的脈衝星，其旋轉週期小於大約30毫秒，並擁有非常低的自轉減慢速度。

**再生脈衝星 (Recycled pulsar)：**一顆脈衝星若果不能以非常快速旋轉被歸類為毫秒脈衝星，但是可以通過吸積來自伴星的物質獲得高旋轉速度。