

## 打量那大跳針者： 波霎 PSR J0537-6910 的 R 震盪模式重力波

波霎 PSR J0537-6910 也稱作「大跳針者(The Big Glitch)」，是一個非常特別的波霎和受到天文學家諸多注目。波霎是快速旋轉的**中子星**，來自於大質量恆星坍縮的內核。這些天體在各方面來說都很極端，除了擁有自然間最強的磁場（比地球磁場強十億倍），還有著宇宙間最緻密的結構。它們同等於把太陽的質量壓縮到一個城市規模的大小，內部的密度甚至超越了原子核密度。「波霎」的名字來自於我們觀測到的電磁脈衝輻射。這些脈衝來自於旋轉中子星磁極所連續發射的電磁波。當磁軸與旋轉軸不平行的時候，輻射波束會如同燈塔般的旋轉，每當波束指向地球時，我們就可以觀測到一個電磁脈衝（見此**動畫示意**）。

仔細計算來自星球脈衝波的時間差就可以用來測量星球的旋轉速度以及這個速度隨時間的變化。旋轉速度隨時間的改變的曲線可以與理論模型來比較。模型中主要的機制來自於波霎帶走了旋轉的能量而降低轉速（稱作**消旋**）。天文學家甚至定義了一個參數稱作制動指數（**braking index**）。如果電磁波輻射為主要的**消旋**機制，制動指數則應該約為3，更大的值則可能來自於重力波輻射。

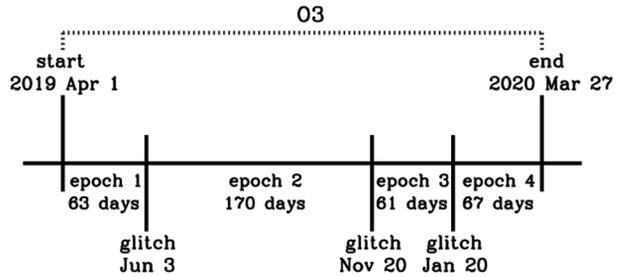
PSR J0537-6910 是一個位於**大麥哲倫星雲**的年輕波霎自轉頻率為62赫茲（也就是每秒轉62圈）。我們曾觀測到這個波霎多次自轉快速的變慢。這個現象稱作波霎的自轉突變(**pulsar glitch**)也就是旋轉速度突然地跳動（因此這個波霎有個非正式的暱稱為「大跳針者」）。不同於其他的波霎，PSR J0537-6910 無法觀測到無線電波反而是觀測到X射線。X射線不能穿透地球的大氣，因此需要到太空中才能觀測。PSR J0537-6910 最初是被1996 – 2012 年時所運行的「羅西X射線計時探測器」（*Ross X-ray Timing Explorer*, **RXTE**）所發現。在2017年國際太空展所先安裝的另一個X射線望遠鏡稱作「中子星內部組成探測器」（*Neutron star Interior Composition Explorer*, **NICER**）也被用來觀測PSR J0537-6910。

這幾年的觀測顯示出這個波霎有著強烈的自旋突變活動並讓我們用來測量自旋突變間的制動指數。RXTE 與 NICER 的觀測指出自旋突變之外的制動指數約為7，這對一般波霎來說是一個很奇特的數值，也是**R震盪模式**所產生重力波所預期的制動指數。R模式是一種存在於快速旋轉星球之間因為科氏力所產生類似流體波的重力波，如同地球上的羅斯貝波（*Rossby wave*）。事實上一些理論甚至推論所有年輕的波霎都有產生R震盪模式的重力波，來讓誕生時所產生的高速旋轉降為一般波霎所觀測到的低速旋轉。儘管還有其他機制（譬如磁場衰變），測量到PSR J0537-6910的制動指數為7暗示說它還在R震盪模式主導的自旋演化時期。

為了測試這個假說，LIGO、Virgo、與KAGRA團隊與NICER團隊合作進行了一個計畫來搜尋PSR J0537-6910因為R模式所產下的**連續重力波**。過去曾經嘗試用第一次(O1)與第二次(O2)的聯合觀測的數據來搜尋這顆波霎的R模式重力波，但當時並沒有X射線計時的數據。在這次搜尋中，我們使用了最新的第三次聯合觀測的數據（O3數據）。

O3除了有比過去O1與O2更低雜訊的數據，更有與NICER從2017年開始觀測PSR J0537-6910的觀測時間重合。NICER的數據精準的測量這類波霎的旋轉速度讓我們可以更準確的分析在自旋突變發生的前後所產生的微弱重力波數據（見圖一）。重力波頻率與波霎旋轉速度的關聯並沒有完全確定，因為這與中子星未知的質量與半徑有關。因此有必要搜尋特定範圍（86 – 97 赫茲，見**這邊**觀看不同頻率的搜尋）的重力波頻率。我們測試了兩種獨立的方法，但兩種方法皆透過配對自旋突變前後的重力波數據與R模式震盪重力波的數據模板庫。這些模板需要兩個與制動指數相關的參數：訊號頻率與頻率改變的速率。我們雖然沒有看到任何重力波訊號的證據，但這些數據仍然可以提供我們一些PSR J0537-6910在R震盪模式中的理論參數限制。譬如說，我們提供了一個重力波振幅的上限值，也就是說如果振幅高於這個數值我們就可以觀測到。圖二比較我們所發現的重力波振幅上限值與理論模型所預測的數值。這些帶狀區域的預測表示振幅與未知中子星質量與半徑的可能。我們的結果顯示我們在探索正確的預測區間，尤其在某些搜尋方法中高頻的部分。

這些上限值遠低於許多理論模型所預測的重力波振幅。在圖三我們轉換為中子星在不同頻率可能的質量範圍。我們的研究排除了PSR J0537-6910 是大質量中子星散發R模式重力波的可能性，但這個情境在低質量中子星中仍然可能。預計在2022年下半年度的下次聯合觀測(O4)，LIGO, Virgo, 與KAGRA 將有機會提供更靈敏的觀測網路與數據，也預期NICER有更準確的計時。



圖一：LIGO-Virgo 第三次聯合觀測(O3) 的時間表、J0537-6910 自轉突變的時間點、以及NICER X射線太空望遠鏡所觀測的時段(epoch)。

拜訪我們的網站：

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

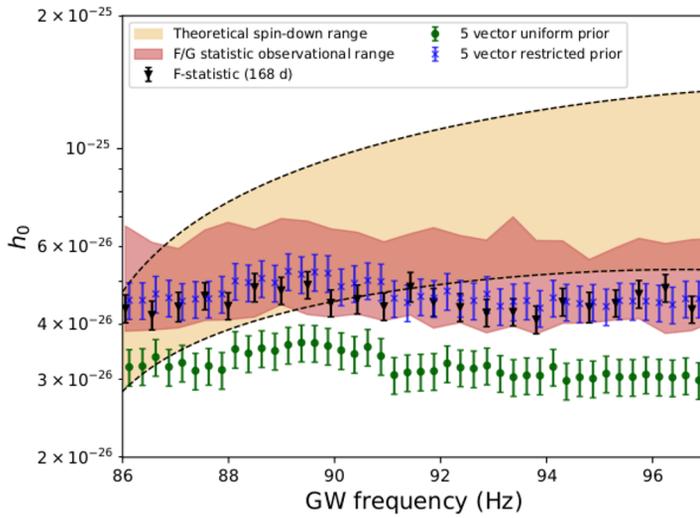
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en)

[www.nasa.gov/nicer](http://www.nasa.gov/nicer)

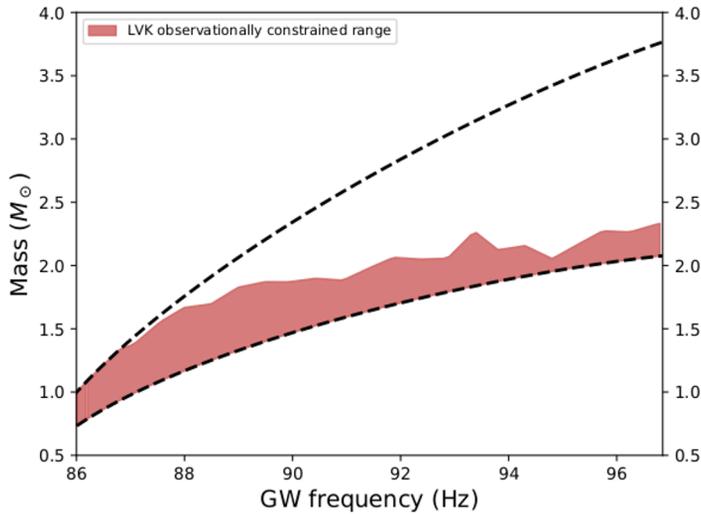


了解更多：

在**這裡**或[arXiv.org](https://arxiv.org) 閱讀科學文章的預印本。



圖二：本次搜尋中挑選的重力波上限值  $h_0(f)$  (縱軸) 與重力波頻率 (橫軸) 的函數。本次搜尋利用了兩種方法分別為「F/G-統計」與「5-向量」方式。虛線代表理論預測的消旋範圍。較深的陰影區域為本次研究所建立的極限值 (見內文)。



圖三：PSR J0537-6910 的質量範圍 (縱軸) 與重力波頻率 (橫軸) 的函數。假設重力波輻射來自於中子星的R震盪模式所造成的消旋。陰影區之外為本次研究所排出的可能數值。

## 詞彙表

**中子星 (Neutron star):** 質量約為10至25倍太陽質量的星球經歷超新星爆炸後所留下的殘骸。典型的中子星質量約為1-2倍的太陽質量，半徑約為10-15公里，代表它們是我們所發現中最緻密的星體之一。

**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](#))。

**消旋(Spin-down):** 中子星透過輻射出能量而導致的自旋下降。

**大麥哲倫星雲(Large Magellanic Cloud):** 距離銀河系約為 50,000 [秒差距](#) 的一個矮星系。大麥哲倫與小麥哲倫星雲皆可以在南半球用肉眼看到。

**R模式(R-mode):** 旋轉星球因為科氏力所造成的一種流體波。