

# O4a 數據分析結果： 未檢測到來自45顆脈衝星之連續重力波

LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 合作團隊最近進行了一項新研究，搜尋來自中子星的極其微弱的連續重力波 (CWs)。這項對第四次觀測運行 (O4a) 第一階段數據的搜尋，標誌著在探測由穩定、孤立天體 (而非如黑洞合併這樣的劇烈事件) 發射的重力波的探索中邁出了又一步。連續重力波是微弱、穩定且幾乎週期性的信號，可能為我們揭示中子星這些宇宙中除黑洞外最致密天體的內部結構提供關鍵線索。

## 什麼是連續重力波？重要性為何？

重力波是由大質量物體運動引起的時空漣漪。迄今為止，LVK 合作團隊已發表了近 100 個重力波信號的檢測結果，主要來自黑洞合併。然而，與這些劇烈事件不同，連續重力波被認為來自具有微小「不完美」的單個中子星。中子星是大質量恆星超新星爆炸後留下的殘骸，其核心極為致密，質量可能超過太陽，但僅壓縮在直徑約 20 公里的球體內。如果這些中子星中有任何一顆具有微小的凸起或形變，隨著其自轉，可能會釋放出微弱且週期性的重力波。檢測到這些波將是一項重大突破，因為它將使科學家能夠研究中子星的「剛性」和結構，揭示極端條件下物質的全新信息。



圖 1：在 X 射線與光學波段觀測到的蟹狀星雲。蟹狀脈衝星位於影像的中央。圖片來源：X-ray – NASA/CXC/ASU/ J. Hester et al.; optical – NASA/HST/ASU/J. Hester et al.

在這項搜尋中，LVK 的科學家專注於 45 顆已知脈衝星 (見圖 2)，以探測它們微弱的連續發射。研究團隊考慮了兩種不同的理論發射模型：一種預測連續重力波會以自旋頻率的兩倍出現 (單譜波模型)，另一種則預測連續重力波會同時出現在自旋頻率的 1 倍和 2 倍 (雙譜波發射模型)。

## 為何是脈衝星？

脈衝星是連續重力波搜尋中特別有趣的目標。它們是具有強大磁場的中子星，會在不同頻率範圍內 (如無線電、X 射線、伽馬射線) 發射電磁波束。隨著它們自轉，這些波束像宇宙燈塔一樣橫掃太空，當它們到達地球時，就會產生脈衝信號。通過不同天文台對脈衝星的電磁觀測，可以準確獲得它們的天空位置、自旋速率及其隨時間的演化信息。這些信息使脈衝星成為連續重力波搜尋的理想候選目標，因為我們可以精確聚焦在可能出現連續重力波的頻率範圍內。

在這項搜尋中，LVK 的科學家專注於 45 顆已知脈衝星 (見圖 2)，以探測它們微弱的連續發射。研究團隊考慮了兩種不同的理論發射模型：一種預測連續重力波會以自旋頻率的兩倍出現 (單譜波模型)，另一種則預測連續重力波會同時出現在自旋頻率的 1 倍和 2 倍 (雙譜波發射模型)。

## 如何搜尋？

LVK 合作團隊使用世界上最靈敏的儀器之一來搜尋引力波。這些檢測器是精密的干涉儀，可以捕捉到極其微小的時空扭曲。然而，即使有這樣高的靈敏度，檢測連續重力波仍然極具挑戰性。連續重力波的信號非常微弱，預計會被埋藏在背景噪聲之下，因此科學家必須依賴先進的演算法和資料分析技術，在噪聲中深入挖掘。研究團隊使用來自不同電磁天文台的詳細資訊，例如每顆脈衝星的位置和自旋參數。這被稱為多信使天文學：利用電磁波提供的資訊，最佳化連續重力波搜尋，以針對每顆脈衝星的獨特特性提高檢測成功的機率。

## 延伸閱讀：

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/)



這些目標性搜尋與「全天區」搜尋不同，後者是科學家在整個天空中尋找任何信號，而不確定信號可能來自何處。在這裡，研究人員利用已知的脈衝星作為指導，能夠專注於連續重力波可能出現的頻率範圍。目標性搜尋是最敏感的分析方法，但強烈依賴於考慮的發射模型，也就是產生連續重力波發射的物理機制，該機制決定了預期信號的特徵。

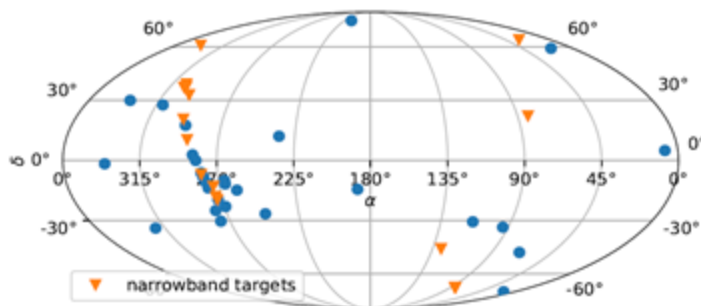


圖2：分析目標在赤道座標系中的天空位置。

## 我們發現了什麼？

根據對O4a數據的分析，LVK並未在所分析的45顆脈衝星中發現任何確定的**連續重力波**信號。然而，我們的發現仍然具有價值。通過分析這些數據，我們能夠對這些中子星的赤道變形或「橢圓率」設置新的上限（參見圖3）。這表示科學家現在對這些脈衝星可能具有的最大變形量有了更精確的估計，即使這些變形不足以產生可檢測的信號。

對於明亮且距離較近的毫秒脈衝星J0437-4715，最強的橢圓率限制約為十億分之九，假設中子星半徑為10公里，這相當於變形量小於100微米！

## 下一步是什麼？

雖然連續重力波信號仍然難以捉摸，但每一次搜尋都將這一領域推向未來的檢測更進一步。每一次靈敏度的提升都增加了我們某一天捕捉到連續重力波信號的機會，並隨之帶來一種研究宇宙的新方式。LVK將在未來的觀測中繼續改進技術並提升檢測器的靈敏度，讓我們更接近發現連續重力波信號的那一天。在此過程中，即使是未檢測到信號，也能非常有意義，因為這不斷增進我們對中子星可承受最大變形量的理解。

對連續重力波的搜尋是一場持久戰，每一輪研究都讓我們更接近捕捉到中子星那微弱且穩定的信號。當這些波被檢測到時，它們可能提供源源不斷的資訊，幫助我們了解宇宙中一些最神秘的天體，並解答關於極端密度下物質行為的重大問題。

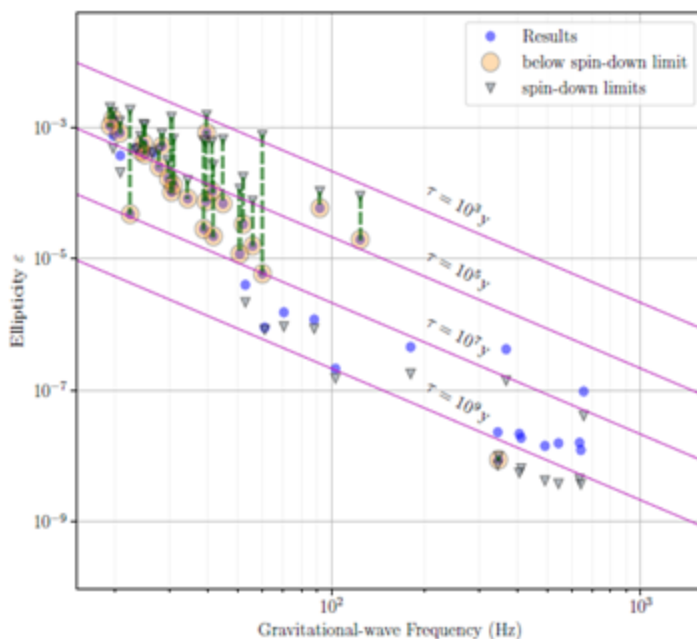


圖3：藍色圓圈：根據實驗測得的每顆脈衝星在預期連續重力波頻率下的橢圓率上限。灰色三角形：假設波雲的自旋減速完全由連續重力波發射引起的橢圓率理論上限。

## 延伸閱讀：

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/)

在 [這裡](#) 或 [arXiv.org](#) 閱讀完成的科學文章預印本。

## 專有名詞字彙

**連續重力波 (Continuous gravitational waves CWs)**：穩定的重力波，通常預計來自具有微小變形的旋轉中子星。

**中子星 (Neutron stars)**：超高密度的天體，為大質量恆星爆炸成超新星後留下的殘骸。

**脈衝星 (Pulsars 又稱「波雲」)**：一種類型的中子星，具有強大的磁場，在旋轉時會定期發射電磁輻射束，從地球觀測時會產生脈衝效應。

**橢圓率 (Ellipticity)**：衡量中子星形狀與完美球體偏離的程度，這可能導致其發射連續重力波。