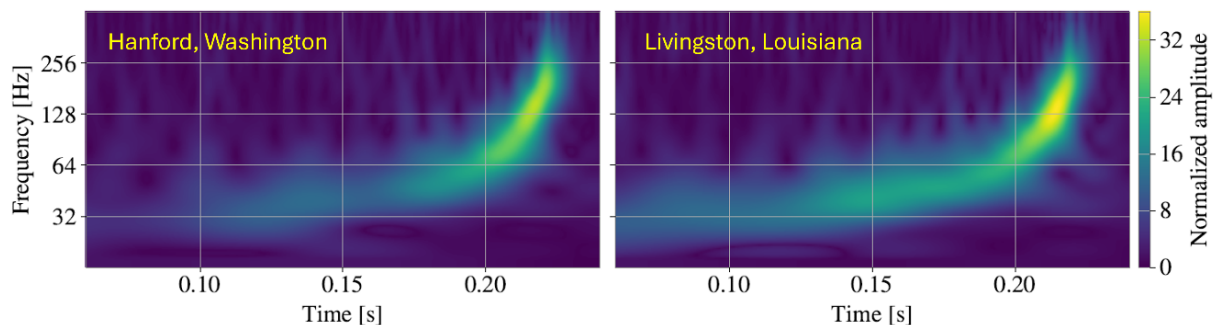


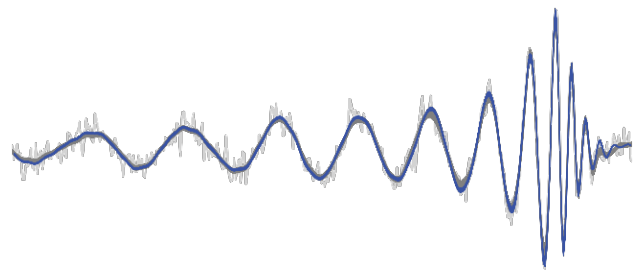
GW250114：宇宙中的混沌鐘聲

在首次探測到重力波後的十週年，[LIGO-Virgo-KAGRA](#) 合作組織 (LVK) 宣佈探測到一個新的重力波訊號：GW250114，源自一次雙黑洞併合事件。值得注意的是，這次事件中的雙黑洞在質量和距離上都與 LIGO 在 2015 年首次觀測到的 [GW150914](#) 驚人地相似。然而，得益於過往十年來對全球探測器網絡與數據分析技術的持續改進，LVK 團隊能以較首次探測時高三倍的靈敏度，更清晰地「聆聽」今次的事件。透過這項前所未有的精密觀測，LVK 研究團隊進一步驗證了廣義相對論的預測：黑洞在併合後只會持續增大，且當受到擾動時，它們會如鳴響的樂鐘般，發出愛因斯坦所預言的「樂聲」。



圖一：(改自出版物中的圖 1) 由 LIGO 漢福德探測器 (左) 和 LIGO 列文斯頓探測器 (右) 所觀測到的重力波事件 GW250114。圖中展示此事件引致的重力波應變在各探測器中隨著時間 (秒) 和頻率 (赫茲或每秒波數) 改變。兩幅圖中均顯示了 GW250114 的頻率在約十分之二秒間急速由 30 Hz 攀升至 250 Hz，形成啁啾波形。

約五十年前，史提芬·霍金 (Stephen Hawking) 和雅各伯·貝肯斯坦 (Jacob Bekenstein) 提出一項革命性的猜想：黑洞的熵是被編寫在事件穹界的表面積上。熵是用於衡量一個系統中的無序或混亂¹的指標。自蒸汽機時代起，物理學家便知曉一個孤立系統的熵總是隨時間增加。因此，若此猜想成立，則黑洞的表面積也理應只增不減。此猜想之所以引人入勝，在於它揭示了黑洞的深層矛盾。根據愛因斯坦的重力理論——[廣義相對論](#)——黑洞理應為極其簡單的物體，只需用到兩個數值來完整地描述它²：其質量與自旋。然而霍金與貝肯斯坦的發現卻指出，這外表看似簡單的黑洞內裏又同時藏有極大量的混沌。這種簡單與複雜二元性揭示了時空結構與[量子力學](#)之間深層的連結。



圖二：示意圖展示 LIGO 列文斯頓探測器在 GW250114 事件探測時所獲得的數據 (淺灰色) 與我們最佳的雙黑洞併合模型所產生的重力波 (深藍色) 之間的高度吻合。此外，圖中的深灰色帶表示在不假設信號由雙黑洞產生的前提下所進行的波形重建。由此可見，深灰色帶與深藍色帶的一致性表明我們的模型能精確描述該信號。

到訪我們的網站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

¹ 嚴格來說，數學上的混亂指的是另一個與無序截然不同的概念，但在一般應用下兩者普遍都可以交替使用，例如參見[此處](#)。

² 理論上，黑洞亦可帶有淨電荷，但普遍認為由恆星塌陷而成的黑洞一般只有微不足道的淨電荷。



GW250114 的觀測數據正是驗證了這兩項黑洞的獨特性質：其結構確實簡單，且其熵在合併後確有增長。此外，該事件的訊號異常清晰，讓科學家得以對黑洞合併後的「衰盪」現象進行迄今最精確的分析。

當一個旋轉的黑洞受到擾動（例如在兩個黑洞合併形成新黑洞的過程中），它會像被敲擊的鐘或鼓一樣振動，發出獨特的重力「聲響」，並迅速衰減。學界普遍假設此衰盪的行為會符合一個理想的數學模型——[旋轉黑洞](#)——由羅伊·克爾（Roy Kerr）預測的「克爾黑洞」。為驗證此假說，LVK 研究團隊成功從 GW250114 的訊號中分離出合併後的黑洞的「聲響」（即其釋放出的重力波），確認其特徵與克爾黑洞的理論預測完全吻合。

我們可借助樂器作比喻來理解黑洞的衰盪。每件樂器因其形狀與材質，而擁有着獨特的音色，正如鐘聲、擊鼓聲或吉他的聲音截然不同。此外，敲擊樂器的方式（如用鼓棒或和鼓刷）亦會激發不同的聲波組合。同理，一個克爾黑洞理論上能發出特定組合的「聲波」（即重力波模式），其頻率與時長完全取決於其質量與自旋。一般的擾動通常只會激發部分聲波。但若能測量到多組聲波，便可以互相比對，從而檢驗這些聲波是否源自同一克爾黑洞。最終 LVK 研究團隊首度以高可信度證實：終態黑洞放射了至少兩組聲波。在比對之下，他們確認這些模式的頻率與衰減時長，均完美符合源自同一個克爾黑洞的理論預期。這更一步確立了 GW250114 事件的殘餘黑洞是一個可以完全由質量與自旋描述的黑洞。

與此同時，LVK 研究團隊亦證實該殘餘黑洞的表面積大於兩個初態黑洞表面積之和（見圖 3）。他們首先利用殘餘黑洞的「衰盪」訊號計算出其表面積。而儘管初態黑洞不會衰盪，它們仍會發出重力波。因為當它們互相繞行時，會釋放重力波而損失能量並向彼此「墜落」。而 LVK 研究團隊利用黑洞碰撞前的 GW250114 訊號來測量初態黑洞的表面積。這兩個獨立的測量結果證實，GW250114 併合事件確實增加了宇宙的熵值！

GW250114 的探測成果，仰賴於數千名科學家數十年來的不懈努力：他們持續提升探測器的靈敏度，同時深化對黑洞衰盪模式的理論理解，並設計出精妙的數據分析方法來「聆聽」這些宇宙的鈴聲。在重力波天文學進入十週年之際，此一里程碑印證了這領域的蓬勃發展，並為未來開啟了更廣闊的探索篇章。

延伸閱讀

到訪我們的網站：

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

[在此](#)閱讀出版於《物理評論快報》的完整文章。

[在此](#)閱讀完整的科學文章預印本。

[在此](#)可取得存放在重力波開放科學中心（GWOSC）

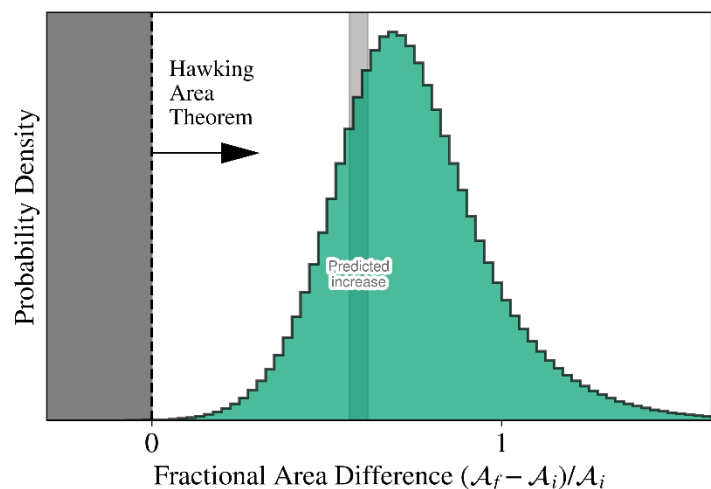
關於 GW250114 的數據。

繁體中文翻譯：梁軒瑋

繁體中文校對：黃進鋒

英文原文來自：

https://ligo.org/science-summaries/GW250114_discovery



圖三：（取自出版物中的圖五）GW250114 事件中表面積分數差的概率分布，其定義為終態黑洞表面積 A_f 減去初態黑洞表面積 A_i ，並除以 A_i 以正规范化。根據霍金面積定理，該面積分數差應位於深灰色陰影區域右側——即在虛線垂直線的右側，該線對應於零面積分數差值（當 $A_f = A_i$ 時）。由此可見，概率分布強烈否定小於零的面積分數差，與霍金面積定理相符。此外，概率分布的峰值亦近符標註為「預測增幅」的淺灰色垂直帶。該區域代表廣義相對論所預測的面積分數差值，約為 65% 的面積增長。