

GW190412: 質量不等黑洞合併的初次觀測

我們發現了什麼？

2019年4月12日，雷射干涉重力波天文台 (LIGO) 的科學合作團隊與 處女座干涉儀 (Virgo) 的合作團隊觀測到兩顆黑洞旋入與合併所產生的重力波。這次事件被稱作 GW190412，並同時被三組重力波偵測器所觀測到。這三組偵測器其中兩組來自雷射干涉重力波天文台（分別在美國華盛頓州的漢福德和路易斯安那州的利文斯頓）另一組則來自義大利卡希納的處女座干涉儀。GW190412是在雷射干涉重力波天文台與處女座干涉儀團隊的第三次聯合觀測（簡稱O3）初期所偵測到的。O3觀測從2019年4月1號開始，並在今年2020年3月27號暫停。

儘管這次所觀測到的黑洞質量與過去所觀測到的黑洞質量並沒有相去太多，GW190412所帶來的新發現則在首次觀測到兩顆合併的黑洞有著確定不相等的質量：其中一顆黑洞的質量比另一顆黑洞還要重三倍。質量的不對稱會影響重力波所產生的訊號並讓我們可以更精準的測量雙黑洞的距離，系統的傾角，較重黑洞的自旋，以及雙星系統的進動等參數。另外GW190412的不等質量雙黑洞可以讓我們驗證愛因斯坦廣義相對論中的很重要的一個預測：除了基本頻率外，重力波高次多極的「鈴聲」。

我們如何知道GW190412是真實的重力波訊號？

GW190412是一個很強烈的事件並被三個偵測器同時觀測到。而三個偵測器彼此相距數千公里，因此三個偵測器同時觀測到就表示這非常可能是一場天文事件而不是單純的雜

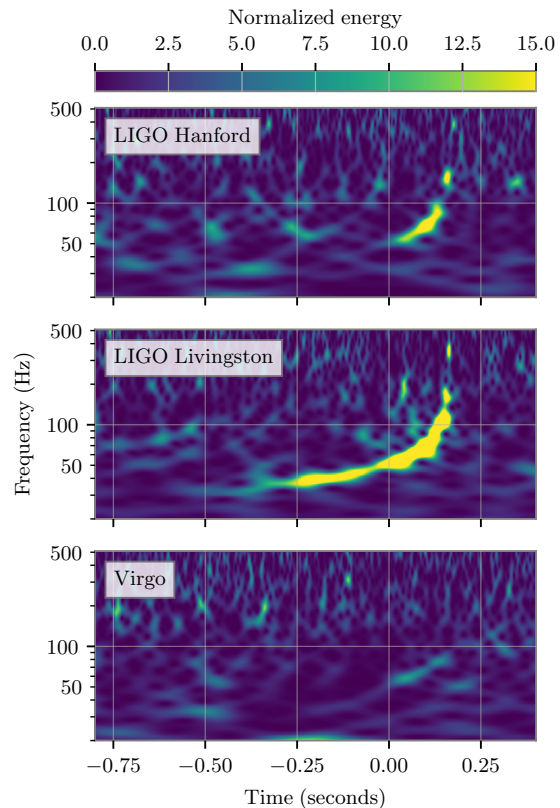


圖 1. 三個重力波偵測器觀測GW190412的重力光譜。橫軸代表著時間（秒）縱軸代表訊號的頻率（赫茲）。顏色則表現特定時間與頻率下的重力波能量強度。著名的重力波“啾啾聲”可以在圖中隨著時間頻率與能量上升的部分看到。這是因為當雙黑洞互繞越來越近（旋入）時會提升重力波輻射的能量，緊接著才是雙黑洞的合併。

訊。

在圖??中用時間與頻率的訊息來表示GW190412的數據也被稱作重力波的光譜圖。儘管GW190412強到足以用「肉眼」在漢福德與利文斯頓的數據中看到，我們使用了許多不同的演算法來掃描重力波的數據來判斷他們的可靠性。大部分的技術是建立在「匹配濾波」的方法上，也就是比較觀測的數據與廣義相對論的數值模擬。用這樣的技術我們可以有效的量化雜訊所造成的訊號誤報率。我們發現4月8號到18號數據的誤報率只有每三萬年才有一次的機率。當之後分析越來越多O3運行的數據，誤報率的分析也會變得越來越重要。我們也分析了許多其他儀器或環境所可能造成的雜訊，並判斷那些雜訊並不會影響我們對GW190412的分析。

GW190412的特性

GW190412雙黑洞的單獨質量並未與過去的觀測差距太多，其中一顆黑洞約比太陽重30倍，另一顆則約為太陽8倍的質量。但是兩顆黑洞質量的比率則與過去的觀測完全不同。過去兩次聯合觀測所發現到的十組雙黑洞皆有接近相同的質量，而GW190412較重的黑洞則比較輕的黑洞重了約三倍。

GW190412的不等質量會造成其重力波輻射的不對稱，讓我們更了解其系統的一些特殊參數。我們發現系統的有效自旋是正值代表說至少其中一個黑洞的自旋方向與雙黑洞的互繞方向是相同的。雙黑洞的不等質量也讓我們第一次可以有足夠的說服力來說較重的那顆黑洞的自旋約為廣義相對論所允許的自旋上限的40%。圖??可以看到GW190412所推論出的雙黑洞系統的有效自旋與質量比例。儘管證據不夠強烈，我們也看到一些些微的跡象顯示雙黑洞系統有在進動。另外雙黑洞的不等質量也讓我們可以更精準的測量此系統的距離以及雙星互繞平面的傾角，讓我們推論出GW19041離我們距離約為25億光年！

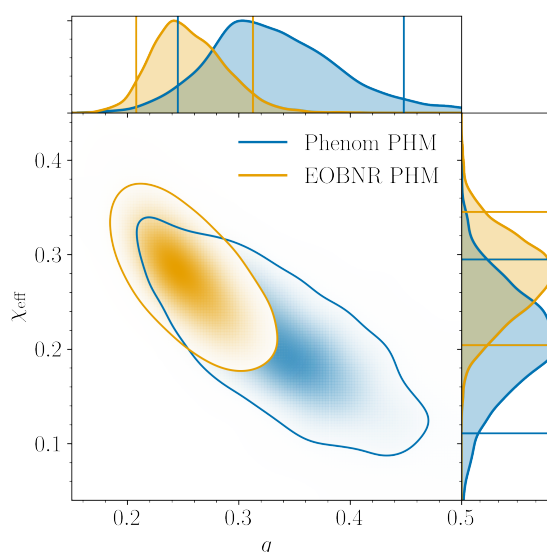


圖 2. GW190412所推論出的質量比率 (q) 與有效自旋 (χ_{eff})。橘色與藍色的等高線圖表示使用兩組不同波形模型所復原的的參數分佈（與真實廣義相對論模型的訊號有些微不同的假設）。

聽到高次諧波的嗡嗡聲

GW190412的獨特特性也可以用來觀測到重力波的一些根本特性。這方面的研究最早是由愛因斯坦開始，之後由紐曼(Newman)，潘羅斯(Penrose)，與索恩(Thorne)等科學家承接。研究顯示緻密雙星的重力波發射是由系統的重力四極為主要的發射來源。重力四極的發射可以想像為撥彈吉他的主要聲音，但是如同其他樂器一般，重力波輻射也有來自更高泛音的聲音。這些高次諧波或說高次多極是非常難被相同質量的雙黑洞合併所分析到。雙黑洞質量不等的GW190412則微妙的可以讓這些訊號比較容易被「聽到」。我們也發現GW190412的數據支持這樣的假說，高次諧波的訊號約比其他等質量雙黑洞的訊號強了超過一千倍。在未來高次諧波的相對強度可以用來更一步的理解黑洞合併過程中的特性。我們也做了另外一系列的測試並發現都與廣義相對論吻合，說明在GW190412的觀測中愛因斯坦的重力理論仍然是可靠的。

形成不等質量的黑洞雙星

雷射干涉重力波天文台與處女座干涉儀的每次聯合觀測都為五花八門的緻密雙星系統帶來新穎與令人振奮的新觀點。作為第一個有確實不等質量的雙黑洞，GW190412提供了許多重要的數據讓我們了解雙黑洞的分佈特性。這次的觀測事件也告訴我們質量不等的雙黑洞並非罕見，也預期未來會有更多類似的系統被觀測到。

天文學家根據恆星演化的詳細物理建立了許多模型來試圖解釋宇宙間如何形成雙黑洞以及它們預期的質量和其他的特性。儘管大部分的模型都預測雙黑洞有接近的質量，也有許多模型認為有相當可觀的系統類似GW190412有著不相等的質量。這類系統大部分預期只有等質量雙黑洞的十分之一或更少。我們目前偵測到超過十個雙黑洞合併的事件，在觀測之前我們並沒有預期會看到像GW190412這樣極端的質量比例。如果我們持續提升重力波偵測器的靈敏度來建立更龐大的緻密雙星合併的數據庫，我們將可以觀測到更多不同的系統來幫助我們了解恆星的演化，緻密雙星的形成，以及宇宙基本的物理。

詞彙表

黑洞 (Black Hole): 一個引力強大的緻密星體，連光都無法掙脫其重力。

緻密雙星 (Compact Binary): 一個包含兩顆緻密星體（譬如中子星或黑洞）的系統。

有效自旋 (Effective Spin): 重力波訊中的一個包含自轉資訊的參數。準確來說，這是一個質量加權過後投影單一黑洞自轉到雙黑洞旋轉的方向的參數。

廣義相對論 (General Relativity): 愛因斯坦在1915年提出的重力理論。在這個理論中，空間就像是一個可延展的布料可以被質量和能量彎曲，而物體會沿著這彎曲的空間運行。

高次多極 (Higher Multipoles): 重力波的輻射可以用「球諧函數」來展開。高次多極代表展開後比主要的四極項還要多次的部分。

傾角 (Inclination): 雙黑洞互繞平面與地球觀測方向的傾角。

匹配濾波 (Matched Filtering): 一種用來偵測訊號被雜訊模糊的技術。透過掃描許多廣義相對論所算出來的訊號模板直到發現類似的型態。

進動 (Precession): 根據角動量守恆，當黑洞自轉的方向與公轉的方向不同時，公轉平面會轉向角動量的方向。

四極 (Quadrupole): 緻密雙星所產生的重力波中最強的多極項。假想重力波是時空的聲音，重力四極的輻射就是聲音中的基本頻率。這個名字是來自於形成時運動方向的型態。用無線電天線來對比的話，天線的電偶極有最強的發射。

光譜 (Spectrogram): 用時間，頻率，與能量來表達連續時間的數據。顏色表達單獨頻率的能量強度。

波形 (Waveform): 用近似愛因斯坦的廣義相對論所算出的理論重力波訊號。