

## 利用 LIGO–Virgo 第三次聯合觀測前半段之重力波來驗證廣義相對論

在偵測到**雙黑洞**合併的重力波之前，愛因斯坦超過百年的**廣義相對論**尚未能夠在一些實驗室或太陽系所無法達到的嚴格環境來檢驗。雙黑洞合併的環境則提供了一些廣義相對論所容許最強烈的動態重力場。雙黑洞合併的觀測也驗證了理論所提供的兩個重要預測：重力波可以直接偵測到以及雙黑洞系統確實存在。然而這些雙黑洞合併的重力波與理論所預測的重力波是完全吻合或是有些微的不同？在這激烈合併中所留下來的痕跡透過重力波又可以讓我們學到什麼？

LIGO 與 Virgo 曾分別利用過去**重力波源目錄-1 (GWTC-1)**中所偵測到的所有重力波訊號以及單一的重力波事件**GW190425**, **GW190412**, **GW190814**, 與**GW190521**來驗證廣義相對論。到目前為止，愛因斯坦是對的！但現在我們可以利用重力波源目錄-2 (GWTC-2)中更多的黑洞合併事件來測試。雖然我們也有用過去類似的方式來分析，但在新目錄中我們分析了超過過去兩倍的黑洞合併事件，也嘗試了一些新測試。

為了尋找與廣義相對論不同的理論，我們通常假設廣義相對論理論中有一些修正項，譬如方程式中額外的項次或參數會導致一些數值與廣義相對論不同，而預期那些不同能否讓觀測的數據更吻合。我們透過**訊號處理**的方法與**統計分析**，得到一些統計的資料測量數值，並與廣義相對論所預期的數值比較。其間的差異可能來自三個地方：(1) 數據太多雜訊。我們的觀測的數據總是包含著重力波與儀器的雜訊。(2) 在大部分的情況下，我們有做一些假設來預期廣義相對論所推斷的訊號，然而這些近似的假設在某些特別的環境上可能並不是非常適當。(3) 廣義相對論可能並不完美，有可能在像雙黑洞合併這樣的極端環境下需要一些理論的修正。然而實作上，這表示我們沒有辦法輕易地判斷這些與廣義相對論的差異是來自雜訊或是近似假設的誤差，但至少我們可以測驗觀測到的數據是否與廣義相對論吻合，而那也是我們目前所做的事。

如同我們在分析之前重力波源目錄-1的**論文中**，有一些事件在某些測試中並沒有完全吻合，但我們現在有了更多的事件可以來檢驗。是否偵測到黑洞合併取決於訊號的頻率與偵測器靈敏的頻率是否吻合，較重的黑洞在軌道旋轉頻率較低的時候合併，會導致較低的重力波頻率。重力波頻率在更遠的地方傳來時，因為宇宙膨脹導致的紅移會讓重力波訊號變成更低的頻率。所以根據不同的重力波頻率，有些事件在某些測試中可能並不適當。

## 比較部分的重力波訊號與廣義相對論預期的結果

廣義相對論中所描述的天文黑洞主要只有兩個特性分別為質量和自旋，其他關於黑洞的特性都可以用質量和自旋來表示。如果你有兩個黑洞互繞就表示你有兩個黑洞和他們個別的質量和自旋。另外，你還需要知道兩個自旋軸指向的方向和分離的距離。一但這樣設定好，之後的問題就都解決了。在最初互繞的階段，雙黑洞的系統會靠輻射重力波的能量來持續演化，讓雙黑洞的距離越來越近，周轉速越來越快。之後兩顆黑洞合併為一，結合為一個合併後的黑洞質量和自旋。但是合併中的黑洞有一個被扭曲的形狀。廣義相對論說這樣的扭曲會產生重力波把這些變形帶走而留

下單獨質量和自旋的訊息。我們可以測試這樣的情景，因為最初互繞的黑洞決定了最後留下的黑洞。再加上最後擾動消失的細節(也稱作衰盪)也都由廣義相對論所決定。

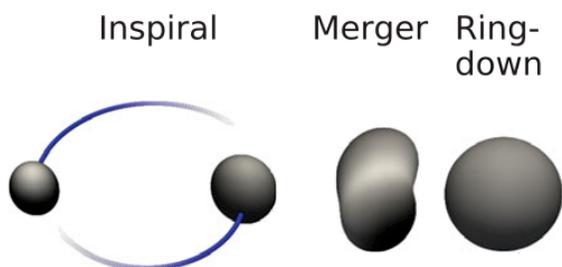


Figure 1: 雙黑洞合併的三個過程：旋入 (inspiral)，合併 (merger)，與衰盪 (ringdown)。從發現 GW150914 論文的圖2修改而成。

如果旋入與衰盪時的重力波訊號有類似的強度，我們可以分開來檢驗，是否兩者間可以互相解讀。根據廣義相對論，如果你有旋入時的資訊，你就可以反推衰盪時的訊號來判斷是否吻合。雖然雜訊與理論近似的極限讓這樣的比較並不精準，我們仍然發現信號與廣義相對論相符。如圖2所展現的結果。變形的合併黑洞就像是被擊響的鈴鐺。如果你敲一個鈴鐺，你可以聽到一些簡單音調的組合，也就是鈴鐺的共振頻率。但是短暫的時間之後，根據鈴鐺的特性，這些音符會漸漸淡去減幅而消失。同樣的道理廣義相對論指出黑洞衰盪之後會展現一些特殊的頻率和減幅時間。因此我們可以比較衰盪時期觀測到的一些扭曲黑洞的特性與旋入時期數據所推斷出來的衰盪訊號。雖然說準確度並不是特別高（我們希望未來的觀測可以有更好的準確度），但結果是與廣義相對論相當的。

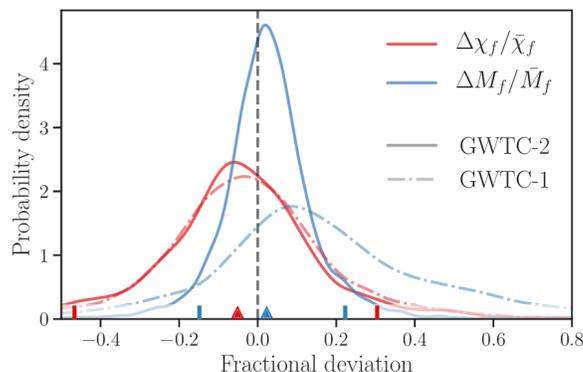


Figure 2: 由旋入時期與合併後數據所推斷的最終黑洞質量  $M_f$  (藍色) 與自旋  $\chi_f$  (紅色) 的差異。實線表示利用GWTC-2的比較，虛線則表示利用GWTC-1的比較。垂直的虛線代表廣義相對論所期待的數值。我們發現新數據的質量差異比較有了明顯的提升與廣義相對論的數值更接近了，但是自旋差異的比較並沒有特別提升（請見我們論文的圖四）。

## 是否有些明顯的黑洞其實是擬黑洞？

黑洞合併會產生非常強烈的重力輻射，很多時候甚至暫時比宇宙其餘地方的輻射還要強烈。然而是否有什麼東西輻射看起來像是廣義相對論中所描述的黑洞，但其實是其它的東西呢？這樣的東西也稱作 **擬黑洞 (black hole mimicker)**。目前有數種可能的擬黑洞假設。它們如同一般黑洞在一個狹小空間有著巨大的質量，但也有些特性並不相同。不同於廣義相對論所描述的黑洞，擬黑洞不需要被受限只用質量和自旋來描述。譬如說，一般黑洞很有名的一種單向特性稱作**事象地平面**在擬黑洞裡有不一樣的描述。在一些可能的擬黑洞模型中有一個類似鏡像的表面來取代事象地平面。一般會掉進黑洞的重力波反而會反彈並產生原本訊號的回聲（見圖3的描述）。目前我們並沒有發現這些回聲的任何證據。

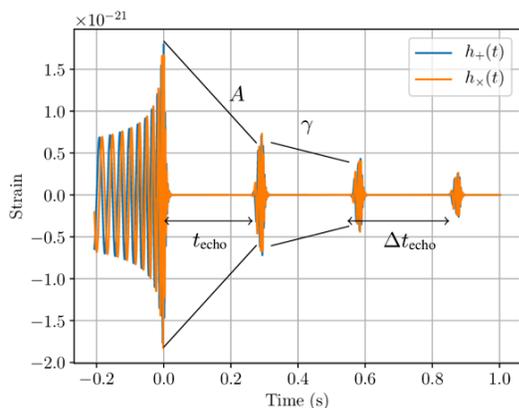


Figure 3: 一種擬黑洞理論所預測可能產生的重力波回聲。當時間在圖中向右演化，我們可以看到原本的重力波訊號伴隨著一系列的複製的扭曲訊號是重力波在擬黑洞的鏡像表面反彈造成的（原圖取自 R.K.L. Lo.）。

但是廣義相對論可能在某些不同種的擬黑洞中失靈。這些擬黑洞具有事象地平面但外型卻大不相同。我們知道旋轉的物體會有較扁平的外型。這對地球來說是成立的，透過小望遠鏡木星也有明顯的效果。這樣的平坦化源自於重力，就算廣義相對論在那環境並不重要。當旋轉的物體是黑洞時，扁平化的程度則取決自黑洞的質量和自旋，但對擬黑洞來說就不一定了，擬黑洞可以有不同的形狀。我們透過許多黑洞合併的事件來檢樣這樣的不同，但是並沒有發現任何顯著的不同。

## 詞彙表

- **黑洞 (black hole):** 一個極度緻密的時空區域，其重力強到包含光所有事物都無法離開。
- **擬黑洞 (black hole mimicker):** 一個類似黑洞的區域，可以產生類似標準黑洞合併的重力波訊號，但是具有一些廣義相對論所無法預測的一些特性。
- **雜訊 (noise):** 重力波測量中來自儀器與環境的一些擾動。重力波偵測器的靈敏度受限於這些雜訊。
- **自旋 (spin):** 一種測量物體自轉多快的物理量。

## 合併後的重力波需要許多時間傳至我們

彩虹般的顏色藏在陽光之中，當光線穿過水珠射散之後才被揭露。時空可以揭露重力波的顏色（頻率）嗎？廣義相對論說沒有辦法，但是其他理論容許重力子可以具有質量並散射重力波。我們觀測到的重力波在宇宙間已經穿梭了數十億年，如果重力子具有質量，他們有很多機會可以產生散射。這也代表說我們可以直接偵測到這些痕跡，就算重力子的質量很小。我們也可以結合所有觀測到的事件資訊來放大重力子質量的效應。透過我們目前最新的數據，我們可以下結論說如果重力子的質量高於 $1.76 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ ，我們就可以看見它。但是我們沒有，所以重力子的質量必須更小。這個新的質量限制比過去提升了2.7倍。最為對比，某些類型的微中子有著最小已知的非零質量 $0.009 \text{ eV}/c^2$ 。我們的重力子質量限制也將限制許多只有推測的重力理論。

## 總結

所以答案是什麼呢？愛因斯坦還是正確嗎？廣義相對論是正確的重力理論？我們透過新發現的黑洞合併事件，新的檢驗方法，與過去已知的重力波事件來檢驗理論。在大部分的情況下。我們可以結合不同事件的結果來強化我們的結論。總結來說，當我們考慮雜訊與理論簡化的誤差，所有我們發現的結果都與廣義相對論吻合。如同我們在圖裡所示，部分測試並沒有非常精準的結果。我們期許未來透過偵測到更多的黑洞合併可以幫助我們提供一個更可靠的答案。

- **衰盪 (ringdown):** 黑洞合併的一個階段，來自合併中擾動的黑洞透過散發重力波來散發這種擾動。
  - **回聲 (echo):** 描述重力波反射自擬黑洞鏡像表面的複製訊號，如同我們可以聽見聲音反彈的回聲。
  - **重力子 (graviton):** 構成重力波的微小粒子，如描述電磁波的光子。廣義相對論要求重力子如同光子一般是沒有質量的。
  - **eV/c<sup>2</sup>:** 質量的一種單位：電子伏特(eV) 是種常用的能量單位來測量把原子中的一個電子移開所需的能量。愛因斯坦也說  $E = mc^2$  ( $E$  是能量,  $m$ 是質量, 而 $c$  是光速) ，因此把能量除以光速平方後是質量的單位。
- 

## 更多資訊

- 我們的網站: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- 免費線上閱讀完整的[文章](#).
- 免費線上閱讀關於重力波事件的[文章](#).
- 免費線上閱讀關於 O1, O2, O3a 數據所推論的黑洞合併分佈的 [文章](#).
- 探索GWTC-2 目錄在[重力波開放科學中心\(Gravitational Wave Open Science Center\)](#)的數據。



Visit our websites:  
<http://www.ligo.org>  
<http://www.virgo-gw.eu>



<https://dcc.ligo.org/P2000436-v2>