



LIGO
Scientific
Collaboration



雙黑洞併合放射之重力波的觀測

OBSERVATION OF GRAVITATIONAL WAVES FROM A BINARY BLACK HOLE MERGER

發表於一百年前的廣義相對論被物理學家馬克思·波恩譽為“人類認知自然的最偉大業績”。我們在此報告兩個有關愛因斯坦理論的關鍵預言的重要科學突破：對**重力波**的首次直接探測和對**雙黑洞**碰撞與併合的首次觀測。

這個被我們命名為**GW150914**的激變事件，發生於距離地球10億光年之外的一個遙遠星系中。它於2015年9月14日被**鐳射干涉儀重力波天文臺**（以下簡稱**LIGO**）的兩個探測器——很可能是人類有史以來製造的最靈敏的科學儀器——觀測到。**LIGO**估算出這個雙黑洞併合最後時刻所輻射的重力波的峰值功率比整個可觀測宇宙的光度（單位時間釋放的電磁波能量）還高10倍以上。這項非凡的發現開啟了令人振奮的天文學新時代，打開了一扇觀測宇宙的全新窗口。

背景簡介

重力波是時空的“漣漪”，由例如緻密星體碰撞併合這樣極其劇烈的物理過程產生。愛因斯坦於1916年預言了它的存在。他證明做加速運動的大質量天體可以劇烈地撼動時空，並且空間扭曲的波動將從波源輻射出去。這些以光速傳播的漣漪攜帶了天體源激烈動盪的資訊以及關於引力本質的寶貴線索。

在過去的幾十年中，天文學家通過觀測銀河系中密近雙星，已經積累了重力波存在的有力證據。雙星軌道由於引力輻射帶走能量而收縮；觀測結果完全符合愛因斯坦的理論預言。儘管如此，對重力波的直接探測可以為我們提供一個新的更加嚴格的在極端條件下檢驗廣義相對論的方法，同時開啟一條探索宇宙的全新途徑。因此整個科學界仍然一直熱切地期待著能在地球上對重力波進行直接探測的機會，就像這次重大突破一樣。

在愛因斯坦預言重力波的同一年，物理學家卡爾·史瓦西證明愛因斯坦的廣義相對論允許黑洞的存在。它是一個奇異的天體，非常緻密，以至於光都難以逃脫它的引力束縛。雖然就字面意義來看我們不能直接“看到”**黑洞**產生的光，天文學家通過研究黑洞候選體對它周圍的物質產生的效應已經收集了大量間接證據。例如，我們認為宇宙中絕大多數星系（包括銀河系）的中心都有一個**超大質量**（數百萬乃至數十億倍於太陽的質量）**黑洞**。同時還有非常多小質量（從幾個到幾十個太陽質量）的黑洞候選體的證據；它們被認為是恆星劇烈爆炸——**核塌縮超新星**——的遺留物。

在黑洞的間接觀測研究取得進展的同時，對這些奇異天體的理論理解也在不斷加深。例如，過去的十年裡，對雙黑洞併合前的最後時刻的軌道演化的模擬有了十分顯著的進步。這些電腦模型說明我們依據廣義相對論精確地計算出**重力波波形**，告訴我們重力波的特徵圖樣在兩個黑洞彼此靠近並最終合併為一個更大的黑洞過程中是如何演化的。因此雙黑洞併合的直接觀測為驗證愛因斯坦的理論提供了一個最好的宇宙實驗平台。

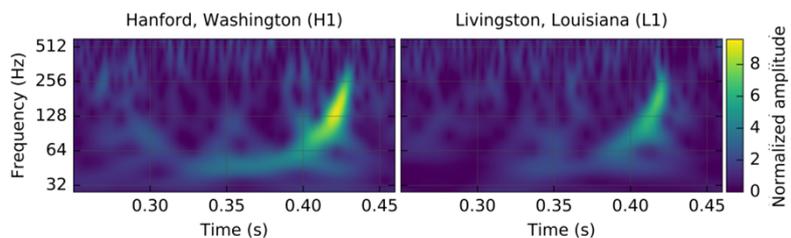


圖1 - (取自論文圖1) LIGO漢福德 (H1, 左) 和利文斯頓 (L1, 右) 探測器所觀測到的GW150914重力波事件。該圖展示了在兩個LIGO探測器中觀測到的由該事件產生的重力波“應變”（見下文）如何隨時間（秒）和頻率（赫茲）變化。兩個圖均顯示了GW150914的頻率在0.2秒內從35赫茲迅速增加到150赫茲。GW150914先到達L1，隨後到達H1，前後相差七千分之一秒——該時間差與光或者重力波在兩個探測器之間傳播的時間一致。

請參閱

<http://www.ligo.org/>



#GravitationalWaves

#BinaryBlackHole

#EinsteinWasRight

LIGO 探測器

LIGO是世界上最大的重力波天文臺，同時也是世界上最精密的物理實驗之一。它由兩個相距幾千公里的大型**鐳射干涉儀**組成，分別位於美國路易斯安那州的利文斯頓和華盛頓州的漢福德。它利用光和空間本身的物理性質來探測重力波，這是早在二十世紀六七十年代就提出的概念。幾台第一代干涉儀在二十一世紀初建造完成，包括日本的TAMA300，德國的GEO600，美國的LIGO和義大利的Virgo。這些探測器在2002年至2011年期間共同進行觀測，但並未探測到重力波。在經歷重大改造升級之後，兩個**高級LIGO**探測器於2015年開始作為靈敏度大幅提升的高級探測器網絡中的先行者進行觀測。

LIGO干涉儀由兩條每個長達四公里並且互相垂直的“臂”構成。沿著每條臂發射的雷射光束在末端反光鏡（懸掛的**測試質量**）處被反射。當重力波經過時，時空的伸縮導致干涉儀兩條臂交替被拉長和壓縮——一條變長的同時另一條變短。當兩條臂的長度變得不同時，雷射光束需要不同的時間來回穿越，也就是說兩條雷射光束的**相位**不再同步，於是所謂的**干涉條紋**產生了。這也就是我們稱之為干涉儀的原因。

兩條臂的長度差異與經過的重力波強度（被稱為**重力波“張力”**）成正比，但是其數量級之小令人咋舌。一個典型的重力波張力大約在**質子直徑的萬分之一**！而具有極高靈敏度的LIGO干涉儀能夠測量出如此微小的變化。

圖2展示了一個高級LIGO探測器的簡化版示意圖。

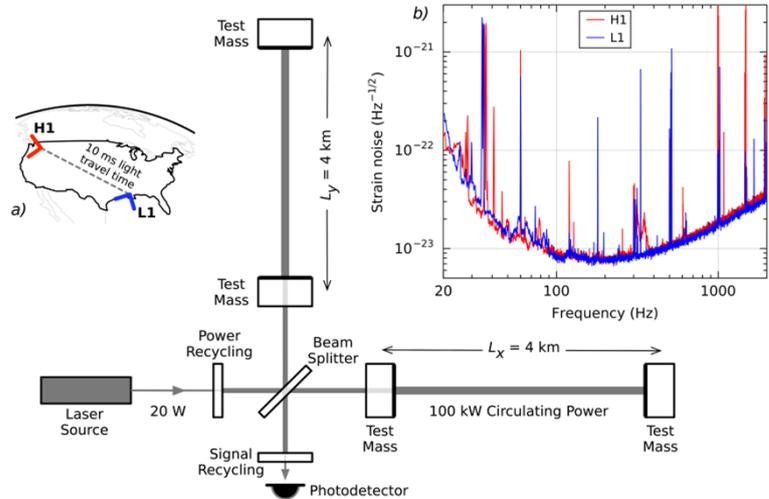


圖2：高級LIGO探測器簡化示意圖（未按比例顯示），對基本設計的主要改進包括：一個**光學反射腔**，使鐳射在單臂中來回反射多次，以加強重力波在鐳射相位上產生的影響；一個**功率迴圈鏡**，將干涉儀中的鐳射功率大幅提高；一個**信號迴圈鏡**，進一步優化從**光電探測器**中提取的信號。這些改進使得鐳射功率在光學反射腔中增強了5000倍，並且延長了信號在干涉儀中迴圈的時間。圖(a)顯示了兩個LIGO探測器的地理位置和方位，以及光在它們之間傳播所需的時間。圖(b)展示了在GW150914事件前後兩個探測器中儀器雜訊與頻率的關係。儀器雜訊越低，探測器對重力波的靈敏度越高。圖中的尖峰表示該窄帶頻率處有很強的儀器雜訊。

想要成功探測諸如GW150914的重力波事件，不僅需要LIGO探測器具有驚人的探測靈敏度，還需要將真正來自重力波源的信號與**儀器雜訊**分離：例如由環境因素或者儀器本身導致的微擾，都會擾亂或者輕易淹沒我們所要尋找的信號。這也是為什麼要有兩個高級LIGO探測器的主要原因。它們幫助我們區分重力波和儀器環境雜訊，只有真正的重力波信號會差不多同時出現在兩個探測器。當然考慮到重力波在兩個探測器之間傳播的時間，前後出現會相隔幾個毫秒。

圖2(b) 展示的是LIGO探測器儀器雜訊與頻率的關係。我們可以看到雜訊在幾百赫茲左右達到最低，但在低頻和高頻區域急劇升高，並且在一些比如由於懸掛反光鏡（測試質量）的纖維震動所導致的儀器雜訊對應的頻率處，顯示出一系列窄帶尖峰。

為了實現高級LIGO探測器靈敏度的大幅提升，第一代LIGO設計的方方面面都進行了升級：

- *大幅提高鐳射功率，以減少高頻雜訊
- *重新設計迴圈腔以更好地配合鐳射的空間分佈
- *使用更大更重的熔融石英作為測試質量，以減少反光鏡的隨機運動
- *用熔融石英纖維懸掛測試質量，以減少熱雜訊
- *用一個四級擺來懸掛測試質量，以更好地隔離地震干擾
- *使用主動“測量－抵消”策略來減少地面運動的影響

欲知高級LIGO的技術資料，請參閱：

<http://tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf>

利用兩個或多個探測器組成的網絡，通過分析重力波到達各個探測器的時間差異，我們可以利用“三角定位法”推斷重力波源的方位。網絡中有越多的探測器，重力波源的位置便能被更好地確定。2016年，義大利的高級Virgo探測器會加入全球探測器網絡，並且更多其他高級干涉儀也將在不久的將來陸續加入。詳情參閱<http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>。

LIGO的觀測結果和科學意義

在2015年9月14日格林尼治標準時間9點50分45秒，LIGO 位於美國利文斯頓與漢福德的兩台探測器同時觀測到了GW150914信號。這個信號首先由低延遲搜索方法識別出來。為了快速分析探測器資料，這種搜索方法並不關心精確的重力波波形。它通過尋找可能為重力波的某些特徵跡象來尋找重力波。這些快速的搜索在信號到達探測器之後僅僅三分鐘就將此作為重力波的候選事件彙報出來。之後LIGO干涉儀獲得的重力波應變資料又被拿來和一個海量的由理論計算產生的波形庫中的波形相對照，這個資料處理的過程是為了找到和資料最匹配的波形，也就是通常所說的**匹配濾波器法**。

圖3展示了仔細分析後的關鍵結論，證實了GW150914是兩個黑洞併合的事件。

圖片中部，我們重建了在漢福德探測器看到的重力波應變圖樣。需要注意的是，這個重建的圖樣（灰色）和通過廣義相對論理論預測的雙黑洞併合的最佳匹配波形（紅色）驚人地吻合。

圖片上方的漫畫代表了雙黑洞併合的三個階段，首先是**旋進**階段，兩個黑洞因重力波的能量損失逐漸靠近對方；接下來是**合併**階段；最後是**衰蕩**階段，為新形成的黑洞在達到最終穩定狀態前短暫的震盪階段。

將探測器的資料與理論預計相比較可以首先用來檢驗廣義相對論的理論是否可以準確地描述這個事件。回答是肯定的：我們的觀測結果強有力地顯示廣義相對論完美地通過了這次檢驗。

我們還可以使用獲得的資料詳細地估計一系列包括併合前的雙黑洞質量，併合產生的黑洞質量，併合事件發生的距離在內的GW150914的具體物理特性。

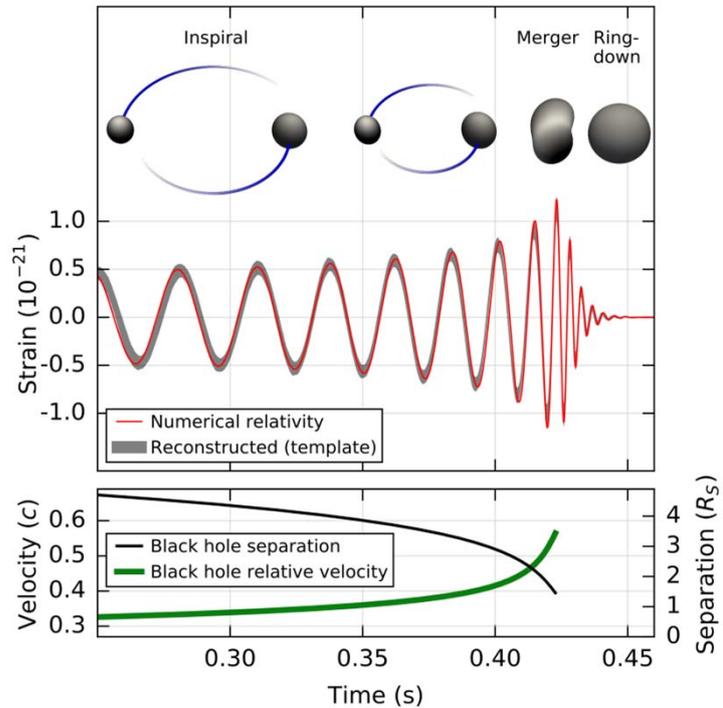


圖 3：通過比較由資料重建的重力波應變（以在漢福德的H1探測器所接收的應變為例）和由廣義相對論計算得出的在旋進、合併和鈴宕(衰蕩)三個過程的最佳匹配波形，得出的關於GW150914的一些關鍵結論。圖片下方展示了兩個黑洞的間距和相對速度隨時間演化的過程。

我們的結果顯示，GW150914是一個**36倍太陽質量**的黑洞和一個**29倍太陽質量**黑洞併合事件，在並合後產生了一個**62倍太陽質量**的黑洞。除此以外，我們可以推斷出這個最終產生的黑洞正在旋轉，這種帶自轉的黑洞是在**1963年**首先由數學家羅伊·克爾通過理論計算提出的，也就是我們所知道的克爾黑洞。最後，我們知道GW150914發生於距離我們**十億光年**以外。也就是說LIGO探測器真實地探測到了很久以前發生於某個遙遠星系的一件引人注目的大事！

如果我們將併合前的兩個黑洞和最終的產生的黑洞相比較，可以注意到這次併合將大約**3倍太陽質量**（大約**6百萬兆兆**（ $\sim 6 \times 10^{30}$ ）公斤）轉換成了重力波能量，其中大部分能量在不到一秒的時間裡被釋放出去。如果將我們的太陽作為對比，太陽在一秒內發出的能量大約只相當於是四十億（ $\sim 4 \times 10^9$ ）公斤物質轉換成的電磁輻射。而事實上，GW150914放出的峰值功率要比可觀測宇宙中**所有星系**的光度總和的十倍還要多。

我們為什麼說GW150914是黑洞併合？

我們估計的GW150914併合前的兩個星體的質量有力地證明了它們都是黑洞，尤其是當我們把它們如此巨大的**速度**和如此微小的**間距**都考慮進去的話。如圖3下方所示，它們的速度極快達到了接近光速，與此類似的是我們可以看到併合前兩個星體之間的距離僅僅只是幾倍黑洞半徑而已。這裡所說的黑洞半徑是我們熟知的**史瓦西半徑**。

圖3暗示了這兩個併合的星體在併合前的間隔只有數百公里，重力波的頻率在此時大約達到了**150 赫茲**，而黑洞是唯一已知的因為足夠緻密而在如此近的距離都不會碰撞融合的物體。由我們估計的兩個星體併合前總質量可以看到，雙中子星的總質量遠低於此，而如果是一對黑洞和**中子星**組成的雙星的話，那麼它們在遠低於**150 赫茲**的時候就早已開始併合了。因此，唯一可能的結論就是GW150914是一對黑洞的併合。

我們是否確信GW150914是一個真實的天文事件？

一個字：是。當然，這個問題事實上非常重要，而LIGO科學合作組織和Virgo組織的很多努力都是為了回答這個問題。為此進行的每一個獨立而全面的檢查，都給我們宣佈GW150914的發現增添一分信心。

首先，如前所述，兩個LIGO探測器記錄的信號時間差與光穿梭於台址間的時間吻合。另外，如圖1所示，來自漢福德與來自利文斯頓的信號有著十分相似的模式。由於兩個干涉儀的朝向近乎一致，這一點恰恰符合預期。同時，這個信號非常強，在雜訊的背景中“鶴立雞群”，就好像在一個擁擠的大房間裡從嘈雜的背景中辨析出一場對話一樣。

對於我們的分析而言，理解背景雜訊至關重要。這也意味著我們需要監測台址附近海量的環境資訊：地面運動，溫度變化，電網波動等等。與此同時，許多資料通道實時監測著干涉儀的狀態，比如檢查鐳射束正確地指向鏡子正中。

如果這眾多的監測通道中的任意一個出現異常，採集到的資料就會被捨棄。然而，在經歷了詳盡的研究和檢查後，該事件前後的資料都沒有發現品質問題。

不過，GW150914可能只是由於機緣巧合，湊巧在兩個台址都出現了相似特徵的雜訊擾動？要排除這種可能，我們需要計算這種情況到底得有多麼湊巧——發生地越罕見，我們就越相信GW150914是真實重力波事件。

要完成這一統計分析，我們使用該資料後一個月內採集到的總時長為16天的穩定、高品質的探測器資料。GW150914的確是兩個探測器在這段時間內最強的信號。接下來我們人為地在兩個探測器資料間引入一個時間平移，等效於構造出一個越來越長（時間上長很多）的資料，用以搜尋其中不弱於GW150914的巧合性信號。我們只採用大於10毫秒（重力波在兩個探測器間傳播所需的時間）的時間平移，這樣保證了人造資料中不含任何真實的信號。如此我們可以放心地使用這些資料來分析噪音的統計學波動——回答偽造出一個像GW150914這樣的信號有多難這樣的問題。我們可以歸納得出一個“誤警率”，也就是說，統計上，噪音被錯誤地歸類為信號的頻率。

圖4（由論文中的圖4改編而來）展示了我們對探測器資料進行的這類統計分析結果。黑色和紫色的實線代表了不同的噪音背景：基於稍微不同的假設，兩條線展示了不同信號強度下類比成信號的巧合噪音“事件”預期發生的數目。在這幅圖中，最關鍵的資訊是GW150914距離黑色和紫色曲線非常遠；這意味著能夠偽裝成信號的雜訊極其罕見。事實上，對於GW150914這樣的事件，我們估計的誤警率低於每20萬年一次！這個誤警率可以轉換成一個sigma值，用以估計統計分析中一個新發現的顯著程度。從圖中可以看出，這一搜索可以在5倍sigma以上的顯著水準確認GW150914是一個真實的信號。

結論和展望

第一次直接探測到重力波，以及第一次觀測到雙黑洞併合是一項非凡的成就。然而，他們不過是天文學激動人心的新篇章的扉頁而已。

將來，高級LIGO探測器會進一步改進，而現有的全球探測器網絡也將拓展，其中包括高級Virgo，日本的大型低溫重力波望遠鏡（KAGRA），和可能的建於印度的第三個LIGO探測器。這些都有助於我們更好的定位重力波源在天空中的位置和更準確地估計它們的物理學性質。重力波天文學這一新興領域必將有一個光明的未來！

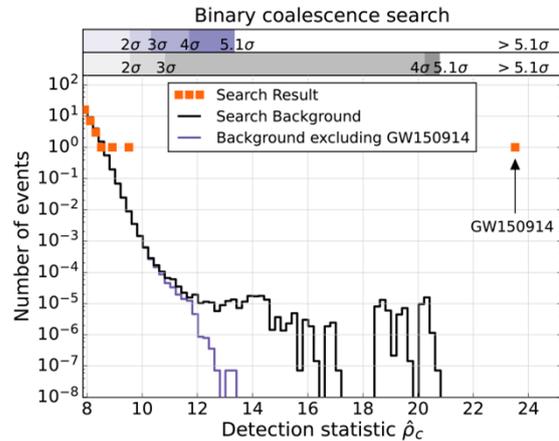


圖4（由論文中的圖4改編而來）。對雙星併合信號的搜索，定量地顯示了同雜訊起伏產生的背景相比，GW150914是多麼地罕見。這一搜索可以斷定由雜訊偽裝成GW150914是極端罕見的——少於每兩萬年一次——這一數值等同於高於五倍sigma的探測顯著性。

延伸閱讀

LIGO科學合作組網頁（包括我們在Physical Review Letters發表的論文）：<http://www.ligo.org>

高級Virgo網頁：<http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

我們主要論文的相關文章：

- *Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions:* <https://dcc.ligo.org/P1500229/>
- *GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO:* <https://dcc.ligo.org/P1500269/>
- *Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500262/>
- *Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave candidate G184098:* <https://dcc.ligo.org/P1500227/>
- *GW150914: a black-hole binary coalescence as predicted by general relativity:* <https://dcc.ligo.org/P1500213/>
- *The rate of binary black hole mergers inferred from Advanced LIGO observations surrounding GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500217/>
- *Properties of the binary black hole merger GW150914:* <https://dcc.ligo.org/P1500218/>

LIGO Open Science Center (with access to GW150914 data): <https://losc.ligo.org/about/>