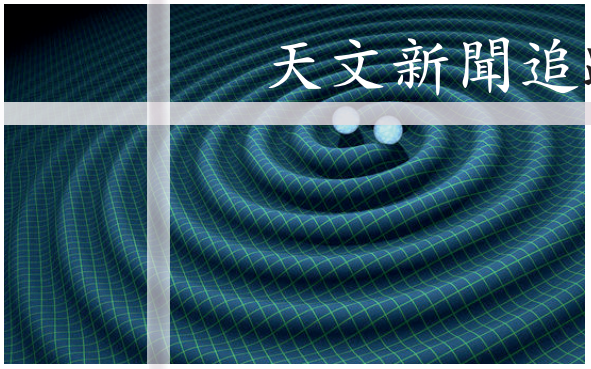


百年追尋－重力波

文/ 胡佳伶

100年前，愛因斯坦提出廣義相對論預測重力波存在；100年後，人類竟然能夠偵測到重力波！這提供了我們一個全新的方式觀測宇宙，或許能看到宇宙不一樣的面貌！

臺灣時間2016年2月11日大年初四晚上11:30，臺灣還沉浸在新年連假的歡樂氣氛，全球可是都在關注一項科學大發現－－科學家經過百年追尋，終於發現百年前愛因斯坦的相對論所預測的重力波！

究竟什麼是重力波？我們又要怎麼偵測它呢？一段好的影片勝過千言萬語，現在就先讓我們進一段VCR吧！

影片：三分鐘搞懂重力波
https://youtu.be/vNXJfDvNc2s

質量告訴時空如何彎曲
時空告訴質量如何運動

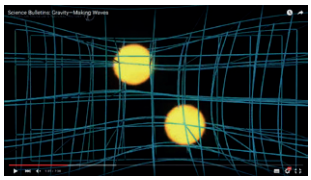
1916年愛因斯坦發表廣義相對論，指出質量能夠扭曲時空。如果把時空想像成一張巨大的膠膜，在這片膠膜放上一個有質量的物體，就會使膠膜彎曲，就像是在彈跳床上扔了個保齡球一樣。質量越大，時空也會被重力扭曲得越厲害。古典力學中的萬有引力在廣義相對論中，有著截然不同的解釋方式。當然，也要有影片說明比較清楚：

影片：質量讓橡膠膜彎曲（重力）
https://youtu.be/MTY1Kje0yLg

我們可以想像太陽是膠膜中央的大質量物體，導致周圍的時空（膠膜）劇烈彎曲，當你在彎曲的時空中放入另一個質量，質量自然就會順著彎曲的時空運動。這也就是為何我們可以用簡單的兩句話理解愛因斯坦的廣義相對論：「質量告訴時空如何彎曲，時空告訴質量如何運動」。（很多人會有疑問，影片中的小球最終會落入中央，那麼為何地球不會撞上太陽？雖然說根據廣義相對論，兩個天體互繞會輻射出重力波，損失能量，使得兩者之間的軌道逐漸縮減，但以地球繞太陽這樣的質量和時間尺度來說，這樣的效應並不顯著。不過，這也和模型中膠膜和小球間的摩擦力造成小球掉入中央的情形不太一樣，彎曲的時空和物體之間並沒有摩擦力存在。）

時空的漣漪－重力波

理解愛因斯坦如何解釋「重力」後，接下來讓我們看看「重力波」又是怎麼一回事吧！就像孩子們在彈跳床上跑來跑去，會形成往周邊傳遞的振動；或是在湖面上悠游打轉的天鵝，也會產生向周圍擴散的漣漪。一旦有質量的物質改變運動狀態，就會改變時空中的彎曲，產生「時空的漣漪」，漣漪會以光速向四面八方傳遞。（由於在「三分鐘搞動重力波」這段影片中，以二維的方式來表示三維的空間，這可能會讓有些人有重力波只在平面上傳遞的錯覺，但其實空間是三維的，所以重力波會往三維空間的各個方向傳遞。可以參考以下這段影片從1分23秒開始的片段，有表達出三維空間的感覺。）



影片：三維重力波
https://youtu.be/838BibFNlRM?t=1m23s

兩個人彼此相繞跳一支舞，也會導致時空的漣漪，但這樣的漣漪實在太過微小，實際上根本無法偵測。重力和宇宙中其他力（強作用力、弱作用力、電磁力）相比十分微弱，因此越大質量的物質，以越快的速度運動，才能產生我們能偵測到的大漣漪！宇宙中最強的重力波，是來自最激烈的事件，像是旋轉的中子星、大質量恆星死亡時的超新星爆炸、兩個互繞的中子星或黑洞、星系合併，或者是宇宙誕生初期的大霹靂和大暴漲。

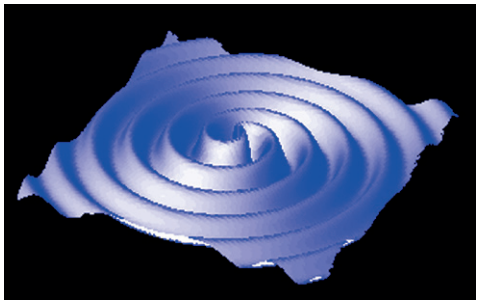


圖1. 重力波的模擬動畫
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Wavy.gif

重力波的百年追尋

1915年愛因斯坦發表廣義相對論，1916年他在德國柏林大學根據廣義相對論預測重力波存在。但他也深知這樣的效應非常微弱，並認為重力波可能永遠都不會被探測到。二十年後，愛因斯坦移民美國擔任普林斯頓高等研究院教授，回頭重拾重力波議題，他與助手羅森（Nathan Rosen）合作，以新的數學方式解決重力波問題，竟然發現重力波的解在某些時空點是沒有意義的，重力波可能並不存在！於是兩人合作寫了一篇論文〈重力波存在嗎？〉，在1936年6月投稿至《物理評論》（Physical Review），期刊編輯將文章交由普林斯頓大學的相對論專家羅伯森（Howard Percy Robertson）進行匿名審查，他發現愛因斯坦的數學在座標轉換上有些問題，這樣的審查意見讓愛因斯坦大為光火，重新修改論文之後才發表在其他的期刊上。

當時有些物理學家認為，即使重力波存在，我們也無法偵測到。一直要到重力波這個想法被提出的四十年後，理查．費曼（Richard Feynman）在1957年利用想像實驗證明，如果重力波存在，那麼理論上應該是能夠被偵測到的。

1968年。首度有科學家嘗試偵測重力波，馬里蘭大學的工程學教授約瑟夫．韋伯（Joseph Weber）利用細線將鋁製圓柱懸吊在真空中，他認為這樣的裝置就像個鈴鐺一樣，能放大微弱的重力波訊號，將輕微震動轉成能偵測的電訊號。為了避免環境干擾所產生的誤判，他還在相隔1,000公里遠的兩地——馬里蘭大學校園和芝加哥附近的Argonne國家實驗室設置了這個被稱為韋伯棒（Weber bar）的裝置。1969年6月，韋伯宣稱記錄到了重力波，這樣重要的發現當然讓物理學家和媒體十分激動，《紐約時報》報導「這開啓了人類觀測宇宙的新頁」，他也從馬里蘭大學的工程系調任至物理系，阿波羅17號在1972年將他的重力波探測裝置送往月球。很快地，他開始報導每天都有記錄到重力波的訊號，但其他的實驗室都沒有觀測到類似的結果。另一位物理學家大衛．道格拉斯（David Douglass）則是在韋伯的電腦程式中發現錯誤，並指出這個錯誤就是造成韋伯每天都能偵測到重力波的元凶。到了1974年，大部分的科學家都認為韋伯的觀測是有問題的，雖然韋伯在2,000年去世之前，仍持續宣稱有新的探測結果。

在重力波探測紛紛擾擾的同時，麻省理工（MIT）的年輕教授萊納．韋斯（Rainier Weiss），在廣義相對論的課堂上被學生問到韋伯的實驗，他身為實驗物理學家，當時對廣義相對論所知不多，仔細思量廣義相對論中的複雜數學後，他這麼評論：「我不知道韋伯到底在搞什麼，鋁製圓柱要怎麼和重力波產生交互作用？」他問自己，究竟有什麼樣的裝置能利用簡單的原理偵測重力波？於是，雷射重力波干涉天文臺（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，簡稱LIGO）的概念就此誕生。

1974年，美國天文學家約瑟夫．泰勒二世（Joseph Taylor, Jr.）和拉塞爾．赫爾斯（Russell Hulse）發現第一對由脈衝星環繞中子

星而組成的雙星系統PSR B1913+16；這個雙星系統的公轉周期和距離會逐漸變小——很可能是因為系統以重力波的形式損失能量。這是科學家首度發現重力波存在的間接證據，赫爾斯和泰勒也因此獲得1993年的諾貝爾物理獎！

韋斯對LIGO的概念逐漸具體成形，雖然一開始仍有許多物理學家對此抱持懷疑態度。1973年，加州理工的基普．索恩（Kip Thorne）在他的重力教材中，還在練習題裡請學生證明用雷射驗證重力波存在並不可行。但在1975年的一場會議中，與韋斯的徹夜長談改變了索恩的想法：「我開始相信重力波的偵測實驗終究會成功」。之後，索恩力勸加州理工聘任了主張建造干涉儀偵測重力波的蘇格蘭實驗物理學家羅納德普．德雷弗（Ronald Drever）。當時韋斯已經開始在麻省理工組裝探測臂約150公分的LIGO原型，但他在系上爭取經費時遇到不少困難，那時相當具有影響力的天文物理學家和相對論專家菲利普．莫里森（Philip Morrison），堅決認為黑洞不存在——這是不少物理學家抱持著的想法。但黑洞是少數能發出夠大重力波的天體，如果黑洞不存在，那麼韋斯的裝置自然也就偵測不到重力波。另一方面，索恩在加州理工的進展就順利多了，1984年他和德雷弗已經建造了40米長探測臂的LIGO原型。他們三人的團隊在1984年正式成形，並向美國國家科學基金會（NSF）提出LIGO計畫。

一直到1990年，美國國會才批准LIGO近2.5億美元的計畫經費，這是NSF有史以來最大的投資，引起了相當大的爭議，不少天文學家擔心這會排擠其他天文計畫的經費。當時NSF的一位官員里奇．伊薩克森（Rich Issacson）為催生此一計畫盡了不少心力，原來伊薩克森自己的博士論文就與重力波有關，他開玩笑說：「其實我是重力波領域安插在NSF的內應」，但他也成功地說服NSF，即使根據LIGO團隊評估，第一階段的設計無法偵測到任何重力波訊號，但計畫帶來的技術進步仍值得投資。1994年LIGO正式動工，2,002年開始運作，到2010年仍沒有偵測到任何重力波訊號。科學家並未就此放棄，決定停機升級成比原本設計更敏銳的aLIGO（Advanced LIGO）。重新設計和建造、安裝又花了七年時間和2億美元，2015年2月aLIGO終於進入測試，同年9月開始運作，所能探測的空間比初期的LIGO設計還要大上1,000倍。

相信大家對上一次偵測到重力波的新聞都還記憶猶新，2014年3月17日，哈佛－史密松天文物理中心（Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics）的天文學家宣布，他們利用位於南極的「第二代宇宙泛星系偏振背景成像」（BICEP2）探測器，在宇宙微波背景輻射中觀測到了宇宙暴漲的重力波效應，當時造成軒然大波，可惜但後來的分析驗證無法排除觀測結果是由星際塵埃造成的可能性。

LIGO的精巧設計

想要觀測時空的漣漪，可得要有相當聰明的方法！如果重力波將兩地之間的時空拉伸或者壓縮，我們無法靠一般的尺規測量出時空的變化，這是因為記號間的距離也同時被拉長或壓縮了。但是有一個刻度尺不會被重力波改變，那就是光速的尺——光速恆定是愛因斯坦狹義相對論的基本公設之一，這也提供了科學家測量時空變化的絕佳工具。如果兩點間的距離被拉長了，光從這點跑到那點需要更長的時間。而如果是被壓縮了，光只需要較短的時間來傳達——這就是LIGO實驗的出發點。

當有重力波傳來時，它會把時空在一個方向上拉長，而在另一個方向上壓縮，LIGO就是用雷射來測量管道兩端之間距離的變化。它的主要部份是由兩個互相垂直的長臂組成，分光鏡將大功率雷射束分成垂直的兩束，分別進入4公里長的管道，管道兩端懸掛著反射鏡，用以增加等效臂長，雷射反射4,000次後，就相當於行進了1,600公里，再進入偵測器中。但即使是經過了這麼長的距離，所能測得的時空變化還是非常微小。因此LIGO利用了光的干涉原理來測量兩個不同方向的光程差。在時空沒有被扭曲的正常狀況下，兩束光會經過完全相同的距離，因此在偵測器會互相抵銷（下圖左）。當有重力波經過

LIGO的時候，兩個通道的距離會稍微有些不同（在這次偵測到的訊號中，距離的變化是10^{-18}公尺），因此兩束光不再互相抵銷，而是在偵測器產生可測量的微小訊號（下圖右）。測量雷射反射後產生的干涉條紋，物理學家可以非常精準地測量管道兩端的距離是拉長了還是壓縮了。升級後的aLIGO可以測量到小於質子直徑萬分之一（10^{-19}公尺）的長度變化。

LIGO的管道是由不鏽鋼製作，直徑約1.2公尺，為了避免影響雷射光的光速，管道內部必須保持接近真空的狀態（約1兆分之一大氣壓），光是要將管道抽真空，就得花上40天以上的時間。此外，為了避免周遭環境震動或地震所帶來的干擾，LIGO的光學裝置得要安裝在結構複雜的防震臺上。單一天文臺的偵測還不能算數，LIGO在相距3,002公里的路易斯安那

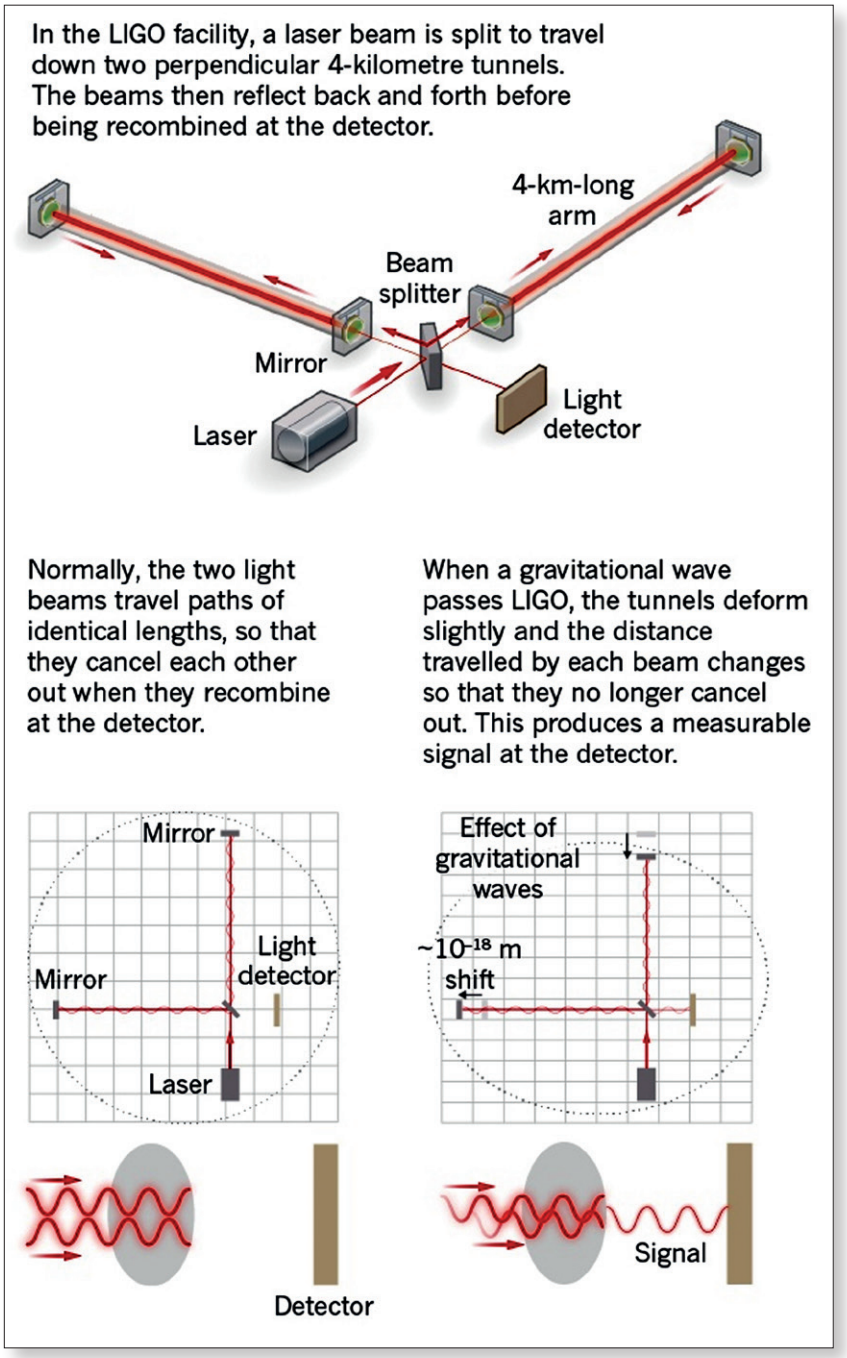


圖2. LIGO的原理
Credit: Nature

州利文斯頓縣（Livingston, Louisiana）和華盛頓州漢福德鎮（Hanford, Washington）建造了兩個相同的探測器，得要兩個探測器同時接收到相同的訊號，才有可能是重力波。

戲劇化的訊號

aLIGO上線所花的時間比預期要久得多，因此延期到2015年9月18日才能正式啓用。韋斯在正式啓用的一週前才從波士頓被找來解決電波干擾的問題，他建議用一個禮拜的時間好好檢查，但LIGO的負責人拒絕浪費任何時間，韋斯事後回憶起來說：「感謝上帝沒讓我這麼做，不然當訊號抵達地球時，系統會是離線狀態！」

9月13日是個星期天，LIGO的技術人員Effler和同事在華盛頓州的監測器忙了一整天，完成一系列測試的最後工作，吼叫、搖晃、敲打、磁鐵干擾，種種測試都比預期花了更久的時間。終於在凌晨四點剩下最後一個測試－－模擬在附近有個卡車司機踩剎車，最後他們終於收工開車回家，留下LIGO靜靜地收集數據。沒過多久，當地時間凌晨4點50分，重力波訊號就抵達地球，以相隔7微秒的時間差通過兩個監測器－－這時離aLIGO正式啓用還有四天的時間。

32歲的義大利博士後Marco Drago是第一位注意到這個訊號的人，當時他正坐在德國漢諾威的愛因斯坦研究所（Albert Einstein Institute），遠端監控LIGO傳回的數據。當Draco看到這個訊號時，一整個驚呆了！消息迅速地在全球上千人的LIGO團隊傳開，高齡83歲的韋斯正在緬因州度假，他登入LIGO系統看到這個訊號，也認不住大叫「My God!」，驚動了他的妻兒。研究人員再三檢查數據，LIGO科學家們也被要求宣誓保守秘密，但傳言依舊沸沸揚揚。不過也有許多科學家懷疑這只是個測試訊號。這是因為LIGO有個四人小組，專門送出假的重力波信號，好監督科學家工作。在2010年LIGO探測到一個很強的信號，科學家緊張兮兮地分析了六個月，最終認為這是個來自大犬座方向的重力波信號，正當它們將結果付梓投稿時，才被告知這一切只是個測試。不過，這次四人小組發誓他們和這個訊號沒有任何關係。科學家因此接受了最簡單的解釋：這是一對黑洞合併造成的重力波！

聽見黑洞合併的聲音！

物理學家對代號為G184098的重力波事件進行詳細分析和電腦模擬後，發現重力波源自兩個分別為36和29個太陽質量的黑洞，在約6~18億年前逐漸互繞合併，約有3倍太陽質量的物質在不及1秒的短暫時間內被轉換成重力波，其尖峰時間的輸出的能量相當於整個可見宇宙的50倍！重力波訊號在2015年9月14日抵達地球，兩個相距約3,000公里的LIGO天文臺以0.007秒的間隔偵測到相當類似的重力波訊號，較南邊的利文斯頓天文臺先收到，接著才是較北邊的漢福德天文臺（圖3），因此我們可以知

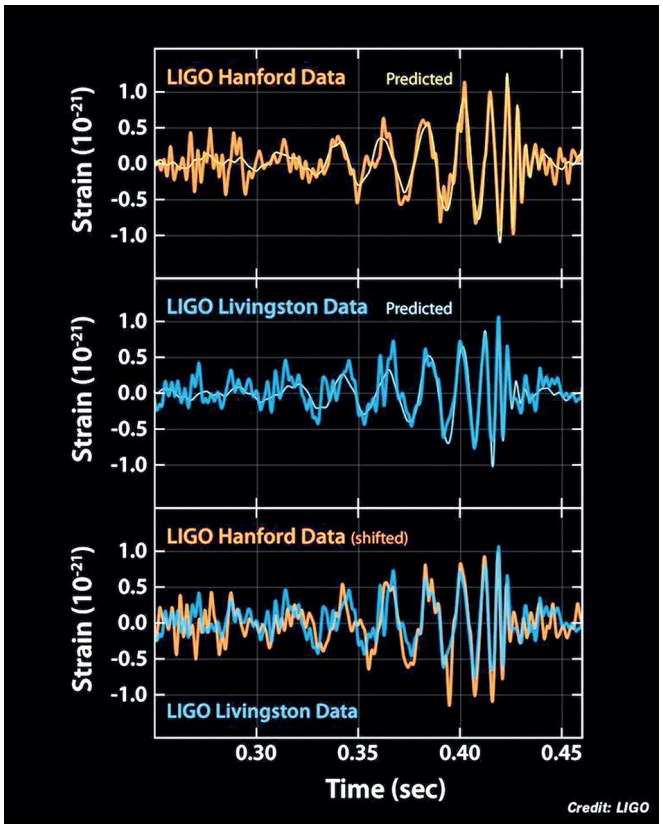


圖3.兩個相距約3000公里的LIGO天文臺以0.007秒的間隔偵測到相當類似的重力波訊號，較南邊的利文斯頓天文臺先收到，接著才是較北邊的漢福德天文臺。

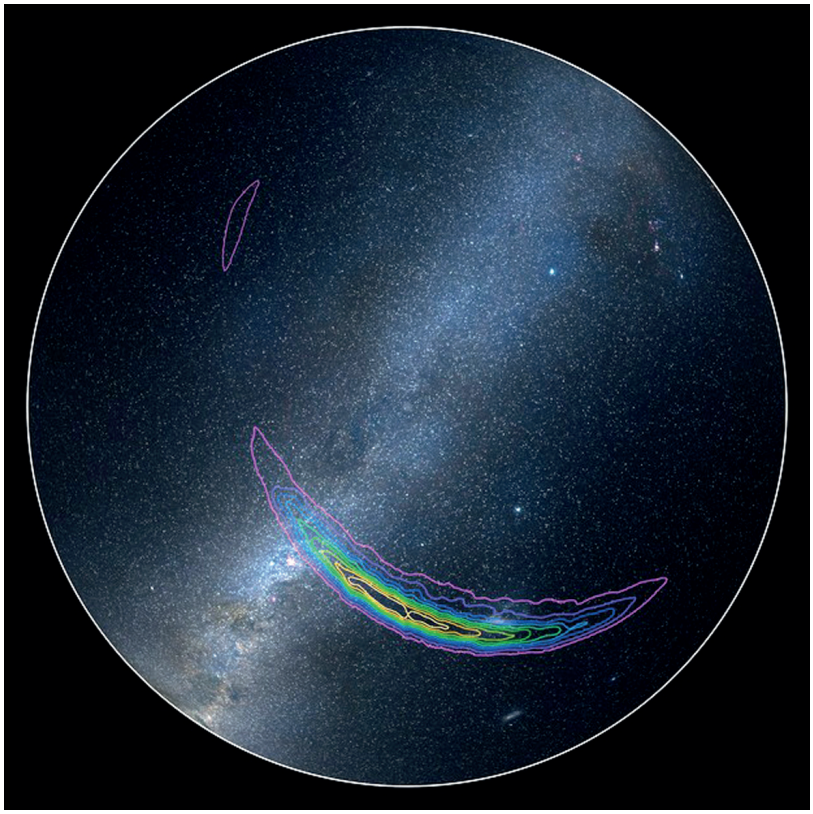


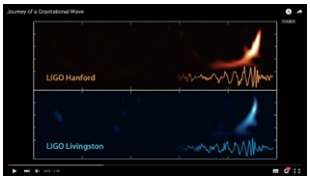
圖4. 重力波訊號源的位置，最外圍紫色線條內爲可信度90%的範圍，最內側黃色線條內爲可信度10%的範圍。

作者名單長達三頁，有來自全球136個研究機構的1860人參與。其中你也可以看到來自臺灣清華大學的五位師生喔！他們是清大光電所趙煦教授所領導的團隊，包括研究生潘皇緯、郭令智、黃書于、鄭鈞，中華民國科技部也被列在致謝名單當中。清華團隊的主要研究貢獻，是降低雷射反射鏡的熱擾動雜訊，以提高偵測器靈敏度，偵測更微弱的重力波。

大自然又給了更多難題！

偵測到重力波之後，並不是所有的問題都有了答案，大自然反而又給了更多難題！在aLIGO探測到重力波後 0.4秒，Fermi GBM探測到來自同一天區的微弱伽瑪射線，其時間和能譜與一般雙星系統結合時產生的伽瑪射線暴（Gamma Ray Buestr，簡稱GRB）相似，但總能量輸出僅十分之一。如果這真是雙星系統結合產生的伽瑪射線暴，而道重力波的來源是在南天（圖4），使用三角測距法還能計算出波源距離。這次重力波造成時空長度的變化率是10^{-21}倍，使雷射光束路徑長度改變了10^{-18}米，相當於LIGO可偵測極限的10倍。

這次量到的重力波頻率約在35到250 Hz之間，剛好都在人耳聽的到的頻率範圍內。各位朋友不妨親耳聽聽看黑洞合併的聲音吧



（https://youtu.be/TWqhUANNFXw）！

影片：黑洞合併的聲音和模擬影片、LIGO偵測的原理

https://youtu.be/FlDtXIBrAYE

如果你有仔細看過這回LIGO偵測到重力波的原始論文（http://goo.gl/Ll9ogr），會發現

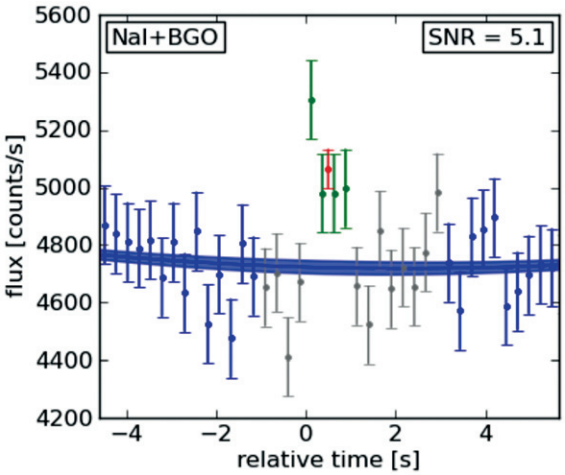


圖5. 來自於 GW150914 同一天區的微弱伽瑪射線 GW150914-GBM (綠色)。Credit: Connaughton et al.

且與這次偵測到的重力波源有物理關係，那麼科學家就頭疼了！因為產生伽瑪射線暴的重要前提，是雙星系統結合後必須有物質在系統附近，因為伽瑪射線是物質發射出來的。所以造成伽瑪射線暴的雙星系統「不可以」是兩個黑洞。可是 aLIGO探測到的是兩個黑洞結合產生的重力波，而兩個黑洞結合後是沒有物質剩下來的！如果這個伽瑪射線真的來自於本次偵測到的重力波源的話，雙黑洞系統如何提供物質給伽瑪射線暴？還是這只是巧合來自同一天區的伽瑪射線呢？科學家還需要更多數據才有辦法回答這個問題。

探測重力波的下一步

除了位在美國兩個LIGO偵測器之外，全球還有另外五個運作中、正在升級或計畫興建的重力波偵測器，包含位在德國的GEO600，義大利VIRGO和日本KARGA正在進行升級，印度也即將建造第六個重力波偵測器。2015年12月3日，歐洲太空總署（ESA）發射了「雷射干涉太空天線開路者號」（LISA Pathfinder），為「演化雷射干涉太空天線」（Evolved Laser Interferometer Space Antenna，eLISA）進行開路工作，而eLISA就是預計在2034年發射升空的重力波天文臺，可說是太空版的LIGO。這些重力波偵測器將能幫助我們探索更深遠的宇宙，偵測由不同機制所產生的重力波。

以全新的方式認知宇宙

很多人會問，除了漂亮驗證百年前愛因斯坦廣義相對論的最後一個預言之外，發現重力波到底有什麼重要性？想像一下，如果你的一生都曾失聰，直到有一天你的聽力恢復了！人類將可以用全新的方式聆聽這個宇宙，這就是重力波對我們的劃時代意義！當我們有新的方式觀測宇宙，將能發現未曾想像過的事物。四百年前，伽利略首度將望遠鏡轉向天空，人類從此對宇宙有了不同的認知；四百年來，人類不僅從可見光，還從紅外線、微波、無線電波、紫外線、X 光、伽瑪射線各種不同波段的電磁波，看到宇宙不同的面貌。重力波將開創天文觀測的新領域，它能穿透電磁波所無法穿透的空間，這次首度發現兩個黑洞合併就是最好的例子，這樣的天文事件無法以傳統的電磁波觀測，另外像是宇宙誕生之初的大霹靂和暴漲，也將是重力波觀測的重要目標。當然，這個重大的發現也會是諾貝爾物理獎的大熱門！

★廣播：重力波廣播導讀

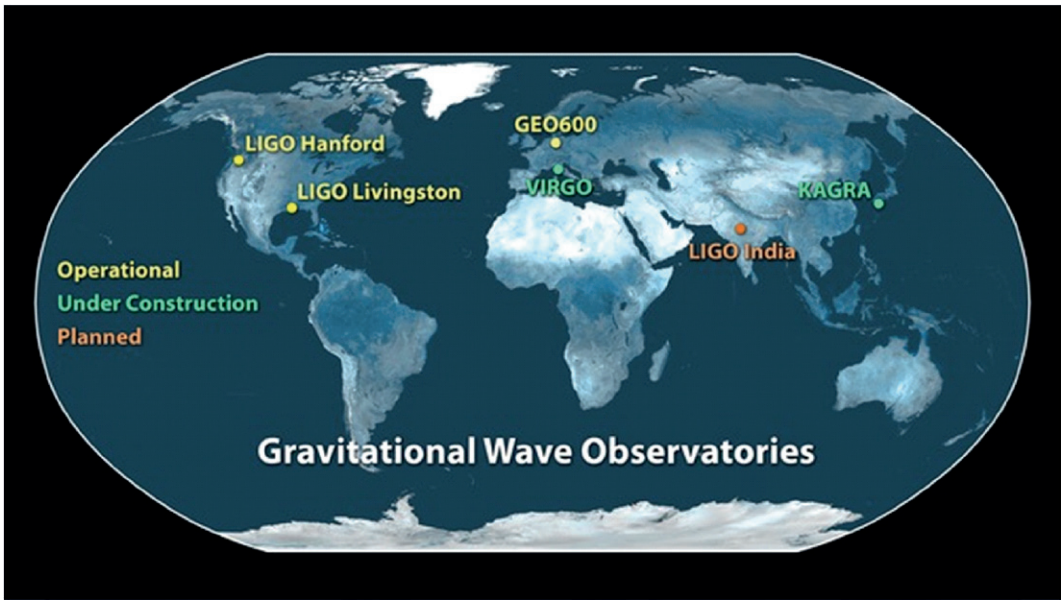


圖6. 目前世界上的重力波偵測器。運作中的有位在美國兩個LIGO偵測器和德國的GEO600。義大利的VIRGO和日本的KARGA正在進行升級，分別預計在2016和2018年上線。印度也即將建造第六個重力波偵測器。
Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab

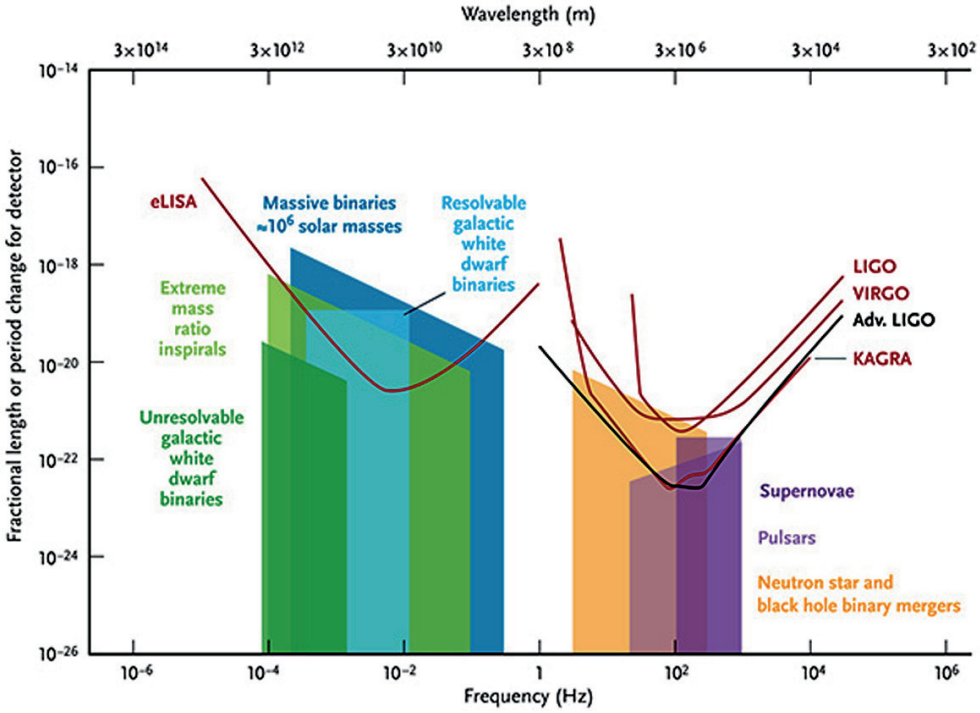


圖7. 不同的重力波來源有不同的頻率，用來偵測的裝置也不相同。
Credit: S&T: Leah Tiscione;
Source: C. J. Moore et al. / arXiv.org 2014

參考資料：

★LIGO官方網頁
https://www.ligo.caltech.edu

★LIGO: Gravitational Waves Detected 100 Years After Einstein's Prediction
https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211

★Nature: Einstein's gravitational waves found at last
http://www.nature.com/news/einstein-s-gravitational-waves-found-at-last-1.19361?WT.mc_id=FBK_NatureNews

★Science: Gravitational waves, Einstein’s ripples in spacetime, spotted for first time
http://www.sciencemag.org/news/2016/02/gravitational-waves-einstein-s-ripples-spacetime-spotted-first-time

★The New Yorker: Gravitational Waves Exist: The Inside Story of How Scientists Finally Found Them
http://www.newyorker.com/tech/elements/gravitational-waves-exist-heres-how-scientists-finally-found-them

★Quanta Magazine: Gravitational Waves Discovered at Long Last
https://www.quantamagazine.org/20160211-gravitational-waves-discovered-at-long-last/

★【網路天文館】廣義相對論發表100年後才終於偵測到重力波
http://tamweb.tam.gov.tw/v3/tw/content.asp?mtype=c2&idx=1475

★【CASE讀報】愛因斯坦預測成真：首次偵測到重力波訊號
http://case.ntu.edu.tw/blog/?p=23774

★【CASE讀報】愛因斯坦一度不相信重力波
http://case.ntu.edu.tw/blog/?p=23958

★【聯合報】重力波偵測器心臟 清大的團隊參與研發
http://udn.com/news/story/6809/1498277

★重力波：愛因斯坦的最後預言 (中)
https://phycat.wordpress.com/2016/02/11/gwave2/

★重力波：愛因斯坦的最後預言 (下)
https://phycat.wordpress.com/2016/02/12/gwave3/

★【風傳媒】物理學與天文學追尋百年的聖盃——重力波Q&A
http://www.storm.mg/article/81777

胡佳伶：任職於臺北市立天文科學教育館