

## 2017 諾貝爾物理獎—重力波

文／林志隆

### 摘要

2017 年的諾貝爾物理獎已經在 10 月 4 日公布，一如之前學界廣為看好的，今年是由做重力波觀測研究的「雷射干涉重力波天文臺」(LIGO)的魏斯(Rainer Weiss)、索恩(Kip S. Thorne)和巴利許(Barry Barish)3 位主持人共同獲獎，以表彰他們成功偵測到重力波對驗證廣義相對論的貢獻。自從 LIGO 的升級版 aLIGO 在 2015 年 9 月上線以來，已經偵測到多次重力波事件，aLIGO 甚至在正式啓用之前就已經成功偵測到一次重力波事件，其成就實是不容置疑。本文將對重力波的產生、LIGO 的發展歷程以及偵測儀器的設計概念做一簡單淺顯的介紹。

關鍵詞：重力波、廣義相對論、LIGO、黑洞、中子星

2017年10月4日，諾貝爾獎委員會公布了今年(2017)物理獎的得主，由LIGO實驗室的魏斯(Rainer Weiss)、索恩(Kip S. Thorne)和巴利許(Barry Barish)3位學者共同以重力波觀測成就獲獎。

重力波這個話題說起來得從愛因斯坦的廣義相對論講起。一般我們說愛因斯坦發明了相對論，但是相對論還分成兩部分，一部分是1905年提出的「狹義相對論」，另一部分是1915年左右提出的「廣義相對論」。狹義相對論討論的是比較單純的沒有外力（等速運動）下的事情，而如果物體的速度有變化（也就是有加速度或是受力）的情況下，所使用的數學規則稱為廣義相對論。

傳統的牛頓力學跟愛因斯坦的相對論之間，有一個很重要的差別是速度的極限。在牛頓力學中，物體彼此間的重力作用是立即而直接的，不需要傳遞媒介，自然也沒有傳遞速度的問題。而光速只是許多被測定出來的物理量之一，理論本身對於速度並沒有任何限制。

但是在相對論中有個很重要的假設是真空中光速是一個極限，任何物體的運動或作用力的傳遞都無法超越它。而且力的作用需要傳播媒介（不限於重力，也及於其他電磁力、強作用力和弱作用力），所以作用力的改變最快只能以光速傳遞。在兩個物體彼此吸引、靠近而互相繞旋的過程中，外界的觀察者會感受到它們的引力因為位置不斷變換移動而時強、時弱，就好像波動起伏一樣，所以這樣的現象被稱為重力波。

在廣義相對論中，愛因斯坦使用了時空彎曲的譬喻來取代傳統的重力場說法，讓大家能用比較視覺性的圖像方式來理解重力如何影響周圍環境。以前我們說物體會在其周圍產生一個重力場，因而對靠近它的其他物體產生作用力。相對論則換成說一個有質量的物體會扭曲其周圍的時空形狀，周圍的其他物體會沿著不平坦的時空而運動。所以兩個質量大的物體在互相吸引繞旋的過程中，周圍時空的曲度會不斷改變，以圖畫方式看起來就好像不斷撥動水面產生水波一樣，所以就被稱為重力波了。重力變化會在時空中產生波動的理論預測雖然很早就提出，但是實驗驗證卻一直到2015年才終於成功，因為重力作用的強度實在是太弱了。（天體繞旋造成時空扭曲的畫面可以參考NASA製作的動畫 [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=16&v=i1-3eClv\\_TY](https://www.youtube.com/watch?time_continue=16&v=i1-3eClv_TY)）

第一次測量到重力波的單位是美國的「雷射干涉重力波天文臺」(LIGO)，它是利用干涉儀把一束雷射分成互相垂直的兩束，再利用來回反射的方式延長光束走的距離，最後讓兩束光再重合產生干涉現象。由於重力波會造成時空的扭曲，所以如果有重力波從某個方向傳過來，則那個方向的時空會因伸縮而改變距離；可是另一方向的則沒有變化，這兩者時間差就會使兩束光重合產生的那個干涉光點的紋路產生變化。

而要產生夠強的重力波，一方面要質量變化大，一方面變化的時間要短，就如同用指尖點水面產生漣漪一樣，又快又用力產生的漣漪才會大而明顯。所以最可能的觀測目標就是兩個黑洞或中子星合併那一瞬間產生的重力波，因為合併的撞擊會有大量能量釋放出來，所以星體會有很大一部分的質量被炸飛出去，而這個時間非常短，所以產生的時空漣漪就會很明顯。

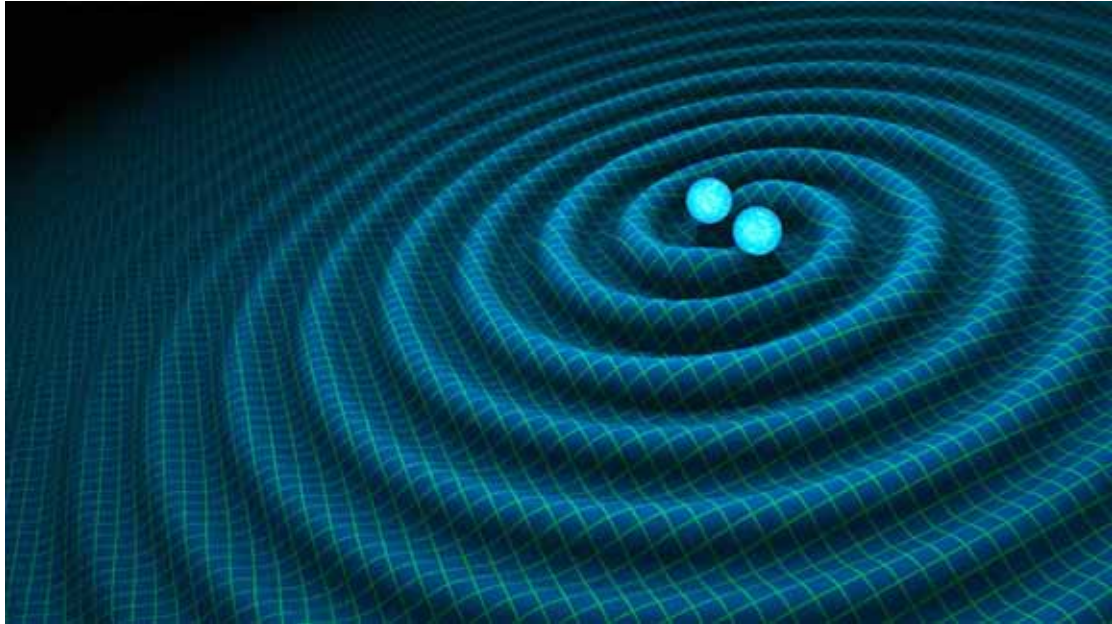


圖 1. 兩個大質量緻密的天體互繞時，會產生很強的重力波。(Credits: R. Hurt/Caltech-JPL)

在 LIGO 之前，1950-60 年代就有多組研究人員想偵測重力波，但是當時的儀器太小、靈敏度太差，所以沒有得到可靠的結果。在 1970 年代，這次得獎的 3 位學者和其他團隊都想建造更大的偵測設備，後來經過一番溝通，他們三位同意將資源整合成現在的 LIGO 團隊。第一代的 LIGO 在 1990 年起建，2002 年啓用，那是一個 4000 米長、外徑大約 3 米的大真空管，抽真空的目的是避免空氣熱擾動造成的影響。

LIGO 總共有兩套重力波偵測干涉儀，一套位於美國路易斯安那州的李文斯頓郡，一套位於華盛頓州的漢福德郡，兩者相隔約 3000 公里。這樣設計的目的是如果兩個都測到同樣的信號，就可以確信不是外界干擾造成的假信號，而且還可以利用時間差來推算重力波的波源在哪個方位。

筆者曾在 2012 年到李文斯頓的 LIGO2 實驗室訪問，當時第一代的 LIGO 已經在 2010 年結束，他們正在進行升級版的新一代 aLIGO 安裝工作。在他們的總部中除了辦公室外，還有一間很大的科學教育中心，裡面有很多介紹光學、波動和重力波、相對論的展示品，一般民眾或學校團體可以預約免費參觀，他們還會派專人解說。



圖 2. 噴水池後面的大水泥管，就是 LIGO 的管子，左方的藍白建築則是主要儀器所在。(林志隆攝)



圖 3. 李文斯頓郡的監控室，在圖中上方的四分割監視螢幕中就是實驗的干涉

紋，如果紋路有明顯變化，那就很可能是實果了。不過實際的判斷當然不全是靠這個畫面。

當時為我們解說的計劃專家在介紹進行中的升級工作時，就表示根據理論估計，新一代的 aLIGO 設計應該已經有足夠的靈敏度，他們有信心更新一旦完成很快就可以偵測到重力波。果然 2016 年 2 月他們就宣布，在 2015 年 9 月 14 日他們已成功偵測到兩個黑洞合併產生的重力波。可是，偵測到第一個重力波事件 GW150914 的時候，aLIGO 其實還在沒正式完工的試營運階段，按原定計畫應該是 9 月 18 日才要辦開幕典禮。所以據說一開始監控室還以為是驗收單位放的假信號，經過一番回報確認之後，才發現他們竟然真的還沒驗收就測到了一個重力波事件。

自從 2015 年測到第一個重力波事件之後，兩年多來已經又偵測到多次重力波事件。其中最特別的是在今(2017)年 8 月 17 日，兩個 LIGO 偵測器跟 8 月 1 日才完成位於義大利的 VIRGO（室女座）偵測器，三個同時測到一個重力波事件，而且這次是雙中子星合併的事件。更特別的是，在偵測到重力波之後 1.7 秒，偵測伽瑪射線的費米(Fermi)太空望遠鏡偵測到了一個伽瑪射線爆發 GRB170817A，約 11 小時後智利的光學望遠鏡也在同一區域測到一個千級新星(kilonova)的可見光變化。這是人類首次能夠把重力波和其他波段的觀測整合，進而了解一個天文事件中，天體的各個部位和不同波段所發生的細節。

重力波的理論構想提出已經 100 年了，經過實驗終於觀測到並證實了它的存在。得獎的 3 位學者不只窮盡一生之力在追逐這個夢想，更重要的是他們能夠放棄門戶之見攜手合作，加快了這一天的到來，獲得這個殊榮堪稱是當之無愧。