

知識天地

重力波研究—宇宙及天文觀測的全新窗口

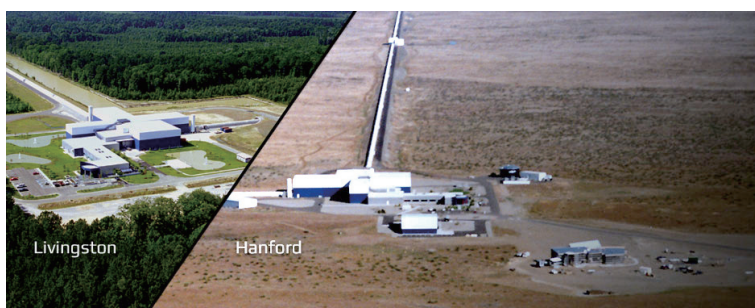
余海禮研究員（物理研究所）

13億年前，宇宙深處兩個黑洞在經歷了如情侶般互相纏繞着對方旋轉了百萬年的運動後，終於在雙方強烈重力場的拉扯中碰撞在一起，瞬間融合為一個更大的黑洞。這是宇宙中最劇烈的現象之一，在短短的十分之一秒左右的融合過程中，釋放出差不多是可觀測宇宙中所有可見光源功率總和的10倍多，我們稱之為重力波的能量。這股能量迅即以光速往四周奔馳擴散，這道在奔馳中不斷因距離擴散而衰減的重力波在宇宙中如是又跑了13億年，終於在西元2015年9月14日，東岸時間凌晨5時51分，蒞臨人類為了偵測他的到來而準備了超過40年，耗費兩億美元的aLIGO (Advance Laser Interferometer Gravitational wave Observatory (鐳射干涉重力波觀測站的簡稱)) 觀測站。

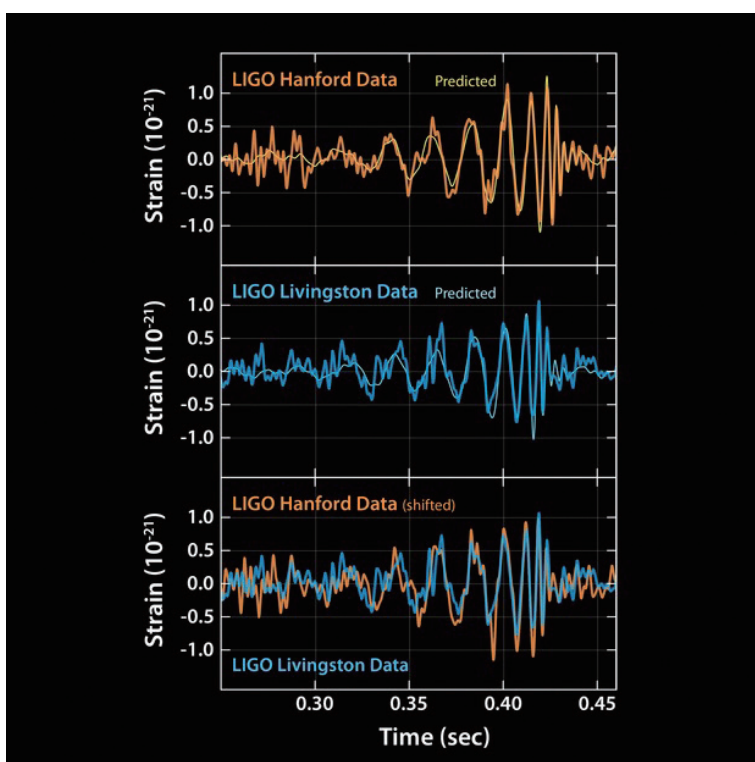
它首先觸發了位於路易斯安那州的Livingston aLIGO，然後在千分之七秒後觸發在三千公里外華盛頓州的Hanford aLIGO，在這兩個 aLIGO觀測站留下了圖二那短短不到半秒鐘微弱到不行的奇特訊號。接着這道重力波又往宇宙深處漫無目的地繼續奔馳。經過不斷反覆檢驗確定無誤後，2016年2月11日LIGO團隊終於在華盛頓舉行的一場記者會上共同宣布人類對於被命名為GW150914的重力波的首個直接探測結果。

愛因斯坦在一九一五年發表的廣義相對論所描述的牛頓力學的重力，其實是彎曲時空的曲率所產生的一種現象。廣義相對論告訴我們質量可以導致這種時空的曲率。當物質在時空中運動時，附近的曲率就會隨之改變。因為速度的傳播是有限的，巨大質量的物體運動時所導致的時空曲率變化會以光速像波一樣向外傳播。這一傳播現象就是重力波。

當重力波通過遠處的觀測者時，觀測者會發現當地的時空會被扭曲了。簡單來說就是，兩個自由物體之間的距離會有節奏地隨着重力波波動，頻率與重力波相同。然而，在這一過程中，廣義相對論又說這兩個自由物體並沒有受到牛頓力學所說的「力」的作用，座標位置也沒有變化；改變的，只是時空座標本身的距離，因此要觀察重力波就需要比較兩個不同的距離，這就是為什麼像LIGO這種具有兩個互相垂直臂的干涉儀是一個觀測重力波的最好方法。另外，在觀測處的重力波強度與波源間的距離呈反比。天



圖一：aLIGO Hanford 及aLIGO Livingston 重力波觀測站
(照片版權: Caltech/MIT/LIGO Lab)



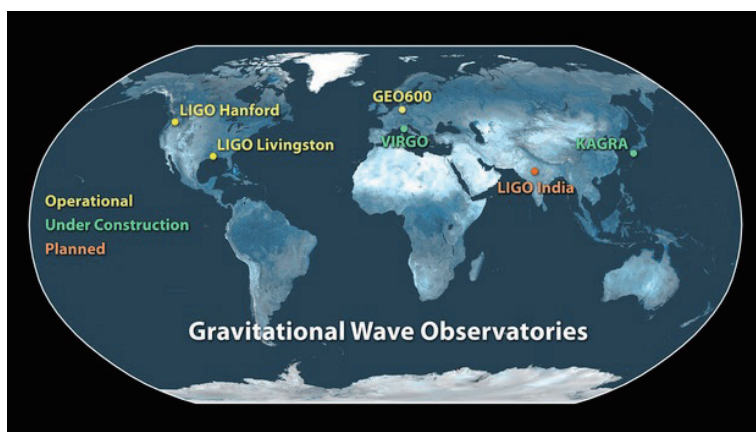
圖二：GW150924重力波訊號
(照片版權: Caltech/MIT/LIGO Lab)

文尺度是如此巨大的距離，所以就算是最激烈的天文事件所產生的重力波，當到達地球後其效應也將會變得微乎其微；在實驗中量度重力波效應的參數稱作「應變」(strain，代表其中距離的分數量的扭曲)，其數量級低於 10^{-21} 。為了探測到這種極之細微的變化，科學家就需要不斷增加探測器(干涉儀)的靈敏度。圖二乃是 Livingston aLIGO及相距三千公里外的 Hanford aLIGO接收的GW150914的重力波訊號，訊號顯示波源乃來自兩個位於約13億光年外質量分別大約為36與29倍太陽質量的雙黑洞的融合。其中x-軸為時間，y-軸為代表距離的分數量的扭曲的應變。而併合後的黑洞的質量為太陽的62倍。合併期間減少了3倍太陽質量的能量透過質能等價 $E=mc^2$ 以重力波形式釋出。

讀者可能會奇怪科學家到底憑什麼決定aLIGO接收到的重力波訊號一定是來自黑洞的融合，而不是其他如中子星的融合？這是因為在可探測信號持續的0.2秒內，數據顯示兩個黑洞間相對切向速度由光速的30%增至60%，同時，它們的軌道運動頻率為75Hz，約為重力波頻率的一半。因此簡單的計算可以得出，在兩個黑洞併合前，它們的距離自由大約350km左右。這是一個極之細小的軌道半徑，意味著其所觀測的系統只能夠是黑洞。因為在已知的天文系統中，沒有其他系統的質量能夠巨大到讓他們在併合前可以以如此小的半徑做軌道運動。

2016年5月，aLIGO全體研究團隊，特別是計畫創始者朗納·德瑞福(Ronald Drever)、基普·索恩(Kip Thorne)、萊納·魏斯(Rainer Weiss)，由於探測到重力波，共同榮獲基礎物理學特別突破獎與獎金3百萬美金。三名計畫創始者在平分其中一百萬後，把其餘兩百萬分給aLIGO成員，每人大約分到兩千美元。值得一提的是基普·索恩曾經於2015年10月28日應李水清物理講座之邀請訪問本院物理所，發表《從大霹靂，黑洞到星際效應》的公眾演講，於參加本所舉辦的重力研討會時隱晦地透露了aLIGO將會在7年之內發現重力波。筆者於記者會當天電郵索恩，除了恭賀其團隊的發現外也證實了索恩在十月訪台時已經十分確定他們已經測量到重力波。一般的新聞報導都說重力波的測量證實了愛因斯坦的廣義相對論，但他們卻忽略了這其實也將會是在更精確的數據下否定廣義相對論的開始。不斷的追求更精確的實驗來證明及否定過去的理論，讓我們得以不斷的逼近更精確的理論，這就是科學的基本精神。

重力波與波源整體的宏觀運動直接相關，同時，重力波另外一個非常重要的特點在於它幾乎不與物質進行交互作用。來自遠方天體甚至是宇宙誕生時所產生的重力波，至今幾乎沒有發生衰減或散射，這意味著重力波可以作為研究宇宙深處的重要工具。宇宙形成後38萬年，電磁波才開始能夠穿透宇宙的物質，在這一堵「牆」以前的宇宙的現象是無法通過目前最重要的微波背景來直接觀測的，因此重力波也就成為了直接觀測大爆炸的僅有工具，這就是為什麼科學家說重力波是打開了另一扇對宇宙及天文觀測的全新窗口。目前，全球重力波觀測網絡包括：除了在華盛頓州及路易斯安那的兩個aLIGO之外還有德國的GEO600、意大利的VIRGO及將來日本的KAGRA，這個全球網絡可以讓科學家從測得的重力波訊號來決定訊號來源的精確位置。



圖三：世界各個重力波觀測站構成的全球網絡
(照片版權: Caltech/MIT/LIGO Lab)