

重力波獨白落幕，多角觀測閃亮登場

金升光

一如許多人事前的預期，重力波研究毫無懸念的拿下了今年的諾貝爾物理獎（參閱《科學月刊》本期諾貝爾物理獎介紹）。然而，要讓大多數圈外人相信這些臂長 3、4 公里的雷射干涉儀可以分辨出信號振幅只有質子大小千分之一，而且還是來自十幾億光年的外太空、連天文學家都未能預見的大型星球質量雙黑洞碰撞，其實是有些難度。得獎恭賀之聲尚未稍歇，美國國家科學基金會（National Science Foundation, NSF）10 月 16 日在華府與重力波研究團隊，包含美國的 LIGO 計畫和 8 月初才加入聯合觀測的歐洲 Virgo 干涉儀，以及代表全球 70 多個天文台的科學家們大陣仗的召開記者會，宣布了第 5 個重力波事件 GW170817 同時也是伽瑪射線爆 GRB 170817A 的相關研究。這是人類首度透過各個電磁波段確認重力波來源，並詳細觀測爆發後的餘暉（afterglow），推斷是來自長蛇座方向距離我們 1.3 億光年 NGC 4993 星系內兩顆中子星相互碰撞的結果。碰撞不僅實際上使全球振動，也讓許多地面和軌道上的大望遠鏡轉向同樣的目標。這原因當然不只是爲了再次驗證愛因斯坦相對論的成功而已。

短伽瑪射線爆與重力波的關聯

伽瑪射線爆（gamma-ray burst, GRB）是冷戰時期美國衛星爲了監測前蘇聯的核子試爆活動意外發現的。這類天體的高能輻射爆發時間只有幾秒鐘，每年可偵測到上百次，遍布全天空，幾乎不重覆發生無法預測，研究困難進展緩慢。部份的 GRB 爆發後在波長較長的電磁波段可以觀測到餘暉，亮度衰減幾小時或幾天之後就很難看見。GRB 爆發時的光度比超新星還亮，是人類肉眼可能看到的最遙遠的天體（例如 GRB 080319B）。不過，一般認爲這瞬間的高能輻射應該像燈塔一樣，只集中在特定的方向。

統計發現，依照爆發時間長短和伽瑪射線頻譜分布可以將 GRB 分成長、短兩種。透過其他間接的證據，天文學家長久以來就懷疑雙中子星合併是某些短 GRB（short GRB）的前身，一夜之間得到證實。雙中子星系統經由重力波輻射損失能量，和脈衝雙星的軌道衰減觀測吻合，不僅是重力波存在的間接證據（1993 年諾貝爾物理獎），也是 LIGO 計畫最初就鎖定的觀測目標之一。雖然雙中子星質量較小，GW170817 卻是 5 次事件中信號（信噪比）最強的，合併前 100 秒內的周期變化清晰可辨；它和我們的距離不到前幾次雙黑洞系統的十分之一，同時也是少數已測得距離的短 GRB 中最近的一個。

中子星碰撞與中子快捕獲過程

GRB 的餘暉和爆發後的產物或周遭的星際介質有關。科學家並不預期雙黑洞合

併會放出強烈的電磁波。9 月底才剛發布了第 4 次重力波事件 GW170814 的研究結果，眾多大小望遠鏡搜尋仍一無所獲。但是中子星不同，它比較像是一個如臺北市般大小，質量卻比太陽稍大的巨大原子核。每立方公分的中子星物質比全人類體重加起來還多。當中子星碰撞合併，無可避免的會有些物質被釋放或噴發出來，這過程比單純的雙黑洞合併還要複雜。

一般人很少在意周期表上各種元素的含量和起源。當代科學認為，宇宙誕生不到半小時就產生了大部分的氫和氦，接著透過恆星內部的核融合反應生成碳、氮、氧等元素。也就是說，你、我、乃至身邊草木玩物的每一顆原子都曾經是漂浮在銀河星際的星塵！比鐵重的原子核融合會吸收能量，需要經由一些特別的核子反應才有可能，容易克服原子核靜電斥力的中子扮演著重要角色。重原子核（例如鐵）以快慢不同的速率吸收中子，經過系列衰變後會產生原子序更高的特定穩定核種。早在 1957 年的一篇經典論文（史稱「B²FH」，依四位作者姓名）就指出快速的捕獲中子（即「中子快捕獲過程」，r-process）是核合成（nucleosynthesis）的重要關鍵之一，核心塌縮的超新星和雙中子星碰撞皆是核合成研究的焦點。

自由中子的半衰期不到 15 分鐘，不穩定的核種也依照長短不同的速率衰變。就像核子反應爐的燃料棒加熱爐心周遭，隨著超新星或中子星碰撞噴發物逐漸消散，透過模擬與計算可以預估、比對爆發後幾天或幾周從紫外光到紅外光的光度變化。超新星的研究歷史較久，對應中子星系統的「巨新星（macronova）」或「千新星（kilonova）」不僅理論變數多，觀測樣本也少。千新星之名意謂著預期光度是典型新星的千倍。新星是密近雙星系統中緻密天體（通常是白矮星）吸積物質而產生星球表面的熱核爆炸，瞬間光度約為太陽的十萬倍左右；超新星則是整顆星球爆炸，最亮時可和全星系千億顆恆星相匹敵。兩者顯然有些差距。這次事件，重力波觀測隱含了質量、自旋與軌道角動量以及可能存在的潮汐形變等資訊，加上光學望遠鏡觀測放射性物質的衰變、運動、輻射傳輸等特性，讓我們瞥見如黃金和鏷系、錒系元素的誕生。婚禮上新人穿戴的飾品背後，很可能有段轟轟烈烈的故事啊！

從中子星物理到宇宙論研究

中子星表面及外層的結構可以透過核子物理來理解，但是核心處於極端物理條件下的那團夸克膠子電漿卻無法在實驗室驗證。忽略磁場和對流，中學生可以用理想氣體定律來建造一個簡單的太陽模型。這定律就是一組狀態方程式（equation of state），由物質的基本特性來決定諸如溫度、壓力、體積等狀態變數之間的關係。不同的關係求出的中子星質量、大小、形變也有差異。中子星大小有所不同，但是狀態方程式和物理基礎應該相同。預期未來更多中子星系統的精密分析，或可解決這重要的問題。

重力波訊號隨著距離衰減，就像遙遠的標準燭光，是一把新的量天尺，一口氣跨到一億光年之外。配合望遠鏡同時觀測到的遙遠星系，可以測量宇宙膨脹。近年宇宙論學者希望能將哈柏常數的精確度推進到 1%，不同方法得到的數字卻有些出入，不難預見更多的重力波同步偵測將會提供另一種獨立的觀點。另一方面，謎樣的暗物質與暗能量和其他重力理論的關係也再次受到嚴格檢視。在中子星合併的重力波訊號 1.7 秒之後，衛星才接收到伽瑪射線（和距離 1.3 億光年相對比，精確度高過 10^{-15} ）。雖然伽瑪射線的發射機制仍有待釐清，這時間差本身的意義也有待更多的類似事件來說明，任何嘗試修正的重力理論都必須正視這樣的精確結果。

NSF 與 LIGO 的創業維艱

NSF 資助重力波研究 40 多年，連同早年的干涉儀原型迄今總耗費將近 11 億美元（NSF, *LIGO Factsheet*, 2017）。這總金額雖然遠比不上當年美國能源部手下的超導超級對撞機（SSC，計畫在 1993 年中止），管徑 1.2 公尺的干涉儀仍然是當時全球體積最大的真空系統。回顧重力波實驗的歷史，LIGO 計畫一路走來不能算是一帆風順。1960 年代後期，韋伯（Joseph Weber）在美國馬里蘭大學使用長度 2 公尺直徑 1 公尺的金屬圓柱（後人稱為「韋伯棒，Weber bar」）偵測重力波，引起學界的關注和仿效。到了 1970 年代初期，美國及歐洲開始利用剛誕生不久的雷射技術發展小型干涉儀實驗，當時出版的書刊包含索恩（Kip Thorne）本人的評論並不認為它會成為重力波研究的主力。

隨著光學工藝的進展，自 1970 年代末期，英國、德國以及稍後的日本紛紛建造 10 到 30 公尺級的雷射干涉儀；NSF 也嘗試整合東西兩岸的團隊，並在加州理工建置 40 公尺的干涉儀原型，為下一代重力波偵測技術做準備。1980 年代中期，LIGO 計畫逐漸成形。為了偵檢出這難以捉摸的微小信號，需要公里級的大型干涉儀，預估的經費也隨著規模大增，學界開始出現質疑的聲音。1986 年秋天，NSF 與當年 LIGO 三人小組之一的魏斯（Rainer Weiss）找來一群對於大型計畫有經驗的圈外人士組成了特別評議會，花了一星期的時間詳細檢討整個計畫。會議結論熱烈支持 LIGO 的科學目標和技術的可行性，但是要求改變三頭馬車的管理方式。加州理工很快的找到 LIGO 的第一位主任。在 Vogt 的強勢領導下，對爭論不休的問題做出果斷決定，臂長 4 公里的雙干涉儀建造計畫於 1989 年底送到了 NSF。在 1990 年代初期，LIGO 是 NSF 有史以來投資最龐大的單項研究。將近 2 億美元的硬體建造經費就佔去了整個計畫預算的 8 成以上。

如此高昂的花費應該集中在單一實驗還是用於資助眾多小型研究向來爭議不斷。LIGO 名字的「O」指的是天文台（observatory），雖然未必是所有參與者的共識，但也適切的表達了計畫的願景：藉由重力波觀測來從事天文學研究。天文學界卻不大認同，並不看好這不知道要花多久時間才能偵測到比原子核還小千倍的信號

能對天文研究產生多少貢獻。雖然 LIGO 得到物理學門的規劃支持，天文學門的看法依然反映在學門的十年計畫和國會的聽證會上。NSF 現行的「主要研究設備及設施建造」(Major Research Equipment and Facilities Construction, MREFC) 預算科目從 1995 年才開始，當年還不存在。然而，LIGO 這項高投資、高風險、高報酬的計畫終究得到 NSF 高層和國會的支持，預算自 1992 年起編列。NSF 必然也感受到相當大的壓力和責任，在評議會的建議下聘用了專職的專案經理。此時，LIGO 內部紛爭揭露的人事和管理等問題引起 NSF 和國會的關注，也導致預算凍結和削減，直到 1994 年聘用剛卸下 SSC 計畫任務的巴里什 (Barry Barish) 接下 LIGO 主任一職才使停滯的計畫能繼續推動步上正軌，雙干涉儀正式動工。同時期大西洋彼岸的英國和德國、法國和義大利，也分別合作計畫建造臂長 3 公里的干涉儀。受到統一後的德國財政問題影響，英德合作改推 600 公尺長的 GEO600 計畫，測試過的先進光學技術可供大干涉儀使用；法義的 Virgo 干涉儀取室女座星系團之名，專注於低頻防震技術，1996 年在義大利比薩附近開工。

天文學的新世界

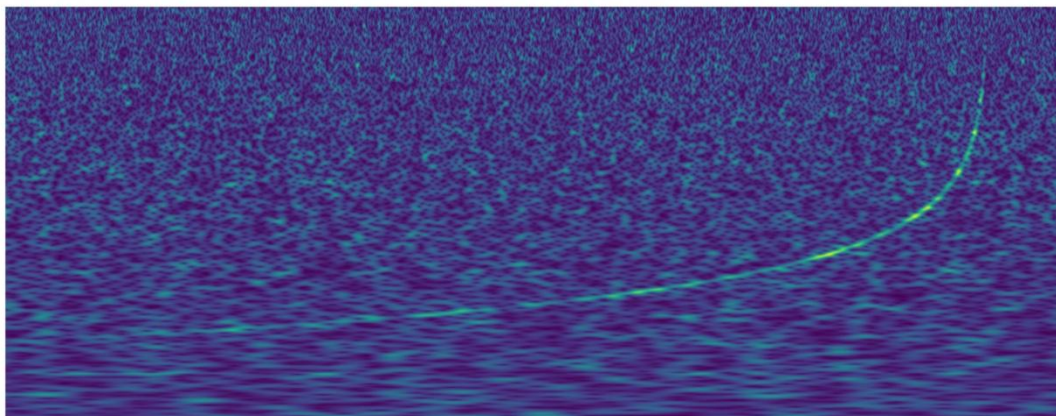
重力波研究多年來的努力終於在世人面前開花結果。加州理工也以口述歷史的方式為這所高等學府史無前例的大計畫留下第一手的記錄。我們不僅看到科學的洞見、技術的精妙，也看到東西兩岸兩所高等學府的不同風格與抉擇、跨領域的合作與困境，還有計畫與管理的成就與難題。然而，在確立計畫走向正確的科學目標、雷射等相關技術工藝的成熟、釐清良好有效的計畫管理、滿足目標願景的經費規畫，重力波計畫在科學上的成功，使得一切風風雨雨都只能算是大歷史的花邊新聞。重力波與各電磁波波段的多角觀測，一如預期的開啓了多元訊息天文學 (multi-messenger astronomy) 的新時代。除了順風耳和千里眼，微中子和宇宙線偵測也可望在不久的將來讓我們「聞到」來自外太空的不同風味。GW170817 不只為天文物理研究新添上一塊里程碑，它是解答許多問題的羅塞塔石碑，而我們只看到了冰山的一角，新的時代才剛剛開始呢。

延伸閱讀

Abbott, B. P. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 119, 161101 (2017).

Metzger, B. D., *Living Rev. Relativ.* 20, 3 (2017).

National Research Council., *Setting Priorities for Large Research Facility Projects Supported by the National Science Foundation*. Washington, DC: The National Academies Press, (2004). <https://doi.org/10.17226/10895>.



美國 LIGO 重力波干涉儀數據顯示 GW170817 雙中子星合併前數十秒的頻率（縱軸）變化，橫軸為時間。

Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory