

中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>



天聞

中華民國107年 春季號

重力波

開啟天文觀測的另一扇窗

模擬兩個黑洞合併後產生的重力波。© NASA/C. Henze

5分鐘

帶您理解「重力波」

秦一男 / 淡江大學物理系助理教授

2017 年的諾貝爾物理獎，頒給了三位美國科學家，分別是 Rainer Weiss、Barry Barish、Kip Thorne。這三位得獎的原因，是他們透過雷射干涉重力波天文台（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，簡稱 LIGO），測量到了「重力波」。

要了解什麼是重力波，要從愛因斯坦的廣義相對論談起。1905 年愛因斯坦完成狹義相對論之後，繼續探討時空的問題，在 1915 年提出了廣義相對論，對我們所處的宇宙，做出了幾項推論，其中一項就是重力波。

愛因斯坦認為，物質的存在，會造成時空的彎曲，而一個彎曲的時空，又會告訴物質在這當中應該做什麼樣的運動。但更重要的是，如果這個物質不是靜止不動，而是在運動的話，他自然而然的會使這個彎曲的時空，也隨著時間而改變。而且這個

改變的彎曲時空，會以光速往四面八方傳遞出去，這就是重力波的概念。

舉一個不完全正確，但比較容易理解的類比，重力波就像我們把一小塊木板放在水池中轉動，水面就會出現波紋，向四面八方傳出去。

重力波造成的效應，就是長度彎曲的變化，兩個正在互繞的天體所產生的重力波，會造成空間產生變化，一下子伸長，又一下子縮短。當這個重力波傳導到地球附近，也會造成地球附近的空間長度，隨著時間而伸長、收縮。

在此之前，重力波一直測量不到的原因，是它造成的長度變化量非常非常的小，也讓愛因斯坦的推論，一直停留在推論的階段，直到 LIGO 天文台藉由雷射干涉儀測量到這個長度變化，才證明了重力波存在。

LIGO 天文台目前測量到的前四次重力波，都是兩個黑洞互繞所造成的。第一次

測量到的合併的兩個黑洞，原來的質量分別是太陽的 36 倍跟 29 倍，在它們互相旋轉、靠近，直到完全結合成一個黑洞的過程中，會發出最強的重力波。最後它們變成一個只有 62 倍太陽質量的黑洞，消失的 3 倍太陽質量轉換成能量，完全以重力波的形式輻射出去。

但如此強的重力波，到達地球附近的時，所造成的空間長度變化，也只有 10 的 21 次方分之一。換算成具體的長度，相當於地球到太陽的一億五千萬公里之間，只有一個原子的大小的變化，可以想見這樣的測量有多麼困難。

重力波對天文觀測有什麼影響？可以借大家熟知的「瞎子摸象」來比喻。過去幾百年來，人類一直是透過光學望遠鏡來觀察天象，就好像盲人一直在摸著象鼻子，摸得再久，還是以為大象長得像根水管一樣。到了二十世紀，無線電波發明之後，如同人類終於摸到象的肚子了，這時候會覺得原來大象長得像個鼓。雖然依然不完全正確，但總比象只有鼻子來得複雜得多；甚至還發現了象有肚臍眼，都是非常偉大的貢獻，也因此 20 世紀因為天文觀測拿到諾貝爾獎的，都是電波天文學家。

接下來紅外線、紫外線、X 射線、 γ 射線等觀測手段的加入，都讓我們看到天象原來是這麼的複雜，就像大象加上了耳朵、腿跟尾巴一樣。到了二十世紀末，微中子進一步被當作觀測天文的手段，也因此二十一世紀獲頒兩次諾貝爾物理獎。微中子的特性可以讓我們看到天象的內部，而不只是表面。而這一次加入的重力波，則讓我們發現，原來這隻天象還是會走路、會運動的。



位於美國華盛頓州 Hanford 的 LIGO 觀測站。© Caltech/MIT/LIGO Lab

將這些所得資訊拼湊起來，終於讓我們對宇宙有了更清楚的認識，並且能夠進一步的分析，宇宙到底發生了什麼事情。可是科學家這樣就滿足了嗎？當然不會。科學有趣之處，就在於我們了解了舊的東西之後，得到的是更多的疑惑。

以這一次測量到重力波來說，再度證明了愛因斯坦的相對論是正確的。可是新的問

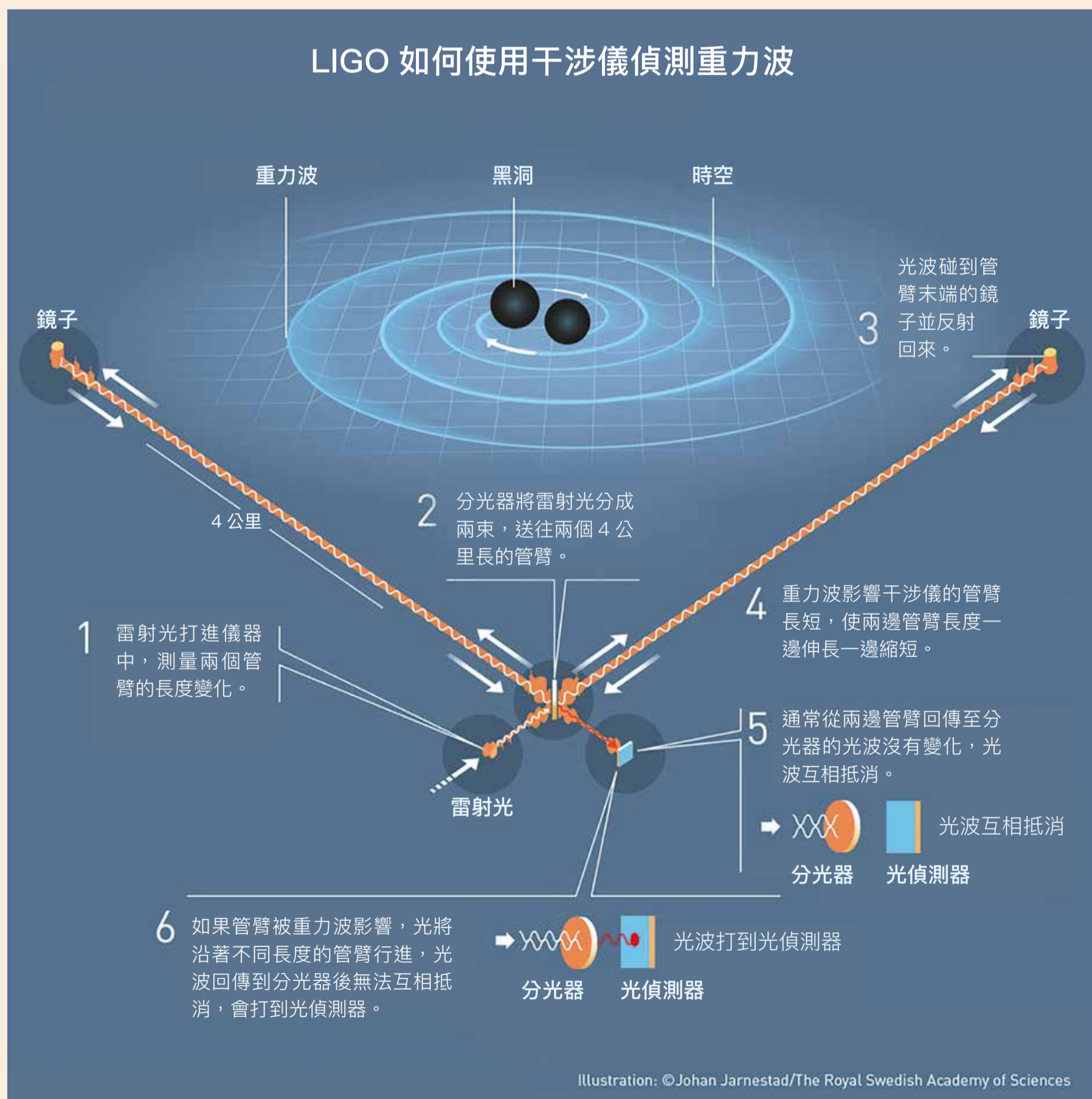
題來了，過去用天文觀測手段所發現的黑洞，不是在星系當中的超大質量黑洞，就是質量不超過太陽 20 倍的小型黑洞。而這一次測量到的四個重力波事件，都是由超過 20 倍太陽質量的兩個黑洞，合併成一個更大的、數十倍太陽質量的黑洞所造成的。

這些中型質量的黑洞，過去為什麼沒有透

過天文觀測方法被發現？如果過去的兩年當中，就有四個黑洞互繞合併，那麼在宇宙一百多億年的歷史當中，需要多少黑洞，才能造成足夠的碰撞事件？宇宙為什麼會有這麼多黑洞？成因是什麼？它們在宇宙當中是如何運動，互相碰撞的？天文科學家們又要忙上好一陣子了。

(本文改寫自遠見 2017 諾貝爾獎系列報導三)

LIGO 如何使用干涉儀偵測重力波







草帽星系 (M104)：大小與之類似的星系，可能讓天文學家偵測到超大質量雙黑洞的合併。
©NASA/Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

重力波獨白落幕

多角觀測閃亮登場

金升光

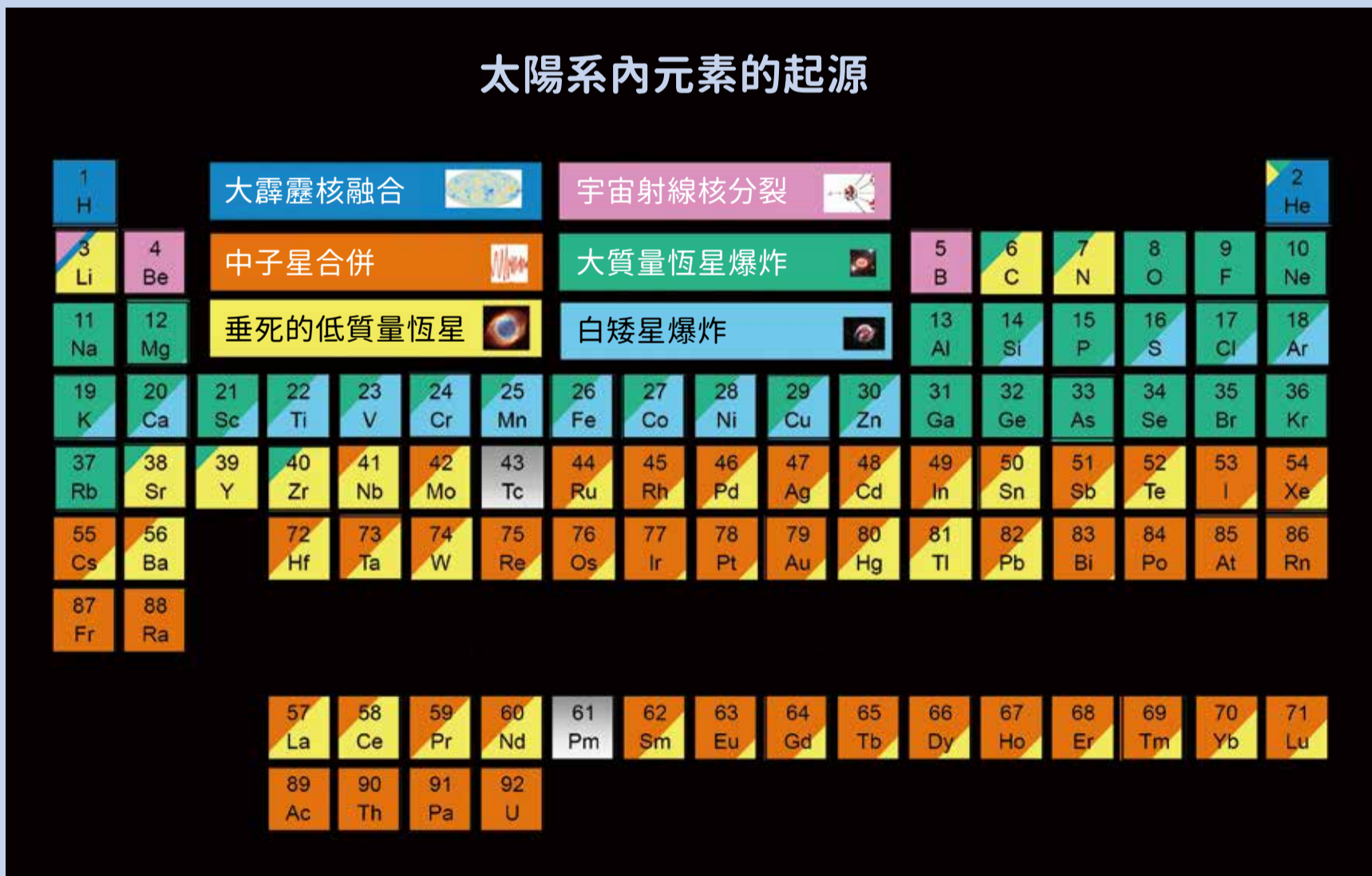
一如許多人預期，重力波研究毫無懸念的拿下了 2017 年的諾貝爾物理獎。得獎恭賀之聲未歇，美國國家科學基金會（National Science Foundation, NSF）於 2017 年 10 月 16 日與重力波研究團隊，包含美國的 LIGO 計畫和歐洲的 Virgo 干涉儀，以及代表全球 70 多個天文台的科學家們大陣

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。

伽瑪射線爆（gamma-ray burst, GRB）是

高能輻射瞬間爆發的現象，持續時間只有幾秒鐘。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 的前身。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，也是 LIGO 計畫最初就鎖定的觀測目標之一。

太陽系內元素的起源



週期表與其可能的來源。其中橘色色塊所標示的元素，可能來自於中子星合併。 ©Jennifer Johnson, EAS/NASA/AASNova

雖然雙中子星質量較小，GW170817 合併前 100 秒內的周期變化已清晰可辨，也是少數已測得距離的短 GRB 中最近的一個。GRB 的餘暉和爆發後的產物或周遭的星際介質有關。中子星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。

一般人很少在意週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

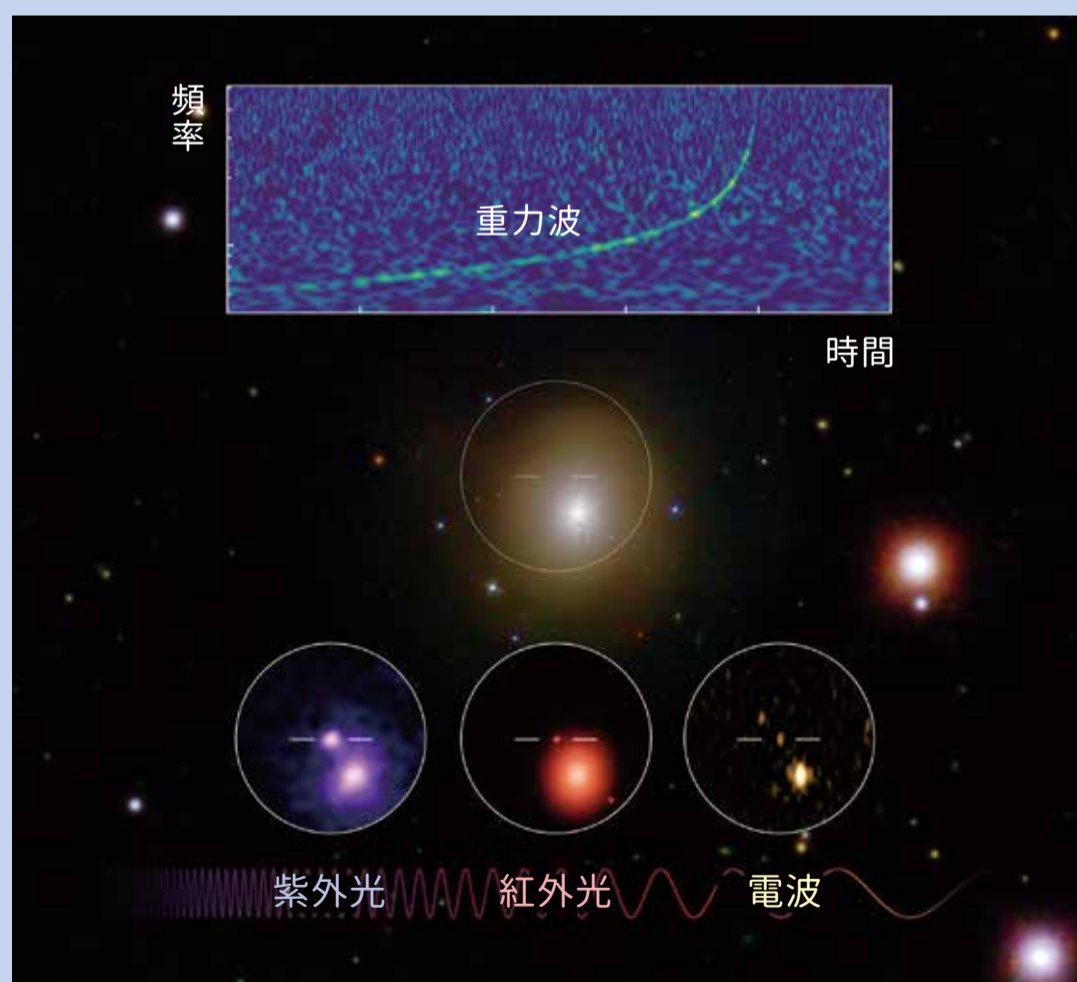
能，容易克服原子核靜電斥力的中子扮演著重要角色。重原子核（例如鐵）以快慢不同的速率吸收中子，經過系列衰變後會產生原子序更高的特定穩定核種，核心塌縮的超新星和雙中子星碰撞皆是核合成研究的焦點。

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的噴發物逐漸消散，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「千級新星（kilonova）」不僅理論變數多，觀測樣本也少。千級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 10 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、鈾系元素的誕生。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！

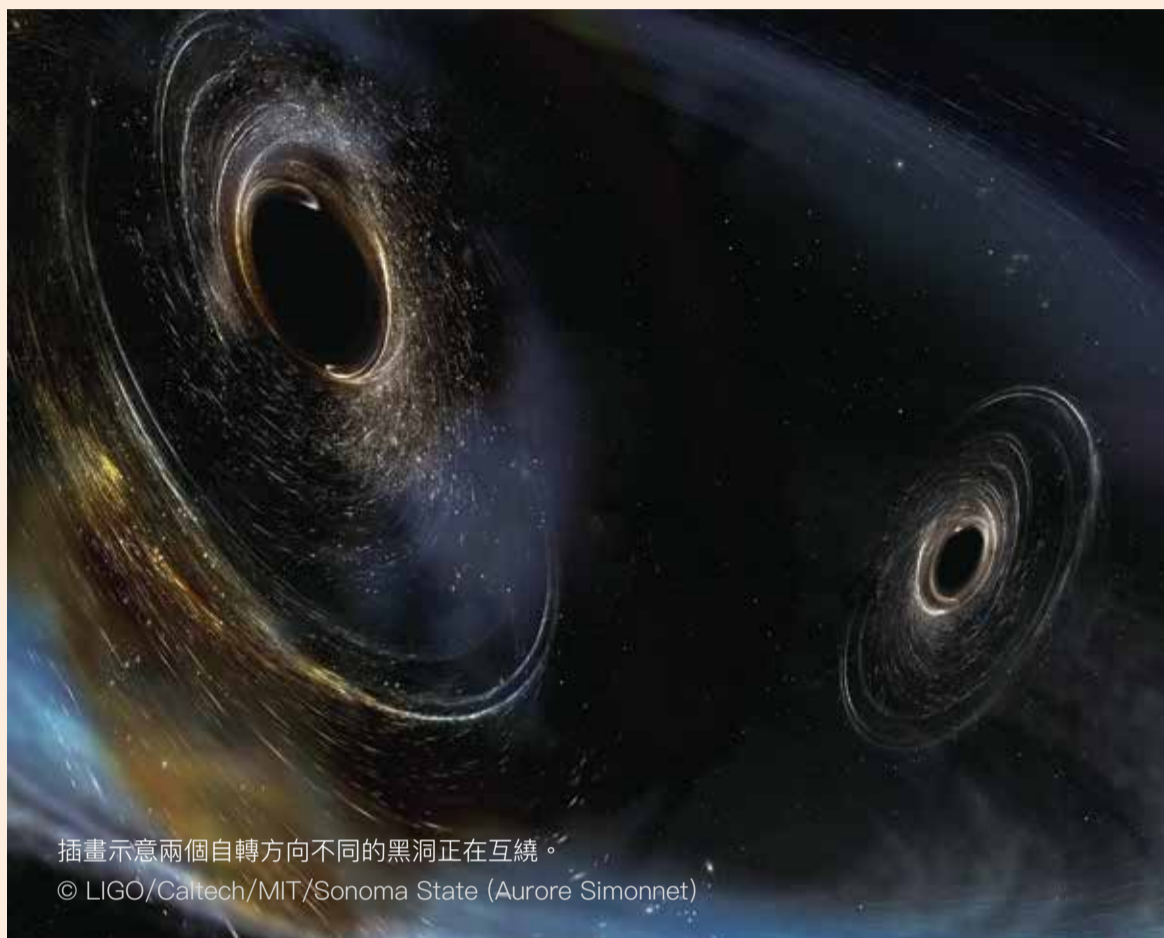
重力波訊號隨著距離衰減，就像遙遠的標準燭光，是一把新的量天尺，一口氣跨到 1 億光年之外。配合望遠鏡同時觀測到的遙遠星系，可以測量宇宙膨脹。近年宇宙論學者希望能將哈伯常數的精確度推進到 1%，不同方法得到的數字卻有些出入，不難預見更多的重力波同步偵測將會提供另一種獨立的觀點。另一方面，謎樣的暗物質與暗能量和其他重力理論的關係也再次受到嚴格檢視。在中子星合併的重力波訊號 1.7 秒之後，衛星才接收到伽瑪射線。雖然伽瑪射線的發射機制仍有待釐清，這時間差本身的意義也有待更多的類似事件來說明，任何嘗試修正的重力理論都必須正視這樣的精確結果。

重力波與各電磁波波段的多角觀測，一如預期的開啟了多元訊息天文學（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。NSF 資助重力波研究 40 多年，連同早年的干涉儀原型，總耗費將近 11 億美元，LIGO 計畫一路走來不能算是一帆風順。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。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，而我們只看到了石碑的一角，新的時代才剛剛開始呢！



重力波事件 GW170817 來自於星系 NGC4993 內的兩個中子星合併，在紫外光（下圖左，使用 Swift 望遠鏡）、紅外光（下圖中，使用南雙子星望遠鏡）和電波（下圖右，使用特大天線陣）波段的觀測。© Robert Hurt (Caltech/IPAC), Mansi Kasliwal (Caltech), Gregg Hallinan (Caltech), Phil Evans (NASA) and the GROWTH collaboration

（本文改寫自科學月刊 2017 年 12 月號）



插畫示意兩個自轉方向不同的黑洞正在互繞。
© LIGO/Caltech/MIT/Sonoma State (Aurore Simonnet)

時空漣漪

有助解開 黑洞彼此繞行之謎

過另一個單獨的黑洞。三者重力互相影響，最輕的物體（恆星）受到的影響最大，因此被甩出，而兩個黑洞開始彼此互繞，但距離還不足以產生合併。在星團中，雙黑洞每經過一次其它恆星，便會再一次多體作用。在甩出較輕的恆星時，雙黑洞也會損失動量，因次越靠越近，最後開始合併。在這個機制底下，產生的雙黑洞可以有各種各樣的自轉方向。

前兩次的重力波訊號不足以讓科學家推測黑洞自轉的資訊，但是第三次偵測到的重力波，是由兩個分別為 32 倍與 19 倍太陽質量的黑洞合併所產生，科學家們偵測到這兩個黑洞自轉的資訊：自轉方向並不同，而且有很大的機率是完全相反的方向，因此很有可能是由多體作用而來！但目前偵測的樣本數還太少，不足以最後的結論。LIGO 正在進行硬體升級，屆時儀器的靈敏度將會大幅提高，提供我們更詳細的重力波觀測。

（本文改寫自臺北天文館之網路天文館網站）

李見修 / Subaru 望遠鏡支援天文學家

雷射干涉重力波天文台（LIGO）第三度偵測到的重力波，其訊號裡有著小小的漣漪，讓科學家得以推測出兩個黑洞的自轉方向，有助於解開雙黑洞形成的機制。

早在 2015 年，LIGO 已偵測到兩起重力波事件。偵測到重力波當然讓科學家非常興奮，但卻也讓理論學家困惑不已：雙黑洞要非常靠近才會合併，那麼如此近的成對黑洞又是如何產生的呢？

黑洞是超大質量恆星演化到最後的產物。當恆星中心的氫燃燒完之後，外層便會開始膨脹變成巨星。在數億年之後，巨星核心的核融合反應所產生的熱壓力無法抵抗

重力，這時巨星就會開始塌縮變成黑洞，同時伴隨著超新星爆發。

而對於成對黑洞，科學家們想出了兩種可能的形成機制。第一種，是成對黑洞來自來自超大質量雙星系統，然後兩顆大質量恆星一前一後演化為黑洞。當一顆恆星已成為黑洞，而另一顆恆星還在巨星階段時，巨星膨脹的外層會被黑洞吸積，最後由黑洞與巨星共享。共享的外層會產生摩擦力，讓黑洞與巨星越繞越近。等到巨星也演化成黑洞時，便形成兩個非常靠近的黑洞了。在這個機制底下，兩個黑洞自轉的方向皆與公轉的方向一致。

另一種機制則是在星團中透過多體作用，一個由黑洞與恆星組成的雙星系統碰巧經

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段 1 號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天聞季報上刊登喔！



發行人 | 朱有花。執行主編 | 周美吟。美術編輯 | 王韻青、楊翔伊。執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆、蔣龍毅。

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所。天聞季報版權所有 | 中研院天文所。ISSN 2311-7281。GPN 2009905151。

地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓。（臺北市羅斯福路四段 1 號）。電話 | (02)2366-5415。電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw。