

# 重力波終於現身！

愛因斯坦世紀前預測的時空漣漪，讓天文學進入嶄新的時代。

作者：渥秋華（Natalie Wolchover） 譯者：戴守煌

渥秋華是 *Quanta* 的物理科學類資深撰稿人。她是塔夫斯大學物理學學士，曾於加州大學柏克萊分校攻讀研究所，並為多本雜誌撰稿。

由黑洞劇烈合併產生的時空漣漪，終於被我們偵測到了。此刻不僅距愛因斯坦首度預測重力波已達百年之久，距物理學家開始著手找尋此種信號，也已經有 50 年。

先進雷射干涉重力波觀測站（Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，縮寫為 Advanced LIGO）在今年 2 月 11 日宣布這項這項劃時代的新發現，總算證實了研究團隊這幾個月分析第一輪數據期間沸沸揚揚的傳言。天文物理學家表示，重力波的偵測開啟了一扇全新的宇宙之窗，即便我們無法透過光學望遠鏡看到遙遠的天文事件，也能感受到它，甚至能隔著宇宙巨大的距離聽見它。

領導這支千人團隊的執行總監瑞茲（David Reitze），在華盛頓特區的國家科學基金會（簡稱 NSF）記者會現場宣布：「我們偵測到重力波了。我們成功了！」



重力波通過地球時，會交替壓縮拉伸 LIGO 偵測器的兩臂。LIGO 共有兩具一模一樣的偵測器，分別位於華盛頓州的漢福特（如圖）與路易斯安那州的李文斯頓。（LIGO）

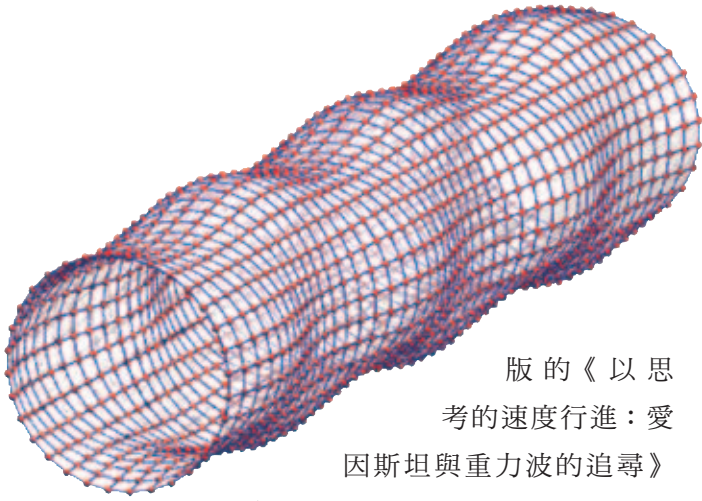
重力波或許是愛因斯坦理論各種預測中最遙不可及的一項，他與其他當代物理學家曾為此爭論達數十年之久。根據他的理論，時間與空間是具延展性的結構，會受到重天體影響彎曲。所謂「受重力作用」，事實上就是沿著時空結構的曲線落下的過程。然而時空結構是否能像鼓面，產生因震動而起的波紋？愛因斯坦對他的方程式導出的結果感到困惑，而且還推翻自己原本的觀點。連最死忠的支持者也同意，重力波無論如何都太微弱，難以觀測。它們由某些劇烈的天文事件產生後向外傳播，交替壓縮與拉伸所經之處的時空。但是當這些波從遙遠的源頭來到地球，通常只會在一英里的尺度上，產生與原子核大小相比都微不足道的伸縮。

偵測重力波需要耐心與精巧的設備。LIGO 有兩具一模一樣的偵測器，分別位於美國華盛頓州的漢福特（Hanford），與路易斯安那州的李文斯頓（Livingston）。雷射光在偵測器呈 L 形的兩條四公里長光臂尾端反射回到發射點，尋找重力波通過時同步引起的兩臂伸縮。藉由最先進的穩定器、真空環境，與數以千計的感測器，科學家可測出細達質子寬度千分之一的臂長變化。這種靈敏度在一世紀前，簡直不可思議。當麻省理工學院的魏斯（Rainer Weiss）在 1968 年開始構思 LIGO 實驗的前身時，許多人還認為難以實現。

「最神奇的是，他們實現了構想，成功找出這些難搞的小鬼頭！」阿肯色大學理論物理學家肯尼菲克（Daniel Kennefick）說。他也是 2007 年出



*Quanta* 是西蒙斯基金會（Simons Foundation）出版但編輯獨立之網路科普雜誌（<http://www.quantamagazine.org/>），希望能提高數學、物理與生命科學前沿研究進展的公眾能見度。本文譯自：<https://www.quantamagazine.org/20160211-gravitational-waves-discovered-at-long-last/> 本刊感謝 *QuantaMagazine.org* 與主編 Thomas Lin 同意翻譯轉載，翻譯之文責由本刊自負。



重力波在傳播時，會垂直與水平兩者交替壓縮與拉伸。(M. Pössel/Einstein Online)

版的《以思考的速度行進：愛因斯坦與重力波的追尋》

(*Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*)

一書的作者。

偵測結果為我們開啟了全新的重力波天文學時代，而且預料將對黑洞的形成、數目與它在星系中扮演的角色，都有更加透澈的理解。黑洞是一種極為緻密的球狀天體，可使時空彎曲到連光都逃脫不了。當兩個黑洞互相盤旋，愈靠愈近，最終合併成一個黑洞時，會發出「啁啾」(chirp)一聲<sup>①</sup>，亦即時空波紋的頻率和振幅，都在與時俱增後戛然終止。LIGO 偵測到的啁啾信號，正好落在人耳聽得見的頻率範圍內，儘管強度十分微弱，不靠輔助裝置無法聽出來。你可以用手指滑過鋼琴琴鍵，來重現這個聲音。魏斯說：「從最低的音開始，滑到中央 C。這就是我們聽到的聲音。」

物理學家對目前偵測到的信號數量與強度感到吃驚，也就是說宇宙中的黑洞比我們預期的還要多。加州理工學院的理論物理學家索恩(Kip Thorne)說：「我們很幸運，不過我一直期待我們或多或少會交一點好運。」索恩與魏斯及同屬加州理工的德瑞佛(Ronald Drever)共同創建了LIGO，他還說：「當一扇嶄新的宇宙之窗打開的那一刻，好運確實降臨了。」

截聽重力波或許將幫助我們發現前所未有的宇宙事件，因而在其他方面重塑我們對宇宙的看法。

哥倫比亞大學巴納德學院(Barnard College)的理論天文物理學家列文(Janna Levin)說：「我

把這個發現跟人類第一次用望遠鏡望向天空相提並論。當時人們知道外太空有東西等著我們發現，但未曾料到宇宙蘊含的可能性竟如此豐富且不可思議。」同樣地，列文認為重力波偵測器也有可能發現「宇宙充滿了我們無法從望遠鏡看到的暗物。」

首度偵測到重力波的故事，從9月的某個週一早晨展開。一開始就驚天動地，是個十分強大而清晰的信號，強到當時魏斯想：「這根本是胡扯。它一定不是我們要的。」

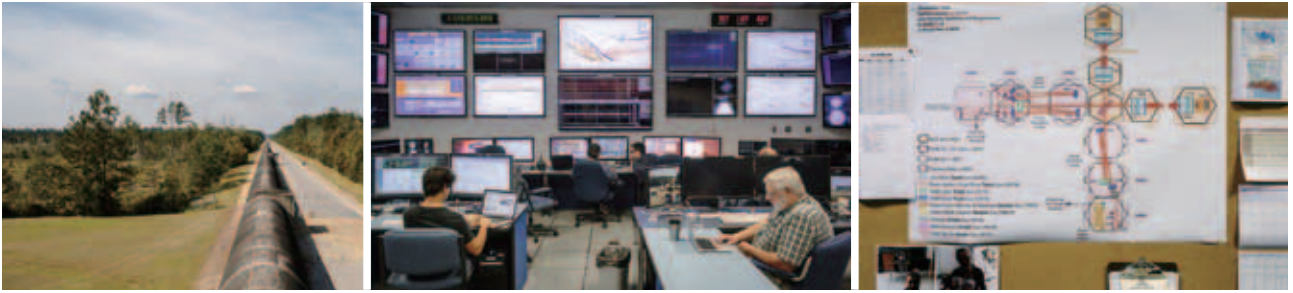
### 歡欣鼓舞

第一道重力波在9月14日清晨進行模擬觀測時，通過LIGO的兩具偵測器。它首先通過位於李文斯頓的偵測器，七毫秒後接著通過在漢福特的偵測器。這一切竟然發生在預定開始正式收集數據的兩天前。

這兩部偵測器歷經五年、耗資二億美元的升級後，才剛開始運轉。這次升級安裝了新的減降噪反射鏡懸吊，及能夠即時抑制外來振動的主動回饋系統。與前代的「初階LIGO」(initial LIGO)相比，升級後的靈敏度大幅提升。根據魏斯的說法，初階LIGO在2002年到2010年運轉期間，發現的是「乾淨清晰的零信號」。

這個天大的信號在9月降臨之後，歐洲的科學家急忙發電子郵件通知他們在美國的同事。而在團隊的其他成員都起床後，消息很快傳播開來。據魏斯

<sup>①</sup> 譯註：在信號處理上，啁啾信號指的是頻率隨時間改變的線性調頻信號。兩個黑洞在互相盤旋接近的過程中，距離會逐漸縮短，導致發出的重力波頻率隨時間增加，直到二者合併成一個黑洞為止。



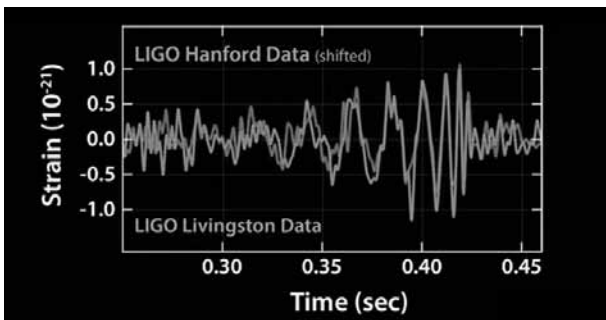
由左至右，分別為李文斯頓觀測站的一條四公里長光臂、控制室，以及偵測器光路示意圖。(William Widmer for QuantaMagazine.org)

說，幾乎每個人都感到懷疑，特別是在看到信號之後。由於這根本是教科書上典型的啾啾信號，許多人懷疑是數據被駭了。

發現重力波的誤傳已有悠久的歷史。最早起於 1960 年代晚期，馬里蘭大學的韋伯 (Joseph Weber) 以為他觀測到重力波引發鉛柱的共振。最近的一次發生在 2014 年，名為 BICEP2 的實驗宣布偵測到太初重力波。這是一種大霹靂時產生的時空漣漪，到現在已經被拉長成極大尺度，並烙印在宇宙的幾何之中。BICEP2 團隊在他們的偵測結果通過同儕審查前就公諸於世，接著卻因為他們偵測到的信號可能來自宇宙塵埃之後而沈寂。

亞利桑納大學的宇宙學家克勞斯 (Lawrence Krauss) 在耳聞 LIGO 偵測到重力波的風聲後，「第一個想法是，它是盲注入 (blind injection)。」他說。初階 LIGO 運轉期間，模擬信號曾在多數團隊成員不知情的狀況下，祕密注入數據流中，以便測試分析能力。但克勞斯從內部消息來源得知這次不是盲注入後，他簡直藏不住自己的興奮之情。

9 月 25 日他在推特上發文，向 200,000 名追隨者宣布：「據說 LIGO 偵測器找到重力波。假使是真



第一道重力波信號於 9 月 14 日，分別被 LIGO 的漢福特與李文斯頓偵測器測得，兩者相差 7 毫秒。(LIGO)

的，就太棒了。如果它通過檢驗，會再發布更多細節。」到了 1 月 11 日，他再度發文表示：「我之前提到關於 LIGO 的傳言，已經由獨立的消息來源確認。繼續保持關注！重力波可能已經發現了！」

團隊的官方態度，是對他們測得的信號保持緘默，直到完全確認為止。受宣示守密約束的索恩，甚至對自己的太太都沒有透露。他說：「我自己偷偷慶祝。」研究團隊的第一步，是鉅細靡遺分析這起信號究竟如何通過偵測器數以千計不同的測量管道，並檢驗信號降臨時是否出現什麼奇怪的事。他們並未發現任何異常狀況，也排除是駭客所為的可能性，因為這需要比任何人更了解該實驗的數千道數據流。索恩說：「甚至連執行盲注入的團隊，都未能使注入的數據達到盡善盡美，以致在數據上留下許多痕跡。信號上沒有人為的痕跡。」

幾週後，出現了另一個較弱的啾啾信號。

當科學家們忙著分析這兩個最早出現的信號時，又有更多信號進來了。他們的論文在 1 月送交到《物理評論通訊》(Physical Review Letters) 期刊，並在 2 月 11 日上線發表。他們估計，最響亮的第一個信號，統計顯著性超過五個標準差，意謂科學家確信它有 99.9999% 的機會是真的。

### 聆聽重力

廣義相對論中的愛因斯坦方程如此複雜，以至於多數物理學家花費了 40 年，才終於認同重力波確實存在且能偵測到，即便這只是理論上的可能性。

愛因斯坦起先認為天體無法透過重力波的形式釋出能量，後來卻改變心意。他在 1918 年的一篇開創性論文中，說明哪些天體可以透過重力波的形式



1970 年左右的魏斯，時任麻省理工學院物理學教授。（Kip Thorne 提供）

釋出能量——只要是繞著兩個軸轉動的啞鈴狀系統，比如雙星或者爆發的超新星，都能產生時空上的波動。

不過，愛因斯坦與同僚卻仍然猶疑不決。有些物理學家認為即便這種波存在，世界也會跟著它們一起振動，因此我們無法察覺。直到 1957 年費曼（Richard Feynman）才用一個假想實驗，使這個問題塵埃落定，證明若重力波存在，理論上偵測得到。不過，沒有人知道在鄰近的宇宙中，這些啞鈴狀的波源究竟有多麼常見，以及它們產生的波強度如何。「當時的終極問題是『我們有朝一日真的可以偵測到它們嗎？』」肯尼菲克說。

1968 年時，魏斯還是年輕的 MIT 教授。就在韋伯發現重力波的新聞公諸於世時，他正好被迫開授一門廣義相對論課程。對他這樣一位實驗物理學家而言，這是一門他所知不多的理論。韋伯在美國兩個不同的州分別架設三個桌上型鉛柱，並宣稱重力波導致它們一起震盪。

魏斯的學生請他解釋什麼是重力波，並且評論這則新聞。深入了解之後，複雜的數學嚇到魏斯。「我弄不懂韋伯到底在搞什麼名堂，鉛柱究竟怎麼跟重力波起作用。」他坐思良久，自問：「我能想出什麼最簡單的方法偵測重力波？」他提出一個構想，後來他稱之為「LIGO 的概念基礎」。

設想時空中有三個物體，比方說三角形頂點上的鏡子。「把光從一面鏡子射向另一面，」魏斯說：「注意從一面鏡子到另一面所需的時間，還有時間是否改變。」結果顯示「你可以很快就算出來。我把這個題目給學生當練習，結果整班都會算。」

接下來幾年，當其他研究人員試著重現韋伯的共振柱實驗結果，卻徒勞無功（他到底觀察到什麼至今仍不得而知，但肯定不是重力波），

魏斯已經開始著手規劃更精確而野心更大的

實驗——一部重力波干涉儀。雷射光在擺成 L 狀的三面鏡子間反射，形成兩道光束。光波波峰與波谷間的距離，可用來精確量測光臂的長度，而且可將兩臂分別當成時空的  $x$  軸與  $y$  軸。當整個裝置安定不動，兩道反射回 L 形交角處的光彼此相消，在偵測器上產生零（null）信號。然而一旦重力波通過地球，會拉長其中一條光臂，並壓縮另外一條（另一種型態的波則反之）。回到交角處的兩道光線不再恰好相消，便在偵測器上產生一個信號，顯示時空出現一連串顫動。

魏斯的物理學家同僚一開始都對這個實驗抱持懷疑態度，但這個實驗的擁護者索恩很快就出現。他在加州理工學院的理論小組一直在研究黑洞與其他潛在重力波源，以及它們可能產生的重力波。索恩的研究受到韋伯的實驗，以及俄國物理學家類似的研究工作啟發。1975 年，在一場研討會與魏斯討論過後，「我開始相信偵測重力波會成功。」索恩說：「而且我希望加州理工能夠參與。」索恩請加州理工聘任蘇格蘭實驗物理學家德瑞佛，同時也大聲疾呼建立重力波干涉裝置。索恩、德瑞佛與魏斯最後組成一支團隊共同合作，每個人負責解決一部分打造可行實驗會遇到的眾多難題。這個三人小組在 1984 年創建了 LIGO，而且在建造出原型偵測器，並與一支日漸壯大的團隊密切合作之後，他們在 1990 年代初期從 NSF 取得超過 1 億美元的經費，



由左而右：索恩、德瑞佛，與 LIGO 計畫第一任總監佛格特（Robbie Vogt），旁邊是一部 40 公尺長的 LIGO 偵測器原型。照片在 1990 年攝於加州理工學院。（Archives, California Institute of Technology）

蓋的範圍內打電話。」

LIGO 偵測器的靈敏度在未來數年內會持續提升，另外命名為先進處女座（Advanced Vergo）的第三具干涉儀，也將在義大利上線運作。這些數據

繪製出兩個巨大 L 型偵測器的藍圖。十年之後，它們開始上線運作。

在漢福特與李文斯頓，每條四公里長的光臂中心都由真空管路構成，藉以盡可能將雷射、光路及反射鏡，與地球上無所不在的振動隔離。每次回收數據期間，LIGO 科學家都不存僥倖之心，用數以千計的儀器監測他們的偵測器，盡其所能測量一切，包括地震活動、大氣壓力、閃電、宇宙射線的來臨、設施的振動、雷射光束附近的聲音等等。然後他們將這些來源各異的背景雜訊從數據中剔除。最重要的或許是有兩部偵測器，使他們可以交叉核對數據，找出同步出現的信號。

即便有了隔絕且穩定的雷射與反射鏡，在真空中「奇怪的信號還是不斷產生。」LIGO 合作計畫的助理發言人卡瓦利亞（Marco Cavaglia）說。科學家必須找出這些像「錦鯉」、「幽魂」、「穗狀海怪」及其他無關重力波的振動型態來源，以便排除肇事者。研究團隊最優秀的偵錯人員之一是博士後研究員麥金佛（Jessica McInver），她說測試階段曾經出現一個棘手的案例：有一段具週期性且頻率單一的人工信號，不時出現在數據中，當她與同事將反射鏡的振動轉換成音訊檔之後，麥金佛說：「你可以清楚聽到電話鈴聲。結果是電話銷售員在雷射涵

或許能幫忙回答「黑洞如何形成」的問題。它們究竟是宇宙最初大質量恆星內爆的產物，抑或是緊緻星團內部恆星碰撞形成的？魏斯說：「這只是兩種構想。我敢說在塵埃落定之前，還會有更多想法出現。」隨著 LIGO 在未來的觀測中不斷增添統計數據，科學家也將仔細聆聽關於黑洞身世的呢喃。

根據最響亮的第一個啣啾信號的形狀和強度來判斷，它來自 13 億光年外，是兩個質量分別為 30 個太陽左右的黑洞，在彼此重力吸引下環繞對方盤旋共舞，最終合併成一個黑洞產生的信號。它們在落向對方的過程中，環繞彼此愈轉愈快，就像排水槽裡的水那樣，最終在一眨眼的瞬間，釋出相當於 3 個太陽質量的能量，成為重力波。這起黑洞合併，是有史以來偵測到最猛烈的一次。

索恩說：「我們彷彿不曾見過風暴中的海洋似的。」他從 1960 年代以來，就一直在等待時空中的風暴。當重力波信號終於蜂擁而至，他說他的感覺不是興奮，而是另一種感受——深深的滿足。☺

#### 本文出處

[QuantaMagazine.org](http://QuantaMagazine.org) February 11, 2016。

#### 譯者簡介

戴守煌畢業於臺大物理系，英國德倫大學（Durham University）基本粒子理論博士，現為南臺科技大學通識中心助理教授。

## 延伸閱讀

► *Quanta* 本文在網頁中還提供兩組模擬動畫：重力波在傳播過程中交替壓縮拉伸垂直與水平方向上的時空模擬動畫，*Einstein Online* 網站的 M. Pössel 提供。

<https://www.quantamagazine.org/wp-content/uploads/2016/02/GravityWaves.gif>

兩個黑洞互繞合併產生重力波輻射的模擬影片，由 NASA 的 C.Henze 提供，*Quanta* 使用。

<https://youtu.be/Q4E6VvDC6ug>

► LIGO 偵測到的重力波啾啾，由喬治亞理工學院製作。據說很多人把這段「重力波之音」當作手機鈴聲。

網址：<https://www.youtube.com/watch?v=TWqhUANNFXw>

► Cho, Adrian "Gravitational waves, Einstein's ripples in spacetime, spotted for first time", (2011) *Science*. 這是《科學》2月11日關於發現重力波的報導。

<http://www.sciencemag.org/news/2016/02/gravitational-waves-einstein-s-ripples-spacetime-spotted-first-time>

► Larson, Shane L. "The Harmonies of Spacetime — GW150914" (1&2), *Write Science* (blog). 作者是西北大學的教授，LIGO 團隊之一，也是熱情的科普推動者。

GW150914 是 LIGO 團隊稱呼第一聲重力啾啾的代稱。文中還可找到 LIGO 成員的其他文章連結。

<https://writescience.wordpress.com/2016/02/11/the-harmonies-of-spacetime-gw150914/>

另外，他在部落格 *Write Science* 中有一系列介紹重力的文章，其中最後三篇介紹了重力波研究的理論與實驗狀況。

<https://writescience.wordpress.com/2015/01/07/gravity-1-seeing-the-invisible/>

► 關於其他重力波探測計畫，可參考

郭兆林〈宇宙是怎麼來的〉4 (2015) 《數理人文》。文中介紹 BICEP 計畫。

Gibney, Elizabeth "Freefall space cubes are test for gravitational wave spotter", (2015) *Nature*. 《自然》期刊在 2015 年 11 月 17 日對另一個探測重力波太空計畫 LISA Pathfinder 的報導。

<http://www.nature.com/news/freefall-space-cubes-are-test-for-gravitational-wave-spotter-1.18806>

## LIGO 的重力波成就

作者：郭兆林（史丹福大學物理系）

基礎物理學除了探討物質與能量的本質之外，也非常關切空間與時間的問題。黑洞的視界（event horizon）可以說是空間的邊緣，而大霹靂則是時間的起點。由於不同的原因，重力波正好是研究這兩種現象的最佳利器，因此 CMB 的 B-模偏極、還有我上次在〈宇宙是怎麼來的？〉（《數理人文》第 4 期）介紹的 BICEP 實驗，常常和 LIGO 一起被提及。

重力波本身的存在，早在 80 年代就已確定。LIGO 這次的大發現，最特別之處在於此次事件由兩個互繞黑洞結合為一而造成。空間不光是事件發生的背景，也不是在太陽重力場附近「稍稍彎曲」就好。黑洞確切存在，而時空可以刮起最激烈的龍捲風，並穿過半個宇宙被偵測到！這一切完全由愛因斯坦場方程式左邊那些華麗的微分幾何符號描述，實在是數學的驚人成功。至於兩個大質量黑洞是如何形成，也將困擾天文學家多年。

不過，這些現象畢竟都是古典物理的範疇，其完整描述在 100 年前已經由愛因斯坦寫下。BICEP 實驗所試圖測量的 B-模偏極，是由重力場零點能而來，是不折不扣的量子重力現象，也將對於我們仍所知不多的暴脹現象提供重要資訊，因此 BICEP 實驗的一系列結果特別受基礎物理學家（也就是高能物理學家）矚目。由於這一本質上的巨大差異，LIGO 與 CMB 團隊之間，不但沒有競爭性，只有佩服與互祝好運。☺