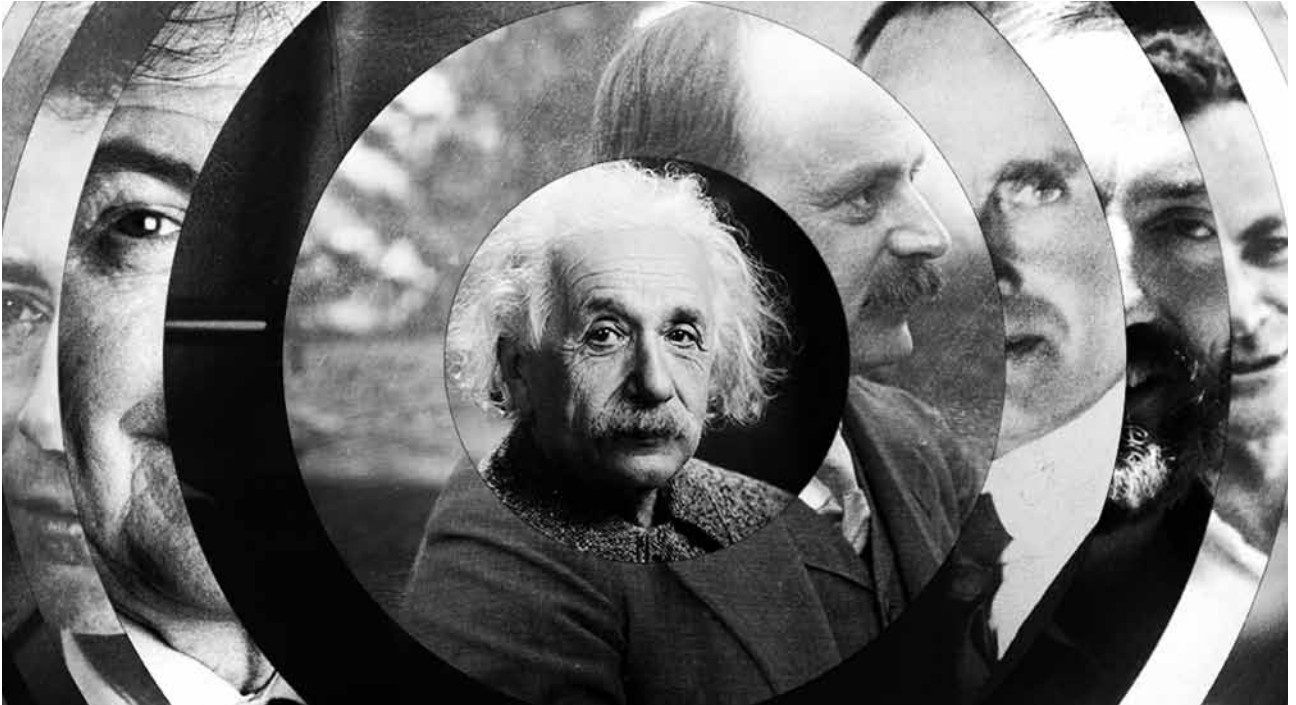


# 理 重力啣啾一聲定音

從愛因斯坦方程式到重力波現身之路，非但障礙和爭論滿布，而且仍然荊棘重重。

作者：渥秋華 (Natalie Wolchover) 譯者：甘錫安

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。



與重力波有關的理論科學家群像（由左至右）：歐本海默、潘若斯、愛因斯坦、史瓦茲席德、愛丁頓、索恩及費曼。他們的研究成果促成了今年 2 月 LIGO 的重大發現。（圖 Olena Shmahalo/QuantaMagazine.org）

「沒有重力波這種東西……」、「因此我們可以找到沿 X 軸正向行進的平面重力波……」、「……重力波不存在……」、「重力波真的存在嗎？」、「現在我們知道嚴密解確實存在……」

這些都是愛因斯坦說過的話。他在 1915 年發表了廣義相對論，但有長達 20 年的時間，愛因斯坦對重力波反反覆覆、含糊其詞，無法確定這些時空結構上的波盪，到底是他革命性理論所預測的結論，還是被它給排除在外。儘管廣義相對論在概念上十分優美簡潔，指出重力是時空彎曲造成的效

應，但它其中包含的數學理論卻極為複雜。

這個問題已於今年 2 月一舉解決。美國先進雷射干涉儀重力波觀測站 (Advanced LIGO) 科學家，宣布偵測到超過 10 億光年外的兩個黑洞劇烈合併時所散發的重力波。要偵測到這個時空微幅收縮與膨脹的「啣啾」(chirp) 信號，必須具備高超的科學技術。這也讓科學家花費了整整 100 年，來確定愛因斯坦理論所預測的確實內容。這項理論不僅預測了重力波的存在，還預測當兩個黑洞合併時，產生的重力波穿越宇宙來到地球的樣貌。但對愛因斯



本文譯自 *Quanta* 線上雜誌的 Q&A 訪談系列。網址為 <https://www.quantamagazine.org/20160218-gravitational-waves-kennefick-interview/> 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。



阿肯色大學理論物理學家暨愛因斯坦研究學者肯尼菲克。(Kennefick 本人提供)

坦而言，黑洞這個陡峭到難以逃離的時空排水孔，其存在是更難接受的概念。

肯尼菲克 (Daniel Kennefick) 是美國阿肯色大學的理論物理學家，研究生涯始於他與其論文指導教授兼 LIGO 共同創辦人索恩 (Kip Thorne) 探討廣義相對論的預測。肯尼菲克對爭議重重的重力波研究史十分著迷，因此開始把歷史研究當作副業。他曾於 2007 年撰寫《以思考的速度行進：愛因斯坦與重力波的追尋》，並於 2015 年參與撰寫《愛因斯坦百科全書》。在今年 2 月 11 日重要記者會前後的討論中，肯尼菲克講述了這項重大發展的過往歷程，並說明理論科學家未來的研究方向。以下是整理及精簡後的對話內容。

**問 | 您對 2 月 11 日的重大宣布感到興奮嗎？**

**答 |** 它令人激動的程度教人難以置信。這個領域的發展一直充滿爭議，這次偵測結果如此清楚明確，真的是很棒的事。他們並非如許多人想像的，必須在雜訊中挖掘訊號，你可以親眼在資料中看到它。而從理論科學家的觀點看來，看見理論預測如此接近真實，讓人興奮莫名。訊號就在眼前，而他們預測兩個黑洞合併時可能產生的波形，也和它完全重合。

**問 | 在此刻之前的重力波研究史，你認為有哪些特質？**

**答 |** 最主要的特質無疑是一連串的爭議，爭議核心在於「重力波是否存在」。它真的存在嗎？它是否帶有能量？是否能偵測到它的存在？甚至爭

議到本體論的問題，包括真實是什麼？你是真的在測量什麼，還是在愚弄自己？

而且事情從一開始就是如此。愛因斯坦第一次提到重力波時，說重力波不存在。100 年前重力波剛為大眾所知時，無疑是十分大膽而勇敢的概念，但一直帶有某種不確定的特性。一個問題解決之後，新的問題又會出現。

**問 | 您的著作書名《以思想的速度行進》，如何傳達這種不確定？**

**答 |** 愛因斯坦撰寫 1916 年預測重力波的論文時，認為自己發現三種重力波。當年稍早，他一直使用錯誤的座標系，所以認為重力波不存在。後來愛因斯坦在同事建議下，改用另一種座標系，讓他更清楚看出真有波動的存在。不過這種座標系的結構本身就有起伏的特性，所以他以為自己發現了三種波，但其中有兩種其實只是以帶著起伏的座標系觀察平面空間而已，完全不是真的波。

傑出的英國天文學家兼物理學家愛丁頓 (Arthur Eddington) 於 1922 年回應愛因斯坦的論文，愛丁頓對一個問題特別感到興趣——重力波是否以光速行進？現在我們已經知道答案是肯定的。愛丁頓不但以計算證明這一點，而且還發現另外兩種假性波動能以任何速度行進，其速度只取決於所使用的座標系。所以他說這些假性波動是「以思考的速度行進」。這句話相當有意思。因為它一方面懷疑「以思考的速度行進」其實不是真的，而另一方面卻也表達了懷疑的重要，因為歸根究柢，宇宙只有一種重力波，而非三種。



愛因斯坦在加州聖塔芭芭拉海灘（日期不詳）。◦（Archives, California Institute of Technology）

**問** | 後來愛因斯坦又於 1936 年改變想法，說重力波不存在，這是怎麼回事？

**答** | 愛因斯坦和助理羅森（Nathan Rosen）著手尋找精確（而非近似）的重力波解，發現了一個問題——無論他們如何建立座標系，都發現時空中存在一個「奇點」（singularity）。奇點是我們無法為波的大小指定數值之處。現在我們知道這個奇點只是座標奇點，對重力波實際上並不構成問題。

以北極為例。如果我問你北極經度是多少，你可能回答「怎麼說呢，所有經線都通過北極。」這表示雖然我們的測量系統在北極失效，並不表示北極不存在，或你不能前往北極。北極實質上真的存在。但是愛因斯坦和羅森為此感到大惑不解。他們認為因為存在奇點，所以證明重力波不

存在。他們撰寫了一篇論文，投稿到《物理學評論》（*Physical Review*）。審閱者撰寫了長達 10 頁的報告，指出文中可能有錯，並將文稿退回。愛因斯坦非常生氣，撤回了論文。

**問** | 也有些人開始主張即使重力波確實存在，我們也不可能感受到。

**答** | 1955 年，羅森嘗試辯稱重力波不帶能量，因此只是一種形式的數學結構，不具實質的物理意義。有個不錯的比喻如下：如果我們在上海遇到巨浪，就會隨著波浪升高再降回原處，而且周圍的東西也都如此，所以可能完全察覺不到它的存在。如果重力波正如這類深海湧浪，它是否會和我們產生交互作用，還是我們全體都會一起隨浪



起伏？這個問題在 1950 年代，曾經掀起很大的爭論。

**問 | 這個問題是如何解決的？**

**答 |** 1957 年，羅森在美國北卡羅萊納州教堂山舉行的研討會中，發表了他的主張。幸運的是，皮拉尼（Felix Pirani，很遺憾他去年底剛過世）也出席了這場研討會。皮拉尼決定以非常實際的方式來檢視廣義相對論的運作方式，完全繞過座標系所造成的問題。最後他證明重力波通過時，會使粒子來回移動。

費曼（Richard Feynman）聽到皮拉尼的想法後，說（大意如下）：「因為已知粒子會移動，所以只要想像有一支桿子，桿上串了幾顆珠子。當重力波通過時，珠子會前後移動。但桿子的形狀會保持固定，因為桿內的電磁力會讓原子和電子維持在相同位置。於是珠子在桿上移動時，其摩擦會產生能量，而這些能量必定來自重力波。所以我斷定這種波具有能量。」這項名為「黏性串珠」（sticky bead）的著名思想實驗，使許多人相信羅森提出的懷疑並沒有道理。不久之後，韋伯（Joe Weber）等人開始嘗試偵測重力波。

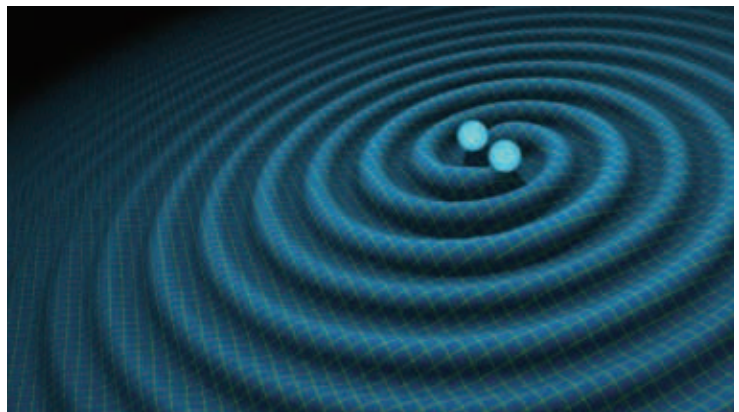
**問 | 不過當時的人仍不知道宇宙中是否有任何重力來源，足以放射出強度得以偵測的重力波，對嗎？**

**答 |** 沒錯。愛因斯坦寫過，應該沒有人能找到受重力波影響時足以被測量到的系統。愛因斯坦指出典型雙星系統放射的重力波帶走的能量非常小，我們根本注意不到

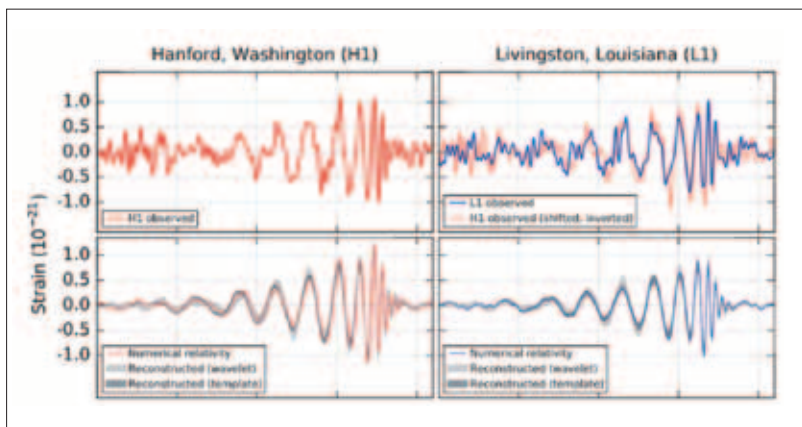
系統曾否出現變化，這個說法是正確的。我們現在之所以能從兩個黑洞辨識出重力波，是因為這兩個黑洞的距離，遠比有史以來任兩恆星間的距離都來得更近。這兩個黑洞體積極小，但質量極大，所以它們能非常接近，以非常非常高的速度環繞彼此。由於愛因斯坦不相信黑洞存在，所以設想不出具有適當特質，可以讓我們觀察到重力波的系統。

**問 | 1916 年，就在愛因斯坦預測重力波的同一年，史瓦茲席德（Karl Schwarzschild）發現愛因斯坦方程的黑洞解。為何在這之後愛因斯坦還是不相信黑洞存在？**

**答 |** 黑洞概念本身發展的歷史一直極具爭議，也相當複雜。LIGO 的偵測結果，是歷史上第一項黑洞存在真正完整的證據。1916 年，愛因斯坦認為史瓦茲席德的發現只是簡化的物理模型，就好像為了簡化，可以把地球當成質點（質量全部集中在中心的一個點）一般。他們也認為「史瓦茲席德解」（現在稱為黑洞）把太陽當成質點，



愛因斯坦在 1918 年指出雙星之類同時圍繞兩個軸旋轉的啞鈴狀系統，會輻射重力波。（LIGO）



先進 LIGO 的漢福特偵測器（左上）和李文斯頓偵測器（右上）偵測器觀測到的重力波「啾啾」波形，以及依據理論預測質量為太陽的 29 倍和 36 倍的兩個黑洞，在 13 億光年外合併產生的重力波啾啾波形（下排）。（B.P. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 061102）

只是為了方便。全然沒想到，竟然真有質量全部集中在同一點的實體存在。他們認為這不可能、太離譜了。到了 1930 年代，許多人開始意識到「你知道嗎？我們還不完全理解不讓這種狀況發生的理論。」漸漸地，著名的美國洛沙拉摩斯國家實驗室曼哈頓計畫主持人歐本海默（Robert Oppenheimer）等人，也開始指出恆星可能向內塌縮，最後形成看來非常像史瓦茲席德解的天體。1960 年代，惠勒（John Wheeler）的研究團隊接下這項工作，索恩就是當時參與的學生之一，他們和其他人共同發展出黑洞理論。

**問 | 後來的人如何釐清，黑洞合併產生的重力波在地球上看來應該是什麼樣貌？**

**答 |** 關鍵問題是得套用底下這個邊界條件——不會有波從無窮遠處（也就是地球上）進入雙黑洞系統，只有波動從黑洞向外傳播到無窮遠處。但這一點真做起來其實非常困難。因為描述距黑洞「無窮遠處」的重力場所需要的數學表述，和描述黑洞本身的數學完全不同。1950 和 1960 年代，有人嘗試進行這些計算，但得到的答案通常不正

確。在某些狀況下，他們得到的答案是黑洞會吸收能量，而非釋放能量，因為他們犯了一類錯誤，讓入射波從無窮遠處攜帶能量進入黑洞。在 1960

年代，傑出的英國相對論學者潘洛斯（Roger Penrose）等人研究了時空結構。潘洛斯發現時間和空間的邊界不只一種無窮遠，所以必須挑選正確的無窮遠，來套用這個條件。接著其他人引進流體力學的技巧。這還只是幾個在概念和算式上都需要突破的例子。

**問 | 所以下一步是預測 LIGO 偵測器可能接收到的特定訊號。**

**答 |** 當我還是年輕學生，剛開始參加索恩研究團隊的討論時（大概是 1991 年左右），有一次他拿著一張很大的紙，把讓 LIGO 發揮作用必須執行的所有理論工作，全都打字在上面。能偵測到這類訊號的理由，是因為它具備特殊的波動模式，讓你可以濾掉不相干的信號。但你必須先知道訊號長什麼模樣才能過濾。但因為從來沒人看過這種訊號，只能依靠理論科學家的推導，所以索恩說「我希望團隊中每個人都參與這項工作」，然後我們就這麼做了。

人們希望能夠預測黑洞合併過程所產生的重力波形，要從 LIGO 能收到信號開始，一直到最

後黑洞沈寂下來不再釋出重力波為止。不過沒有單一方法可以預測全部的資料。在合併的第一階段，你可以使用當時已知的近似法，但卻發現還得再多做好幾個數量級的近似，這點十分令人卻步。接著當黑洞合併時，重力會變得極為強大，因此需要改用數值方法，使用超級電腦幫忙計算。有許多研究團隊試圖以數值運算，但都面臨嚴峻挑戰，他們只能讓雙黑洞演進一小段時間，對問題完全沒有幫助。因此幾年前，他們基本上已決定「我們別無選擇，只能不斷更換座標系，直到算出有用又不會當掉的結果為止。」然後普瑞托斯（Frans Pretorius）終於找到解決方法，這才奠定數值方法的發展基礎。

**問 |** LIGO 或許能偵測到來自未知天體的重力波，進而「打開一扇宇宙之窗」。就辨識黑洞合併訊號所投注的心力而言，我們如何才能發現意料之外的波動？

**答 |** 對，真正令人興奮的是意料之外的發現。有一種可能性是這些意料外的事件本身有非常明確的信號，幫忙我們很快辨認出來。這個希望現在小了一點。因為原本的 LIGO 已經上線一段時間，如果信號非常明確，LIGO 應該已經接收到。想要發現意外信號看來的確不大容易，那麼我們該如何從雜訊中找出訊號呢？

答案之一，是目前已有幾種技巧，並不針對已知的確切信號作檢視，而是嘗試從數據中找出某種特定的規律性。比方說，意料外信號或許至少具備週期性。LIGO 的確在進行這類觀測。他們甚至成立了 Einstein@Home 計畫，在這項計畫中，你完成註冊後，他們會傳一段 LIGO 資料到

你家的電腦，用你的電腦協助找出這類簡單的週期性。另一種方法是運用機器學習，嘗試教導機器尋找信號。先從你已知的開始學習，但過了一段時間後，這些辨識技巧或許會更有進步，發展出足夠的靈活度，來偵測意外的信號。

**問 |** 你從這段歷史體認到什麼？

**答 |** 我為這項成就的集體性深深感動。它需要通力合作，每一步都十分困難，而且和下一步環環相扣。集體努力一定有批評和爭執，成員間也難免彼此叫囂，但人性中的高尚品格終將勝出。人會克服憤怒，愛因斯坦就克服了自己的憤怒。人也會承認自己的錯誤。最後，我們將團結一致，達成目標。☺

**本文出處**

*QuantaMagazine.org*, February 18, 2016.

**譯者簡介**

甘錫安為專職譯者，定期為《科學人》及《BBC 知識》雜誌翻譯，目前另有數學科普書籍譯作《1, 2, 3 和 + - × ÷ 的數學旅行》（臉譜）。

**延伸閱讀**

► Kennefick, Daniel "Controversies in the History of the Radiation Reaction problem in General Relativity". 這是受訪者更詳細討論重力波發展史中爭論的科學史文章，評價歷史在科學論辨中的地位。

<http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9704002.pdf>