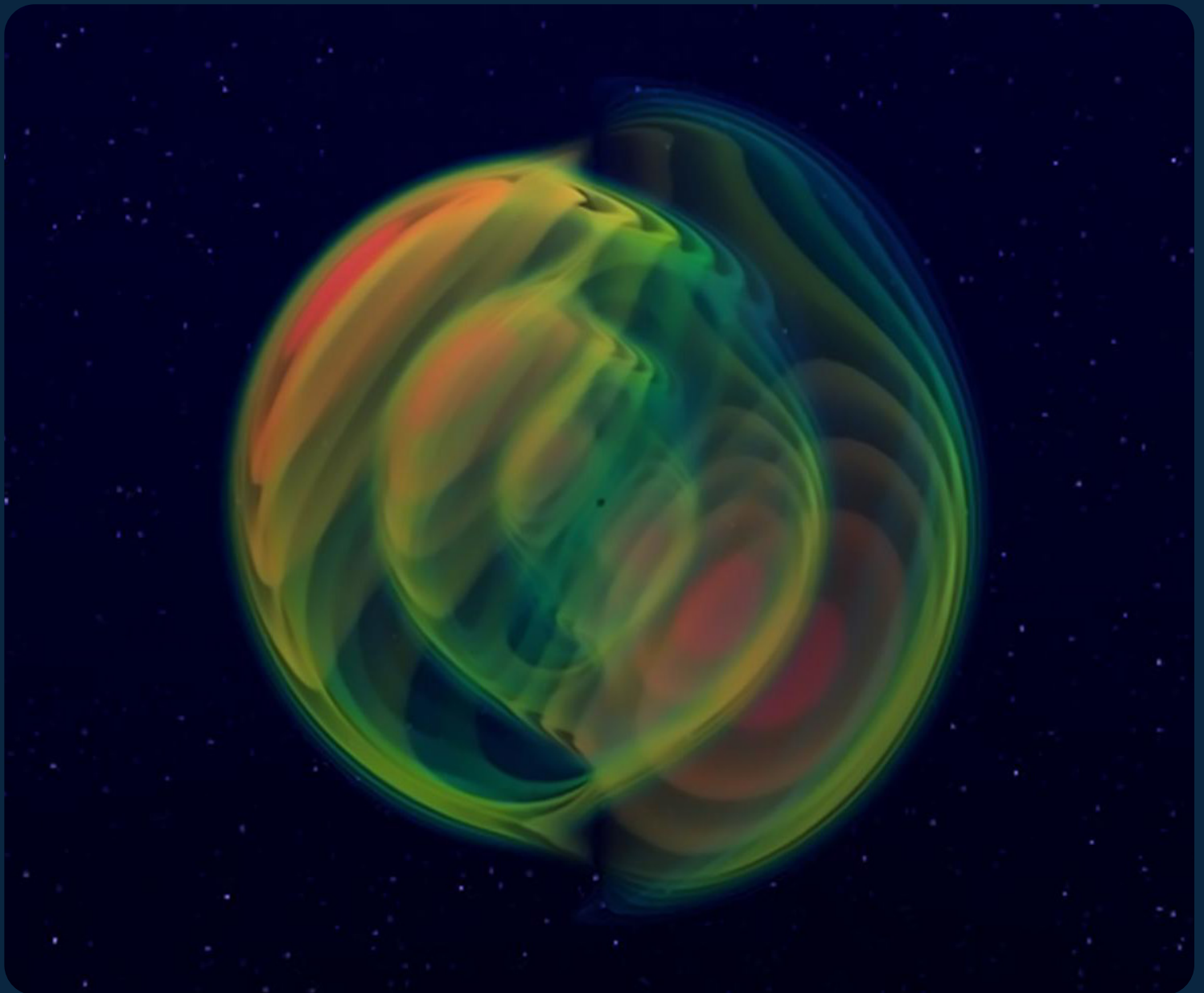


愛因斯坦的重力波預言及實現之路

1905年愛因斯坦發表了四篇奇蹟年論文，其中包含了狹義相對論，1907年，愛因斯坦開始發展重力相關的廣義相對論，並最終於1915年完成發表，重新定義了我們對「重力」的理解。又過了一年，他在《重力場方程的近似解》一文中推導出一個大膽的結論：如果宇宙中有巨大的質量快速移動或碰撞，將會在時空中激起微弱的波動，這些「波動」如同宇宙的漣漪，穿越整個時空。

文／許晉翹



此示意圖中所展現，為兩個相互繞轉的黑洞合併之前瞬間，放射出來的三維重力波模擬圖。圖片來源：LIGO

時間恍惚了一百年，那個當初只存在於數學中的預言，終於在2016年被科學家證實存在，在臺北天文館展示場的一隅，我們將透過影片展示，一同走進這場從理論到實驗的長征，傾聽宇宙深處的低語。

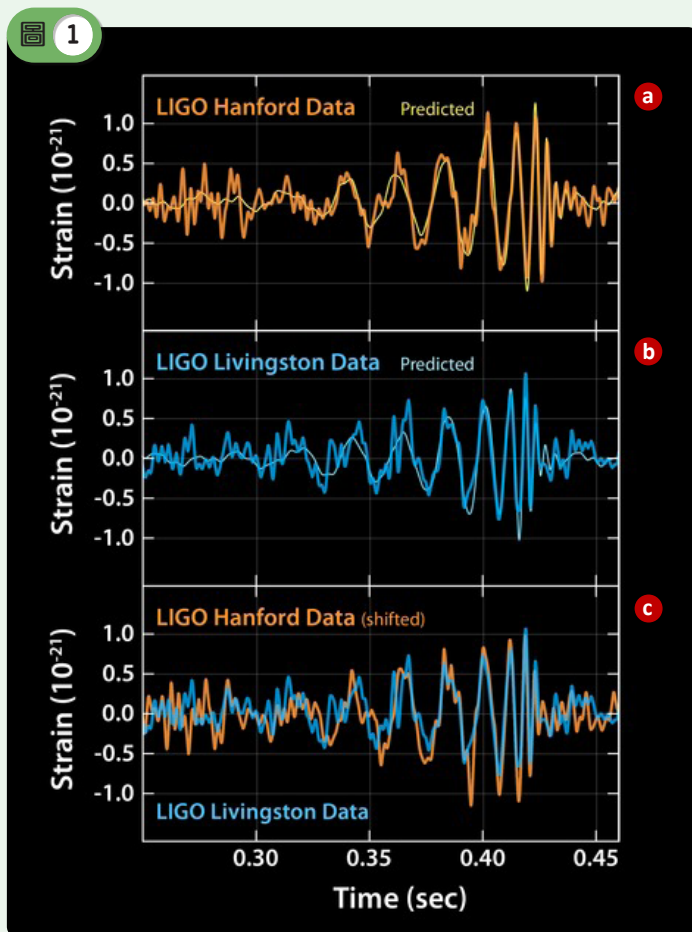
一百年的沉默 從愛因斯坦到LIGO

愛因斯坦在1916年首次提出重力波的概念，但他本人其實懷疑人類是否有能力檢測這樣微弱的現象，重力波就像是在一整個銀河系範圍內掀起一絲

絲不可思議的時空波動，當它們通過地球時，經過更嚴謹的計算，它的長度量級僅相當於原子核的百萬分之一倍。

然而，到了21世紀初，科學家終於打造出一台能偵測這些時空微震的儀器：雷射干涉重力波天文臺（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，簡稱LIGO）。2015年9月14日，LIGO首次偵測到來自13億光年外的雙黑洞合併事件所產生的重力波訊號，這不只是一次天文觀測，更是物理學史上的重大突破，如圖1，也讓愛因斯坦的預言跨越世紀成真，或許也是為了紀念愛因斯坦的廣義相對論100年，才選在那一年發表。

LIGO偵測到的重力波事件，與愛因斯坦所預言的重力波形態相符



左圖的數據，顯示設置在美國路易斯安那州利文斯頓和華盛頓州漢福德的LIGO干涉儀所接收到的重力波訊號。這些訊號來自13億光年外兩個質量約為太陽30倍的黑洞合併事件。

a 和 **b** 分別顯示來自利文斯頓測站與漢福德測站的觀測數據，並加上愛因斯坦廣義相對論推導的理論波形（黃線標示）作為對照。呈現兩個相互繞轉黑洞合併過程所產生的重力波形，以及儀器固有的背景雜訊。圖中橫軸為時間，縱軸為應變（strain），即空間因重力波通過而被微小拉伸或壓縮的比例。

從圖中可見，實際的觀測資料與理論推演結果非常近似，驗證了愛因斯坦廣義相對論的預測。

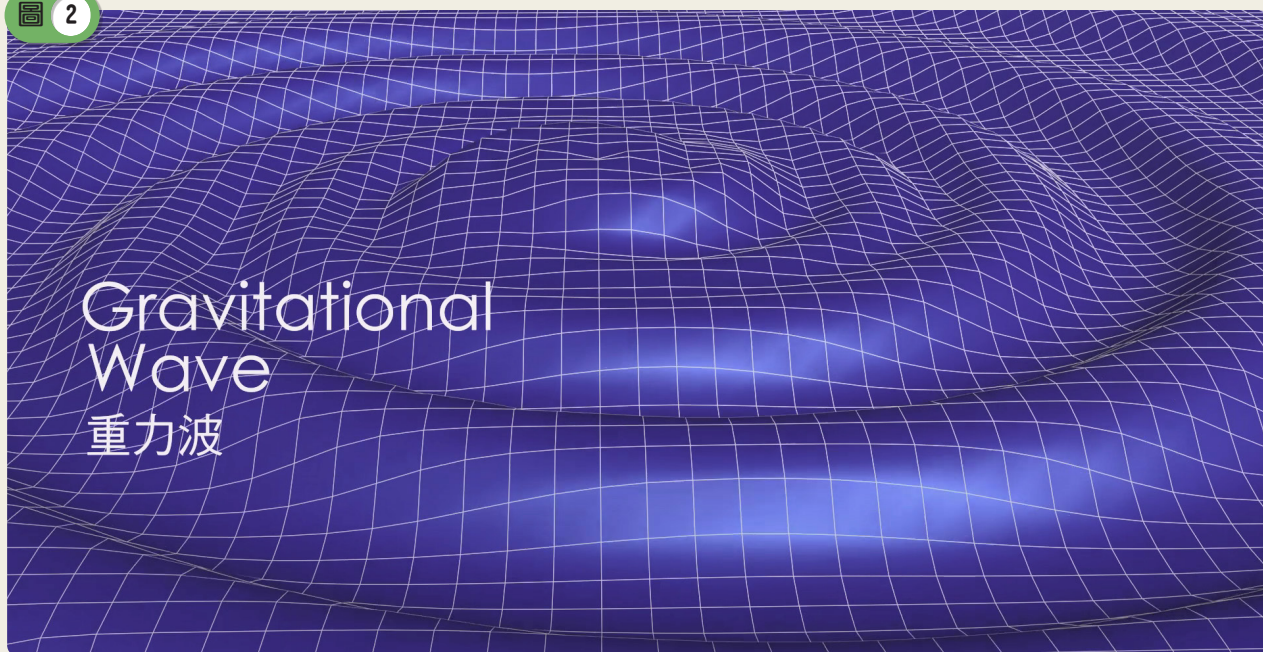
c 則綜合了兩座探測站數據相互對照。由於這兩組干涉儀在地面上的方向排列不同，為了方便比較，將漢福德測站的訊號進行了反轉，並根據重力波從利文斯頓傳至漢福德所需的時間差（約0.007秒）進行了時間校正。結果顯示兩測站觀測到是相同的事件，進一步確認此次重力波的成功探測。

看見時空的震動 重力波展示影片

如果你進入展示場三樓的一個劇院般的小角落，會看到一段令人屏息的動畫影片，描繪兩個黑洞旋轉、碰撞、融合，並釋出一道波浪般的時空漣漪，那正是重力波的視覺化重現。影片中，科學家

透過電腦模擬將這些原本無形的現象轉換成可感知的影像，並且將重力波「轉譯」成人耳可聽的頻率，讓我們真正「聽見」宇宙的聲音。這段展示不僅是視覺享受，更蘊含著深刻的物理意涵，你可以看到波動如何擠壓與拉伸時空，如何穿越億萬年後仍留有訊號到達地球，如圖2~圖5。這一切的背後，關鍵在於一項精密的實驗裝置：LIGO。它的工

圖 2



重力波是一種在時空中傳遞的波動

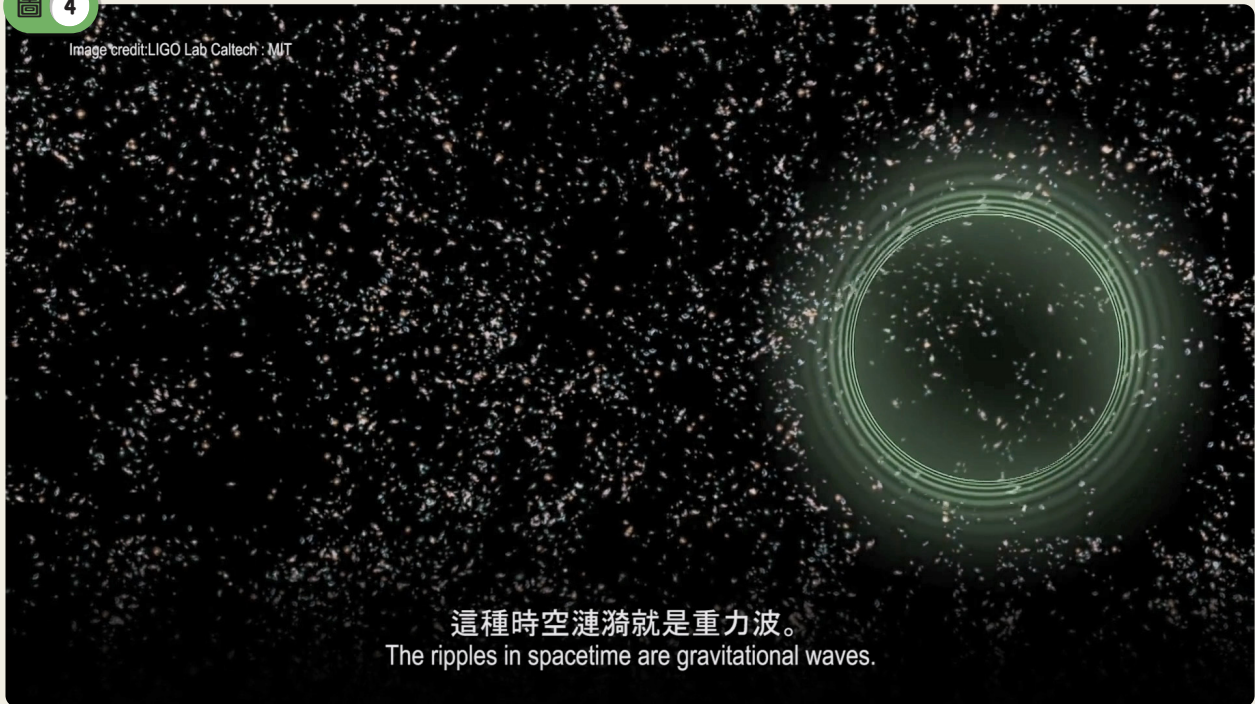
圖 3



相互繞轉且即將合併的兩個黑洞，其重力場和發出的重力波彎曲從黑洞後方射來的光線，形成此奇特的景象。

4

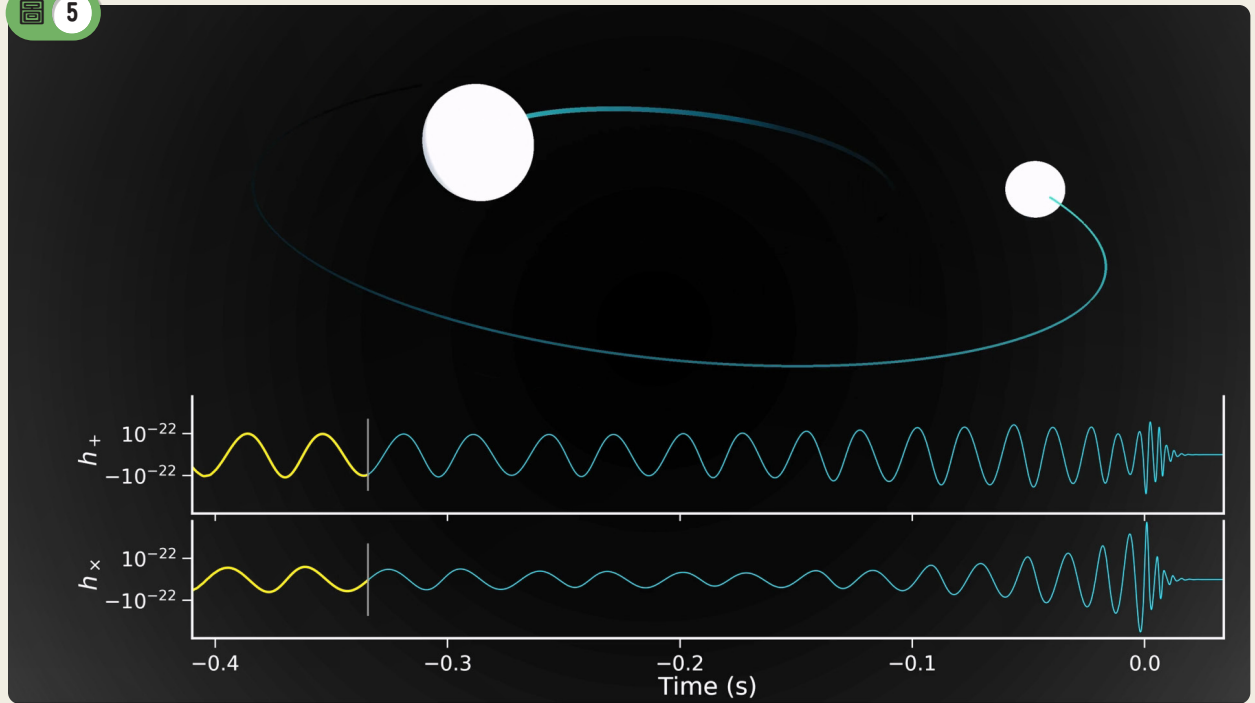
Image credit: LIGO Lab Caltech: MIT



這種時空漣漪就是重力波。
The ripples in spacetime are gravitational waves.

黑洞相互合併瞬間，將會發出合併過程中最強的重力波，如同漣漪般向四面八方傳遞出去。

5



黑洞相互合併事件發出的重力波，頻率和人耳可聽見的聲波頻率十分接近，因此若將重力波轉換為波形、頻率相同的聲波，我們就可以聽見它的聲音。

作原理是：讓雷射光分成兩道光束，沿著相互垂直、各長達4公里的真空管道前進，再反射回來。這兩道光會在交會點重新干涉，若時空因重力波而微微被壓縮或拉伸，即使只有比原子核還小的變化，也會造成光程長度不一，從而改變干涉圖案，如圖6。

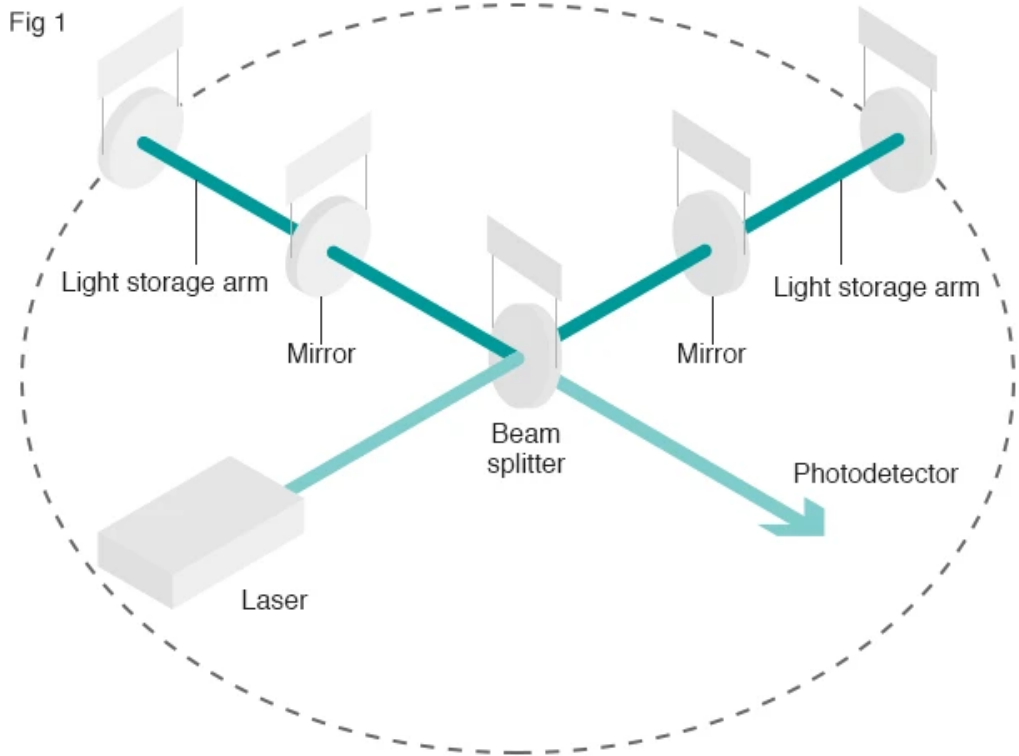
這種測量方式的靈感，可追溯到十九世紀的「邁克生干涉儀」(Michelson Interferometer)，這是一項原本用來測試以太假說的經典實驗裝置，只不過把實驗裝置的尺度從40公分放大到4公里的程度，LIGO

就像被哆啦A夢的放大燈照到的邁克生干涉儀一樣。如今，這個原理被延伸應用到極致，成為人類首次「聽見」宇宙重力波的關鍵技術。

重力波到底有多微弱？打個比方，要從整個太陽系的直徑裡找到一個不到原子核寬度的變化，除了實驗裝置本身要夠靈敏之外，還要排除所有地面的震動、熱擾動、甚至雷射本身也會產生雜訊，這些都是一場與物理極限拔河的科技挑戰，也讓LIGO成為現代物理史上最具有代表性的實驗之一。

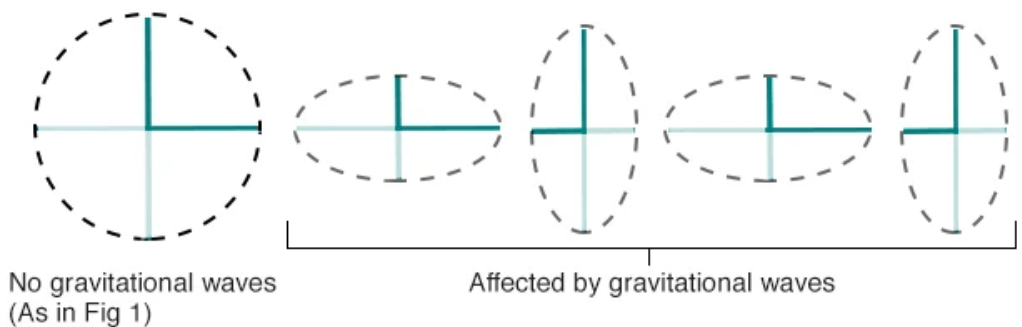
圖 6

An interferometer: How a gravitational wave hunter works



LIGO的雷射干涉儀原理示意圖。
圖片來源：BBC News

Gravitational waves alternately stretch and squeeze the space they pass through



Source: LIGO/NSF

BBC

宇宙的全新觀測視窗 為什麼重力波重要？

過去，人類認識宇宙主要仰賴「光」：可見光、紅外線、X光、伽瑪射線……但這些都需要穿過宇宙的塵埃與氣體，而有些事件，如黑洞合併，本身幾乎不會發出任何光。

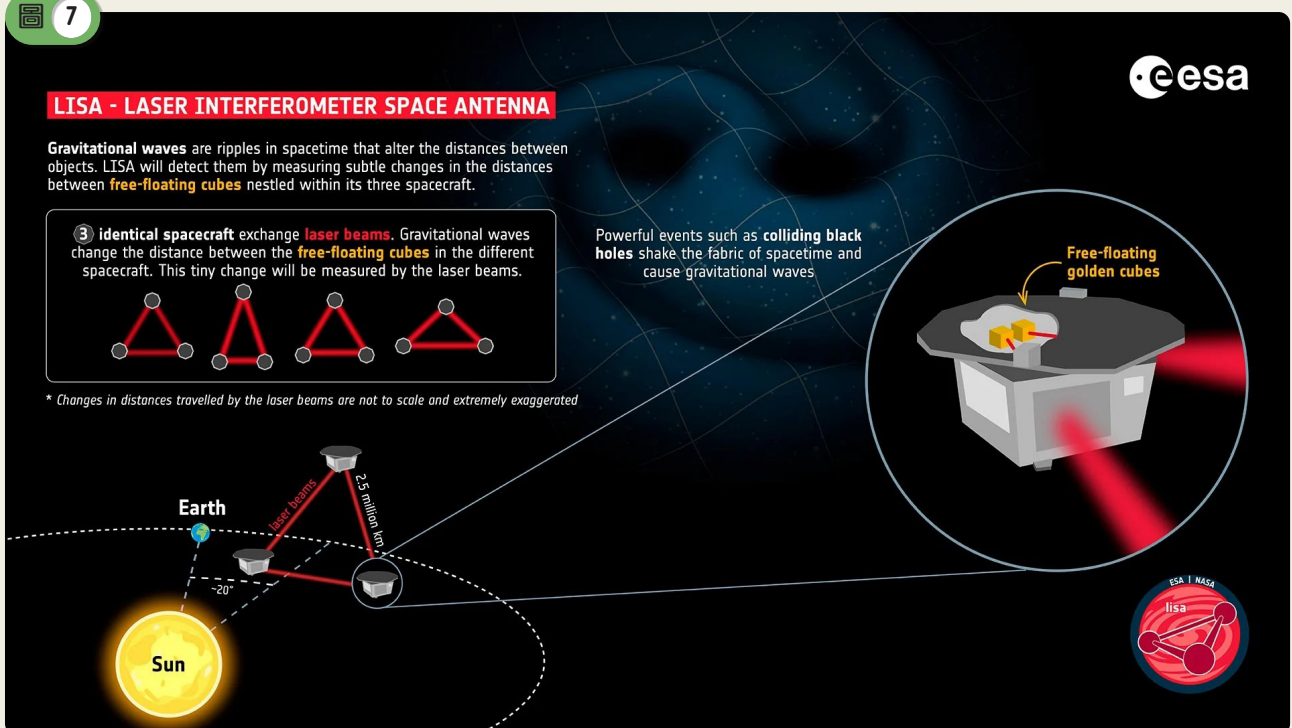
重力波觀測提供了另一種全新的方式，不需要依賴光線，而是直接感應到空間本身的震動。這讓我們能夠「聽見」以往無法觀察到的宇宙事件，也開啓了「重力波天文學」的嶄新時代，如圖7。從雙中子星合併、黑洞旋轉、甚至未來宇宙誕生初期的原始重力波訊號，這些都可能成為新的觀測對象。

回到展示場 你與宇宙漣漪的距離

臺北天文館展示場的重力波展示影片與看板，正是為了讓觀眾能夠在短短幾分鐘內理解這段從理論到實證的壯麗旅程。從愛因斯坦的紙筆，到干涉儀的細緻光程，從無聲的黑洞舞蹈，到人類耳中「啾」的一聲重力波訊號——這是一段橫跨世紀、跨越維度的故事，但卻以50秒的影片呈現給您。下次不妨停下腳步，想像你也正被那一道從數十億年前出發的時空波動輕輕掃過，在那一瞬間，你與宇宙的距離，其實比你認為的還要近得多。

許晉翊：臺北市立天文科學教育館

圖 7



未來即將部署在太空，最先進的重力波探測器（Laser Interferometer Space Antenna，簡稱LISA）的運作原理示意圖。圖片來源：ESA