

# 重力波偵測器的科學原理

金升光

重力波研究在相對論誕生的 100 年後戲劇性的成為世人矚目的焦點。接二連三超乎預期的黑洞雙星碰撞事件拿下 2017 年諾貝爾物理獎；中子星碰撞事件與全球觀測網同步更開啓了多元訊息天文學（multi-messenger astronomy）的新時代。美國雷射干涉儀重力波天文台（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，LIGO）和義大利與法國合作的室女座 Virgo 干涉儀在完成了歷史性的任務後，依照原訂計畫在 2017 年 8 月底停機，進行升級更新，預定 2018 年秋天再次上線觀測。另一方面，在不同頻率波段偵測重力波的努力也採用了一些和 LIGO 相近或相異的概念或技術，可以探測星系核心超大質量黑洞等系統，像是運作中的波霎定時網（pulsar timing array，PTA）以及預計 2030 年代中期發射的雷射干涉儀太空天線（Laser Interferometer Space Antenna，LISA）。這些精密測量時空的實驗本身就涵蓋了許多有趣的物理或天文概念，大多和相對論無關，還可能應用在高科技或日常生活中。本文將著重在 LIGO 雷射干涉儀的特點，特別介紹其中熱雜訊與量子雜訊相關的一些基礎觀念。LISA 太空實驗的特色和波霎定時的技術關鍵也會概略提及。關於重力波和干涉儀的基本概念和若干細節請參閱《科學月刊》548 期（2015 年 8 月）林俊鈺與游輝樟以及 576 期（2017 年 12 月）倪維斗、潘皇緯的文章。

## 重力與重力波偵測

相對論認為，我們在體重計上的重量和車輛瞬間起步煞車時所感受到的力並無區別。自由落體好像感覺不到重力；但若是自由下落的場景換成了星球質量大小的黑洞附近，上下左右的重力差（潮汐力）肯定會讓人有感。加速度產生的力可以透過坐標變換消除，潮汐力卻不行，這才是相對論關注的重力。聲波透過空氣或其他介質的振動來傳遞。薄膜或是早年話筒中的碳粉盒將接收到的空氣密度振動轉換成電的訊號，麥克風或電話就是聲波的偵測器。電磁波不需要介質，電場與磁場交互振動傳播，遇到天線產生感應電流或電壓傳到接收機放大，這天線和接收機就是電波的偵測器。重力波是時空的漣漪，也不需要介質。原則上，潮汐力的振動可以用上下左右兩把尺的長度相對變化來測量，條件是這兩把尺組成的天線方向正確，而且振動的信號可以從雜訊中分辨出來。

雜訊是重力波偵測的關鍵。以 LIGO 干涉儀為例，雷射光經由分束鏡（或分光鏡，beam splitter）進入干涉儀的兩臂，被鏡子反射回分束鏡後產生干涉（圖一）。這兩臂就是互相垂直的兩把尺，當兩把尺的相對長度有變化，干涉結果也會改變。反過來說，任何改變反射鏡距離、兩臂相對長度或影響干涉光的因素都是雜訊可

能的來源。地面傳來的振動可能來自地震或是實驗室附近的人類活動、機械振動。重力場的微小起伏（重力梯度）可能來自地震波、結構的振動、潮汐、大氣海洋或地下水流等。干涉儀中殘存的氣體微粒可能影響反射鏡、折射率、散射光束。反射鏡和懸吊系統的熱運動（布朗運動）可能改變鏡子距離、反射面形狀或方向。雷射頻率輸出的穩定度，甚至於光的顆粒性也會限制干涉儀的靈敏度。理論計算預估雙中子星事件產生 LIGO 干涉臂的相對長度變化不到原子核直徑的 1/100，聽起來像是不可能的任務。如何監測、模擬雜訊來源、進而消除這些雜訊，達到設計的靈敏度，正是重力波偵測的關鍵技術之一。

### LIGO 干涉儀主要架構

LIGO 的雙干涉儀就像是傳統的邁克生干涉儀（Michelson interferometer）如圖一。光在干涉儀兩臂的光程改變半個光波波長時，干涉光有可能從最亮（建設性干涉）變成最暗（破壞性干涉）。也就是說，干涉儀可以很容易量到和光波波長差不多的光程變化。重力波產生的光程變化和干涉臂長度成正比；如果 4 公里長的干涉臂相對長度變化是  $10^{-19}$  米，把干涉臂拉長百萬倍（如 LISA）就可達  $10^{-13}$  米。不過，地面上不大容易建造太長的干涉儀，距離遠也會有其他的困難。1980 年代 10 米級的原型干涉儀實驗中曾經測試過兩種光路設計，可以在同樣的干涉臂中增加實際的光程來提高靈敏度。一種是利用光學延遲線（delay line）的概念，讓光線在兩面鏡子中來回反射（例如 Herriott delay line）。另一種是使用法布里－珀羅空腔（Fabry－Perot cavity）做為干涉臂；光在空腔中來回形成多光束干涉，當波長和空腔長度滿足共振關係時會有明顯的效果，為 LIGO 所採用。光在空腔內來回反射約 280 次，可以把微小的臂長變化放大。

如果雷射光太弱，干涉儀的精度會比較差。就好比一台黑白顯示器有 32 位元甚至更高的動態範圍，和只有 16 個灰階的顯示器相比，後者的影像不如前者細緻。第二代 LIGO（Advanced LIGO 或 aLIGO）設計的輸入雷射功率（經過幾個階段的放大後）是 125 W。觀測時通常把相位鎖定在干涉儀輸出端產生破壞性干涉附近，此時，絕大部分的光會從輸入端流失（能量守恆）。為了進一步利用這些原本將損耗的能量，LIGO 在輸入端增加了功率回收反射鏡（power recycling mirror），把光反射回干涉儀內再利用。在輸出端的信號回收反射鏡（signal recycling mirror）也有類似的功用。最後在干涉臂共振空腔內的功率可能高達 710 kW，主要架構如圖二，實際設計更為複雜。干涉臂兩端的反射鏡在重力波實驗中特稱為「測試質量（test mass）」。因為，科學家想要觀測的是當重力波通過之際，兩質量之間時空的變化，反射鏡只代表觀測的手段。理想的測試質量最好能排除一切非關重力波的因素影響。透過四階段懸吊系統主動被動的減震設計，大幅減低反射鏡所受到的干擾，40 公斤的測試質量可以近乎自由的運動。無法隔絕的重力梯度變化等雜訊可以透過環境監測和模擬來剔除。

## LIGO 干涉儀概況

LIGO 採用波長 1064 nm 的 Nd:YAG（鉍:鈮鋁石榴石）固態雷射。這是工業雷射切割及醫療美容應用常見的紅外光雷射。原本 2 W 的輸出功率放大至 100 到 200 W 再送進干涉儀，是全世界在相同波長所產生最穩定的雷射光源。簡報用的雷射筆輸出功率約 5 mW，家用微波爐或吹風機大約 1000 W 上下。和干涉臂共振空腔內高功率搭配的是  $10^{-9}$  Torr（約  $10^{-12}$  大氣壓）的高真空環境、低吸收低散射的光學系統和元件、超高反射率的終端反射鏡（終端測試質量）以及原子等級高精度研磨的光學曲面。同樣條件下，越高的功率會產生更多的損耗，包含懸吊系統、光學元件、光路等的熱雜訊或熱效應也更為顯著。

路口閃爍的小綠人號誌燈提醒行人加快腳步，閃爍的頻率大約是 1 Hz 上下。若閃爍頻率超過 30 Hz 以上，肉眼恐怕就很難辨識，因為人類視覺對於光線變化的快慢反應有一定的極限。露天音樂會在嘈雜的環境中，聽眾還是能夠分辨演奏的音符或親友的呼喚。這往往並不是因為某個樂音或音調特別響亮，而是因為我們有能力從噪聲中揀選出有意義的信號，包含頻率及波形。人類聽覺的範圍約 20 Hz 到 20 kHz。aLIGO 對於 10–7000 Hz 的重力波頻段比較敏感，大約在 40–1000 Hz 靈敏度最高，這也是典型雙中子星合併前振幅最強的波段。預計在 2019 年 aLIGO 可以達到設計規劃的靈敏度，目前大約只有 40% 左右。現階段系統最主要的雜訊來源是量子雜訊和熱雜訊（圖三），是升級的首要目標。

## 熱雜訊、多層膜、起伏與耗散

除了在日本神岡隧道裡建造中的 KAGRA 重力波干涉儀採用地下化設計，並準備應用低溫技術降低雜訊，包括 LIGO 的其他地面干涉儀都在室溫下運作。熱平衡狀態下的絕對溫度代表每個自由度的平均動能，這就是能量均分原理

（equipartition of energy）。基礎物理章節中通常簡單假設每個自由度都有相同的動能；統計力學進一步考慮不同自由度之間能量的交換，熱平衡時會呈現一種特定的分布型態，是動態的平衡。那麼，測試質量的熱運動難道會比質子還小嗎？反射面的熱運動難道不會改變鏡面的形狀，影響傳播的光程和方向嗎？偵測微弱的重力波信號豈不是天方夜譚？實際上，研究員確實需要估算測試質量的熱運動在設計頻段中（譬如 100 Hz 附近）的平均振幅大小。無規的熱運動並不像琴弦的樂音，它可以展現出更豐富的頻譜分布，隨材料、形狀、外力變化而異。琴弦或音叉可能對樂音有強烈的反應，施加能量更強的超音波它們反而有可能看似紋風不動。另一方面，熱運動是一種統計的現象，有限的粒子數或樣本數會增加統計上的偏差。將測試質量增加一倍，理論上也可以降低雜訊，是近期評估的目標之一。此外，還可以考慮改變光束（外力）的直徑大小或分布。熱雜訊表現在許

多不同面向。例如懸吊系統的熱運動，元件的力學熱效應或光學熱效應等等。干涉臂中靠近分束鏡的測試質量有較高的透光率（1.4%），藉由額外的補償片可以修正去除或降低一些熱效應。干涉臂終端的測試質量則必須能儘量將光線反射回來，以免額外的耗損。

不同材料可能有不同的折射率，並隨著光的頻率而改變，也就是色散。光通過介面時，常有部份反射部份折射（穿透）的現象，遵循電磁學和波動傳播的基本原理，也可以用電子電路或電磁波阻抗匹配的概念來了解。廣義的阻抗不只包括振幅的衰減，也涵蓋相位的變化。收音機天線接收廣播或電視音響傳輸線傳遞信號，如果阻抗不匹配也會有信號反射而損耗。損失的能量可能造成收訊不夠清晰，如果對於不同頻率的阻抗反應不均，還可能失真。這也是為什麼不同等級的音響接頭和傳輸線會有相當大價差的原因之一。另一方面，透過阻抗匹配的設計，戰機或軍艦外殼塗裝有可能大幅減低雷達波的反射，使它在雷達幕上失蹤。這也是隱形戰具的另一種可能，是不是很有趣呢？爲了消除色散或像差，將各種透鏡合成透鏡組是常見的設計；但是，如果沒有抗反射處理，經過多次的反射耗損會使得光線變得更黯淡。高級眼鏡、相機、望遠鏡的鏡頭和目鏡多倚賴鍍膜的技術，針對特定波長或波段的光，藉由特定厚度、高低折射率相交錯形成的建設性或破壞性干涉來儘量消除或增強反射光的強度。

aLIGO 終端測試質量的穿透率只有 5 ppm（百萬分之五），經過兩三百次反射後，還可將送到干涉臂遠端的紅外光接近百分之百的留存下來。穩定的熔融石英玻璃（fused silica）構成測試質量本體，高反射鍍膜則使用不同材料（參閱潘皇緯文）。分析發現，半徑約 5、6 公分的雷射光束在鍍膜上產生的熱效應是目前 aLIGO 熱雜訊的最主要來源。早年使用簡正模（normal mode）分析估計雜訊的大小，有點像是將琴弦振動分解成基音和泛音的組合。由於鍍膜的反射面直徑 34 公分比光束大許多，不僅計算繁複，誤差也較大。現在則多用統計物理著名的起伏耗散關係或稱起伏耗散定理（fluctuation-dissipation theorem）來處理。

熱力學使用巨觀的物理量，不需要有原子分子等微觀的結構。統計力學從微觀的角度出發，將所有粒子或各個自由度本身的特性加總起來，求出和熱力學相當的巨觀物理量，如溫度、壓力、密度等等。靜態平衡的系統好比平靜無波的大海或水庫，可能有水位的高低，但是沒有波瀾起伏。「起伏」（fluctuation）是比靜態平衡更進階的一種概念，實際上卻廣泛存在我們的周遭。一顆發熱的電阻兩端由於電流載體（例如電子）的熱運動，會產生電位差的起伏，這起伏只和溫度及電阻大小有關，和外加的電壓無關，稱為強生雜訊（Johnson noise）。電阻代表耗散的元件，強生雜訊將電位差的起伏與電路的耗散關連起來，是起伏耗散關係的簡單例子。測試質量表面的多層膜或許有點像鋪在石英玻璃表面的彈簧床墊，無數彈簧的振動代表熱運動也彼此相關連。能量在彈簧間傳遞、耗散，造成一定程

度的起伏。起伏的大小和彈簧等級以及彈簧間耦合的特性有關，也隨施加外力的不同而改變。另一方面，起伏耗散關係在其他更實際且遠離平衡的系統可能扮演不同的角色。奈米、生物、混沌、流體、天氣等都是熱門的研究對象。

### 干涉儀的量子雜訊

光的粒子性與海森堡測不準原理是量子力學的特性，大小都由普朗克常數決定。語意上「測不準」一詞改用「不確定性」會更為恰當，原理描述諸如位移、動量兩共軛物理量的不確定度之間密不可分的關係。不確定度就像先前提到的起伏，只是統計力學的起伏和量子起伏有本質上的不同。aLIGO 偵測的精密度比原子還要小許多，量子效應必須納入考量。不過，有人證明把測試質量本身看做量子力學中的波函數或量子態，並不會對重力波干涉儀的雜訊產生顯著的影響，主要的量子雜訊仍來自於光的粒子性（Braginsky et al., 2003）。約 100 Hz 以上的高頻大致相當於兩顆黑洞或中子星以每秒上百圈的高速相互環繞，是緻密雙星合併前的最後階段。圖三顯示量子雜訊是當前這波段最主要的雜訊來源。aLIGO 第三個觀測期預計 2018 年秋天開始，在此之前最主要的工作就是安裝特殊設計的量子態光來降低量子雜訊。

干涉儀的量子雜訊包括散粒雜訊（shot noise）和輻射壓雜訊。古典電磁學的光（電磁波）沒有粒子的特性，不會產生這樣的雜訊。量子化的電磁波最小能量單位是光子。對於任何一種光源，理論上我們都可以做一個光子計數的實驗，譬如說，每單位時間計算光偵測器所接收到的光子數目，先假設偵測效率是 100%。不同性質的光源可能會顯現不同的光子統計（photon statistics）特性。接近同調態（coherent state）的雷射光源光子統計應該呈帕松分布（Poisson distribution），期望值和方差都和光子數成正比。實際的光子統計需仔細考慮光源產生的機制。干涉儀的散粒雜訊是在輸出端，由於光子計數的起伏所產生的雜訊，光子越少，相對的信噪比（signal to noise ratio, SNR）越差。輻射壓雜訊是在干涉臂中，測試質量反射的光強度有量子起伏，造成測試質量的動量變化和位移的不確定性。量子力學發展初期，為爭論測不準原理的本質而發展出許多想像的實驗，這可以看做是另一個版本。實際上干涉儀的情況還要更複雜一些，因為一台干涉儀有兩支干涉臂。X 方向和 Y 方向的輻射壓雜訊來自同樣的輸入光源，兩側雜訊可能互相關聯，必須一併考慮。早在 1980 年，卡夫斯（Carlton Caves）就指出，關鍵的雜訊不是來自輸入端雷射的起伏，而是在傳統的輸出端，真空中電磁場的量子起伏透過分束鏡進入干涉儀並與輸入光疊加，最後反映在光偵測器的信號起伏和信噪比上面。「真空中的量子起伏」聽起來很神奇啊！更神奇的是科學家竟然有辦法做得比真空更好，而且已經準備用在 aLIGO 上了！

## 真空起伏與緊狹態

古典的真空什麼都沒有；量子力學的真空是一種基態（ground state）。譬如說，電磁場量子化以後的最低能量態，光子數、電場、磁場的期望值都是零，和古典真空概念相符合。然而，總能量的期望值不是零（即零點能量），這基態也不是電場或磁場的本徵態（eigenstate），也就是說，真空中的電場雖然平均值為零，但是沒有固定的值，有量子起伏。量子力學裡的電場就像測不準原理的位移或動量，有個共軛的物理量，兩者的不確定度相乘同樣遵守測不準原理。這些都可用基礎物理中的簡諧運動來理解。以位移和動量當作橫坐標和縱坐標，簡諧運動任一時間的狀態可表示在這張「相圖」上。古典簡諧運動好比理想的彈簧，靜止時位移和動量都是零。量子簡諧運動，基態的平均位移和平均動量都是零，但是有量子起伏，滿足測不準原理。忽略質量和彈簧常數等人為係數（選擇自然的單位），相圖上任一點和原點的距離（平方）直接對應到簡諧運動的總能量（動能加位能 = 位移<sup>2</sup> + 動量<sup>2</sup>）。教科書上量子簡諧運動的基態波函數是一個高斯分布，由平均位移（零）和它的方差（或變異數）可以完全決定。相圖上可以用一個以原點為中心的圓來表示，如圖四 a。

當測不準原理的等號成立時，我們可以說這是一個不確定度極小態（minimum uncertainty state）。測不準原理要求兩者的乘積有最小值，不需要位移、動量、或者電磁場振幅、相位的不確定度也有下限。以量子簡諧運動為例，不難找出其他的不確定度極小態，波函數呈高斯分布和基態一樣，但動量或位移的不確定度比基態還小，代價則是其共軛量的不確定度會比基態還大，如圖四 b。電磁場的真空也一樣，結果產生一種新的量子態，稱「真空緊狹態（squeezed vacuum）」，可選擇不同的緊狹方向來「壓縮」。這名詞也有些誤導，雖然電場、磁場的期望值仍然為零，平均的光子數卻大於零，而且總能量和壓縮的大小相關。但是，這新的量子態在某些相位的不確定度比真空的表現還要好！

卡夫斯在 1981 年就提出構想，從干涉儀傳統的輸出端注入適當的緊狹態，可以進一步降低干涉儀的量子雜訊。澳大利亞及德國的團隊分別在實驗室和德國 600 米的干涉儀 GEO 600 測試過；LIGO 也在 2013 年發表了於干涉儀 H1（Hanford, Washington）的實驗結果，如今即將正式上場。緊狹態的效力受到光路上損耗的影響很大，這是為什麼要對多層膜和其他元件反射率、吸收、散射問題斤斤計較的另個原因。高斯波包可以和雙光子過程連繫起來。古典電磁學在真空中電磁波與電磁波之間沒有交互作用；在非線性光學材料中，電磁效應可以和電場的平方成比例，指引了產生緊狹態的一種可能途徑。此外，利用前述光在空腔中的力學效應（optomechanics）改變光子計數特性，或是直接度量測試質量的速度（動量）而非位移的「量子非破壞性測量（quantum non-demolition measurement）」等等諸多方法都有可能改善量子雜訊，可應用在精密測量、量子資訊、量子通訊、自旋系統等不同領域。

## 太空干涉儀、波霎定時網

歐洲太空總署在 2015 年 12 月發射了 LISA 探路者太空船 (LISA Pathfinder)，半年的實驗超乎預期的成功驗證了後續 LISA 任務所需要的無拖曳技術 (drag-free)。也就是說，計畫中的三艘 LISA 太空船應該可以順利的保護承載的測試質量，在滿足設計的重力波觀測波段和靈敏度要求內，不受其他非重力因素（如太陽風、太陽光壓）的干擾。測試質量在軌道上進行近乎完美的自由落體運動，藉由雷射干涉儀技術測量彼此間距離的變化來偵測重力波。依照 LISA 在 2017 年初提交給歐洲太空總署的計畫書，任務設計以三艘太空船相距 2.5 百萬公里為藍本，預計使用口徑 30 公分的望遠鏡來接收雷射光進行干涉測量。任務需求的觀測波段在 0.1 mHz 至 0.1 Hz 之間，期望能拓展到 0.02 mHz 至 1 Hz。這大略相當於周期不到半天的緻密雙星系統，有可能來自銀河系內的白矮星、中子星、黑洞雙星，或者是宇宙深處有相似周期的超大質量黑洞系統等等。

自 1990 年代開始研發，LISA 的相關技術多半已經成熟。除了 LISA 探路者測試的無拖曳科技，也利用諸如 Gaia、GRACE-FO (GRACE Follow-On) 等太空任務測試相關的系統或元件。在 3 mHz 以下主要是加速度的雜訊，已經在探路者的實驗中展現。高於 3 mHz 的部份，約一半是來自技術性的雜訊 (technical noise)，可能像是雷射穩定或電子電路等等；另一半則是光的散粒雜訊。平常用雷射筆當做指標，因為準直度不錯，比較像平行光。一般準直度較好的雷射光束發散度 (beam divergence) 可以用高斯光束 (Gaussian beam，光束橫截面強度變化呈高斯分布) 來估計。光束發散是繞射的結果，和光束的大小及光的波長有關。發散角通常以毫弧度 (milliradian) 為單位，大約不到 0.06 度。1 milliradian 在 10 公尺遠處相當於 1 公分，在 38 萬公里遠的月球表面就相當於 380 公里！LISA 的雷射波長 1064 nm 功率 2 W，被另一側望遠鏡接收到的功率，照計畫估計只剩下 100 pW (pW =  $10^{-12}$  W) 左右。不大可能循原路反射回去。透過弱光鎖相技術鎖定雷射相位再發射 2 W 的光返回比較可行。

測量重力波的兩把尺，未必要用雷射干涉儀。只要時空的變化能夠在兩把尺的相對長度變化上展現出來，測量遙遠的太空船、似星體或是實驗室中特製的超低溫金屬球等等都是一種可能。波霎定時網 (PTA) 利用某些脈衝星 (持續發出穩定電波信號的緻密天體，故稱波霎) 比原子鐘還準確的特性，來尋找重力波。PTA 搜尋的重力波頻段大略在 1 nHz 到 100 nHz 之間，相當於周期 30 年到 3 個月或更短。相較於每秒鐘放一次電波信號的普通波霎，每秒發出數百次脈衝的毫秒波霎 (millisecond pulsar) 更適合用於搜尋重力波。然而，像這類比較能夠達到定時精確度要求的波霎數目不多，僅占全體總數的 1%。波霎本身電波信號微弱，大型電波望遠鏡比較適合用於尋找新的波霎。貴州境內新近完工的 500 米直徑天線

FAST，以及澳大利亞與南非建造中的平方公里陣列 SKA 都佔有大口徑的優勢，可望能發現更多的毫秒波霎。不過，由於波霎產生電波的確切機制並不十分清楚，很難掌握電波脈衝信號本身的變異性。星際介質影響電波傳遞，就像大氣層影響星光傳播，構成另一種雜訊的來源。此外，PTA 網路上每個電波天線和天線後端的電子電路軟硬體等並不完全相同，種種因素都可能影響定時的精確度。

## 結語

2017 諾貝爾物理獎得主之一的巴利許（Barry Barish）在 1998 年接受加州理工學院口述歷史訪問，觸及他在 1994 年初掌 LIGO 計畫時的心路歷程。當時外界多半把整個計畫問題的重心放在人事管理的紛擾上，巴利許認為技術問題才是最大的挑戰。他舉例說明 LIGO 干涉儀多個次系統之間相互耦合牽一髮而動全身的關係，數位化控制系統是解決的關鍵。他也強調偵測科技必須與時俱進，因為（當時）「沒有人真正知道如何建造靈敏度足以偵測到重力波的機器」。硬體完工後經過一段調整期，第一代的 LIGO 從 2002 年起正式觀測，隨著每個觀測期（observing run）結束再進行軟硬體的升級調整。2010 年底開始更換全新的第二代硬體，自 2015 年 9 月迄今，aLIGO 已經完成了兩個觀測期並成功的偵測到重力波。重力波偵測不只是相對論物理學家的工作，也統合了量子光學、精密測量、軟硬體自動控制與大數據分析計算等不同領域的科學和工程技術。從 LIGO 網站下載儀器科學或資料分析的白皮書（每年隨研究進展更新），可以進一步瞭解科學關注的內容與趨勢。典型的偵測器發展周期包括基本構想的模擬、實驗測試、原型概念設計、提出正式計畫與工程分析、建造安裝、啓用及觀測，大約需要 15 到 20 年。在 aLIGO 之後的進階構想包括 LIGO A+、可能採用低溫技術的 LIGO Voyager 等。若技術和經費無虞，全新 40 公里等級真空腔、靈敏度比 aLIGO 高 10 到 100 倍、觸角遍及全宇宙的 LIGO Cosmic Explorer 可望在 2030 年代前後的重力波天文學扮演重要角色。LISA、波霎定時網以及其他進行中或構想中的地面、地下或太空偵測器將涵蓋更深廣的重力波頻譜，開展重力波宇宙的全新視野。

## 延伸閱讀

1. The LIGO Scientific Collaboration, “Advanced LIGO”, Class. Quantum Grav. 32, 074001 (2015)
2. Danzmann, K. et al., “LISA: Laser Interferometer Space Antenna”, A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts (2017)
3. Lommen, A. N. and Demorest, P., “Pulsar timing techniques”, Class. Quantum Grav. 30 224001 (2013)