

雷射干涉重力波觀測站 (LIGO) — 宇宙觀測的第三隻眼

姓名：莊川廣 / 學號：112020009

前言—愛因斯坦在廣義相對論中，預言了重力波的存在，但自己也不怎麼有自信。1974 年，赫爾斯—泰勒脈衝雙星的軌道衰減首次驗證了重力波理論。一直到了 2015 年，透過雷射干涉重力波觀測站 (LIGO)，人類才首次真的測到重力擾動形成的空間波動。

本文將從重力波的背景知識著手，說明重力波的本質與其來源，引導讀者了解重力波所造成的時空漣漪之微弱，接著說明 LIGO 技術論文中所分享，提升儀器靈敏度與降低噪音的技術，帶領讀者一窺其設計之精密與工程之高超。最終與讀者一同引頸期盼人類重力波觀測的未來計畫。

目錄

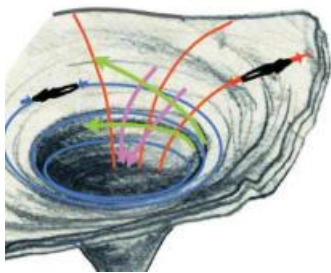
壹、背景知識.....	1
貳、LIGO 如何測得重力波？.....	2
參、地球上其他重力波觀測站。.....	4
肆、重力波觀測對科學界影響。.....	5
伍、未來的觀測計畫。.....	5
參考文獻.....	5

壹、背景知識

一、重力波是什麼？

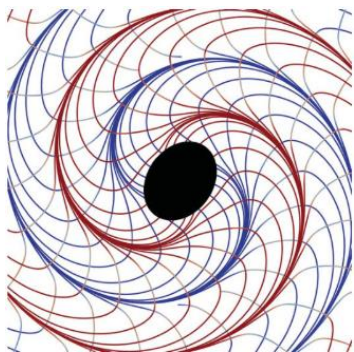
(一) 潮汐重力

根據廣義相對論，強大重力場周圍的質量會沿著翹曲空間和時間的筆直路徑運動。基普·索恩 (Kip Thorne) 與他的學生發現，在翹曲空間與時間中的力線，會迫使某些自由路徑聚攏，某些路徑分離。他們將這樣的力線命名為拉伸線 (Tendex line) [1]。



圖一：黑洞周圍拉伸線示意圖，紅線為伸展，藍線為擠壓。綠色與紫色的軌道垂直經過力線後，分別受到伸展與壓縮。 [1]

在大質量天體互繞合併的案例中，兩者的拉伸線分別從軸向、碰撞區釋出，軸向上發生伸展，碰撞區發生擠壓。高速的旋轉逐漸接近光速，而重力以光速傳遞，因此重力線的訊號如同波動一般，攜帶軌道能的差值向外傳遞。其頻率與公轉頻率相關。兩者合併釋出大量能量後回歸平靜。



圖二：黑洞接近合併時的拉伸線示意圖。 [1]

圖中伸展與壓縮線一直維持垂直。拉伸的共扼特性確保了重力波對我們張開探測器的二維空間的變形有正極化、交叉極化兩種模式，依據重力波前進方向而不同。

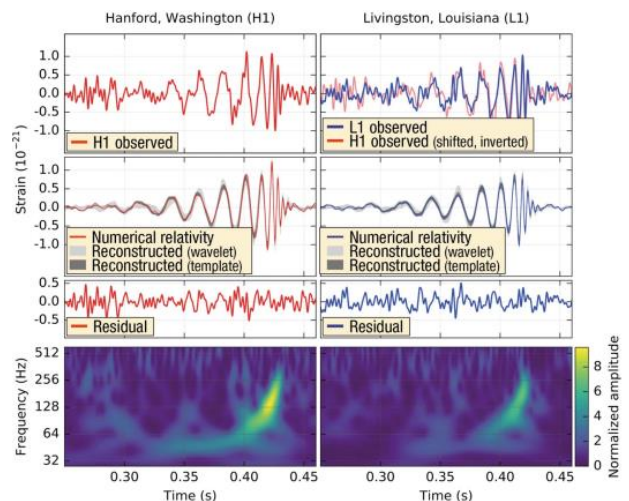
(二) 重力波的源頭。

重力波的源頭多為大量質量密集處發生的事件，比如說黑洞、中子星、中子星互繞與碰撞、非球對稱超新星爆炸、非球對稱中子星自轉以及大霹靂宇宙背景重力波。球對稱的事件不論是電磁抑或是質量皆無法釋放波動 [2]。

不同的事件依據理論模型以及其紅移量，會有不同的頻率與強度特徵，比如說 2015 年所觀測到的雙黑洞合併事件具有頻率與強度突增的現象。

(三) 重力波的尺度

以 GW150914 為例，當時所收到的訊號頻率從 35Hz 至 250Hz，功率約為 3.6×10^{49} Watt，總釋出能量高達三倍太陽質量。 [3]



圖三：GW150914 事件的數據，此次事件的時間尺度約只有 0.2 秒，最大位移為臂長的 10^{-21} 倍，即 4×10^{-18} m。 [2]

若想計算雙星系統所釋放的重力波功率，我們可以引用以下公式 [2]

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{64 G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5 c^5 r^3}$$

並由軌道總能

$$E = -\frac{G m_1 m_2}{2r}$$

推得

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} = -\frac{32 G^4 m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{5 c^5 r^4}$$

便能夠算出巨大質量雙星互繞的理論重力波功率。

貳、LIGO 如何測得重力波？

雷射干涉重力波觀測站 (LIGO) 位於美國，由三部位於不同地點的巨型干涉儀組成。華盛頓州漢福德區有兩部 (H1 與 H2)，路易斯安那州利文斯頓有一部 (L1)。H1 與 L1 的干涉臂長為 4000m，H2 則為 2000m。其運作原理大致上與麥克森干涉儀相同，可說是輸出功率進化、能量使用效率進化、放大版的麥克森干涉儀。



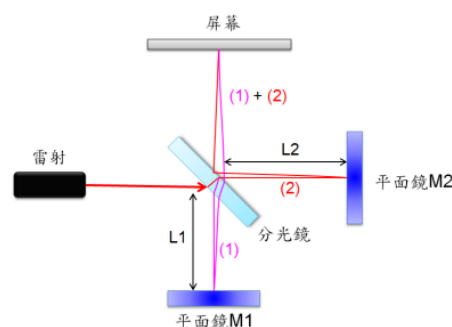
圖四：位於兩地的巨型干涉儀。圖片取自 LIGO 官網。

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.ligo.caltech.edu%2F&psig=A0vVaw2-hDJRUyqkIw7f-xp7V4mX&ust=1758856457617000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBgQjhxqFwoTClIx0oT58o8DFQAAAAAAdAAAAABAE>

一、麥克森干涉儀原理。

麥克森干涉儀被廣泛運用於精密距離測量。此項實驗技術源自於物理學家麥克森希望透過測量在不同方向上光速是否有差異以驗證以太的存在所開發出的實驗。

麥克森干涉儀的主要構造為：光源、分光透鏡、干涉臂、反射鏡。透過光源在屏幕上的干涉性質了解分光後兩道光線的路徑長度差異。當差異是其波長的整數倍，形成相長干涉；當差異是半整數倍時，形成相消干涉。

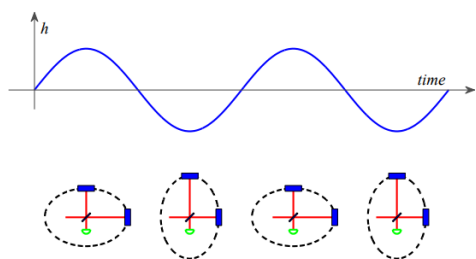


圖五：一般的單調光源干涉儀構造。圖片來源：清華大學普通物理實驗室，邁克生干涉 (Michelson interference) 實驗講義。

在光源為單調光的情況下，干涉臂的長度差異容許範圍很大，也能形成良好的干涉圖型。LIGO 所使用的光源為 Nd:YAG，即摻鉍鈮鋁石榴石雷射，波長為 1064nm [4]，因此在技術文件中未強調兩光線路徑必須完全等距。

二、重力波干涉儀的運作。

重力波干涉儀所偵測的目標是空間的拉伸與擠壓，前文有提到，拉伸與擠壓線正交，於我們的採樣平面造成正極化或交叉極化的扭曲變化。LIGO 先將觀測的狀態調整為相消干涉，雷射在干涉臂中的路徑長度若發生變化，就會在收集器上產生光訊號，其強度與訊號的振幅近似線性。



圖六：誇飾表達的空間伸縮，對雷射路徑長造成變化，上方圖表為假想的相對振幅。[4]

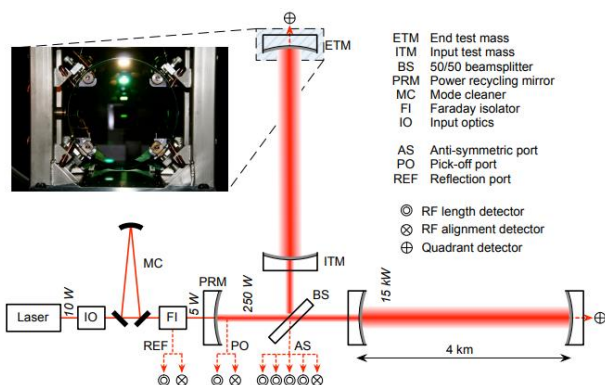
然而，對於重力波，一般的麥克森干涉儀顯然不足以測得這樣的訊號，

第一：LIGO 的對於廣泛波段的偵測靈敏度約在臂長的 10^{-21} [4]，如此小的位移所產生干涉的光訊號十分微弱，對於一般的干涉儀難以測得。

第二：一般的干涉儀在微觀尺度下有大量的雜訊與能量耗散，例如反射鏡的缺陷散射、熱噪音、氣體散射以及環境噪訊等等，足以淹沒如此微小的訊號。LIGO 如何將靈敏度做到如此細微呢？

三、Power Recycle Fabry-Perot Michelson Interferometer

儀器靈敏度與雷射能量和干涉臂的等效長度正相關，LIGO 透過在干涉臂設置共振腔、並且回收返回光源的能量來增加靈敏度。



圖七：LIGO 所運作的強化版干涉儀的構造圖，圖中 ETM 與 ITM 為測試質量，兩者間的距離

便為我們所稱的干涉臂長；在光源與分光鏡之間放置了一面部分反射鏡 PRM 以回收能量 [4]。

(一) 共振腔

單調雷射經過分光鏡後，進入干涉臂，首先通過第一個測試質量部分反射鏡，進入共振腔，干涉臂的尾端有一個測試質量全反射鏡，兩者間距約 4km。雷射光的路徑在共振腔中放大了 100 倍，也就是將干涉臂的等效長度放大了 100 倍，大大提升了靈敏度。[4]

(二) 能量回收

為了達到雷射能量的最大利用，LIGO 的光源與分光鏡之間設置了部分反射鏡，將從干涉臂返還未進入偵測器的能量反射回分光鏡，透過精密調控，讓再利用的雷射與波原的雷射相位一致，就能夠使裝置內的能量更高，以提升靈敏度。[4]

四、降噪與控制

(一) 散射吸收

即使鏡面缺陷極小、散射度極低、空氣粒子多麼稀薄，仍然有可能發生小角度的散射事件，這些小角度散射的光子路徑與直進的光線不同，對實驗數據造成汙染。

LIGO 的雷射真空腔體內裝備了許多吸收體，每 4 km 會放置約 200 個[4]，能夠確保散射的光子被吸收不至於影響實驗數據。

(二) 低散射、吸收鏡面

LIGO 的熔融石英測試質量經過精密拋光、多層介電質包覆、濺鍍鏡面，達到不到 5 埃的曲面誤差、最大僅 2 埃的粗糙點缺陷。這個低耗損鏡面的吸收尺度為 ppm 等級；散射則約 60~70ppm。[4]

（三）極真空管材

為了避免雷射與空氣粒子散射，以及聲學噪音的干擾，將真空腔內的氣體密度降至 $10^{-8}\sim 10^{-9}$ torr。為了達到如此低的氣壓，不鏽鋼管材的氣體含量必須非常低，才能避免氣體從金屬材料析出的問題。製作低氬不鏽鋼的製程為熱線圈加熱鋼材至 160°C 並持續 20 天。[4]

（四）懸掛式隔震

由於敏感度非常高，實驗結構體的微小震動都會對數據造成雜訊。測試質量與感測器皆以擺錘懸掛系統懸吊於空中，懸掛系統再以四層彈簧抗震系統阻隔噪訊，將結構的噪音降至最低。[4]

（五）控制與回饋系統

透過電磁裝置精密控制懸掛的測試質量與感測器位置，確保共振腔維持整數倍波長以維持共振效果；確保感測器初始位置觀察到破壞性干涉。[4]

（六）環境監測

實時追蹤外部訊號有助於我們濾除干涉儀數據中的噪音。使用地震儀與加速儀偵測地面與部件震動；使用麥克風接收聲學噪訊；使用磁計偵測背景磁場對測試質量與電子設備的影響；設置雷射接收器偵測目標波段周圍的雷射訊號。

這些資料用於實時了解裝置的背景訊號，協助分離出目標訊號。

五、協同觀測

一部偵測器只能測得訊號強度、頻率與發生時間，無法得知來源的方位。為了對宇宙更深處進行探索，定位出訊號的來源能夠協助我們對相關目標進行更多的觀察。

GW150914 事件中，只有兩處 LIGO 觀測站運作中，因此對於訊號來源，我們只能利用訊號抵達兩處設施的時間差，決定出一個源頭可能位於的圓錐面（以天球的觀點是一個圈）再輔以其他電磁波數據推測相關性以猜出訊號源的位置。今日世界各處有多部重力波探測器運轉中，形成一個定位網絡，大大增加定位的可信度。

多部重力波探測器同時運轉也有助於濾除 local 的雜訊，識別出共同測得的波形有助於增加波形的可信度。[4]

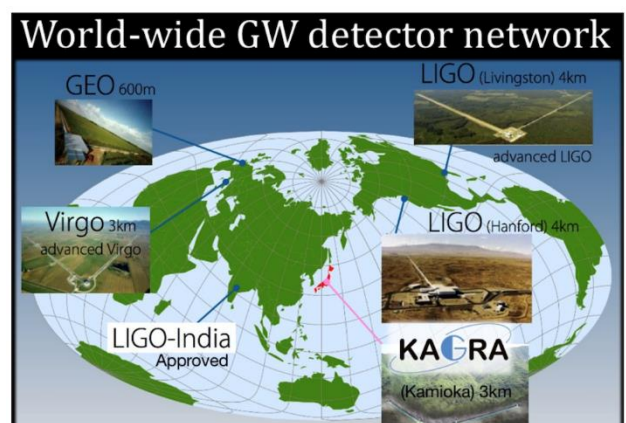
參、地球上其他重力波觀測站。

如圖八所示，除了位於美國的兩座 LIGO 觀測站，世界上還有三部運作中的重力波觀測站。分別為：

位於日本神岡的 KAGRA，干涉臂長 3 km，於 2020 年開始觀測。

位於義大利比薩的 VIRGO，干涉臂長 3km，於 2017 年升級完成重新投入觀測。

位於德國漢諾威的 GEO600，干涉臂長 600m，於 2002 年開始與 LIGO 進行協同觀測，不幸的是於 GW150904 事件時該設施處於工程狀態，因此未收到訊號。



圖八：世界上的重力波觀測站。圖片取自中央研究院 ASGC 網站。

肆、重力波觀測對科學界影響。

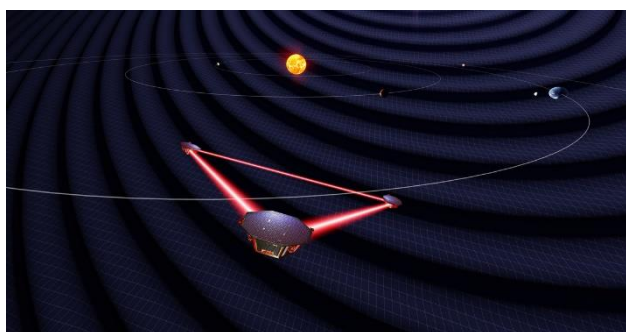
愛因斯坦的廣義相對論預測了重力波的存在，GW150904 的觀測首次驗證了相對論中所預測的重力波，為相對論的實驗驗證添上最後一塊拼圖。

重力波的觀測增加天文觀測的手段，有如開啟人類探索宇宙的第三隻眼。重力訊號能量與電磁波一樣隨著距離平方遞減，但電磁波更容易與路徑上帶電物質交互作用而被遮蔽；對於不產生電磁波的天文現象如無吸積盤的遙遠黑洞互繞系統，我們只能透過重力波來進行觀測。重力波天文學與電磁波天文學的共同運作，能夠讓我們看見更深更廣的宇宙。

伍、未來的觀測計畫。

LIGO 等觀測站皆以提高靈敏度，降低噪訊比做為未來目標。期能夠觀測到更低頻率與更低能量的重力波訊號，例如尚未被發現的宇宙背景重力波。

另一方面 NASA 與 ESA 計畫 2035 年發射名為 LISA 的重力波探測太空站，三部太空梭將會在地球軌道上維持正三角形並落後地球約 5000 萬公里的位置運行，兩兩之間形成約 250 萬公里長的干涉臂[5]，目標是觀察人類前所未見的早期宇宙，早至第一顆黑洞的故事。



圖九：LISA 運作示意圖。取自 EGO official website.

<https://www.ego-gw.it/wp-content/uploads/2024/01/LISA.jpg>

參考文獻

- [1] Kip Thorne. The science of interstellar. 漫遊者文化出版, 2015.
- [2] Gheouali Abdelkrime. Gravitational waves. 2023.
- [3] GW150914. Wikipedia. 2023.
- [4] B. P. Abbott et al. LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. IoP Science journals, 2009.
- [5] LISA factsheet, ESA Official website.