

B. 重力波

2015年9月14日，LIGO(雷射干涉重力波天文台)首度測量到重力波，這在科學界引起巨大轟動，重力波到底是什麼呢？不少科普文章都把時空比喻為可彎曲伸縮的膜，重力波則是這塊膜的波動，究竟這個比喻有多準確？我們平日都經常接觸不同的波動，例如在空氣中傳導的聲波，傳遞訊息的無線電波等等，重力波跟這些較常見的波動現象又有什麼共通和相異之處？

重力波 時空的漣漪

「重力波」是愛因斯坦的廣義相對論所預言的物理現象之一，它在牛頓的萬有引力理論中是不存在的。當質量(或能量)進行加速運動時，會在時空中產生波動¹¹並擴散傳播，這種波動就是「重力波」，如上述所言，「時空的彎曲」本身是取代了「重力」的一種表示形式，這裡「時空的波動」也可理解為「重力場的波動」。即使牛頓的萬有引力理論可用時空的彎曲表示，但仍沒有包含到這種波動，因為牛頓的理論下的時空是絕對堅固的，即是任何時空曲率的改變都可瞬間傳遞¹²。打個比方說，牛頓的時空就像經典力學中的剛體 (rigid body)，假使我們敲打剛體的任意一端，這訊息會在一瞬間傳遍整個剛體，導致它整體同時運動，而形狀維持不變，也不會有波動傳播。廣義相對論的時空則允許了波動的傳導，像平常物質一般既可變形，也可震盪，當然重力波在性質上跟在物質裡傳導的力學波 (mechanical waves) 有很大分別。

由於震動的是時空本身，重力波的傳導是不需要介質 (medium) 的，這一點與電磁波十分類似，電磁波包括可見光、無線電波及伽馬射線等，其本質是電場及磁場的波動，同樣能在真空下傳播。根據廣義相對論的預測，重力波與電磁波同樣以光速傳播，這預測在2017年8月17日得到證實，當時LIGO(雷射干涉重力波天文台)及Virgo(處女座干涉儀)¹³測量到來自雙中子星合併的重力波信號GW170817，與以往五次來自雙黑洞合併的信號不同的是，這次雙中子星合併會同時發出重力波及電磁波信號(伽馬射線、可見光、無線電波等)，幾乎在測量到重力波的同一時間，地球軌道上的兩個伽馬射線望遠鏡Fermi及INTEGRAL探測到來自同一方向的短伽馬射線暴¹⁴(short gamma-ray burst)，從而證實了重力波以

¹¹ 波動是透過震動傳遞能量的現象，經典物理學中的剛體裡波動傳遞速度為無限，有違狹義相對論，這裡不把這種假設現象稱為波動

¹² 牛頓的理論中，重力的傳遞速度是無限，因此不允許重力波的存在

¹³ 重力波信號GW170817由LIGO-Virgo探測網絡所測量到，實際上位於意大利卡希納的Virgo測量到的信號比分別位於美國漢福德及利文斯頓的LIGO所測量到的信號微弱且不穩定，因此沒有被用於計算信號的顯著性(significance)，它卻在定位信號來源方面起了作用

¹⁴ 短伽馬射線暴是一種相信由雙中子星合併產生的天文現象，起始時會放出高強度的伽馬射線，並在短時間內消逝，隨後亦會發出其他頻段的電磁波，稱作餘輝

光速傳播的預測。



圖五：雙中子星合併的一刻(概念圖, credit: LIGO)

相較於電磁波，重力波與物質的相互作用極微弱，並具有更高的穿透性。電磁力遠比重力強，因此物質中電荷分佈的微小波動已足以產生可觀測到的電磁波，但同時電磁力由正負兩極的電荷產生，兩極有著互相抵消的效果，電磁波通過正常物質(非暗物質)時很容易被吸收或散射。反之，重力來自質量(或能量)，重力作用本身雖然非常微弱，但沒有相反兩極抵消的現象，會隨著質量疊加而反覆增強，儘管只有質量龐大的天體的震盪或運動才足以產生可觀測到的重力波，它卻不易被吸收而衰減。

以上提及的「時空的波動」或「重力場的波動」都是概念上的描述，我們可粗略地將重力波看成是一張被稱為「時空」的膜在震動，或一些隨時間在空間上傳導的重力變化。撇除這些人為的理解角度，為了進一步理解重力波，我們需要明白它造成的物理影響。

重力波造成的物理影響

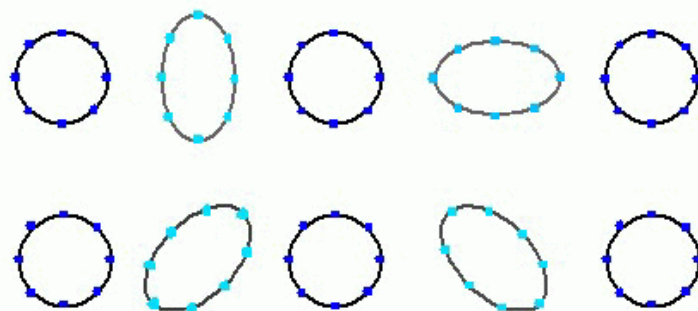
時空波動的概念可謂十分抽象，在四維時空中形容一事件，我們需要四個座標，包括三個空間座標(例如經度、緯度及高度)和一個時間座標，座標系統的選擇是任意的，假如我們選擇了一個波動的座標系統，即使時空本身是靜止的，看起來也仿佛在波動著。在討論重力波時，經常會問及一個問題：時空的波動會否純粹是一種座標系統帶來的幻象呢？這問題其實等價於：重力波是否具有真實的物理影響？這個問題困擾了物理學家好一段時間，事實上，即使愛因斯坦本人亦曾一度誤以為重力波並不存在¹⁵。

真實的物理現象是不會因座標系統的選取而消去的，我們必須弄清楚重力波會否造成不能被座標轉換消除的物理影響。首先，波動的時空和波動的座標系統

¹⁵ 愛因斯坦曾撰寫一篇論證重力波不存在的文章，並提交至物理學期刊「物理評論快報」(physical review letters)，但由於不滿該期刊在未經同意下把他的論文交給其他專家審閱，且指出文章中有錯誤，因而撤回了該論文，以至後來發現論文中的數學確實出錯，最終沒有發表

對單一質點(沒有大小的粒子)的影響是無法被分辨的。在波動的時空中，由一個跟隨單一質點運動的座標系統觀察，該質點看起來是靜止的，沒有受到外力作用，因此重力波沒有局部的影響(local effect)；但兩個位置不同的質點之間的相對運動是無法以同樣方法消除的，換言之重力波對位置不同的兩個質點的潮汐影響(或對任何有實際大小的物體的影響)是無法被抵消的，這就是重力波的物理影響。

簡單且籠統來說，重力波就是隨時間在空間上傳導的潮汐引力。重力波通過時，受影響的物質會在垂直於重力波傳播軸的方向感到一股伸縮震盪的潮汐力，如果重力波垂直通過一組排成一圈的細小粒子，這潮汐引力會使它們以橢圓變形。重力波的震盪模式有兩種¹⁶，分別是呈十字形及 X 字形的橫向震盪(圖六)，兩者互相「正交」(orthogonal)¹⁷。根據上述，重力波具有真實的物理影響，因此它是可以被測量的。假如我們用一把堅硬的尺子量度粒子距離的變化，就可以測量重力波，堅硬的尺子因被其他力維繫著，可抵抗重力波的潮汐力而不會跟著粒子伸縮。但現實中抵達地球的重力波震幅極小，甚至比原子核的直徑要小上許多，我們也無法造出絕對堅硬的尺子來測量如此微小的改變，為此我們需要最精密的儀器來探測這些長度變化。

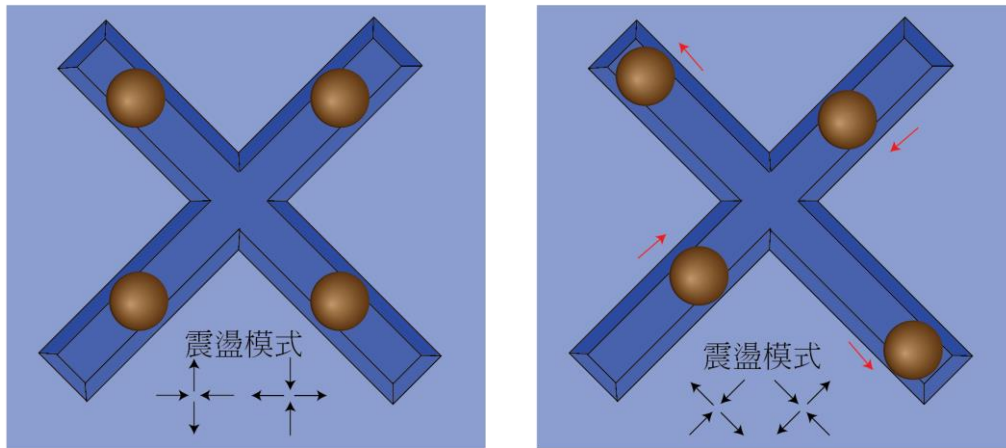


圖六：一圈細小粒子在重力波垂直通過時的十字形(第一列)及 X 字形(第二列)震盪

(圖片來源 http://www.auriga.inl.infn.it/auriga/grav_wave.html)

¹⁶ 廣義相對論下，重力波只有兩種橫向震盪模式，互成 45° 。牽涉縱向震盪的模式及造成膨脹/收縮的呼吸振動模式(breathing mode)並不存在

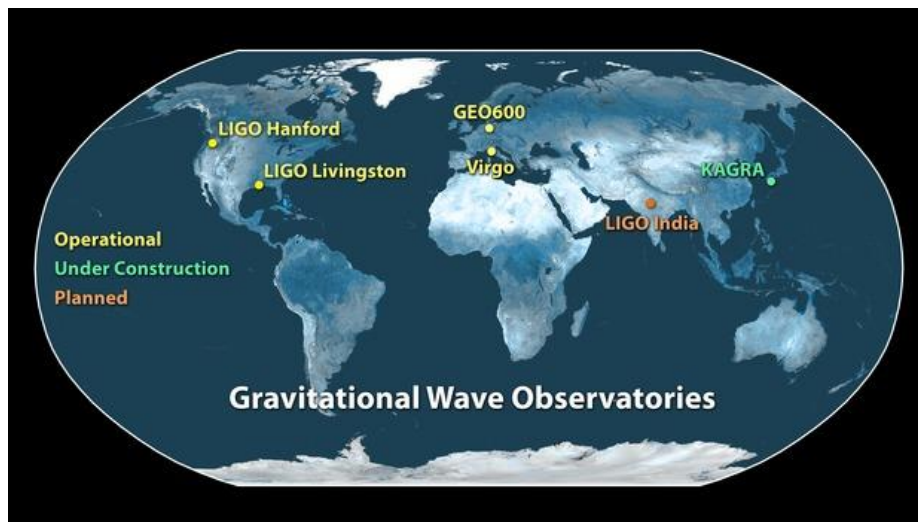
¹⁷ 十字形及 X 字形的震盪互不相關，這稱作互相正交，例如十字形的震盪對於只能沿 X 字變形的物體不會造成影響(圖七)，這是因為十字形的震盪下，當豎向拉伸的時候，平向會同時收縮，兩者相加的效果沿 X 字方向完全抵消



圖七: 只能沿 X 字變形的系統在不同震盪模式下的反應

重力波的測量

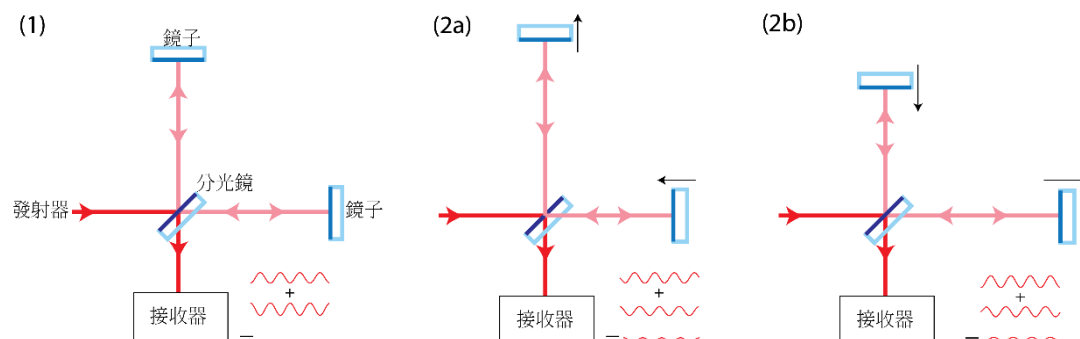
重力波可造成分佈在空間不同位置的質點之間的相對加速，因此是真實的物理現象，儘管抵達地球的重力波波幅極微，但仍然可被測量。現時運作中並已經成功測量到重力波的探測器利用激光干涉來測量重力波造成的長度變化，它們包括位於美國的 LIGO 的 H1 和 L1 及位於意大利的 Virgo。同時，世界各地亦有興建中或計劃興建的重力波激光干涉儀(圖八)。



圖八: 世界各地興建中或計劃興建的重力波激光干涉儀 (credit: LIGO)

基礎的激光干涉儀擁有兩臂，成一定角度。運作時，一束激光從發射器射出，經過分光鏡分成兩束並沿兩臂傳播，被盡頭的鏡子反射回到分光鏡再次相遇，從而產生干涉(圖八)。當重力波經過時，兩臂的長度隨著時間改變 (圖九 2a,

2b)¹⁸，於是兩條光束的干涉圖樣就會發生改變，由此觀測到重力波的作用。這只是使用激光干涉儀測量重力波的基本原理，真實使用中的干涉儀需要大量的技術設計來提升準確度及降低雜訊。除激光干涉外，將來科學家亦會使用其他原理的探測方法測量不同頻段的重力波。



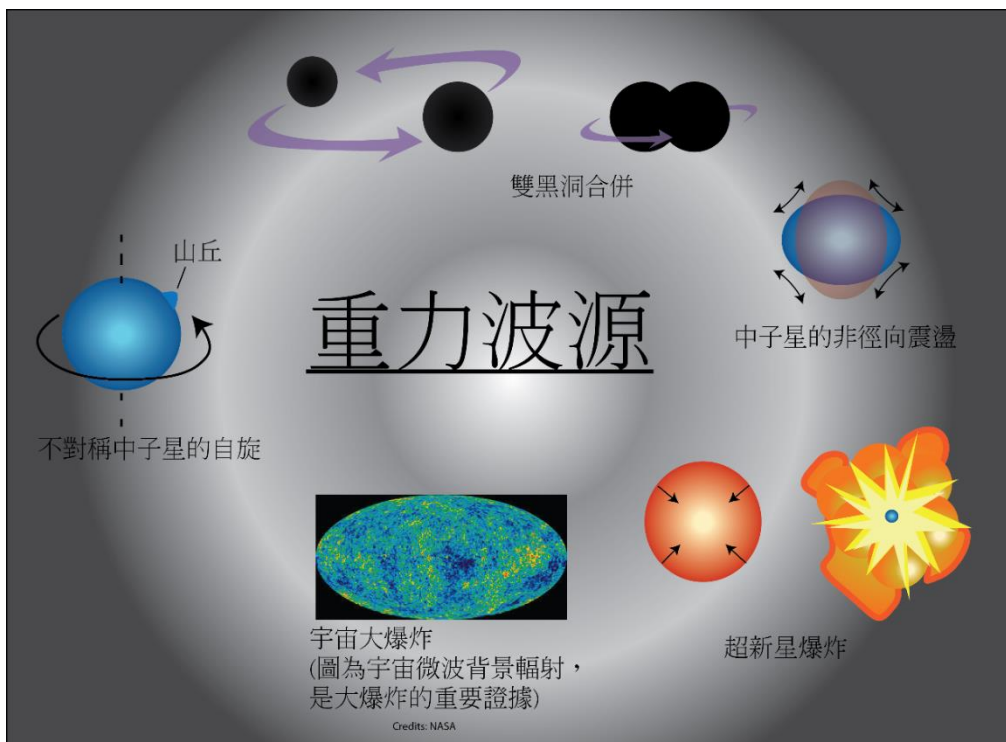
圖九: 基礎的激光干涉儀，兩臂的長度改變會影響光束干涉的圖樣

重力波源

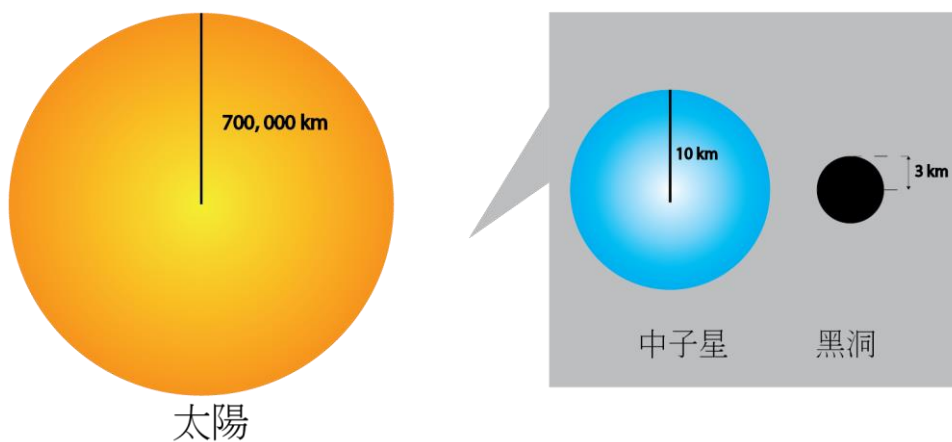
重力波極其微弱，因此測量重力波非常困難，且需求的精準度極高。同時，重力波的源頭必須是擁有龐大質量或能量且密度極高的天體，當這些天體發生極端的物理過程時，才有望產生出探測到的重力波。這類現象包括：雙緻密星的合併（如雙黑洞合併、雙中子星合併或中子星黑洞合併）、重力塌縮導致的爆發（如超新星爆發）、不對稱中子星的自旋、緻密星的非徑向震盪、宇宙大爆炸。至今 LIGO 測量到的。圖十列出部份重力波源的例子，圖十一則展示太陽及同等質量的緻密星的大小對比。現今測量到的重力波¹⁹都來自雙緻密星的合併，包括五次雙黑洞合併及一次雙中子星合併。

¹⁸ 重力波改變了兩臂的固有長度(proper length)，光束本身的速度維持不變，因此通過兩臂的所需時間就會發生改變，兩條光束的相位(phase)亦隨之變動，影響干涉圖樣。

¹⁹ 本文撰寫於 2017 年 12 月，當時已紀錄的重力波信號有七個，其中一個因為統計顯著性不足而不被認定為確實的重力波信號



圖十：部份重力波源



圖十一：太陽跟同等質量的緻密星的大小對比