

## [ 研究新領域報導 ]

## 重力波天文學：一個新的前瞻研究領域

國家理論科學研究中心 朱創新主任

縱觀歷史，人類都是倚賴光來觀察探索這個宇宙。最近隨著 LIGO 探測器的出現，人類開始有了一個全新且強大的工具來使用重力波探索宇宙。重力波攜帶有關於物體運動的信息，而且因為它比光更不容易有交互作用，所以它可以攜帶來自宇宙更遠地區的未受阻擋和未受影響的物理信息。重力波天文學相關研究顯然是天文物理與理論物理未來發展的重要方向，也得到國家理論科學研究中心（物理組）的全力支持。

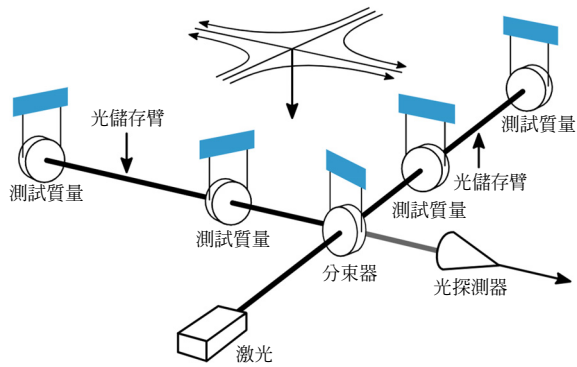
## 一、重力波的簡介[1]

在牛頓所發展出的重力理論中，重力被描述為在有質量的物體之間，不需要接觸即可發生的交互作用，被稱為遠距離的交互作用，或者等同於這個作用力的傳播速度是無限快的。因此，根據牛頓的重力理論，當有質量的物體在某個時間點改變位置時，整個宇宙中的重力場也會瞬間變化，並且其他物體所感受的重力也會立即改變。但是牛頓這樣的重力理論其實與愛因斯坦的相對性原理不相容，因為後者證實所有的資訊傳遞速度不可能超過光速。這也就帶來牛頓的重力理論需要如何符合愛因斯坦的相對論原理的問題。在經過將近十年的努力後，愛因斯坦於 1916 年發表他著名的重力理論，在他新的重力理論中，重力被理解為一種時空變形的一種展現，而非過往所認為的一種單純的作用力。因此，廣義相對論也就預言引力場的變化將會同樣的以光速穿越宇宙，而這些重力場的變化正是所謂的重力波。

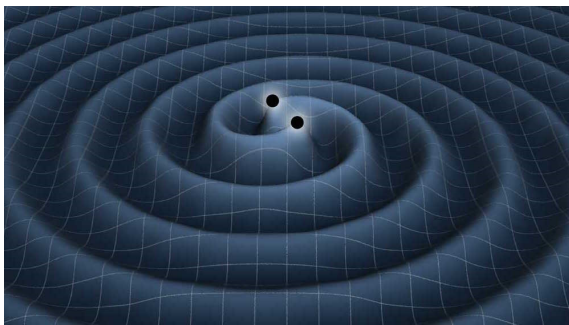
簡單來說，重力波是由移動有質量的物理所產生的，就像電磁波是通過移動電荷所產生的。但是因為重力是四種基本力量中最弱的一種（其他三種分別是電磁力，弱作用力和強作用力），所以重力波的效應非常小，使得觀察

或測量非常困難。雖然愛因斯坦早在 1916 年預測了引力波，但它是大約在 60 年後才證實其存在。首先，天文學家於在 1967 年底，從旋轉的中子星中發現了無線電脈衝。這些“脈衝星”是宇宙中最好的自然鐘，因為其週期非常精確且固定，幾乎不會隨時間變化。此後天文學家拉塞爾·赫爾斯(Russell Hulse)與約瑟夫·泰勒(Joseph Hooton Taylor)又於 1974 年互繞旋轉的脈衝雙星系統，也就是一個脈衝星與另一個中子星互繞。這雙星的軌道運動之所以重要乃是因為，根據愛因斯坦的重力理論，重力波會將能量帶離這樣快速運動的雙星系統，以至於使其彼此的距離越來越短，所以雙星的軌道運動週期已應該會逐漸變小，而這正好就可以藉由測量其脈衝星的週期變化而得到。1981 年，雙中子星系統的環繞周期衰減被精確的測量，其大小在一個微小的誤差範圍內與愛因斯坦的理論完全一致，這個發現因此得到 1993 年的諾貝爾物理獎。

雖然脈衝雙星系統提供了重力波存在的明確證據，但畢竟只是間接的觀測。最近美國的雷射干涉儀引力波觀測台(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)就發表了用探測器直接觀察到重力波的訊號。LIGO 是目前最大的重力波探測器，有兩隻臂長達 4 公里的干涉儀（見圖一）。LIGO 的雷射干涉測量法可以檢測引力波產生的位移大約為 10-18 公尺，甚至比質子的直徑還要小 1000 倍。這種強度的波動一定會是透過非常大的加速度系統才能產生。例如 GW150914 這個事件，是 2015 年 9 月 14 日所觀測到一對黑洞的碰撞（如圖二），並且於 2016 年 2 月 11 日作最後的確認。由於這樣的系統很少見，從這些重力波觀測中所提取資訊將提供有關這些系統寶貴物理信息。



圖一 LIGO 雷射干涉儀引力波觀測台示意圖



圖二 螺旋黑洞碰撞所產生的重力波

## 二、重力波研究的潛力

重力波最重要的應用之一是打開宇宙新的觀測方式。過去大多數天文學都依賴於不同形式的電磁輻射（可見光，無線電波，X 射線等），但這些電磁波很容易被來源和我們之間的任何物質反射和吸收。從另一方面來說，由於重力彼此間的交互作用非常弱，因此對於絕大部分的星體而言，重力波幾乎是透明的。因此，通過使用重力波，人們可以觀察到那些可能會被遮擋的天體物理對象。他還開關了一個新的方式來觀察一些內部沒有產生光的恆星形成機制。因此重力波天文學 (Gravitational Astronomy) 已經成爲一種非常值得期待的前瞻性物理研究領域，有助於探索物理學中的一些重要問題：例如，黑洞是如何形成的？早期宇宙是否是能以暴漲(inflation)的方式描述？在中子星和超新星的極端溫度和壓力下，物質的性質會是如何？等等。這是令人興奮的方向。

## 三、國家理論科學研究中心相關的研究工作

這研究方向的重要性也已經爲國家理論科

學研究中心物理組（以下簡稱理論中心）所確認。理論中心的科學家已經從許多角度來探索重力波的物理。例如，朱創新主任與理論中心的博士後小山陽次博士已經研究游於重力震波 (gravitational shock wave) 而造成的黑洞動力學，而且發現量子霍金輻射與這個重力震波有一個簡單的相關性[2]。最近他們也研究重力波在彎曲時空（如 deSitter 或 Anti deSitter 時空）中的重力記憶效應(gravitational memory)。不同於在平坦時空中的重力波，在彎曲時空中有可能會有尾引力波（tail wave, 以低於光速的速度傳播的引力波）以及從時空邊界反射的可能性[3]。這種效果對於彎曲的時空而言是非常新穎和獨特的。

除了以上的研究以外，理論中心亦在培養相關領域的發展方向有一些貢獻。大約 2 年多前，一群由國立台灣師範大學林豐利教授所領導的研究群已經在理論中心的邀請下組建種子研究小組，主要在作重力波研究和相關的數據分析。該小組已經有很好的研究成果，也已經正式參加進入日本 KAGRA 的重力波觀測台。

由於這方面研究的重要性，理論中心決定繼續強力支持與重力波相關的基礎研究。由林教授領導的小組最近被提升爲理論中心的實驗合作研究群，專注在重力波與新官數值分析的研究。此外，理論中心還有另一個設立一個種子研究群，研究多信使天文物理學 (Multimessenger Astrophysics)，由國立清華大學的潘國銓教授所領導，主要是研究除了傳統多波段的光以外，也包括重力波，微中子，宇宙射線等其它類型的天文信號的綜合天文觀測。此外，理論中心正與中央研究院一起規劃在十月份有一個國際重力波物理學校，可以預期其學員將會成爲下一代的重力波物理學研究的專家。

## 參考文獻

- [1] M. Coleman Miller and N. Yunes, "The new frontier of gravitational waves," *Nature* 568, 469 (2019).
- [2] C. S. Chu and Y. Koyama, "Soft Hair of Dynamical Black Hole and Hawking Radiation," *JHEP* 1804, 56 (2018).
- [3] C. S. Chu and Y. Koyama, "Memory Effect in Anti-de Sitter Spacetime," arXiv: 1906.09361, submitted to *JHEP*.