

## C. 重力波在天文學上的應用

### 重力波天文學



位於漢福德的雷射干涉重力波天文台 (credit: LIGO)

重力波的成功測量是天文學的一大突破。自遠古時代起，人類已經開始透過觀察夜空認識宇宙，用最直接的方法--可見光--觀看星空萬象，隨著科學與科技的發展，現今的天文學家利用不同頻段區域的電磁波，包括伽瑪射線、X 射線、紅外線、無線電波等觀察宇宙，在不同頻段下，宇宙呈現著不同的形態，這使得人類眼中的宇宙越來越豐富。重力波的本質與電磁波截然不同，這意味著重力波的測量可讓我們「看」到所有頻段的電磁波以外的天文現象，提供一套全新的觀測宇宙的頻段，例如 LIGO 首次直接測量到的重力波信號 GW150914，同時也是首次直接測量雙黑洞合併，由於黑洞不會發出電磁波，重力波成為唯一直接觀察黑洞的工具。隨著重力波天文台的儀器不斷升級，科學家預期可收集到大量關於黑洞的數據，這有助於研究不同類型的黑洞，例如原始黑洞 (primordial black holes)<sup>20</sup>，有理論指原始黑洞是暗物質<sup>21</sup>的一部份，因此重力波的測量亦可能增加我們對暗物質的認知。

另外，科學家可以從重力波信號中獲取重力波源跟地球相差的距離，這提供了一個測量星系距離的新方法。當將來收集到更多重力波信號，這些星系距離的數據可用於計算宇宙學的哈勃常數(Hubble's constant)。哈勃常數是哈勃定律<sup>22</sup>中

---

<sup>20</sup> 原始黑洞的假設由史蒂芬·霍金(Stephen Hawking)提出，由宇宙大爆炸時物質分佈不均勻而生成，現時尚未有直接證據支持它們的存在

<sup>21</sup> 以現時的認知，宇宙的質量及能量可分為暗能量、暗物質及正常物質，正常物質只佔約 5%，暗物質則佔約 25%，而暗能量佔約 70%。暗物質不發出任何電磁波，現時科學家只能以間接的方法知道它的存在，而它的本質卻仍未確定，它是現時宇宙學及天文學的重要研究課題之一。暗能量雖佔質量及能量的大部份，但它的性質不明，是用以解釋宇宙的加速膨脹的一種假設性能量

<sup>22</sup> 哈勃定律以觀測為根據，表明所有方向的星系都在遠離地球，而且遠離的速度都與它們跟地球的距離成正比，即是距離越遙遠的星系遠離地球的速度越快，為宇宙膨脹的理論奠定基礎

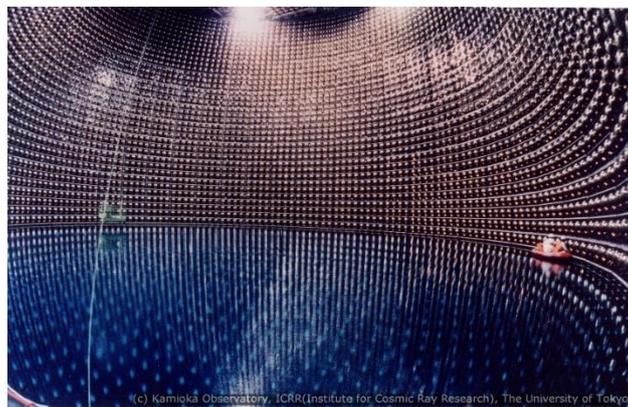
的一個重要數字，是星系遠離地球的速度與它們跟地球的距離之間的比率，亦即是現時宇宙膨脹的速度。

重力波信號在測試廣義相對論的準確性上亦有重大作用。廣義相對論是重力的理論，它在弱力場<sup>23</sup>的範圍通過了重重測試，與觀測結果十分吻合，因而取代了牛頓力學的萬有引力理論，但其實現時並未有足夠多對廣義相對論在強力場下的測試，同時物理學界亦存在不少可能取替廣義相對論的重力理論，它們在弱力場下與廣義相對論一致，但在強力場下開始分歧，因此廣義相對論在強力場下是否準確仍然是一個疑問。對於來源自高密度天體的重力波信號，計算模擬信號需要使用強力場範圍下的重力理論，科學家可透過對比測量到的信號和使用廣義相對論計算出的模擬信號，測試強力場下廣義相對論的準確性。

除此之外，重力波源之一的緻密星--例如中子星，這類星體有著極高密度，一湯匙的中子星物質的質量已高達一億噸，研究來自緻密星的重力波信號亦有助科學家了解物質在這些環境下的性質。

## 多元信息天文學

自十八至十九世紀以來，天文學家開始利用可見光以外頻段的電磁波觀察宇宙，衍生出紅外線天文學、無線電波天文學、X射線天文學及伽瑪射線天文學，這些電磁波天文學研究帶來了許多重大發現，例如我們所處的銀河系的存在，以至銀河系以外的其他星系，及宇宙的加速膨脹等。



超級神岡中微子探測器內部(credit: ICRR, University of Tokyo)

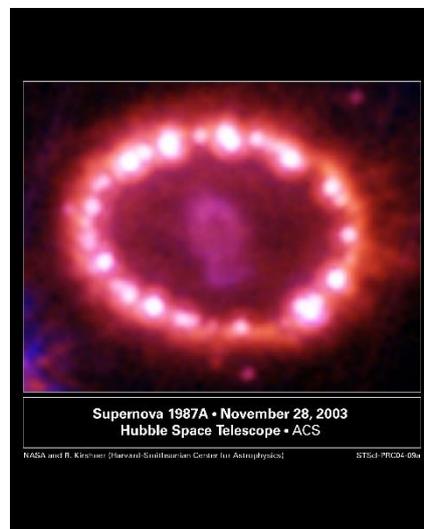
除了上述的電磁波及重力波外，科學家亦使用中微子觀察宇宙，發展出中微子

---

<sup>23</sup> 這裡提到的弱力場，指的是時空曲率不高的情況，反之，強力場則是時空曲率高的情況，一個天體造成的時空曲率大致與其緊湊度 (compactness)  $C$  相關， $C$  是一個無量綱 (dimensionless) 的參數，它正比於天體的質量除以半徑，它的數值越大則時空的曲率越高，比如太陽系表面的  $C$  約為 0.000002，屬於弱力場範圍，而中子星表面的  $C$  約 0.1 至 0.3 之間，則可歸類於強力場範圍

天文學。中微子是其中一類基本粒子，它們只透過萬有引力及弱作用力<sup>24</sup>跟其它物質相互作用，這些作用力遠弱於電磁力，因此中微子很難被探測到，但同時不容易被阻礙。中微子主要來自核反應，比如恆星內的核聚變能產生出大量的中微子，實際上大量源自太陽的中微子一直像幽靈般不斷穿過地球。中微子天文學尚處於襁褓，目前確認觀測到來自地球外的中微子源只有太陽及超新星 SN 1987A。

2017 年 8 月 17 日，LIGO 首次測量到來自雙中子星合併的重力波信號 GW170817，同時，世界各地的天文望遠鏡亦相繼探測到來自同一方向的短伽馬射線暴及其餘輝所發出的不同頻段的電磁波信號，這次多個觀測團隊合作的成功測量是多元信息天文學(multi-messenger astronomy)的一大突破。



圖十：哈勃望遠鏡所攝的 SN 1987A 照片 (2003 年)  
(Credit: NASA)

另一多元信息天文學的例子則是 1987 年偵測到的超新星 SN 1987A，當時超新星的電磁波信號首先被光學望遠鏡觀測到，及後中微子天文台 Kamiokande-II、IMB、Baksa 分別觀測到其發出的中微子信號。

多元信息天文學將為宇宙的面貌揭開一層又一層的神秘面紗，在電磁波、重力波及中微子天文學互相配合下，以往難以觀測或根本觀測不到的天文現象，將一一呈現在人類眼前，這為人類對宇宙的認識帶來前所未有的快速增長。

---

<sup>24</sup> 弱作用力是自然界的四種基礎相互作用力之一，其餘分別是重力、電磁力及強作用力，弱作用力是次原子粒子(subatomic particles)的一種相互作用，可引發放射性衰變，它的作用距離非常短