

# 中子雙星的死亡之舞

## 一 中子雙星的發現

中子星是重恆星演化末期的產物：質量超過太陽大約8倍的恆星在燃燒完可以釋放能量的內部核燃料之後<sup>①</sup>，就會塌縮、內向爆炸、然後「射脫」(eject)外殼，遺留下來的核心部分則成為中子星或者黑洞，這就是所謂「超新星」(supernova)現象。由於中子星是經過極其猛烈的超新星爆炸形成(其時它的發光量可以超過整個星雲，有如一顆明亮新星突然出現，「超新星」之名即由此而來)，所以我們向來認為，不可能有由中子星組成的「雙星」系統，即「中子雙星」(neutron star binary)，因為產生那兩顆中子星的任何一次超新星爆炸，都會把另一顆星推射到遠方，從而完全破壞其原有的重力束縛系統。

意想不到的事：中子星雙星是存在的。20年前泰勒(Joseph H. Taylor)和胡斯(Russell A. Hulse)發現了圍繞另一顆伴星運行的中子星 PSR1913+16，並且從它所發出的無線電脈衝的頻率變化非常準確地測定了兩者的質量、速度和運行軌道，從而推斷 PSR1913+16 極為細小的伴星必然也是一顆中子星。尤其令人興奮的是，這兩顆中子星在彼此強大重力場中的運動狀況，竟然與愛因斯坦廣義相對論的各種計算完全吻合，不差毫釐！而且，兩顆迴旋運轉的中子星之間的距離正在以每年數米的速率逐漸減少，從而證實它們在發出強大的重大波 (gravitational wave，這是由於重力場的改變而產生的波動現象)，波的能量，便是從二者因接近而釋出的勢能而來。這可以說是重力波存在的首個(雖然只是間接的)實際證據。泰勒

和胡斯因此而獲得了1993年的諾貝爾物理學獎。

中子雙星系統的發現對所謂「重力天文學」有重大意義：它從前只不過是一種擬想，一種期望，現在卻已經站到逐步實現的起點上了。

所謂「重力天文學」，簡單地說，就是通過重力波觀測去了解天文現象，特別是牽涉質量巨大但尺度異常細小的「塌縮體」(collapsed objects，即黑洞、中子星、白矮星等等)的現象。由於這類天體本身很小，一般只有十數至數千公里直徑，而周圍又往往為重重雲氣包圍，所以通過電磁波直接觀測極為困難，甚至根本不可能(PSR1913+16 可說是幸運的例外)。然而，積聚在細小空間的巨大質量會產生極強烈重力場，由是它們的急速運動也必然產生強大的重力波，那是任何雲氣所不能掩蓋的。因此，重力天文學又可說是塌縮體的天文學。但重力天文學的實現有兩個前提：第一，是必須先對產生重力波的實際機制有詳細和確切了解；第二，由於重力波極其微弱，所以必須發展能夠直接探測重力波的大型精密設備。

## 二 臨終的閃爍

中子雙星系統的發現初次提供了一個確切的巨大重力波產生機制，因為系統中的中子星不斷喪失勢能而循內向螺軌(inspiral)接近，至終必然互相接觸，並可能融合成為黑洞。在這最後融合的猛烈過程中，就會發出十分強烈，

而且其特性可以預測的重力波。由美國和以色列一組天文物理學家所作的詳細計算顯示，中子雙星系統融合之前最後15分鐘是最關鍵而戲劇性的：雙星之間的距離從700公里一下子減到數十公里，公轉頻率從每秒5周增加到數百周，由於彼此起潮力的作用，大量星內質量被拉出星外，形成扁平的集積碟(accretion disk)，同時兩星之間相當一部分重力勢能轉換成重力波發射到太空。最後，在不到1秒的時間之內，兩星相觸，迅速融合成黑洞<sup>②</sup>，洞外的集積碟也在數秒鐘之內重新被吸入洞中。這樣，經過劇烈而短暫的「死亡之舞」，中子雙星系統會完全消失，只剩下一個沉寂的黑洞。

這純理論計算最少有一點已經得到了驗證。在中子雙星碰撞和融合的剎那，它們內部溫度會迅速上升到數十億度，從而產生大量中微子  $\nu$  和反中微子  $\bar{\nu}$  對，這兩者有千分之一左右的機會通過對撞而產生電子  $e^-$  和正電子  $e^+$  對，後兩者又會對撞、湮沒(annihilate)而產生一定能量(大約是50萬電子伏)的高能光子(即  $\gamma$  射線)，飛散到太空遠方<sup>③</sup>：

$$\nu\bar{\nu} \rightarrow e^-e^+ \rightarrow 2\gamma$$

奇妙的是：中子雙星系統在臨終剎那所發出的這些短暫閃爍，早在60年代就已經無意中為人類探測到了。原因是當時美蘇締結了有限度禁止核試條約，為了監察利用太空核試作弊，美國國防部曾放出多個人造衛星探測核爆所產生的短暫X-光和  $\gamma$  射線脈衝。這些衛星始終沒有探測到核爆，然而卻不斷地發現從太陽系以外飛來，歷時從數十毫秒至數十秒的  $\gamma$  射線爆發(outburst)。

從70年代開始，對這些  $\gamma$  射線的來源就眾議紛紜，有上百種不同說法。直到1991年春季康普頓(Compton)號  $\gamma$  射線太空探測船升空，對這些神秘的  $\gamma$  爆發提供了前所未有的精確數

據，它的性質才逐漸得以大白。首先，無論從爆發的方向或強度分布來看，它們顯然都不是太陽系附近甚至銀河系以內的事件，而是來自遙遠的太空深處，即數億光年以外的其他星雲。其次，來自遠方星雲的  $\gamma$  射線應該有三個效應：由於宇宙膨脹，所以遠方星雲在迅速後退(事實上，後退速度與距離成正比，這就是哈勃定律)，因此從地球看，由之而來的射線爆發時段會延長，能量也會降低；並且，由於距離遙遠，所以射線強度也會相應減弱。以上三個效應是緊密地以一定數學形式相關連的，而它們現在已經完全由觀測數據加以詳細證實了。

最後，從有關X-光雙星的研究，可以估計每個星雲大約有30,000個中子雙星系統，它們平均要經過  $10^{10}$  年才會融合毀滅，所以整個宇宙(它一共有  $10^{10}$  星雲)之中每年平均大約有30,000次(相當於每20分鐘一次)中子雙星的融合，這其中估計約有3%亦即約1,000次是距離不太遙遠，可以為「康普頓號」探測到的。驚人的是，這恰恰也正是實際上探測得到的數目！

### 三 重力波的探測

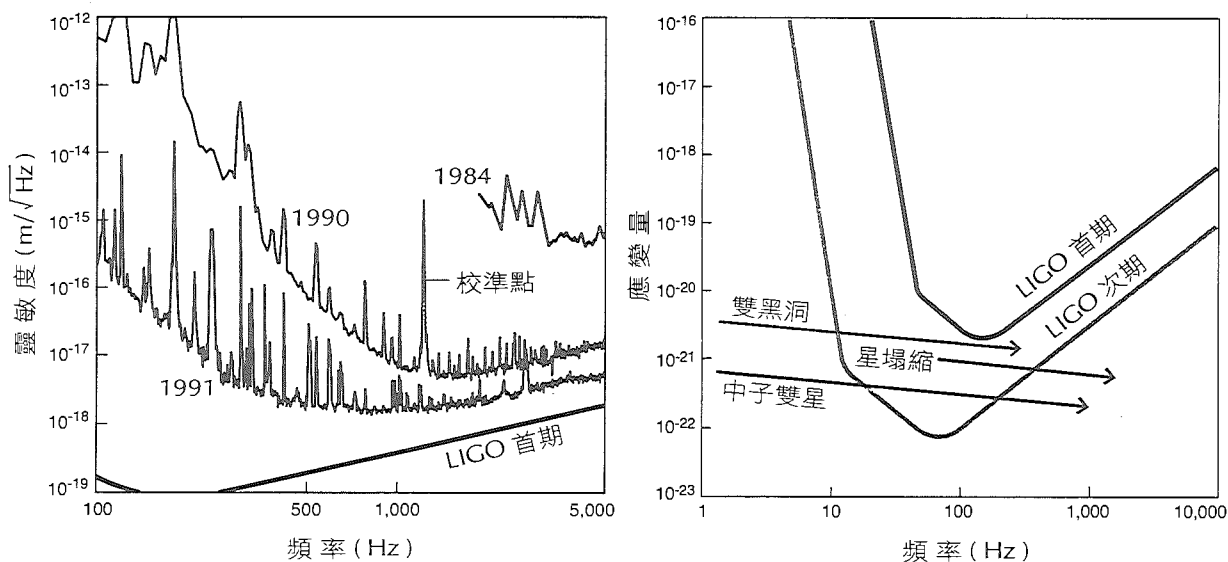
從天外傳來的這些短暫閃爍，可知廣大宇宙中不斷有中子雙星璀璨壯觀的死亡。問題是：它臨終時所發出的重力波，也同樣可以探測到嗎？原理上，重力波和電磁波相似：後者是波動變化的電場和磁場，它碰到電荷，就會令其振動和感受壓力，從而產生電流；同樣，前者也只不過是波動變化的重力場，它碰到質量，也會令其感受壓力和振動，從這振動，就可以探測重力波的存在。

困難之處在於：電磁作用的強度是重力作用的 $10^{42}$ 倍左右，所以即使是極強烈的重力波，其效應也還極端微弱，至今以最精密的儀器都還未能探測到它的存在。其實，早在60年代初，馬里蘭大學的韋伯(Joseph Weber)就已經開始用長達3至4米，重數十噸的巨大鋁棒作為應變質量，用黏附其上的百餘塊壓電體作為探測器，希冀從測定鋁棒在感受重力波時產生的微小伸縮而證明重力波的存在了。可是由於這種效應委實太微弱(棒的伸縮只會達到原子核直徑的百萬分之一左右!!)，而探測器本身量子噪音對其靈敏度的限制又未充分預計，所以經過數十年努力，這個大膽嘗試始終還未產生切實成果。

到了80年代，我們對產生重力波的事件，例如中子雙星、中子—黑洞和雙黑洞等系統的融合過程已經有更深入了解，對在廣袤空間傳播的重力波脈衝的出現頻率、強度、時段、波頻等特性的統計分布也可以更確切估計，因

此，很自然地，更龐大、精密的重力波探測計劃也隨之展開④。這些計劃的基本概念是利用巨大的、長達數公里的激光干涉儀來探測重力波所引起的長度變化。由於干涉儀中的鏡距比韋伯的鉛塊長1,000倍，而激光干涉條紋的移動也比壓電晶體反應更靈敏，所以這新努力預計是有希望捕捉到重力波的蹤迹的——當然，它所需要的資源，也遠較以前龐大，雖然比起超級加速器來，也還算是便宜的了。

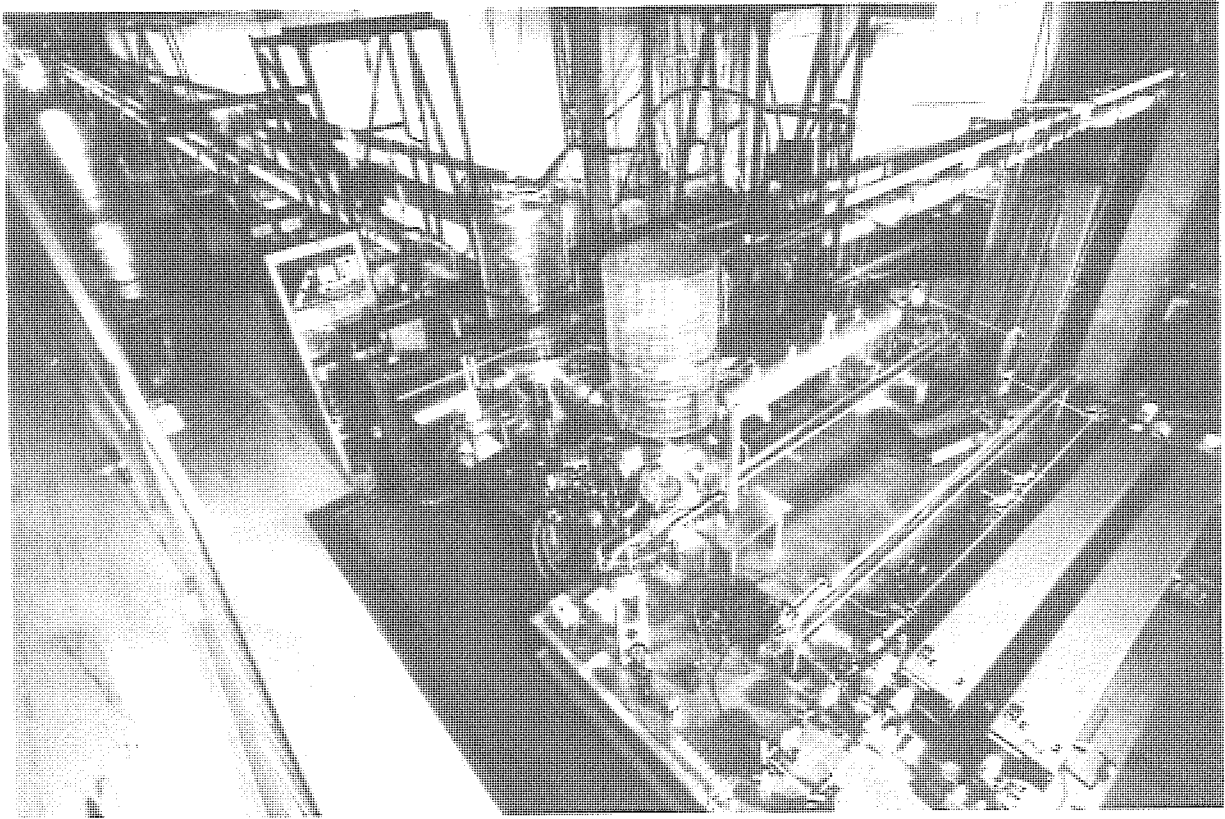
數年前，加州理工學院已經研製成一台長40米的重力波探測器原型，而現在美國已經正式動工興建命名為LIGO的第一代重力波激光干涉觀測台⑤，預期在本世紀末就可以初步落成，並且接收到重力波。此外，歐洲也在建造一座命名為VIRGO的相類觀測台，甚至日本也都在急起直追。看來，今後數年間天文學就將開啟又一扇新的窗口，為我們展示一個前所未有的宇宙，在這宇宙中，中子星和黑洞的誕生、融合、死亡，都是普遍的自然現象。



據 *Sc. Am.* 266, no. 3, 79 (March 1992) 圖。

圖1 (甲) 加州理工學院40米激光干涉儀的靈敏度在過去近10年的改進。縱軸的靈敏度是可測位移(以米為單位)除以波頻的平方根。

(乙) LIGO首期和次期設備的預計應變探測能力：圖中直線所示，是幾種融合/爆炸事件所會產生的重力波效應的估計。



Courtesy LIGO Project, California Institute of Technology.

圖2 加州理工學院40米干涉儀原型(攝於1989)的照片。照片中向左上和右上角伸延的長管是干涉儀兩臂的真空激光管，前方的籠罩內是激光產生器和耦合器。

### 參考資料

本報導主要根據下列兩篇文章：

- (1) Tsvi Piran: "Binary Neutron Stars", *Sc. Am.* (May 1995), p. 34.
- (2) Russell Ruthen: "Catching the Wave", *Sc. Am.* (March 1992), p. 72.
- (3) B.E. Schaefer: "Gamma-Ray Bursters", *Sc. Am.* (February 1985), p. 40.
- (4) N. Gehrels et. al.: "The Compton Gamma Ray Observatory", *Sc. Am.* (December 1993), p. 38.

此外，下列資料也有直接參考價值：

Edward van den Heuvel and Jan van Paradijs: "X-Ray Binaries", *Sc. Am.*(November 1993), p. 38.  
 Kip Thorne: *Black Holes and Time Warps* (New York: Norton, 1994), ch. 10.

### 註釋

- ① 原子序超過鐵的重核雖然「可燃」，但在核反應中是吸熱而不是釋熱的。
- ② 中子星質量的上限是太陽質量的1.4至2.0倍左右，兩顆中子星融合之後質量一般會超過這上限，因此會再塌縮成黑洞。
- ③ 兩顆中子星融合時所形成的集積碟在被重新吸入黑洞之前也可以與中子星的強大磁場作用而產生高能 $\gamma$ 射線。
- ④ 重力波的來源，最能確切估計的是：第一，由超新星爆炸所引起；第二，由塌縮體組成的雙星系統在融合時的爆發。除此之外，亦有人推測在宇宙形成之初也會產生瀰漫於所有空間的「黑體輻射」式的重力波。
- ⑤ LIGO的全名是Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory，它基本上是由加州理工學院主導的一個龐大計劃。