

上世紀的天文物理學家曾花了很多時間研究一個問題，就是當恆星核心的燃料耗盡後停止製造熱能，物質是否仍可以抗衡重力，避過被自己的重力壓縮至無限細小的厄運？這個問題關乎所有恆星的歸宿，自然在科學界引起廣泛興趣[Tho94]。出人意料地，這個重要問題的部份答案，卻由一個當年籍籍無名的印度少年首先提出！他就是**陳德拉錫加(Chandrasekha Subrahmanyan)**。要明白他的答案，我們首先需瞭解一群電子被壓的反應。

廿世紀物理學最重要的成就之一，就是發現所有物質都有量子的特性[Fey65c,Gui68,Wol89]。**量子力學(Quantum Mechanics)**並不是容易理解和掌握的；我們當然亦不能在此花上大量篇幅去闡述這學說。我們只能套用量子力學的一個結果，以說明**電子簡併壓力[Sha83] (electron degeneracy pressure)**的由來。根據量子力學，電子在原子內只能有特定的能量，稱為**能階(energy levels)** [Fey65c,Gui68,Wol89]，而每一能階只容許有限數目的電子。例如氫原子的最低能階(稱為1s)只容納兩顆電子。換言之，若我們硬要把第三顆電子擠進來，也不能把它安置在已「滿座」的能階，而只能找一個未滿的。一般而言，物質都會自我安排往最低能量的結構，所以通常都先把低能量的能階先填滿。後加的電子便只好跳上較高而未滿的能階。低溫的一群電子便會把低能階完全填滿，成為所謂**簡併態(degenerate state)**。若果我們再把這堆電子壓縮，後果就是把其中一些電子趕往更高的能階，整個系統的能量自然增加。換句話說，我們要花很多能量才能夠把一群在簡併態的電子壓縮。這一股反抗壓縮的力，稱為**電子簡併壓力**。

6.1 白矮星

陳德拉錫加十八歲時由印度乘船到英國劍橋唸研究院，在船上推算出電子簡併壓力足夠可以抗衡大至一點四倍太陽質量的重力，維持星球的穩定[Sha83,Tho94]。一顆質量少於這個稱為**陳德拉錫加極限(Chandrasekha limit)**，即約一點四倍太陽質量，憑藉電子簡併壓力以平衡重力而達至穩定的星體，就叫做**白矮星(white dwarf)** [Sha83,Tho94]。

行星狀星雲中心垂死的星燒完它核心的核燃料後，便開始收縮，並且愈縮重力愈大，再加快收縮的速度，使星球的密度不斷升高。當密度到達約每立方公分一百萬克¹時，電子簡併壓力發揮作用，繼承氣體熱壓力對抗重力，形成白矮星(圖6-1)。

白矮星是非常奇特的星體。它們熾熱而細小，因而得名。它們的質量與太陽相若，卻只有地球般大小，所以密度非常高，而表面重力強大。一茶匙白矮星物質約重十五噸，表面重力約地球的十萬倍。最著名的例子是天狼星B伴星，根據觀測所得，它約有一個太陽質量，半徑為地球百分之七十六，表面溫度約三萬二千度，密度約為每立方公分三百萬克。白矮星已再不會產生能量，只緩慢地輻射餘溫。再過約一百億年

¹ 即水密度的一百萬倍。

之後就變得非常冰冷和暗淡，最後不再發光成為**黑矮星(black dwarf)**，寂靜地在太空中漂浮，算是安靜的「死亡」。

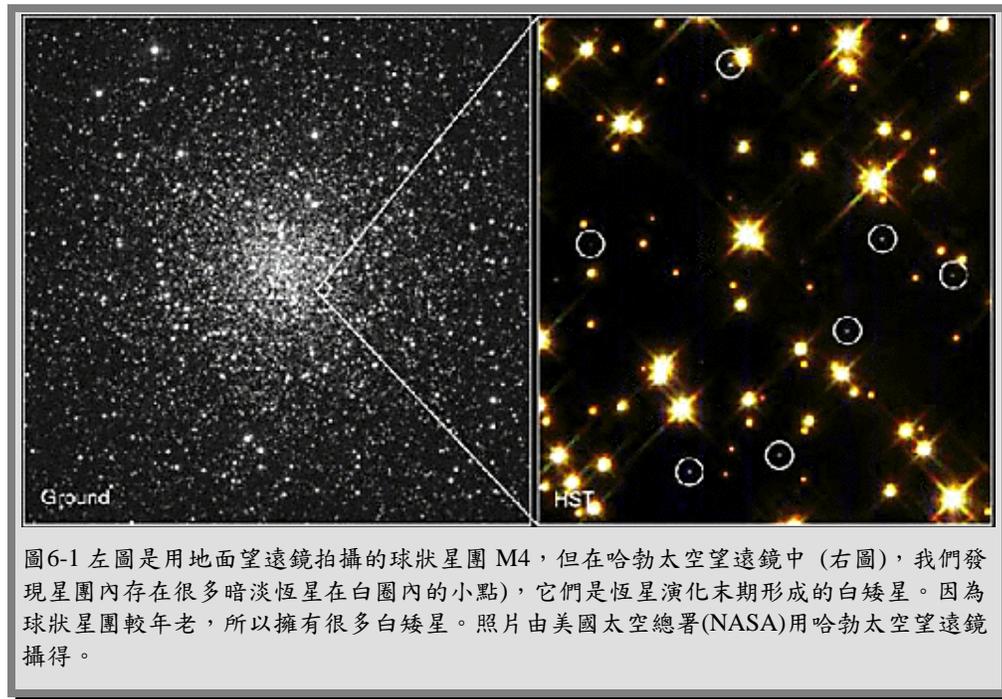


圖6-1 左圖是用地面望遠鏡拍攝的球狀星團 M4，但在哈勃太空望遠鏡中（右圖），我們發現星團內存在很多暗淡恆星在白圈內的小點），它們是恆星演化末期形成的白矮星。因為球狀星團較年老，所以擁有很多白矮星。照片由美國太空總署(NASA)用哈勃太空望遠鏡攝得。

陳德拉錫加的理論，「挽救」了質量不太大的恆星，死後成為白矮星而不至於被重力無限壓縮。但即使電子簡併壓力，亦只能抵受最多一點四倍太陽質量。若星球質量再大一些，白矮星也不穩定。除了電子簡併壓力，是否還有其他力量抗衡重力？答案在一九三二年中子被發現後很快便出現，就是**中子簡併壓力(neutron degeneracy pressure)**。天文物理學家理論上預測了一種大部份由中子組成的星體，稱為**中子星(neutron stars)**。不過，即使中子星質量亦不會太大；若果星球質量達到約三倍太陽質量或以上，那重力將無敵！星球最終塌縮成一個**黑洞(black hole)**。本章介紹這兩種奇特星體的性質[Sha83,Tho94]。

6.2 中子星的特徵

如第十章所述，中子就像彈珠，當被擠壓至互相碰觸到時，就產生很大的斥力，抗拒被壓。若星球質量不太大，那麼中子的簡併壓力可以支持著星球物質，維持穩定，成為一顆中子星。

我們熟悉的物質都由原子組成，而原子含電子及原子核。原子核體積極細小，它的半徑只佔整顆原子的約一百萬份之一[Pre62]。所以若把一顆原子壓至原子核般大小，它的體積便大幅縮小。一顆典型的中子星質量約為太陽的一倍半，半徑卻

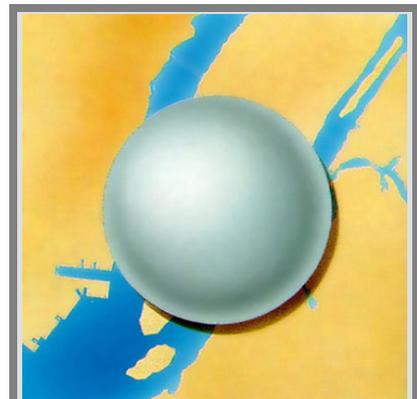


圖6-2 試想像把一顆典型的中子星放在曼克頓 (Manhattan) 上空比較大小。中子星只比地球上很多主要城市大一些。

只有幾十公里(圖6-2)，僅像地球上一個大城市般大小。因此中子星的密度極高($\sim 10^{14}$ - 10^{15} g/cc)，比水的密度高約幾百萬億倍！想像把整個香港的所有物質壓縮至一茶匙大小，才達到相若的密度。中子星質量比太陽大，但半徑那麼小，所以它的表面引力極強。一個人站在中子星表面上竟重達一百萬噸！當然任何人在這般強大的引力下都站不起來了。甚至地球上最堅硬的石頭也撐不起這麼大的重力，所有表面物體在本身的重量下塌陷。所以我們相信中子星的表面極之平滑，完全沒有任何山峰或甚至小丘。

中子星有極高的自轉速度，可達每秒旋轉數次至數千次之譜！這原因和溜冰者的例子一樣(圖6-3)，當溜冰者把雙手拉向自己身體，她的自旋便會加快。這現象在物理學上稱為**角動量守恆(conservation of angular momentum)**。它告訴我們，只要一顆恆星有自轉，它塌縮成中子星後的自旋速度必然大幅增加。因此，若我們把一天定義為星球自轉一週的時間，那麼中子星上的一天，只是地球上的幾份之一或甚至幾百份之一秒！中子星的週期非常穩定，可被量度至十七個小數位，準確性差可媲美原子鐘，是天文學上最準確的觀測數據，對於驗證一些關於中子星的理論非常重要。



圖6-3 角動量守恆定律的例子。溜冰者收縮身體時旋轉速度加快。

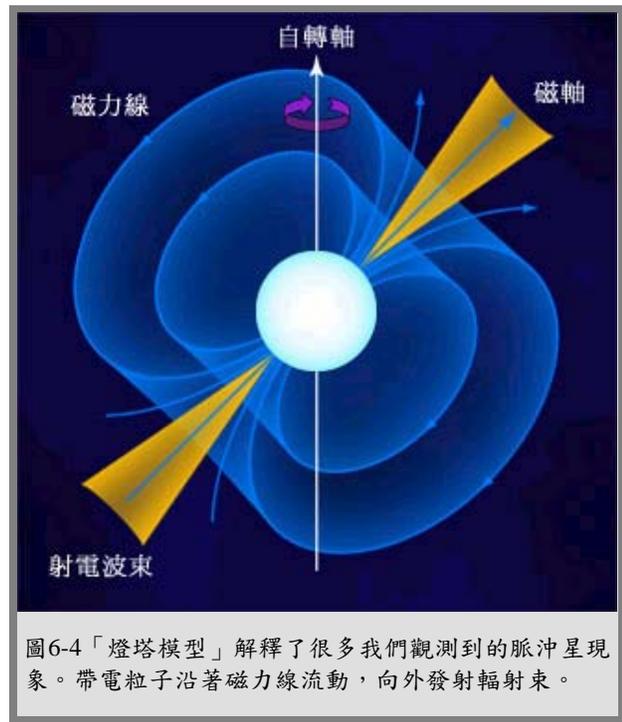


圖6-4「燈塔模型」解釋了很多我們觀測到的脈沖星現象。帶電粒子沿著磁力線流動，向外發射輻射束。

中子星另一奇特性質，是它的磁場極強，約為地球磁場的一萬億倍²。這原因亦和塌縮有關。磁場的強度可以磁力線的密度代表，而磁力線隨著星球收縮而被「緊束」一起，「濃縮」至極高密度，所以磁場強度被大幅提高。這個極強的磁場自中子星的磁北極伸延至磁南極(圖6-4)，而星球附近的帶電粒子便會沿著磁力線加速，發出輻射。因此，在磁極上空便會有很窄的輻射束，帶著由無線電波至X射線各種波長的輻射，自磁極向太空直射而出(圖6-4)。若星球自轉軸並不貫穿磁極，則星球的轉動便會把這兩個輻射束帶動掃向各方，就像燈塔上旋轉的射燈情形一樣(圖6-5)。所以這情況亦稱

² 地球表面的磁場為半高斯。

為**燈塔效應 (lighthouse effect)**[See99,Tho94]。若果地球剛在輻射束掃過的範圍，我們在地球上便會觀測到非常有規律及短促的脈沖。這種星體稱為**脈沖星 (pulsars)**[Lip92,Tho94]。第一顆被發現的脈沖星週期為1.3373019秒，由於訊號太規則了，天文學家甚至曾經懷疑它是外太空有智慧生物所發的哩！到今天，天文學家已發現上千顆脈沖星。其中最著名的例子，就是金牛座蟹狀星雲 (Crab Nebula, M1)內的脈沖星(圖6-6,7)。



圖6-5 中子星磁極「爆發」出來的電磁輻射束。中子星自轉時，輻射束就像燈塔的光束一樣，週期性地掃向四方漆黑的夜空。

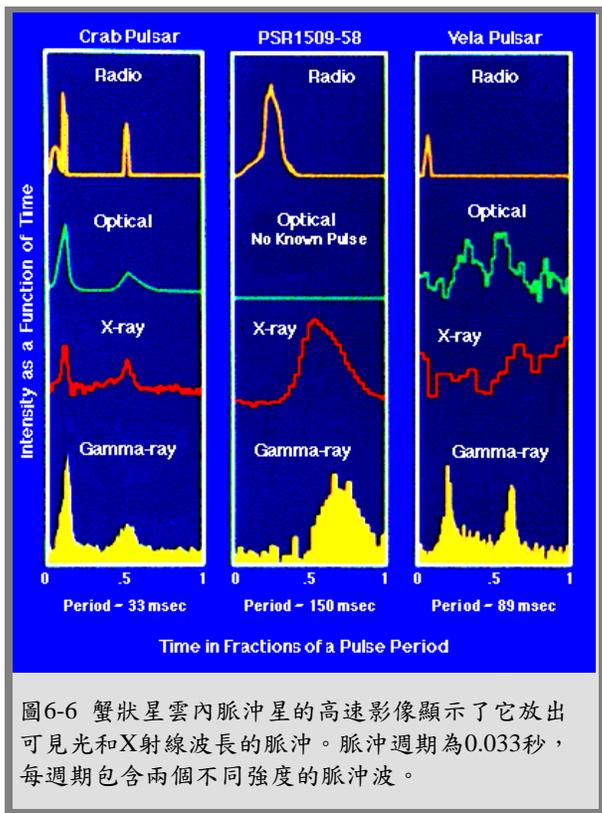


圖6-6 蟹狀星雲內脈沖星的高速影像顯示了它放出可見光和X射線波長的脈沖。脈沖週期為0.033秒，每週期包含兩個不同強度的脈沖波。

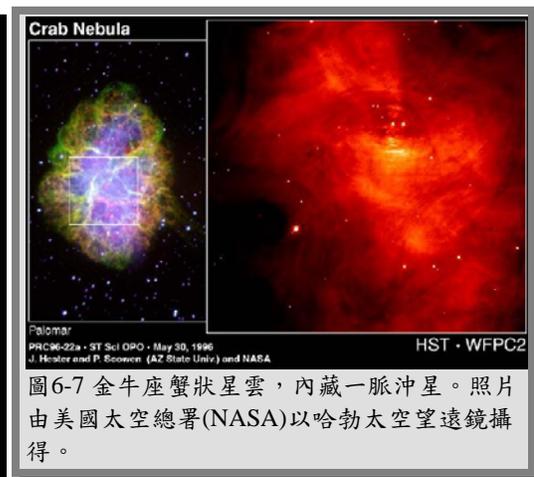
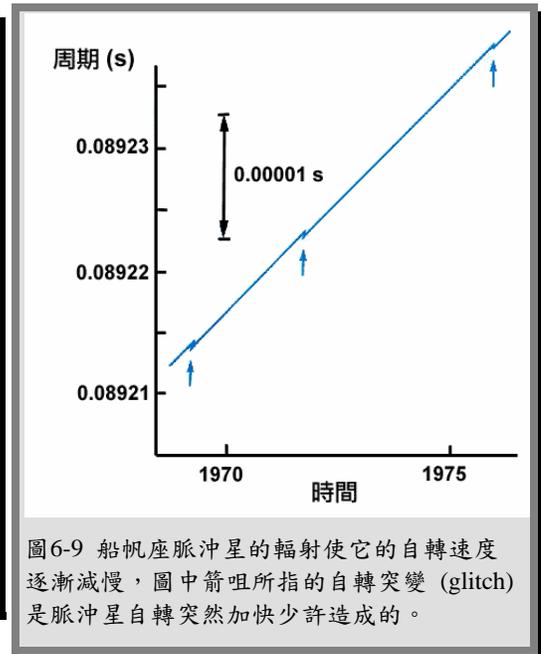
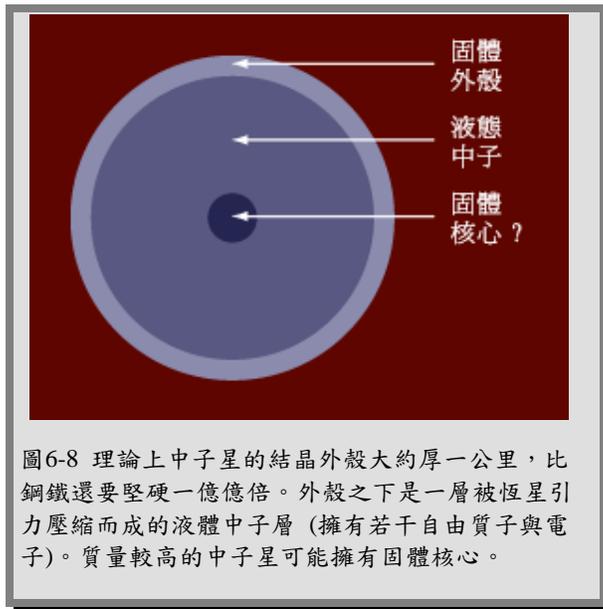


圖6-7 金牛座蟹狀星雲，內藏一脈沖星。照片由美國太空總署(NASA)以哈勃太空望遠鏡攝得。

中子星的結構當然是大異於普通恆星了。建構一個中子星的理論模型（圖6-8）最大的困難，是我們對於高密度物質的性質缺乏準確的理解[Gle97]。例如說，中子物質究竟可以支持幾大的質量，亦即中子星的質量上限，是取決於中子物質在不同密度下的壓力。但至今為止，我們都未能在實驗室內製造長期穩定的高密度中子物質，以作研究。而中子物質的理論模型計算卻非常複雜，且不同模型往往得出相異結果。所以中子星質量上限的估計，由一倍半至三倍太陽質量都有，莫衷一是。至於中子星內部的物質分佈等問題，就更難說得準了。

不過，大致而言，中子星的外殼應是由一層重原子核構成的堅固晶體，而它的內部則很可能有一層由中子、質子和電子構成的超流體(superfluid)[Gle97]。中子星亦可能有一個固體核心（圖6-8）。



脈沖星的磁場不斷把大量粒子輻射出太空，因此它的能量流失頗快，令到它的轉動越來越慢，自轉週期漸漸增長(圖6-9)。估計一顆脈沖星只能夠維持約一千萬年內產生可量度的輻射，隨著年歲增長輻射能量亦逐漸減少。不過天文學家發現，一些脈沖星有自轉突變(glitches)的現象，即其自轉速度有時會在很短時間內突然增加(圖6-9)[See99,Zei97]。對此現象現在仍未有一致公認的解釋。估計可能和星球外殼與超流內層有不同轉速有關。可能的解釋包括星震(starquakes)，磁力線重組等，基本上都是把星球內層的轉動能量傳至外殼的機制[Sha83,Lip92]。

6.3 雙星系統內的脈沖星

天上的恆星超過一半是在雙星或多星系統之內，而既然大質量的恆星有機會演化成為中子星，那就應該有一定數量的脈沖星是雙星系統的一員。有一些雙星系統甚至兩顆恆星皆是脈沖星。這些脈沖星的觀測性質，就會受到其伴星所影響。

從地球看，雙星系統內的成員就像各自在太空中兜著小圈圈運行。除非它們的軌道剛好垂直於我們的視線，否則我們應見到它們的運動有時迎向地球，有時卻離地球而

去。這便使星球發出的輻射及脈沖產生**多普勒效應(Doppler Effect)**：當脈沖星移向地球，脈動頻率增加(藍移)；當脈沖星移離地球，脈動頻率減少(紅移)，如圖6-10所示。既然我們可以非常準確地量度脈沖星的脈沖週期，我們便可從它的紅、藍移準確地得出脈沖星的公轉速度及週期。

伴星對於中子星的輻射另有更大的影響。中子星可能吸掉伴星部份物質，而這些物質受到中子星的強大表面重力吸引，以高速撞擊星球的表面，因而釋放巨大能量，令撞擊處溫度可達一億度之譜。這樣高溫的物質會放射大量X射線及伽瑪射線，觀測上很容易分辨出來。一個著名的例子是武仙座X-1，它的伴星是一顆巨星(圖6-11)，以每年十億份之一太陽質量的速度把物質傳給中子星[See99]。這顆伴星週期性地擋著從中子星射出來的X射線(圖6-12)。伴星物質墜落中子星是一個複雜的過程[Sha83]。物質可能形成吸積盤，包圍著中子星，而墜落的質量可能時多時少，導致不規則的輻射放射(稱為X射線爆發)。這狀態維持約數億年，中子星便把伴星完全「消化」掉。

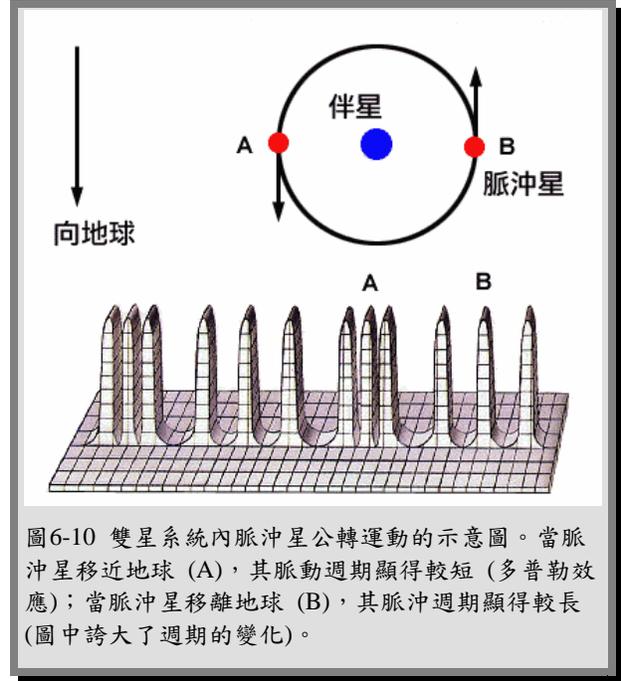


圖6-10 雙星系統內脈沖星公轉運動的示意圖。當脈沖星移近地球(A)，其脈動週期顯得較短(多普勒效應)；當脈沖星移離地球(B)，其脈動週期顯得較長(圖中誇大了週期的變化)。

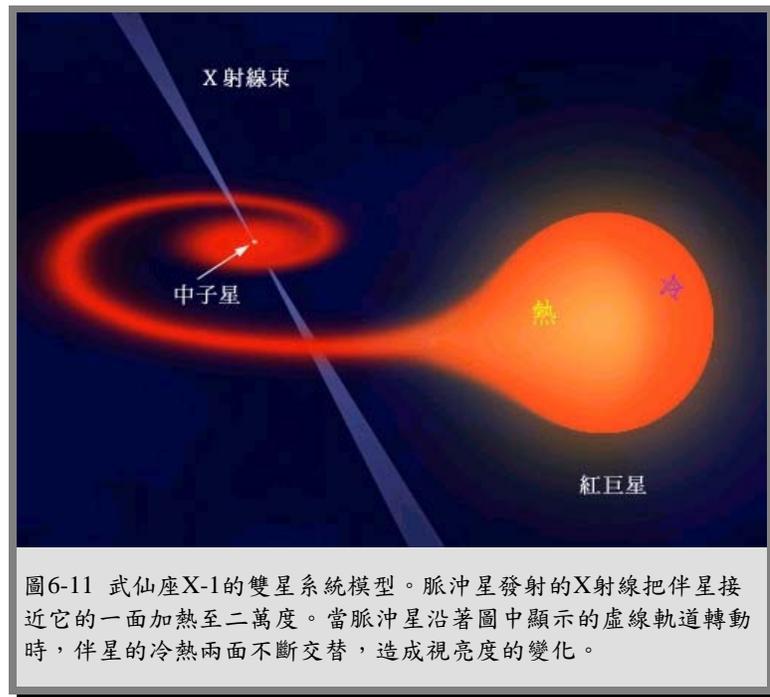
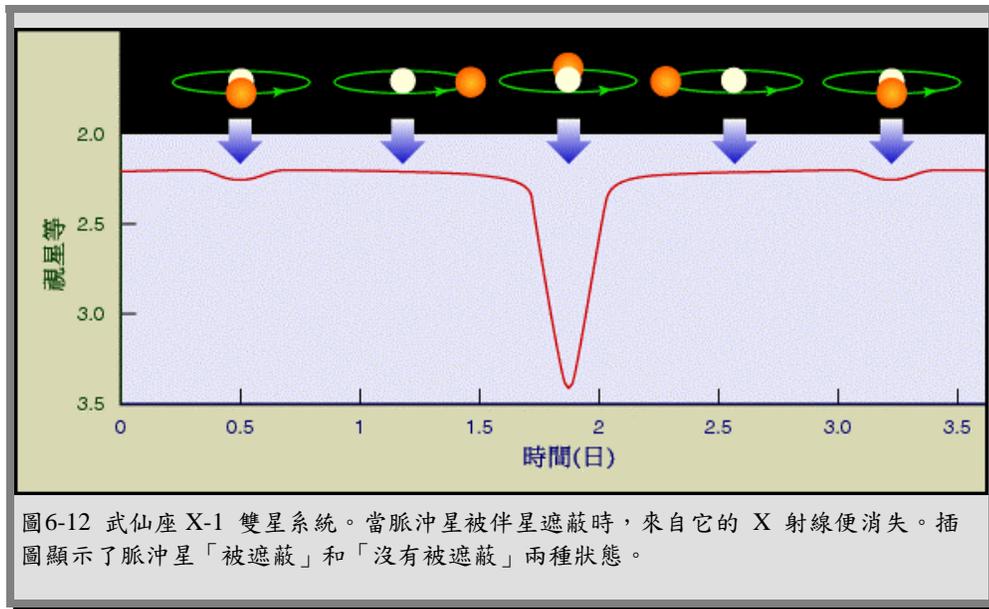


圖6-11 武仙座X-1的雙星系統模型。脈沖星發射的X射線把伴星接近它的一面加熱至二萬度。當脈沖星沿著圖中顯示的虛線軌道轉動時，伴星的冷熱兩面不斷交替，造成視亮度的變化。



若果雙星系統內兩顆都是中子星，即所謂**脈沖雙星(binary pulsar)**，則這兩顆中子星在彼此強大引力場作用下繞著對方公轉，做成對星球附近時空相當大的擾動。廣義相對論預測，這情況便會發出重力波 [Mis73]。雙星系統亦因此緩慢地失去能量，令公轉軌道漸漸收縮。一個著名的例子是代號為PSR1913+16的脈沖雙星。觀測上，天文學家發現這系統的公轉週期越變越短，表示其公轉軌道不斷收縮。這與相對論的預測在數值上完全一致[Sha83]。預料這兩顆星將沿螺旋形的軌道緩慢地移近對方，最後發生碰撞。理論上，這兩顆中子星的結合(merger)甚至可能演變成為一個黑洞。

6.4 中子星的行星證據

利用中子星精確而穩定的自轉週期，天文學家甚至發現第一個太陽系外的行星系統(extrasolar planetary system)。經過長期的觀測，一顆代號為PSR B1257+12的中子星自轉週期已被精確地測定至十七個小數位。天文學家發現它的週期有微小和有規律的改變。對此最自然的解釋是這顆中子星與其他星體圍繞而轉。但要解釋觀測數據，一顆伴星還不足夠，需有三顆比地球還要小的行星，而它們引起的潮汐作用影響著中子星的自轉。甚至其中兩顆行星之間的引力相互作用，亦可從觀測資料看出，並與理論預測相符[See99]。天文學家搜尋系外行星多年，卻從未想到竟在中子星附近找到行星，因為中子星的形成經歷過恆星死亡前的大小爆炸。既然在中子星附近這樣惡劣的環境下仍有行星存在，那麼行星在宇宙中一定十分普遍了。

參考書目

- [Fey65c] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. III (Addison-Wesley, Reading, 1965).
- [Gle97] N. K. Glendenning, *Compact stars: nuclear physics, particle physics, and general relativity* (Springer, New York, 1997).
- [Gui68] V. Guillemin, *The story of quantum mechanics* (Scribner, New York, 1968).
- [Lip92] V. M. Lipunov, *Astrophysics of neutron stars* (Springer-Verlag, Berlin, 1992).
- [Mis73] C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1973).
- [Pre62] M. A. Preston, *Physics of the nucleus* (Addison-Wesley, Reading, 1962).
- [See99] M.A. Seeds, *Foundations of Astronomy* (Wadsworth, Belmont, 1999).
- [Sha83] S. L. Shapiro and S. A. Teukolsky, *Black holes, white dwarfs, and neutron stars* (Wiley, New York, 1983).
- [Tho94] Kip S. Thorne, *Black holes and time warps – Einstein’s outrageous legacy* (Norton, New York, 1994).
- [Wei72] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology* (Wiley, New York, 1972).
- [Wol89] F. A. Wolf, *Taking the quantum leap* (Harper and Row, New York, 1989).
- [Zei97] M. Zeilik, *Astronomy – The Evolving Universe* (Wiley, New York, 1997).