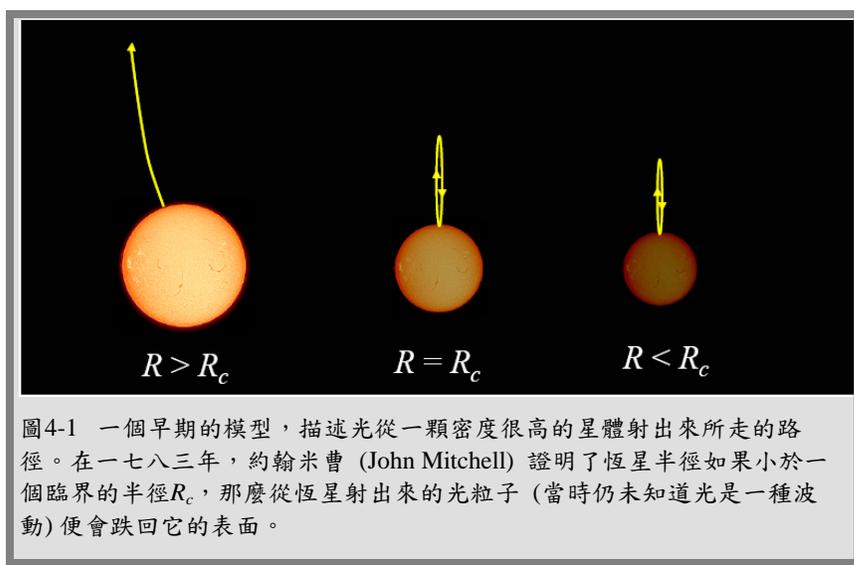


牛頓的和愛因斯坦的重力學說有一個共通點，就是任何物質都有相互的引力，而且質量愈大或物質愈接近，引力愈大。這明顯地預示着物質潛在一發不可收拾的災難：物質會否因為引力而塌縮（重力塌縮 gravitational collapse），直至密度無限大向一點？**黑洞(black hole)** [Mis73,Sha83,Wei72]的可能性是經典物理學中最引人入勝的課題之一，近年亦有很多觀測證據，告訴我們黑洞的確存在，而且為數不少。本章簡介黑洞的理論及觀測。

4.1 牛頓力學中的黑洞

黑洞的概念已有幾百年的歷史。在經典力學裏，一顆星體以萬有引力吸着組成的物質。所以，我們安穩地站在地球上，不愁被拋出太空。物質必須要加速至一定的速度，才可以衝出星球引力的牽絆。逃離一顆星球所需的最小速度稱為**逃逸速度(escape velocity)**[See99,Zei97]。恆星的表面重力越強，物質要逃離就越困難，逃逸速度亦越高。當一個星體的逃逸速度達到光速，即使光亦不能逃離(圖4-1)。所以，幾百年前已有物理學家提出，宇宙中質量最大的星星是不發光的！這樣的天體便是黑洞！

從牛頓萬有引力定律可知，一顆恆星的表面重力與星球質量成正比但與星球半徑的平方成反比。所以若一個星球的表面重力強，它必然有很大的質量或很小的半徑，或二者皆是。想像把一個星球的半徑縮小（質量不變），那麼逃逸速度便會愈來愈高。終於縮小至某一個半徑¹時，逃逸速度達至光速，星球便會成為黑洞，而這個半徑稱為**臨界半徑(critical radius)**。



¹ 臨界半徑 $R_c = 2GM/c^2$ 。

4.2 廣義相對論的觀念

雖然牛頓的萬有引力理論導出黑洞的概念，但在引力很強大時，這理論就不夠準確了。例如說，牛頓理論中把光看成為由一些有質量的粒子所組成，於是光的軌跡被重力扭曲，但若光粒子的質量趨向於零，光線所受的扭曲只是正確答案的一半而已²。我們有必要用廣義相對論，才能較正確地理解黑洞的性質，以及黑洞存在的必然性。

廣義相對論的主要精神，就在於質能會導致時空扭曲，而其他物體 - 包括光 - 在這個彎曲的時空內便自然地走出相對於遠方的觀測者彎曲的軌跡[Mis73,Wei72]。換句話說，愛因斯坦以彎曲的時空取代了牛頓的萬有引力³。

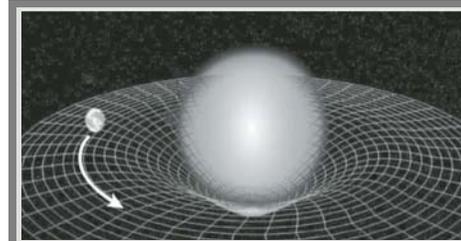


圖4-2 廣義相對論對一個大質量物體周圍時空彎曲的描述，可以被粗略地比喻為一個重球使橡皮彎曲的圖像。雖然這只是一個比喻，但卻可以幫助我們了解愛因斯坦的理論中一些比較抽象的概念。圖片由美國太空總署(NASA)提供。

我們雖然不能想像四維時空的扭曲，卻可以用類比的方法幫助理解相對論中的黑洞。想像把一個球放在橡皮膜上(圖4-2)，球的重量把橡皮膜扭曲就代表為質量對時空的影響。

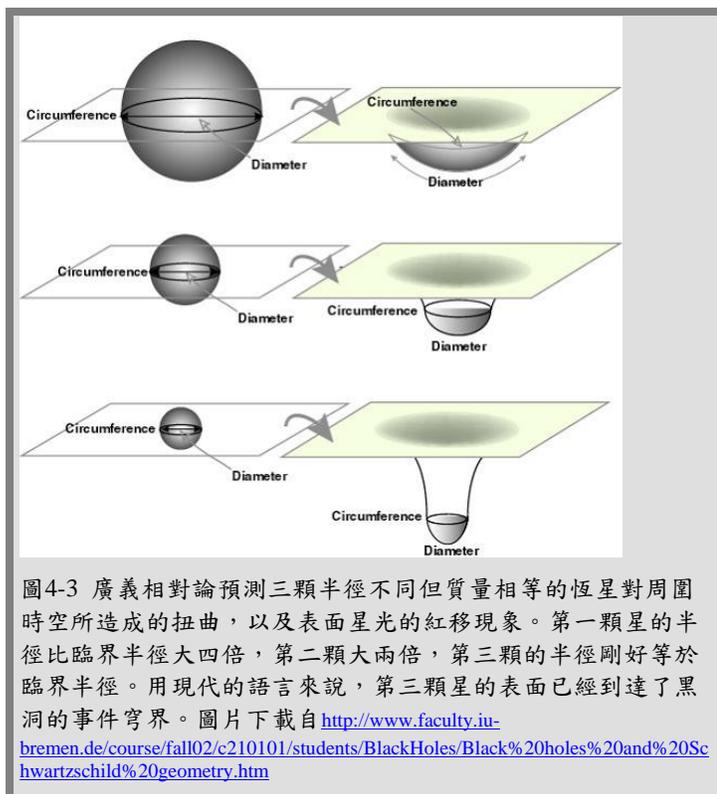


圖4-3 廣義相對論預測三顆半徑不同但質量相等的恆星對周圍時空所造成的扭曲，以及表面星光的紅移現象。第一顆星的半徑比臨界半徑大四倍，第二顆大兩倍，第三顆的半徑剛好等於臨界半徑。用現代的語言來說，第三顆星的表面已經到達了黑洞的事件穹界。圖片下載自 <http://www.faculty.u-bremen.de/course/fall02/c210101/students/BlackHoles/Black%20holes%20and%20Schwarzschild%20geometry.htm>

橡皮膜的彎曲度受兩個參數控制：球的質量及半徑。質量愈大，扭曲就愈嚴重。同等質量的球，則半徑愈小，製造愈深的「洞」。因此，在質量大但體積小的天體附近，時空被嚴重扭曲，出現又深又陡的一個洞。任何物體要從這個洞逃出來，都要損耗一部份能量。若果這個洞太深，光波「爬出這個洞穴」時失去所有能量，那麼光亦不能逃離這個重力場。這就成為一個黑洞。

我們亦可憑藉**重力紅移 (gravitational redshift)** 現象[Mis73,Wei72]去瞭解黑洞。強大的重力把時間拉慢了很多（相對於遠方觀測者而

言），黑洞邊緣的時間被拉至接近停頓，放射的光波頻率大幅下降，出現紅移現象

² 這是因為牛頓理論中時空皆是絕對不變，不受重力影響的，而廣義相對論告訴我們，重力強大時，時空扭曲的影響不可忽略。

³ 參閱第二章。

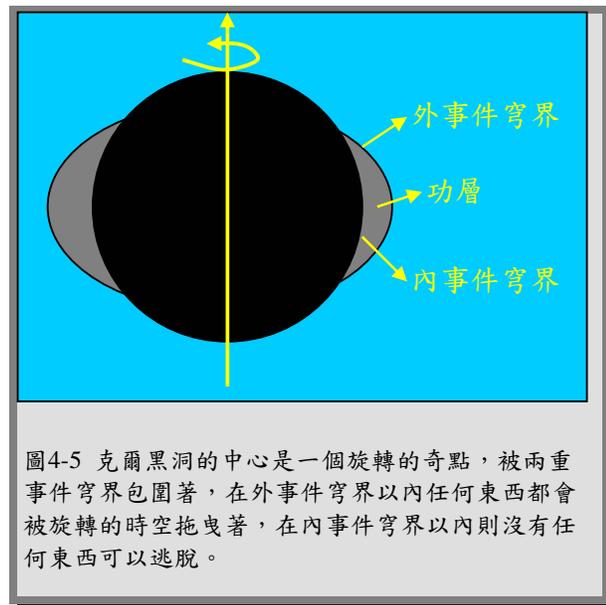
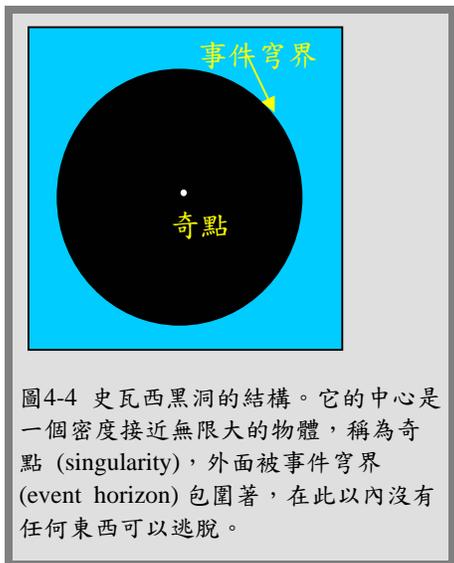
(圖4-3)。重力愈強，紅移愈厲害。黑洞的重力場把從黑洞邊緣向外放射的光波作無限大的紅移，因此光波不能逃離。當一個天體收縮到一個特定半徑時，它表面的重力紅移變得無限大。這個特定半徑就是臨界半徑，數值上和上述牛頓理論的一致。

4.3 史瓦西黑洞 (Schwarzschild black hole, 圖4-4)

首先提出廣義相對論有黑洞解的是**史瓦西(Schwarzschild)**。說起來，史瓦西關於黑洞的研究論文，竟是在戰場上寫成的，而他當時是一位士兵！在廣義相對論發表後一年內，史瓦西便已發現到任何一個靜止的球狀物體收縮到臨界半徑以內，它便會把光困着，成為黑洞[Tho94]。這個臨界半徑亦稱**史瓦西半徑(Schwarzschild radius)**，其數值正比於物體的質量。例如太陽的史瓦西半徑約為三公里，而地球的質量約為太陽的三十萬份之一，所以地球的史瓦西半徑只有十萬份之一公里，或一公分。換句話說，若把地球擠壓至半徑只有一公分，地球亦會成為一個黑洞。史瓦西黑洞的邊界，亦稱為**事件穹界(event horizon)**，簡稱事界，標誌著光是否能逃逸的界限。據說當年史瓦西把論文寄給愛因斯坦，愛因斯坦雖然不相信黑洞的存在，卻找不到論文有錯誤，於是仍替史瓦西在學術會議上宣讀論文[Tho94]。其實史瓦西得到的解不但正確，亦是廣義相對論其中一個最簡單的解[Mis73,Sha83,Wei72]。

問題是究竟星球會否縮小至臨界半徑以內？科學家對此經過幾十年的研究，才終於肯定核心質量大於二至三倍太陽質量的恆星必會塌縮成黑洞！這當中的困難在於要掌握高密度物質的性質，無論理論或實驗上都不容易[Gle97]。陳德拉錫加等雖然發現簡併壓力可以阻止質量比太陽略大的星體塌縮⁴，卻不能挽救質量更大的恆星成為黑洞的命運。物質在事件穹界內受到極大的重力影響，不斷塌縮，密度趨向無限大，令黑洞中心形成一個**史瓦西奇點(Schwarzschild singularity)**。我們現有的物理知識仍不足以讓我們瞭解這個奇點；所以，它可以說是已知物理宇宙的邊緣。現在最合理的推測是一切進入黑洞的物體皆被奇點吞沒。而雖然廣義相對論的確容許稱為**蟲洞(wormhole)**的時空墜道，原則上可以通往宇宙其他地方，但它們是否穩定卻很有疑問[Tho94]。

⁴ 第六章將詳述之。



4.4 克爾黑洞 (Kerr black hole)

史瓦西的黑洞解只適用於不轉動的星體。但是一般相信，大部份的恆星都有自轉。描述一個自轉黑洞的廣義相對論方程解[Mis73,Wei72]，由物理學家克爾提出，所以自轉黑洞亦稱克爾黑洞(圖4-5)，以別於史瓦西黑洞。

一個克爾黑洞的結構比史瓦西黑洞複雜[See99]。它有兩個事件穹界，分別稱為**外事件穹界 (outer event horizon)**及**內事件穹界(inner event horizon)**，而兩者之間的區域稱為**功層(ergosphere)**。任何物件若進入外事件穹界，就會被旋轉的時空拖曳著；若進入內事件穹界就不能夠逃脫，必會墮入奇點。在功層有一個奇異的現象，進入這區域的粒子會被一分為二：一顆墮入內事件穹界，另一顆則以較高的能量被射出。這令一些天文學家想到人類或可從功層裏提取能量呢(圖4-6)！只要我們把一些垃圾射向一個克爾黑洞的功層，另一堆能量更高的垃圾便會從功層回射，我們便可利用它們的能量來發電了。當然，這些能量都源自黑洞的轉動能量。

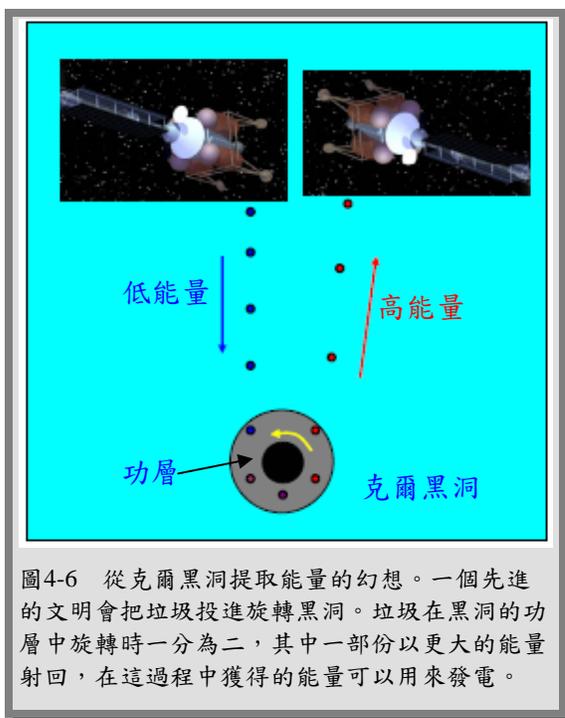


圖4-6 從克爾黑洞提取能量的幻想。一個先進的文明會把垃圾投進旋轉黑洞。垃圾在黑洞的功層中旋轉時一分為二，其中一部份以更大的能量射回，在這過程中獲得的能量可以用來發電。

4.5 黑洞遊

想像我們派太空船去一個史瓦西黑洞探險，我們將看到怎樣的情景？當太空船仍然遠離⁵黑洞的事件穹界時，黑洞的引力並無特別之處，它的引力和一顆相同質量的恆星並無不同。只要觀測者遠離事件穹界，牛頓定律（或開普勒定律）依然是很好的近似。隨著太空船逐漸接近黑洞，我們才慢慢察覺異象。在地球上的控制室，雖然保持着和太空船的通訊，控制室人員卻發覺太空船內的鐘走得較地球上的鐘慢。這就是重力場造成的**時間延滯(time dilation)**⁶ [Mis73,Wei72]，重力場愈大，效應愈明顯。當然這時間延滯在地球附近也發生，如地面與人造衛星的鐘便因地球的重力而有不同速度。不過地球的重力只做成輕微的影響，我們日常根本察覺不到。黑洞附近的重力場卻非同小可。太空船愈接近事件穹界，時間延滯愈厲害。當太空船墮進事件穹界時，這種效應變得無窮大，以致地球上只看到太空船需要無限長的時間，方能跌進事件穹界。換言之，我們從地球只看到⁷太空船停留在事件穹界之上不動，而太空船內的所有時鐘 - 包括太空人的生理時鐘 - 都停頓了！

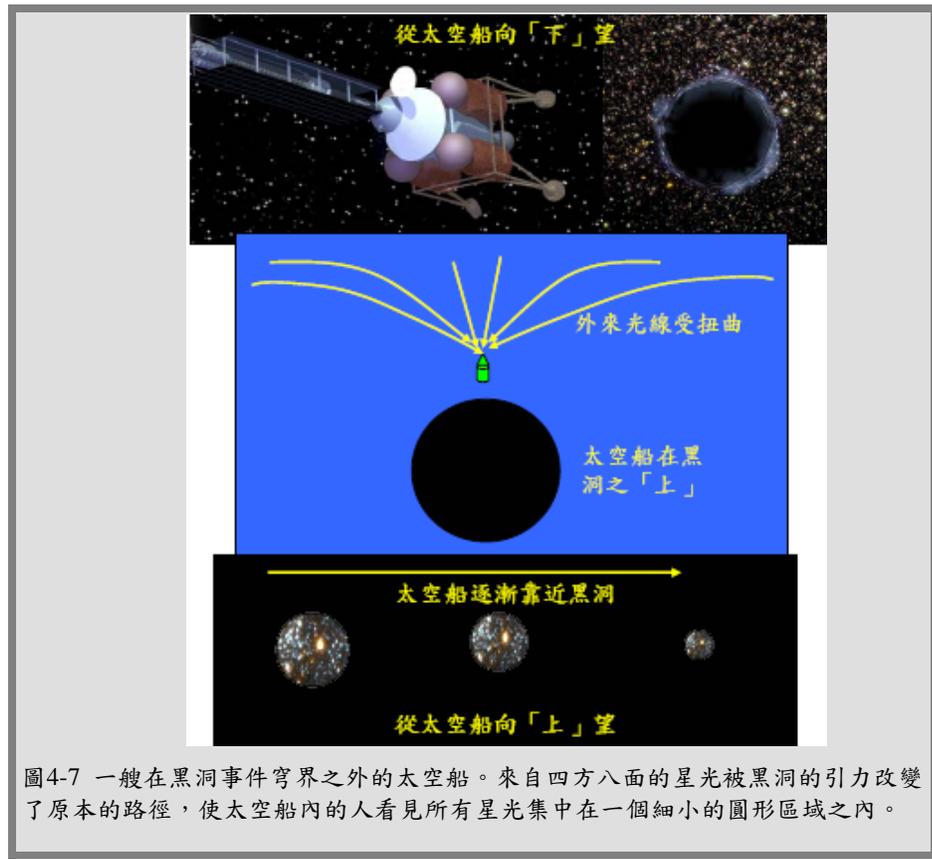
其中一個太空船上的時鐘，是太空人給地球控制室所發的電波訊號頻率。例如說，太空人可選擇用無線電波與地球控制室人員聯絡。假設電波的頻率為一億赫斯，那就是說這個「時鐘」每秒跳動一億次，是個頗準確的鐘。不過，因為時間延滯，這個「鐘」從地球上看似跳動慢很多，可能每秒只有幾千次吧了。於是地球接收到的訊號頻率便低很多了。這就是**重力紅移(gravitational redshift)**現象[Mis73,Wei72]。可以說重力紅移和時間延滯根本就是相同的。

⁵ 距離黑洞遠或近，可用事界的大小作指標，例如距離為一百倍事界半徑，便可算是遠了。

⁶ 參閱第一章。

⁷ 事實上，太空船放射的光或無線電訊號，亦被大量紅移，地球上根本再「看」不到太空船了。

不過，無論重力紅移或時間延滯都是遠離黑洞的觀察者所見到的情況。臨近事件穹界的太空船上的太空人卻不會體驗到時間延滯。太空人只覺得自己的時間如常前進，太空船很快地越過事件穹界。太空船受著不斷增加的潮汐力，沿著黑洞的方向被拉長，橫向則被壓縮。太空人看見遙遠的星光聚集成一個細小區域，並逐漸縮小，當他越過事件穹界時區域縮為只剩下一點(圖4-7)。



太空人越過事件穹界後，看到扭曲得非常複雜的時空。若他能抵受極大的潮汐力，他或可看到黑洞中心的時空奇點。在那裏量子效應 (quantum effect) 變得重要，而廣義相對論亦不足以描述它的物理狀況了。可惜是，太空人將不能把他見到的情景轉告我們，因他發出的訊號，全部都不能逃離黑洞。他自己就很快被奇點吞噬。而我們從地球就只看到太空船停留在黑洞邊緣，裏面的時間則永恆地凍結！

4.6 黑洞的輻射

量子力學的測不準原理 (uncertainty principle) 告訴我們，真空的能量並不是恆常不變的，而是可以在很短的時間內有很大的波動[Fey65c,Gui68,Wol89]。突然增大的能量，可透過質能轉換產生一對正粒子和反粒子 (particle-antiparticle pair)，如電子-反電子對，它們又很快地再碰在一起而煙滅 (annihilate)。它們的生成和煙滅都在一瞬間，且過程不斷重複。所以，真空並非空無一物，而是充滿着這些虛粒子對 (virtual

particle pairs) [Fey65c,Gui68,Wol89]。在黑洞附近，虛粒子被非常強大的潮汐力拉開，變成了真正的粒子(圖4-8)。其中一顆粒子被拉進黑洞，另外一顆逃脫，帶走一點能量。因此，黑洞邊緣不斷輻射出各種粒子，稱為**霍金輻射 (Hawking radiations)** [See99,Tho97]。

霍金輻射帶走黑洞一部份的能量及質量。若果黑洞沒有新的質量補充，它的半徑便相應縮小，黑洞的輻射速率亦隨之增加。當一個黑洞失去很多能量後，它的質量變得很小，最後更劇烈地爆炸，黑洞便煙消雲散。不過，黑洞**蒸發(evaporation)** 的速度非常緩慢。例如一個太陽質量的黑洞需要約 10^{66} 年才會完全蒸發掉！

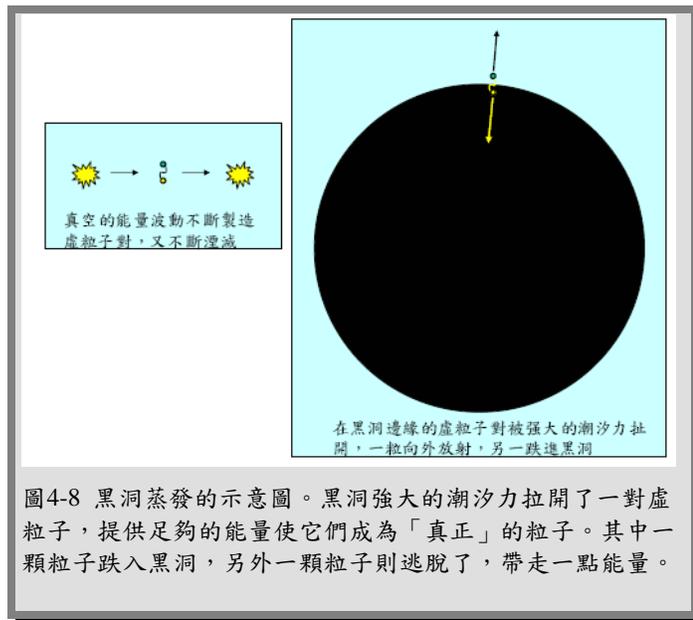


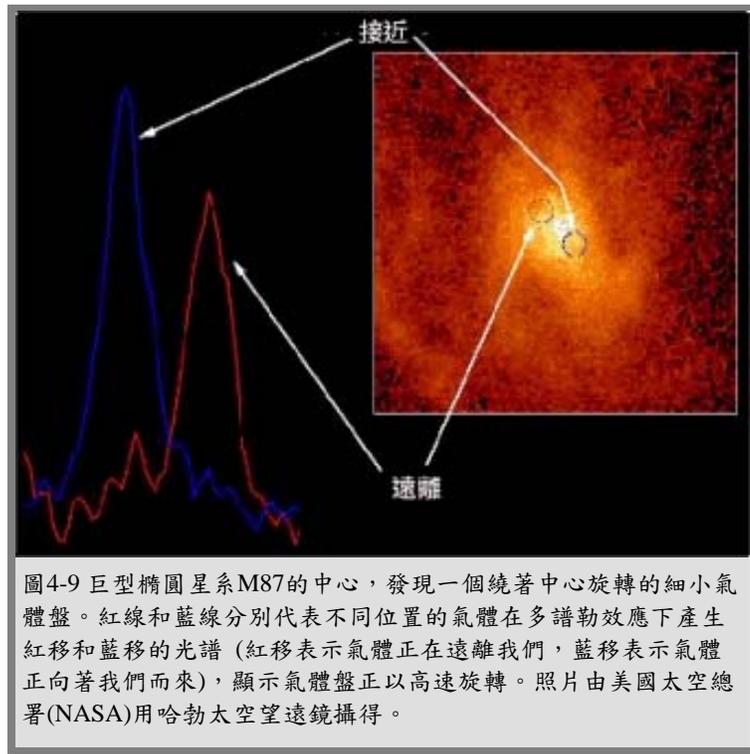
圖4-8 黑洞蒸發的示意圖。黑洞強大的潮汐力拉開了一對虛粒子，提供足夠的能量使它們成為「真正」的粒子。其中一顆粒子跌入黑洞，另外一顆粒子則逃脫了，帶走一點能量。

4.7 尋找黑洞

初聽尋找黑洞會以為是不可能的科幻。黑洞既連光也困着，我們又怎能在漆黑的太空找尋黑洞？不過，科學家卻似乎於廿世紀最後的幾年真正找到黑洞了。而且，諷刺地，科學家發現，黑洞往往是宇宙中最光亮的星體呢！

原來宇宙中很多黑洞都被大量物質包圍著，而它們掉進黑洞之前都會因摩擦而變得很熱，因此發出大量輻射[Sha83,Tho97]。當然這些輻射都是在黑洞**外面**放出。科學家就利用這些輻射的觀測而得知黑洞的存在。如上節所述，遠離事件穹界外，開普勒定律仍然適用。如果一堆物質繞著一個物體旋轉，我們只要知道那堆物質的速度分佈，便可推斷該中心物體的質量。這就像九大行星繞太陽公轉的情況一樣，我們可以藉著開普勒定律及各行星的軌道資料準確地推算太陽質量。天文學家發現黑洞外圍物質的輻射光譜有很大的多普勒移(Doppler shift): 一邊紅移，另一邊藍移，從而推斷這些物質正以高速繞著中心旋轉。根據這旋轉速度，天物學家計算中心物體的質量，如果發現物體的質量很大，但所處的空間很小，那物體便很可能是一個黑洞。

近年科學家在**星系核心**找到很多黑洞的例子。例如巨型橢圓星系M87，在其核心兩邊四份之一弧秒的範圍內發現物質正以每秒五百公里的高速旋轉(圖4-9)。這意味著此星系核心只有太陽系般大小的範圍內約有三十億個太陽的質量[See99]！若然這個物體不是一個大黑洞，那就是我們還未想像過、比黑洞更奇怪的星體了。

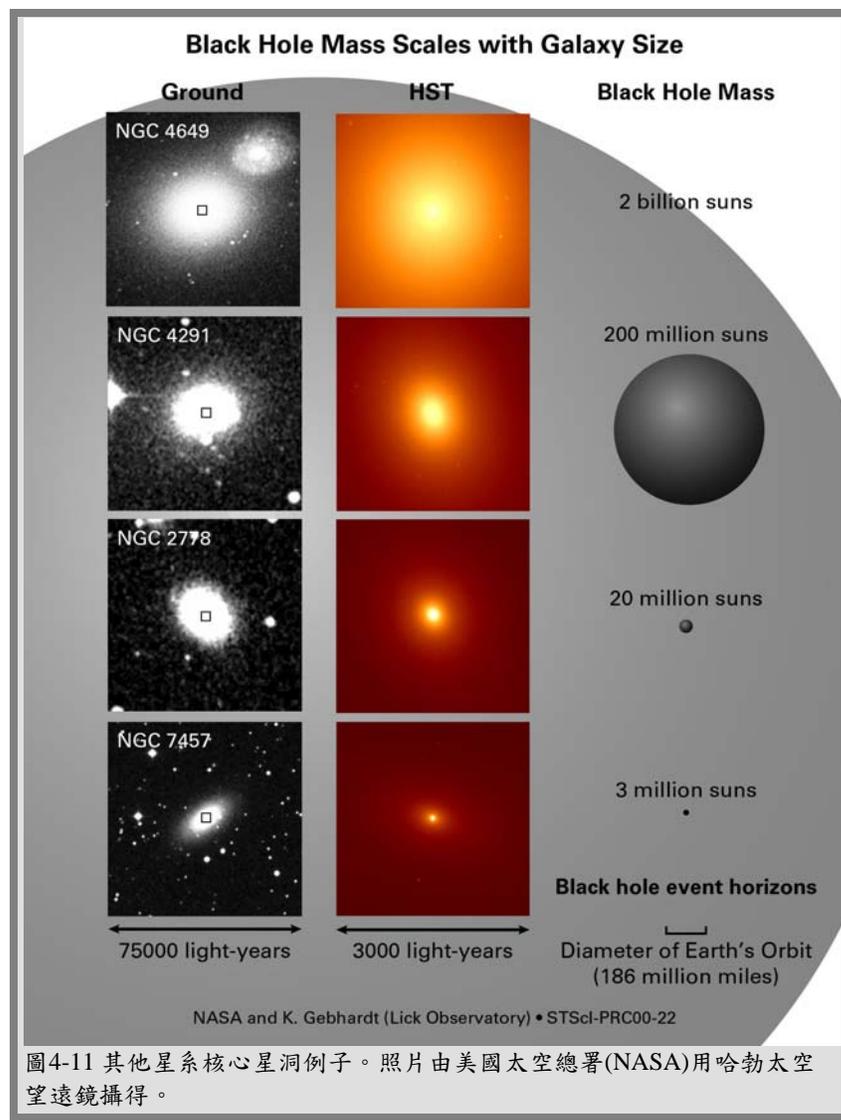


另一個例子是NGC 4261 (圖4-10)，它擁有兩片巨大的無線電放射源，在其核心附近三百光年的範圍內發現了一個正以高速旋轉的氣體盤，這顯示星系核心質量高達十二億太陽質量。似乎，大部份核心擁有黑洞的星系都是**活躍星系 (active galaxy)**，放射大量電磁波，如擁有兩片巨大射電瓣的河外射電雙源 (double radio source)、**塞佛特星系 (Seyfert galaxy)**的核心等。亦有跡像顯示，星系核心黑洞和星系的演化有不可分割的關係。隨著觀測數據的增加，天文學家發現星系核心可能很普遍地有黑洞存在(圖4-11)。甚至乎我們自己的銀河系核心亦很可能有一個幾百萬太陽質量的黑洞呢！



除了這些超級大黑洞，天文學家亦發現一些**雙星系統(binary system)**中的暗星體很可能是黑洞。方法也是利用多普勒效應(Doppler effect)量度可見恆星的運動，並從而推測暗伴星的質量。若質量遠大於中子星的最大可能質量⁸，該天體很可能便是一個黑洞。一些雙星系統中的黑暗星體發出X射線。估計它是一個黑洞，正在把其伴星的物質吞噬。物質跌進黑洞前，在黑洞外圍形成**吸積盤(accretion disk)**，產生高熱，便成為X射線源(圖4-12)。著名的例子是**天鵝座X-1 (Cygnus X-1)**。估計該暗天體的質量約為十六個太陽質量，應是一個黑洞。又例如天鵝座V404是一顆發射X射線的新星，黑暗天體的質量約為太陽六倍。

對於大部份的科學家而言，黑洞是否存在已不再是問題。問題倒是如何可以進一步研究這些奇異星體的性質，及怎樣利用它們去探究未知的宇宙！



⁸ 約三倍太陽質量。

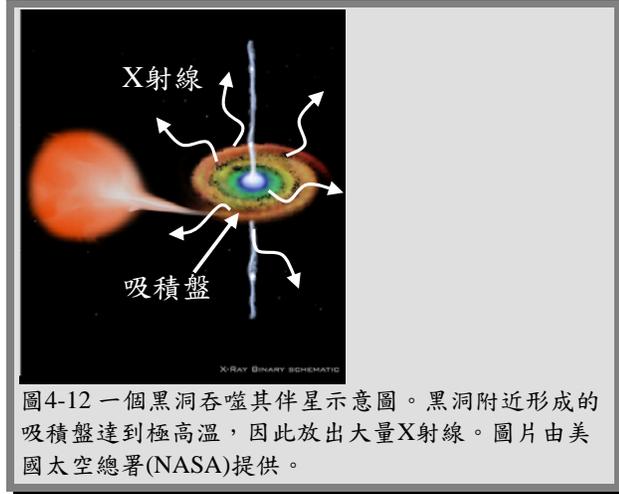


圖4-12 一個黑洞吞噬其伴星示意圖。黑洞附近形成的吸積盤達到極高溫，因此放出大量X射線。圖片由美國太空總署(NASA)提供。

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).