



黑洞

宇宙中的詭異星體

生與滅是人類必經的歷程，對於宇宙，科學上也曾出現生滅的說法。有人認為大爆炸是宇宙的起源，黑洞是死亡的星體，可是黑洞並未死去，它透亮、詭譎，擁有超強重力，更霸道地操控著它周圍的宇宙時空。

■ 演講人／蔡駿 文字整理／張志玲

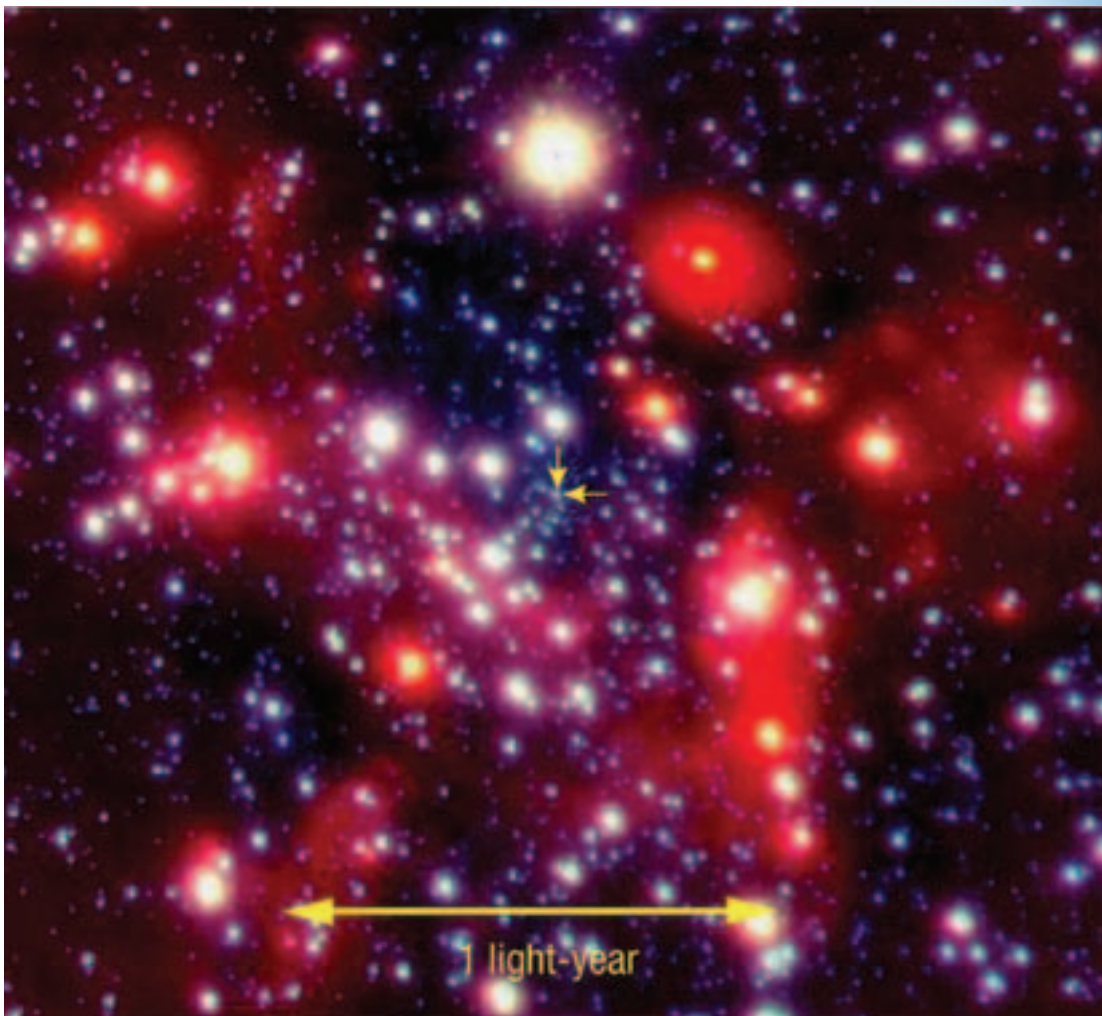
今年（2005年）是科學巨擘愛因斯坦（Albert Einstein，1879-1955）發表光電效應、布朗運動、相對論等一系列重要論文的100周年。他所提出的時空交錯、時空彎曲概念震撼科學界，而已落實在天體研究上的黑洞更令人充滿遐想。尤其在最近幾年的科普演講中，老是有人舉手發問：「黑洞究竟是什麼呢？」這和早期人們經常問愛因斯坦：「為什麼時間會不一樣，什麼是相對論？」的情形頗為類似。

愛因斯坦在1905年發表相對論，當時人們對於時空的概念仍是根據牛頓所說：「時間和空間是絕對的，我和你測量的時間是一樣的。」然而，在相對論中卻有另一個全新的概念——我們兩人測量的時間有可能是不一樣的。為什麼呢？這

和兩人所在的座標系有關。

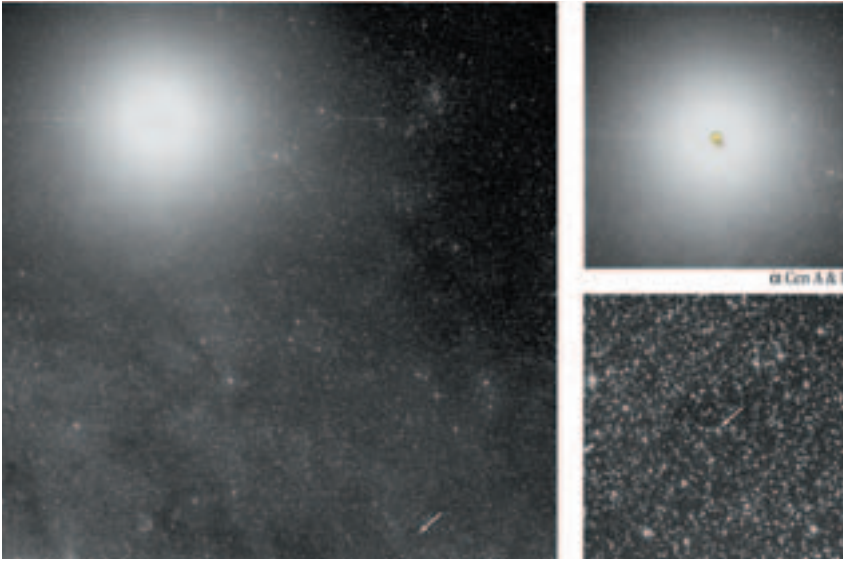
比方說，有一位探險家正搭乘一艘飛船從地球出發往半人馬座 α 星飛去。又假設，飛船上有兩個平行放置的鏡子，且有一粒光子在中間奔跑，當光子碰到其中一面鏡子時，因反射而觸碰另一面鏡子，然後再反射，再觸碰，每觸碰一次就發出滴答一聲。由探險家所在座標系看，光子跑的是垂直於鏡面的路線，每隔一秒鐘就有一次滴答聲。但對留守地球的觀測者來說，兩面鏡子正往恆星方向移動，光子須跑斜線才能從上方鏡面跑到下方鏡面，所以跑的路線比較長，滴答聲的前後間隔會超過一秒鐘。

當探險家到達目的地後，雖然所記錄的滴答聲總數和地球觀測者一樣，但因聽到的滴答聲間



<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2002/pr-17-02.html>, Credit: European Southern Observatory (ESO)

這張影像所呈現的是銀河中心周圍2光年附近的擁擠天區，而箭頭所指的位置就是銀河中心。根據觀測並追蹤一顆編號S2恆星的結果，很具體地證明恆星S2是在一個不可見天體強大的重力作用下運動，而這個天體極端細小且緻密，是一個超大質量的黑洞。也就是說，在我們銀河系的中心，藏著一個質量超過2百萬個太陽的黑洞。



半人馬座阿爾法三星系統是離太陽最近的一個恆星系統，在三星系統中最暗的星是比鄰星（箭頭所指處），另外兩顆較亮的半人馬座阿爾法A星與B星，是相當靠近的雙星。在左上的照片中，過度的曝光使得半人馬座阿爾法A星與B星看起來很大，而它們真正的大小只是如右上圖中所示的兩個小光點。北半球的大部分地區，都無法看到這個半人馬座阿爾法三星系統。

隔比較短，所以他所測量到的時間比地球觀測者的短。又因為運動是相對的，所以探險家可以理直氣壯地認為自己是靜止的，而是地球和半人馬座 α 星正以同樣速度往相反方向運動。正因為他測量到的時間比較短，所以會認為地球到半人馬座 α 星的距離比

較短。這就是相對論的時空結構：相對於靜止物體，在運動座標裡，時間過得比較慢，而且運動方向的長度也比較短。

相對論的3個基本假設

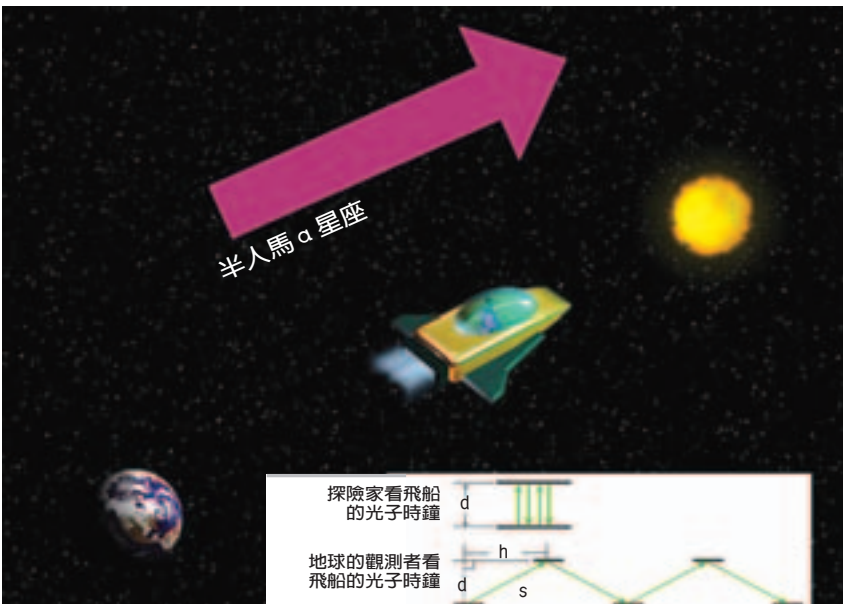
上述例子得到的結果，導因於相

對論3個基本假設中的第1個和第2個假設—慣性座標等效性和光速恆定性。

慣性座標的概念是伽利略（Galileo Galilei, 1564-1642）首先提出來的，後來被牛頓（Isaac Newton, 1642-1727）總結成爲第一運動定律：如果一個粒子在不受力情況下，它的速度會保持恆定而且方向不變，在一個座標系裡，如果粒子的運動遵守這一定律，我們便稱它是慣性座標。愛因斯坦認爲，物理法則在所有的慣性座標裡都是一樣的，而且運動都是相對的。我們沒有辦法挑選出一個絕對靜止的粒子。

相對論的第2個基本假設是光速恆定性。在這之前已經有馬克士威爾（James Clerk Maxwell, 1831-1879）從電磁學理論中推導出一個結論：電磁波如果做爲一種波在真空中傳播，它的速度是一個常數。可是這個理論沒有提到電磁波傳播的速度是在哪一個座標系裡面測量的。愛因斯坦把電磁學理論的結果提升做爲第2個基本假設—在任何座標系下，光子跑的速度（簡稱光速）是一個恆定常數。

就在愛因斯坦發表相對論11年以後，也就是1916年，他又發表廣義相對論，人們便把較早的理論稱爲狹義相對論。狹義相對論主要在表達：只要你在做直線等速運動，你所經驗到的物理定律，會和任何做直線等速運動者所經驗的一樣。廣義相對論則表達：重力（就是牛頓說的萬有引力）是因為物質彎曲了附近的時間空間結構所產生的結果。且在正常情況下，一個物質在太空中會循著直線跑，但若跑進一個彎曲的時空裡面時，它所

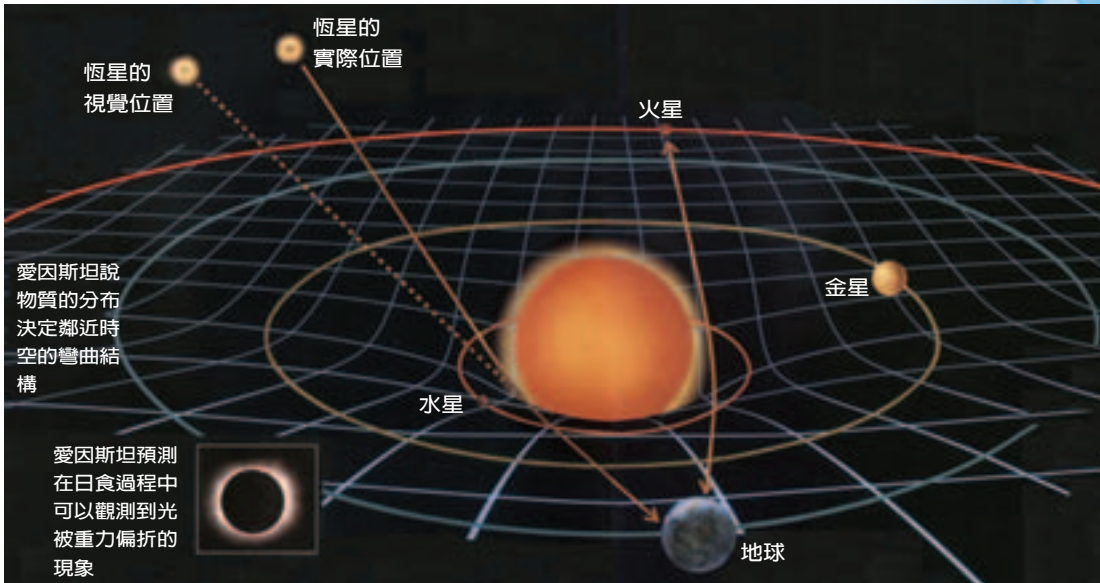


地球及飛船分別位在不同的時間空間座標系內，雖然光子跑的速度不變，但由不同座標系內觀測某個運動物質時，所觀測到物質的運動時間、運動距離都不一樣。



黑洞

圖片提供：國立自然科學博物館博工時間特展活動



重力（就是牛頓說的萬有引力）是因為物質彎曲了附近的時間空間結構所產生的結果。在正常情況下，物質在太空中會循著直線跑，但若跑進一個彎曲的時空裡，它所跑的路線會隨著時空彎曲而彎曲。

跑的路線會隨著時空彎曲而彎曲。

可是，為什麼時空會彎曲呢？這主要和加速度反重力場有關。相對論的第3個假設，就是加速度與重力場的等效性假設。要說明這個假設，可從亞里斯多德（Aristotle, 384-322 B.C.）、伽利略和牛頓的一段小故事說起。

亞里斯多德學說是16世紀的經典知識，他的自由落體學說認為：重的東西往下掉的速度比較快。但是伽利略不認同這樣的說法，相傳他從比薩斜塔上丟下兩個重量不一樣的東西，目的就在證明它們會同時掉落地面。

當時的伽利略還因為這個想法而遭迫害，但他堅持真理，並在日記中寫下來：如果從高處扔下兩個質量不同的東西，比如一個鐵球及一個木球，倘若亞里斯多德是對的，那麼，比較重的鐵球應該掉得比

較快。倘若把兩個東西綁在一起往下扔，因為木球會把鐵球往上拉，所以掉落的速度比鐵球慢。可是，兩個東西綁在一起以後的質量比鐵球大，如果亞里斯多德是對的話，那麼，質量大的東西掉的速度應該比較快才對。顯然前後兩個結果相互矛盾，如此說來，亞里斯多德的假設是不成立的。

長久以來，這兩位大師的想法一直相持不



圖片攝影：林瑞珠

1173年建造的義大利比薩斜塔是世界七大建築奇景之一，塔高54公尺，當初興建到10公尺高的時候就開始傾斜，直到現在仍在持續傾斜中。據說伽利略曾從塔上扔下1磅重和10磅重鉛球各一個，結果同時落地，得以證明物體掉落速度與質量無關，而寫下「落體法則」。

下，後來牛頓以他的第二定律和萬有引力跑出來打圓場。牛頓第二定律認為：一個東西的加速度乘上它的質量，等於它所受到的外力。倘若加上萬有引力公式，就可獲得結論如下：所有東西往下掉的速度都一樣快。不過，以現在的科學知識研判，雖然牛頓所說的結論是對的，但是他的第二定律和萬有引力定律僅是近似的，解釋這個結論的正確理論應該是愛因斯坦的相對論。

只是為什麼東西掉落的速度會和相對論扯上關係呢？假設有一座電梯放在地球表面，並在電梯裡懸空放了3樣外型不同、質量不同、組成成分不同的東西：1輛車子、1個瓶子、以及1顆蘋果。根據前述結論：在重

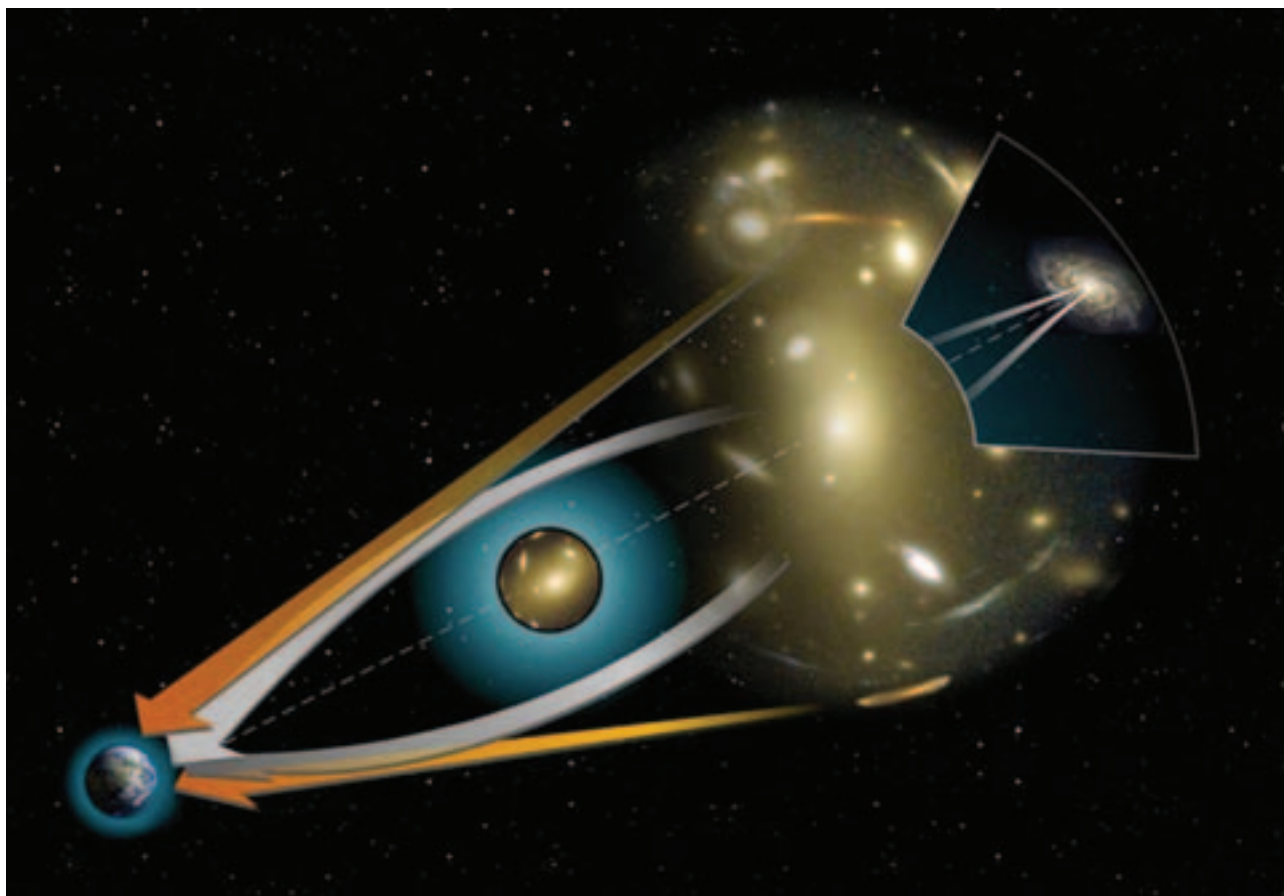
力場中所有東西往下掉的速度都一樣快，所以對電梯裡的人來說，他所看到的3樣東西會一齊往下掉。但是我們也可以從另外一個角度再思考一次，假設電梯裡的3樣東西都靜止不動，只是電梯在往上加速而已，這時電梯裡的人會因為電梯正以重力加速度往上提升而撞到原本懸空，但仍靜止不動的東西。

從上述兩種不同思考中可知：我們對於所觀察的物質，實在無法分辨它到底是在一個加速度的座標系裡面，還是在一個具有重力場的地球表面。這裡的意思是說，加速座標系和重力場其實是沒有區別的，這就是相對論的第3個假設：加速座標系和重力場是等效的。

同樣地，倘若在某個往上加速而沒有重力的電梯裡觀察光子，雖然光子以水平方向進行，但對電梯裡的人來說，他看到的是行進路徑有點彎曲的光子。這時的光子，從電梯側上方跑進來，慢慢縮短和電梯地面的距離，最後從電梯側下方跑掉。在這裡可以得到另一個概念：在重力場裡面，光子跑的路線是彎曲的。

時間空間會彎曲

對於光線會彎曲的說明，我們可用狹義相對論和牛頓力學的概念做解釋。假設太陽後面有兩顆恆星，從地球上望過去，你會發覺，由恆星那兒跑出來的光線在太陽附近受到重力影響而彎曲，然後進入我們的視線。也



圖片提供：國立自然科學博物館陳運博士時間特展活動

組成太陽的物質彎曲了附近時空，所以在觀察兩顆恆星發射出來的光子時，光子雖沿著直線跑，但因是從彎曲時空裡跑出來的，所以光子跑的路線看起來好像是彎曲的。

就是說，如果對著太陽看，原本位在太陽後方的恆星，看起來好像是位在太陽的左右兩邊。

對於這個說法，愛因斯坦又有不一樣的想法。他認為，或許是組成太陽的物質把太陽附近的時空彎曲了，所以在觀察兩顆恆星發射出來的光子時，因它是從彎曲的時空裡面沿著最短路線跑出來的，所以光子跑的路線看起來好像是彎曲的。

這兩個思考模式都可以解釋為什麼光子會彎曲，但在應用相對論公式計算時，你會發現，這些光子的偏差角度，比牛頓力學

加上狹義相對論所計算出來的偏差角度要大上一倍。到底哪一個情況比較接近事實呢？這時候只好以實驗來判別了。

很幸運的是，我們想知道的實驗答案在1919年揭曉了。有一位天文學家利用日蝕機會測量光子角度偏差的大小，最後得到的數值和廣義相對論所計算出來的一樣。也就是說，從科學實驗中所得到的恆星角度偏差，比用牛頓力學加上狹義相對論公式算出來的大一倍。而且現在的科學知識也已經知道，不僅空間在太陽附近是彎曲的，就連時間在太陽附近也是彎曲的。

如果再仔細推敲愛因斯坦的3個基本假設，我們還能獲得許多心得！譬如說，時間和空間是一家人，我們無法很明確地把時間和空間切開。又例如，時空是彎曲



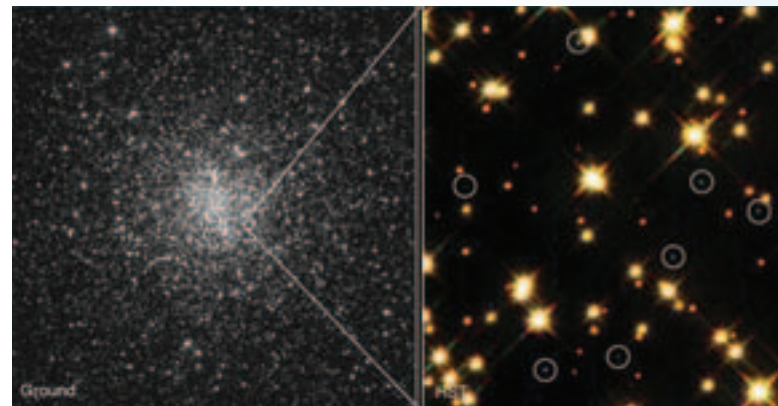
一顆單獨的中子星 根據哈伯太空望遠鏡對圖中箭頭所指的那一顆中子星所做的觀測，並和先前用其他工具所做的觀測結合，已可求得這顆中子星的大小。

http://issdc.gsfc.nasa.gov/photo/photo_gallery/photogallery-astro-exotic.html, Credit: Fred Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

的，重力場會讓光子彎曲。甚至知道，太陽的重力場和黑洞的重力場比較起來，真是小巫見大巫呢。

超大恆星擠成一點點

這些基本概念愈來愈清楚以後，就可以進一步了解黑洞。因為黑洞是從星體演變來的，所以應該從星體談起。



逐漸冷卻的白矮星 右圖是由哈伯太空望遠鏡所觀測到，很靠近M4球狀星團中央一個小區域的影像，研究人員在這裡找到了許多白矮星（白圈內的天體）。白矮星核心的核反應已經停止了，因此它們會一直冷卻，直到完全暗去為止。

http://issdc.gsfc.nasa.gov/photo_gallery/photogallery-astro-exotic.html#dwarf1, Credit: Harvey Richer (University of British Columbia, Vancouver, Canada) and NASA

黑洞

星體由氣體組成，以我們熟悉的太陽為例，它的外部有氣體，內部有燃燒的核反應，因為核反應所產生的對外壓力可以把氣體撐住，並和太陽重力抗衡，所以太陽是一顆很穩定的恆星。萬一星體內的燃料燒完了，核反應便停止，這時的星體會因為無力頂住萬有引力而往內塌縮。從量子力學可知，電子具有相斥性，當兩個電子靠得很近的時候會產生簡併壓力。所以當星體往內塌縮到某種程度時，裡面的電子會產生簡併壓力而與重力相抗衡，如果兩者達到平衡，這時候的星體就是白矮星。

只可惜電子能夠支撐的簡併壓力只有1.4個太陽質量那麼大，萬一場塌縮後的星體質量超過1.4個太陽質量，就沒有辦法再撐住，於是星體裡面的電子只好敲開原子核，與質子反

應形成一大堆中子。然而中子和電子一樣，不喜歡兩兩擠在一起，所以恆星的殘骸會繼續收縮，直到中子的密度足以抗拒重力壓縮時才停止，這時候的星球內部只剩下中子，所以稱為中子星。

截至目前為止，科學界對於中子星的內部結構仍不十分了解，就現在的推估所知，中子星的質量必須小於3.2個太陽質量，否則中子的簡併壓力仍然撐不住。但是，萬一場塌縮後的質量超過3.2個太陽質量，又該怎麼辦呢？那就沒什麼東西可以支撐了，所以重力塌縮會一直進行，一直到所有東西都擠到一個點上為止，這個點就是奇異點。

黑洞很單純也很恐怖

1973年，史蒂芬·霍金（Stephen

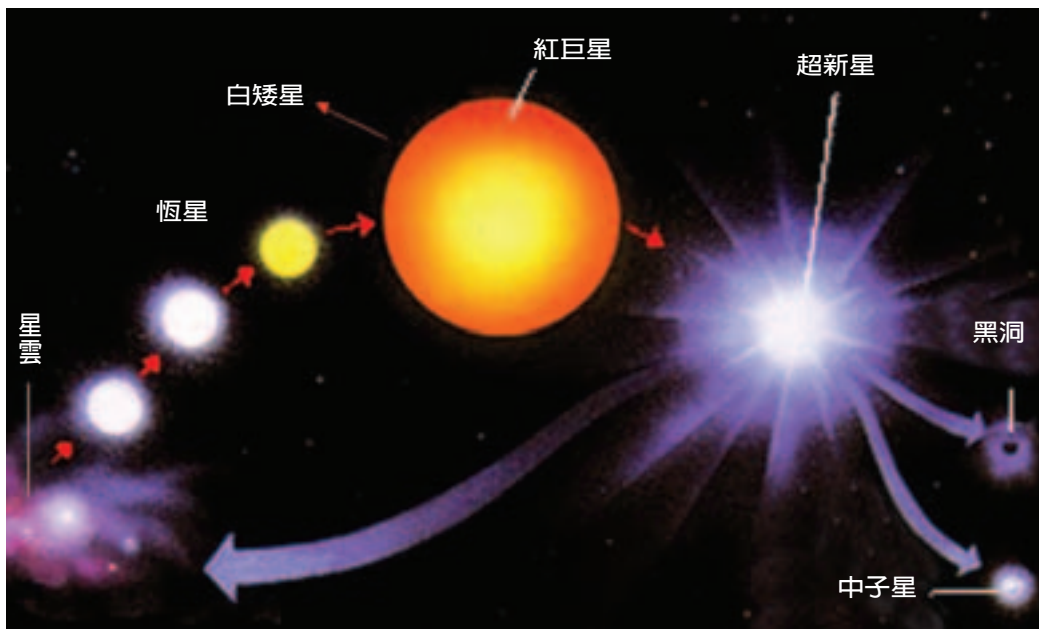
Hawking, 1942—）與羅傑·潘若斯（Roger Penrose, 1931—）推測每一個黑洞裡面都有一個奇異點。這個奇異點具有無限大的重力場和密度，且在某個範圍裡面，它的重力強度可以大到連光線也逃不出去。這種讓光線逃不出去的範圍邊界稱為視界，無論光線或物質，都只能從視界外面進入裡面，但是無法從裡面跑出來。黑洞，就是躲在視界後面的神秘區域。如此說來，黑洞應該是一個非常單純的星體，因為它只有一個奇異點和環繞在奇異點外圍的視界。

或許你想知道更多與黑洞有關的知識，再舉兩個例子。如果我們把地球上所有的人疊在一起，然後從外面施加壓力，把大家揉成一個黑洞，這個黑洞有多大呢？大概是一個質子這麼大。如果把地球上所有的東西都擠

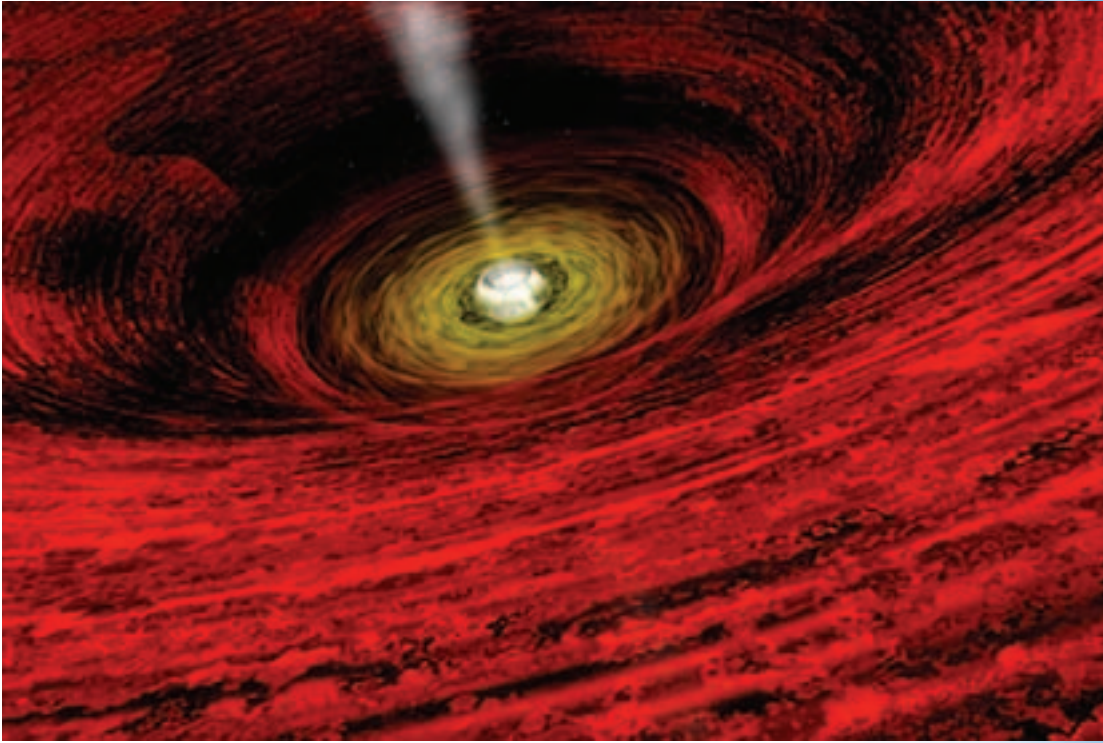
到一個點上，讓它形成一個黑洞，這個黑洞究竟有多大呢？大概是一個銅板這麼大。現在你可以發揮想像了：如果地球的質量全都集中在一個銅板大小的範圍內，這時的重力強度是何等的巨大與恐怖啊！

黑洞概念來自相對論

最早提出黑洞概念的人，是二百年前的劍橋學者約翰·米契爾



恆星的一生 星體由氣體合成，當中心溫度達攝氏1千萬度以上時，會出現「氫融合成氦」的核能反應而產生光熱，這時的星體稱為恆星。如果氫數量過少，「氫融合成氦的能量」不足以維持穩定平衡時，即進入「碳氮氧循環核能反應」的「變星」階段，這時星體四周滿是快速擴散、逐漸降溫的紅色氣體，稱為紅巨星。然而星體質量大小不一：質量和太陽差不多的星體，在中心燃料燒完時會停止核反應，內部即失去支撐力，星體往內塌縮變成白矮星。至於質量是太陽數倍的星體，在燃料耗盡時會膨脹爆炸，發出亮光，把物質以接近光速速度拋向四方，這就是「超新星爆炸」。超新星爆炸後，質量超過1.4個太陽的星體，其所留下的核心會變成一顆體積很小質量很大的中星；質量超過3.2個太陽質量的星體會一直塌縮，直到一個點上為止，這個點就是奇異點。奇異點和環繞在奇異點外圍的視界稱為黑洞。



圖片提供：國立自然科學博物館陳輝博士時間特展活動

黑洞

根據量子效應，黑洞的表面看上去應該會有物質往外跑，這就是黑洞輻射。又受角動量影響，黑洞附近的物質會形成高能噴流，當物質掉進旋轉非常快的黑洞時，會把總能量的42%釋放出來，這些快速變化的能量，會讓黑洞變得非常光亮。這是黑洞不黑反而很亮的原因。

(John Michell, 1724-1793)。雖然在他那個時代只有牛頓的絕對時空概念，但他依然在1783年提出與黑洞有關的想法—當一個物體的脫離速度大到無限大的時候，就連光線也無法逃離它的吸引力。米契爾把想像中的星體稱為「暗恆星」。

1790年，數學家拉普拉斯 (Pierre-Simon Laplace, 1749-1827) 利用牛頓力學公式演算，希望能找到隱形的恆星。奇怪的是，他所用的計算方法是錯誤的，但得到的答案卻是對的。不過這也沒啥大礙，因為在往後的一百多年中，人們對於黑洞依然沒能說出個所以然來。

這個情形直到愛因斯坦廣義相對論出現，把重力想像成一種「由時空彎曲所造成的萬有引力」後，大家循著這個邏輯推導才建立起黑洞的基本概念。

更有意思的是，有一個叫做史瓦茲 (Karl Schwarzschild, 1873-1916) 的人，竟然從超困難的愛因斯坦方程式中解出一個解，後來才知道，這個解可以用來描述一個不旋轉黑洞 (史瓦茲黑洞) 的時空結構。緊接著，另一個叫克爾 (Roy

Kerr, 1934-) 的人發現了會旋轉的黑洞。至於黑洞的名稱，則是約翰·惠勒 (John Wheeler, 1911-) 在1967年提出的，且在那以後的70年代，就是人類研究黑洞的黃金時代。

黑洞不黑還很亮

黑洞不但不黑而且還很亮，可能的原因主要有兩個。一是根據1974年霍金的黑洞蒸發理論，他把廣義相對論與量子力學合併思考，即根據量子效應，黑洞的表面看上去應該會有物質往外跑，這就是黑洞輻射。循這推衍，黑洞會被慢慢蒸發。可惜科學家看到黑洞輻射的機率微乎其微，因為小如一個太陽質量的黑洞，它的表面溫度是 10^{-8} K，想要觀測如此低溫的景象，本身就是一個高難度的極限挑戰。更何況，這個黑洞如果被蒸發，需要 10^{64} 年，這又是另一個遙不可及的極限時間。

黑洞很亮的第2個可能原因和重力位能的釋放有關。當物質遭受重力吸引朝黑洞跑去時，因為角動量的影響，這些物質會在黑洞外圍形成一

個吸積盤。

由喀卜勒（Johannes Kepler，1571-1630）的行星運動三大定理可知，當各個氣體繞著黑洞跑時，它的每一個半徑轉速不一樣，這又表示，吸積盤上的兩兩氣體環會互相摩擦，有摩擦就有熱，一旦熱到一定程度就會發射 X 光。這些由重力位能轉化成的熱能，會把吸積盤內的氣體（因為非常熱所以任何固體都會被汽化）熱化成電漿。如果吸積盤裡有磁場，電漿可能被加速到接近光速，形成我們觀測到的高能噴流。

另外，有些黑洞會旋轉，有旋轉就有旋轉能量，這些能量也可能被旋轉磁場抽出來放到吸積盤上去，隨即又被轉換成噴流的能源。且當物質掉進一個旋轉非常快的黑洞時，它會把

總能量的 42% 釋放出來。這些快速變化的能量，讓黑洞變得非常光亮。如此說來，我們該用什麼工具觀測黑洞比較好呢？那些散落在宇宙中的黑洞，是不是也有大小等級的分別呢？

使用重力波觀看宇宙

在觀測黑洞的時候，科學家把黑洞分成 3 個等級。一個是由一般恆星塌縮後形成的輕量級黑洞，它的質量有十個到幾十個太陽質量，密度很大，重力場很強。另一個是住在活躍星系核中心，每個質量約等於 100 萬

我們習慣利用電磁波觀測宇宙，如果用電磁波觀看黑洞，當光子在黑洞附近產生時，在傳播中就會受到黑洞附近物質的干涉，然而由於重力波不怕干擾，所以可以用重力波觀看黑洞附近的時空結構。

個到 10 億個太陽質量的重量級黑洞。人們曾在我們的銀河系和附近星系中觀測到這類黑洞，所以重量級黑洞已證明確實存在。

然而在輕量和重量中間，有沒有中量

級黑洞呢？中量級黑洞的質量比輕量級大，所以在地球附近不容易找到，但它的質量又要比重量級黑洞小，所以不如重量級黑洞來得亮。如此說來，尋找中量級黑洞似乎是個不輕鬆又有點麻煩的事，還好一切順利，人們真的找到一個約 1 千個太陽質量那麼大的黑洞，從此確認了中量級黑洞的存在。

觀看黑洞還有一個重要技巧，就是要使用正確的工具。我們原本習慣利用電磁波觀測宇宙，因為電磁波容易產生，容易觀測，但它有一個缺點——在傳播中會受到物質的干涉。比方說，光子在傳播電磁波的時候，如果碰到不透明物質，一部分光子會被吸收掉，另外一部分光子會被反射掉。

同理，如果用電磁波觀看黑洞，因為黑洞附近有很多物質，當光子在黑洞附近產生時，若要傳遞到眼睛來，必須穿過這些物質，而在傳遞過程中就會產生很多吸收與反射，使得我們沒辦法看到最原始的光子，這是用電磁波看宇宙的缺點。

如果使用重力波就沒這個缺點。因為重力波不怕干擾，可以穿透物質直接傳播到觀測者眼中，所以可以用重力波觀看黑洞附近的時空結構。至於如何產生重力波呢？只要有兩個重力場的東西互相繞行就可以了。例如，有兩個黑洞互相繞行，或是一個中子星與一個黑洞互相繞行時，就能產生重力波。

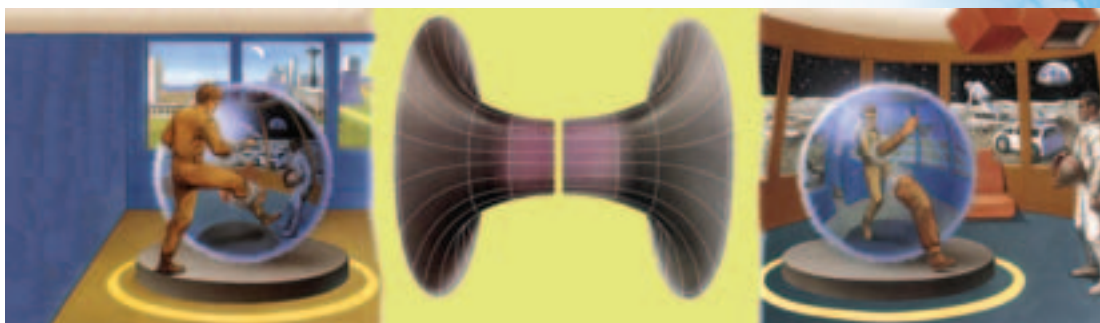
真的有白洞、蟲洞嗎

既然有黑洞，那麼有沒有白洞呢？白洞是一個理論上的名詞，科學家仍在努力摸索是不是真有白洞存



由位於美國華盛頓州及路易斯安那州的兩處設施所組成的雷射干涉重力波天文台（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO），是研究重力波的利器。圖中所顯示的是位於華盛頓州的設施。愛因斯坦在 1916 年所提出的廣義相對論中預測重力波的存在，但到了 21 世紀，科技才進步到可以實際偵測及研究它。

http://www.ligo.caltech.edu/LIGO_web/PR/scripts/photos.html Credit: LIGO Laboratory



圖片提供：國立自然科學博物館陳耀輝博士時間
特展活動

黑洞

科學界有個想法：太空中或許有蟲洞，穿過蟲洞，可以進入另一個時空，那地方可能是未來也可能是過去。

在？不過就理論來說，黑洞是一個只能進不能出的洞，所有流進黑洞裡的物質，是不是正等待宇宙的毀滅呢？還是正等待從另一個宇宙湧出呢？如果從另一個宇宙湧出，那麼，和黑洞相反，能讓所有東西只出不進的白洞，是不是就是這個「出口」呢？偏偏這個時候，科學家又蹦出另外一個想法—在這兩個「洞」中間，是不是另有一個叫蟲洞的「門」呢？

蟲洞是科幻小說家很喜歡寫的東西，在電影裡面也曾出現這樣的場景—眼前突然出現一條扁扁的、狹長的細縫，從這裡穿過去，立刻進入另一個時空，那地方，可能是未來也可能是過去。這條細縫，就是科學家朝思暮想的蟲洞。如果純粹從理論上說，我們應該可以形成一個蟲洞，只是形成以後它非常不穩定，馬上會消失，甚至無法讓我們從蟲洞裡面穿過去。若以現代科學技術來說，要做蟲洞仍是非常困難的事，然而弔詭的是，我們也沒有辦法證明做不出蟲洞來。

引領企盼量子重力理論

黑洞已經逐漸由理論的遐想成為觀測事實，雖然我們沒有看到黑洞的邊緣，但在黑洞研究過程中，發現了許多有意思的事，重力波的運用就是其中一樁。

由於大部分物質對重力波來說是透明的，所以用重力波可以看到黑洞附近的時空結構，或是用重力波觀看蟲洞或白洞的時空結構。更妙的是，甚至可用重力波測試相對論的正確性。到目前為止，所有相對論實驗都是在重力場比較弱的

太陽系裡面做，既然重力波可在超強重力場產生，那麼，何不用它來檢驗在超強重力場裡面的相對論理論，究竟是對還是不對。

最後提醒大家，奇異點的重力場很強、密度很大，時空曲率非同小可，這使得大家對

於研究奇異點的物理性質躍躍欲試。就體積來看，奇異點非常小，所以需要量子力學幫忙。而它的重力場又非常強，所以需要廣義相對論推導。只可惜，廣義相對論與量子力學不和，到現在仍沒有一個真正的理論可以把這兩個理論結合在一起，所以大家只能耐心等待，等待「量子重力理論」誕生。若是你能發展出這樣的理論，或許諾貝爾物理獎的得主就是你了！ □

黑洞已經逐漸由理論的遐想成為觀測事實，雖然我們沒有看到黑洞的邊緣，但在黑洞研究過程中，發現了許多有意思的事，重力波的運用就是其中一樁。

演講人／蔡駿

清華大學天文所

文字整理／張志玲

本刊特約文字編輯

科學是一種生活的態度，是一種運用邏輯思考的方法和追根究柢的精神，去解決在日常生活上和宇宙探索中所遇見的問題的態度。為了讓社會大眾了解科技發展的趨勢，由國科會主辦，中央大學理學院科學教育中心承辦的「2004展望系列演講」，秋季部分「科學的極限」自93.10.15陸續展開，本篇是第3場講座的整理與補充。