

2015年的9月14日，人類第一次偵測到13億光年外兩個黑洞的合併事件，這個遙遠的事件形成了一個新的黑洞，0.6秒的合併過程中約等於三個太陽的質量轉變成為能量，這個新天體向四面八方放射出的重力波能量甚至比那一瞬間全宇宙的恆星發出的亮光還亮。這個事件不僅象徵人類尋找黑洞的里程碑，也開啓了科學家探索宇宙的新領域。

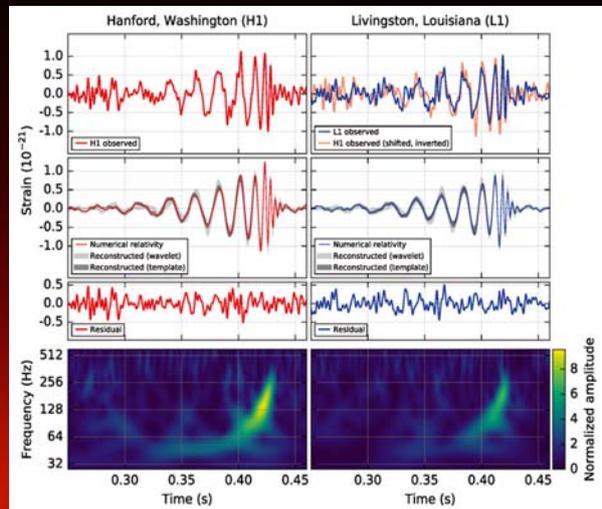


圖1. 雙黑洞撞擊產生的重力波事件觀測結果。  
 圖片來源：B. P. Abbott et al./LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration

# 認識黑洞



圖2. 與黑洞有關的科學家們。

## 黑洞研究的歷史

有關「黑洞」的概念最早可以回溯到18世紀，1687年牛頓提出萬有引力定律之後，科學家最感興趣的目標是利用牛頓的理論去計算和預測那些在天上會移動的天體—行星、月亮及彗星，1758年的閃亮彗星是牛頓定律的顛峰成就，哈雷根據牛頓定律計算並預測這個彗星的週期運動，在哈雷去世16年之後它如期回歸。在這些受科學家矚目的會移動的天體之外，僅有少部份的科學家對恆星的形成和相關的理論感到興趣。

18世紀的天文學家用最先進的望遠鏡觀察宇宙的各個角落時，發現非常多的雙星系統，當時普遍認為雙星系統僅是在天空中的投影位置看似彼此接近，其實分別在離地球不同且遙遠的位置上。同時期的科學家對於光的認識也以牛頓的「光粒子」概念為主。1784年英國科學家及牧師約翰·米歇爾（John Michell）提出了牛頓版本的黑洞假說，指出真正彼此接近的雙星系統是計算恆星質量的最佳目標，並可以從它們的質量計算出引力對「光粒子」運動的影響。

約翰·米歇爾假設光粒子從恆星向外運動，運動時亦會受到來自恆星本身的引力，當恆星愈大，光粒子的運動速度會受引力影響減慢，當恆星的質量大到所有的光粒子都會被它拉回去的時候，會形成無法看到任何光粒子發射出來的黑色天體「暗星」，根據約翰·米歇爾的計算這樣的暗星若與太陽的密度相同時，其半徑可達太陽半徑的500倍。當無

法觀測到的天體存在時，觀測者又該如何發現它呢？

另外一位著名的數學家拉普拉斯，也曾在他的1796年宇宙論研究的著作《宇宙體系論》中提到過「具有如同地球一樣密度的發亮恆星，它的直徑比太陽大250倍，其引力將無法讓光線射出，因此宇宙間最大的發光體可能是看不見的。」

兩位科學家在受限的牛頓定律及誤解的光理論基礎上，建立了人類最早的黑洞想像，約翰·米歇爾甚至給出極具創造性的觀測「暗星—黑洞」之方法。他提出若暗星的旁邊存在發光的恆星，它將因為暗星的引力影響，看起來好像在天空中來回晃動。這正是現代天文學家尋找黑洞的基本方法之一。



圖3. 暗星想像圖。Created by Dall-E3

隨著時間來到1915年，愛因斯坦提出的廣義相對論，替黑洞存在的可能性找到了最新的方向。廣義相對論描述的引力不僅是質量產生的重力，而是時空結構曲面的變形。質量越大的物體，其附近時空的曲率就越大。這個由引力形成的曲面會造成光線傳遞路徑的彎曲。並且在1919年的日食天象觀測中由愛丁頓爵士觀測恆星位置時證實。

恆星的演化終點會因為恆星的質量不同而差異極大，可能會形成白矮星（1873年發現）、中子星（1969年發現）或黑洞，1931年錢德拉塞卡根據理論計算得到類似太陽的恆星最終將形成白矮星，其質量上限為1.44倍太陽質量，1939年歐本海默計算中子星質量上限約為0.7倍太陽質量（後經修正為1.5至3倍），超過這兩個極限質量的恆星最終將成為黑洞。

1916年卡爾·史瓦西（Karl Schwarzschild）對廣義相對論的方程式提出了一個球形對稱的靜態解，描述一個靜態（不會自轉、不帶電荷）的極大質量天體的邊界，球體的半徑正是史瓦西半徑。在這個半徑形成的邊界之內會產生無限大的時空曲率，以至於連光都無法逃逸。後來科學家才了解並用以描述黑洞的半徑。

史瓦西半徑計算式

$$R_s = 2GM / C^2$$

任何具有質量的物體，若壓縮至其史瓦西半徑以內皆可以形成無限大時空曲率。如太陽的史瓦西半徑約為3km，地球的史瓦西半徑則僅約有9mm。根據史瓦西半徑計算式可以發現黑洞的質量和半徑成正比，若將黑洞的質量除以體積（史瓦西半徑的3次方），進一步推導可以得到一個有趣的結果——質量愈大的黑洞，密度會愈低。根據計算，一個半徑等於可視宇宙大小的黑洞，約等於可視宇宙的平均密度。

## 黑洞的觀測

黑洞本身無法直接觀測到，因為它們的引力場如此之強，以至於連光都無法逃脫。然而，天文學家可以通過觀察黑洞周圍的物質來推斷黑洞的存在。隨著觀測技術的發展，天文學家對黑洞的觀測取得了重大進展，在20世紀，天文學家發現了一些被認為可能是黑洞的天體，例如位於銀河系中心的人馬座A\*（1995年發現）。2015年LIGO探測到黑洞合併過程中的重力波訊號。2019年事件視界望遠鏡（EHT）發表室女座的M87\*的觀測結果，首次拍攝到黑洞的真實照片。

黑洞周圍的物質會受到黑洞引力的強烈影響，並會發出強烈的各波段電磁輻射。天文學家可以使用不同波段的望遠鏡來觀測這些訊息。黑洞還會與其周圍的恆星和星系產生互相的影響。圍繞黑洞運行的恆星，其軌道會發生扭曲，星系中心的超大質量黑洞會導致星系中心出現噴流及相關的巨大球狀泡泡結構等現象，天文學家可以通過觀察這些效應來推斷黑洞的質量和自轉。

## 黑洞的最新研究結果

近年來，天文學家在黑洞研究方面取得了一系列重大進展。例如，天文學家發現了雙黑洞的合併。還發現了超大質量黑洞的證據，這些黑洞的質量是太陽質量的數百萬倍甚至數十億倍。這些超大質量黑洞被認為存在於大多數星系的中心，並在星系的形成和演化中發揮著重要作用。這些發現為我們提供了對黑洞的新認識。當天文學家重新檢視20世紀中觀測到的許多不同天體時，發現它們都與黑洞有千絲萬縷關聯。

## 幾種與星系核心中的 超大質量黑洞相關的天體

### 1943年發現的西佛星系

1943年發現的西佛星系（Seyfert Galaxy I & II），具有極亮星系核的星系，在各波段電磁頻率都有強烈的輻射，其中來自星系中的氫、氦等元素的發射譜線呈現強烈的都卜勒效應增寬現象。



←圖4. 天鷹座  
NGC 6814 SF I

↓圖5. 長蛇座  
NGC 3081 SF II

## 1939年發現的電波星系

1939年發現的電波星系，在無線電頻率10MHz~100GHz波段非常明亮。

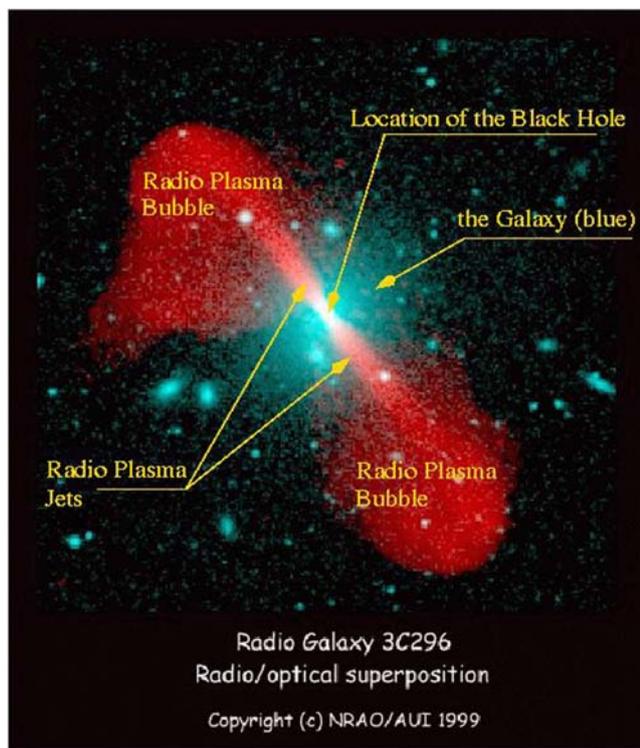


圖6. 橢圓星系3C 296的無線電波段（紅）和可見光波段（藍）的重合影像，自NGC 5532中心的黑洞所噴發出的帶電粒子噴流長達將近百萬光年遠。

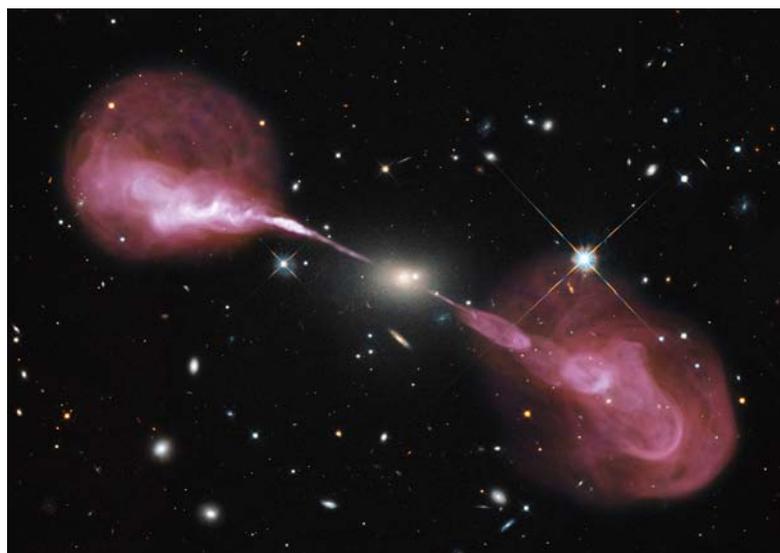


圖7. 天鵝座A（3C 405）是一個電波星系，並且是天空中最強的無線電源之一。它是由Grote Reber於1939年發現的。

## 1963年發現的類星體QSO

光學觀測影像有如一般恆星，光譜有未知的寬發射譜線，具有極端的紅移值。最後確認是遙遠的高速運動天體。由於其發出的巨大能量推測是活躍的年輕星系核心。

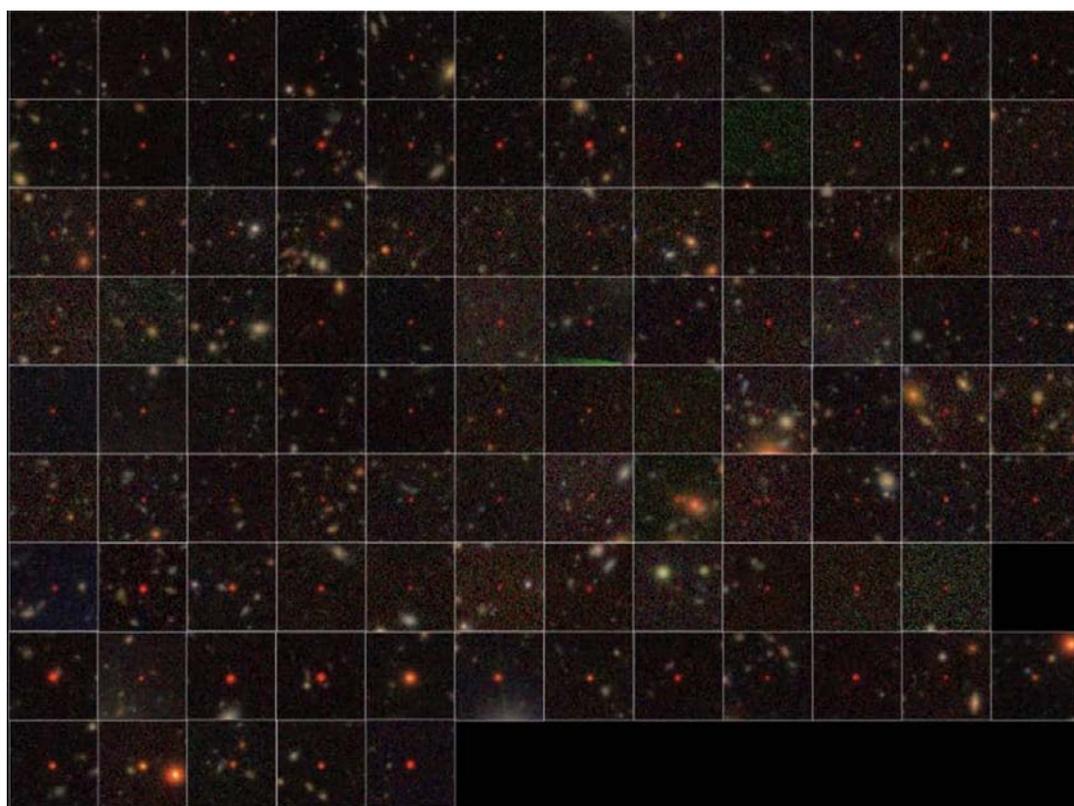


圖8. 早在1950年代，劍橋大學第三版無線電巡天觀測星表（3C星表）中就發現奇異電波天體。

## 1968年發現的 蝎虎座BL (BL Lac) 及同型天體

其亮度可以在一周內變化兩倍，也可以在幾個月內變化15倍，沒有規律性，電波、紅外、X射線、光學波段都有快速變化。

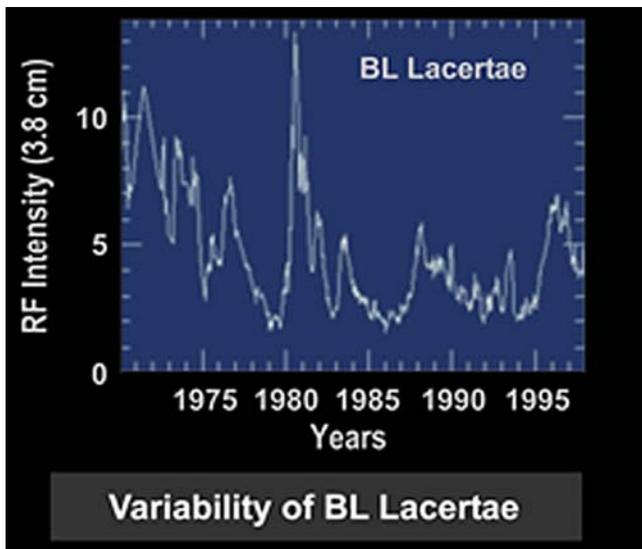
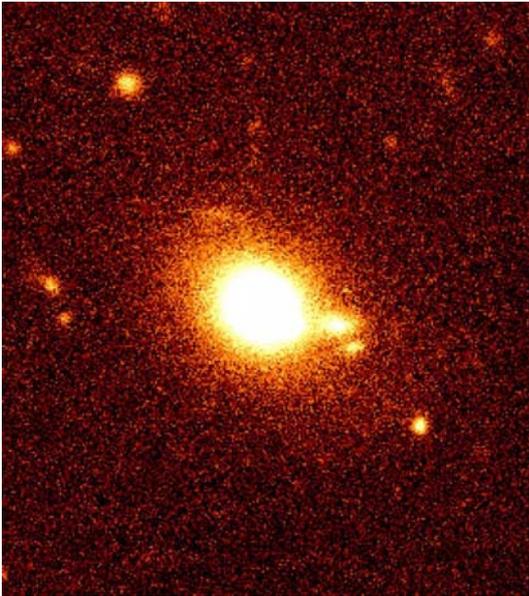


圖9、10. BL Lac (上) 與其在1970至1998年間的亮度變化圖(下)。

## 1980年發現的 低電離星系核 (LINERs) 星系

LINER星系非常普遍，大約有三分之一的星系可以歸類為LINER星系，天文學家一直在爭論這些星系中心激發氣體電離的能量來源，這些奇異天體都與超大質量黑洞有關。



圖11. 室女座的M104星系被認為是低電離星系核 (LINERs) 星系。

## 超大質量黑洞具有以下的幾種特徵

### 1 噴流 (Jet) :

在無線電波段及可見光，X-ray及 $\gamma$ -ray波段有強烈的輻射。

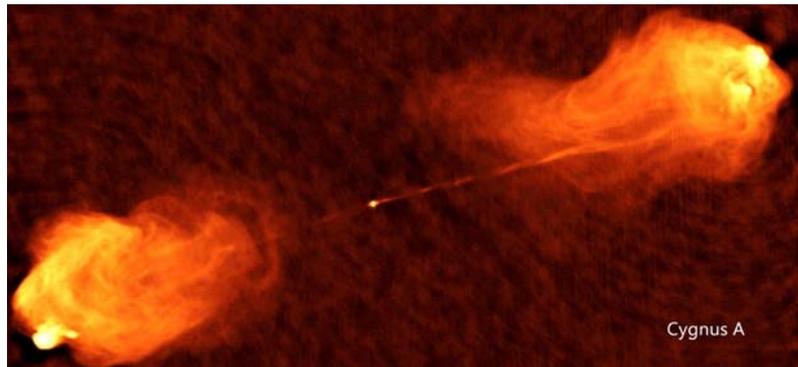


圖12. 天鵝座A。

### 2 吸積盤 (Accretion Disk) :

環繞黑洞的瀾散物質盤面結構，輻射峰值在紫外光及可見光波段。

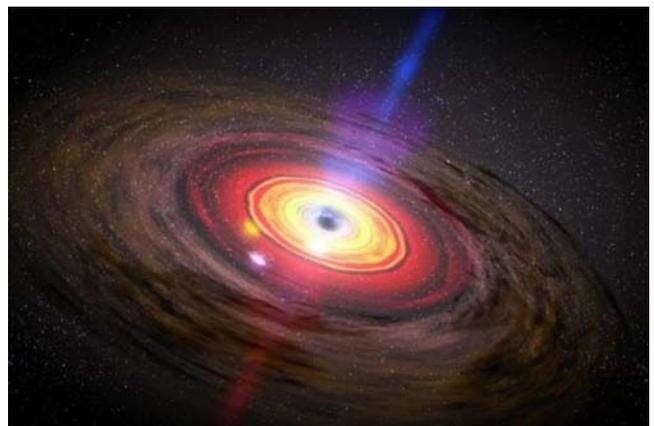


圖13. 黑洞吸積盤想像圖。

### 3 冕區 (Corona)

吸積盤上方的區域，以反康普頓散射的方式將光子提高至X光的能量，輻射主要為X射線。

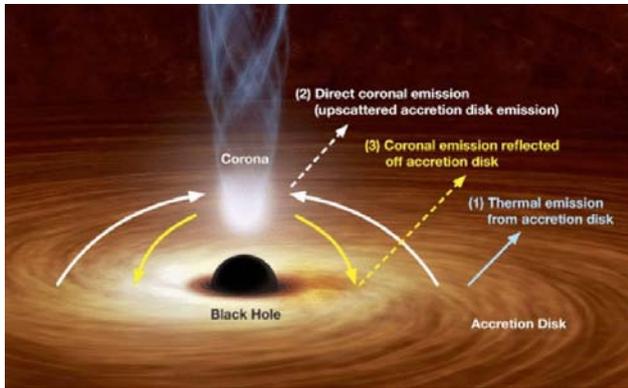


圖14. 鄰近黑洞中心之構造。

### 4 塵埃環及氣體雲 (Dusty Torus & Gas Clouds)

塵埃環會吸收吸積盤的紫外輻射，再轉為發射紅外輻射，同時也會擋住內部的光。

吸積盤的外緣有一圈較厚的塵雲環造成遮蔽效果，在軸向 (face-on) 觀測，就只能看見正對著的噴流，看不見吸積盤及其他發射譜線區，結果就是觀測到有劇烈光變的BL Lac天體。如果傾角中等，塵雲環不至於完全遮蔽視線，可看見寬發射譜線區以及部分中央吸積盤輻射區，如西佛I型星系或是寬線電波星系。假如傾角過於側向 (edge-on)，塵雲環就會完全遮蔽吸積盤和靠內側的寬線區，只能看到較外側的窄線區，也就是西佛II型星系或是窄線電波星系。

黑洞是宇宙中最神秘的天體之一，也是研究現代天文學的重要領域之一。黑洞的研究可以幫助我們了解宇宙的起源和演化，以及引力的本質。最新的重力波觀測直接打開人類觀察這個宇宙的另一扇窗。且讓我們與天文學家一起透過黑洞去了解這個宇宙的真面目。

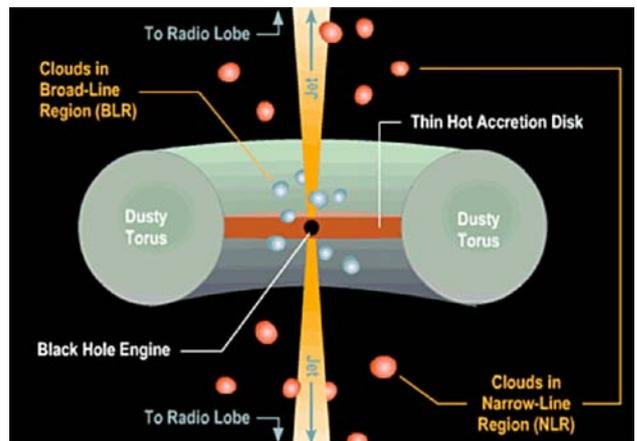
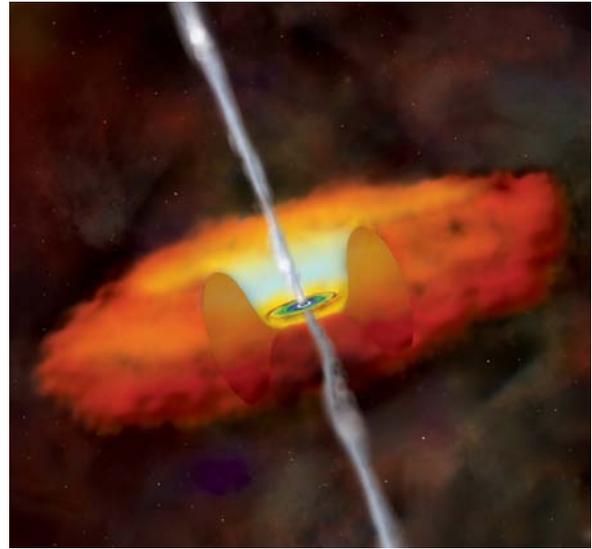


圖15、16. 黑洞及它的各種現象。

楊擘群：臺北市立天文科學教育館

表1. 天文學家將這些黑洞依質量大小分成四種不同的類型：

| 黑洞的類型  | 黑洞的質量範圍<br>(與太陽質量相比)                    | 黑洞的半徑                             |
|--------|---|-----------------------------------|
| 超大質量黑洞 | $10^5 \sim 10^{10}$ 或更大<br>(10萬倍太陽質量以上) | $> 0.001\text{AU}$ (數十萬公里以上)      |
| 中等質量黑洞 | $10^4$ (數千倍到數萬倍)                        | $> 10^3$ 公里 (數千公里, 約為地球大小)        |
| 恆星質量黑洞 | $10 \sim 10^2$ (數倍到數百倍)                 | $> 10$ 公里 (數十公里, 約為臺北市大小)         |
| 微型黑洞   | $10^6$ 公克~月球質量                          | $< 0.1\text{mm}$ (10分之1公釐以下比砂粒還小) |