

黑洞 — 超級比一比

黑洞是一種重力強大到連光都無法脫離其「表面」的天體。天文學家一開始並不相信這種理論預測的奇怪天體，後來根據眾多的觀測證據與推敲，逐漸認為黑洞普遍存在於宇宙中。主要是因為黑洞（相較於其他所有可能天體）最合理描述了許多天體如何能以特有的方式影響周圍天體或氣體運動，或是讓鄰近物質在掉入天體之前能釋放出極為可觀的輻射。這些往黑洞掉入的物質形成了稱為黑洞吸積流的結構，部分吸積流能在掉入黑洞表面前逃逸，甚至有可能被磁場集體加速，形成黑洞噴流的壯觀現象。

我們可以根據黑洞的質量幫黑洞分類，從數個太陽質量的**恆星級質量黑洞**，到數百萬甚至數十億太陽質量的**超大質量黑洞**。這些黑洞系統往往因為吸積流或是噴流而顯得明亮顯眼。前者位於星系的不同位置，形成原因是由大質量恆星演化末期因為重力塌縮而產生，且當黑洞形成時，可能會伴隨產生**伽瑪射線爆**的事件。後者多位於星系的中心，可能是由於黑洞的不斷合併而形成，這類超大質量黑洞能藉由輻射、噴流、與衝擊波影響著恆星的形成，對**星系演化**有重要的作用。

形成黑洞的關鍵是「緻密」。本期季報中我們藉由尺寸和質量來比較不同系統的緻密程度。如果要進一步探討緻密天體的特性，尤其是黑洞周圍特殊的時空特性，就需要了解廣義相對論對引力的描述。並非所有被黑洞吸引的物質都會掉入黑洞。在離黑洞很遠的地方，黑洞所造成的引力表現幾乎符合牛頓的萬有引力定律。

儘管有許多間接證據暗示某些天體的本質是黑洞，但因為這些天體在天空中實在是太小且距離我們太遙遠了，目前實際的天文觀測還不具有足夠的解析度，來一窺黑洞並取得其存在的直接證據。根據廣義相對論，當帶有質量的物體變得更加緻密的時候，物體周圍的時空特性會變得十分特殊：空間沿著徑向方向被拉長，且時間的流逝速率越接近質量中心則流逝得越慢！光線在這樣的彎曲時空行進時也不再是走直線。藉由國際合作和特長基線干涉儀（VLBI）觀測技術的發展，在不久的將來，我們將有機會以足夠的影像解析度，觀測到黑洞附近的有趣影像與其他資訊，來驗證黑洞的存在以及廣義相對論的正確性。目前中研院天文所所進行的「格陵蘭望遠鏡（GLT）及「事件視界望遠鏡」（EHT）計畫，正是致力於這樣的目標！

黑洞內部

卜朗克尺度

卜朗克尺度



在卜朗克尺度以下，對於尺寸大小的物理概念變得無法定義。人們認為大自然中的重力、電磁力、強核力及弱核力強度在此尺度會統合成強度相當的力。尚在發展的量子重力理論在這個尺度變得重要。

量子領域

康卜吞波長

康卜吞波長

根據量子理論，物質也具有波動的特性，稱為物質波。這個由 $R=h/Mc$ (h 為卜朗克常數, c 為光速) 的界線，稱為康卜吞波長，也標註了物質所對應的最小波長，可看成是測量基本粒子位置準確度的極限。物質波波長越短，波動特性越不明顯。

事件視界

這個由 $R=GM/c^2$ (G 為重力常數, c 為光速) 定義的界線標註了黑洞的「表面」，或稱為事件視界 (event horizon)。事件視界其實是一個摸不到的虛擬表面。量子物理對事件視界的周圍，以及黑洞內部質量的聚集處（即奇異點）的理論描述，目前還在蓬勃發展中。但這些量子效應對目前已經發現疑似黑洞的天體並沒有觀測上的重要性。

事件視界

原子密度

兩個原子間的引力作用和電磁力相比是極其微弱的。當我們逐漸把越來越多的原子「揉成團」時，物質的質量 M 隨著體積 (R 的三次方) 成正比，如右方藍線所示。因為引力聚集的系統或具有著近似球形的外觀（例如月球、地球、木星、太陽等等），並且大致沿著右圖的原子密度線分布。這樣的曲線並不會無止盡的增長而最終和上方的「事件視界」相交。因為隨著質量的增加，最終這些「原子團」能形成一個引力束縛的系統，並由於自身引力而產生往內塌縮的力。恆星利用內部的核融合反應產生往外的輻射壓和高溫的氣體壓力，以抵抗往內的重力而達成平衡。白矮星和中子星為恆星歷經燃料耗盡而塌縮後的緻密天體，由伴隨產生的簡併壓力與重力達成平衡以維持型態穩定。黑洞則為引力系統完成塌縮 ($R <$ 事件視界) 而形成的天體。因為恆星演化到末期而形成的黑洞，就是恆星級質量的黑洞來源。而黑洞與黑洞的合併則可能形成質量更大的黑洞。

原子核



原子

人類

原子核

卜朗克長度

10⁻³⁰

10⁻²⁰

10⁻¹⁰

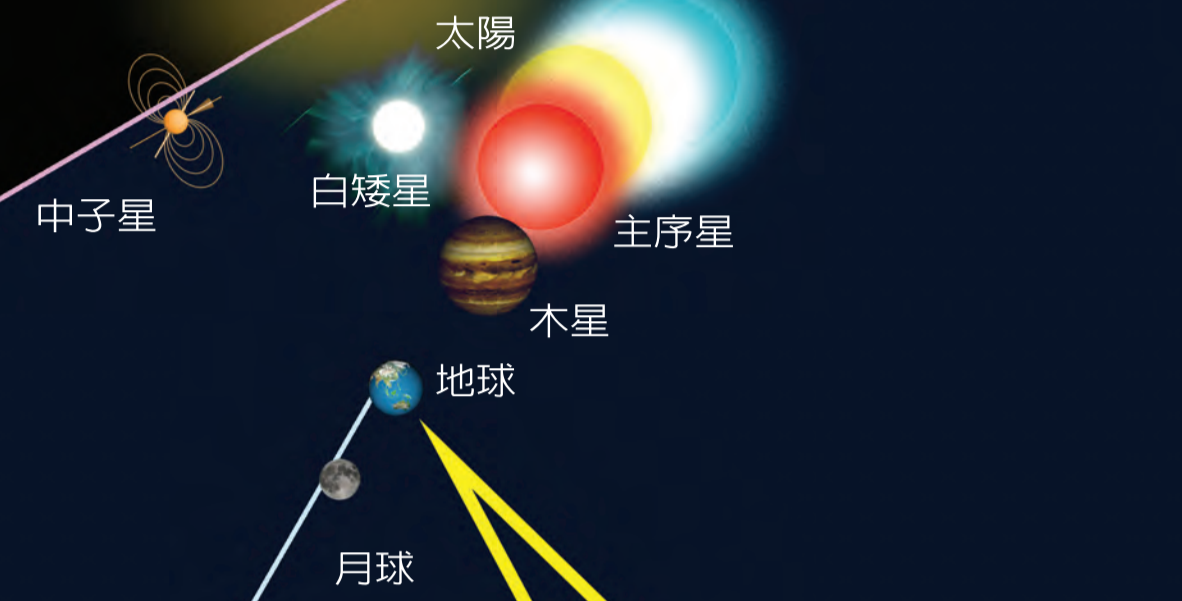
1

10¹⁰

10²⁰

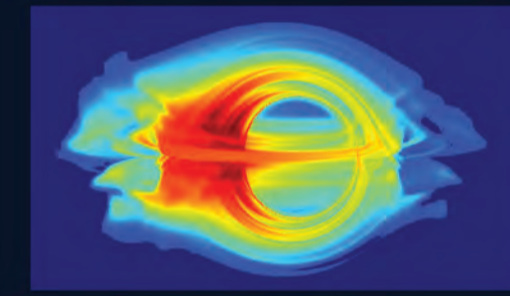
尺寸 R (公尺)

C&D



格陵蘭望遠鏡 (GLT) 計畫：

在地球上看見黑洞的「身影」



圖說：根據廣義相對論以及吸積流的計算，所模擬出吸積流環繞旋轉黑洞的影像。 © 中研院天文所 / 卜宏毅

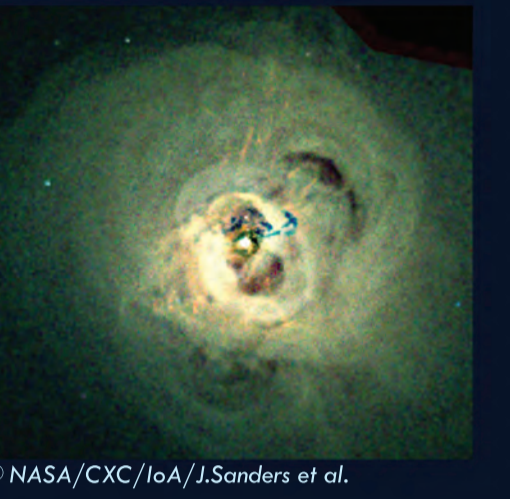


上圖：計畫工作人員前往格陵蘭的圖勒 (Thule) 進行望遠鏡組裝 (感謝國防部贊助防寒衣)。下圖：未來在毫米 / 次毫米波段的 VLBI 觀測，需要世界上許多不同地方的望遠鏡共同合作。中研院天文所與其合作機構將在格陵蘭建立的電波望遠鏡將是重要的成員之一。 © 中研院天文所。



A. 黑洞對星系(團)的作用

星系中心的超大質量黑洞能藉由吸積流的輻射或是吸積過程伴隨的噴流，將能量從黑洞附近的小尺度分布到整個星系乃至於星系外面的大尺度中。這樣的過程造成了星系中氣體的吹散或是加熱，也間接影響了星系中的恆星形成或是星系的整體亮度。天文學家也發現了許多超大質量黑洞與其所在的星



© NASA/CXC/IaA/J.Sanders et al.

系環境之間的關係，暗示了黑洞對於宇宙結構演化的影響。右圖是Perseus星系團由錢卓 (Chandra) 太空望遠鏡拍攝的X光影像。影像中明顯的類似連漪與泡泡的氣體結構，正是位於星系中心渺小的超大質量黑洞(相對於星系團的尺度而言)，居然能影響整個大尺度結構的例子。

B. 超大質量黑洞

這類位在星系中心黑洞其質量約為數百萬到數十億個太陽質量 (事件視界大小約為太陽系的尺寸)，藉由吸積流釋放出來的輻射能讓星系中心特別明亮。右圖是星系 Hercules A 在可見光以及電波波段的合成影像。因為超大質量黑洞 (約 25 億個太陽質量) 與吸積流的存在而明亮顯眼的星系中心，以及比星系本身尺度要大上好幾倍的噴流結構皆清晰可見。



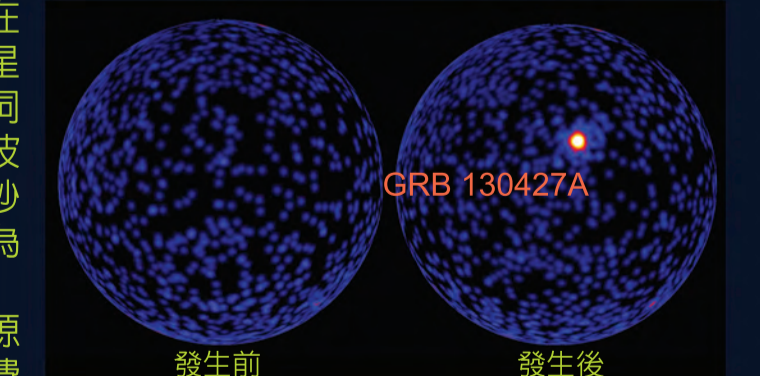
© NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

C. 恆星級質量黑洞

此類的黑洞質量約有十到百個太陽質量 (其事件視界約為新北市大小)。若圍繞著另一個巨星伴件而進行著雙星運動，則形成 X 射線雙星系統。左圖是 Cygnus X-1 由錢卓 (Chandra) 太空望遠鏡拍攝的 X 光影像，這些能量的來源是黑洞吸積盤。Cygnus X-1 是第一個被公認的恆星級質量黑洞。在此雙星系統中，有個約太陽質量 15 倍的黑洞。

D. 伽瑪射線爆

大質量的恆星在最終產生超新星爆炸並形成黑洞時，會在高能波段產生為期數秒的高能閃爍，為「伽瑪射線爆」(GRB) 的來源之一。右圖是費米 (Fermi) 太空望遠鏡捕捉到伽瑪射線爆事件 GRB 130427A 在發生前和發生後的影像。



© NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration



黑洞— 超級比一比

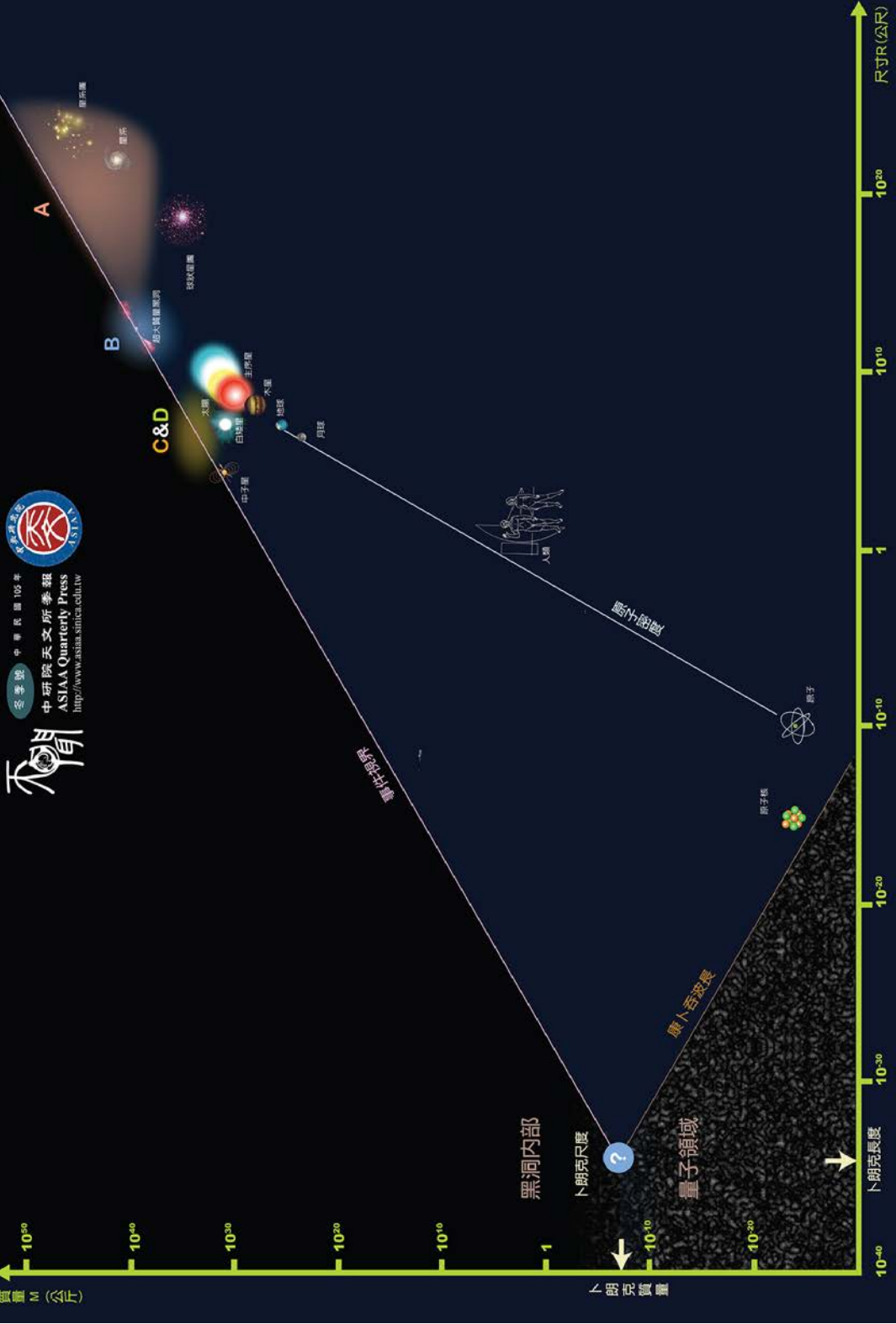
黑洞是一種重力強大到連光都無法脫離其「表面」的天體。天文學家一開始並不相信這種理論預測的奇怪天體，後來根據眾多的觀測證據與推敲，逐漸認為黑洞普遍存在於宇宙中。主要是因為黑洞(相較於其他所有可能天體)最合理描述了許多天體如何能以特有的方式影響周圍天體或氣體運動，或是讓鄰近物質在掉入天體之前能釋放出極為可觀的輻射。這些往黑洞掉入的物質形成了稱為黑洞吸積流的結構，部分吸積流能在掉入黑洞表面前逃逸，甚至有可能被磁場集體加速，形成黑洞噴流的壯觀現象。

我們可以根據黑洞的質量幫黑洞分類，從數個太陽質量的恆星級質量黑洞，到數百萬甚至數十億太陽質量的超大質量黑洞。這些黑洞系統往往因為吸積流或是噴流而顯得明亮顯眼。前者位於星系的不同位置，形成原因是由大質量恆星演化末期因為重力塌縮而產生，且當黑洞形成時，可能會伴隨產生伽瑪射線爆的事件。後者多位於星系的中心，可能是由於黑洞的不斷合併而形成，這類超大質量黑洞能藉由輻射、噴流、與衝擊波影響著恆星的形成，對星系演化有重要的作用。

形成黑洞的關鍵是「緻密」。本期季報中我們藉由尺寸和質量來比較不同系統的緻密程度。如果要進一步探討緻密天體的特性，尤其是黑洞周圍特殊的時空特性，就需要了解廣義相對論對引力的描述。並非所有被黑洞吸引的物質都會掉入黑洞。在離黑洞很遠的地方，黑洞所造成的引力表現幾乎符合牛頓的萬有引力定律。

儘管有許多間接證據暗示某些天體的本質是黑洞，但因為這些天體在天空中實在是太小且距離我們太遙遠了，目前實際的天文觀測還未具有足夠的解析度，來一窺黑洞並取得其存在的直接證據。根據廣義相對論，當帶有質量的物體變得更加緻密的時候，物體周圍的時空特性會變得十分特殊：空間沿著徑向方向被拉長，且時間的流逝速率越接近質量中心則流逝得越慢！光線在這樣的彎曲時空行進時也不再是走直線。藉由國際合作和特長基線干涉儀(VLBI)觀測技術的發展，在不久的將來，我們將有機會以足夠的影像解析度，觀測到黑洞附近的有趣影像與其他資訊，來驗證黑洞的存在以及廣義相對論的正確性。目前中研院天文所所進行的「格陵蘭望遠鏡」(GLT)及「事件視界望遠鏡」(EHT)計畫，正是致力於這樣的目標！

(主筆/卜宏毅)



質量 M (公斤) 半徑 R (公尺)

圖表名詞解釋

卜朗克尺度

在卜朗克尺度以下，對於尺寸大小的物理概念變得無法定義。人們認為大自然中的重力、電磁力、強核力及弱核力強度在此尺度會統合成強度相當的力。尚在發展的量子重力理論在這個尺度變得重要。

康卜吞波長

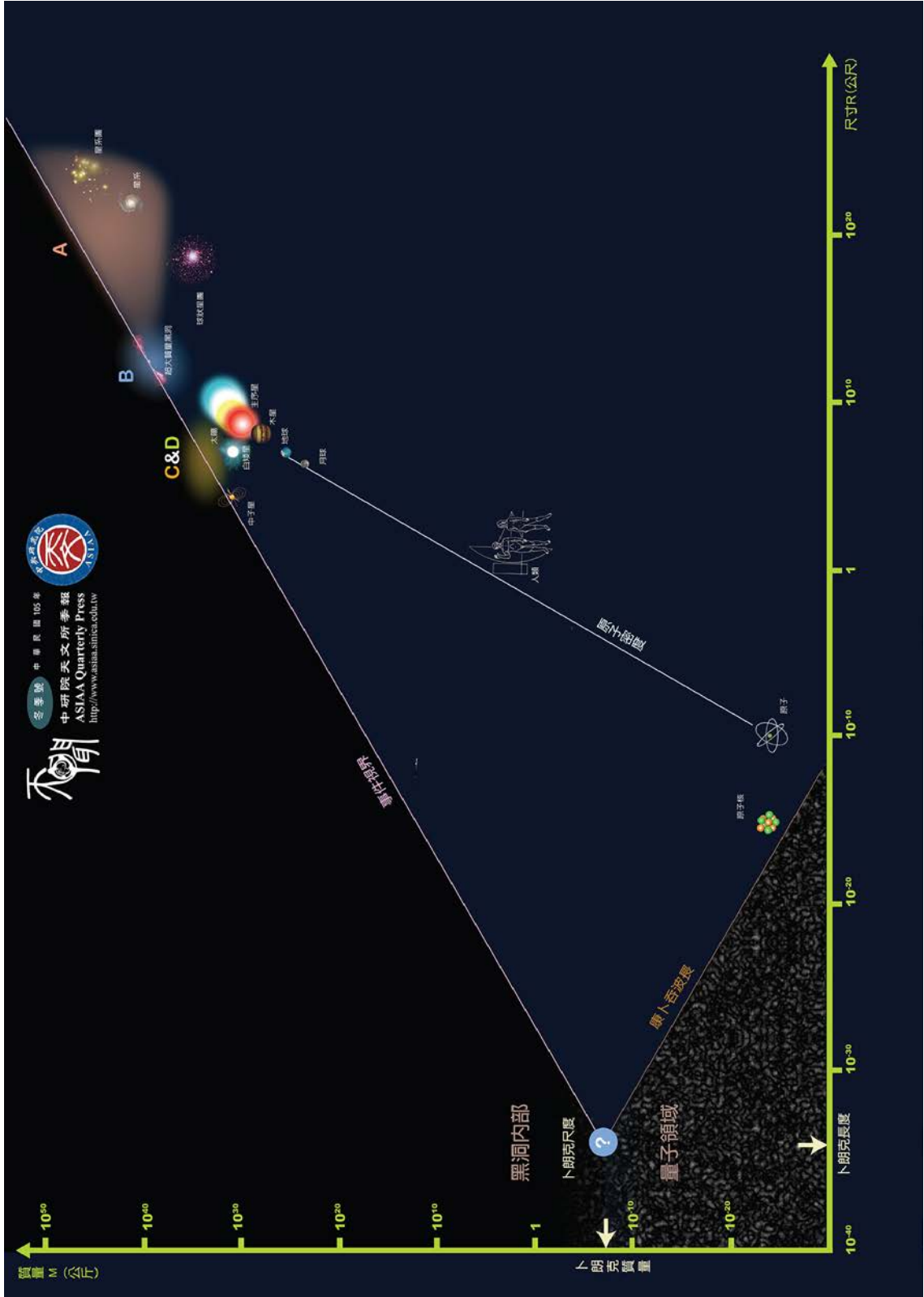
根據量子理論，物質也具有波動的特性，稱為物質波。這個由 $\lambda = h/Mc$ (h 為卜朗克常數， c 為光速) 的界線，稱為康卜吞波長，也標註了物質所對應的最小波長，可看成是測量基本粒子位置準確度的極限。物質波波長越短，波動特性越不明顯。

事件視界

這個由 $R = GM/c^2$ (G 為重力常數， c 為光速) 定義的界線標註了黑洞的「表面」，或稱為事件視界(event horizon)。事件視界其實是一個摸不到的虛擬表面。量子物理對事件視界的周圍，以及黑洞內部質量的聚集處(即奇異點)的理論描述，目前還在蓬勃發展中。但這些量子效應對目前已經發現疑似黑洞的天體並沒有觀測上的重要性。

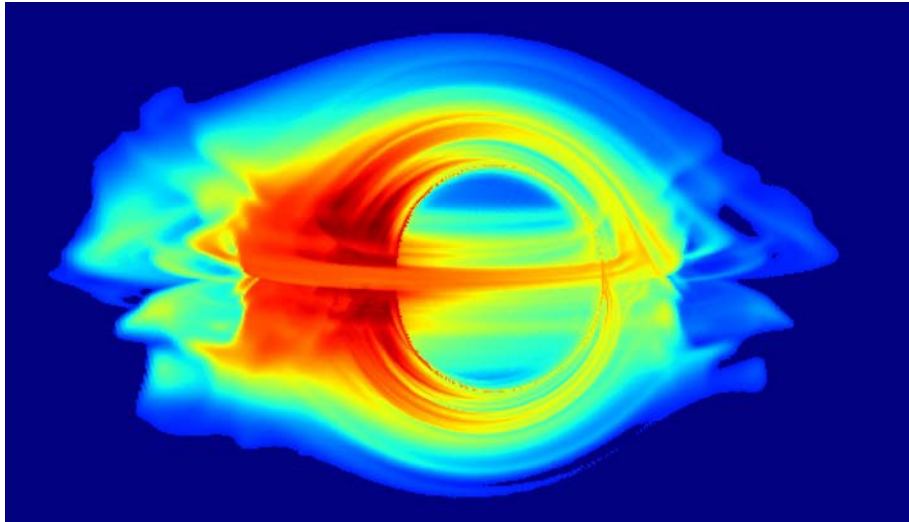
原子密度

兩個原子間的引力作用和電磁力相比是極其微弱的。當我們逐漸把越來越多的原子「揉成團」時，物質的質量 M 隨著體積(R 的三次方)成正比，如右方藍線所示。因為引力聚集的系統成員有著近似球形的外觀(例如月球、地球、木星、太陽等等)，並且大致沿著右圖的原子密度線分布。這樣的曲線並不會無止盡的增長而最終和上方的「事件視界」相交。因為隨著質量的增加，最終這些「原子團」能形成一個引力束縛的系統，並由於自身引力而產生往內塌縮的力。恆星利用內部的核融合反應產生往外的輻射壓和高溫的氣體壓力，以抵抗往內的重力而達成平衡。白矮星和中子星為恆星歷經燃料耗盡而塌縮後的緻密天體，由伴隨產生的簡併壓力與重力達成平衡以維持型態穩定。黑洞則為引力系統完成塌縮($R <$ 事件視界)而形成的天體。因為恆星演化到末期而形成的黑洞，就是恆星級質量的黑洞來源。而黑洞與黑洞的合併則可能形成質量更大的黑洞。



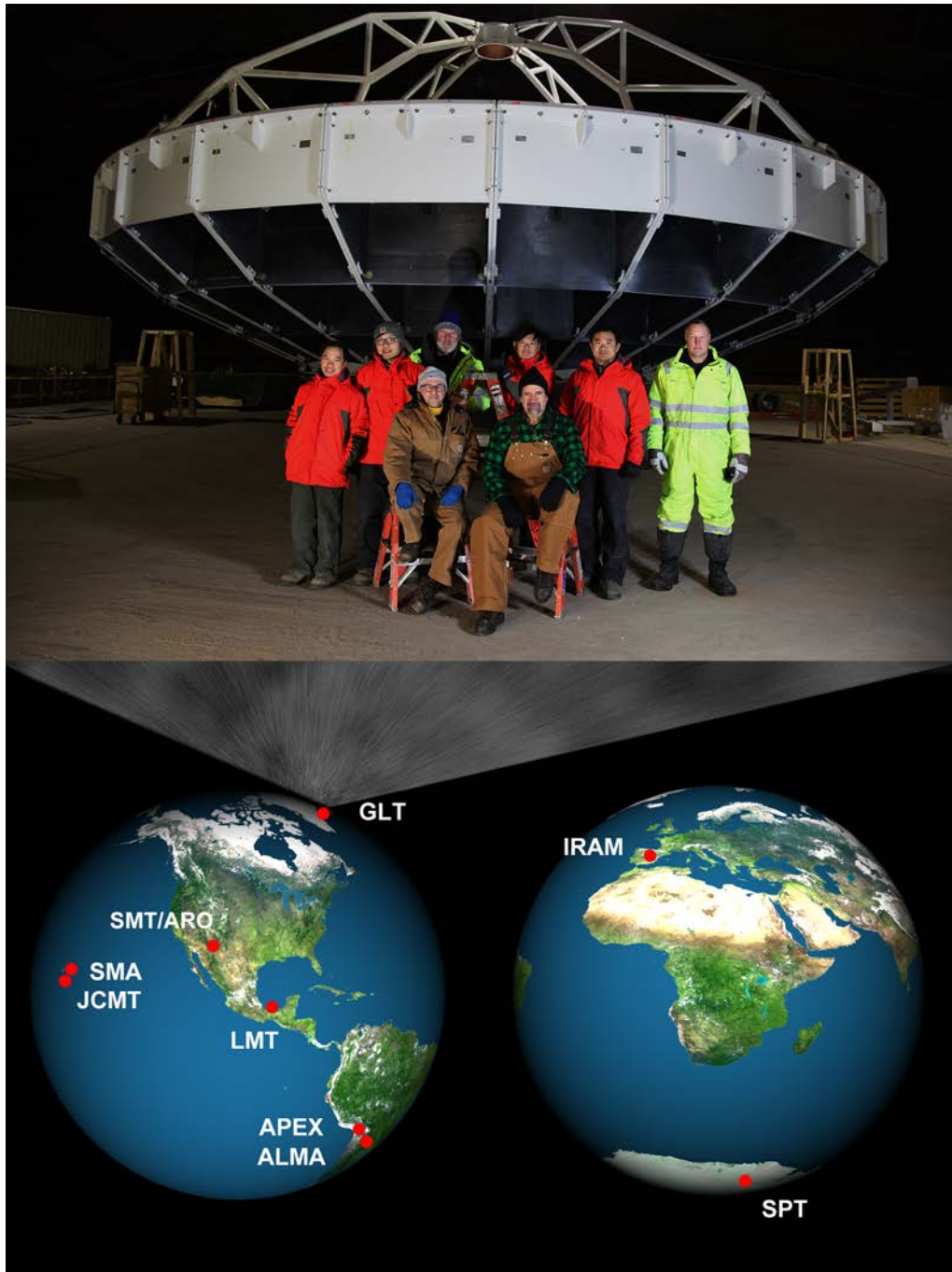
格陵蘭望遠鏡 (GLT) 計畫：

在地球上看見黑洞的「身影」



圖說：根據廣義相對論以及吸積流的計算，所模擬出吸積流環繞旋轉黑洞的影像。

©中研院天文所/卜宏毅



上圖：計畫工作人員前往格陵蘭的圖勒(Thule)進行望遠鏡組裝(感謝歐都納贊助防寒衣)。下圖：未來在毫米/次毫米波段的 VLBI 觀測，需要世界上許多不同地方的望遠鏡共同合作。中研院天文所與其合作機構將在格陵蘭建立的電波望遠鏡將是重要的成員之一。©中研院天文所。



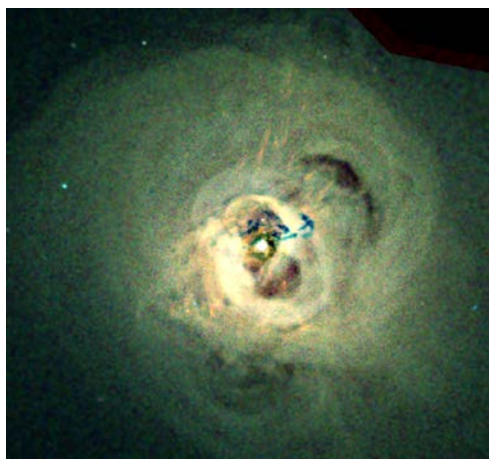
更多關於 GLT 的進程請掃描上方 QR Code 。

(主筆/卜宏毅)

各式黑洞簡介

A. 黑洞對星系(團)的作用

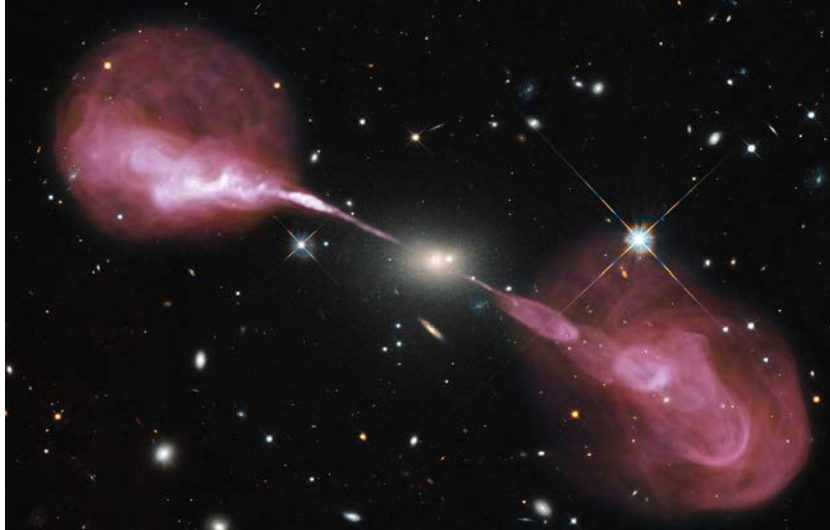
星系中心的超大質量黑洞能藉由吸積流的輻射或是吸積過程伴隨的噴流，將能量從黑洞附近的小尺度分布到整個星系乃至於星系外面的大尺度中。這樣的過程造成了星系中氣體的吹散或是加熱，也間接影響了星系中的恆星形成或是星系的整體亮度。天文學家也發現了許多超大質量黑洞與其所在的星系環境之間的關係，暗示了黑洞對於宇宙結構演化的影響。右圖是 Perseus 星系團由錢卓 (Chandra) 太空望遠鏡拍攝的 X 光影像。影像中明顯的類似漣漪與泡泡的氣體結構，正是位於星系中心渺小的超大質量黑洞 (相對於星系團的尺度而言)，居然能影響整個大尺度結構的例子。



©NASA/CXC/IoA/J.Sanders et al.

B. 超大質量黑洞

這類位在星系中心黑洞其質量約為數百萬到數十億個太陽質量 (事件視界大小約為太陽系的大小)，藉由吸積流釋放出來的輻射能讓星系中心特別明亮。右圖是星系 Hercules A 在可見光以及電波波段的合成影像。因為超大質量黑洞 (約 25 億個太陽質量) 與吸積流的存在而明亮顯眼的星系中心，以及比星系本身尺度要大上好幾倍的噴流結構皆清晰可見。



©NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

C. 恆星級質量黑洞

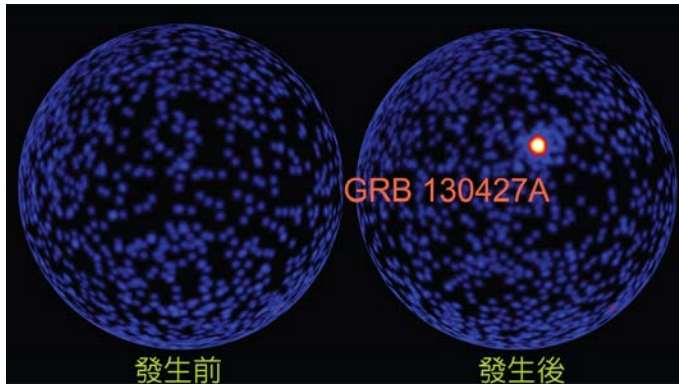
此類的黑洞質量約有十到百個太陽質量(其事件視界約為新北市大小)。若圍繞著另一個巨星作伴而進行著雙星運動，則形成 X 射線雙星系統。左圖是 Cygnus X-1 由錢卓(Chandra) 太空望遠鏡拍攝的 X 光影像，這些能量的來源是黑洞吸積盤。Cygnus X-1 是第一個被公認的恆星級質量黑洞。在此雙星系統中，有個約太陽質量 15 倍的黑洞。



©DSS

D. 伽瑪射線爆

大質量的恆星在最終產生超新星爆炸並形成黑洞時，會在高能波段產生為期數秒的高能閃暴，為「伽瑪射線爆」(GRB)的來源之一。右圖是費米(Fermi)太空望遠鏡捕捉到伽瑪射線爆事件 GRB 130427A 在發生前和發生後的影像。



©NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

(主筆/卜宏毅)

編輯資訊

發行人 | 朱有花。

執行主編 | 周美吟。

美術編輯 | 蔡殷智。

執行編輯 | 林峻哲、曾耀寰、劉君帆、蔣龍毅。

本期主筆 | 卜宏毅。

底圖影像版權聲明 | 原子核、原子、月球、地球、太陽、中子星、白矮星、主序星 © 中研院天文所；

球狀星團 © 王為豪；人類 © NASA；星系 © NASA/ESA；

星系團 © NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (Racah Institute of Physics/The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA。

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所。

地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓。(臺北市羅斯福路四段 1 號)。

電話 | (02) 2366-5415。

電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw。

天間季報版權所有 | 中研院天文所。

ISSN 2311-7281。

GPN 2009905151。

天間季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民衆作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段 1 號 中央研究院/臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天間季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天間季報上刊登喔！