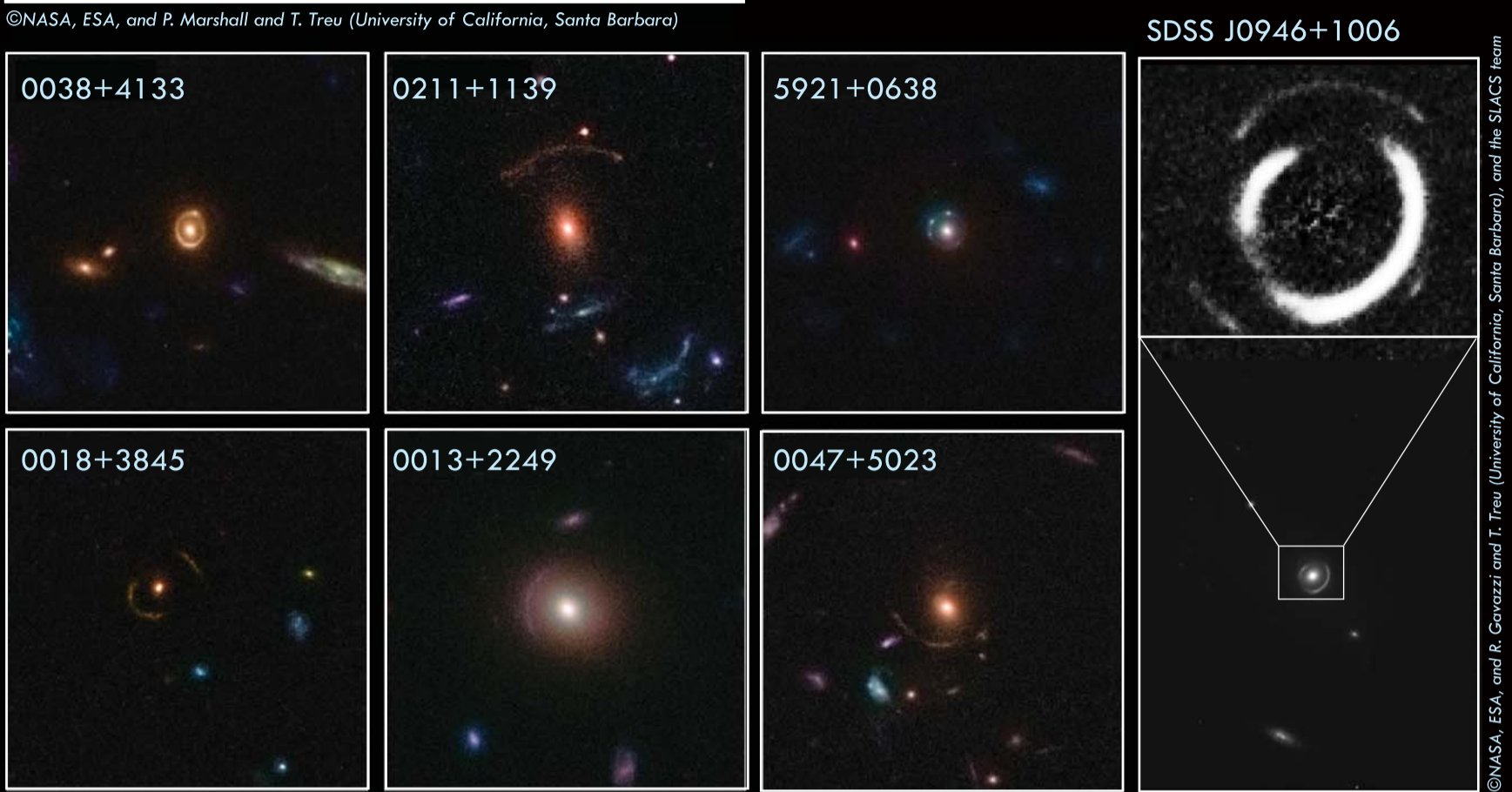


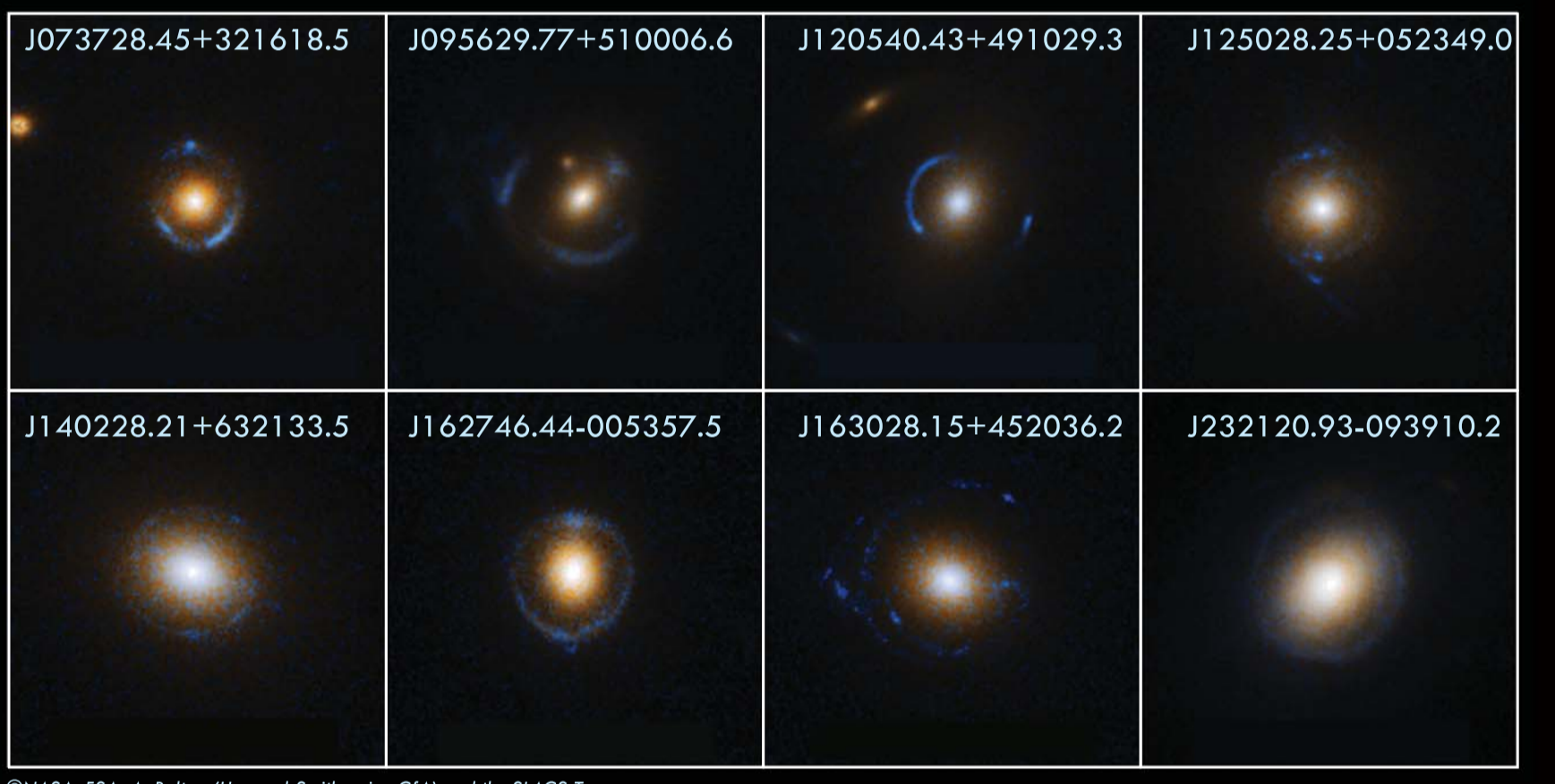
【環狀影像】

當重力透鏡系統的各個主角們完美排列成一直線，而且扮演透鏡的是大質量密度的球形對稱天體時，透鏡就會把光源傳來的光散開成完整的環狀影像，也就是所謂的「愛因斯坦環」。

第一個「愛因斯坦環」在1988年被發現。光源是遠方的一個星系，而作為重力透鏡的是一個包含暗物質的大質量星系團。



©NASA, ESA, and R. Goetz and T. Treu (University of California, Santa Barbara) and the SLACS Team



©NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA) and the SLACS Team

宇宙的哈哈鏡館

強重力透鏡圖集



強重力透鏡效應的類型

作為強重力透鏡的天體通常是質量密度大又集中的球形對稱天體，其重力場作用很強，光線偏折角度較大，透過望遠鏡所看到的成像會被放大，產生多點影像、圓弧影像、或是人稱「愛因斯坦環」的環狀影像。

【多點影像】

重力透鏡系統各個主角們的排列如果稍微彎曲，或者透鏡為橢圓星系，那麼背景光源的不同部位會環繞著透鏡星系以不同比例放大形成多個影像，有時會產生如「愛因斯坦十字」的多點影像。

1985年第一個被紀錄的愛因斯坦十字—Q2237+030，是重力透鏡效應最著名的例證之一。十字中央的光點是距離地球約4億光年作為透鏡的前景星系(ZW 2237+030)，對稱分佈於四周的光點是距離地球80億光年的類星體(QSO 2237+0305)受到重力透鏡作用而形成的多重影像。



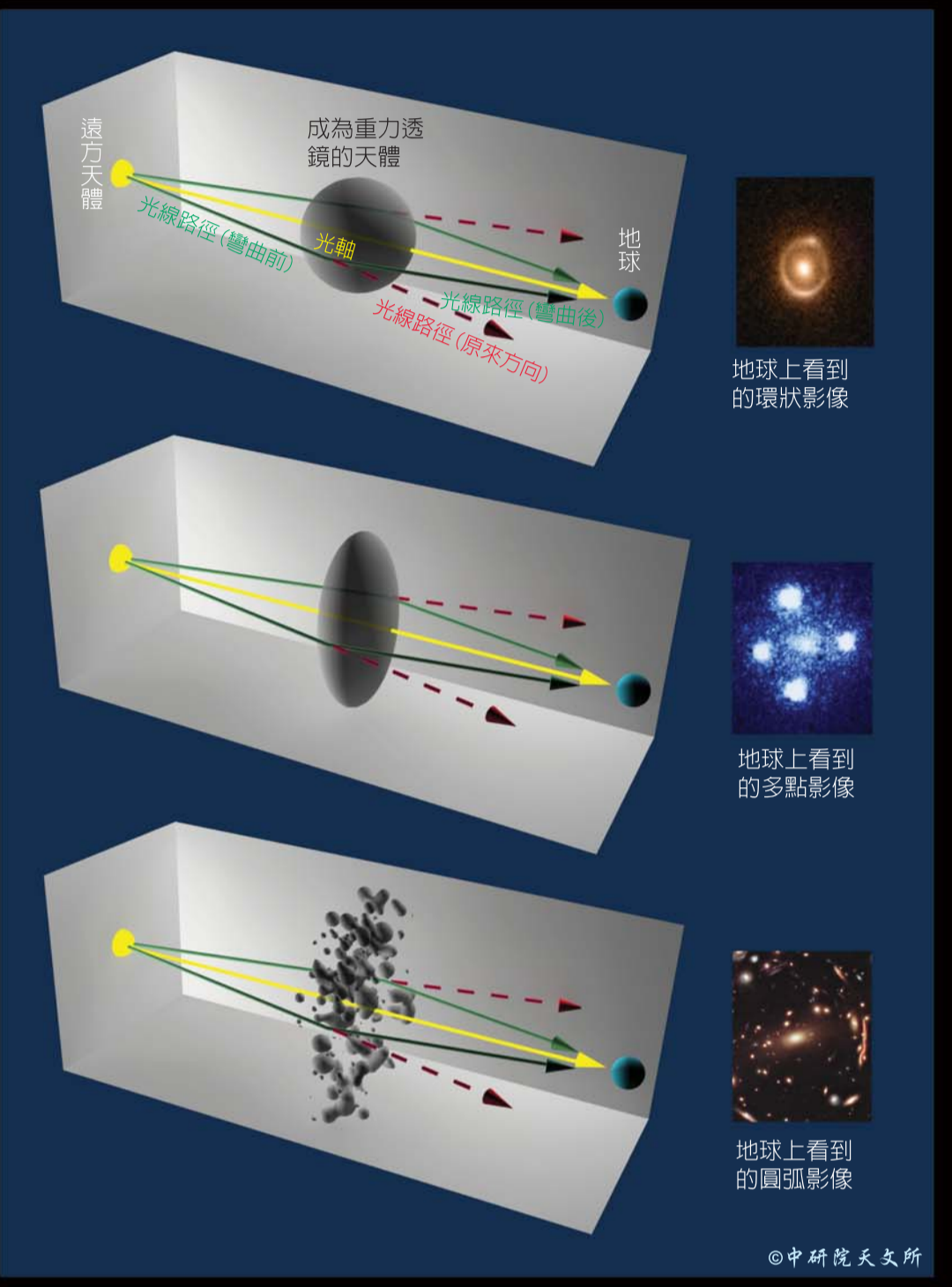
©NASA, ESA, and STScI

重力透鏡效應的成像原理簡介

1979年，天文學家觀測類星體Q0597+561時，發現其發出的光線受到前方星系的重力影響而彎曲，於是在另一個位置出現一模一樣的類星體成像。這是人類第一次觀察到重力透鏡效應。

人們原本認為光線走的是直線，只有當反射、折射、或繞射時才會改變行進方向。但是根據愛因斯坦的廣義相對論，太空中巨大天體（比如：星系、星系團及黑洞）的質量會產生重力場，光線經過天體附近時，會像通過透鏡一樣發生彎曲並改變行進的方向。太空中重力場造成光線偏折的現象因為和光學透鏡作用雷同，所以被稱為重力透鏡效應，而影響光線路徑的天體就是重力透鏡。只不過重力透鏡作用與光線的種類和波長無關，光線偏移的程度主要取決於重力場的強弱，並和光源與透鏡的最短距離成反比。

重力透鏡效應系統的主角有四個，觀測者、背景光源、位於光源與地球之間的重力透鏡、以及包含前三者的空間。透鏡系統會因各主角的特性差異、主角間相對位置的變化而產生不同效應—包括成像的形狀、大小、光度及光度變化的時間等等。目前發現的重力透鏡效應類型大致可依此歸類為三種：強重力透鏡效應、弱重力透鏡效應及微重力透鏡效應。原則上，前兩種效應作為重力透鏡的前景天體，其質量與分佈範圍都得夠大才行，若是星球或行星則只能造成微重力透鏡效應。



©中研院天文所

透鏡效應的研究應用

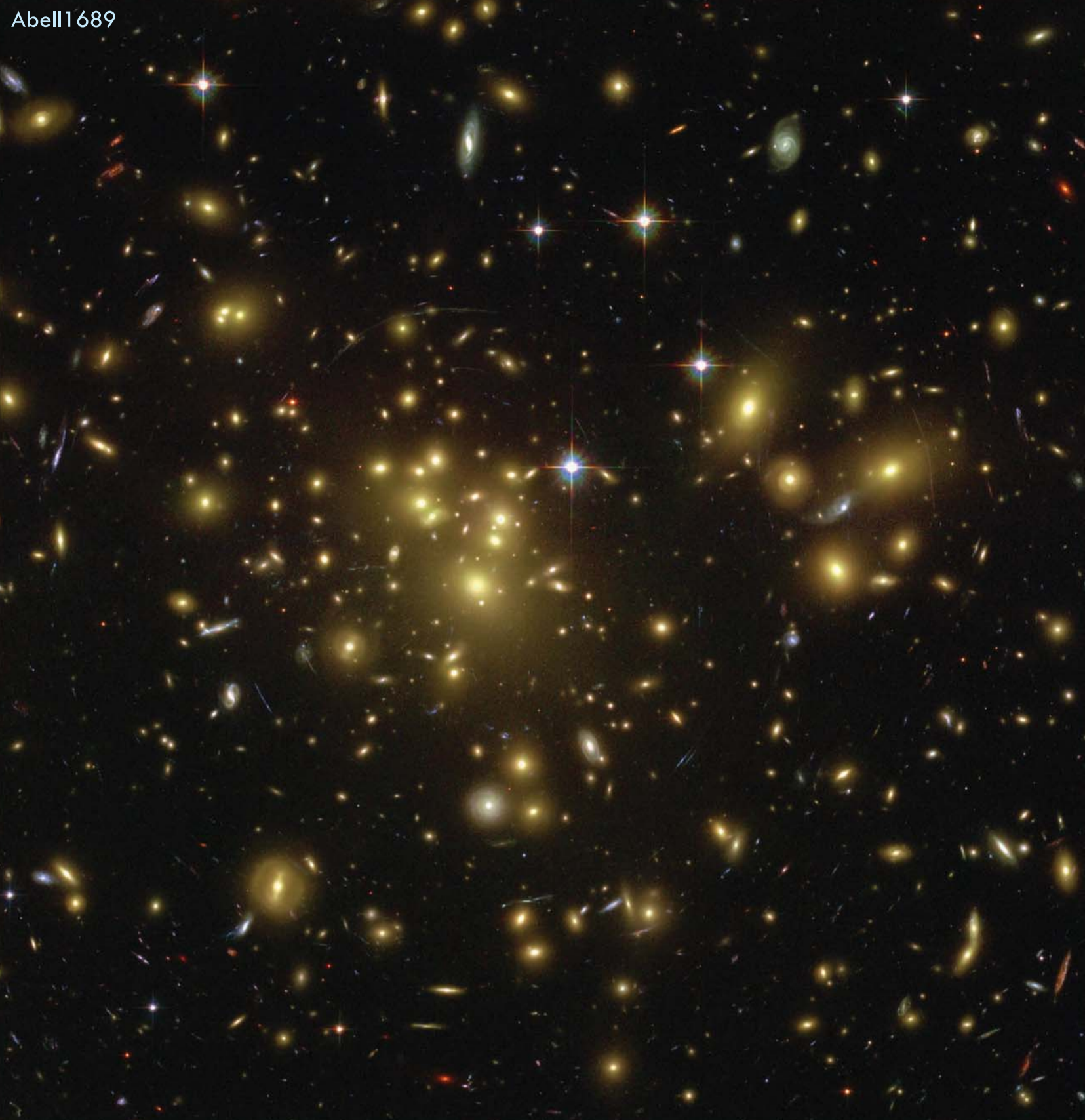
重力透鏡效應除了可用來發現或觀測作為「背景光源」的宇宙天體外，也可以利用來分析作為「透鏡」的天體特性。現代天文學利用觀測，收集記錄各類型重力透鏡效應產生的不同數目或型態的影像照片，並配合光譜及統計等分析，可取得作為「透鏡」的重力場的質量密度分布、結構演化及運行等資料—尤其是黑洞、暗物質或暗能量，並有助進一步推論宇宙形狀及解讀各種宇宙演化學說。

【圓弧影像】

類似多點影像的成像原理，當重力透鏡系統主角們的排列稍微彎曲，或者透鏡為橢圓星系，此時如果背景光源是非點狀、向外延伸的天體，光源的不同部位會環繞著透鏡以不同比例放大形成多個成像，在以透鏡為中心的圓周上，排成香蕉狀的圓弧。



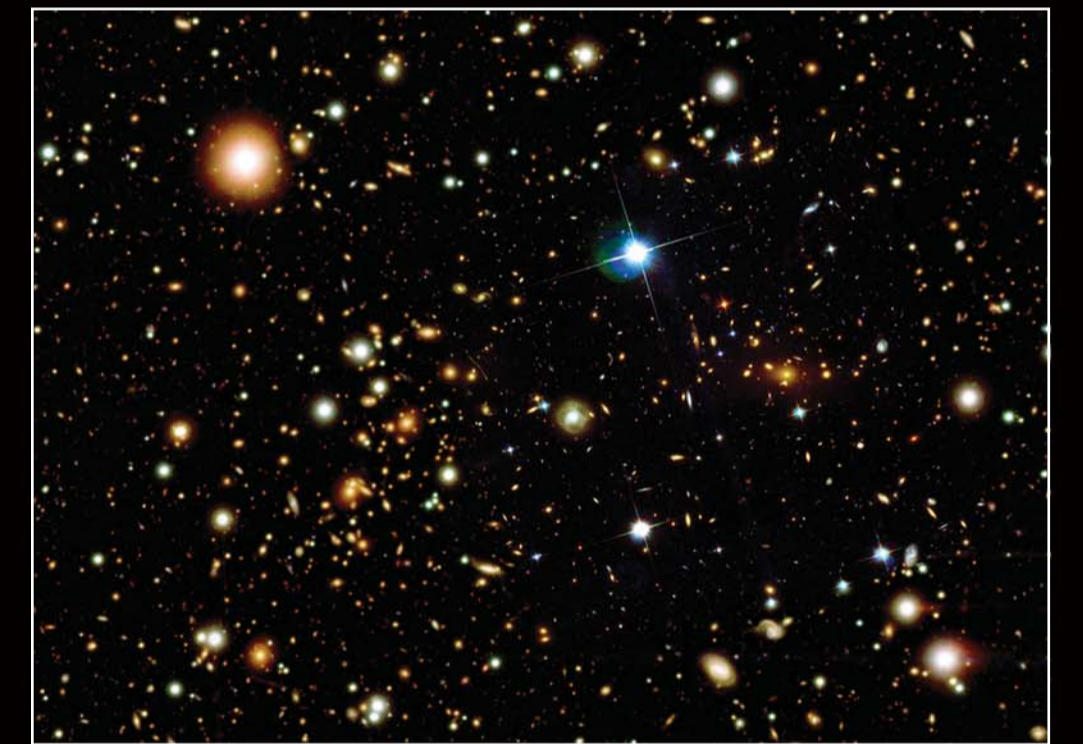
©NASA, ESA, M. Postman (STScI), and the CLASH Team



©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

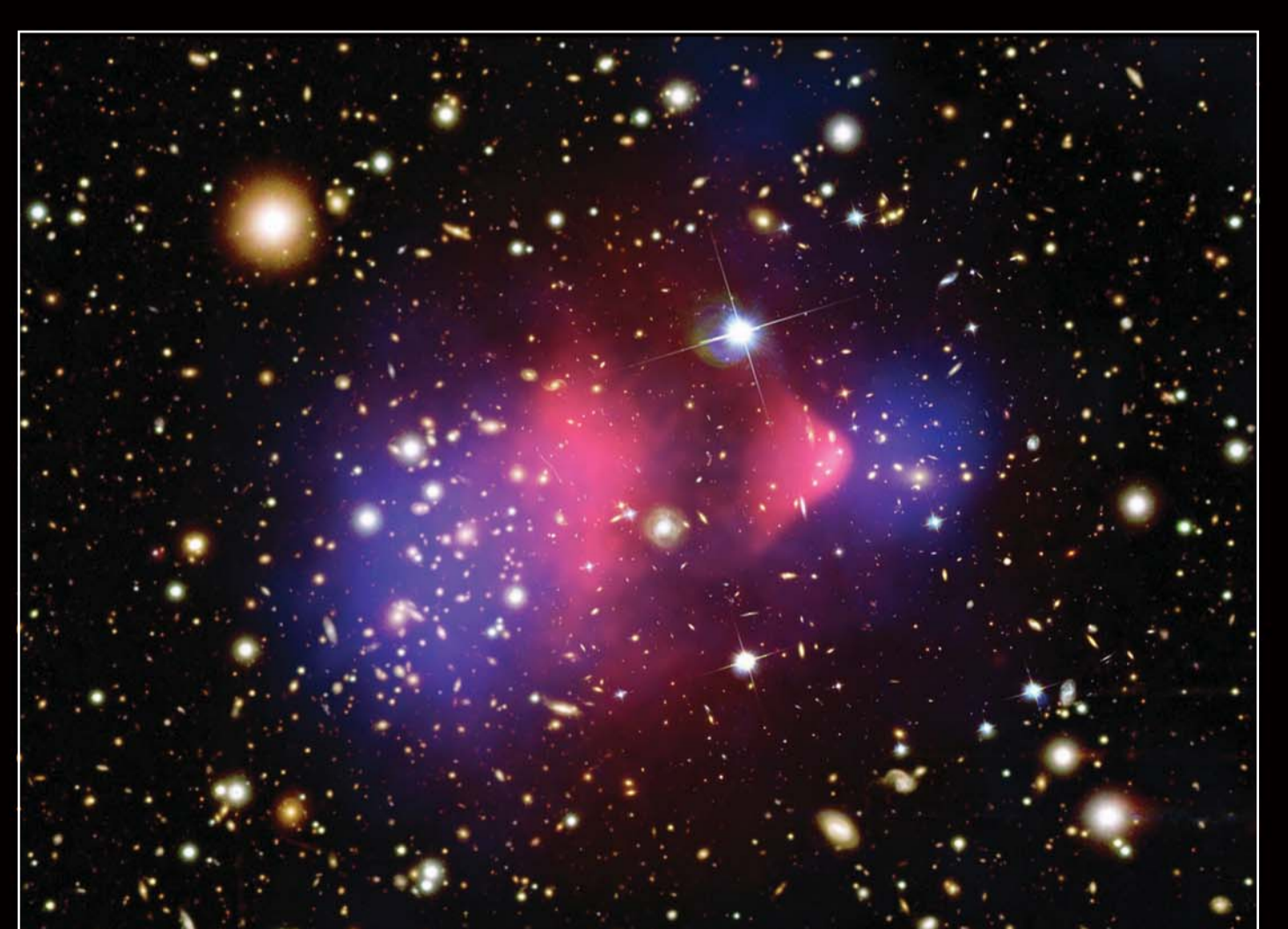
從重力透鏡尋找暗物質

子彈星系團 (bullet cluster)，正式名稱為1E 0657-56，距離我們約34億光年，是證明暗物質存在的一個好例子。



©NASA/STScI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

右圖為透過哈柏望遠鏡拍攝到的可見光影像，從影像中可以清楚見到子彈星系團的個別成員星系。下圖則是合成照片，除了右圖的可見光影像外，還加上錢卓望遠鏡所拍攝的X射線影像（紅色部份，是星系團中最大宗的普通物質—熾熱游離氣體），以及測量重力透鏡效應後所得的質量分佈（藍色部分）。

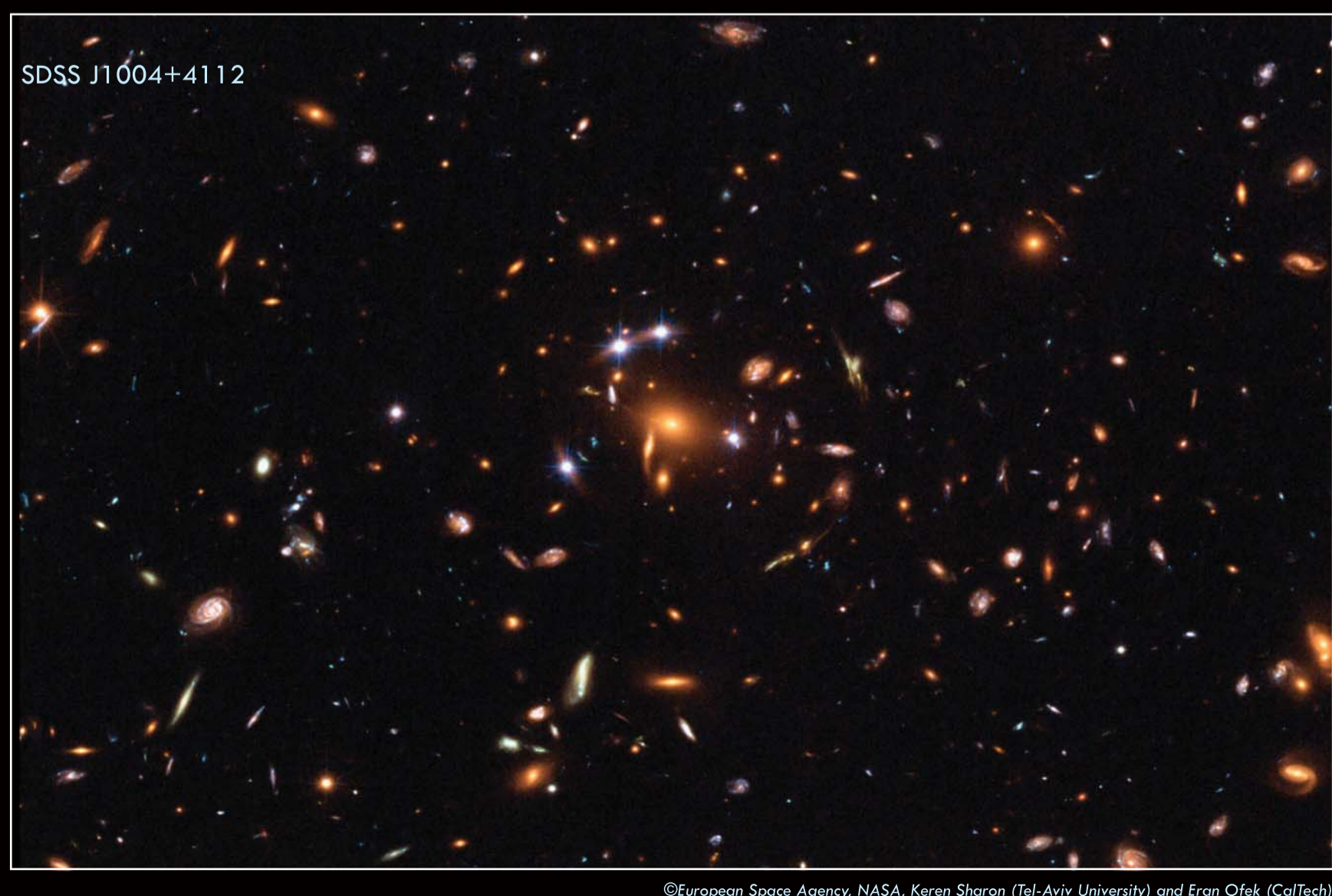
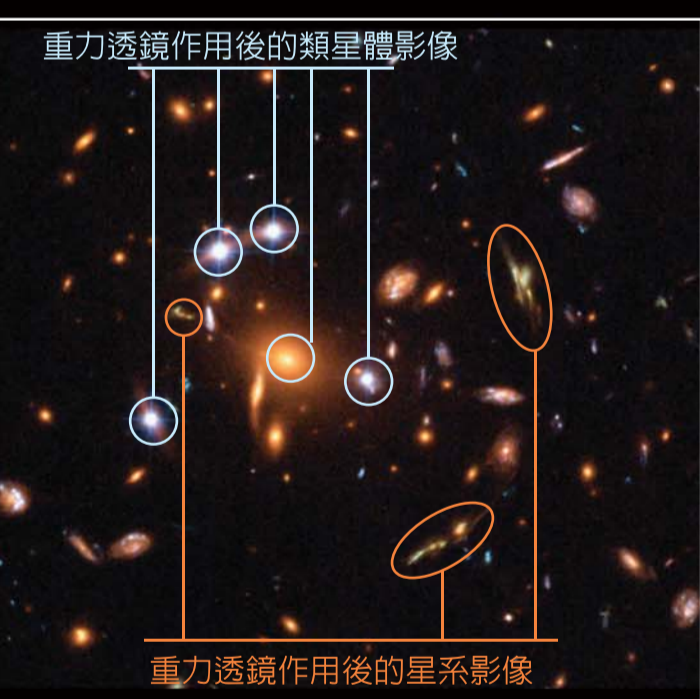


圖說：天文學家認為，影像中的藍色部分是兩個「子彈系團」。子彈星系團的影像，推測是兩個子彈系團以高速對撞後的殘骸，其中位於右端、形如子彈的X射線影像，就是兩個子彈系團碰撞下的震波前緣。 ©X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markertich et al.; Optical: NASA/STScI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI, ESO WFI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

重力透鏡案例，SDSS J1004+4112：

哈柏太空望遠鏡捕捉到一顆遙遠類星體的5重影像。先前雖然有很多重力透鏡效應被觀測到，但是這是第一個由整個星系團扮演重力透鏡產生5重類星體的「五星級」成像。背景類星體是某遙遠星系的核心，由於星系中心超大質量黑洞的作用而顯得異常明亮。類星體發出的光線在到達地球之前會先經過一個大質量星系團SDSS J1004+4112，距離我們70億光年遠。受到這個星系團重力場影響，類星體的光線被偏折並放大，出現了5重影像。

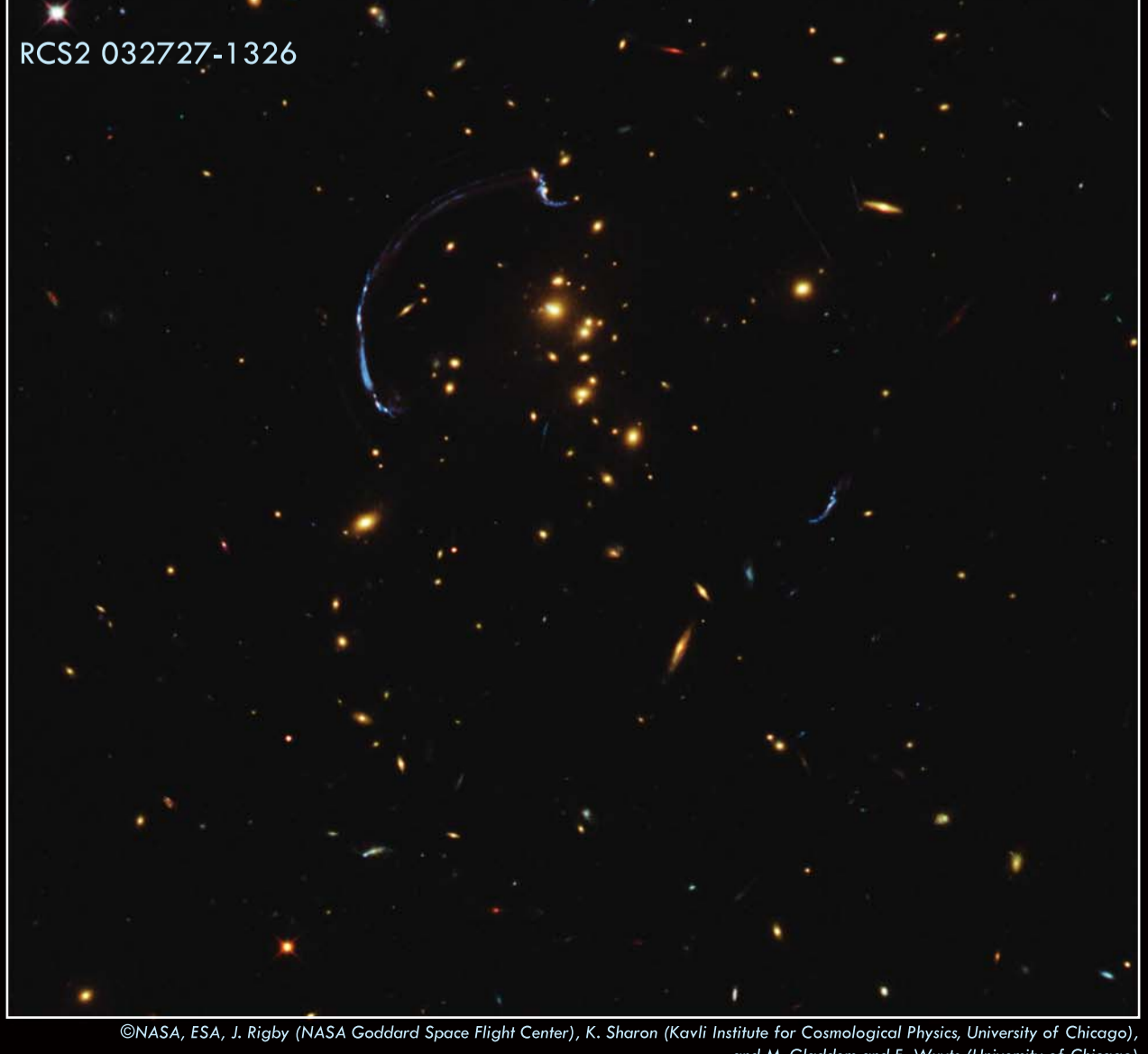
重力透鏡效應造成的多重影像數目都是奇數，且其中的一個影像通常深陷透鏡天體的光線中而看不清楚。哈柏望遠鏡的高解析力能夠把第5個影像從中央星系的光亮核心中給區分出來。這個類星體距離我們約百億光年，但看起來就在星系團的中央星系核心旁，圖中不容易分辨。來自其它遙遠星系的光線在星系團重力透鏡作用下，也能產生多重扭曲的影像。



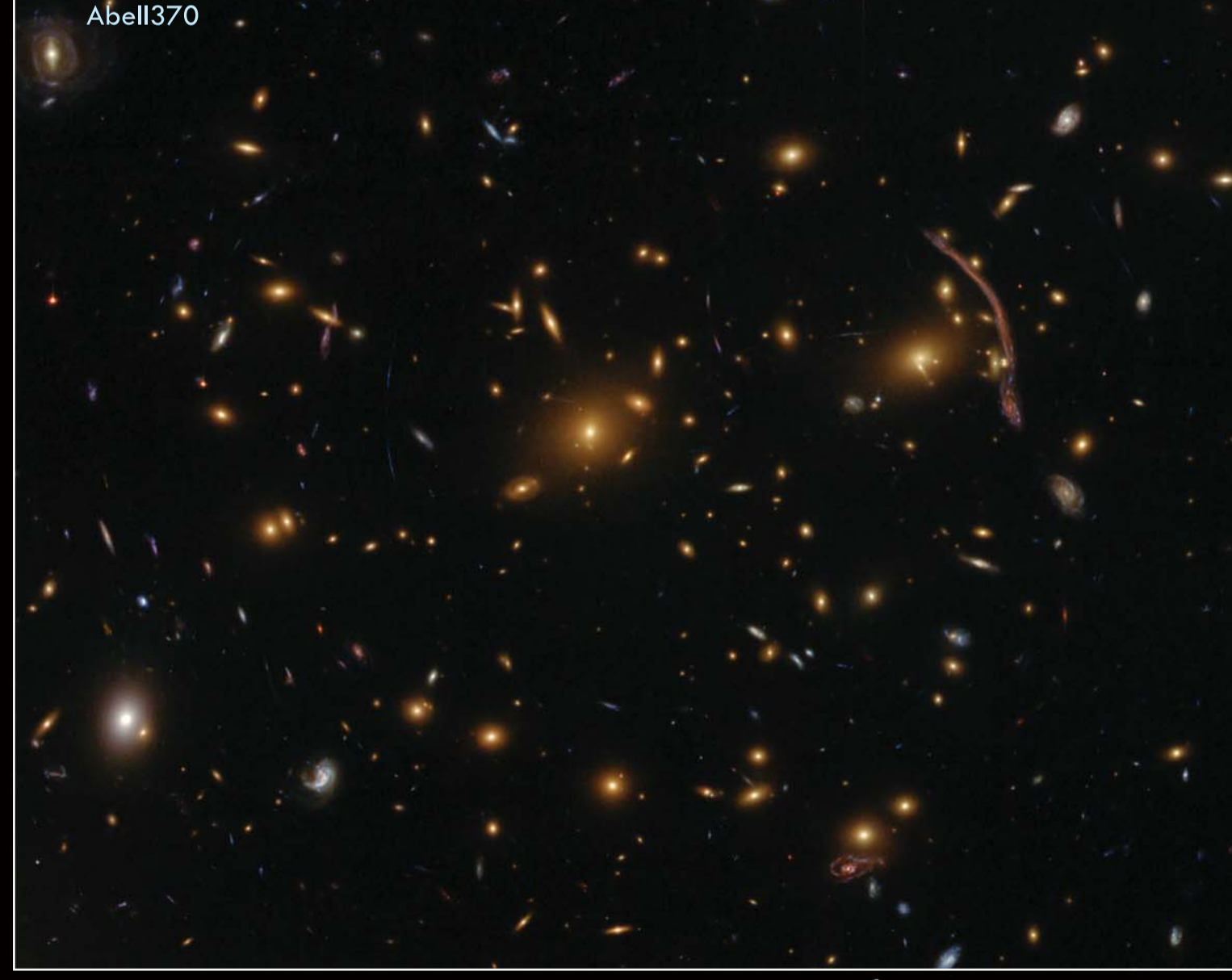
©European Space Agency, NASA, Keren Sharon (Tel-Aviv University) and Eran Ofek (CalTech)



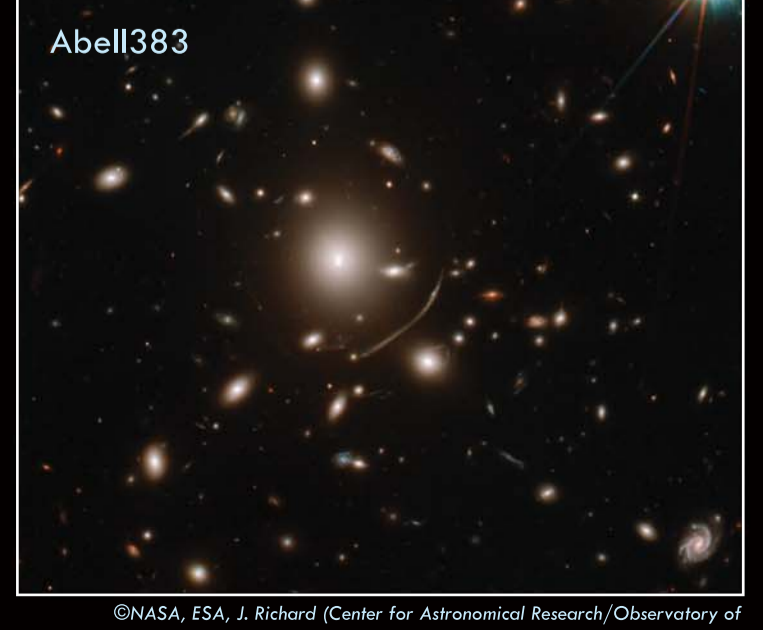
©NASA, Andrew Fruchter and the ERO Team (Sylvia Baggett (STScI), Richard Hook (ST-ECF), Zoltan Levay (STScI))



©NASA, ESA, J. Rigby (NASA Goddard Space Flight Center), K. Sharon (Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago), and M. Gladders and E. Wuyts (University of Chicago)



©NASA, ESA, the Hubble SM4 ERO Team, and ST-ECF



©NASA, ESA, J. Richard (Center for Astronomical Research/Observatory of Lyon, France), and J.-P. Kneib (Astronomical Laboratory of Marseille, France)



©NASA, ESA, J. Blakeslee and H. Ford (Johns Hopkins University)

【暗物質，明不明顯？】

這世上有的，多是沒人看得出來的明顯事物。
—出自「福爾摩斯」系列「巴斯克維爾獵犬」一書

人類潛意識對黑暗總是感到特別恐懼，原始人類在日落之後都會躲起來，避免被肉食性動物掠食，或是在樹上，或是在洞穴，總之，盡可能在夜晚停止一切的活動。由於火的發明，人類活動的時間可以延伸到夜晚。火，是驅避野獸最有效的利器，除此之外，火還可以達到照明的用途，讓我們看到夜晚不發光的事物。

人類是地球上最好奇的動物，雖然黑暗既神秘又令人恐懼，仍對它充滿好奇的探索心，宇宙中的暗物質就是其中一例。人們對暗物質最粗淺的解釋，就是：它是一種非常非常暗的物質，甚至是不會發光的物質；所謂「不發光」，實則包括發出的是肉眼看不到的所有電磁波。既然看不到暗物質，我們又如何確定其存在？如何瞭解暗物質對我們宇宙有何影響？

想確認物體的存在與否，除了用手直接觸碰，還可以用看的。所謂「看」，就是透過眼睛接收來自物體的可見光。我們也可以利用其他探測器來接收波長比可見光更短或長的電磁波，例如無線電波或紅外線。這些光可能來自物體本身，或者透過反射的方式被接收。天文學家要確認天體的存在，就是透過接收電磁波的方式。從伽利略的折射式可見光望遠鏡開始，牛頓的反射式可見光望遠鏡，乃至於接收無線電波的 ALMA（詳細請見中研院天文所季報民國 100 年冬季號）、紅外線的史匹哲太空望遠鏡、紫外線的 GALEX 太空望遠鏡、X 射線的錢卓太空望遠鏡、伽瑪射線的費米太空望遠鏡，舉凡能提供有用訊息的方式，天文學家都歡迎。

如果肉眼看不到，用望遠鏡也接收不到任何訊息，是否就代表沒有東西存在？還是只因為視力不好，或儀器不夠敏銳精良，才收不到訊息？的確，這情形是有可能發生的。1846 年 9 月 23 日以前，人們尚未發現海王星。在 1821 那年，布瓦（Alexis Bouvard）出版了天王星軌道表，然而長期持續觀測下來，發現天王星實際的軌道位置逐漸和軌道表產生偏差，布瓦認為這是因為天王星受到未知星體的萬有引力影響而致。1843 年，亞當斯（John Adams）根據牛頓萬有引力定律，計算出影響天王星的未知行星運動軌道，1846 年法國的勒維耶（Urbain Le Verrier）也算出未知行星的軌道，根據這些計算，柏林天文台在當年的 9 月 23 日找到了海王星。這就是一個藉由萬有引力對天王星軌道的影響，推測出海王星，並事後證實存在的例證。

牛頓的萬有引力可以作為證實物體存在的工具。提到萬有引力，便會想到黑洞，黑洞是一個具有超強萬有引力的天體，強到連光都會被吸進去。1783 年，認為「光子從星球表面離開時，會受到星球的萬有引力吸引而減速」的英國地質學家米契爾（John Michell）想要利用光子的減速來測量恆星質量。這個原理就如同利用地球上的逃脫速度來推算地球質量那樣。一顆星球表面的物體，若要飛往無窮遠的地方，該物體所需的最小速度就稱為逃脫速度，這個速度和星球質量的平方根成正比，和星球半徑的平方根成反比。米契爾在寫給英國著名物理學家卡文迪西（Henry Cavendish）的信裏提到，如果一顆星球的密度維持和太陽一樣，但半徑是太陽的五百倍，則該星球的逃脫速度比光速更快。那個年代，「光的微粒說」是主流學派，認為光既是粒子，便可被星球的萬有引力吸引，

也就是說在上述星球表面的「光子」是無法飛出星球外的，因此，這顆星球就會像一顆暗星（dark star）那樣，無法被看見。

說到黑洞還可以聯想到愛因斯坦。愛因斯坦在 1915 年提出廣義相對論，說明了質量、能量和空間幾何的關係。尤其黑洞附近的環境，得靠廣義相對論才能解釋。美國理論物理學家惠勒（John Wheeler）曾說：物質告訴時空如何彎曲，時空告訴物質如何運動——“Matter tells space how to curve. Space tells matter how to move.”。廣義相對論將牛頓的萬有引力解釋成時空的彎曲，物體靠近另一個物體不過是順應著時空來作變化罷了。至於黑洞則是時空中的一個大凹洞，任何物體只要進入史瓦西半徑內，就會掉入重力的無底深淵。像黑洞這樣的極端情況需要用到相對論，但在一般狀況，牛頓的萬有引力定律就足夠了。

天文學家可以測量星體的運動速度，進而推算出星體所含的質量，推測附近是否有看不到的物質存在。1922 年卡普坦（Jacobus Kapteyn）測量銀河盤面上的恆星運動速度，藉此推算出太陽周圍的平均質量密度，約為 $0.099M_{\odot}/pc^3$ (M_{\odot} 代表太陽質量， $1pc$ 約 3.26 光年)，同年的金斯（James Jeans）則推算出相近的數值 ($0.143M_{\odot}/pc^3$)。1932 年歐特（Jan Oort）也得到類似的平均質量密度值 $0.092M_{\odot}/pc^3$ ，這和他根據發光天體所測量出來的質量密度相差不遠。這些例子是天文學家最早藉由恆星的動力行為推測是否有其他看不見的天體存在的嘗試，結果顯示在太陽附近並沒有明顯的暗物質存在。

到了 1937 年，茲威基（Fritz Zwicky）測量了后髮座星系團（Coma Cluster of Galaxies）內各個星系的運動速度。后髮座星系團離我們約 3.2 億光年，是由一千多個星系所構成。平衡狀態下，星系的運動速度必須能和整個星系團的萬有引力相抗衡；星系的運動速度太快，整個星系團就會四散紛飛，星系的運動速度太慢，星系團就會向中心塌縮。從星系團外表看起來的質量，可以推算出星系應有的運動速度，但茲威基卻發現星系的實際觀測速度其實比推算速度更大，這意味著星系團需要更多看不見的質量來維持整體的平衡。根據茲威基的推算，后髮座星系團有將近 90% 的物質是看不見的，這算是第一個大尺度的暗物質存在證據。可惜，茲威基的 EQ 不好，他曾用

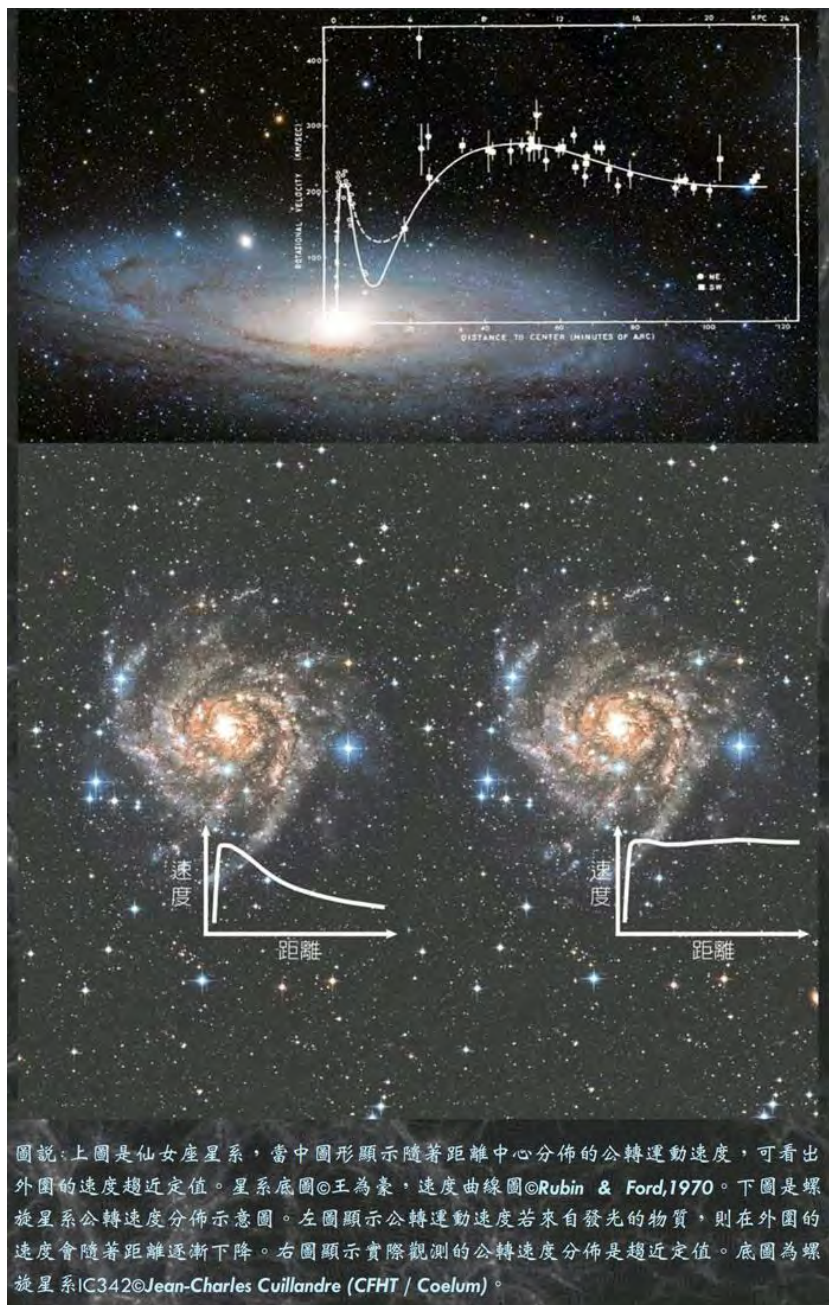
spherical bastards 來斥責同僚（意思是不管從什麼角度來看，對方都是個混蛋），因為惹惱了當時的天文學家，他在暗物質上的發現被刻意忽略。一直到 1970 年代，天文學家開始測量河外星系的旋轉速度，發現螺旋星系的暗物質也很多，才掀起尋找暗物質研究的熱潮。



后髮座星系團，約有一千多個星系聚集在橫跨二千萬光年的空間內。這張照片由史隆巡天計畫的可見光資料（藍色部分）和史匹哲太空望遠鏡（紅色和綠色部分）的紅外光資料所構成。

©Leigh Jenkins, Ann Hornschemeier et al. /Goddard Space Flight Center, JPL-Caltech, SDSS, NASA

從牛頓的萬有引力和運動學定律，我們可以推算太陽系內各個行星的公轉速度分佈。若太陽質量為 M_{\odot} ，行星的公轉速度為 v ，與太陽的距離為 r ，則 $v^2/r = GM_{\odot}/r^2$ ，簡單地整理一下方程式，就可得知行星的公轉速度隨著距離的平方根成反比，離得越遠，速度越小。我們太陽系內的行星公轉速度都是依照這個形式。假若類推到河外星系，尤其是螺旋星系，因為大部分發光區域都集中在中心，表示螺旋星系大部分質量也都集中在中心區域，那麼外圍的公轉速度應該也是離中心越遠而越慢。著名女性天文學家魯冰（Vera Rubin）在 1970 年代藉由光譜分析螺旋星系 M31，從光譜線的都卜勒效應，推算出沿著星系盤面的運動速度分佈，結果卻和預期的大大不同，外圍的速度分佈非但沒有減慢，還維持了近乎相同的速度，這現在被稱之為平公轉速度曲線（flat rotation curve），據此，推算出 M31 有九成的質量皆來自暗物質。後續的觀測發現大多數的螺旋星系中也都有暗物質，比如 1978 年馬修（William Mathews）就在橢圓星系 M87 發現大量看不見的物质。這些觀測資料顯示宇宙中暗物質是無所不在的。



圖說：上圖是仙女座星系，當中圖形顯示隨著距離中心分佈的公轉運動速度，可看出外圍的速度趨近定值。星系底圖©王為豪，速度曲線圖©Rubin & Ford, 1970。下圖是螺旋星系公轉速度分佈示意圖。左圖顯示公轉運動速度若來自發光的物質，則在外圍的速度會隨著距離逐漸下降。右圖顯示實際觀測的公轉速度分佈是趨近定值。底圖為螺旋星系IC342©Jean-Charles Cuillandre (CFHT / Coelum)。

所以，暗物質的存在是被承認的，只是至今大家對暗物質的「本質」仍不清楚。早期認為暗物質的真面目不是 WIMPs 就是 MACHOs。WIMPs（弱交互作用大質量粒子的縮寫）是一些理論上的基本粒子，只有萬有引力和弱作用力，沒有電磁力，所以不會發光。MACHOs（大質量緻密暈天體的縮寫）發出的光非常微弱或完全不發光，例如黑洞、棕矮星，但其實仍是由一般物質所構成。根據最新的觀測證據顯示暗物質不太可能全來自 MACHOs，大部分應該是 WIMPs。不過 WIMPs 目前仍只是理論產物，所以對暗物質的本質研究仍待努力。但對於宇宙的暗物質分佈狀況可以透過重力透鏡的原理得知，根據廣義相對論，物質的存在會讓周圍的空間彎曲，當背景星系的光線經過的時候，會受到影響而彎曲，使得背景星系的影像受到扭曲，從扭曲的程度可以推估當中物質的分佈（見

本期背面海報)。

從宇宙學的角度來看，一般物質只佔了全宇宙的 4%，暗物質佔了 23%，而且只有冷暗物質（一種熱運動速度較慢的未知粒子）才能符合宇宙大尺度結構的觀測結果。至於剩下的 73%則是暗能量。暗能量的存在證據最早來自於 1998 年的超新星爆炸觀測，其結果推論宇宙正在加速膨脹，這個發現後來獲頒 2011 年的諾貝爾物理獎。

想想整個宇宙的大部分（96%）都是暗的！可真是被福爾摩斯說中：這世上有的，多是沒人看得出來的明顯事物。

（曾耀寰）



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

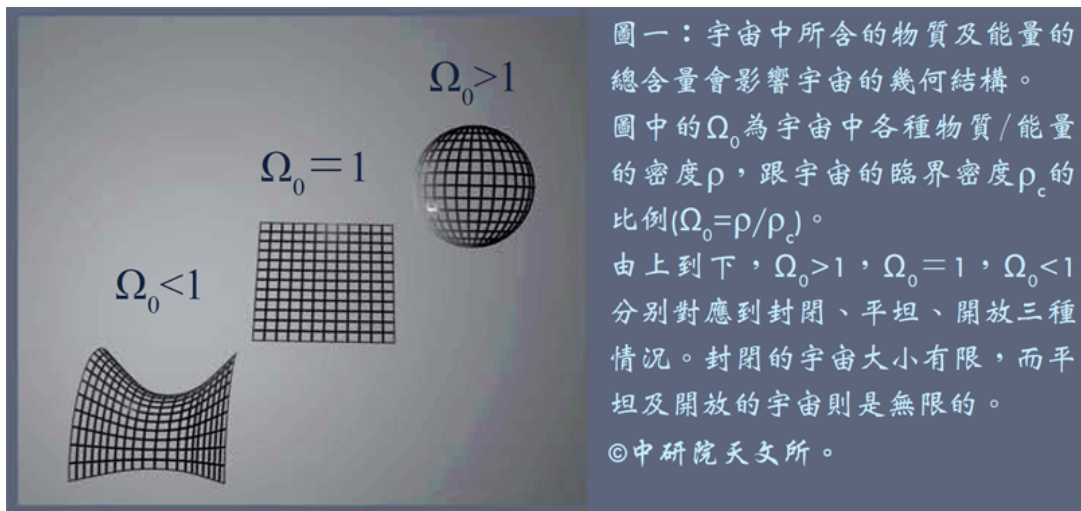
【暗能量，淺談】

想像一下，若你把一顆球向上拋高，它沒有墜回地面，反而加速向太空逃逸。發生這種情況，做何感想？那種難以置信的驚訝，大概就是十多年前，天文學家首次發現宇宙正在加速膨脹時，心中的感覺。

長久以來，大多數天文學家相信宇宙雖然在膨脹，但其中一切物質所產生的重力，終有一天將會克服膨脹的趨勢，中止膨脹，甚至開始向內塌縮。就好比向上拋出的球會再落回地表那樣。然而，「宇宙在加速膨脹」這個發現，顯示除了重力之外，有著其它未知的力量在支配着宇宙。宇宙，其實不是我們想像的那麼簡單！

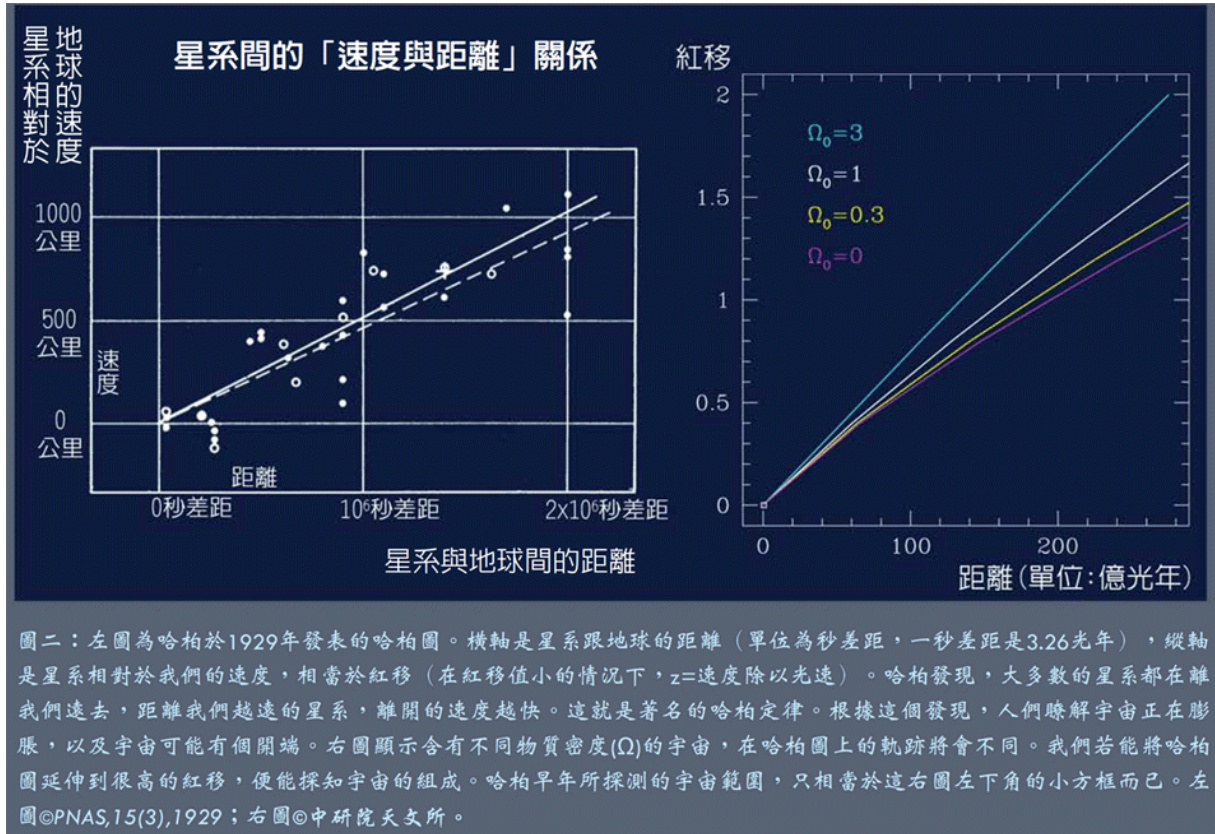
真有這個額外的力量嗎？會不會是觀測的問題？還是宇宙動力學的基礎—愛因斯坦的廣義相對論—有著根本上的問題？在千禧年的第一個十年，這些問題深深困擾着宇宙學家、天文學家、以及物理學家。今日我們普遍認為宇宙真的在加速膨脹，但是原因究竟是什麼，依然沒有定論。預料在接下來的十年間，這方面的研究，仍會是宇宙學界最重要、最熱門的工作。

觀測宇宙學的主要任務，基本上就是去量測宇宙膨脹的歷史，也就是宇宙大小相對於時間的變化。由於膨脹率深受宇宙的成分性質影響，宇宙膨脹歷史可以告訴我們的，除了宇宙成分有哪些外，還有各成分的相對含量。有了這些資訊，我們不僅能知道宇宙的年紀，還能進一步預測宇宙的命運。比如說：宇宙中所含物質如果不夠多，膨脹會一直持續下去（我們稱宇宙的「幾何結構」是開放的）；反之，所含的物質若太多，它將在有限的時間內塌縮，一切可能盡歸於一個巨大黑洞（我們稱宇宙的幾何結構是封閉的）。怎麼知道物質是太多或太少呢？我們可以拿宇宙中各種物質/能量的密度 ρ 跟宇宙的臨界密度 ρ_c 相比，若是 $\rho > \rho_c$ （或是 $\rho < \rho_c$ ），則宇宙是封閉（或是開放）的；如果 $\rho = \rho_c$ ，則我們稱宇宙的幾何結構是平坦的（圖一）。

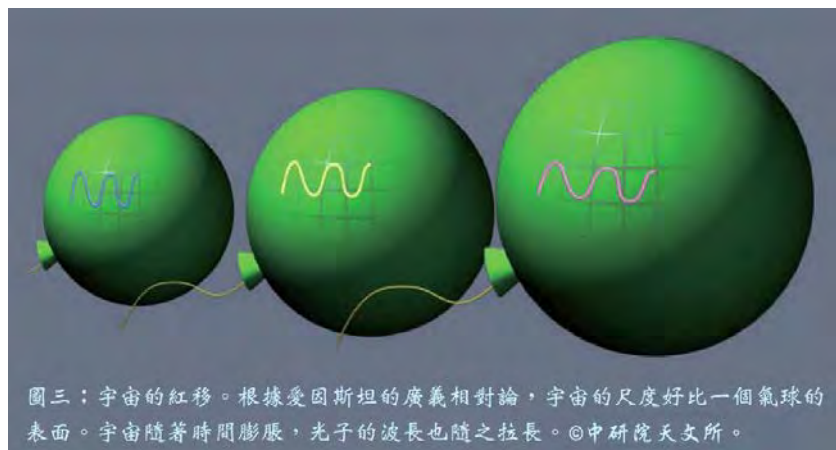


常用來標記宇宙膨脹的計量單位是紅移。若紅移是 z ，代表宇宙的大小是現在的 $1/(1+z)$ 倍。現今宇宙所對應到的 $z=0$ ；紅移越大，代表宇宙越小，也就是越早期的宇宙。

要測定宇宙膨脹的歷史，換句話說，就是想量得天體到地球的距離與其紅移的關係。上世紀 20、30 年代，比利時的勒麥特 (Georges Lemaitre) 及美國的哈柏 (Edwin Hubble) 便利用我們鄰近的星系，首次嘗試測量這個關係。如今，我們把這個關係通稱為哈柏圖 (Hubble Diagram) (圖二)。



測量紅移，其實相當簡單。宇宙隨著時間膨脹，光子的波長也會隨之拉長，從遙遠星系來的光會被「紅移」到較長的波段(圖三)。假設原本的波長是 λ_e ，光到達地球時，被觀測到的波長會變成 $\lambda_0=(1+z)\lambda_e$ 。因此，我們若能從光譜中判斷出來自遙遠物體的發射或吸收譜線，由這些譜線真正的波長及觀測波長，即可量出該物體的紅移。



另一方面，要量測遙遠物體到地球的距離，就不是簡單的工作了。我們通常得依賴「標準蠟燭」或「標準尺」，也就是得拿實際亮度或長度不會隨時間變化的物體或現象作比較(圖四)。拿標準蠟燭來說，假設我們觀測到的亮度是 f ，而它真正的亮度是 L ，那麼，在距離小的情況下，我們就可以用平方反比的關係($f \propto L/d^2$)來求得蠟燭跟我們的距離 d 。這個原理雖然簡單，實際上，在宇宙中要找到好的標準蠟燭並不容易。首先，標

準蠟燭得夠亮，足以讓我們橫跨大半宇宙觀測到它們；其次，它們的亮度要穩定，或至少能夠校準；再者，它們不能太稀有，不然也很難得到大量的樣本來減小統計誤差。

直到上個世紀的 60 年代，造父變星仍然是天文學家用來量測距離的最佳標準蠟燭。利用它們，以及最亮的星系，哈柏和他的接班人桑帝致 (Allan Sandage) 耗費數十年心力，動用了當時全世界最大口徑、位於加州威爾遜山和帕洛瑪山的望遠鏡，才將哈柏圖延伸到紅移 0.02 的範圍。然而，由於他們方法上的一些根本問題，這仍不足以讓我們判定宇宙的參數。



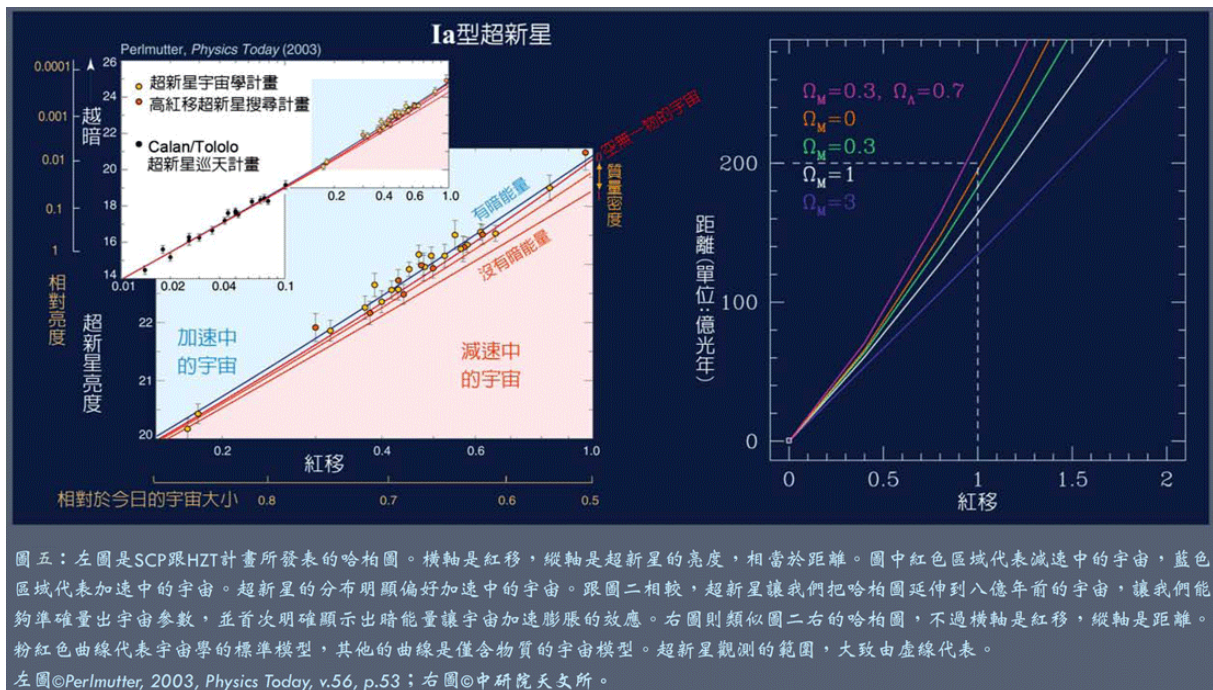
圖四：兩種量測宇宙膨脹速率的方法（左：根據標準蠟燭；右：根據標準尺）。超新星很亮且亮度穩定，根據它在天空的亮度，便可得知它距離我們多遠。這和左邊的一排蠟燭一樣，蠟燭的光離我們越遠越暗。近來還有一種量測方法，是利用一系列選出來、兩兩配對好的星系來作為標準尺，這兩兩配對的星系在今天的宇宙中彼此間距都約為 4 億 9 千萬光年。星系紅移越高，從我們這裡看到的這個間距就顯得越小，就像右邊的一排尺所顯示的那樣。©NASA/JPL-Caltech。

1989 年，美國勞倫斯柏克萊國家實驗室的柏木特 (Saul Perlmutter) 決定採用新的標準蠟燭—Ia 型超新星——來建構哈柏圖。超新星非常地亮，最亮的甚至和整個星系一樣亮，早在 30 年代，巴德 (Walter Baade) 就建議用超新星當標準蠟燭。不過到了 80 年代後期，人們才發覺超新星其實有許多種，而其中只有 Ia 型超新星最適合當作標準蠟燭，至此用超新星探測宇宙的時機才漸趨成熟。即便如此，柏木特的團隊仍然花了近十年，才克服種種挑戰，得到讓人信服的成果。

用超新星來探測宇宙，困難在哪裡？首先，一個普通星系，大約每數百年才有一個 Ia 型超新星。所以我們必須同時觀測大量的星系，並運用特別的觀測模式，才能有效率地發現、追蹤、並確認超新星的類型。其次，最亮跟最暗的 Ia 型超新星亮度差了大約三倍，因此它們其實不算真的標準蠟燭；我們還必須找到校準它們的方法才行。此外，宇宙中

充斥著塵埃，它們會吸收星光、讓物體變暗，因此我們也得修正塵埃的影響。再者，我們必須確定超新星的性質不會隨時間而變，也就是要能保證「宇宙早期爆炸的超新星，跟我們鄰近宇宙中發現的超新星，性質都一樣」。一切努力都是希望能把統計及系統性的誤差降低，以便能藉由超新星在哈柏圖上的分佈，求出宇宙的參數。

在柏木特團隊領導的超新星宇宙學計劃 SCP 開始搜尋超新星之前，其實有個丹麥團隊也嘗試過類似的實驗，但他們兩年中只找到一顆超新星，無功而返。SCP 計劃的前幾年，收獲也相當有限。直到 1994 年，由澳洲國立大學的史密特 (Brian Schmidt) 及哈佛大學的瑞思 (Adam Riess) 主導的「高紅移超新星計畫 HZT」團隊加入戰局之後，良性競爭下，雙方一一克服了上述困難，終於在 1998-99 年間，先後發表了哈柏圖 (圖五)。共同結論是：在所有假設宇宙僅由物質所組成的模型中，遙遠的超新星實際上看起來比模型預測的更暗；也就是說，宇宙膨脹的速度比想像中更快，才能把超新星放到夠遠的地方，讓他們的亮度跟觀測相符。宇宙正在加速膨脹中！



這是個驚人的結論，完全推翻近百年來人們對宇宙的認知。當初柏木特等人想要量測的其實是宇宙的減速度，不料在十年奮鬥之後，卻得到全然相反的結果。超新星的觀測，究竟意味著甚麼？如前所述，宇宙可沒有我們想像的那麼簡單。要符合超新星的哈柏圖，宇宙中不能只有物質—包括暗物質及普通的物質，還必須存在有某種能提供「負壓力」或「反重力」的能量形式。對於這種難以想像的能量形式，天文學家現在以「暗能量」來稱呼它。

暗能量其實也不是什麼新觀念。早在愛因斯坦提出廣義相對論時，他的場方程式中就包含了一個「宇宙常數」項，那便是暗能量最基本的一個形式。當初愛因斯坦引進宇宙常數，是為了讓他的宇宙模型可以永久穩定；不過當他從哈柏那裡得知宇宙正在膨脹之後，便把宇宙常數從場方程式刪掉了。到了二十世紀末，宇宙常數才又重現江湖，天文學界一開始的反應是半信半疑，甚至難以接受。所幸，一來有 SCP 跟 HZT 兩個團隊同時獲得類似結果，二來，本世紀初許多其他的宇宙學觀測也支持暗能量存在的推論，持懷疑、

對於暗能量性質及來源的真相，雖然我們仍然在五里霧中，但至少我們知道下一步該怎麼走：全面量測宇宙結構演化的速率，以及膨脹的歷史；藉此我們可量出 w 在不同紅移的值，以便界定究竟廣義相對論或新重力理論哪種正確？究竟是宇宙常數，還是新的作用力？

為了表彰超新星觀測帶動暗能量研究的貢獻，2011 年諾貝爾物理獎便頒發給柏木特，史密特，和瑞思三人。下一個世代，有許多大型天文觀測計畫正在進行或即將展開，包括本所積極參與的 Subaru 望遠鏡的「堇(Sumire)」計畫，這些都有望幫助釐清暗能量本質（詳細內容請參考網址 <http://oir.asiaa.sinica.edu.tw/subaru/cam.php>）。就讓我們拭目以待！

(林彥廷)



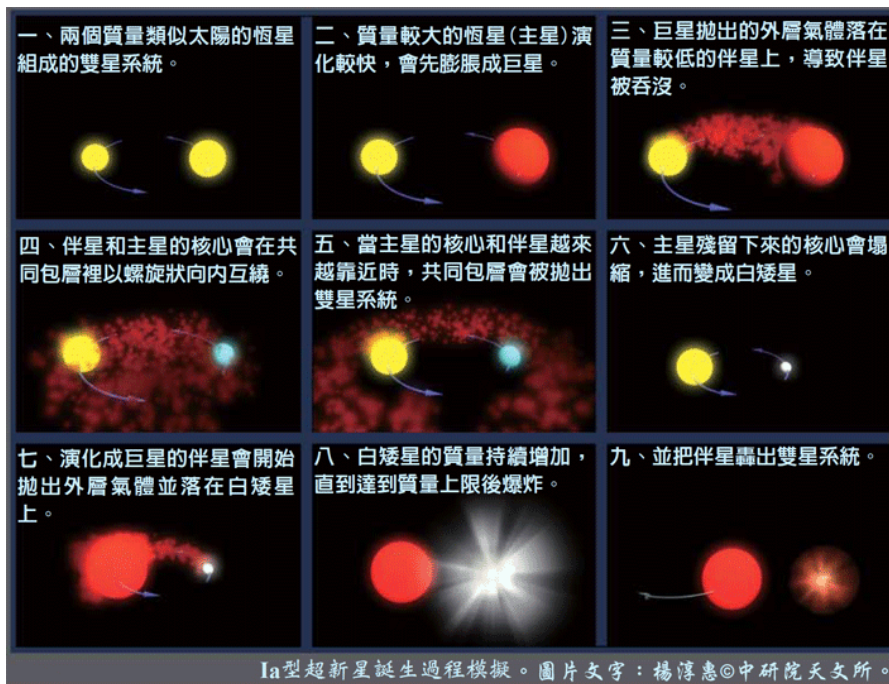
天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 [CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款](#) 釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【天文小辭典】

Ia 型超新星

Ia 型超新星一般相信是處於雙星系統中的白矮星，由於吸積了來自巨大伴星中的物質，在質量超過錢卓塞卡極限 (Chandrasekhar Limit) 後，因為重力塌縮而導致的爆炸現象。由於爆炸的白矮星質量都雷同，超新星的亮度因此相似。至於其他種超新星 (Ib, Ic, II...), 一般相信是大質量恆星核融合之後產生了鐵核心，因無法抵抗自身重力因而產生的爆炸。

(編輯稿)

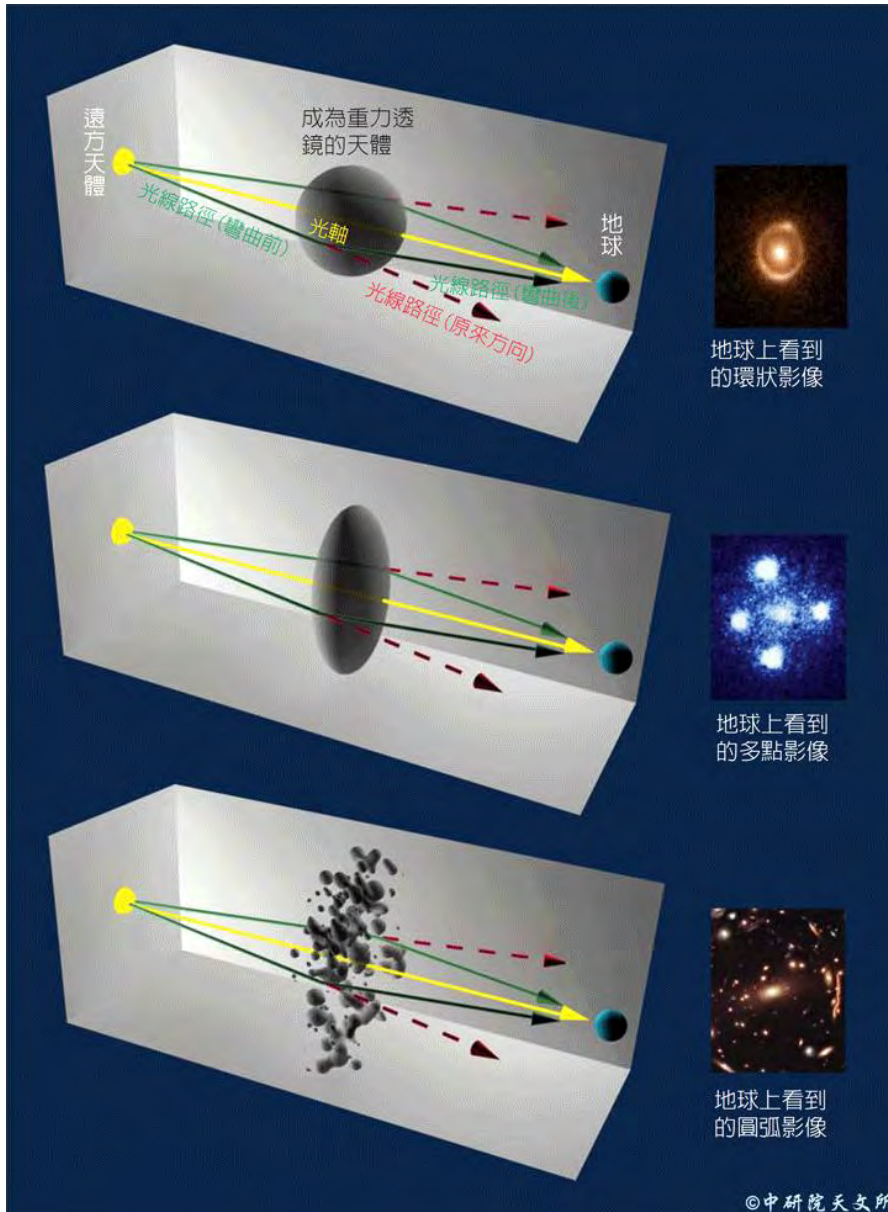


天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【宇宙的哈哈鏡館】 強重力透鏡圖集

重力透鏡效應的成像原理簡介

1979年，天文學家觀測類星體 Q0597+561 時，發現其發出的光線受到前方星系的重力影響而彎曲，於是在另一個位置出現一模一樣的類星體成像。這是人類第一次觀察到重力透鏡效應。



人們原本認為光線走的是直線，只有當反射、折射、或繞射時才會改變行進方向。但是根據愛因斯坦的廣義相對論，太空中巨大天體（比如：星系、星系團及黑洞）的質量會產生重力場，光線經過天體附近時，會像通過透鏡一樣發生彎曲並改變行進的方向。太空中重力場造成光線偏折的現象因為和光學透鏡作用雷同，所以被稱為重力透鏡效應，而影響光線路徑的天體就是重力透鏡。只不過重力透鏡作用與光線的種類和波長無關，光線偏移的程度主要取決於重力場的強弱，並和光源與透鏡的最短距離成反比。

重力透鏡效應系統的主角有四個，觀測者、背景光源、位於光源與地球之間的重力透鏡、以及包含前三者的空間。透鏡系統會因各主角的特性差異、主角間相對位置的變化而產生不同效應—包括成像的形狀、大小、光度及光度變化的時間等等。目前發現的重力透鏡效應類型大致可依此歸類為三種：強重力透鏡效應、弱重力透鏡效應及微重力透鏡效應。原則上，前兩種效應作為重力透鏡的前景天體，其質量與分布範圍都得夠大才行，若是星球或行星則只能造成微重力透鏡效應。

透鏡效應的研究應用

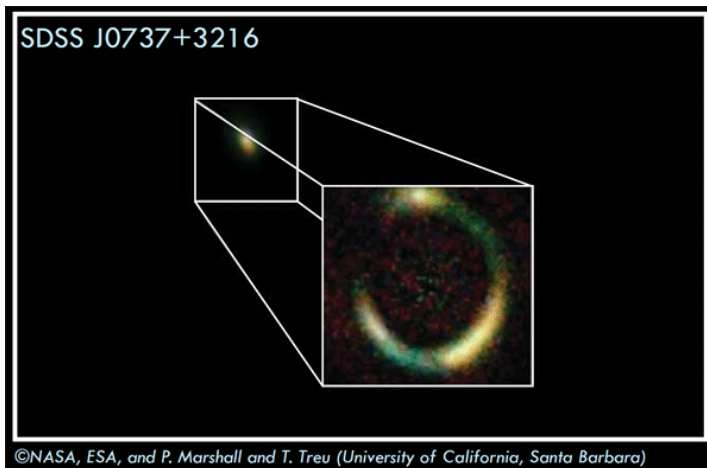
重力透鏡效應除了可用來發現或觀測作為「背景光源」的宇宙天體外，也可以利用來分析作為「透鏡」的天體特性。現代天文學利用觀測，收集記錄各類型重力透鏡效應產生

的不同數目或型態的影像照片，並配合光譜及統計等分析，可取得作為「透鏡」的重力場的質量密度分布、結構演化及運行等資料—尤其是黑洞、暗物質或暗能量，並有助進一步推論宇宙形狀及解讀各種宇宙演化學說。

強重力透鏡效應的類型

作為強重力透鏡的天體通常是質量密度大又集中的球形對稱天體，此時重力場作用很強，光線偏折角度較大，透過望遠鏡所看到的成像會被放大，產生多點影像、圓弧影像、或是人稱「愛因斯坦環」的環狀影像。

1、環狀影像



當重力透鏡系統的各個主角們完美排列成一直線，而且扮演透鏡的是大質量密度的球形對稱天體時，透鏡就會把光源傳來的光散開成完整的環狀影像，也就是所謂的「愛因斯坦環」。

第一個「愛因斯坦環」在1988年被發現。光源是遠方的一個星系，而作為重力透鏡的是一個包含暗物質的大質量星系團。

2、多點影像

重力透鏡系統各個主角們的排列如果稍微彎曲，或者透鏡為橢圓星系，那麼背景光源的不同部位會環繞著透鏡星系以不同比例放大形成多個影像，有時會產生如「愛因斯坦十字」的多點影像。

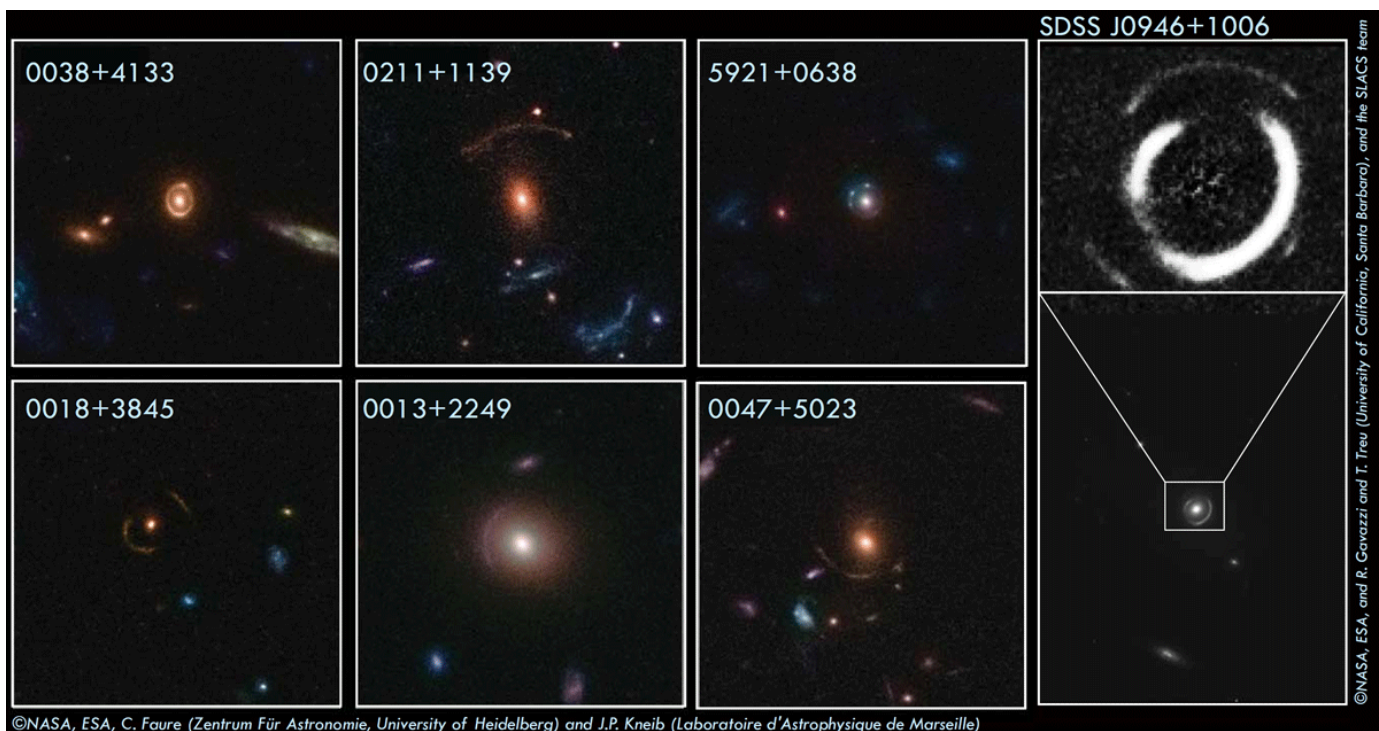
1985年第一個被紀錄的愛因斯坦十字—Q2237+030，是重力透鏡效應最著名的例證之一。十字中央的光點是距離地球約4億光年作為透鏡的前景星系（ZW 2237+030），對稱分布於四周的光點是距離地球80億光年的類星體（QSO 2237+0305）受到重力透鏡作用而形成的多重影像。



3、圓弧影像

類似多點影像的成像原理，當重力透鏡系統主角們的排列稍微彎曲，或者透鏡為橢圓星系，此時如果背景光源是非點狀、向外延伸的天體，光源的不同部位會環繞著透鏡以不同比例放大形成多個成像，在以透鏡為中心的圓周上排成香蕉狀的圓弧。





(文/陳筱琪、蔡殷智；審校/曾耀寰、張慈錦)



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
 以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
 天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
 創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【從重力透鏡尋找暗物質】

子彈星系團(bullet cluster)，正式名稱為1E0657-56，距離我們約34億光年，是證明暗物質存在的一個好例子。

右圖為透過哈柏望遠鏡拍攝到的可見光影像，從影像中可以清楚見到子彈星系團的個別成員星系。下圖則是合成照片，除了右圖的可見光影像外，還加上錢卓望遠鏡所拍攝的X射線影像（紅色部份，是星系團中最大宗的普通物質—熾熱游離氣體），以及測量重力透鏡效應後所得的質量分佈（藍色部分）。



天文學家發現，可見光影像中的星系質量總合，遠小於X射線影像中測得的熾熱游離氣體的質量。而重力透鏡效應所測得的質量（藍色部分），則是遠高於星系和X射線游離氣體的加總。因此，藍色部分的質量，不可能僅僅來自普通物質。換句話說，在這個系統中，多數質量顯然並不是以恆星（即星系）或游離氣體的狀態存在，這麼一來，只有看不見的「暗物質」才能夠解釋子彈星系團的這個觀測結果。這就證明了暗物質的存在。



（蔡殷智彙整；審校/林彥廷）

圖說：天文學家認為，影像中的藍色部分是兩個「子星系團」。子彈星系團的影像，推測是兩個子星系團以高速對撞後的殘骸，其中位於右端、形如子彈的X射線影像，就是兩個子星系團碰撞下的震波前緣。©X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

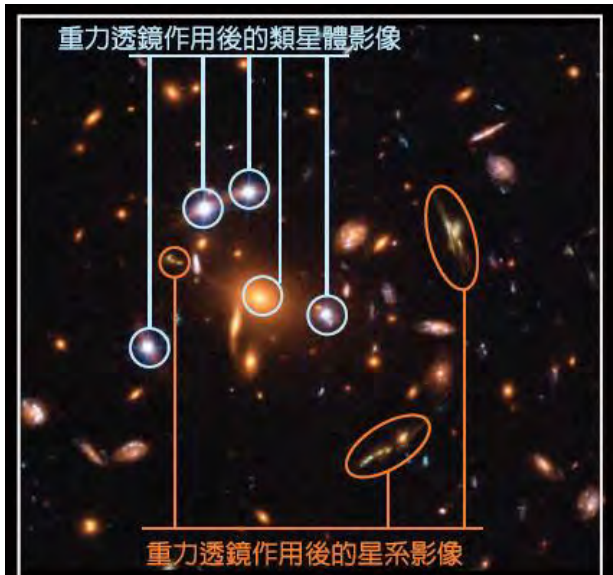
（改寫自 2012 年 2 月物理雙月刊 34 卷 1 期第 18 頁）



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

【重力透鏡案例】 SDSS J1004+4112

哈柏太空望遠鏡捕捉到一顆遙遠類星體的 5 重影像。先前雖然有很多重力透鏡效應被觀測到，但是這是第一個由整個星系團扮演重力透鏡產生 5 重類星體的「五星級」成像。背景的類星體是某遙遠星系的核心，由於星系中心超大質量黑洞的作用而顯得異常明亮。類星體發出的光線在到達地球之前會先經過一個大質量星系團 SDSS J1004+4112，距離我們 70 億光年遠。受到這個星系團重力場影響，類星體的光線被偏折並放大，出現了 5 重影像。



重力透鏡效應造成的多重影像數目都是奇數，且其中的一個影像通常深陷透鏡天體的光線中而看不清楚。哈柏望遠鏡的高解析力能夠把第 5 個影像從中央星系的光亮核心中給區分出來。這個類星體距離我們約百億光年，但看起來就在星系團的中央星系核心旁，圖中不容易分辨。來自其它遙遠星系的光線在星系團重力透鏡作用下，也能產生多重扭曲的影像。

(翻譯/陳筱琪；審校/金升光)



案例摘自 hubblesite：<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2006/23/image/a/>



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。

天聞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眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信給我們，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『10617 臺北郵政 23-141 號信箱 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收』；或是寄至電子信箱：epo@asiaa.sinica.edu.tw。

發行人\賀曾樸

執行主編\陳筱琪

美術編輯\蔡殷智

執行編輯\金升光、曾耀寰、蔣龍毅、顏吉鴻

發行單位\中央研究院天文及天文物理研究所

地址\臺北市羅斯福路四段一號天文數學館 11 樓

電話\ (02)2366-5391

電子信箱\epo@asiaa.sinica.edu.tw

天聞季報版權所有\中研院天文所



天聞季報海報版與網路版由中央研究院天文及天文物理研究所製作，
以創用 CC 姓名標示-非商業性-禁止改作 3.0 台灣 授權條款釋出。
天聞季報網路版衍生自天聞季報海報版。超出此條款範圍外的授權，請與我們聯繫。
創用 CC 授權可於以下網站查閱諮詢 <https://isp.moe.edu.tw/ccedu/service.php>。