

# 星空中的重力透鏡

偏折的光透露暗能量、暗物質與黑洞的祕密

作者：庫普曼斯 Leon V. E. Koopmans

布蘭福特 Roger D. Blandford

譯者：李沃龍

**作者簡介：**庫普曼斯是荷蘭葛羅寧根大學（University of Groningen）的卡普田天文研究所（Kapteyn Astronomical Institute）教授。布蘭福特是美國史丹佛大學卡弗里粒子天文物理與宇宙學研究所（Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology）主任。

愛

因斯坦在 1915 年所完成的廣義相對論，為我們提供了描述宇宙結構所需的工具，並決定光在其中的傳播途徑。它指出，假若我們把時空當成是平坦的，會發現光行經重力勢阱（potential well）時彷彿受其吸引而產生偏折。這種偏折現象如今稱為重力透鏡（gravitational lensing），在 1919 年 5 月 29 日的日全蝕期間，首度被位於巴西索布拉爾（Sobral）與西非外海普林西比島（Principe Island）的英國探險隊觀測到。兩支探險隊觀察靠近太陽邊緣的恆星，並測量它們的位移，發現此結果比較接近愛因斯坦預期的 1.7 角秒，而非只有一半大小的牛頓理論預測值。1919 年的觀測結果意謂著愛因斯坦理論的重大勝利。

在此之後的 60 年內，太陽折射星光成為重力透鏡的唯一例證。不過，這個局面在 1979 年發生了改變，華爾希（Dennis Walsh）、卡爾斯威（Bob Carswell）與魏曼（Ray Weymann）在這一年發現某個類星體的光受其前景星系團裡的大質量星系影響而呈現多重影像 [1]。自那時候起，無論是在觀測或理論上，重力透鏡的研究皆蓬勃發展。現在，天文學家利用重力透鏡來探測恆星尺度乃至整體宇宙範圍內的物質與能量分佈。

## 不斷擴張的宇宙

從時空的最大尺度上看來，宇宙是均質（homogeneous）且均向（isotropic）的，其範圍仍持續不斷擴大。描述宇宙膨脹的歷史與未來的最佳方法，是透過尺度因子  $a(t)$  這個單一函數，它正比於星系間平均距離，而且是宇宙時間  $t$  的函數 [2]。長久以來，觀測宇宙學的主要目標之一，就是精準量測這個尺度因子，並利用描述宇宙膨脹的運動方程式來推估宇宙的物質內涵。

出於宇宙暴脹的啟發，簡單而自然的宇宙模型通常假定宇宙空間幾何是平坦而非彎曲的，目前總質能密度中有  $\Omega_m$  的比例主要由冷物質（當星系形成時速度幾乎為零的物質）構成，其餘的  $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$  部份則以恆定的暗能量密度形式存在。尺度因子的歸一化一階導數  $\dot{a}/a \equiv H_0$  就是所謂的哈伯常數（Hubble constant）。實際上，這個「常數」是會隨時間演變的，不過在我們的討論裡，我們總是使用現今的哈伯常數值。此外，歸一化的二階導數  $\ddot{a}/a = -H_0^2(\Omega_m/2 - \Omega_\Lambda)$  則用來測量加速度。直到十幾年前，宇宙學家一般假設宇宙的加速度是負的，因為物質間總是互相吸引。其實剛好相反，宇宙的加速度大於零。這是宇宙裡存在有負壓性質暗能量（dark energy）的初步證據，它會在

質量之間產生有效的萬有斥力。

從造父變星、遙遠的超新星、質量的大尺度結構及微波背景起伏等的觀測顯示，在約 10% 的誤差範圍內，我們的宇宙基本上是個擁有  $H_0 = 72 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$ 、 $\Omega_m = 0.3$ 、 $\Omega_\Lambda = 0.7$  的平坦宇宙。宇宙學家認為  $\Omega_m$  中只有 15% 來自於可形成恆星與氣體的重子物質。其餘不可見的「暗」物質，可能是由一種新的超對稱弱作用粒子所構成。

新近觀測結果指出的宇宙加速膨脹、強勢的暗能量與高比例的非重子冷物質，都是宇宙學模型的顯著特性。宇宙學家必須利用各種方法來探究那些驚人的特性，以增進測量的精準度。

此外，模型本身也必須接受檢驗。例如，暗能量密度與愛因斯坦的宇宙常數不同，可能會隨時間演變，且具有豐富的動力學性質。另一種可能是暗能量根本不存在，觀測者看到的可能是重力場滲入至今仍不可見的額外維度所引發的效應 [3][ 延伸閱讀 1]。對物理科學而言，要從這兩種甚至其他更瘋狂的方案中挑出對的理論，絕對是項重大挑戰。侷限  $a(t)$  函數會是個好的開始，而重力透鏡正好能以好幾種不同的方式 [4]，幫忙進行測試。

## 測量哈伯常數

由於  $H_0$  可指出宇宙的大小與年齡，哈伯常數可說是物理宇宙學裡最重要的參數之一。不過自從 1920 年代天文學家發現宇宙正在膨脹之後，測量哈伯常數就變成一項困難重重的任務。

圖 1 強透鏡幾何學。遙遠光源所發出的光線，沿著多條測地線（本圖僅顯示兩條）前進，導致觀測者看到光源投射在天空中的多重影像。由於這兩條傳播路徑長度不同，在不同影像間產生成像時間延遲。此外，不同路徑通過重力場的不同部分，也會造成額外的時間差，這現象有時稱為夏皮洛延遲（Shapiro delay）。天文學家測量這兩個時間延遲的總和，該數值與哈伯常數成反比。本圖描繪透鏡本身是由星系的恆星（黃）與周遭的暗物質暈（暗灰）所構成。同時也顯示出幾個包含或缺乏發光物體的小型衛星（矮衛星星系），它們也會影響透鏡成像。

標準的作法是建構所謂的宇宙距離階梯（cosmic distance ladder）：天文學家利用已知距離的鄰近天體，來校準更遠處天體的距離。他們透過這種方式逐步建立起由近而遠天體的距離，直到遙遠的天體的移動實際上與哈伯流一致為止，也就是達到完全均質且均向宇宙裡的星系遠離我們的平均速率。不過，天文學家並不十分明瞭許多用來建構距離階梯的天體背後的物理。因此，當他們以經驗修正觀測數據時，會不知不覺摻入偏見，進而限制了用傳統階梯方式結果的可靠性。

重力透鏡確保以單一步驟便可獨立精準地測定哈伯常數。這種構想在 1964 年由瑞夫斯達（Sjur Refsdal）率先提出 [5]，測量的是方向不定的光源所呈現出的多重影像。能產生如圖 1 到圖 3 這類多重影像的稱為強透鏡。強透鏡使光線向不同位置偏折而製造出不同的影像，而這些光線彼此間的傳遞時間差距可達數天，有時甚至長達數年，但都與哈伯常數  $H_0$  成反比。這種時間延遲的現象，最適合使用位於地表且以監測為目標的光學或電波望遠鏡來準確測定。天文學家除了已充分理解重力透鏡的物理外，更可藉由測量距離較近天體的多重影像，推算出幾乎不受  $m$  與  $\Omega_\Lambda$  等宇宙學參數影響的哈伯常數值。

不過，透過成像時間延遲來決定哈伯常數，會面臨一項重大困難。除了時間延遲外，我們還必須準

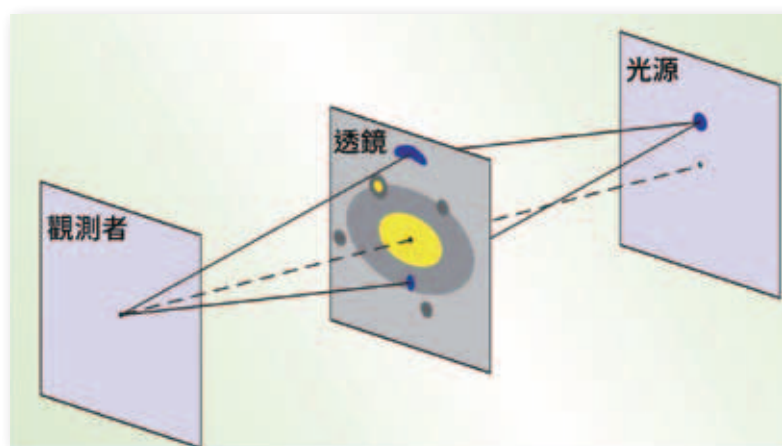




圖 2 哈伯太空望遠鏡所拍攝的透鏡系統 CLASS B1608+656 的真色影像。兩個前景星系（G1 與 G2）放大並扭曲了背景的單一光源，造成四個明亮的鏡像天體（A - D）。（感謝 Tommaso Treu, UCLA 提供）

確知道透鏡的質量分佈，以及其他鄰近星系對重力透鏡位能的微小擾動；因為透鏡的幾何與時間延遲畢竟是由整個重力場所決定的，我們只是由時間延遲現象估算  $H_0$  的大小。觀測通常都只專注於量測時間延遲，而忽略了質量分佈。因此，不同透鏡系統所推算出來的  $H_0$  值往往不太一致。在 2004 年 6 月本文完成時，已有十幾個透鏡系統的時間延遲獲得相當準確的測量，很快就會有更多系統加入這個行列。在獲得完善的延遲數據後，天文學家就可將心力轉為精密模擬透鏡星系裡恆星與暗物質的質量分佈，更精確地測定它們的重力位能。

圖 2 是強透鏡系統的絕佳範例，是「宇宙透鏡巡天計畫」（Cosmic Lens All-Sky Survey，縮寫為 CLASS）觀測到的強透鏡系統 CLASS B1608 + 656。此系統特別引人注意，因為天文學家已測出 4 個鏡像間的所有時間延遲數據，延遲的範圍從 4 到 10 週不等。雖然那兩個透鏡星系使 B1608 + 656 化身為一個頗複雜的系統，但綜合時間延

遲數據、哈伯太空望遠鏡拍攝的光學影像，以及從夏威夷茂納開亞（Mauna Kea）火山上凱克（Keck）望遠鏡得到的速度資料，可建構出準確的透鏡星系質量分佈模型。在合併時間延遲與質量資訊後，推算出誤差 10% 以內的  $H_0$  值為  $75\text{km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$  [6]，由於這僅是由單一透鏡系統給出的數值，儘管它符合「哈伯太空望遠鏡關鍵計畫」（HST Key Project）的觀測結果 [3]，我們仍需抱持謹慎的態度。不過，在過去幾年裡，已有其他透鏡系統受到詳盡分析，它們所測得的  $H_0$  值似乎逐漸收斂。這使得我們相信，再過不久有可能改善技術並擴大樣本數目，使重力透鏡能夠

突破 10% 精準度的限制，獲得更準確的  $H_0$  值。

### 限制宇宙學模型

只要有足夠的資訊，知道透鏡源的紅移分佈、透鏡星系的區域密度、和透鏡的質量－密度對應數據，那麼在大型透鏡搜尋計畫中偵測到的強透鏡數目，預期將會是宇宙幾何與運動學的函數。宇宙學參數一旦改變，介於地球與遙遠光源分佈間的體積也會跟著改變。因此，位居其間的透鏡星系數目亦隨之改變。例如，添加暗能量會造成體積擴大，我們便預期調查中可見的重力透鏡數目會增加。所以，天文學家可透過模型預測與透鏡調查結果的比較，來侷限宇宙學參數值的可能範圍。

還有一種對宇宙物質密度變化很敏感的技術，靠

① 編註：pc 即秒差距，為常用天文距離單位。1pc 大約等於 3.26 光年。本文用到 kpc（千秒差距），Mpc（百萬秒差距）。1Mpc 大約等於 326 萬光年。

的是弱重力透鏡效應，也就是重力強度不足以產生多重影像的透鏡系統。改變弱透鏡的重力位能，會造成背景光源形狀些微的扭曲變形。測量那些變形量便能推算出密度起伏的振幅大小；三維資訊可由所謂的「斷層掃描巡天」(tomographic survey) 提供，或者將徑向變數積分之後，也能決定二維的密度變化。目前的弱透鏡測量會產生簡併的狀況：測量的結果可能來自於高密度宇宙裡的微小起伏，也可能由低密度宇宙裡的大規模起伏產生。但由於微波背景觀測可決定獨特的早期宇宙密度起伏；因此，結合微波背景與弱透鏡觀測便可確定宇宙的質能密度。

無論是強透鏡或弱透鏡觀測，都得到  $\Omega_m$  顯著小於 1 的結果。假定宇宙幾何是平坦的，最大規模的強透鏡搜尋（也就是 CLASS）測出  $\Omega_m \sim 0.2-0.3$ ，誤差約 0.1 左右 [7]。目前透過弱透鏡測得的  $\Omega_m$  大概是 0.3，有 10% 左右的誤差 [8]。這些結果與其他獨立測量（如遙遠超新星）的結論一致。

質量起伏的本質與發生過程本身就是值得關注的課題。因為畢竟星系團、星系、與恆星等結構就是源自於某種起伏，並受其自身重力的影響而成長演化。弱透鏡與強透鏡都提供了寶貴的工具，用來量測宇宙最大至最小尺度的質量分佈 [9]。由於光的偏折並不是由造成偏折的質量或能量的組成或運動狀態來決定，因此我們可以透過它來研究包括暗物質在內的所有質量分佈。所以運用重力透鏡方法會比研究單純的星系分佈來得更好。基本上，星系的分佈只能追溯會發光的物質，因此必須輔以一個稱為偏離因子 (bias) 的不確定因素，才能將光的起伏與質量起伏連結起來。換言之，偏離因子代表的其實是決定星系在暗物質汪洋的何處形成的規則。

## 大尺度結構

宇宙學家有一套描述從微波背景形成 ( $t \sim 40000$  年) 開始到今天 ( $t \sim 140$  億年) 密

度起伏成長狀況的理論。雖然這似乎為觀測提供了一致的詮釋，但它絕對需要接受檢驗。而測量弱透鏡在各種角尺度範圍中造成遙遠光源的變形量，就是驗證理論的一種絕佳方式。這個方法對物質（不論是否會發光）在宇宙下半生密度起伏的振幅大小非常靈敏。

假如  $\delta\rho/\rho$  是一個張角為  $\theta$  的球形區域裡的密度起伏，它對個別星系影像造成的變形量約為  $\Omega_m\theta(\delta\rho/\rho)$ 。這樣一來，沿著視線方向上就遍佈著大約  $\theta^{-1}$  個可隨機發生扭曲變形的獨立球形區域。因此，我們就可推估測得變形量的振幅（又稱為宇宙切變，cosmic shear）約略等於  $\Omega_m\theta^{1/2}(\delta\rho/\rho)$ 。在 0.5 至 10 角分尺度範圍內（約等同於 0.5-10 Mpc 的線性尺度區域），宇宙切變大小通常會從百分之幾降為千分之幾。宇宙切變在 2000 年時首度由五個國際研究團隊分別獨立偵測到 [10]。

為了探測大尺度下的密度起伏，天文學家觀察天空上張開  $\theta$  角大小的圓圈，測量在那些圓圈裡眾多星系的形狀，並計算星系的平均切變。如果一個樣本包含  $N$  個星系，則其統計誤差的大小約等於  $N^{-1/2}$ 。不過，還必須考慮來自大氣狀況、望遠鏡與偵測器的系統效應。通常，大概需要  $10^5$  個星系左右構成的樣本，才能以合理的精確度測出樣本的宇宙切變。天文學家最近觀測一個包含超過 100 萬個星系的樣本，計算密度起伏相對於角尺度的關係，發現其斜率符合理論預期 [11]。

不過到 2004 年為止，對宇宙切變的測量僅涵蓋了遠小於整個天空 1% 的區域，且許多還只是初步結果。由於廣角巡天與弱透鏡斷層掃描可繪出從最大尺度到星系團大小的詳細質量分佈圖；因此，透過這些質量分佈圖的研究，未來幾年內天文學家對宇宙大尺度結構的理解將大幅提升。

## 星系團與星系

星系團是宇宙最近坍縮形成的最大尺度結構。因



圖 3 透鏡星系團 Abell 1689。注意沿著星系團中心的切線方向上，分佈著許多道弧型物體。它們是位在不同距離上的強透鏡背景光源。這些弧型物體的位置與形狀，可用來測定星系團的質量分佈，甚至宇宙的尺度因子。（感謝：NASA; N. Benitez, Johns Hopkins University; T. Broadhurst, Hebrew University of Jerusalem; H. Ford, JHU; M. Clampin, Space Telescope Science Institute; G. Hartig, STScI; G. Illingworth, University of California Observatories/Lick Observatory; the Advanced Camera for Surveys science team; and the European Space Agency.）

此，它們對於結構從線性尺度 ( $\delta\rho/\rho \ll 1$ ) 到非線性尺度 ( $\delta/\rho \gtrsim 1$ ) 如何演化的研究而言非常重要。它們的質量可達  $10^{14}$  太陽質量以上，其中約有 85% 是暗物質。星系團的觀測結合大型數值模

擬的預測，可作為宇宙學模型的基準檢測。

弱透鏡測量可協助解析半徑  $r$ ，張角最大為 10 角分範圍內的質量分佈。在此半徑尺度上，星系團開始與周遭的大尺度宇宙環境融合。如今弱重力

透鏡研究開始結合 X 光觀測、星系速度測量、以及偵測光子通過高溫游離的星系團氣體時在微波背景上造成所謂的桑涅夫－澤爾多維奇 (Sunyaev-Zel'dovich) 傾斜等。天文學家在擁有這些數據後，便可逐步拼湊出星系、暗物質、與組成星系團氣體的分佈圖。

豐富星系團的內部區域 ( $r \lesssim 100\text{kpc}$ ) 常對背景星系展現出強重力透鏡效應，製造出壯觀的多重巨大弧形結構，如圖 3 所示。測量這種弧形結構時，可搭配 X 光觀測，並研究中央星系的恆星運動學，以決定中心的質量分佈情形。模擬預測，內部區域的非均向密度分佈變化率  $-d(\ln \rho)/d(\ln r)$  介於 1.0 到 1.5 之間，中心呈尖點狀 (cuspy)。但近來觀測顯示該密度變化比模擬平緩得多。若這項觀測能通過嚴格的檢驗，表示暗物質或許與我們設想的稍有不同。例如，它可能是微溫的，或者會進行自我交互作用。

星系是用來追蹤遙遠宇宙最主要的工具。一般認為，它們和星系團都會隨著宇宙的成長而經歷階層式合併的過程。然而相較於大尺度結構及星系團，我們對星系形成與演化的了解更需要依附模型，因為氣體的運動、恆星、輻射以及核反應過程都可分隔氣體、恆星與暗物質，並透過不易量化的方式來影響星系的質量與能量內涵。所以，弱透鏡測量就變得特別重要，因為它們可以在幾 kpc 到數百 kpc 的徑向尺度上提供精準的星系質量測定。

重力透鏡在決定超越本地局部宇宙尺度（也就是紅移約大於 0.1 以上）的星系質量與質量分佈上扮演重要角色。我們知道星系較外圍的部份（也就是它們的暈，halo）主要由暗物質構成，但我們並不清楚暈的範疇與形狀。在數十到數百 kpc 的尺度上，星系－星系透鏡是用來探測暈的極佳方法。這個技術利用統計測量星系周邊的弱透鏡變形量，因為背景星系常沿著切線方向變得細瘦狹長。天文學家已運用此法追蹤遠在星系發光區域外的暗物質

暈，並揭露徑向上的物質密度分佈，確實與數值模擬的結果一致。對於典型的明亮星系，天文學家也測量了它們的半質量半徑 (half-mass radius)，證實暗物質也會沿著光亮分佈的方向延展拉長。

在半徑約 10 kpc 的區域內，強透鏡可用來測定質量分佈的狀況。將詳細的質量模型與準確的光度與光譜測量結合起來，便可推算出個別星系內的恆星與暗物質分佈。當哈伯太空望遠鏡聯合電波望遠鏡的觀測時，可產生高解析度影像；地表的大型光學望遠鏡則可提供恆星速度分佈的數據。最近的觀測結果顯示：遙遠星系擁有滿足  $\rho \propto r^{-2}$  關係的等溫密度 (isothermal density)，但指數的數值變動顯著，不確定性可達 15%。這些關於遙遠星系的結論，都和從鄰近星系所得到的一致 [12]。

在星系周遭暗物質暈內的較小尺度裡，以純粹冷暗物質所進行的模擬預測結果是：有 10% 左右的暗物質質量，應該化為數百至數千個小型緻密的衛星星系。令人訝異的是，我們在銀河系附近只看到少數這樣的小系統。這對暗物質理論是一個嚴重的問題 ①。

或許衛星星系一直存在著，只不過因為不含可發光的物質而偵測不到。這樣的衛星星系會影響個別透鏡星系產出多重影像的性質。當透鏡星系的質量分佈夠均勻時，就會具備一項顯著的特性：假如它製造出 2 或 3 個高度放大的合併影像（例如圖 2 的 A 與 C 影像），則有一種特定的組合，可使影像通量加總為零。另一方面，如果透鏡星系的質量確實包含許多暗物質衛星星系，則與它們相關的小尺度重力位能微擾會破壞該通量關係。檢查許多擁有高度放大影像的透鏡系統發現，通量並不會剛好加總到零 [13]。這被解讀為首次偵測到這些暗物質衛星星系的證據 [14]。

不過，到目前為止僅有少數透鏡星系經過這項通量關係的檢驗。因此，這個令人振奮的暗物質衛星星系的存在跡象，只能視為初步結果。要確認

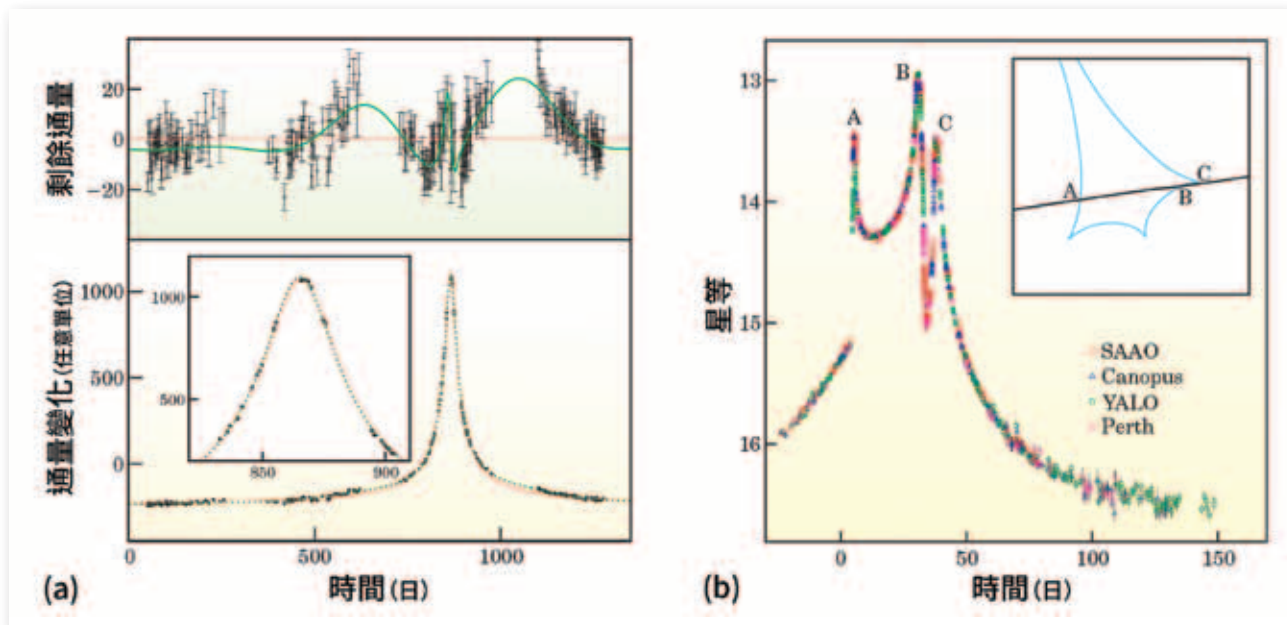


圖 4 微透鏡效應：(a) 在微透鏡事件 OGLE-1999-BUL-32 裡，可見光曲線顯示通量如何隨事件的發展過程而演變；插圖顯示高峰附近的光曲線。從光曲線推測出透鏡物體的質量，天文學家認為該天體可能是個黑洞。基於幾何特性與此事件較長的時程，當光曲線模型考慮地球軌道運動時所得出的結果（綠），會與標準模型（紅）十分不同。（摘錄自 S. Mao et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. 329, 349, 2002.）(b) PLANET（透鏡異常探測網）聯合觀測 EROS BLG- 2000-5 事件所得到的可見光曲線。數據來自於南非天文台（紅）；塔斯馬尼亞的老人星觀測站（Canopus Observatory）（藍）；YALO 聯盟（綠）；以及澳洲伯斯天文台（紅紫）。插圖顯示一個微透鏡聚焦（淡藍）與透鏡天體穿越它時的路徑。A、B、C 三點是對應到光曲線上三突起處的天體位置。摘錄自 J. H. An et al., Astrophys. J. 572, 521, 2002.) 橫軸的時距長度是任意定的。

這些衛星星系的存在，天文學家必須看見它們對多重影像光源的通量與形狀所造成的直接效應。高解析度（約 0.001 角秒）的電波觀測可顯現那種效應。另外，由於吸收、散射等傳播效應及微透鏡（microlensing）的效應，在中紅外光波段都可被忽略，所以在此波段觀測類星體的透鏡影像，也能揭露衛星星系的直接效應。

### 恆星與行星

很小的質量可利用微透鏡來偵測，這是因為小透鏡物體在通過我們視線方向附近時，會造成背景光源的通量變化。微透鏡會形成多重影像，因此可被當成在極小角尺度（通常從微角秒到毫角秒）範圍裡的強透鏡。目前的天文望遠鏡還無法解析這麼小尺度的多重影像，但可偵測到被折射光源的總亮度變化。

明亮的恆星與紮實的暗天體都可扮演微透鏡的角色。特定背景光源被銀河系的恆星分佈前景折射的機率極小，大約只有  $10^{-6}$  左右，因此天文學家必須進行大型的微透鏡調查。他們朝向銀河系的中心區域附近或鄰近的大星系觀測，因為那些地方有數百萬顆恆星的光線有機會被折射。

最引人關注的結果來自於「大質量緻密量體」（Massive Compact Halo Object; MACHO）及「體驗暗天體研究」（Expérience de Recherche d'Objets Sombres; EROS）等團隊。他們監測大麥哲倫雲裡的恆星，試圖尋找我們星系量裡的緻密暗物質所造成的快速放大率變化 [15]。MACHO 宣稱約有 20% 的銀河系量，是由一些具有 0.5 個太陽質量的

① 編註：目前已知銀河系的衛星星系共有 35 個，包括今年（2015）三月新發現的 8 個。

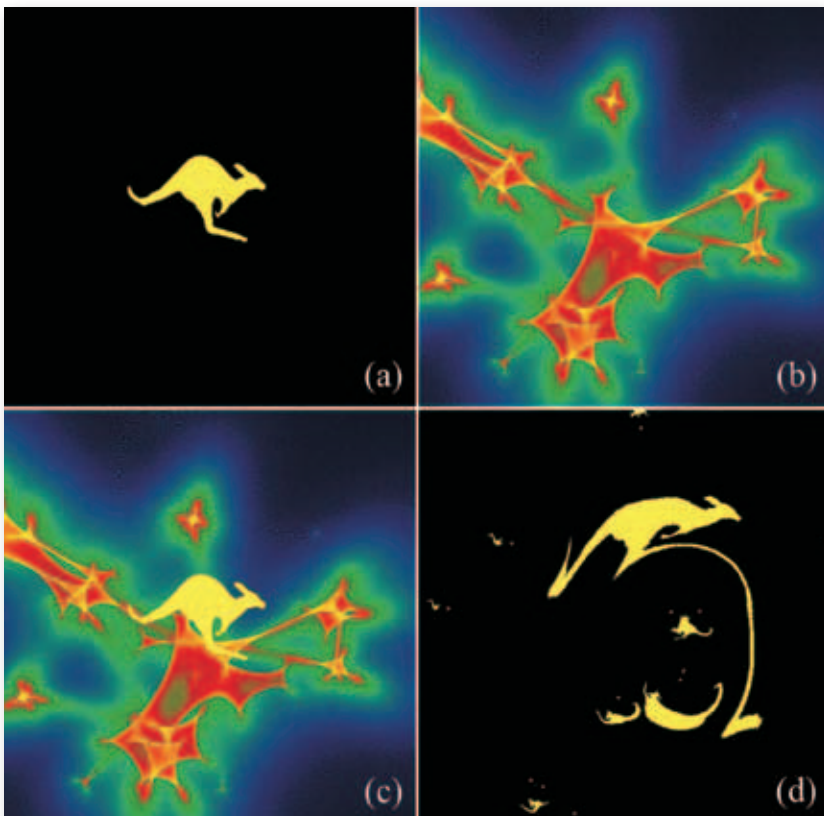


圖 5 微透鏡的袋鼠像。在此展示數值模擬的結果：光源 (a) 是任意的緻密天體 (例如恆星) 分佈。那些天體形成的焦散網絡 (b) 是具有超高放大率且極度扭曲變形的區域。(c) 圖把光源與焦散網絡重疊在一起，(d) 圖則描繪出透鏡影像。由於微透鏡成像的時程通常只有幾微秒，因此，當透鏡在光源之前通過時，觀測者將只能看見光源兩度隨時間的變化。(感謝：Joachim Wambsganss, Potsdam University.)

緻密物體所組成，但這部分的物質質量已超過已知恆星的總質量了。光源與透鏡皆位於麥哲倫雲的自我折射聚焦 (self-lensing) 或可用來解釋 MACHO 所觀測到的結果。EROS 團隊則找不到像 MACHO 那麼多的微透鏡事件，但認為緻密暗物質天體最多佔星系量質量的 25%。無論如何，現在我們已經知道只有一小部分銀河系量的暗物質，是由大質量緻密物體所構成。因此，我們只能在粒子物理的領域中尋找暗物質的可能組成。

微透鏡也可作為探索黑洞的無價之寶。每當測出透鏡的質量大於三個太陽質量時，就認定可能有「暗星」(dark star) 存在，因為那已超出中子星或白矮星的質量範圍了。若透鏡距離夠近，我們就可排除發光恆星的可能性。這麼一來就只剩黑洞能

解釋微透鏡現象。微透鏡技術差不多是天文學家可用來測量銀河系裡個別黑洞密度的唯一工具。已有三個非常可能是黑洞的天體，就是透過這項技術偵測到的，其中之一顯示於圖 4a。

雙透鏡系統會產生更加複雜的通量分佈，請參見圖 4b 的例子。當行星距離太過遙遠而無法被直接看到時，這種複雜的光曲線就可成為辨識行星的好方法——行星與其母恆星是被折射的鏡像雙星。「可見光重力透鏡實驗」(Optical Gravitational Lensing Experiment) 與「微透鏡觀測天文物理」(Microlensing Observations in Astrophysics) 計畫合作，最近發現第一起令人信服的這類案例，是由一顆恆星與其擁有木星質量大小的伴星所形成的 [16]。

微透鏡在我們星系裡是不太可能發生的，但遙遠的強透鏡星系可形成焦散線網絡 (caustic network，參見圖 5)，在微角秒的尺度裡放大或縮小緻密光源 [17]。例如，可見光類星體的吸積盤，或電波噴射流的衝擊波波前之透鏡影像，就可能被高度放大；於是，我們便可在極小的尺度中，探測它們的大小與形狀。天文學家從微透鏡的研究裡，得知大質量黑洞對於遙遠星系量的整體質量，只佔了些許比例的微小貢獻而已。

### 大型與深空巡天計畫

由於天文學家在電波與可見光頻段小心謹慎的觀測，才使得重力透鏡得以從純粹的科學好奇迅速發展成探索宇宙的工具。雖然如此，天空中有為數超



過千億的可觀測恆星與星系有待觀測，宇宙深處仍有許多尚待完成的工作。

下個階段的研究早已開始進行。地表望遠鏡正在執行中的大型與深空巡天計畫，將觀測超過 1 千萬個星系，並在約 1 度角的尺度裡測量它們的弱透鏡變形量。那些計畫應該會發現許多強透鏡與微透鏡的新案例。其中一些觀測將使用不同顏色的濾鏡測量星系光度紅移，以決定星系的距離，因此可做斷層掃描的研究。目前正進行中的計畫也將提供質量起伏的演化數據。這些數據可以和數值模擬由各種宇宙模型中產生的準確預測互相比對。

對未來的期待無疑圍繞在重要的新建望遠鏡身上，它們的設計可同時執行重力透鏡的研究。其中之一是稱為 SNAP (SuperNova Acceleration Probe，即「超新星加速探測衛星」) 的太空望遠鏡。透過研究超新星並繪製弱透鏡分佈圖，SNAP 將可測量宇宙的大小與形狀。它或許也能偵測某種新型態的弱透鏡現象。SNAP 將觀測的十來億個星系，構成了我們今日所看見的周圍星系。由於它們太過暗淡，以致於無法測出形狀。然而，它們其實是群集在一起的。跟較明的亮星系一樣，這些群集在一起的星系也會呈現切變。如果可以偵測到這種切變，天文學家就能據此推知那些星系的紅移分佈。此外，SNAP 應還能發現數萬個星系大小的強透鏡事件，增進天文學家對星系質量分佈的理解。

籌劃中的「大型綜合巡天望遠鏡」(LSST) 與技術層次稍低的「泛星計畫」(PanSTARRS) 採取互補方式研究重力透鏡<sup>①</sup>。那些計畫將觀測地平線以上的半個天空，但大氣層的干擾將使其解析度比不上太空望遠鏡。它們應該能產生 10 億個星系的圖像，因此可看見本地宇宙最大規模的質量結構。透過弱透鏡研究應會發現數量龐大的星系團，而它們隨時間演化的密度可用來檢驗宇宙的動力學理論。

電波望遠鏡的觀測能力應該與光學望遠鏡不相上

下。它們目前(2004年)正在進行性能提升，其中低頻電波陣列(Low-Frequency Array)與平方公里陣列(Square Kilometer Array)這兩具較大型的電波望遠鏡值得我們期待。

迄今為止，科學家僅能掌控部分重力透鏡的研究；在這個領域的歷史上出現過太多意想不到的現象。還有什麼領域比暗能量、暗物質、暗恆星與行星的觀測研究，更有機會與偶然的發現不期而遇呢？我們預期重力透鏡將繼續藉由意外的發現，增進我們對宇宙的理解。∞

#### 本文出處

*Physics Today* 57 (2004) 6, pp.45. 網頁為

<http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/57/6/10.1063/1.1784273>

#### 譯者簡介

李沃龍為國立台灣師範大學物理系助理教授，長期與《科學人》雜誌合作，有許多天文物理類譯作。

#### 延伸閱讀

► Arkani-Hamed, Nima; Dimopoulos, Savas & Dvali, Georgi, "Large extra dimensions: A new arena for particle physics" *Physics Today*, 55 (2002) 2, p.35. 大尺度額外維度模型的介紹。

<http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/55/2/10.1063/1.1461326>

► 重力透鏡早期的發展過程可參考：

[http://www.einstein-online.info/spotlights/grav\\_lensing\\_history](http://www.einstein-online.info/spotlights/grav_lensing_history)

► "The Dark Matter Mystery: Gravitational Lensing" 加拿大理論物理周長研究所 (Perimeter Institute for Theoretical Physics, PI) 製作的系列科普影片中的其中一章。除原理介紹外，特別強調其在暗物質問題上的啟發。

<https://www.youtube.com/watch?v=7xKFrzhM2Y>

► "Gravitational Lensing" 是美國費米國家實驗室製作介紹「重力透鏡」的影片。

<https://www.youtube.com/watch?v=4Z71RtwoOas>

① 編註：LSST 全名為 Large Synoptic Survey Telescope。PanSTARRS 的全名為為 Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System, Pan-STARRS，直譯為「全景巡天望遠鏡和快速回應系統」。