

## 天文與地球物理學：通天徹地之能

地球與太陽系中各個天體的表面形象似熟悉而又陌生，似遙遠但實在又可以企及，所以太空科學最能刺激人類的好奇心與想像力。然而，現代科學對「天」與「地」的觀測與了解，實在遠遠超越太陽系：它不但伸展及於整個宇宙，包括它的形成之初，而且深入我們站立的地殼之下，及於地幔，乃至地核以內。近二三十年來，由於太空科學的誕生與電腦之日新月異，這種「通天徹地」的探索，更受到強烈刺激而不斷飛躍發展。

### 甲 望遠鏡的革命：它活了

先說「通天」吧。四百年來望遠鏡始終是天文學家的主要乃至唯一法寶，而它的改進則總是朝着增加口徑以提高分辨率和集光能力的方向發展。40年代末落成的加州巴洛馬山 (Mount Palomar) 希爾 (Hale) 200吋 (5.02米) 口徑大鏡是這一途徑的里程碑，甚至也可以說是終點。90年代初在夏威夷基亞山 (Mouna Kea) 上落成的格克 (Keck) 鏡和歐洲各國在智利聯合建造、現在剛剛落成的「歐洲南天觀測台」，則可以視為二十一世紀望遠設備的起點 (彩頁A)。這些新一代設備的基本形態起了革命性變化：首先，它們不再是單鏡，而是鏡群 (格克是一對10米鏡，南天台則由四座8.2米鏡組成)，各鏡可以單獨運作，亦可協同觀測，原則上可以形成分辨率等同於口徑達100米以上的超巨鏡。其次，今日的「鏡」已不再是一塊厚重無匹的巨型玻璃，而是由數百枝電腦程控桿不斷調節其曲率與形狀的可屈曲面，其厚度只有10-20釐米——它已和人眼一樣「活」起來了①！

新一代望遠鏡必須是「活」的才能充分發揮功能，這不僅因為它們協作的時候必須補償鏡與鏡之間的光波「相差」(Phase Difference)，更因為每一鏡亦都必須以「調適光學」(Adaptive Optics) 的技術來克服大氣密度擾動對影像分辨能力的影響。所謂「調適光學」，主要是不斷調節鏡面各部分的位置，以補償由大氣擾動所造成的光波到達鏡面不同部分的時間誤差。由於這擾動不斷變化，所以如何以每秒上千次的在線 (On-line) 速度來測定擾動，同時立即實施鏡面調校，是這技術的關鍵 (圖1)。目前解決這問題的方法大致有兩途。一是利用在望遠鏡視野內的恆星作為參照訊號，從它的漫射來返求大氣擾動；其次，在沒有自然星作為參照時，則以強力激光聚焦於10-100公里高空，以其所受空氣或高空鈉原子的反射形成「人造星」，以產生相類似的參照訊號。這一方法目前尚在實驗階段，但已證明原則上可行 (圖2)。更長遠的構想則是，以迅速地不同方向和不同高度聚焦的脈衝激光來實現瞬時大氣密度分層造影 (density tomography)，從而測定能徹底消除大氣擾動效應的精密參照訊號。這一構想為口徑等同於100米以上的超巨鏡達到其分辨率理論極限 (至少為6.

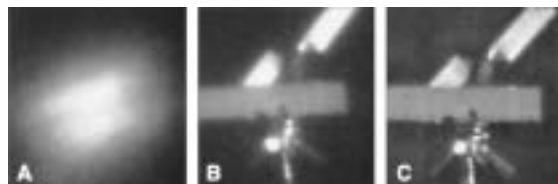


圖1 美國空軍在夏威夷「星火光學試驗場」(SOR)以「調適光學」技術所攝得在1,000公里高空的Seasat衛星照片，分辨率達25釐米，即相當於 $2 \times 10^{-7}$ 弧度：A 未經處理的毛照由於大氣擾動而模糊一團；B 經「調適光學」在線補償處理的照片；C 經事後進一步處理照片。

Courtesy of NASA/JPL



Courtesy of AFRL.

圖2 「星火光學試驗場」3.5米遠鏡所配備為產生「人造星」之用的鈉激光。

$7 \times 10^{-9}$  弧度，等於分辨月球上的人打下基礎，屆時(也許只是一二十年後)正如四百年前望遠鏡替代了人眼的時候一樣，我們會發現宇宙陡然被拉近了許多②。

當然，要完全脫離大氣干擾，也可以把望遠鏡送上太空。大約十年前升空的2.5米哈勃(Hubble)太空鏡，以及較小但已準確測量了一百萬顆恆星位置的歐洲希巴谷(Hipparcos)太空鏡已經證明這構想完全可行，而且是劃時代的突破。現在美國太空總署(NASA)已在計劃口徑達8米之巨的所謂「新一代太空鏡」(NGST)，但它的升空恐怕也還要在十年之後。

## 乙 宇宙微波與未來前途

從上世紀開始，天文學家就已經對紅內光發生興趣，可是他們完全離開望遠鏡和可見光譜，則以二次大戰後蓬勃發展的無線電天文學為開端。在過去半個世紀，這一新領域的成績是非常輝煌的：在1965年發現的2.7K(絕對溫度)宇宙微波背景(CMB)，亦即是宇宙形成之初所發生「大爆炸」的殘餘溫度，以及1968年發現的脈衝星(其後證實為中子星)，都是由觀測其無線電輻射而來。而近數十年星雲形成以及類星體(quasar)的研究，也都離不開無線電波的接收。

宇宙微波之所以被認定是「大爆炸」的殘餘，除了其溫度(2.7K)以及其黑體輻射頻譜切合理論預測之外，最重要的證據便是其強度在各個方向完全一樣，即具有高度各向同性，這證明它是與整個宇宙密切相關，而非來自任何特殊天體、星雲或區域。然而，到1992年，卻又有意想不到的新發展：宇宙微波在不同方向的極細微而混亂的強度變化(約為 $10^{-5}$ )測出來

了。這種細微局部變化反映了宇宙在大爆炸之後的不均勻物質分布，以及星雲形成的雛形，而且，也與目前宇宙膨脹的至終命運相關。在1998年底，被氣球帶上南極數十里高空的BOOMERANG精密微波觀測儀進一步測出詳盡的太空背景微波色溫局部變化圖譜(彩頁B, C)，其角度分辨率達到 $1^\circ$ 。從變化幅度的統計分布，天文物理學家得出了宇宙物質密度與其膨脹能量是平衡的，所以膨脹會平穩地持續下去，而不會加速或者停下來那樣的結論③。

## 丙 黑洞與銀河核心爆炸

在可見光譜另一面是能量高得多，但完全不能穿透「大氣窗口」(那只容可見光和無線電波通過)的X-光。「自由號」(Uhuru) X-光探測衛星在1970年底升空後立刻就迎來第一個大發現：天鵝座(Cygnus) X-1於1973年被確認為由黑洞及其伴星形成，從而為已經有三十餘年歷史的廣義相對論預測找到初步證據。其後三十年間一系列X-光觀測設備相繼升空，從而開闢了研究質量高度密集的巨型黑洞、活躍銀河核心、超新星、類星體等高能現象的嶄新領域。現在，三十年後，黑洞的存在已被充分證實——事實上它在「天體萬牲園」中已不再是罕見事物，而是宇宙質量存在的一種普通形式。不但許多星雲核心是由超巨黑洞盤踞(圖3)，即就在銀河系以內也可能有單獨漫遊的黑洞④。

比X-光能量更高的，自然還有以 $\gamma$ 射線為主的宇宙射線。1969年美國軍方由於監測太空核武試驗(其實「自由號」之升空，亦同樣與這軍事背景有關)而偶然發現了太空深處飛來的極短暫 $\gamma$ 射線爆發(GRB)。它的性質長期以來始終是個謎，雖有各種推論，例如認為它是中子雙星融合成為黑洞剎那的爆發，但始終還未有定論⑤。在90年代初升空的「康頓號」(Compton) $\gamma$ 射線探測船為這方面的研究提供了大量資料，它們與X-光觀測資料一樣，都是宇宙高能現象研

Reprinted with permission from *Science* 287, 65. Copyright 2000 American Association for the Advancement of Science.

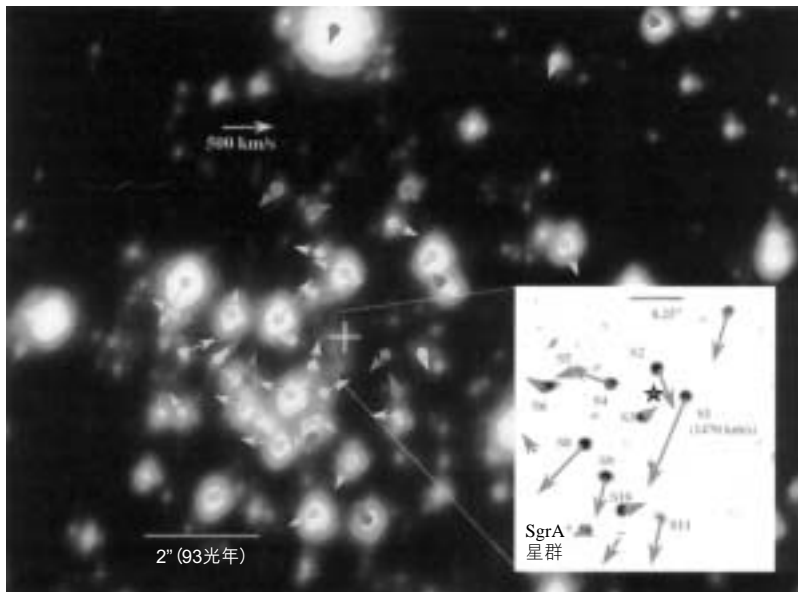


圖3 在我們銀河系核心的超巨黑洞，位置在★點。它雖然不發出任何可見訊號，但其存在可以從四周恆星的運動（其速度與箭長成比例）推測得知。

究不可或缺的（彩頁D）。由於其導向系統開始失靈，康頓號即將被迫提早結束使命，但「替任」的HETE-2快速探測台卻也即將升空（彩頁E），所以對 $\gamma$ 射線之謎的研究肯定不致中斷，而仍將繼續下去⑥。

#### 丁 漫長的探索

甚至，在電磁波以外，也還有其他來自太空深處的訊號：同樣是由廣義相對論所預測的



圖4 在美國路易斯安那州利文斯頓 (Livingston) 的四公里長引力波探測實驗室LIGO-1。

重力波就是極好的例子。萬有引力是四種基本作用中最微弱的一種，所以由於質量變化而產生的重力波效應也極其微弱——事實上，過去四十年間普林斯頓大學和加州理工學院的物理學家雖然不斷努力，但始終還未能夠直接證實重力波的存在。另一方面，詳細的觀測和推算已經間接證實，兩顆極端接近的一對中子雙星確會因彼此圍繞對方急速旋轉而發出重力波⑦。現在第一座專為探測重力波而建造的大型真空激光干涉儀LIGO-1（儀臂每邊長四公里）

剛剛落成和進入調試階段，預

期2002-2004年間將正式投入運作（圖4）⑧。由於它的靈敏度也還不算很高，所以屆時是否真能探得重力波訊號還在未知之數。但更大、更靈敏的LIGO-2和LIGO-3探測器也都已在計劃之中了：在人類對無論如何微弱的宇宙訊號嚮而不捨探索下，重力波的發現只是時間問題而已。

#### 戊 深入厚重閉塞的九地之下

宇宙雖大，但密度極低（約 $10^{31}$ - $10^{29}$  g/c.c.），所以基本上是透明的，各種不同訊號都可以自由通過。因此，「通天」之道基本上是改進各種訊號探測儀的靈敏度，以及設法了解所觀測到的迥異現象。地球雖小，而且就在腳下，但密度卻大得多（約5 g/c.c.），所以實際上只有一種訊息能夠穿過它：地震波。因此，說來弔詭，「徹地」反而比「通天」要困難得多。在近數十年間，地球物理學最主要的進步，都來自對地震震波的分析（即所謂地震分層造影法Seismic Tomography），以及建構越來越精巧、逼真的理論模型，而這兩者又都與電腦一日千里的改良分不開，那絕非偶然。當然，除此之外，從

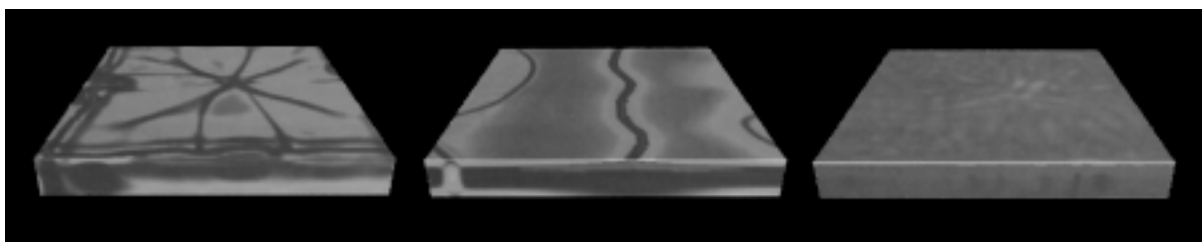


圖5 電腦計算建造的地幔對流與地殼板塊結構耦合模型：自右至左為地殼屈順(yield)強度減低時板塊自然出現的情況。

Reprinted with permission from *Science* 288, 2003. Copyright 2000 American Association for the Advancement of Science.

地殼縫隙裏噴出來的火山岩漿或深海熱羽流，以及岩層中所保存的地磁紀錄等等，也都還是熱切研究的題材。

無論如何，經過了多年不懈努力，我們現在對地球內部結構，總算是有個大致的整體了解了(彩頁F)。就地球表面而言，地殼板塊學說已經牢固建立；板塊移動與其下地幔(Mantle)對流二者之間的密切關係，也可以通過模擬計算來研究了(圖5)。在最近兩三年，地球物理學的最大進展則在於地幔結構本身，特別是自地球表面一直沉降至「核幔面」的大陸板塊，以及自「核幔面」上升至地表的超羽流之發現。前此將地幔分為上、下兩層的觀念因而被打破，為地幔是個有充分混合機制的對流整體這觀念所取代(彩頁G)⑧。甚至，深深包裹在地幔以內的地核，也不再是固定、沉默的了：高度複雜和全面的模擬計算，初次展示地磁與地球液態鐵鎳核心的旋轉之間的複雜關係(彩頁H)，它甚至還提供了模擬和預測地磁周期性逆轉的可能性。此外，震波分析顯示了地球固態內核具有彈性各向異性構造，並且相對於地殼／地幔可能有微小旋轉速度差異，這些自然都是令人深感驚訝——甚至難以置信的事⑨。

事實上，疑惑、問題往往伴隨進展而來，在必須倚賴高度間接推論的地球物理學尤其如此。例如，夏威夷火山所噴出岩漿的化學成分顯示了地域性，甚至還有地球形成之初的標記——而這是與地幔為充分混合整體的觀念大為矛盾的。因此，地幔中是否也有某些不受對流混合作用擾動的局部區域，就成為重要問題

了。又例如，固態內核與地球外殼的旋轉差到底是否存在，其實要視乎其各向異性的空間分布，而這分布還不能確定，目前只能以模型來推測。至於地殼與地幔對流之間以及地磁與液核自旋之間到底如何耦合，那更是高度複雜的問題。以我們目前的理論模型建構和運算能力，只能接觸到問題開端而已。

無可懷疑的是，隨着今後一二十年間的理論進展與計算機不斷翻新，所有這些問題都會逐漸得到解決——但亦很可能是被更新、更意想不到的發現和問題所取代。無論如何，厚重閉塞的「九地」這一印象，恐怕是要為一個有動態結構，各部分息息相關、相互影響的整體那麼一個觀念所逐步取代了。

① 本刊 48, 113 (1998.8)；Patrick Moore, *Eyes on the Universe: The Story of Telescope* (London; New York: Springer-Verlag, 1997), chap. 13.

② R. Angel and B. Fugate, *Science* 288, 455 (21 April 2000).

③ P. de Bernardis et al., *Nature* 404, 955 (27 April 2000).

④ 本刊 30, 109 (1995.8)；53, 74 (1999.6)；*Science* 287, 65 (7 January 2000)；*Science* 287, 411 (21 January 2000).

⑤ 〈中子雙星的死亡之舞〉，本刊 29, 58 (1995.6)；此外見本刊下列有關宇宙高能現象報導：24, 63 (1994.8)；28, 101 (1995.4)；33, 86 (1996.2)；47, 125 (1998.6)；53, 74 (1999.6)。

⑥ *Nature* 405, 504 (1 June 2000).

⑦ R. Irion, *Science* 288, 420 (21 April 2000).

⑧ P. J. Tackley, *Science* 288, 2000 (16 June 2000)；〈超羽流：地幔的深層結構〉，本刊 54, 95 (1999.8)。

⑨ B. A. Buffett, *Science* 288, 2007 (16 June 2000)；〈地幔核心的秘密〉，本刊 39, 123 (1997.2)。