

星戰計畫中的一環：調適光學

傅學海

國立臺灣師範大學 地球科學系

天空總是令人驚嘆，即使烏雲密佈，颶風、下雨、打雷，天空也有它的魅力，使人無法忽略。天空也常有美麗的景象，飄盪的雲朵，豔麗的彩霞，日出、月落的美景，以及在夜晚閃爍的星星。當我們仰望天空欣賞這些景物時，會覺得大自然是如此美好，心中充滿著喜悅與驚奇，並有著浪漫的感覺。實際上，天空的種種景象可以分為，大氣中與大氣外兩類，颶風、下雨、打雷、颱風、彩虹屬於是大氣中的現象，而夕陽、銀河、星星等則屬於大氣之外的景觀。

地球的大氣有如海洋，並不是平靜無波的，總是在流動中、處處在擾動中。當我們身處其間，感受到清風明月、浮雲星辰，除了颱風、豪雨等災難以外，並不會感受到大氣流動的影響。但是天文學家使用天文望遠鏡觀察天體時，除了驚嘆宇宙之奇、之美外，對於擾動的大氣，卻有著一種無能為力的沮喪。

星光為什麼閃爍

當我們在晴朗的夜晚，看著夜空中的小光點，常會浮起「一閃一閃亮晶晶，…」的歌詞。留心觀察，星光閃爍，自有一份夢幻的美。一般人並不會覺得這有什麼特別，也不會有什麼困擾，雖然也有許多人會問：「星光為什麼會閃爍呢？」

這問題倒很容易回答：由於大氣中空氣流來流去、擾動不已，使得穿過大氣的星光路徑被扭來幌去，造成星光閃爍。在日常生活中，也常有類似的情形。例如在炎熱的夏天，透過熾熱的空氣看景物，總是幌動而模糊不清。在熾熱的柏油路面上尤其明顯。簡單說來，大氣的擾動造成了星光閃爍。

大氣對地球表面的生物來說，是非常重要的屏障。高層稀薄的大氣吸收來自太陽的 X 光、 γ 射線，臭氧層吸收短波長的紫外線，使得這些對生命有害的輻射不至於抵達地面。而靠近地表的對流層帶來天氣、颱風、雲朵、…，使環境多彩而有變化。這一層保護生命的大氣，對精密的天文觀測卻是無情的殺手。因為大氣的擾動，使天文學家無法觀測到天體的細節，即使望遠鏡做得再大也沒有用，這就成為天文學家探究宇宙奧秘的障礙。

挑戰大氣擾動

依據出土的證據，遠在六千年前，人類便藉著觀察天象想要了解我們所處的宇宙。除

了太陽、月亮、流星，以及偶而出現的彗星，整個天空中只是數千個小光點。直到伽利略在 1609 年用自製的望遠鏡觀察天體，人類才突然發現天體的面貌竟然是多采多姿、變化萬千的。隨著望遠鏡的口徑愈做愈大，光學品質也愈精良，可以更清楚的觀察天體的面貌。但也面臨了大氣擾動的難題——流動中的空氣干擾了經過其間的光線，而模糊了細節。

早在十八世紀，天文望遠鏡的品質就達到了相當的水準，但受制於地球大氣的擾動，使望遠鏡的最佳解析度祇能達到一角秒（註一）左右，而無法達到理論應有的解析度。基本上，由於受到地球大氣擾動的影響，望遠鏡口徑超過二十公分後，即使口徑再增大，解析度也不會增加。因此，二十公分望遠鏡的解析度與兩公尺望遠鏡的解析度差不多。那麼，為什麼要做大口徑的望遠鏡呢？因為口徑大，面積也大，接收的星光也越多，就能觀察到更黯淡的天體。簡單的說，大望遠鏡的主要功能是發揮其集光力，而不是增加其解析力。

進入二十世紀後，一些觀念與技術被發展用來克服大氣的擾動，但都屬於將觀測到的影像進行事後的處理，而無法在觀測時就得到清晰的影像。直到星戰計劃裡重要的一環——調適光學(adaptive optics)興起、成熟，才脫離困擾天文學家兩百多年的困境。調適光學已經是廿一世紀研究用天文望遠鏡的標準配備之一。

如果星光沒有受到大氣的擾動，則透過望遠鏡所觀察到的天體影像，將呈現天體原貌，而影像解析度也將與望遠鏡口徑呈正比，即望遠鏡口徑愈大，影像解析度愈高（註二）。以人的眼睛最敏感的黃色波段來說，經過計算，如果望遠鏡的光學品質精良，則口徑十公分的望遠鏡可以分辨角度在一角秒左右的細節。目前單一鏡面望遠鏡的口徑是八公尺，解析度約為 0.015 角秒。世界最大的凱克(Keck)望遠鏡，組合了三十六個鏡面，其等效口徑為十公尺，則解析度約為 0.012 角秒。

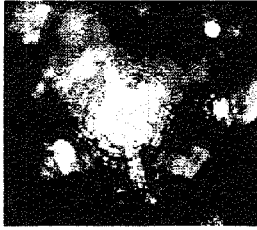
由於地球大氣擾動的影響，不論望遠鏡的口徑有多大，只能獲得一角秒左右的解析度，相當於可以看到四公尺外的頭髮，或一公里外的一元硬幣。在空氣稀薄、氣流穩定的高山，偶而大氣穩定度會稍微低於一角秒。在平地或大氣不穩定的都市，大氣穩定度通常大於一角秒，甚至高達五角秒。因此，大型望遠鏡配合使用調適光學，可以觀察到的天體影像比傳統光學系統清晰約一百倍，呈現以往所無法看到的細節。

望遠鏡能分辨的最小細節稱為解析度。任何一個影像範圍如果比解析度小，則也只能呈現解析度大小的圓斑；如果影像的細節比解析度大，就能呈現影像的細節。

例如，口徑十公分的望遠鏡解析度約為一角秒，星雲、星團、月亮、...等天體遠比一角秒大數百至數千倍以上，所以能觀測到這些天體的細節。然而，恆星的視直徑或遙遠星系的細節都遠小於一角秒，因此這些影像都呈現直徑為一角秒的圓斑。對於解析度約為一

角秒的望遠鏡來說，凡是範圍小於一角秒的天體都視為點光源，因為它們全都呈現直徑為一角秒的圓斑。

如果大氣穩定或沒有大氣，完美的點光源影像呈現一圈圈的同心圓，中央的圓斑就是解析度的大小。如果氣流不穩定，會破壞這些同心圓而看不到。



左圖為哈伯太空望遠鏡以紅外線波段拍攝的獵戶座星雲，其中一顆亮星可以看到許多繞射的同心環，其中心圓盤（由於太亮，影像中看不到）便是解析度的極限。右邊一顆比較暗的恆星可見其中一個繞射環，中心的圓盤比實際解析度約大三倍以上。至於呈現解析度大小的恆星，它的繞射環太暗無法呈現。

美國星戰計畫與調適光學

在美國雷根總統主政的 1980 年代，美蘇仍處於冷戰中。為了能在空中攔截來襲的導彈，或辨認出攜帶核武的衛星並加以摧毀，雷根總統下令發展星戰計畫，其中一個子計畫便是由美國空軍發展的調適光學。

調適光學的目標很簡單，要能及時辨認來襲的導彈或空中的衛星。想想，要在地面觀察幾十公里至一百多公里高空中的導彈或衛星，可不是一件容易的事。真正的困難度不在於辨認物看起來很小，難在「及時」兩個字。因為它們是動態的，而且是以高速移動，必須在一秒以內就辨認完畢，不然等數秒鐘後才確認，則早已延誤攔截、摧毀的時機。

一個導彈或武裝衛星的體積大約像一輛公共汽車大小，在數百公里的高空看起來，比一角秒要小。雖然很容易觀察到，但如何分辨小於一角秒的細節呢？必須克服地球大氣擾動，才能在觀測的瞬間辨認小於一角秒的細節。

在前蘇聯解體、冷戰終結以前，美國空軍已經秘密的發展了八年調適光學，得到令人鼓舞的結果，可以在不到一秒的時間，將圍繞地球運轉中的衛星影像呈現在螢幕上。當蘇聯解體、冷戰結束後，調適光學計畫解密，天文學家隨即將這技術用在天文觀測上，終於使大望遠鏡展現威力，不再受限於大氣擾動的影響，達到了應有的解析度。

將閃爍的星光還原

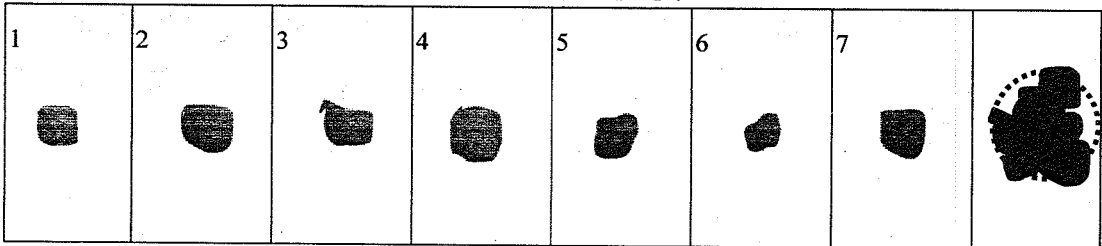
早在 1970 年代，科學家便已經深入研究地球大氣的擾動，發現星光通過地球大氣時，受到大氣的密度與擾動影響，原本直線的路徑便被扭曲歪斜。因此，一束光線中的每一條光線路徑都變得不一樣，原本聚焦成爲一點的光束，由於被扭曲投影到不同位置，成爲散

亂的許多斑點，像是散亂的一團芝麻。

許多海邊名勝屬於淺海，從海面上方可以看到海底。當海面平靜無波時，海底一片柔和。但是波浪起伏時，波峰就像一個凸透鏡將光線聚集，波谷就像一個凹透鏡將光線擴散，因此海底就呈現亮、暗的網絡狀花紋。隨著海面波動，海底波紋也跟著舞動。地球大氣的情形也是一樣，只是光線的波動遠比海波小。因此必須將影像放大數百倍以上，才能顯示波紋隨著大氣擾動而舞動的情形。

地球大氣的流動與對流非常複雜，影響大氣的主要因素是溫度。當某一處的溫度稍微升高一點點，該處的氣體就膨脹；溫度下降則空氣收縮。大氣中處處在動盪著，溫度也時時在變動中，形成無數大大小小看不到的空氣胞。將複雜的大氣運動簡單化，則大氣可以視為充滿了有大有小的空氣胞，每個空氣胞都能將光線偏折。

綜合的結果獲知，一道星光由地球大氣外進入至抵達地表的情形，相當於經過一個直徑約十公分的空氣胞，稱為「等效空氣胞」。對於口徑小於十公分的望遠鏡來說，星光只經過一個等效空氣胞，所以不會受到影響。如果用高速攝影機或攝錄機記錄影像的話，則每一幅畫面只呈現一個斑點，但下一幅畫面的斑點位置受到等效空氣胞移動的影響而移動了。所以，看連續動畫時，便看見一個斑點跑來跑去，就覺得星光閃爍著（見圖一）。但是斑點雜亂移動有個範圍，大氣越穩定，這個範圍就越小。



圖一 小口徑望遠鏡中恆星影像飄移的情形。左側 1 至 7 圖各顯示每一瞬間時之恆星影像，最右圖則為左側七圖疊加起來之情形。虛線圓為疊加數十幅以上的大致輪廓範圍，相當於長時間曝光所得到的影像。

左側七幅是單幅影像中斑點，是望遠鏡解析度的大小。最右圖為七幅影像疊加起來的情形，虛線圓是疊加數十幅以上的情形（相當於長時間曝光），表示大氣擾動使影像晃動的範圍。顯示大氣穩定度或視相（虛線圓）大約為望遠鏡解析度的三倍。

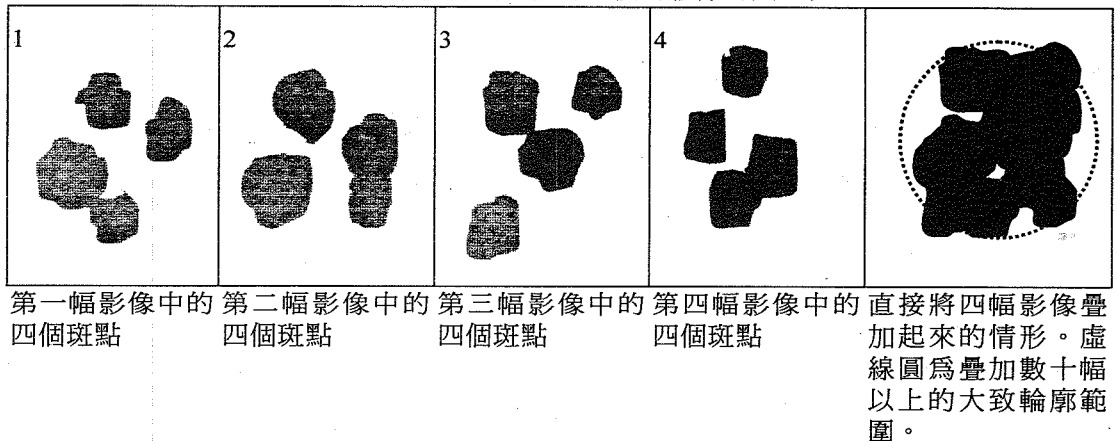
天文學家將大氣穩定的程度稱為「視相」(seeing)或大氣寧靜度。等效空氣胞的直徑與大氣穩定度與觀測波段有關。一般說來，等效空氣胞直徑約為十公分。如果大氣特別穩定，等效空氣胞的直徑可以達到三十公分。如果大氣擾動特別厲害，則等效空氣胞的直徑會小於十公分。光線的波長越長，受到的擾動也越小。由於紅外線波長比可見光長兩倍以上，

受大氣擾動的影響比較小，對應的等效空氣胞直徑也比較大。

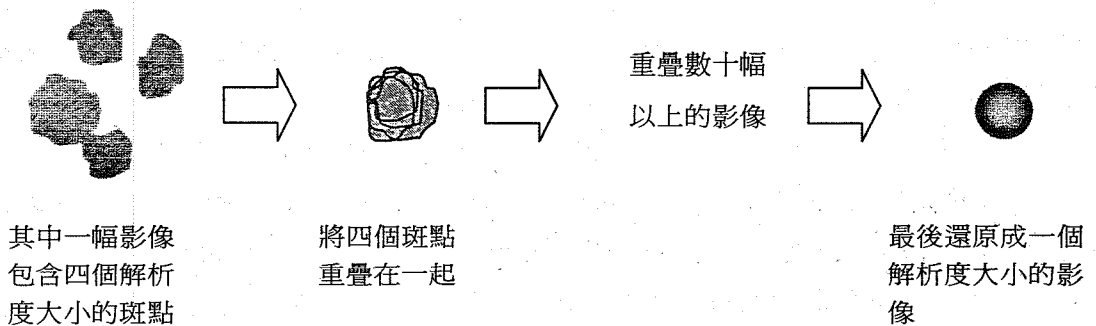
大氣擾動的變化率大約是百分之一秒；也就是說，如果以百分之一秒拍攝一張畫面，就能將大氣影像凍結。但是，人的眼睛並不能看清這麼快速移動的情形，人眼的視覺暫留大約是十分之一秒左右，所以透過高倍率來看影像，只能看見星點快速晃動後疊加的一團影像，當然就喪失了細節。

透過高速記錄的儀器，將影像凍結。然後，將每一瞬間影像中的斑點對齊、疊加起來，就能得到清晰的影像。這便是克服大氣擾動，將影像還原的基本概念。

望遠鏡口徑越大，解析度也越高，但是星光經過的等效空氣胞也越多，在聚焦面上呈現的斑點也越多。例如口徑二十公分的望遠鏡，其面積是口徑十公分的四倍，所以星光通過四個等效空氣胞，因此每幅凍結的畫面呈現四個斑點（圖二）。連續畫面則為四個斑點快速晃動的情形。要將影像還原，則必須將每一瞬間畫面中的四個斑點重疊，再將每一瞬間影像中的斑點對齊疊加起來。最後得到一幅還原後的影像（圖三）。



圖二 口徑二十公分的望遠鏡之瞬間畫面與長時間曝光的影像



圖三 將大氣擾動的影像還原之原理示意圖

同樣的，口徑四公尺的望遠鏡面積，是口徑十公分的一千六百倍，所以每幅凍結的畫面呈現一千六百個光點。這一千六百個光點混雜一團，有些光點還重疊在一起，因此要將影像還原的程序便複雜許多。

上面這種將影像還原的方式是最簡單的一種，而且過於簡化，實際的運作方式要複雜許多，必須使用傅立葉轉換(Fourier transformation)等數學運算。目前天文學家都是寫好運算程式，交由電腦來處理。

由於要瞬間凍結影像，所以曝光的時間要短，望遠鏡口徑就不能太小。望遠鏡口徑越大，就越能在極短時間內收集足夠的光線而呈現影像。目前採用調適光學的望遠鏡口徑大都在兩公尺以上，像口徑八公尺的速霸陸(Subaru)望遠鏡，等效口徑十公尺的凱克(Keck)望遠鏡…，都已經裝置了調適光學系統。

調適光學的原理

如果能測得每一道光線的實際路徑，將變長的路徑縮短，而變短的路徑放長，導引光線到應有的方向，使所有光線又循應有的路徑聚合在一起，就可以呈現影像原貌。這便是調適光學的原理，說來簡單，做來可是困難重重。爲了要達到及時還原被大氣擾動扭曲的影像，科學家發展了人造星光、橡皮鏡面、陶瓷電膜次鏡等多套技術來進行。

人造星光

首先要知道光線如何晃來晃去，致就須要一個點光源才能辦到。如果不是點光源，例如是一個像老鷹的星雲，則每一幅凍結的影像都是許多個老鷹雜亂疊在一起，根本無法知道哪一道光線射到那裡。如果是點光源就簡單多了，一幅凍結影像中每一個點（小圓斑）都代表同一個影像的不同位置，便可以加以處理。

基本上，由於恆星距離遙遠，除了少數距離很近的超巨星以外，恆星都可以視爲點光源。因此，只須要在視野中至少有一個夠亮的恆星就可以了，但是問題來了。通常在望遠鏡的狹小視野中，除了少數例外，幾乎沒有夠亮的恆星可以作爲參考用的點光源。如果是追著導彈或人造衛星，更不用說一路剛好有參考的亮星了。

調適光學了不起的地方就在這裡，既然天上沒有，就想辦法在視野中創造一個點光源。科學家詳細研究的結果，發現九十公里的高空大氣有鈉原子，如果用雷射照射，則雷射光會激發鈉原子而發出一種螢光。這些螢光可以作爲人造星光，而且可以作爲點光源。因此，將雷射安置在望遠鏡上，望遠鏡指向哪一個方向，雷射就可以打到同方向的高空，製造出人工點光源。

雷射可以照射在數十公里或數百公里的高空中，激發原子成為點光源。但是參考點光源必須夠高，才能反映出大氣的擾動。大氣擾動最劇烈的是對流層，因此人造星光至少要在對流層之上，對流層大約為十至二十公里厚。

調適光學所使用的雷射光束，不是持續性，而是脈波。雷射光束只出現數萬分之一秒就消失了，它的功能只要瞬間在高空產生人造星光就可以了。不然一直都是雷射光在照耀，就無法進行觀測了。

橡皮鏡面

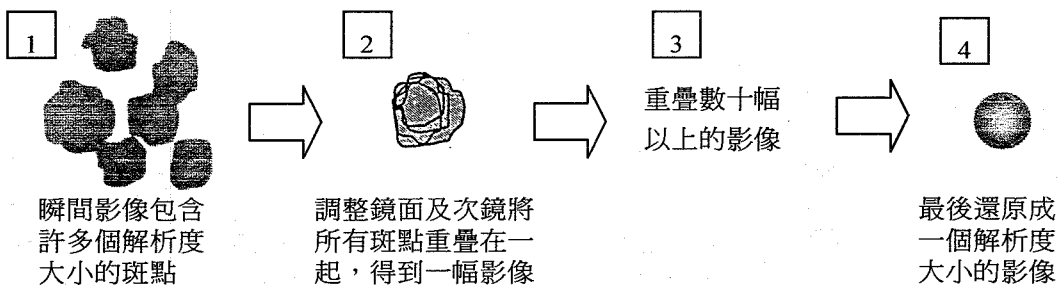
當觀測到點光源的位置，推算出光線被等效空氣胞偏折的路徑後，這時有兩種方法來改變星光的路徑。一種稱為主動光學（active optics），主鏡底部有許多小支柱，可以利用微電腦細微的升降，形成凹凹凸凸的，像橡皮般的鏡面。每一支柱所控制的區域便將星光修正偏向至合適的方向。但是支柱的位置是固定的，而且只能上升或下降，因此只能大致修正被大氣扭曲的影像。另一種稱為「陶瓷電膜次鏡」，將在下一節介紹。

光像波動一樣通過大氣，波長愈長受到的影響愈小。紅外線的波長比可見光長兩至三倍，因此受到大氣擾動的影響比較小；也就是說，紅外線的等效空氣胞直徑比較大。在調整鏡面上的支柱數量就比可見光波段所須要的少許多，所以許多調適光學也都採用紅外線為觀測的主要波段。

目前由於紅外線偵測晶片的技術已經成熟，越來越多的望遠鏡同時採用可見光與紅外線進行天文觀測。像等效口徑十公尺的凱克望遠鏡、口徑八公尺的速霸陸望遠鏡都可以進行可見光與紅外線天文觀測。

陶瓷電膜次鏡

主動光學可以調整主鏡，但是無法在每十公分大小的區域裝設一個微調支柱。因此仍然須要在次鏡上進行調整。次鏡是用陶瓷材質製作，經由電流作用可以輕微的壓力使鏡面起伏凹下，精準調整、修正每個斑點光線的路徑，使其照射在同一個位置（圖四）。



圖四 調適光學將瞬間影像中的斑點重疊在一起之示意圖

調適光學運作的步驟總結如下：

- (一)將望遠鏡對向目標後，在視野中選擇一個足夠亮的恆星作為參考點光源（只有少數例子中，可以找到）。如果沒有適合參考用的恆星，則將雷射脈波射進高空大氣創造人工星光作為參考點光源。
- (二)經由電腦分析瞬間參考點光源影像，獲得點光源分佈的情形，將訊息傳至望遠鏡主鏡下的支柱（主動光學），或陶瓷電膜次鏡。
- (三)迅速調整支柱高低使鏡面適當的位凸起或凹下（主動光學），或次鏡陶瓷電膜效應，使分佈在不同部位的影像移至應有的位置，然後將此單幅影像傳至電子記錄器（相當於曝光）。
- (四)重複步驟(二)至步驟(三)。
- (五)累積足夠的單幅影像，獲得想要的影像。

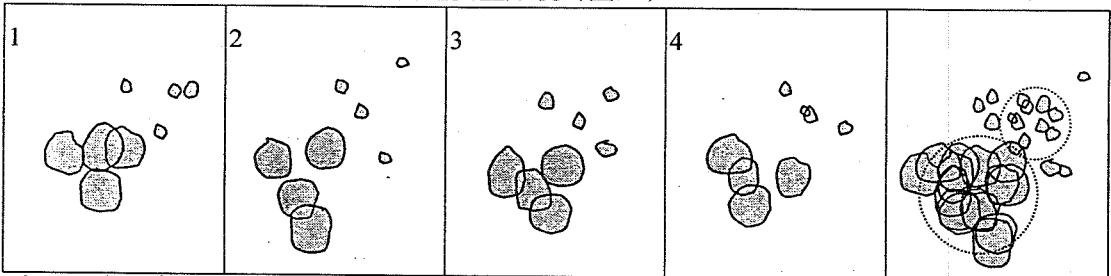
由上述步驟，可以知道調適光學須使用雷射來創造參考用的點光源，高速運算的電腦來進行計算與分析，及時反應的機電系統來調整主鏡與次鏡，缺一不可。這也說明了為什麼調適光學的技术，要歷經二十多年才成熟到可以實際利用。

調適光學現況

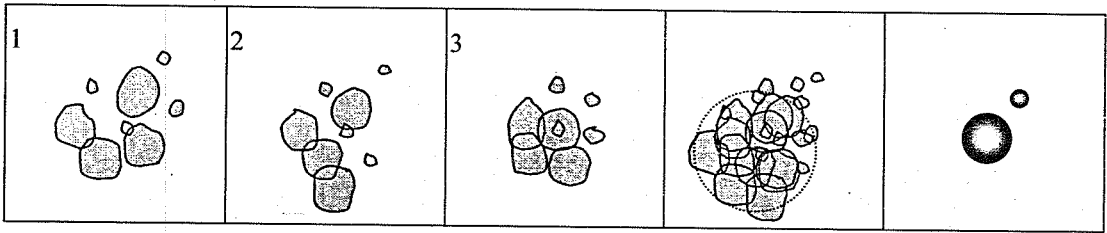
雙星觀測是最早應用調適光學的天文觀測，主要是雙星系統本身是兩個點光源，影像單純，只須要測量兩顆星的相對位置。

雙星中比較亮的星稱為主星，比較暗的稱為伴星。如果兩星相距比較遠，超過地球大氣擾動（視相）的範圍，則在長時間曝光的影像中，可以看見兩個一亮一暗的雙星影像（圖五中之兩虛線圓）。

但是如果亮星的間隔小於視相的範圍，則在長時間曝光的影像中，便只能得到一大團的圓盤狀。基本上，可以用主星為參考點光源，得到瞬間影像斑點散佈的情形，再調整鏡面將所有光線都聚焦在同一處，而還雙星原貌（圖六）。



圖五 雙星系統之瞬間影像，每一個斑點都是由一大（亮）一小（暗）所構成。左邊四圖各為單幅之影像，包含四組斑點，每一組斑點包含一大一小之斑點。最右圖為左邊四幅影像疊加起來的情形，虛線圓是疊加數十幅以上的情形。如果兩星相隔比較遠，則顯現擴散的兩團，仍然可以看出兩星分離的情形。



圖六 同圖五，但兩星相隔很近，因此疊加後已經無法看出雙星的情形。最後一幅影像是啟動調適光學校準後的雙星影像。

視野狹窄的星團，可以利用其中一顆亮星作為參考點光源，便可以得到整個星團的影像。例如獵戶座鳥狀星雲中央區，傳統光學觀測只能得到五、六顆恆星的影像，啟動調適光學後，以其中一顆亮星作為參考用之點光源，累積足夠的曝光影像後，卻得到十多顆恆星的影像。

目前調適光學的技術日益精進，已經可以用來觀測比較複雜的影像，或是大範圍的影像，成功的例子為太陽表面。

太陽表面並不是平滑的，而是像一鍋沸騰的水面，佈滿起起伏伏的對流胞。平均一個對流胞由形成至消失的時間約在五分鐘左右。太陽表層的對流胞大小約在七百公里至一千公里之間，在地球大氣的擾動下，只能得到模糊的影像。以往是利用高空氣球將望遠鏡帶至高空進行拍攝。調適光學使天文學家能夠在地面直接觀測太陽表面的細節，利用微小的太陽黑子作為參考點光源，得到顯示米粒組織的清晰影像。

結合干涉技術

將望遠鏡送上太空，費用至少數億美金，必須動用許多人力操作，維修也十分昂貴而費時。而調適光學所須要的經費只有太空望遠鏡的十分之一以下，維修也比較簡便。更重要的，目前受制於太空梭的貨艙大小，不能製作大口徑的太空望遠鏡，例如哈伯(Hubble)太空望遠鏡的口徑只有二點四公尺，可見光的解析度為 0.05 角秒。但是許多地面望遠鏡口徑都比它大，配合調適光學，解析度比太空望遠鏡高。

電波的波長是可見光數萬倍至數百萬倍以上，所以電波望遠鏡的解析度遠比可見光差，單單使用一具電波望遠鏡甚至不能判定月亮在天上的位置。但是在 1960 年代，電波天文干涉觀測技術成熟，大大提高了精確度，甚至超過了光學觀測。

干涉技術是利用分隔兩處的兩個望遠鏡，「同時」接收到天體影像或訊號並疊合在一起，則兩個望遠鏡收到的影像或訊號會彼此干涉，分析干涉的情形而得到還原後的影像。兩個望遠鏡分隔越遠，解析度就越高。電波干涉技術使用的望遠鏡相隔的距離，由早期的數十、數百公尺，目前已有能力進行跨洲數千公里的天文干涉觀測，其解析度已經達到 0.001

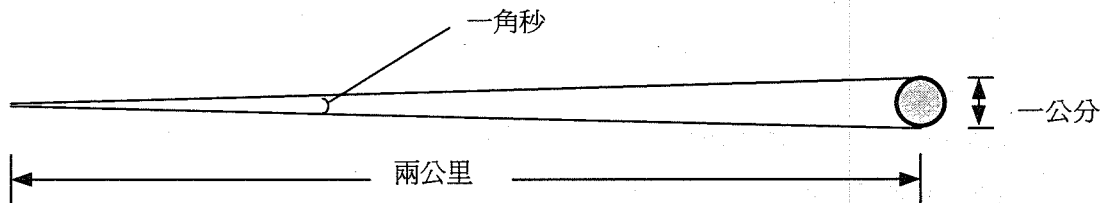
角秒。

電波的波長比較長，所要求的精確度比較低，更重要的是可以使用一般電線來傳遞電波。所以當電波不是同時抵達兩個個望遠鏡時，可以使用電線將其中一個電波訊號通過一段延長的電線，使兩個電波望遠鏡收到的訊號同時抵達同一個接收器。

可見光或紅外線的波長遠比電波短，而且也不能用電線來傳遞，必須使用鏡面反射來延長其中一個望遠鏡所得到的影像。由於精確度須要達到十萬分之幾公分，只能使用雷射來確認延長的長度，技術困難度明顯增高。直到 1980 年代，才有了初步的進展，目前才進入成熟階段。

在二十一世紀，調適光學是大型望遠鏡的標準配備，也有許多進行中的觀測計畫使用可見光與紅外線天文干涉技術。其中最著名的當推凱克望遠鏡的雙子星計畫。美國加州理工學院在夏威夷冒納基山頂建立了兩個口徑十公尺的望遠鏡，兩座巨無霸相隔一百公尺，同時配備了調適光學系統。每一具望遠鏡的解析度是 0.01 角秒，而兩具望遠鏡光學干涉技術解析度是 0.001 角秒，可以觀察到三千光年以外的雙星系統，或數百光年外的行星系統，或銀河中心的細節，或數百萬光年以外的星系核心細節。光是想想上述情景就令人激動，真是令人期待啊！

註一：角秒是角度的單位，一度有六十分，一分有六十秒。但是角度單位所使用的分及秒，很容易與時間單位的分及秒混淆。為了區分，通常將角度單位的分與秒，稱為角分與角秒。一角秒相當於將直徑一公分的錢幣放在兩公里外所看到的夾角。



註二：用公式來表示，則解析度 = $2.52 \times 10^5 \frac{\lambda}{D}$ (")

其中 λ 為觀測波段之波長， D 為望遠鏡之口徑， λ 與 D 的單位必須一致。

參考資料

1. Untwinkling the Stars, May & June, 1994, Sky and Telescope.
2. Adaptive Optics for Astronomy: Principles, Performances, and Applications. Jacques M. Beckers, Annual Review Astronomy and Astrophysics, 1993. Vol. 31, pp 13-62.
3. Adaptive Optics in Astronomy, Laird A. Thompson, Physics Today, December 1994.
4. Adaptive Optics in Astronomy, Edited by Francois Roddier (1999), Cambridge University Press.