

落日與大氣折射效應

王靖華

臺北市立南港高級中學

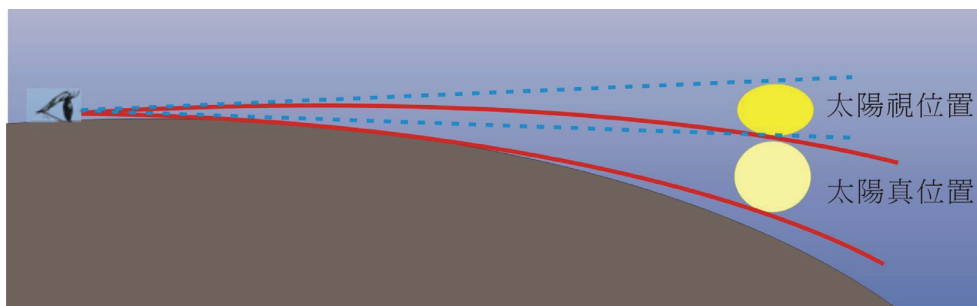
落日，不僅絢麗迷人，也關係到軍用與一般座標定位。退去艷陽高照的白熾，落日餘暉是金黃、澄橘甚至火紅，不單是白和亮，常令人看著落日晚霞而湧起「夕陽無限好，只是近黃昏」的感受。

除了光影的變化外，長日將盡的夕陽已不像中天時刻那樣的圓，會逐漸呈橢圓狀，而且越靠近地平線變形得越厲害。在西元二世紀時，托勒密首次注意並且觀測太陽變橢圓的現象，也意識到太陽的變形與大氣折射效應息息相關。之後科學家便利用天上的太陽、行星與恆星來研究大氣折射效應，反推星體真實位置；近幾年來則分析人造衛星所發出的訊號來探討大氣折射效應，進而估算全球大氣溫度、壓力等隨高度變化的情況，我國參與的福衛三號衛星計畫便是這樣的研究計畫。

壹、大氣折射原理

科學家對於夕陽落日，除了感懷以外，還有一份好奇，為何接近地平的太陽會愈來愈扁？這與光線經過不同物質時會發生偏折的現象有關，生活中常見如插入杯水中的直筷子看起來像折彎的筷子、水中的魚看起來比較淺、或者夏天乾柏油路面上好像有攤水這樣海市蜃樓的幻象都是光經過不同介質所造成的折射現象。同樣的，由外太空穿過大氣層的光也會偏折。

托勒密時期的科學家已經知道光線由密度小的物質穿過密度大的物質時會偏離原來的方向，當時也應用這樣的概念解釋星光進入密度較大的地球大氣時會改變它的行進方向，使得我們能提早看見尚未由地平線升起的星體，或者是看得見已經落入地平下的星體。大氣折射的影響下，非但使得太陽變形，也造成太陽看起來的位置比它實際的位置要高出約 0.6 度，相當於一個太陽的視角大小。(如圖一)



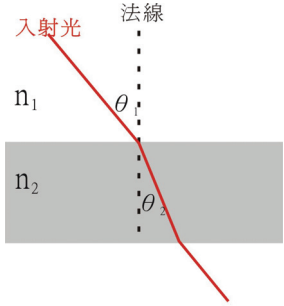
圖一：大氣折射的影響下，非但使得太陽變形也造成太陽看起來的位置比它實際的位置要高出約 0.6 度，相當於一個太陽的視角大小。

貳、大氣折射模式

觀測大氣折射的現象早已進行，然而一直要到十七世紀才開始用理論計算大氣折射效應所造成的位置偏折量。法國科學家卡西尼的大氣折射模式是其中一個重要經典雛型。

卡西尼延續過去將大氣視為均勻、同質的一層物質圍繞著地球，由地球表面一直延伸至與外太空交界處，而外太空是乙太(ether)物質與大氣物質成分不同，所以造成光線的偏折。相較於過去的科學家，卡西尼能成功計算出大氣折射效應是因為司乃耳已經提出折射定律，並結合幾何關係才推導出各高度大氣折射量的近似定律。

司乃耳折射定律：



$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

司乃耳 (W.Snell, 1591~1626) 於 1621 年提出，其中 n 表示介質的折射率， θ 為光行進方向與法線夾角。

事實上，大氣層既不均勻也非同質，貼近地面的空氣密度最大，越往上空氣密度越小。如此一來，折射率隨密度減小而減小，或者說折射率隨高度減小。今日將大氣視為多個不同層，有著不同的折射率。因此光在大氣中傳播時，通過一層層

密度不同的大氣，在各層的分界面處會發生折射，綜和結果使光線沿曲線射至地表。(如圖二)

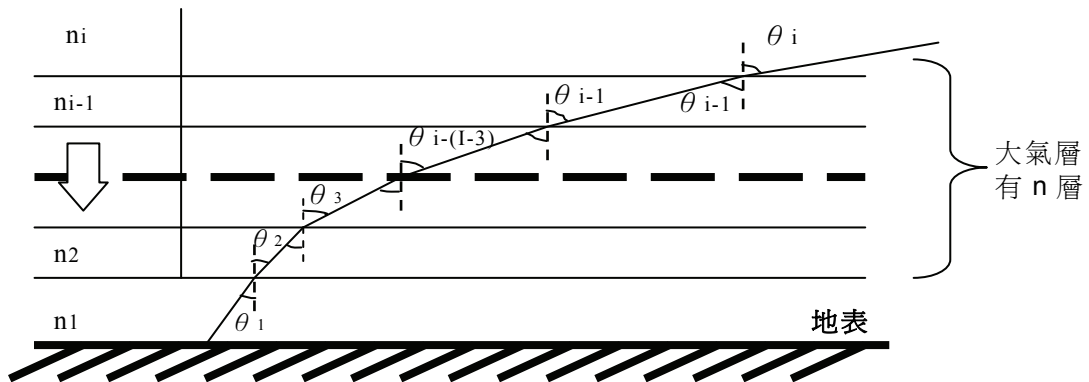
與今日的計算模式相比，卡西尼的理論模式在高空誤差不大，只是運用在低平處不盡理想。如表一可知道離天頂 74 度的範圍內或者說是離地平 16 度以上，誤差都小於 0.1 角秒，一直到接近地平 4 度內，誤差才達到角分等級的落差。

地平附近的大氣折射量即使到了今日依然是研究重心，此處深受大氣溫度、壓力與濕度的影響，變化大。即使在同一地點隨著時間、天氣改變，大氣折射效應總有不同。

參、GPS 定位的精益求精

在 1960 年代，為了精確計算環繞地球之人造衛星的軌道，就需要修正地球大氣折射效應。由地球上所看到的人造衛星位置已經被地球大氣折射效應，偏離了原先的位置。必須將大氣折射效應所偏折的角度還原，才能精確計算人造衛星的真正軌道。

到了 1990 年代，全球衛星定位系統 (GPS) 已經成為商用等級。接收人造衛星所發出的訊號，並經過地球大氣折射效應的修正，可以精確定出觀測者所在的位置與高度。一般商用 GPS 的精確度大約在數公尺左右，但是專業或軍用等級的 GPS，精確度甚至比公分等級更小。了解各地區的大氣特質，建立良好的大氣折射模式便可減少定位的誤差，提高 GPS 的精準度。



圖二：光在大氣中傳播時，通過一層層密度不同的大氣，在各層的分界面處會發生折射，綜和結果使光線沿曲線射至地表。

表一：卡西尼推算之大氣折射效應與今值比較表

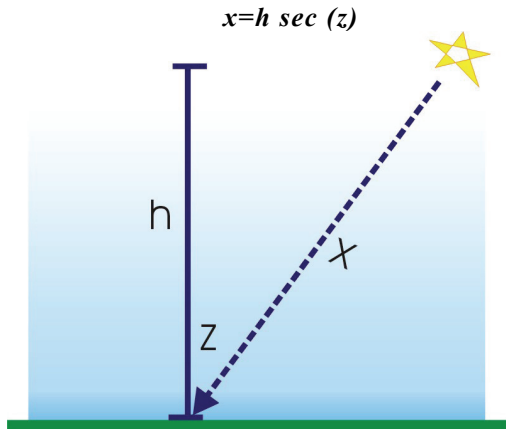
天頂距	折射量 (角秒)	卡西尼	誤差 (角秒)	天頂距	折射量 (角秒)	卡西尼	誤差 (角秒)
60°	98.051	98.049	0.002	82°	383.118	381.887	1.231
65°	121.175	121.169	0.006	84°	494.371	490.313	4.057
70°	154.720	154.702	0.018	86°	684.208	666.447	17.761
74°	195.367	195.316	0.051	88°	1058.06	947.692	110.37
76°	223.712	223.615	0.097	89°	1399.69	1098.01	301.68
78°	260.701	260.502	0.199	90°	1960.13	1166.62	793.51
80°	310.987	310.528	0.459	註：天頂距是指天體與天頂之間的夾角。			

表格資料引用自 http://mintaka.sdsu.edu/GF/explain/atmos_refr/models/Cass_hor.html

肆、大氣消光效應 (air mass)

大氣對光的影響除了位置外，還有減光的效果。經過大氣層厚度越大，減光的效應越強，直接影響天體亮度的測量。也就是說天體位於天頂時所經過的大氣厚度

最小，影響最小。通常要精準測量亮度便是還原至天頂位置之厚度 (h)，修正因通過大氣層厚度不同 (x) 所造成的減光。如果天體與天頂夾角為 Z ，也就是天頂距 Z ，那麼 x 與 h 便符合這樣的關係(圖三)：



圖三

當天頂距 Z 的角度大於 75 度，就必須同時考慮地球表面是曲面和大氣折射效應的影響，修正的關係式更複雜些。

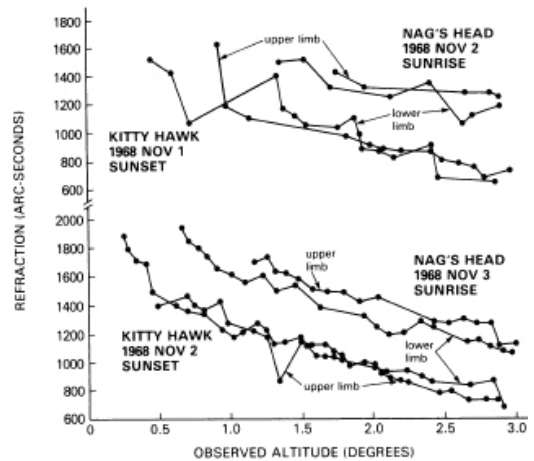
伍、大氣折射的其他現象--綠閃

綠閃 (green flash) 就是陽光中綠色光的偏折現象。不同波長的光，偏折角度就不同，例如藍光偏折角度大，紅光折射角小。天氣晴朗的情況下，貼近地平處的落日時刻，太陽的藍、綠光就比紅光折向天空上方多一點，使得有時候可以在落日最後一刻看到太陽頂端的邊緣出現綠光影像，稱之為綠閃。綠閃如同它的名字一樣，是快閃族，通常只停留 1~2 秒的時間。

大氣對光的偏折現象如變扁或者扭曲的太陽，還有綠閃等多落在可見光波段。這些現象不僅存在觀賞價值，也暗藏著大氣特質的影響，可以作為科學研究的主題。例如觀測落日的不同時間太陽高度的變化，就可以簡單的估算地球大氣折射效應！

陸、利用落日影像探討大氣折射

除了透過落日影像探討大氣折射效應外，使用六分儀也可以測量不同時間的太陽高度。下圖(圖三)便是美國國家海軍天文台於 1968 年以六分儀觀測而得到兩次落日和兩次日出時，在近地平三度附近各高度太陽上緣與下緣受大氣影響的偏折量。同樣是越接近地平，偏折量越大(圖四)。

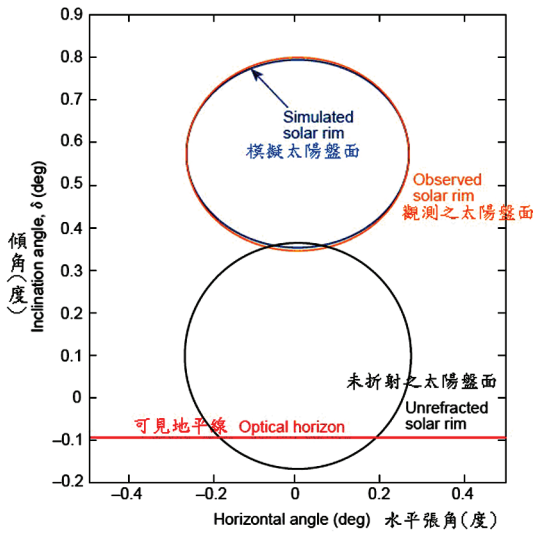


縱軸為折射量(角秒)，橫軸為太陽高度(度)

圖四：美國國家海軍天文台於 1968 年以六分儀觀測而得到兩次落日和兩次日出(取自 1990,PASP,102,796-805)

然而六分儀只能獲得太陽邊緣的位置而且精確度不如以望遠鏡拍攝落日影像來得高。

下圖(圖五)為 MICHAEL 等人於 1996 年利用落日影像分析，得到地平附近的大氣折射效應，將實際觀測到的太陽位置與真實位置相互比較，結果如圖五所示。



圖五：取自 JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 17, NUMBER 3 (1996)

柒、拍攝太陽

觀測太陽必須小心，做好準備，以免視力受到傷害。即使是夕陽，也不要直接用眼睛直視太陽，以免視力受損，嚴重者甚至失明。如果當天黃昏無雲、空氣清徹，相機鏡頭或望遠鏡必須安裝太陽濾鏡（或是專業減光濾鏡），如圖六、圖七，以免陽光被鏡頭集光過熱，燒壞鏡頭中的膠質，或是相機的感光晶片。

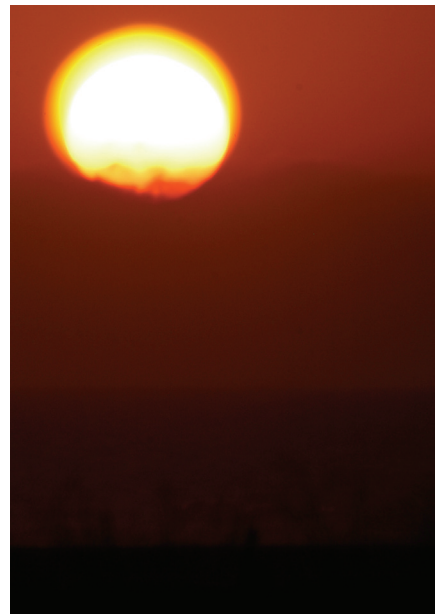


圖六：未加濾鏡前，太陽過曝。

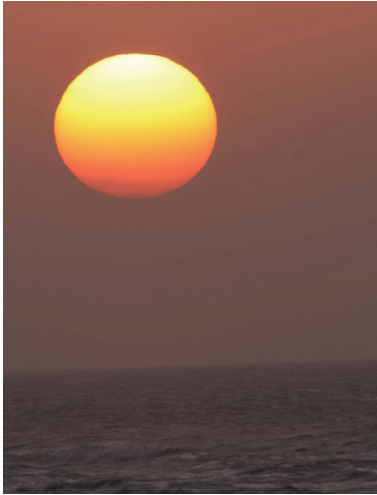


圖七：加太陽濾鏡後之太陽影像

為了儘可能增加影像品質，感光度（ISO）最好設定為 100。至少每 30 秒中拍一次落日影像，接近地平面之前 10 分鐘，每隔 10 秒中曝光一次。隨時調整每幅影像之曝光時間，務必使太陽盤面邊緣清晰、不過曝，如圖八、圖九。



圖八：過曝之太陽影像，邊緣模糊。



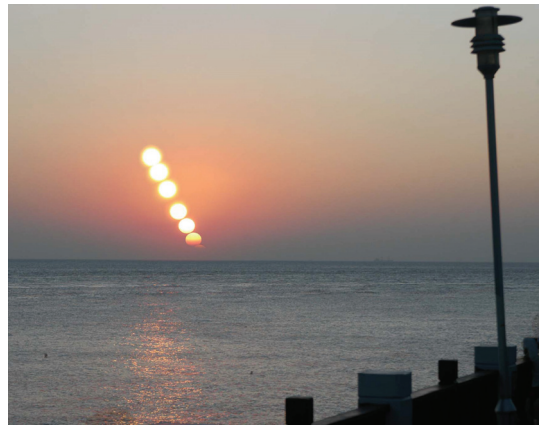
圖九：接近地平，太陽呈橢圓。

拍攝時，同步記錄時刻，以電話 116 報時台為準，精確至「秒」。如果相機本身有計時功能，以 116 報時台校準。

儀器與時間都已確認後，至少要在太陽落下的三十分鐘前開始拍攝，如圖十、圖十一。



圖十：架設望遠鏡



圖十一：漁人碼頭落日

捌、落日影像分析

- (1) 測量太陽盤面上緣、中心、下緣之高度：由於垂直方向受到大氣折射效應影響，太陽盤面上緣至下緣的折射程度不同，因此不能用垂直直徑來定太陽中心。水平方向最大直徑中心作為太陽盤面中心。（為什麼？）
- (2) 以時間為橫座標，分別以太陽盤面上緣、中心、下緣 之高度做關係圖。
- (3) 分別計算太陽盤面上緣、中心、下緣高度與時間之「趨勢線」
- (4) 計算太陽上緣與中心實際接觸地平線（或設定之水平線）的時刻。