

氣象光學之認識 童文海

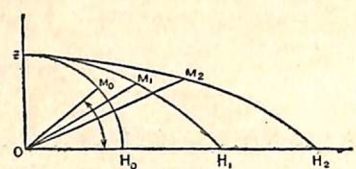
General Meteorological Optics

氣象學發展之趨勢應須區分為純理與應用二大領域，在太空時代之今日，純粹大氣物理諸性態之研究日趨重要。大氣熱力、光、電、放射等能之影響因素均需詳加認識與深刻研究。大氣中光的作用雖不如熱、電等之能直接影響天氣，但有很多氣象觀測現象是要憑視覺的。光受大氣影響發生漫射折射等作用，出現許多光學現象，亦皆為氣象人員所應認識，謹略舉數端，拋磚引玉，希藉以引起共同之注意與研究發展。

穹形之天空

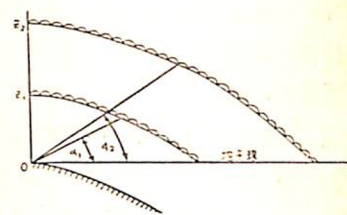
(Apparent Shape of the Sky)

古代有天圓地方之說，是因為視覺上看天究有如球形覆於地面。這也就是心理物理學 (Psychophysics) 的說法。如果目光注視天空不動，直向空中某一點看去，祇覺其無窮遠而沒有面的視覺，如果將目光在空中描掃，則有球面的視覺，似乎天空確如半球形覆於地面。氣象學上的估計天空狀況與雲量係以此一視覺天球為準。通常在視覺上我們總覺得地平線一望無際，似乎很遠，而天頂 (Zenith) 則似乎較近。於是此一天球總似乎是扁圓的。究竟扁至如何程度，因天頂與地平線祇是視覺上存在，無法精測，二者遠近程度估計極為困難，故天空之扁平度 (Flatness) 通常以視覺上天空弧線來估計，以天空弧線之半對地面所成之角來表示，此角稱為半弧角 (Half-Arc Angle)。如圖一 O，為觀測點，Z 為天頂，H 為地平線，ZH 為天空弧線，ZH 之一半 MOH，即為表示天空扁平度之半弧角，此角愈小表示天空愈扁。正圓天空此角應為 45°，通常視覺之扁圓天空此角約為 20~40° 不等。天空有雲則似天頂愈低，視覺愈有扁平之感，半弧角僅約 20° 餘，如為碧空晴天則增至 30 餘度，至夜間因水平視距不遠，如又為無月光之天空，則半弧角可達 40° 左右。如



圖一：天空弧線與半弧角

圖二即表示天空有低雲 (Z₁) 時，天空半弧角較小。雲層愈高 (Z₂) 則半弧角愈大。



圖二：雲層與天空半弧角

天空扁平度與雲量雲高極為有關

，但實際仍缺精確觀測數值可資比較，一般平均估計數值約如下表：

雲量(/10)	0	<1	1-3	4-7	8-9	>9
半弧角(度)	34.0	32.6	31.5	30.6	30.2	29.9
雲量與雲狀	⁴ / ₁₀ Cu, Fe	⁵ / ₁₀ Ci, Cs	⁷ / ₁₀ Ac, As	⁸ / ₁₀ Sc	¹⁰ / ₁₀ St	
半弧角(度)	30.0	29.1	27.8	28.4	29.0	

由表可見雲量愈多，則半弧角愈小，亦即天空愈有扁平之視覺，但雲量多至某一程度後，其對視覺之影響漸減，雲量在 4/10 以上，雲雖增多，半弧角之減少甚微，視覺判斷估計已甚困難，不易區別。雲高與天空扁圓之關係較不明顯，表中以 Ac、As、Sc 之半弧角最小，反較更低雲 St 為小，此可能因中雲其雲量、雲高多屬中度，而低層雲則常為密雲或較多之雲量，反易於影響所視地平距離，而中雲則有使地平距離增遠之感。故低層雲所影響及天空扁平度者反不如中雲為大，其半弧角反較略增。總之，天空狀況之視覺影響首須視其雲愈，其次則視其雲量，因為雲狀多已含有雲量之因素在內，某種雲大多以某項雲量出現，故須參考上二表配合應用。至雲高在理論上雲愈低，則天空半弧角愈小，扁平度愈大 (如上圖二所示)，但實際應先由雲狀與雲量來作決定，僅由雲高影響之直接關係較為不顯。又能見度影響地平視距，故凡能見度愈佳時，天空之扁平度愈大。惟實際視界因有山脈、地形、地物影響，不易真正具有地平視覺，故尚不能一概而論。

由於天空視覺上之扁平感常使吾人對天體視像亦發生差異。如圖三為一正圓天空與一半弧角約之 25° 扁圓天空相比較，同一視角，例如均為 5°，靠近地

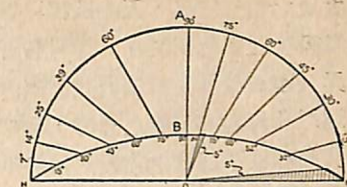
平者在扁圓天空所佔弧線較長；仰角較高，接近天頂者在扁圓天空所佔弧線較短。故日月在升沒時接近地平，視覺上應較大；在上空較高時視像較小。又此項視覺差異，僅係對視像之垂直長度有影響，在水平方向無論天空正圓扁圓應均一律，即日月在近地平時，視覺上之垂直直徑應長於其水平直徑，亦即日月視像不但較大且應呈長圓形，惟此項垂直與水平視差不大，且另有更大之大氣折射視線之影響 (將於以下討論) 相補償，故不易察覺。

在正圓的天空與扁圓的天空上某一角度所呈理的

正圓天空 真仰角 A	扁圓天空 視仰角 B	差數 B-A	比值 B/A	正圓天空 真角度差 C	扁圓天空 視角度差 D	比較 D/C	正圓天空 真角度差 C'	扁圓天空 視角度差 D'	比較 D'/C'
地平...0°	地平...0°	0°							
7	15	8	2.14				7°	15°	2.14
14	30	16	2.14	15°	32°	2.13	7	15	2.14
15	32	17	2.13				11	15	1.36
25	45	20	1.80	15	20	1.33			
30	52	22	1.73				14	15	1.07
39	60	21	1.54	15	13	0.87			
45	65	20	1.44				21	15	0.71
60	75	15	1.25	15	10	0.67			
75	84	9	1.12	15	9	0.60	30	15	0.50
天頂...90°	天頂...90°	0	1.00	15	6	0.40			

由表可知視覺扁圓天空上之仰角 (B) 與真仰角 (A) 之差數 (B-A) 約在 30°~40° 時最大，差值可達 20 餘度。但仰角甚低時，亦即接近地平，真仰角在 20° 以下時，扁圓天空之視仰角約均較真仰角高出一倍以上。仰角愈大則此比值愈減 (即 B/A 由 2.14 漸減為 1.00)。又由角度差比較，在正圓天空上每差 15°，其在扁圓天空上視覺估計之角度數自 32° 至 6° 不等。在真仰角低於 30° 時，視覺估計之角度均大於真角度 (D>C)，在 30° 以上時，則視覺估計之角度均失之過小 (D<C)。平均約在仰角低於 15° 以下估計之視角約大於真角度一倍 (即 D/C > 2)。至 75° 以上，則真仰角 1° 估計之視角僅約半度 (即 D/C < 0.5)。在扁圓天空上視角度每差 15° 時之真角度差，請閱表中 C'D' 諸值，亦與此同。故日月在天體等如在近地平時，視之較大。愈高則在視覺上愈有較小之感。同理，對山峯或地面建築物高度之估計亦皆受此影響，因係接近地平，故在視覺上均覺

視角弧度各不相同，如圖三扁圓天空半弧角為 25°，在扁圓天空弧線上則應為至天頂之一半，亦即應為 45°，圖三右半為將正圓



圖三：正圓天空與扁圓天空

弧按每 15° 等分，列出其在扁圓弧上之相對弧度，左半為在扁圓弧上每 15° 等分，列出其在正圓弧上相對度數。為便比較，列表如下：

得稍高。又如對圓形之日 (月) 暈、日 (月) 華、虹等視覺可略呈橢圓形，及觀測雲之形狀亦易生錯覺，均係由此天空扁平之視覺差所致。故對目測天空狀況與雲量，應注意雲所在天空之位置，仰角高時與仰角低時所佔天空面積有所不同。惟此僅係一種視覺上估計之錯覺，而天空視覺上之扁平度又係由於各人視覺主觀因素 (心理上的) 及視覺經驗而不同，另外尚有天空光亮之明暗、雲狀、雲量、能見距離之遠近等因素影響，故主要的應認識此祇是一種質的變差，尚不能準確定出量的差誤值。例如天空光亮明暗之影響視覺尚無定論；有謂天空愈明亮時，視覺上覺得目的物愈遠，即光愈亮遠處愈清晰，有極目無窮之感，謂視覺距離與明亮度 (Brightness) 之平方根成正比。但又有相反說法，如星體其光愈亮者則又反似顯得愈近。又如遠處地面有霾霧，則亦可使物體視覺朦朧有反覺愈遠之感，此均表示視覺之不可靠。故氣象光學在此一方面尚需研究之問題甚多；如天空之扁平度與

雲量之相互關係，天空照相與目測雲量之分析比較，單獨積狀雲之觀測在天空另有層狀雲與無層狀雲之差異（因層狀雲能構成視覺天空之變形），視地平距離遠近及有無障礙物之影響，季節性差異與天空各部份明亮程度不同時之差異，目視點離地面高度（如在高山或飛機上觀測）之影響天空視覺情形，均為尙乏圓滿答案猶待研究之問題。

折射現象 (Refraction)

光波在不同物質中速度不同，故光射過不同物質有折射現象，其折射率係按光之入射角與折射角計算，如圖四，光由 I 射至 II，入射角為 i ，折射角為 r ，按折射 n 率之定義為：

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}$$

設光在 I 中之光速為 V_I ，行程為 BC，至 II 中光速為 V_{II} ，行程為 CE，(CE=AD)

，則折射率 n 為：

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{BC/AC}{AD/AC} = \frac{BC}{AD} = \frac{V_I}{V_{II}}$$

即折射率為光在二物質速度之比。如以真空為標準，大氣之光波折射率平均為 1.000292，其差別僅約為 1/3500。而太陽光波內各種波長之折射率亦略有不同，大氣溫度變化對其折射率亦有影響，其差值約如下表：

波長 (Å)		折射率 $(n-1) \times 10^6$		
		0°C	15°C	30°C
3983	紫	297	282	268
5569	黃	293	278	263
7664	紅	290	275	261

可見光波波長愈長，氣溫愈高者，折射率愈小，反之則愈大，但其差別極微，僅相差約三萬分之一，通常應用可以忽略不計。又大氣係由各種不同氣體組成，物質不同時折射率自亦有差異，所幸大氣之組織成份上下各處差異極微，故折射率亦應無甚差異。光在大氣中所生折射主要係由於大氣密度變化而引起。如在大氣中劃分成許多等密度層 (Isopycnic Surface)，則折射率 n 應係隨此層次而變化。大氣之等密度層理論上應係與地面平行，向上遞減，但實際因受溫度梯度、界面、地形等因素變化亦有傾斜，但此項影響

於折射之變化不大。大氣密度以近地面最大，其相對變差亦較大，故光在近地面層折射最烈。例如太陽實際在地平線下若干度時，因有折射而仍可看到太陽，使日出時間較由實際圖形推算之時間略提早，日沒時間則延緩。尤以在兩極地區，其冬季近地面大氣密度層變差最鉅，可使夜半年日出時間提早數日之多。又日月在近地面時，因此層上下之折射率差異大，使對其上緣之視線與下緣之視線折射不同，而水平方向（即左右緣）則無此影響，故日月之垂直向視直徑因折射變化應有較短之視覺，相差可達五分之一，使日月呈扁圓形，但前述因天空有扁平視覺而使近地之日月呈長圓形，適與此相補償。但因大氣折射之影響應較心理上之視覺影響為大，故多呈扁圓形。由近地處日月之變形亦可推知空氣層密度變化之強烈。

研討大氣中光之折射可以折射曲線與直線間之夾角表示之。如圖五，在地面上 A 處可看到 B 處，其間視線呈曲線 $\widehat{AB}$ 弧線，AC、BC 為 $\widehat{AB}$ 之切線，AC、BC 與 AB（直線）構成角 α 及 β ，此二角之和亦即稱為總折射 (Total Refraction) E ：

$$E = \alpha + \beta$$

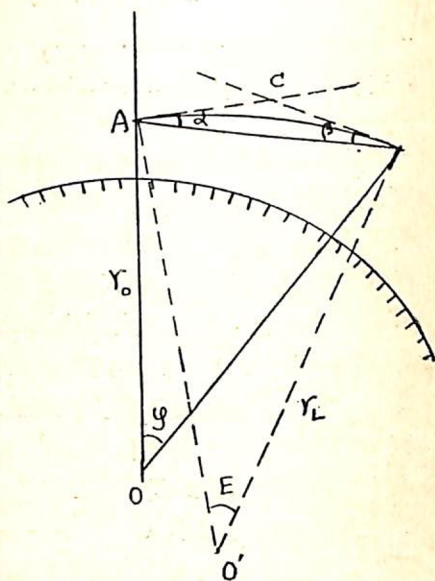
在大氣一般密度變化情況，如 A、B 相距在 20 公里以內，此總折射角值約為 2'' 至 42''，亦即等於 $\widehat{AB}$ 對其圓心之夾角 E 。圖五所繪係部份放大情況，實際 A、B 間之距離及 A、B 離地面高度差如與地球半徑 r_0 比較，數值極微。

故 A、B 間折射曲線弧之對角 E （亦即折射角值）與 A、B 間實際距離之彎角 φ 之比較，亦即為折射曲線率半徑 r_L 與地球半徑 r_0 之比：

$$\frac{E}{\varphi} = \frac{r_0}{r_L}$$

$$E = \frac{\varphi r_0}{r_L}$$

因 $E = \alpha + \beta$ ，通常並可視為 $\alpha = \beta$ ，

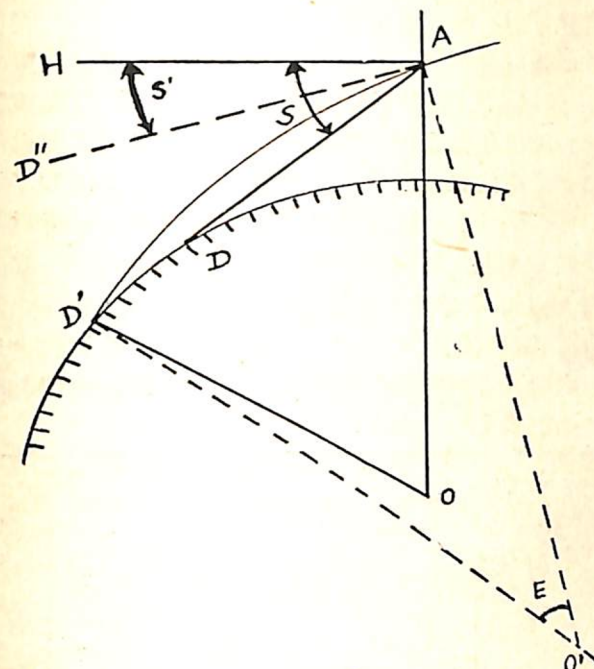


圖五：折射角

$$\text{故 } \alpha = \beta = \frac{E}{2} = \frac{\varphi r_0}{2 r_L}$$

式中 φ 及 r_0 為 A、B 二點之已知值，故其折射角值應與曲率半徑 r_L 成反比。惟此項視線折射角與曲率半徑均不易量算，通常又可採用下法求算較為實用。

圖六所示為在地面上空 A 點，其水平視線為 AH，由 A 點原應看到地平線 AD 之地面 D 點，因折射關係，視線成曲線 AD' 而可看到地面之 D' 點，



圖六：視線折射

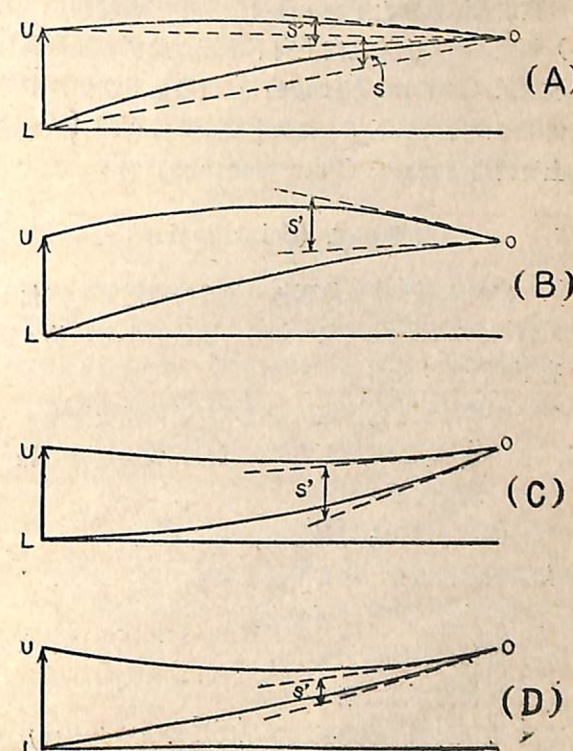
此視曲線 AD' 之切線 AD'' 亦即實際折射後之視平線，其與真地平線 AD 之夾角 α 亦即等於上述之折射角 α ，如以水平視線 AH 與真地平線 AD 間之夾角為 S，AH 與視地平線 AD'' 間之夾角為 S'，則

$$\alpha = S - S'$$

S 為理論可查算之已知數，故欲求折射角 α 值可僅測量水平視線與視地平線間之角度 S' 即可。影響此項折射角值之主要因素前已述及為近地面層氣層密度之變化，而影響密度變化者則又以氣溫垂直遞減率 (Lapse Rate) 最有關，如以一般平均氣溫垂直遞減率 (0.65°C/100m.) 情況下，如視地平距離約 30 公里測氣溫垂直遞減率每變化 0.04°C/100m. 將影響折射角值約 1 秒。故反之如能測出地面二點視線之折射角值，應亦可推知近地層氣溫垂直遞減率之變化情形。惟實際因近地面層常有強烈對流，氣溫直減率變化急劇，使視線影像有擺動及閃爍現象，測視難求準確，

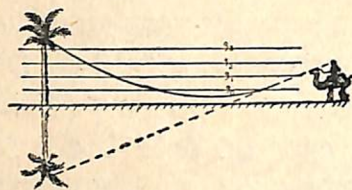
實際應用仍有困難。

大氣愈高愈稀薄，大氣密度自地面向上遞減，乃屬正常情形。如近地面層大氣密度向上遞減率特大，超過平均情況（亦即高空氣溫轉高，氣溫直減率極小之情況），則折射率增大，使原地平以外之目標亦能看到，即視地平較正常情況延伸更遠，此種現象稱為「上現遠景 (Looming)」。反之，如近地面層大氣密度向上遞減率特小，則視地平較正常者為近，則應稱為「遠景沉落現象 (Sinking)」。又因近地面氣層上下密度變化率不同，則對一目標物上下端兩視線之折射率亦因而不同，可使目標像變形。如圖七，由目視點 O 看一目標物 UL，其正目視線應為 UO 及 LO 二直線（如圖七 A 圖之 UO 與 LO 二虛線），其夾角（亦即視角）為 S。如大氣密度向上遞減率愈高愈小，亦即 UO 與 LO 二視線折射時上者小於下者，如圖七 (A) 中 UO 與 LO 二曲線，UO 之曲率小於 LO 之曲率，其視角 S'（亦即 UO 與 LO 二曲線之切線之夾角）較原正視角為小 ($S' < S$)，故對目標物之視覺應較實物為高為小，此種現象光學上稱為下彎現象 (Stooping)。如圖七 (B) 為大氣密度向上遞減率愈高愈大，則對目標上端視線之折射大於下端，亦即 UO 曲率大於 LO，其視角 S' 較原來者增大 ($S' > S$)，故對目標物將有較大較高之視覺。此



圖七：大氣密度變化與折射

種現象稱為上彎現象 (Towering)。又低層大氣密度時有反常情形，下層密度反小於上層密度，可稱為反密度或逆密度 (Negative Density)。此時視線之折射將呈反向，視曲線凸向地面 (Convex toward the ground)，可使視像較低。如圖七 (C)、(D) 均是，(C) 為密度變化下強於上，即目標下端視線 LO 曲率較大，使視角 $S' > S$ ，故可使目標物視像變大，(D) 則為目標上端視線 UO 之曲率較大，使 $S' < S$ ，目標物視像將變小。又如在沙漠中出現之蜃景 (Mirage)，即係因近地面沙質過熱，下層空氣較下空為稀薄，甚至可使視像發生倒影，似沙漠中有水池反映物像，如圖八所示。



圖八：沙漠蜃景

低層，氣密度上下變化已如上述，可使視像偏高偏低，偏高者稱為上現蜃景 (Superior Mirage)，偏低者稱為下現蜃景 (Inferior Mirage)。同理，密度之水平變化則亦可使視像旁偏，例如近地層大氣因其下地質不同，可有一溫度突增區，猶如有一片豎立之熱牆 (如路面影響)，將使其附近空氣等密度線原係水平方向者竟改成垂直或近似垂直之走向，則可使水平之視線向左 (右) 偏差，一如上述之向上向下偏差，此種現象稱為側現蜃景 (Lateral Mirage)。實際低層空氣密度分佈情形多極繁雜不勻，視像之變差亦極複雜，故光學上有稱為複雜蜃景 (Fata Morgana) 者。

閃爍現象 (Scintillation)

由於大氣密度分佈不勻，並且時有短暫的變化，致使視覺發生閃爍現象。如看一點狀的小目標物，則有下列現象：

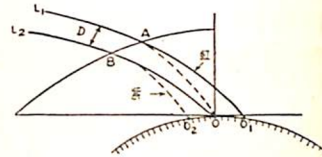
- (1) 目標物方向不定，似在不停的擺動或振動。
- (2) 物體光度強弱不定。如為發光物體則呈閃爍，忽明忽暗。
- (3) 光波變化亦可引起顏色變化。

如看較大目標物，則有下列現象：

- (1) 物體外廓形狀可發生變形。
- (2) 部份明暗不均。
- (3) 部份或隱或現。

在天文學上觀測天體，星光及視像較大之日月邊緣情形等，均甚受氣象影響，如風速愈大，亂流愈強

，低層大氣溫度直減率愈大，則所觀測之影像愈劣。因可見之光波中含有各種不同波長，按波長次序可區分為紅、橙、黃、綠、藍、紫等色，其所受折射影響各不相同。如圖九，設有光 L 進入大氣 A 點，其紅光波折射至地面 O_1 點，其他各色順次折射，最短之紫光波折射至地面 O 點；又另有一光線 L_2 射經大氣層 B 點，發生



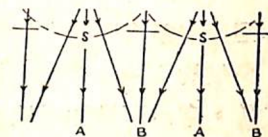
圖九：各色光波之折射

折射後紅光射至 O 點，紫光射至 O_2 點；實際在 L_1 與 L_2 之間有無數的光線，故在地 O 面點實際所受到的仍包括全部各色的光波，所見應仍為混合的白色。惟應注意者此項紅光與紫光折射之差距 D (亦即 L_1 與 L_2 間之距離) 係隨光線入射角度與折射高度而異。光之入射角愈低 (亦即天頂距愈大)，高度愈高，則此 D 值愈大。入射角高至 40° 以上 (亦即天頂距 50° 以下)，此 D 值極為微小，故星體之近天頂處者，大多無顏色閃爍現象。此 D 值之變化情形列如下表：

天頂距 (度)	高度 (公 里)				
	0.1	1	5	10	40
50	—	—	2	3	5
60	—	—	5	8	12
70	—	3	14	22	31
80	—	15	58	92	127
84	4	37	142	224	311
88	17	151	580	915	1,273
90	50	442	1,696	2,680	3,727

按表列 D 值，如有一團密度特異之空氣，其直徑小於表列 D 值，即可使光波發生顏色折射之閃爍 (Chromatic Scintillation)。例如有星體其天頂距為 80° ，如在高空 1 km 處有 15 cm. 直徑之異密度空氣團，即可使光波折射出不同顏色。如 5 km 處有 58 cm 直徑之異空氣團亦同，故由低處星光之呈各色閃爍，亦即表示大氣有異常情況存在。

大氣密度之水平變化可使光折偏而發生側視蜃景，已如上述。如在一層大氣中各區密度不勻，如圖十中之 S 區，可使光線折成放射狀，使地面 A 處與 B 處所見

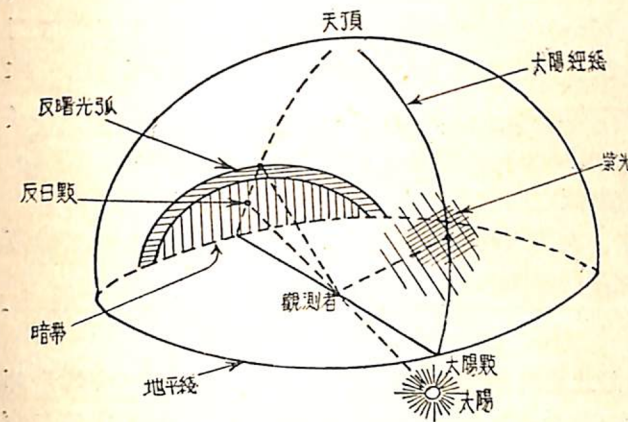


圖十：光之閃爍

不同，一呈放射狀，一呈輻合狀。如此層空氣作水平移動，則地面所見之光似由不同方向射來，時明時暗，如所見星光之閃爍不定。大氣有垂直運動 (升降氣流) 亦可產生同樣結果。大氣中溫度、濕度與風之不連續係為產生閃爍之重要因素。光在各種高度與不同斜度產生不同的閃爍現象，亦為各機場航行管制應用燈光信號所應注意參考者。

其他大氣光學現象

曙光——曙光之成因主要由於高層大氣之光學現象，係由高空六萬公尺 (60公里或37哩) 以上大氣所含塵粒反射光線而生。在日落於西方地平線以下，天空仍有一光亮圈，稱為曙光弧 (Twilight Arc)，或稱亮帶 (Bright Segment)。另在東方天空可見一淺紫色光弧，稱為反曙光弧 (Anti-Twilight Arc)，在其下有灰暗藍色之陰影，即為地球之陰影，通稱為暗帶 (Dark Segment)。又在西方天空上空，仰角自 $10^\circ \sim 50^\circ$ 處有紫光 (Purple Light) 出現，寬約 $40^\circ \sim 80^\circ$ ，通常以太陽落至地平線下約 4° 時最顯，至 6° 以後漸漸消失。曙光諸現象如圖十一所示。

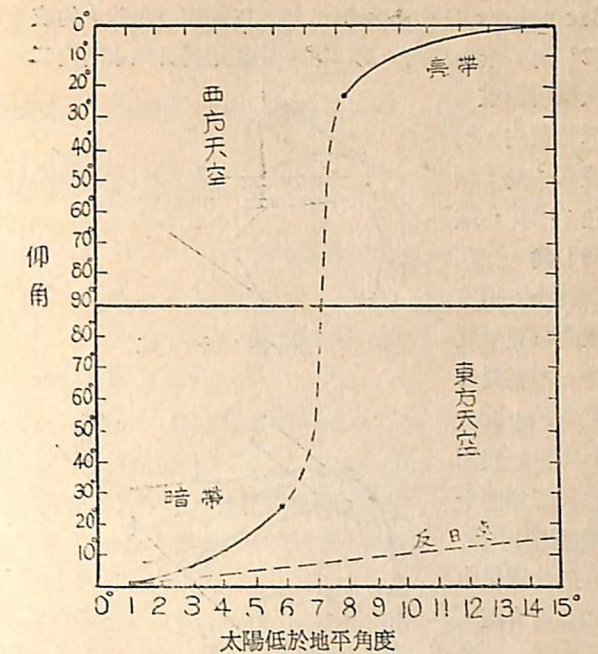


圖十一：曙光現象

繪。曙光出現時間約自日落到地平下 1° 起即有暗帶 (其上為反曙光弧) 出現，至 6° 時消失，仰角最高約達 25° 。曙光弧 (亮帶) 約在日落到地平下 7° 出現，仰角高約 25° ，逐漸低降變弱，至太陽低於地平 16° 時完全消失。日出前情況與此相反，請參閱圖十二。此乃平均情形，實際觀測曙光現象因時因地各有不同，但大致在東方之暗帶與西方之亮帶出沒之間，有一過渡時期，約當太陽在地平線下 $6^\circ \sim 7^\circ$ 之間，如圖十二中之虛線所示。

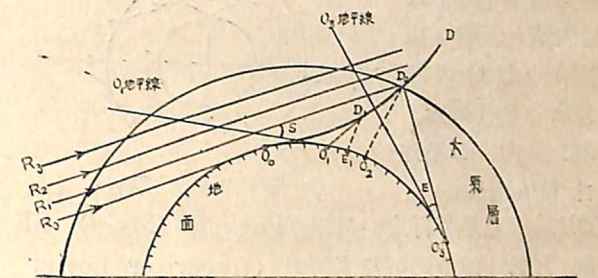
此時應為一間斷無光帶可見之短暫時期。

曙光諸現象之產生由於光波受大氣之放射與吸收



圖十二：曙光出現時間

，光線在空氣中逐漸衰弱而消失，如圖十三所示，日落到地面 O_1 點地平以下 S° ，其光線 R_0 、 R_1 、 R_2 、 R_3 穿過大氣層時逐漸衰弱， R_0 光線與地面 O_0 點相



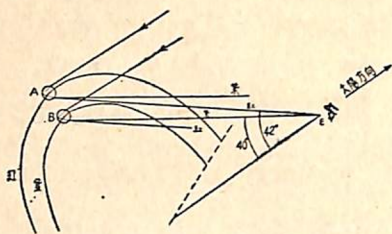
圖十三：曙光圖解

切，原可射至 O_0 點，但實際因光之變弱，可能在射達 O_0 點前即已消失。光線之愈近地面者所經過之氣層較濃距離亦較長，光線之衰弱終止較早，愈高者經過氣層較薄，光線終止較遲，故諸光線在氣層中消失處約呈一弧線 O_0D ，在此弧線以東應無光線可見。故在地面 O_1 點觀測，太陽已在西方地平以下 S° ，東方天空有反曙光弧與暗帶，暗帶高度為 $D'E_1$ ，其上為反曙光弧。日落愈低，則暗區愈廣，至 O_2 點暗區已擴及天頂，但此種現象變化極漸，界限不明，甚難察覺。至日落更低，如至地面 O_3 點，則僅可見西方天空有仰角為 E 之亮帶出現，其他天空均已無光可見矣。

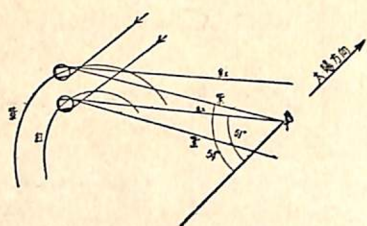
虹——虹為與太陽反向之水滴反射日光而呈之彩色環，分為正虹 (Primary Rainbow) 與副虹 (Secondary Rainbow)。

Secondary Rainbow) 二類，正虹紅色在外，約成 42° 角，紫色在內，約 40°。副虹則為日光水滴內二次反射而成，

紅色在內，約成 51° 角，紫色在外，成 54° 角，如水滴較小，則可產生白色暈狀帶，亦稱為霧虹 (Fogbow)，正虹與副虹情形如圖十四及圖十五，一般物理學中均已介紹。



圖十四：正虹

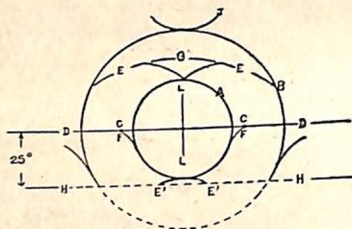


圖十五：副虹

暈——暈

為大氣中冰晶反射日光而生，通常仍多在太陽不甚高時出現，亦可分為內外二圈，茲舉例如圖十六，介紹其各部份名詞。

HH 為地平線，A 為內圈之暈環 (約 22°)，B 為外圈之暈 (約 46°)，CC 為左右二點幻



圖十六：暈之圖解

日 (Parhelia)，DD 為與地平平行之幻日環 (Parhelic Circle)，EE 與 E'E' 為上切弧及下切弧 (Upper or Lower

(上接第 9 頁)

能等影響，並令流體系統的容積極小，運動速度與空氣速度相同，則式變為普遍化的 Bernoulli 方程式，即

$$(30) \quad \frac{\partial}{\partial t} [\rho(I+K+P+p\alpha)] - \frac{\partial p}{\partial t} = -[\rho V^k (I+K+P+p\alpha)], k$$

若為穩定流體 (氣壓分佈不變)，則應用連續方程式，沿運動系統的任何跡線 (Trajectory) 必能滿足下列條件：

$$(31) \quad CvT + \frac{1}{2}(v^i)^2 + gz^3 + p\alpha = \text{常數}$$

氣象學者對於大氣能量問題的研究，論著浩繁，上述討論，僅舉數例而已。普遍能量方程式雖允許應用速度與應力的平均值，但不幸所需渦流的知識並不能直接測量，所以要使普遍能量方程式對於大氣的應用獲得成功，則方程式中包含渦流的各項必須更進一步的瞭

Tangent Arc)，在二幻日點下方有二日耳 (Lowitz Arcs) 如圖中 FF，內暈之上方有內暈耳 (Parry-Arc) 如圖中 G；外暈之上方有日戴 (Circumzenithal Arc) J，另在地平線以下應有相對之日承 (Circumhorizontal Arc) 存在，但不易見到。在太陽附近有日柱 (Sun Pillar) 如圖中 LL。另在暈之弧向天空亦有反日弧 (Anthelic Arcs) 出現，但不常見。

其他大氣光學現象尚有華 (Corona)，為日光透過薄雲層而生之色環，如出現不明顯，僅略呈藍灰色，邊緣略帶棕色則稱為華蓋 (Aureole)。如空空中含塵灰特多可出現畢旭甫光環 (Bishop's Ring)，為一紅棕色稍大之環。因雲之反射亦可使各色光環呈不規則形狀，或沿雲層形狀出現。在太陽之反向亦有類似光環出現，如峨嵋光 (Brocken Specter)、彩光 (Glory 或名 Anticorona 或 Brocken Bow)。又夜間天空在黃道 (Ecliptic) 附近有黃道光 (Zodiacal Light)，為極淡薄之光，秋季多見於東方天空，春季則見於西方，有謂係極高層大氣中之離子 (Ions) 吸收日光再重發射所致，真正成因仍欠明瞭。又有所謂極光 (Aurorae) 乃高空大氣分子受太陽光質點與離子撞擊而生，與地球磁場，離子層 (Ionosphere) 及磁暴 (Magnetic Storm) 有關。另夜間天空尚有星光、星雲、慧星及星際間之光等，大多亦均係受高層大氣發射影響。則已偏重純光學方面之專門知識矣。

解。除此之外，能量方程式中尚未包括大氣程序的全部內容，若干富有影響力的原理 (例如古典熱力學第二定律) 更須引入，以求大氣能量問題獲得更完全的解答。

參考書籍

1. Lamb, H., "Hydrodynamics" 6th ed., Cambridge, London, 1932, PP. 737-738
2. Stewart, H.J., "Kinematics and Dynamics of Fluid Flow" in Handbook of Meteorology, Mc Graw, New York, 1945, PP. 429-430; 461-474.
3. Miller, J.E., "Energy Equations" in Compendium of Meteorology, AMS, 1951, PP. 483-491
4. Haltiner, G. J. and Martin, F. L., "Dynamical and Physical Meteorology, U. S. Naval Postgraduate school, 1957, PP. 176-177
5. Bergeron, T., Bjerknes, J., and Bundgaard, R.C., "Dynamic Meteorology and Weather Forecasting", McGraw, New York, 1957, PP. 238-250,