

# 光學快速入門與如何驗光

譯者 楊文卿

## 第一部分：光學快速入門

---

### 重點 (Highlights)

- 針孔光學和透鏡的作用。
- 凸面（球面）透鏡：對遠距離物體成像、焦距和度數。
- 密接鏡片疊加：透鏡度數相加。
- 對近距物體成像：聚散度和聚散度公式。
- 凹面（球面）透鏡。
- 在空氣和光密介質中的成像：修正折射率。
- 軸性屈光不正：近視和遠視。
- 散光和圓柱鏡。

---

### 詞彙表 (Glossary)

**散光** 由複曲面透鏡形成的圖像，其屈光力隨著子午線而變化。

**相機暗箱** 一個小的不透光的空間或盒子，通過其中的針孔形成倒像。

**焦距** 透鏡與遠距離物體的成像之間的距離（*光學無限遠*）。

**遠視** 一種屈光不正，遠處的物體成像在視網膜之後。

**像距** 透鏡到物體成像的距離。透鏡左側的距離符號規定為負數，透鏡右側的距離符號規定為正數。

## 2 • 臨床光學

**子午線** 穿過透鏡光軸平面的方向，或該平面與透鏡表面相交曲線的方向。該方向通常以度（°）為單位，從透鏡前方觀察時按水平方向逆時針增加。按照慣例，水平子午線指定為180°（不是0°），垂直子午線是90°。

**近視** 一種屈光不正，遠處的物體成像在視網膜之前。

**物距** 從發光物體到透鏡的距離，以m為單位。符號規則與像距相同。

**（透鏡的）焦度（度數）** 焦距的倒數。以 $m^{-1}$ 為單位，稱為屈光度（D）。

**屈光力十字（光學十字）** 複曲面作用的示意圖，顯示2條主子午線（相垂直）的屈光力和方向。

**主子午線** 複曲面透鏡最平坦與最陡的子午線。主子午線通常相互垂直。

**折射率** 以空氣（或真空）中的光速除以不同介質中的光速即為折射率。由於光在普通介質（有時為光密介質）比在真空中通過的速度更慢，因此折射率總是會大於1.00。

**複曲透鏡** 具有類似於複曲面外緣表面的透鏡，例如汽車輪胎、橄欖球、美式橄欖球的側面。

**聚散度（在空氣中）** 物距的倒數（物的聚散度）或像距的倒數（像的聚散度）。

**聚散度（在空氣或真空以外的介質中）** 光傳播介質的折射率除以物距或像距。即使其在數值上大於空氣中的聚散度，有時也稱為**簡化聚散度**，因為光密介質的折射率總是大大於1.00。

**聚散度公式** 關於物的聚散度、鏡片焦度和像的聚散度的公式。

---

## 緒論（Introduction）

術語**光學**指的是光的特性和操作。在《快速入門》的這一部分，我們介紹光學的基本概念—這有助於大家理解臨床驗光的本質，如第2部分《如何驗光》中所述。已熟悉此部分的讀者可以直接進入第2部分。

## 暗箱的故事（The Tale of the Camera Obscura）

術語**暗箱**（拉丁文為「暗室」）始於17世紀，用於描述一側有1個小洞且小而不透

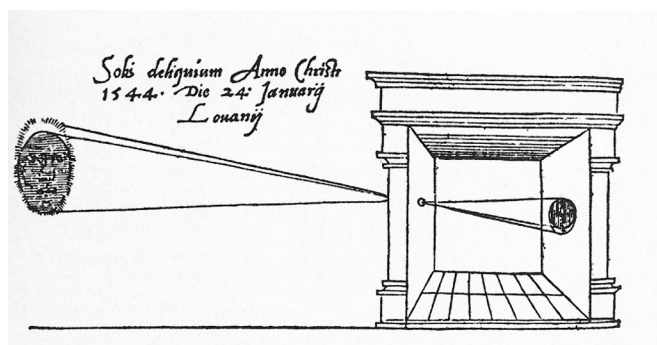
光的房間或盒子。該孔將明亮物體的倒立圖像投射到盒子內壁，以利於觀察或研究。已知最早的這種裝置見圖I-1所示，其用於觀察日蝕。

使用此類設備可得出3個重要觀察結果：

1. 投影像是倒立的。
2. 投影像的「景深」特別好：不同距離的物體同時聚焦，從眼前的物體到遠處的山丘，甚至是天文物體（圖I-2）。
3. 像非常暗淡。

倒像清晰是由於原物體中的每個點的光線延直線傳播，而針孔就像是他的支點（圖I-3）。

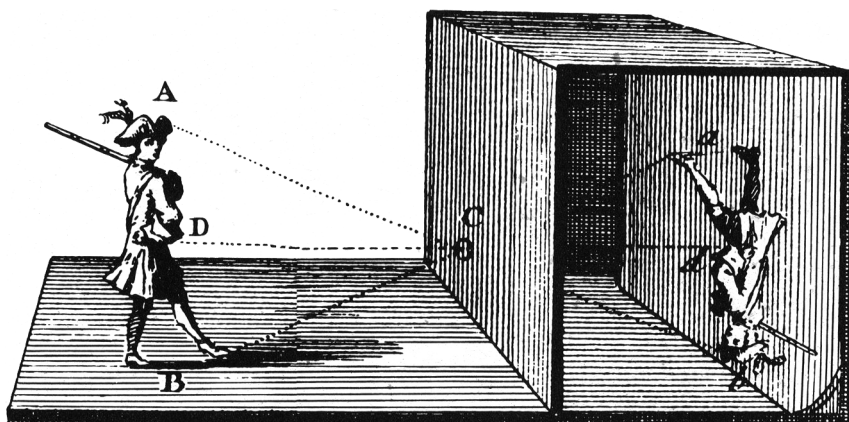
大景深源自小針孔，這使得每個物體的光線僅到達像平面中的非常小的區域。



圖I-1 已知最早的暗箱描述。(From *De Radio Astronomica et Geometrica*; 1545.)



圖I-2 暗箱（針孔相機）像。其景深很大，前面的岩石和背景中的山脈同時處於清晰的焦點處。(Courtesy of Mark James.)



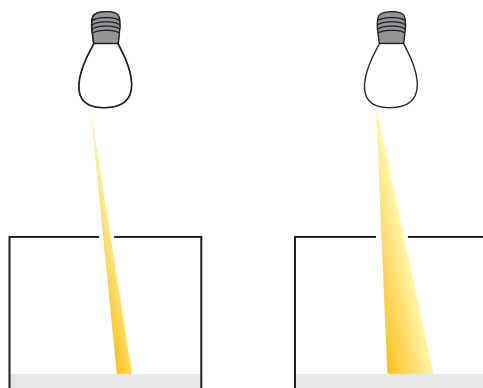
圖I-3 暗箱中的像形成。光線從原物體的點（如A、D、B）經過針孔（C），以直線路徑到達遠處壁上的對應點（如b、d、a），形成倒像。

而小針孔也極大地限制了成像的曝光量，這就解釋為什麼它會很暗淡。

為了得到更亮的圖像，必須擴大針孔，讓更多的光線進入，這也適合激發檢測器（例如照像板、CCD蕊片或視網膜）。但是，放大孔徑也使得發光物體的每個點發出的光線形成一個光錐，其在像平面上形成更大的圓盤。這些「模糊圓圈」（或者常見的「模糊橢圓」）會弄混形成的像，導致其更為模糊（圖I-4、圖I-5）。

為了在較大光圈下保持像亮度的同時恢復像的清晰度，需要重新組合發光物體每個點發出的光線，使他們聚合在單一圖像點上，這可以經由在光圈中放置合適的透鏡來實現（圖I-6）。

然而，經由擴大孔徑、使用透鏡恢復圖像清晰度的方法，必然會損失小針孔獲得的景深。雖然透鏡同時聚焦來自發光物體中不同點的光，但也只能是與透鏡相同距離的光源點（圖I-7）。（亦即近軸光線）



圖I-4 放大暗箱的針孔孔徑，會導致發光物體上每個點的模糊像變大。



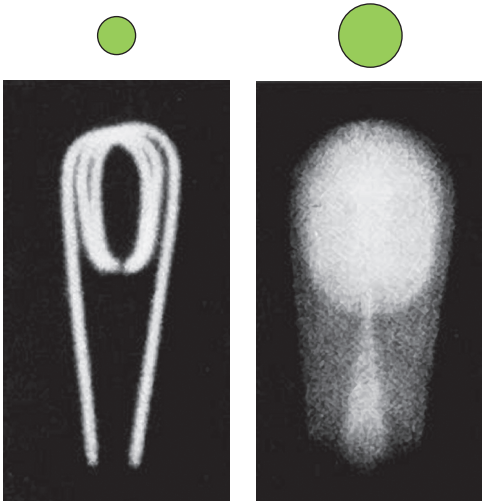


圖1-5 針孔孔徑大小（由頂部圓圈示意）對暗箱中像清晰度的影響。

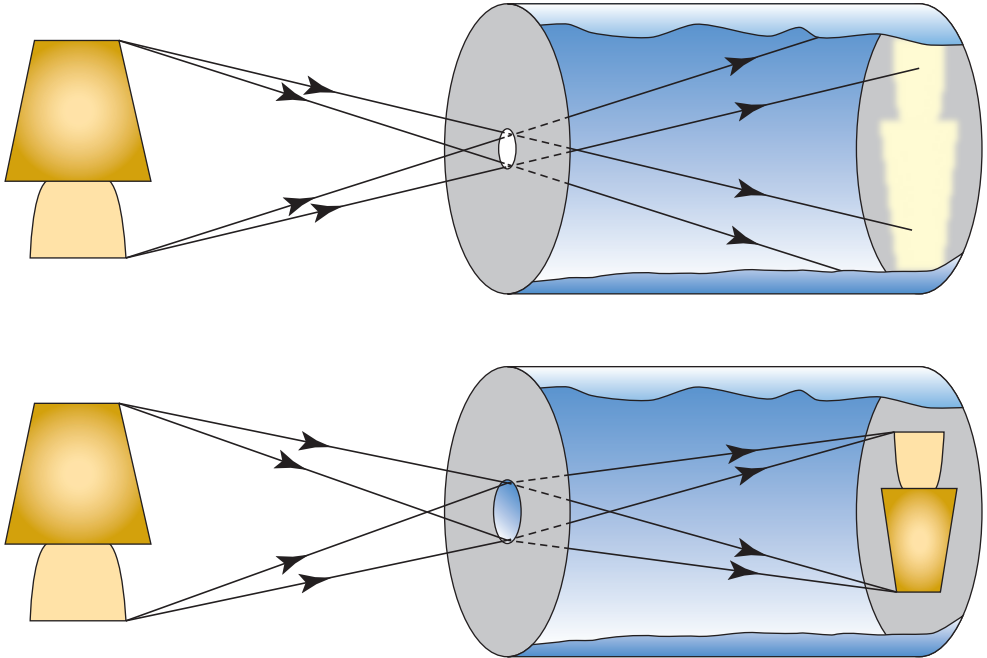
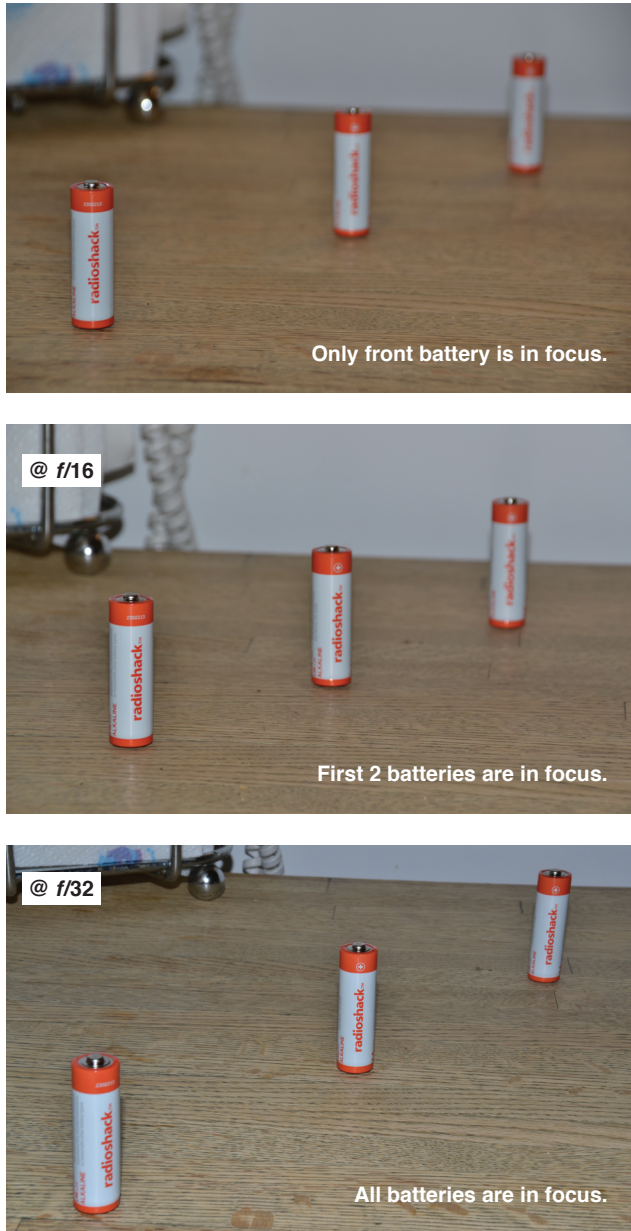


圖1-6 放大孔徑後，將透鏡放入暗箱，圖像恢復清晰度。同時，透鏡重新組合了發光物體每個點發出的光線，使其可以到達像平面中的每個點。

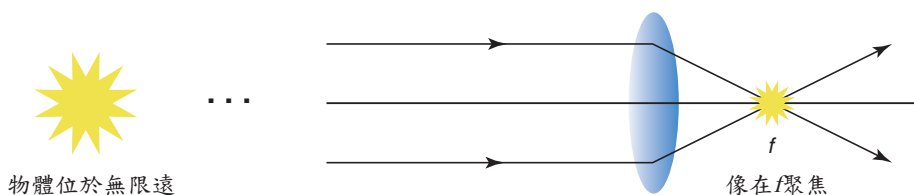
這些關於簡單相機成像的觀察扼要說明了基本光學的全部問題：從有限大小的針孔中經過的光束形成清晰像，並提供足夠的亮度。下一節將討論正確選擇透鏡的原則。



圖I-7 透鏡獲得的景深減少，而即使在這種情況下，也會是光圈越小（ $f/n$ 越大），景深越大。（Courtesy of Scott E. Brodie, MD, PhD.）

### 凸透鏡（Convex Lenses）

考慮一個薄（球形）凸透鏡成像，在「光無窮遠」，即非常遠（如恆星；實務上， $\geq 6$  m為遠方）時，如果物體位於透鏡左側，則像成於透鏡右側。距離 $f$ ，以



圖I-8 凸透鏡對於無限遠的物體（如恆星）進行成像。從透鏡到像的距離為 $f$ ，即透鏡的焦距；透鏡的度數（屈光度） $P=1/f$ ，其中 $P$ 的單位是屈光度（D），相當於 $m^{-1}$ 。

$m$ 為單位，稱為透鏡的**焦距**。此時透鏡的**度數**為 $P=1/f$ ，其中 $P$ 的單位是 $m^{-1}$ ，稱為「**屈光度**」（縮寫為“D”）。例如，對於一個右側焦距為 $0.5\text{ m}$ 成像的透鏡來說，其具有 $P=1/0.5\text{ m}=2.00\text{ D}$ 的度數（屈光度）（圖I-8）。

### 組合透鏡（Combining Lenses）

如果兩個（薄）透鏡（如屈光度為 $P_1$ 和 $P_2$ ）彼此緊臨放置，可視為單個複合透鏡系統，則兩個透鏡的總度數（屈光度）近似於組成透鏡的度數之和： $P=P_1+P_2$ 。

#### 範例 I-1

如果兩個凸透鏡的屈光度為 $P_1=1.00\text{ D}$ ， $P_2=4.00\text{ D}$ ，若其組合視為一個單元，那麼這個組合透鏡將遙遠恆星的影像形成在哪裡？

$$P = P_1 + P_2 = 1.00\text{ D} + 4.00\text{ D} = 5.00\text{ D} = 1/f$$

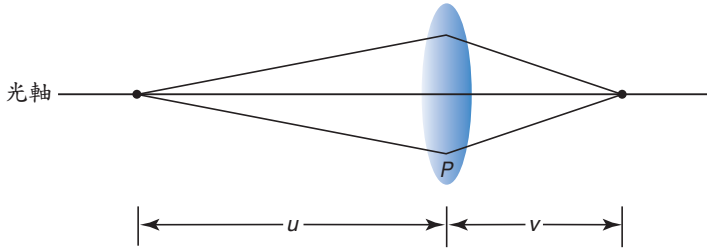
因此， $f = 1/P = 0.20\text{ m}$ ，即透鏡右側 $20\text{ cm}$ 處是遙遠恆星像的位置。

#### 範例 I-2

將影像移近透鏡，若範例 I-1中的像移近 $2.0\text{ cm} = 0.02\text{ m}$ ，欲使其更靠近複合透鏡，可以增加第三個凸透鏡來實現。若我們希望得到 $f = 0.18\text{ m}$ 的結果， $P = 1/f = 1/0.18\text{ m} = 5.55\text{ D} = P_1 + P_2 + P_3$ 。因此， $P_3 = 0.55\text{ D}$ 。這是一般方法的示例：將凸透鏡增加到透鏡系統中，通常會使位於透鏡右側的像更靠近透鏡系統。

### 近物體成像：聚散度和聚散度公式（Imaging Nearby Objects: Vergence and the Vergence Equation）

如果發光物體位於凸透鏡左側、為有限但大於焦距的距離時，則所成像將比無限遠的物體（如恆星）所成的像更靠近透鏡的右側。從透鏡到發光物體的距離稱為



圖I-9 聚散度方程式：物距為 $u$ ，像距為 $v$ ，透鏡焦度（屈光度）為 $P$ 。

物距；從透鏡到像的距離稱為像距。假設發光物體和像都是在空氣中，則像位置的公式是：

$U + P = V$ （或 $U + D = V$ ；或 $L + F = L'$ ）；用以表示物聚散度和像聚散度的符號很多，別讓這些符號混淆你。

其中， $U = 1/u$ 是在透鏡左側距離為 $u$ 處的物的聚散度， $P$ 是透鏡的度數（屈光度）， $V = 1/v$ 是像的聚散度，成像在透鏡右側時，像距為 $v$ （圖I-9）。註：在聚散度公式中，將透鏡左側的距離視為負數（因此， $u < 0$ ）。透鏡左側物體的聚散度 $U = 1/u$ 同樣是負數。將透鏡右側的距離視為正數，像的聚散度 $V = 1/v$ 。在這種情況下，重要的是將凸透鏡度數（屈光度）的符號保持為正數。距透鏡無限遠的物體形成的光束到達透鏡時，其聚散度為 $U = 1/\infty = 0$ 。

### 範例 I-3

透過度數 $P = +3.00$  D的透鏡，對透鏡左側 $u = -1.0$  m處的物體進行成像，如下所示：

$$U + P = V: 1/(-1.0 \text{ m}) + (+3.00 \text{ D}) = +2.00 \text{ D} = V, \text{ so } v = 1/V = +0.50 \text{ m or } +50 \text{ cm},$$

表示成像在透鏡的右側（後方）50 cm處。

### 範例 I-4

將發光物體移近透鏡，如將範例I-3中的物體移近透鏡（但不要超過焦距 $f = 1/P$ ）—距離透鏡左側-0.50 m處，則

$$U + P = V: 1/(-0.50 \text{ m}) + (+3.00 \text{ D}) = -2.00 \text{ D} + 3.00 \text{ D} = +1.00, \text{ 所以 } v = 1/V = +1.0 \text{ m}.$$

也就是說，將發光物體移近透鏡會使像遠離透鏡。如果將發光物體往左側移動而遠離透鏡，將會發生什麼？

## 凹透鏡 (Concave Lenses)

凹透鏡本身不會成像，但可將像從透鏡或透鏡系統中移開（向右）。

（球面）凹透鏡會使無限遠處物體的光發散。如果這些發散光線回頭朝光源的方向延伸（即向左延伸到透鏡的左側），光線將在「虛」焦點處相交，即在透鏡左側距離 $f$ 處相交（圖I-10）。根據前述符號規定，該透鏡的度數 $P = 1/f$ （以m為單位）。這裡的 $f$ 是負數，凹透鏡的度數（屈光度）同樣也是負數。

凹透鏡可與其緊密相鄰的鏡片組合。這種透鏡系統的度數與凸透鏡的公式相同：

$$P = P_1 + P_2$$

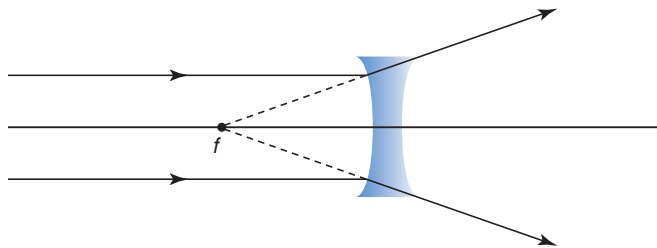
須注意代數符號。

### 範例 I-5

屈光度 $P_1 = +4.00$  D的透鏡，在位置 $u = -0.5$  m處形成發光物體的像如下：物體的聚散度為 $U = -2.0$ ，像的聚散度為 $-2.00$  D +  $4.00$  D =  $+2.00$  D，因此像的位置為 $v = 1/(+2.00$  D) = 透鏡右側+0.50 m。如果屈光度 $P_2 = -1.00$  D的凹透鏡與+4.00 D的透鏡相鄰放置，則該組合的屈光度為 $P = +4.00$  D +  $(-1.00$  D) =  $+3.00$  D，像的聚散度則為 $V = -2.00$  D +  $3.00$  D =  $+1.00$  D，因此像的位置為 $v = 1/(+1.00$  D) = +1.0 m。也就是說，將「負」透鏡添加到光學系統已將像從+0.50 m移動到透鏡右側的一個新的位置—透鏡右側+1.0 m處。

## 小結 (Summary Thus Far)

凸透鏡左側有限距離的物體，在透鏡右側成像（即焦距 $f$ 小於物距），有2種方式移動像向左（靠近透鏡）：將物體往左側移，或在透鏡系統中添加額外的凸透鏡。



圖I-10 透鏡左側無限遠的物體通過凹透鏡形成的虛像。焦點位於透鏡的左側，焦距是負數，透鏡的度數（屈光度） $P = 1/f$ 同樣也是負的。

同樣的，有2種方法可以將像向右移動（遠離透鏡）：將物體往右側移（只要離透鏡的距離大於焦距），或者在系統添加凹透鏡。

### 光密介質中的像 (Images in Denser Media)

如果離開透鏡的光在一種介質，如眼睛的房水或玻璃體的水狀組織中傳播，光在其中的速度小於在空氣中的速度，則聚散方程式中的像聚散度為

$$V = \eta / v$$

其中  $\eta$  是光密介質的**折射率**：真空（或空氣—幾乎與真空相同）中的光速與「光密」介質中的光速之比。折射率總是大大於1.00，因為光在光密介質中的傳播比在空氣中更慢。眼睛中的水樣組織， $\eta = 1.33$ 是一個近似值。（「光密」一詞與介質的比重無關！）

#### 範例 I-6

人的角膜屈光力  $P = 44 \text{ D}$ 。計算遠處（即  $\geq 6 \text{ m}$ ）物體經過無水晶體眼的角膜形成的像的位置： $U + P = V$ ，所以  $0 + 44 \text{ D} = 1.33/v$ ，或  $v = 1.33/44 \text{ m} = 0.0302 \text{ m} = 30.2 \text{ mm}$ 。（由於人眼的軸長約為  $24 \text{ mm}$ ，因此在去除水晶體後需要額外的屈光力！）

### 簡化模型眼 (A Very Much Simplified Model Eye)

我們現在有工具，用於闡明單純軸性屈光不正的矯正，屈光不正是由於前段（角膜和水晶體）的屈光力與眼睛的軸長不匹配引起的。

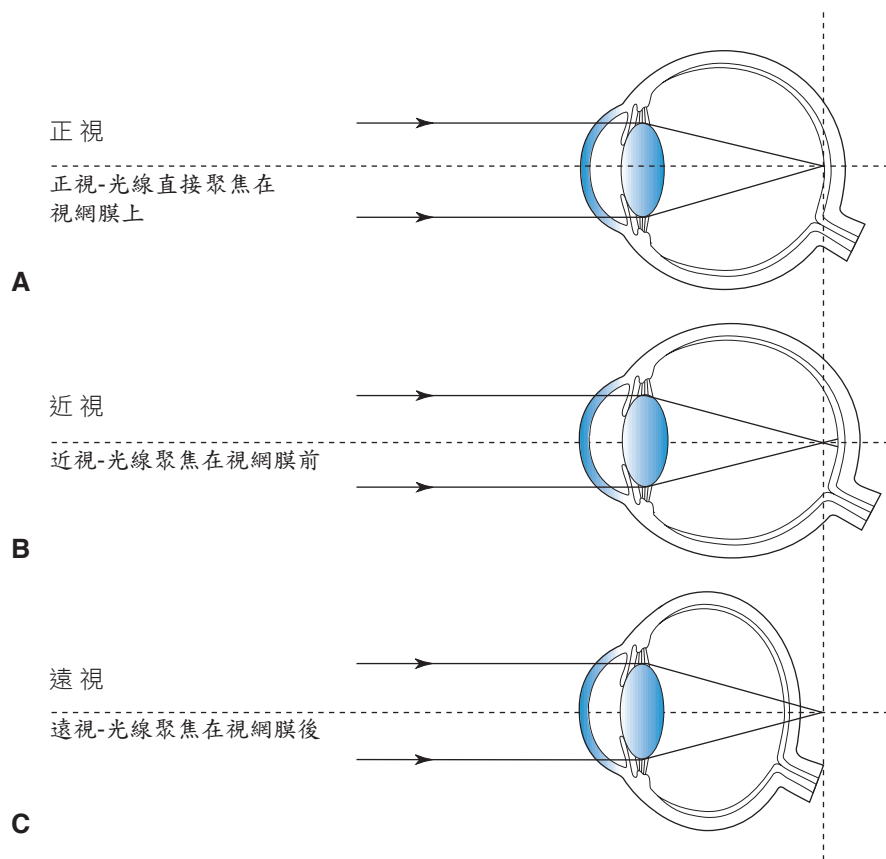
#### 正視 (Emmetropia)

假設眼睛所有的屈光力都集中在角膜頂點的單一平面上，軸長為  $24.0 \text{ mm}$ 。如果這個簡化模型眼將遠處物體的光線聚焦在視網膜上（圖I-11A）—角膜頂點的屈光力由聚散度方程式給出： $0 + P = 1.33/0.024 \text{ m} = 55.42 \text{ D}$ 。人眼的實際總屈光力約為  $60 \text{ D}$ ，因此我們的簡化模型減少了約10%。

#### 近視 (Myopia)

假設我們的眼睛有標準的前段，屈光力為  $55.42 \text{ D}$ ，但比正常長度長  $1.0 \text{ mm}$  軸長為  $-25.0 \text{ mm}$ 。在這種近視的眼睛中，來自遠點的光進入「應該」在視網膜的焦點（圖I-11B），然後光線交叉，並繼續前行  $1 \text{ mm}$ ，在視網膜上形成一個模糊圈。要矯正這種屈光不正，必須將像的位置移向眼睛後方  $1.0 \text{ mm}$  處。根據聚散度方程式，





圖I-11 光線聚焦的位置。A.正視眼。B.近視眼。C.遠視眼。(Illustration developed by Scott E. Brodie, MD.)

可以使用角膜頂點屈光度數 $P$ 的凹透鏡隱形眼鏡（發散，「負的」）： $0 + (P + 55.42 \text{ D}) = 1.33/0.025 \text{ m} = +53.20 \text{ D}$ 。因此，所需隱形眼鏡的屈光力為 $P = 53.20 \text{ D} - 55.42 \text{ D} = -2.22 \text{ D}$ 。在更精確的計算中，當軸長每超出1 mm時，矯正量大約為 $-3 \text{ D}$ 。

### 遠視 (Hyperopia)

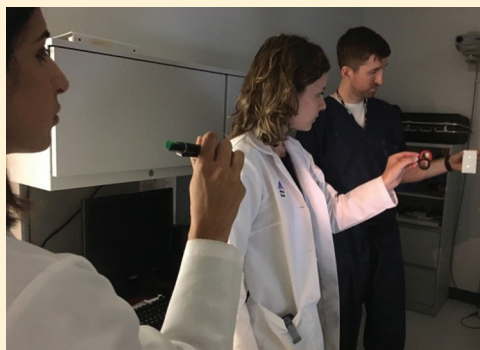
同樣，如果將簡化模型眼的軸長減少1.0 mm，遠處的物體會成在視網膜後面成像（圖I-11C）。這樣的眼睛是遠視。所需的隱形眼鏡屈光度數將由聚散度方程式給出： $0 + (P + 55.42 \text{ D}) = 1.33/0.023 \text{ m} = +57.83 \text{ D}$ ，或 $P = +57.83 \text{ D} - 55.42 \text{ D} = +2.41 \text{ D}$ ，即為「正的」凸透鏡。

因此，對於軸性屈光不正的矯正，僅需要將遠處的光源重新聚焦在視網膜上，確定最佳球面透鏡的屈光力。

### 親自試作！ I-1

1. 按順序排列的正 (+) 球面鏡片和負 (-) 球面鏡片的「試鏡箱」。  
(在手柄上或鏡片框的顏色即可分類。) 3個人一組：第1個人舉起1個小光源 (筆燈或工作檯的Finoff透照燈)；第2個人站在2~3 m處持1個透鏡；第3個人拿1張白色卡片，做為屏幕來獲得經透鏡的成像 (圖I-12)。先從一個+2.0 D球面鏡開始，找到離光源比透鏡更遠，距透鏡66 cm處的像，(一個小的圓形光點)。(為什麼像距離透鏡不到50 cm? 因為手裡拿著筆燈不在無限遠處！)
2. 將光源移近透鏡，找到新成像：它將離透鏡更遠。
3. 如果有空間，將光源移到離透鏡更遠的地方，比步驟1更遠，並定位新成像：它將比開始時更靠近透鏡。
4. 返回步驟1中的設置，添加第2個+透鏡 (如+1.00 D)，並將透鏡固定在一起，作為單透鏡系統。定位成像：它比開始時更接近透鏡。
5. 取出添加的+1.00 D透鏡，用-1.00 D透鏡更換。定位成像：它將比開始時離透鏡更遠。
6. 將+2.00 D和+1.00 D透鏡組合所形成的像位置與+3.00 D透鏡形成的像位置進行比較，兩者應該一致。
7. 嘗試將+2.00 D和+1.00 D透鏡組合，並與實際的+1.00 D透鏡進行比較。
8. 用+透鏡和 (或) -透鏡等其他組合驗證這個「透鏡算數法」。

圖I-12 3個人組成一個「光學工作站」。1個人拿著筆燈，第2個人比較+3.00 D球面鏡與+4.00 D球面鏡聯合-1.00 D球面鏡，第3個人拿著白色卡片。請注意，白色卡片上的圖案是相同的。(Courtesy of Scott E. Brodie, MD, PhD.)

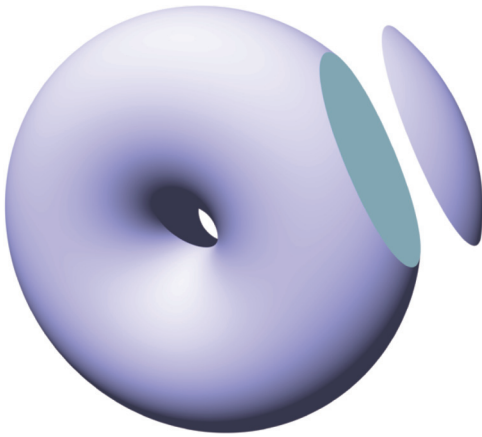


單純的負透鏡不會成像。白色卡片將會形成一個比外面更暗的光圈（為什麼？因為負透鏡可以使光發散，降低了單位面積 ( $/\text{cm}^2$ ) 上的光照強度）

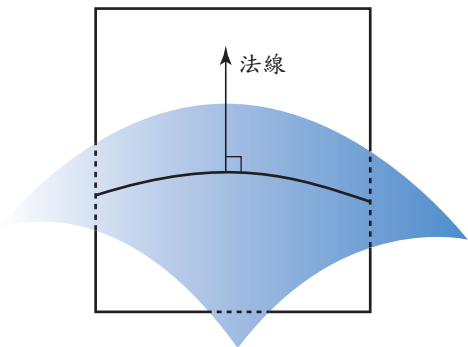
## 散光 (Astigmatism)

除了前面討論的軸性屈光不正之外，還必須處理非圓形對稱的屈光面問題，使球面透鏡將點光源發出的所有光聚焦在單一像點。想像一個「環形」表面，例如橄欖球（美式足球）的一側，或汽車輪胎內胎（圓環）的外緣，如圖I-13所示。

為了解這種複曲面的屈光面效果，我們設想一個與平面相交的彎曲面，該平面圍繞垂直於頂點表面的直線（「法線」，見圖I-14）旋轉。將這種平面的方向或交叉曲線本身稱為透鏡的子午線。



圖I-13 環形圓的外緣形成複曲面。(Illustration by Ir. H. Hahn, from Creative Commons.)



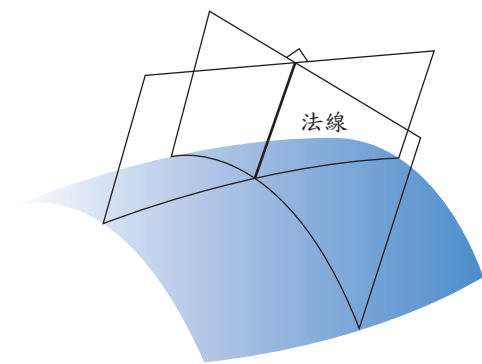
圖I-14 與複曲面相交的法線平面。平面與表面相交，曲線的曲率將隨著平面圍繞與頂點垂直的方向而變化。每條這樣的曲線都是該點表面的子午線。

當這個法線平面旋轉時，交叉點的曲率從最平坦的子午線到最陡的子午線，相差 $90^\circ$ （圖I-15）。

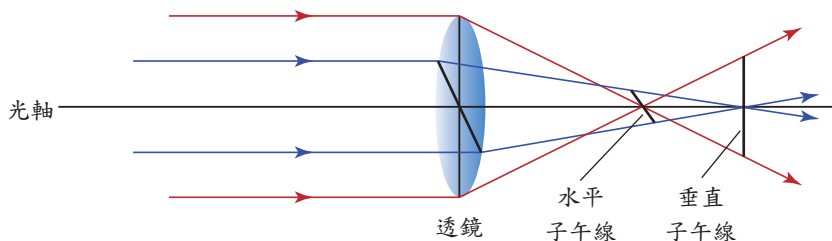
光從遠處的點光源發出，在最陡的子午線上被折射時，就好像它們遇到相同曲率的球面透鏡一樣。因此，焦距隨子午線的不同而變化，不能聚集於一點（焦點），也就不能形成清晰的物像。這種情形稱為散光，來自拉丁文的「單一點」或焦點的「缺乏不在」（圖I-16）。

最平坦與最陡的子午線相互垂直，稱為主子午線。我們可以繪製一個光學十字來表示這種情況：劃出最陡和最平坦的子午線的方向，並標示各自的屈光度（圖I-17）。

實務上，通常以主子午線的屈光度表示屈光度的差異。在這種情形下，可以將折射表面理解為在所有方向上均勻折射的球狀屈光面和純粹的「柱狀」屈光表面的組合，後者對應了光學十字方向上的最大屈光度（並且在正交方向上沒有屈光力）。例如，水平 $+1.00\text{ D}$ 、垂直 $+2.00\text{ D}$ 的透鏡可描述為垂直方向屈光度為 $+1.00\text{ D}$ 的球面鏡和垂直方向屈光度為 $+1.00\text{ D}$ 的圓柱鏡，可記錄為 $+1.00+1.00 \times 180$ 。或



圖I-15 沿2個不同子午線的複曲面曲率的變化。曲率最小或最大的子午線相差 $90^\circ$ 。

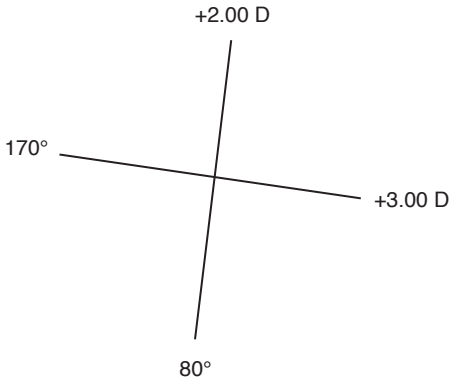


圖I-16 由複曲面表面形成的散光像。例示中，落在水平子午線上的光線（即以藍色表示的光線）比落在垂直子午線上的光線（即以紅色表示的光線）能到達更遠透鏡的焦點。

處方表示： $+2.00+1.00 \times 080$

or

$+3.00-1.00 \times 170$

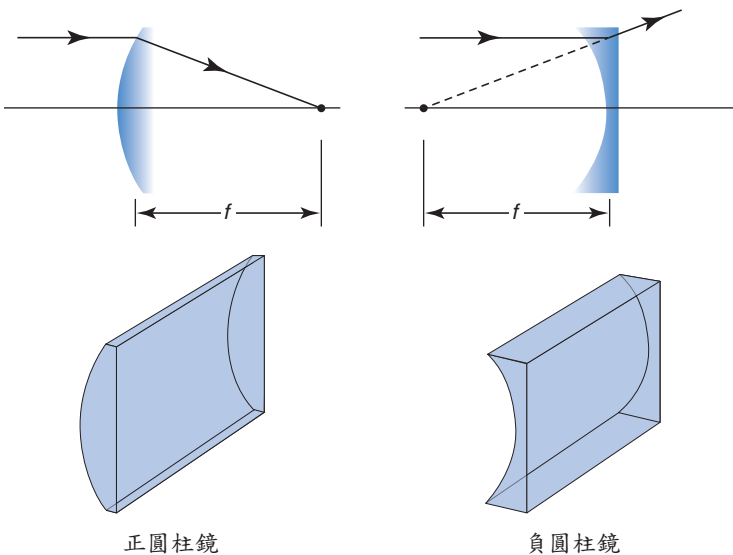


圖I-17 輕微傾斜軸的複曲面透鏡的光學十字表達方法。子午線顯示最大和最小屈光度。

者相同的折射表面可描述為在 $180^\circ$ 子午線方向 $+2.00\text{ D}$ 的球面鏡聯合 $-1.00\text{ D}$ 的圓柱鏡，紀錄為 $+2.00-1.00 \times 090$ 。

在實務中可以將球面鏡與具有圓柱形表面的透鏡相結合來形成這種透鏡，這裡所述的圓柱形表面是凸面（正圓柱體）或凹面（負圓柱體）的，見圖I-18。這些可以在標準試片箱中找到。

標記這些圓柱鏡，可以提示圓柱體的原始軸線方向，而圓形表面就是從該原始軸線導出的。這種圓柱鏡的屈折力作用在垂直於圓柱軸向的方向。例如，透過垂直軸向切割圓柱體來獲得水平子午線具有 $+1.00\text{ D}$ 屈光力的正圓柱鏡。將這種圓



圖I-18 凸面（正圓柱體）和凹面（負圓柱體）玻璃透鏡。