大 學 用 書 選 譯

光 學 原 理

王 先 鎔 譯

教 育 部 出 版
正 中 書 局 印 行

正中書局印行
教育部出版

大學用書選譯

光學原理

王先鎔譯
Francis A. Jenkins
Harvey E. White 原著

中華民國五十六年一月臺初版
中華民國六十三年七月臺二版

大學用書選譯 光學原理
(Fundamentals of Optics)

全一册　基本定價　三元一角

（外埠酌加運費滙費）

原著者	Francis A. Jenkins Harvey E. White
譯者	王先銘
出版者	教育部
發行人	黎元譽
發行印刷	正中書局

（臺灣臺北市衡陽路二十號）
暫遷臺北市南昌路一段十二號

海外總經銷　集成圖書公司
（香港九龍旺角洗衣街一五三號地下）
海風書店
（日本東京都千代田區神田神保町一丁目五六番地）

內政部登記證　內版臺業字第〇六七八號（6515）滙
(1000)

譯者前言

㈠ 本書係譯本，原書爲 Francis A. Jenkins 與 Harvey E. White 二氏合著之 Fundamentals of Optics, third edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, U.S.A., 1957.

㈡ 本書所譯學術名詞，均採用教育部所公布者；其有未經翻譯公布者，則斟酌試譯，而於譯名之後均附註英文。對於人名，地名，書名，出版公司名均仍用英文，未加翻譯。

㈢ 原書爲大學"光學"課程之標準本，內容豐富，目前各大學普遍用作教本。譯者在一年內利用教學餘暇，倉卒譯畢，疏誤之處勢所難免。敬希讀者惠予教正爲感！

王先鎔謹識

民國五十一年於臺南市

原書第三版序

重訂此新版之主要目的在使本書簡化與近代化。根據作者及許多採用此書的人過去二十年的經驗，認爲在許多節中以及一些數學的推導過於繁重，往往因之未能加重其應重視之點。矯正此缺點之步驟，例如對反射一章已完全重寫爲較簡單的形式，且將其置於偏極光比較困難部份之前。再者，以圓的量度表示頻率及波長，以及在一些地方引進複數符號，此可能使在波動理論中之推導手續簡短，俾能多容納新材料。

物理學中任一分科的姿態將因全部物理學進展而異。在光學中波束，線寬，及相干長度等觀念，因其在量子力學中的重要性而變得較前顯著。同樣的理由，現在學生們通常已先學過複數的運算，所以我們覺得以引用複數而示其簡化功能，似無不合。因爲同心光學（concentric optics）及畫線圖解法應用日漸增加，故於幾何光學之章節中增列之。幾何光學與質點力學間優美的關係，例如在電子顯微鏡及四極透鏡(quadrupole lenses)中，本書因限於篇幅未作論述，教者可在此方面補充之。有些問題係舊的原理而最近顯得重要，如 Čerenkov 輻射，傾斜階級光柵，以及複層膜，亦作相當簡短的討論。

所有此一水準之教科書的作者均同遭遇一個困難，即是避免給人一種印象某一問題的知識是固定而完整的。如能使學生略讀原來文獻，此種印象立即消失。爲鼓勵作此閱讀，本書中隨時插入原來的論文及書籍名稱，俾供參閱。此版列入一組全新的習題，較以前所代表的範疇爲廣。

對本書提供改進意見之人不勝列舉。L.W. Alvarez, W.A. Bowers, J.E. Mack, W.C. Price, R. S. Shankland, 及 J.M. Stone 均惠予特別指正和刪改；而 H.S. Coleman, J.W. Ellis, F.S. Harris, Jr., R. Kingslake, C.F.J. Overhage 及 R. E. Worley 曾分別提出寶貴意見，均所感激；T.L. Jenkins 提出一些推證的簡化，並核對許多習題的答案，一併致謝。

Francis A. Jenkins
Harvey E. White

目　錄

第一編　幾何光學

第二編　物理光學

第三編　量子光學

第一編　幾何光學

第一章　光　　線

光學研究光的現象，通常分爲三部份，各部份均以顯著不同的方法去作理論的探討。其中(a)幾何光學(geometrical optics)，係用光線方法研討，(b)物理光學 (physical optics)，以波動學說探討光的本性，(c)量子光學 (quantum optics)，研究光與物質原子基本單位的作用，精確討論需用量子力學的方法。本書幾全部論述幾何光學及物理光學，僅在最後一章中略述量子光學的要點。若加重表示它們應用的範圍，此三部份光學毋寧稱爲粗大的 (macroscopic)，細微的 (microscopic)，以及原子 (atomic) 光學。如從粗大處着眼，討論光之性質用光線已足表示其一切。

1·1 光線之觀念　當我們用光闌(diaphragm)設法隔離單一光線時，幾何光學與物理光學之區別立即現出。在圖 1A 中，S 爲可能最小的光源，稱爲點光源 (point source)。此種光源通常以焦聚白熱炭

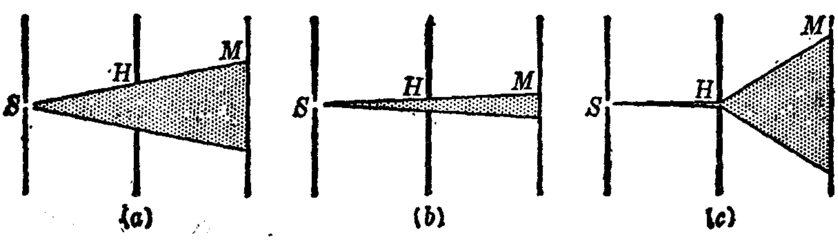

圖 1A.　隔離單一光線

弧正極之光在一金屬屏之小孔上得之(註*)。H 爲有較大之孔之不透明的屏，置 H 於 S 及一白色觀察屏 M 之間[圖 1A(a)]，屏上被照亮

(註*) 在21.2 節中所述之集中弧光燈(concentrated-arc lamp)，也是用做近似點光源很方便的方法。

之部份僅爲由 S 通過孔邊所劃之直線如 SHM 所包圍之部份。我們可以假設僅有未被 H 所阻之光線始能抵達屏 M，來解釋此種現象，此種觀察卽形成光作直線傳播所謂光線之基礎。若減小 H 上的孔，如圖 1A(b) 所示，屏 M 上被照亮之部份亦隨之縮小，因此人們便想以極小之孔隔離單一光線。由實驗知 H 上之孔如小到某一寬度（幾個十分之一毫米），屏 M 上之亮點反而增大。我們使 H 上之孔盡量減小，其結果屏 M 上亮度雖減弱，然被照亮之區域却擴大至相當範圍〔圖 1A (c)〕。

人們試圖隔離單一光線而遭失敗，乃由於光之繞射 (diffraction) 現象所致，其孔徑變大邊影不甚明晰之情況，亦可據此解釋之。繞射係光具有波動性質之結果，將於物理光學部份作詳細之討論。當我們研究細微之現象時，如用極細小之孔，或用一放大鏡考察影之邊界，此種繞射現象便顯得非常重要。對大多數光學儀器而言，我們所論及之光柱均相當寬，繞射效用通常可以略去不計。因光線可以表示在光柱中能量流播之方向，故光線的觀念顯得極爲有用。

1·2 反射和折射定律　遠在此二定律之重要性被瞭解以前，它們已經由實驗發現，此二定律實爲形成全部幾何光學的基石。它們可由後述之某普遍原理推導而出，目前我們僅當作實驗事實敍述之。當一光線碰及兩透明物質之分界面，如光在此二物質中之速度顯然不同，通常分爲一反射光線和一折射光線。在圖 1B 中 IA 表入射線，與交界面上 A 點之法線或垂直線 NA 成角 ，此角稱爲入射角 (angle of incidence)，IA 與 NA 所決定之平面稱爲入射面 (plane of incidence)。

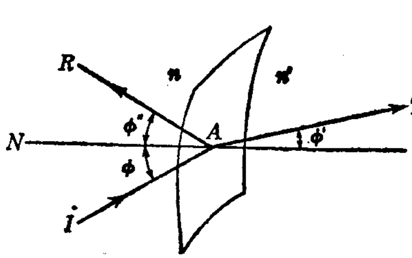

圖 1B. 在一交界面上一光線之反射和折射

反射定律 (law of reflection) 現可述之如下：

反射線在入射面內，反射角等於入射角。

卽 IA，NA，及 AR 均在同一平面內，並且

$$\varphi''=\varphi \tag{1a}$$

折射定律(law of refraction) 以其爲 Snell 所發現(註*)，常稱作 Snell 定律，可述之如下：

折射線在入射面內，入射角之正弦與折射角之正弦成一常數之比值。

此定律之第二部份卽

$$\frac{\sin\varphi}{\sin\varphi'}=\text{常數} \tag{1b}$$

在圖 1 B 中若交界面左方爲眞空（在實際應用上或爲空氣亦可），方程式 1b 中常數之值稱爲右方介質之折射率(index of refraction) n。我們由實驗測量角 φ 及 φ'，卽可決定各種透明物質之 n 值。如在折射率爲 n 及 n' 兩種物質之交界面折射時，Snell 定律可寫成對稱形式

$$n\sin\varphi=n'\sin\varphi' \tag{1c}$$

如在第二介質中以有（'）符號表之，在第一介質中無此符號，則上式對任何兩種介質均可適用。其比值 n'/n 稱爲第二介質對於第一介質之相對折射率。方程式 1b 中正弦之常數比值卽等於此相對折射率。當入射角很小時，由方程式 1c 可知折射角也很小，在此情形下，吾人可以角之數值替代角之正弦得一近似之關係式

$$\frac{\varphi}{\varphi'}=\frac{n'}{n}\ \text{（用於小角）} \tag{1d}$$

1·3 折射作圖法 一光線通過兩透明物質之交界面，其所循之方向，有一相當簡單之作圖法，如圖 1C 所示。因此方法很容易擴充用於複雜的光學系統，故有助於製造許多光學儀器的預先設計工作。

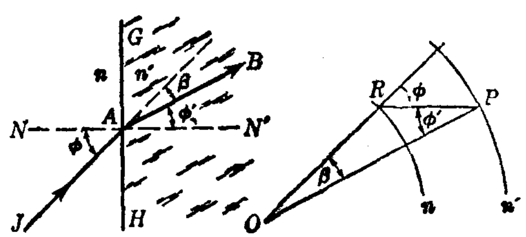

圖 1C. 平面上折射作圖法

有折射率爲 n 及 n' 的

(註*) 1621 年荷蘭 Leyden大學Willebrord Snell (1591–1626)在一未經刊印之論文上提出折射定律之要義，由幾何作圖他決定角 φ' 及 φ 的餘割(cosecant)的比值爲常數。Descartes首先用正弦的比值，在法國折射定律通稱作 Descartes 定律。

兩種介質，GH 爲其分界面，JA 表入射線，φ 表入射角，此作圖法如下：在圖之一邊近旁，作一線 OR，平行於 JA。以O點爲圓心，作兩圓弧，其半徑與兩折射率 $\boldsymbol{n}$ 及 $\boldsymbol{n}'$ 成比例。

經交點 R 作一線平行於 NN'，與弧 $\boldsymbol{n}'$ 交於 P。聯 OP，由 A 作 AB 平行於 OP，AB 即爲折射線。入射線與折射線所成之角 β，稱爲偏向角(angle of deviation)，可書爲

$$\beta=\varphi-\varphi' \tag{1e}$$

由折射定律可證明此作圖法，在三角形 ORP 中應用正弦定律，得

$$\frac{OR}{\sin\varphi'}=\frac{OP}{\sin(\pi-\varphi)}$$

因 $\sin(\pi-\varphi)=\sin\varphi$，　$OR:OP=n:n'$，代入上式卽得

$$\frac{n}{\sin\varphi'}=\frac{n'}{\sin\varphi} \tag{1f}$$

此卽 Snell 定律（方程式 1c）。

1·4 可逆性原理　由方程式 1a 及 1c 的對稱形式，立刻可以看出，假如一反射線或折射線反方向進行，它必定循原路反射或折射。如光線由一折射率爲 $\boldsymbol{n}$ 之介質進入一折射率爲 $\boldsymbol{n}'$ 之介質，其入射角爲 φ，折射角爲 φ'；如光線由折射率爲 $\boldsymbol{n}'$ 之介質進入折射率爲 $\boldsymbol{n}$ 之介質，φ' 爲入射角，則其折射角必爲 φ。可逆性原理旣可用於每一反射面或折射面，亦可用於最複雜的光程。以後我們將論及此有用的原理不僅有其幾何學的根據，並且爲力學中波動原理必然的結果。

1·5 光程　有一比較普遍的原理，包含反射定律及折射定律。爲敍述此原理方便起見，我們引進一個新名辭，此名辭稱之爲光程(optical path)。在一折射率爲 n 之介質中，光行一距離 $\boldsymbol{d}$，光程卽爲其乘積 $\boldsymbol{nd}$。由後述 $\boldsymbol{n}$ 之物理意義，可知光在該介質中行距離 $\boldsymbol{d}$ 所需之時間，實與光在眞空中行距離 $\boldsymbol{nd}$ 所需之時間相等。當光在折射率爲 n_1，n_2，…… 之各介質中的行程各爲 d_1，d_2，……，其光程可如下計算：

$$光程=[d]=n_1d_1+n_2d_2+\cdots\cdots=\sum_i n_i d_i \tag{1g}$$

例如在圖 1D 中，L 爲一透鏡，其折射率爲 n'，沒於折射率爲 n 之液體中。在一光線上 Q 及 Q' 兩點間的光程爲

$$[d]=nd_1+n'd_2+nd_3$$

此處 Q 及 Q' 二點並不一定需要是物及像上之二點，僅爲一實際光線上之兩任意點而已。

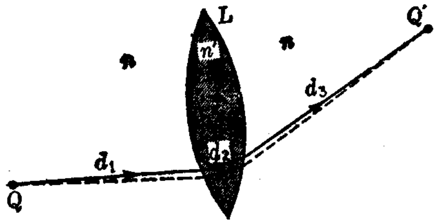

圖 1D. 圖示光程觀念及 Fermat 原理

在一折射率連續變遷之介質中，可用積分法替代求和法，而得光程之定義。我們將討論一原理，包含反射定律及折射定律，並且對任何形式變化之 n 均可適用。

1·6 Fermat(註*)原理 許多教科書對此原理之敍述均不十分完全，因爲那些書的作者們希望保存 Fermat 原來提出的面目，他原來提出的便是不完全的。用光程觀念此原理可書爲：

用一次近似法(first approximation)，光由一點至另一點，中經任何種數不同的介質，其所取的路線，在使其光程等於密切隣近的其他路線的光程。

上述"其他路線"必係可能的路線，它們僅因反射面或折射面而發生偏向。一光線比其隣近假設之路線，其光程爲極小，現在已知 Fermat 原理可用於此種情形。Fermat 原意云：光所取的路線需時最短，光程即係量度此時間。實則在許多情形之下，光所走的路線，其光程爲極大，或則既非極大亦非極小，僅係不變(stationary)值(在一拐點 a point of inflection)。

如有一光線通過 Q 點，經一平面反射後通過第二點 Q''(見圖 1E)。爲求光之實際路線，由 Q 作一線垂直於 GH，與 GH 交於 M，並引長至 Q'，使 M 恰爲 $Q'Q'$ 之中點。聯 QQ''，交 GH 於 B，聯 QB。光實際所走的路線即是 QBQ''。從圖上的對稱關係很容易看出，在此情形下光實際所走的路線是服從反射定律的。

(註*) Pierre Fermat (1608–1665)。法國數學家，許多人論他的成就，把他和微分學發明人並列。他提出 Fermat 原理的理由是"自然是經濟的 nature is economical"，他沒有料到在許多情形下，事實恰和他的想像相反。

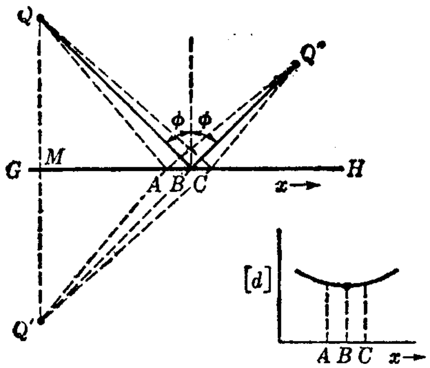

圖 1E. 圖示 Fermat 原理用於平面反射

若有隣近二路線經過鏡面上 A 及 C 兩點，此兩點在 B 點近旁。路線 $Q'AQ''$ 及 $Q'CQ''$ 均大於 $Q'BQ''$，因直線為兩點間最短的路線。由相等三角形的關係，可以得到 $QA=Q'A$ 與 $QC=Q'C$，所以$QAQ''>QBQ''$，同理$QCQ''>QBQ''$。因此實際路線 QBQ'' 是一極小值。

圖 1E 中右下方之曲線表示極小的意義，A 及 C 兩點間之曲線曲率甚小，正說明如用一次近似法，隣近路線的光程等於實際路線的光程。

今進而討論一橢圓球形反射面 (ellipsoidal reflector)，如圖 1F 所示。位於一焦點之點光源 Q 所發射之光線，依照反射定律，經反射面反射後，將會聚於另一焦點Q'。所有路線長度均相等（我們可用一定長度之線，固定其兩端於兩焦點，而畫出一橢圓。）。在此情形下所有光程均相等，既非極大，亦非極小，正如上述之不變值。在圖 1G(b) 中，其水平直線即表示光程相等。

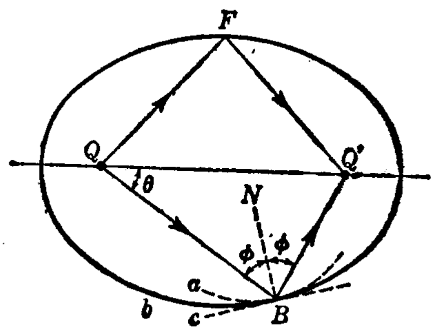

圖 1F. 圖示 Fermat 原理用於一橢圓球形反射面

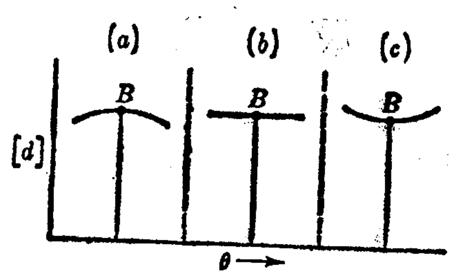

圖 1G. 反射光程圖，並示 Fermat 原理在(a)極大(b)不變(c)極小光程的情況

假如在圖 1F 中，考慮其它二反射面 a 及 c。此二反射面與橢圓

球切於B點，直線NB為a，b，及c三面之法線，對三反射面而言QBQ'均係實際路線。就反射面c而言，如考慮實際路線以外隣近路線，則顯見實際路線為一極小值。如就反射面a而言，則實際路線却為一極大值（見圖1G）。

用數學方法很容易由 Fermat 原理推演出反射定律及折射定律。圖 1H 表示一光線經兩介質之交界面而折射，可用以演證折射定律（方程式1c）。由折射率為n之介質中一點Q，至另一折射率為n'之介質中一點Q'，經交界面上任一點A，其光程之長為

$$[d]=nd+n'd' \qquad (1h)$$

式中d及d'表示QA及AQ'之長度。

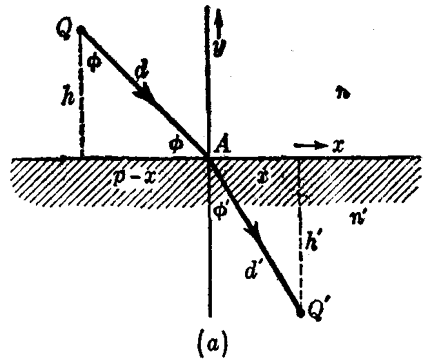

圖 1H. 用折射線之幾何圖形說明 Fermat 原理

如以h及h'表示Q及Q'兩點至分界面垂線之長，此兩垂線在分界面上截取一線段，其長為p，用直角三角形的 Pythagoras 定理得

$$d^2=h^2+(p-x)^2$$
$$d'^2=h'^2+x^2$$

將此d及d'值代入方程式 1h 得

$$[d]=n[h^2+(p-x)^2]^{1/2}+n'(h'^2+x^2)^{1/2} \qquad (1i)$$

就光的實際路線而言，依照 Fermat 原理$[d]$必須為一極小值，或一極大值，或為不變值。欲求此值，可以$[d]$為縱坐標，x為橫坐標，繪曲線；求出曲線上水平切線之x值，此x值之相當光程即為實際路線之光程（見圖 1G）。如用數學方法，由方程式 1i 求$\dfrac{d[d]}{dx}$，即曲線之斜率，再使此值為零求x之值，是即曲線斜率為零之處。

將方程式 1i 對x微分，並使其結果等於零，即

$$\frac{d[d]}{dx}=\frac{\frac{1}{2}n}{[h^2+(p-x)^2]^{1/2}}(-2p+2x)+\frac{\frac{1}{2}n'}{(h'^2+x^2)^{1/2}}(2x)=0$$

由上式可得

$$n\frac{p-x}{[h^2+(p-x)^2]^{1/2}}=n'\frac{x}{(h'^2+x^2)^{1/2}}$$

化簡卽得

$$n\frac{p-x}{d}=n'\frac{x}{d'}$$

參考圖 1H 上式之 n 及 n' 所乘之式，正是 $\sin\varphi$ 及 $\sin\varphi'$，由此我們已證明方程式 1c，卽

$$n\sin\varphi=n'\sin\varphi'$$

仿照圖 1H 可繪反射線圖，同樣用數學方法可證明反射定律。

1·7 色散現象　　學過初等物理學的人都知道，折射可使白光分析成它組成各成份之色。在圖 1I 中入射線爲白光，折射線爲不同之色（實際上是一連續光譜），其折射角 φ' 之値各不相同。由方程式 1c，可知 n' 亦隨各色而異。通常所述之折射率均對某特殊之色而言，此特殊之色可以太陽光譜中某些暗線所在之位置表之。本書中表 21–Ⅱ及表23–Ⅰ列有 Fraunhofer (註*) 線，由長波紅光開始，並分別以

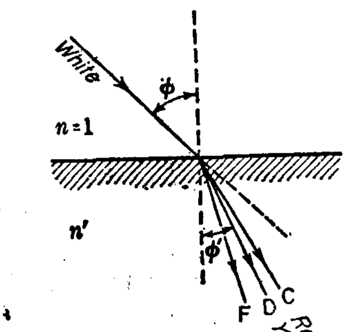

圖 1I.　白光折射成光譜稱爲色散

White 白　Yellow 黃
Red 紅　Blue 藍

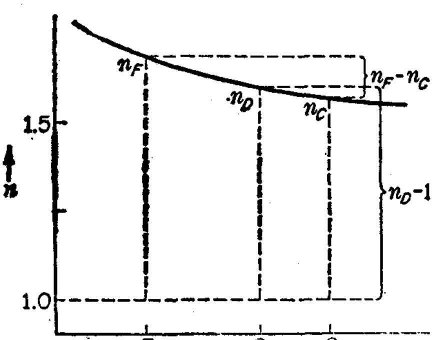

圖 1J.　折射率因色而異之曲線

Violet 紫　Yellow 黃
Blue 藍　Red 紅
Green 綠

(註*) Joseph Fraunhofer(1787–1826)。Bavaria 窮玻璃工人的兒子。他由磨玻璃的實際工作，而進入光學研究的領域。他卓越的實驗技巧，使他能得到空前美好的光譜，因此導致他在太陽光譜方面的成就，後人以其名名之。繞射光柵(diffraction grating)也是Fraunhofer首先製造的（見第十七章）。

A，B，C，……名之。最常用的線如圖 1I 所繪者。

F 及 C 二線所夾之角度通常用來量度色散，在圖 1I 中係擴大地繪出。D線與入射線所成之角度訂爲平均偏向(deviation)。就冕牌玻璃之特例說，按表 23-Ⅰ知其折射率爲

$$n_F=1.53303 \quad n_D=1.52704 \quad n_C=1.52441$$

從方程式 1d 很容易證明，如入射角 φ 是一小角，F 及 C二線之色散 $(\varphi'_F-\varphi'_C)$與

$$n_F-n_C=0.00862$$

成正比，而 D 線之偏向$(\varphi-\varphi'_D)$則決定於$n_D-1=0.52704$，此數值約爲(n_F-n_C)之六十倍。(n_F-n_C)與(n_D-1)之比值隨玻璃之種類不同而變化甚大，是光學物質之一重要特性常數，稱之爲色散率 (disper-ive power)，並以下式表之

$$\frac{1}{\nu}=\frac{n_F-n_C}{n_D-1} \tag{1k}$$

色散率之倒數通常用希臘字母 ν 表之，大多數光學璃璃 ν 之數值均在 30 與 60 之間。

通常光學物質之折射率 n 隨色之變化如圖 1J 所示。方程式1k 之分子是量度色散的，由光譜兩端折射率之差而決定。方程式 1k 之分母是量度平均偏向的，由一中間折射率與 1 之差而決定。

在討論幾何光學的多數問題中，習慣上對色的效應多略而不論，正如在本書此後七章中，所論光學儀器某一部份之折射率，均假定係對黃色鈉的D光線而言。

習 題

1. 一光線由空氣入射於一塊表面光滑的玻璃，其入射角爲 15° 如用角的數值代替 Snell 定律中角之正弦，試計算所得折射角誤差的百分率。假定 $n'=1.520$。

2. 一光線由空氣射入折射率爲 1.560 之玻璃，其入射角爲 45° 用 (a) 圖解法，(b) Snell 定律計算，求其折射角。(c)求其偏向角。

   答案：(a)27°.(b)26°57′.(c)18°3′.

3. 一中空之直管長 1m，兩端封以厚 10mm 的水晶板，如管係眞空，水晶