

普通岩石学

第一册

晶体光学

胡崇堯編著

四川人民出版社

前 言

本書是參考高等教育部1954年修訂的教學大綱編著而成。全書共分六章，主要講述晶体光学的原理及其在顯微鏡鑒定下的应用。是高等院校中講授岩石学的第一部份。

本書主要材料取自契特維里科夫的晶体光学薄片研究法，并參考了塔塔尔斯基的晶体光学及油浸法，何作霖先生的光性礦物学及其他文献。亦結合作者在教學實踐中的心得体會，數度改編補充而成。

本書可作为找礦、勘探專業教本；亦可作为水文、石油与其他有关專業以及學習岩礦鑒定者的參考。

本書初次出版，錯誤难免；敬希讀者多提意見，以便改正。

本書插圖系張崇賢、羅中流等同志代繪，附此致謝。

胡崇襄 1957 秋

目 錄

第一章 晶体光学基础.....	(1)
第一節 光的基本概念	(1)
第二節 自然光和偏光	(5)
第三節 光线在均質体与非均質体中的傳播方式	(7)
第四節 常光和非常光	(9)
第五節 光波面	(9)
第六節 折光率与折光鏡	(12)
第七節 折光率曲面	(17)
第八節 光率体	(22)
第九節 光率体在晶体中的位置——光性方位	(27)
第十節 色散	(30)
第二章 偏光顯微鏡	(35)
第一節 偏光顯微鏡的結構和特點	(35)
第二節 偏光顯微鏡的制造和蘇科爾波鏡剖面	(36)
第三節 偏光顯微鏡的檢驗和校正	(38)
第三章 單偏光鏡下的研究	(44)
第一節 顏色和多色性	(44)
第二節 晶粒、解理和角的測量	(46)
第三節 突起、糙面和礦粒邊緣	(50)
第四節 光帶	(53)
第五節 不透明礦物的观察	(57)
第六節 礦物顆粒的測量和計量	(57)

第四章 平行光下正交偏光間晶体光学的研究..... (64)

- 第一節 正交偏光鏡的裝置及其上下偏光鏡的位置..... (64)
- 第二節 消光和消光位..... (65)
- 第三節 正交偏光鏡中的干涉現象..... (66)
- 第四節 光程差及其与重折率及薄片厚度的關係..... (68)
- 第五節 干涉色..... (69)
- 第六節 用干涉色譜表測定礦物的重折率(厚度和光程差)..... (73)
- 第七節 消色法則和各种消色器..... (77)
- 第八節 一系列的重要光性測定..... (81)
- 第九節 双晶在正交偏光鏡間的观察..... (88)

第五章 錐光鏡下的研究..... (94)

- 第一節 錐光鏡的裝置及其特點..... (94)
- 第二節 一軸晶干涉象..... (95)
- 第三節 二軸晶干涉象..... (107)
- 第四節 礦物軸性的鑒定..... (121)
- 第五節 光性方位的測定..... (122)
- 第六節 色散的測定..... (126)
- 第七節 偏光面的旋轉..... (130)

第六章 費多洛夫法和油浸法的基本概念..... (132)

- 第一節 費多洛夫法的基本概念..... (132)
- 第二節 油浸法的基本概念..... (134)

第一篇 晶体光学基本原理

第一章 晶体光学基础

第一节 光的基本概念

一 光的本性

光的本性有种种假设。惠更斯 (Huygens 1678) 认为光的传播，是以“以太”为媒介的波动现象，所作光波是垂直传播方向而振动的横波。马克思威尔 (Maxwell 1873) 进一步认为光波是电磁波的一种。它的振动向量相当于电场强度和磁场强度，后二者彼此正交而垂直其传播方向。海兹 (Hertz 1888) 用电来试制与光波性质相近的波，也取得了成功。这都属于波动说。用波动来解释我们所需要解释的一些现象，如折射、反射、干涉和偏化等是比较容易的。

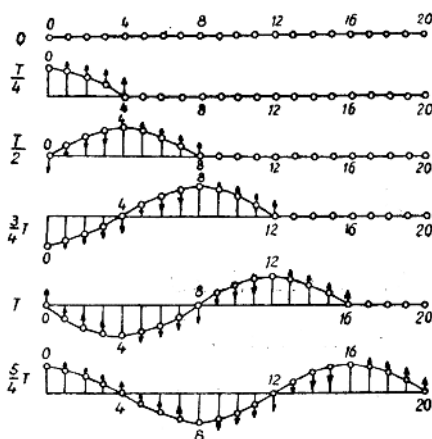
不过，必须指出，由于光和电子、原子等互相作用时所引起的光电现象，以及铀射线中的放射现象，又显示出是由粒子（即光子）所组成。从而导致了量子的概念。由此可知，光的本质是具有两重性的。一方面是一束能量的粒子（即光子），而另一方面，又是一种波的振动运动。

因而，晶体光学中把光作为光能的一种形式（即波的形式），作为一种横的简谐振动运动来研究，有时也谈到微粒的弹动。

二 光的简谐运动

光的简谐振动运动，沿着直线传播。质点连续振动的轨迹，成功正弦曲线（图一）。

图中质点假定原来处于静止状态中，而且它们之间有一种弹性



〔圖1〕 光的諧振運動

力互相联系着。因此 0 点受力，向上彈动，势必影响附近質点的 1、2、3、4 等也跟着彈动起来。不过离开静止状态的时间，一个比一个迟一些而已！但因各点牽制，0 点到达一定高度以后，只能回头向下，这时便走过了 $\frac{1}{4}T$ 的行程。

0 点繼續下降

以后，1、2、3 点也跟着向下，而 4 点將居最高位置，与此同时 5、6、7、8 点在前者的影响下，也会依序地向上彈动起来，迨 0 点下至原位时，上述八点完成了 $\frac{1}{2}T$ 的途程。

由于慣性关系，0 点仍然运动，并下至一定距离后 ($\frac{3}{4}T$)，又复上彈，直至原位 (T)。于是完成了一次完整的振动。自此，随着時間繼續前進，光能傳播，越來越远，联系諸質点振擺之迹，形成了正弦曲綫。

惟应注意者 質点垂直振擺，成功波的形式，但質点本身并未作橫的移动，而光能僅借每一点上的电场和磁场强度（向量），作周期性的輪換变化來傳播而已！

三 諧振运动諸要素

振幅 (A) 是振动物質点从静止位置彈至最高点时的距离。亦称波

高。振动能量 (I) 与振幅平方成正比。

振动周期 (T) 是完成一次完整的振动所需的时间。

振动频率 (f) 是每秒钟完成振动的次数。因此频率是周期的倒数, 即

$$f = \frac{1}{T}$$

位相 (F) 是在一定时间内振动点振动的状态。这要加以注意, 因为光的干涉现象, 就与位相有关, 而干涉在晶体光学中占着特别重要的位置。位相有三种 (圖一):

(一) 相同位相 光线上的对应振动点, 如圖 1 与 17, 2 与 18, 3 与 19 等等, 如果均在基线同侧, 振动方向又都相同, 于是称此諸点皆在相同位相上。凡在相同位相上的相关两点, 其相隔距离 (即相差) 必为半波长的偶数倍 $2n \frac{\lambda}{2}$ 。

(二) 相异位相 圖中 1 与 9, 2 与 10, 3 与 11……各点, 各在基线异侧, 振动方向恰好相反, 于是称此諸点皆在相异位相上。凡在相异位相上的相关两点之相差, 必为半波长的奇数倍 $(2n+1) \frac{\lambda}{2}$ 。

(三) 不等位相 在不等位相上的振动点, 其位置既不合于相同位相, 也不合于相异位相。其相差介于 $2n \frac{\lambda}{2}$ 与 $(2n+1) \frac{\lambda}{2}$ 之間。

波长 (λ) 是振擺运动经过一个周期时间所传播的距离。亦即相同位相上两最近点的距离。

再谈到与上述要素有关的光速 (V), 按电磁波在真空中传播的速度为 299796 ± 4 公里/秒, 取其近似值则为每秒 30 万公里 (在其他介质中速度略小), 可见光速是很快。波长 (λ) 除以光速 (V), 则得周期 (T), 而频率 (f) 为周期之倒数, 故得其关系式如下:

$$T = \frac{\lambda}{V}, \quad \text{或} \quad \lambda = VT$$

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{或} \quad f = \frac{V}{\lambda}$$

单色光之颜色决定于其波长, 由上公式可知色光与频率亦有密切

的关系。我們所見太陽光僅僅是它的一小部分。如果將所見白光，通過三稜鏡，立見紅、橙、黃、綠、藍、青、紫七色，構成美麗色帶。其中各色光大致各有一定範圍的波長（見下表），但沒有截然的界綫。紅光光波最長（760—630 $\text{m}\mu$ ），紫光光波最短（430—400 $\text{m}\mu$ ）；但紅紫兩端以外尚有紅、紫外綫，無法目睹；但為數更多。倘若用兩個數字來形容，即能見色光的寬度為2.5公分，則不能見者要占3.5公里。

各種能見色光在空氣中波長的近似值

色 光	波 長 ($\text{m}\mu$)
紅	760—630
橙	630—590
黃	590—570
黃 綠	570—530
綠	530—500
藍	500—480
青	480—430
紫	430—400

四 光振動的干涉現象

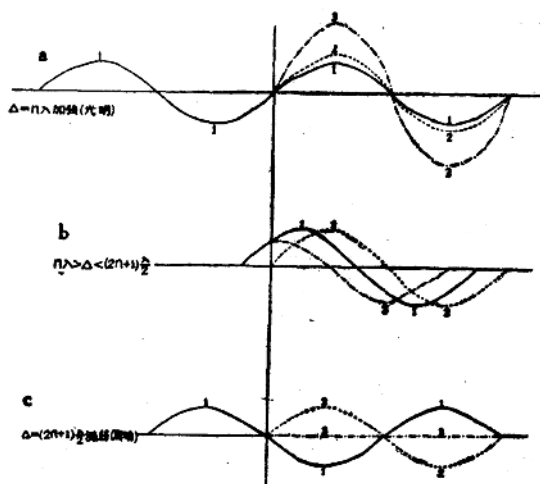
兩波同向傳播，而且波長相等，必然發生干涉。干涉結果決定於相遇質點的位相關系：

（一）兩波相關兩點在相同位相上相遇，即其相差為半波長的偶數倍，則其結果，所成新波之振幅為原來兩波振幅之和（圖二，a）。即 $A = A_1 + A_2$ ，如果 $A_1 = A_2$ ，則 $A = 2A_2$ ，可見在此情況下，振幅增加了一倍，光的強度便增加到4倍（特亮）。

（二）兩波相關兩點如在相異位相上相遇，即是相差為半波長的奇數倍，則干涉所成新波之振幅為原來兩波之差（圖二，b），亦即 $A = A_1 - A_2$ ，是則振幅減低，光強變弱，如果 $A_1 = A_2$ ，則 $A = 0$ ，

故达消光现象(黑)。

(三) 兩波相关兩点各在不等位相相遇。即其相差介于半波長的奇数倍与偶数倍之間, 則所成新波之振幅亦介于前二者之間(圖二, c), 如 $A_1 = A$, 則振幅介于 $2A_1$ 与 0 之間, 故明暗程度亦介于前二者之間。



(圖2) 光振动的干涉现象

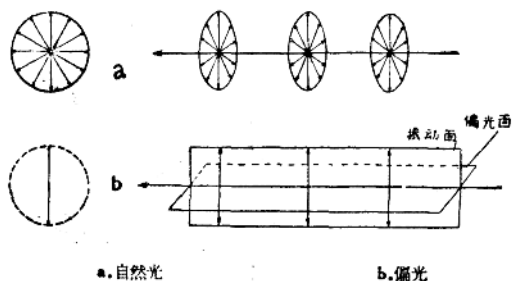
这里所要預先提示的, 將在正交偏光鏡下所見干涉现象, 恰与上述相反, 即光程差为 $2n\frac{\lambda}{2}$ 时黑暗, 为 $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$ 时光明, 其中緣由將詳于第三章中。

第二節 自然光和偏光

所謂自然光又称普通光。它可視為由無數电磁波混合而成。在其傳播方向的每一点上, 其电磁向量虽彼此保持直交, 且振幅一般相

等，但振动方向却有不规律的迅速变化。因之显示其垂直传播方向作各方向的振动（圖三，a）。

惟經某种作用的結果，所得光綫僅有一个固定方向的振动，而具有一定的规律性，則称为偏振光，或简称偏光。以其性質而言，又称直綫偏光或平面偏光。当然，平面偏光的振动方向也与其传播方向垂直，但振动面和与它垂直的偏光面却应分別开来（圖三，b）。



〔圖3〕 自然光和偏光的振动方向

一个重要的認識，即垂直其進行方向作各方向振动的自然光，是可以偏化为僅具有一个方向振动的平面偏光的。人工偏化的方法，已有种种，但不外根据折射、反射、重屈折或吸收四种作用。根据折射、反射做成的簡單偏光鏡，偏化强度太小。著名的聶科尔棱鏡以及改良得更完备的格蘭——托馬斯棱鏡和弗蘭克——立特爾棱鏡，主要根据重屈折制成，偏化强度很高，但价昂貴。根据重屈折和吸收作用，利用电气石，海拉帕石，或碘化硫酸奎寧，或用可塑体加碘來制成的偏光片，已被广泛采用，因为它偏化能力尚高而价值低廉，但对某些色光的吸收性不完全。懂得聶科尔棱鏡的制成，將有助于偏光顯微鏡下晶体光学現象的順利了解，將亦詳于第三章中。

此外再提到由于两个互相垂直振动的偏光，彼此作用，可導出橢圓偏光，而在特殊情況下可成圓偏光。

第三節 光綫在均質体与非均質体中的傳播方式

一 均質体与非均質体

光学上把一切物体分为均質体与非均質体两种。

空气、液体、玻璃、樹膠以及其他非結晶質，都是均質体。此外，所有等軸晶系礦物（未受过压力者）也是均質体。其他各晶系如正方、六方、三方、斜方、單斜，与三斜六系礦物皆为非均質体。

均質体礦物，内部結構各方一致，具有三个互相垂直而且对称程度相同的方向，这三个方向与其他任何方向，在光学上，其性質完全一样。

非均質体礦物沒有結構完全相同的三个互相垂直的方向，自然也沒有三个光性相同的，互相垂直的方向，除特殊方向外，其他各方向的光性，不会是全同的。

因此，光綫在均質体中，得以相等速度向各方傳播。但在非均質体中，光綫傳播的速度因方向不同，其方式也較複雜。

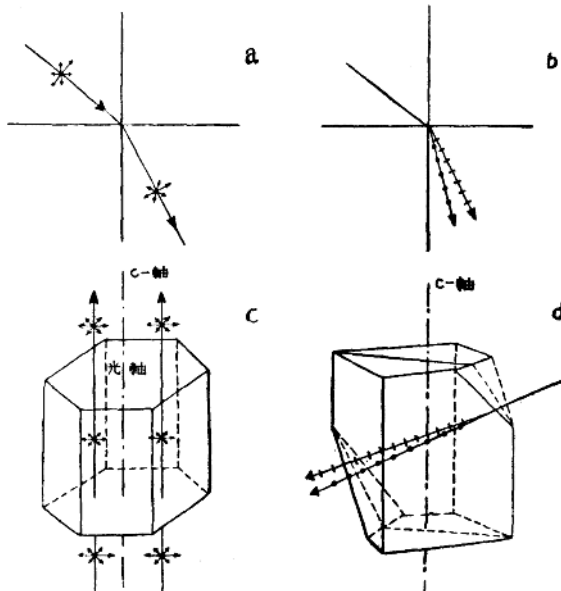
二 光綫在均質体与非均質体中的傳播方式

大家知道，光綫自空气中，即發生單折射現象。同样，傾斜射入其他均質体中，也要產生一种折射綫（圖四，a），而且除在某些情況下有部分成为偏光外，一般仍然是垂直其進行作各方向振動的。倘若垂直入射，則折射綫与法綫重合，可認為是折射現象中之一特例。

但若射入非均質中，情况就不同了。一般產生两种折射綫，每种折射綫均有其一定的振動方向，而且彼此是垂直的。所以它們已是两种平面偏光了。这种現象叫做双折射或重屈折（圖四，b）。具有双折射性質的礦物称为双折射或重屈折礦物（非均質体）。僅具單折射性質的礦物叫做單折射礦物（均質体）。

必須注意，光綫如从非均質体的某个特殊方向射入，譬如說从六方晶系晶体的 c 軸射入，則不發生重屈折，它和垂直射入均質体一

样，所生单折射綫和法綫重合，并垂直其進行作各方向的 振动（圖四，c、d）。这个不生重屈折的方向，叫做光軸。



〔圖4〕 a.單折射 b.双折射（重屈折） c.光綫沿C軸方向射入不發生重屈折 d.光綫傾斜射入發生重屈折

正方、三方和六方晶系礦物（中級晶系）都只有一个方向不發生重屈折，亦即僅有一个光軸，故称一軸晶礦物。斜方、單斜和三斜晶系礦物（低級晶系）各有兩個方向不發生重屈折，亦即有兩個光軸，故称二軸晶。

总之，光綫進入均質体中，產生單折射，實驗証明，無論从任何方向射入，光能之傳播速度皆等。如果射入非均質体中，產生重屈折，即分为兩種振动方向互相垂直的偏光，傳播速度亦不同。但平行光軸的方向則不生重屈折。

第四節 常光 and 非常光

光綫在一軸晶中所分成的兩種偏光，其中的一種，其振動方向永與光軸垂直，且經測定，向各方傳播光能的速度也完全相等，是為常偏光（簡稱常光）。以符號 O 表示之。另外一個，其振動方向，系在其與光軸所成的平面上，其速度因方向而改變，是為非常偏光（簡稱非常光）以符號 E 表示之。再則常光與非常光的振動面是彼此垂直的。

第五節 光波面

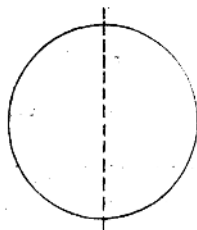
自一光源發出之光，在同一瞬間所達到的端點（波前），聯系之即成光速面，亦即光綫曲面，通常又稱光波面。

一 在均質體中的光波面

均質體因各方結構一致，光性相同；光在其中傳播，得以等速度四向進行，故所成光波面當為一球形，通過中心任切一剖面皆為一圓（圖五）。

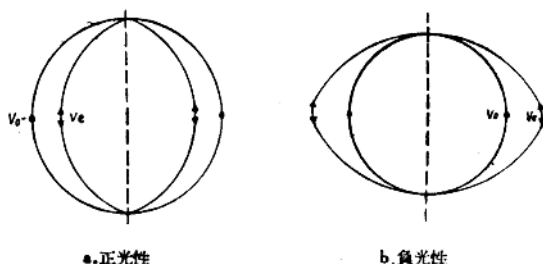
二 在中級晶系（一軸晶）晶体中的光波面

以石英及方解石為例。設光源置於石英中心，必然產生常光與非常光兩種光波。為了說明方便，沿其 c 軸（即光軸）作一直切面，則自中心傳出的常光，其振動方向皆垂直 c 軸（圖六，a），有如圖（圖五）均質體光波面剖面中點所示，垂直於紙面。因為各方速度均等（ $V_o = 1/1.544$ ），故在同一瞬間，必成一圓。但自中心傳出之非常光則不然，振動方向系在其與 c 軸所成的平面上，即為圖中箭號所示，平行於紙面，而速度則因方向而不同（ $V_e = 1/1.544 - 1/1.553$ ），



在 c 軸方向速度最大 ($1/1.544$)，垂直 c 軸方向速度最小 ($1/1.553$)。其他方向速度，自大而小依序变化于前兩者之間。故在同一瞬間成一長形橢圓。可見石英的光波面切面，乃為圓包長橢圓，且兩者相切之處之聯綫，即 c 軸（光軸）之方向。因為石英屬三方晶系，有唯一的單向，即三重對稱軸（亦即 c 軸），此軸對各方之光性皆相等，故憑此軸旋轉一周，則其光波面切面即變成光波面整體。它的具体形狀為球包旋轉長橢球。

倘若光源从方解石中發射，則產生情况恰好相反。其常光速度 V_o 為 $1/1.658$ ，非常光速度 V_e 变化于 $1/1.658$ — $1/1.486$ 之間，故所成光波面切面為一扁橢圓內包一圓。所成光波面整體乃為旋轉扁橢球內包一球（圖六，b）。



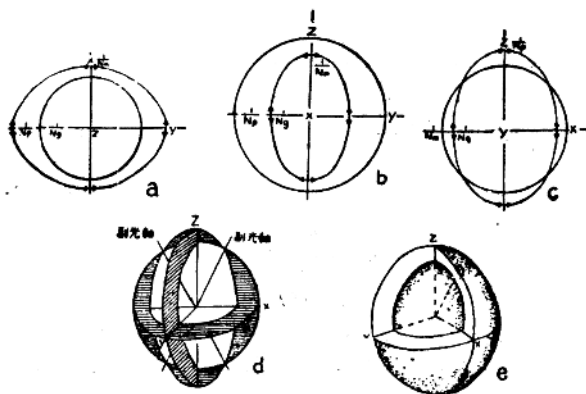
〔圖6〕 一軸晶光波面剖面

从上例可知常光与非常光的速度因礦物而不同。象石英这类礦物，其光波面為球包長橢球，表示着 $V_o > V_e$ ，这在晶体光学中称为正光性。反之，象方解石这类礦物，具有扁橢球包球的光波面，表示着 $V_o < V_e$ ，称为負光性。

凡屬負光性礦物的光波面，好象一只光明的慧眼，其中包含着一颗滾圓的珠球（因為是扁長形的，所以很容易記得是負光性）。而正光性礦物的光波面就好比一个美丽的瑠璃桃，包含一个長形的硬核（前者為負，它便為正）。这样來記憶，用时可免于顛倒。

三 在低级晶系（二轴晶）晶体中的光波面

在低级晶体中的光波面是相当复杂的。乍看之下，如象是一个三轴不等长的椭球体，内包另一个三轴不等长的椭球体。但与中级晶系的不同，因为内外都是椭球体，而且并不相切，却是相交于其四个陷穴处。此四陷穴之对角联线即为二根光轴的方向。由于低级晶系晶体具有若干单向，而無軸次高于二的对称軸，說明了它的內部結構之異向性。因而不可能產生四面八方傳遞速度均等的球形光波，所以也不好使用常光和非常光來描述。但是它有一个特点，即沿其主軸截下的三个主切面（XY，ZY，ZX）上，各有兩個波前呈現，一个是圓，另一个是橢圓（圖七）。



a. xy剖面 b. zy剖面 c. zx剖面 d. 三个主剖面的關係位置 e. 二軸晶光波面整體——四个陷穴的三軸橢球体

〔圖7〕 二軸晶光波面

为了更明确的了解，茲再分別敘述于下：

（一）XY主剖面（圖七，a）它是垂直Z軸截下的。环绕Z軸的

內圓，其半徑相当于一光波在此切面上的最小速度 ($1/N_g$)；振动方向如点号所示，平行于Z軸。其外橢圓之短半徑相当于一光波在此切面上較小速度 ($1/N_m$)，長半徑相当于一最大速度 ($1/N_p$)；振动方向，如箭号所示，平行于紙面。而兩波并不相切。

(二) ZY主剖面 (圖七, b) 它是垂直X軸截下的。在此切面上，外圓環繞X軸，半徑相当于一 $1/N$ ；振动平行于X軸。其內橢圓之短半徑相当于一 $1/N_g$ ，長半徑相当于一 $1/N_m$ ，振动方向平行于紙面。兩波亦不相切。

(三) ZX主軸面 (圖七, c) 垂直Y軸截下。在此切面上，圓環繞Y軸，半徑相当于一 $1/N_m$ ，而振动平行Y軸。橢圓短半徑为一 $1/N_g$ ，長徑为一 $1/N_p$ 。振动亦平行于紙面。兩波相交之四点，即为一四陷穴所在地，对角联綫，即为一兩根光軸。這兩根光軸与光率体的兩根主光軸，位置相近，称为副光軸以示区别。

从上看來，每个剖面上的圓与橢圓半徑，表示着在二軸晶中的光波有大、中、小三种主要的速度 ($1/N_p$ 、 $1/N_m$ 、 $1/N_g$)，整体观之，此三种速度是彼此相关联的。如果把上述三剖面垂直安插，还其原状 (圖七, d)，可以看得比較明白。

二軸晶体也分正負光性。决定于一兩根副光軸所夾銳角 ($2V$) 的等分綫。等分綫如为Z軸則为正光性，如为X軸則为負光性。

运用光波面原理來鑑定礦物的某些光性有其方便处，亦有直接的理論根据，但其本身 (如在低級晶系中) 复雜，說明某些現象时，初学者难以建立簡單确切的概念。而且光波速度的数值，一般利用折光率的倒数，不如直接利用折光率所作出的折光率曲面，还較簡單。

第六節 折光率与折光鏡

一 折光率

折光率是被鑑定礦物的一种最重要的光学常数。我們鑑定礦物时，常常利用它，并利用由它而伴生的一些光学現象。

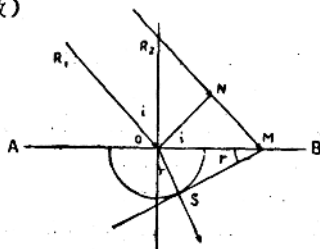
設光綫通过光密度較稀的空氣，傾斜射入光密度較大的某液體中（圖八）。根據惠更斯原理，當 R_1 行抵液面 O 點時， R_2 尚在空氣中之 N 點，組成 ON 波前。當 R_2 射至液面 M 點的同時， R_1 已經透入液體中，並已走過一段距離，為 OS ；若以 O 為圓心， OS 為半徑作一半圓，自 M 作一直綫切此圓周上，所成 MS 即為其波前。 OS 綫即折射方向。

若以 V 表示光波在空氣中的速度 NM ， V_1 表示光波在液體中的速度 OS ，兩者之比，為一常數 N 。這就是該液體的折光率。

$$\frac{V}{V_1} = \frac{NM}{OS} = N \text{ (常數)}$$

由此可知，任何物質的折光率是光波在空氣中的速度與其在該物質中的速度之比。

折光率也可以用入射角與反射角的正弦來表示。



〔圖八〕 折光率與速度的關係

$$\sin i = \frac{NM}{OM}$$

$$\sin r = \frac{OS}{OM}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{NM}{OS} = N \text{ (常數)}$$

所以光綫自空氣中進入另一物質中，其入射角的正弦與其折射角的正弦之比，也是該物質的折光率。

這裡要弄清楚，所謂某物質的折光率是以空氣為標準的。某物質折光率的倒數即等於光波在該物質中的速度。

$$V_1 = \frac{1}{N}$$

如果光綫自第一物質（非空氣）進入第二物質，所得折光率 N' 實為第二物質對第一物質的相對折光率。相對折光率變為對空氣的折