

# 第六章 晶体偏振光学

## 6.1 双折射

### 6.1.1 双折射的基本现象

### 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 6.1.3 单轴晶体中的波面

### 6.1.4 惠更斯作图法

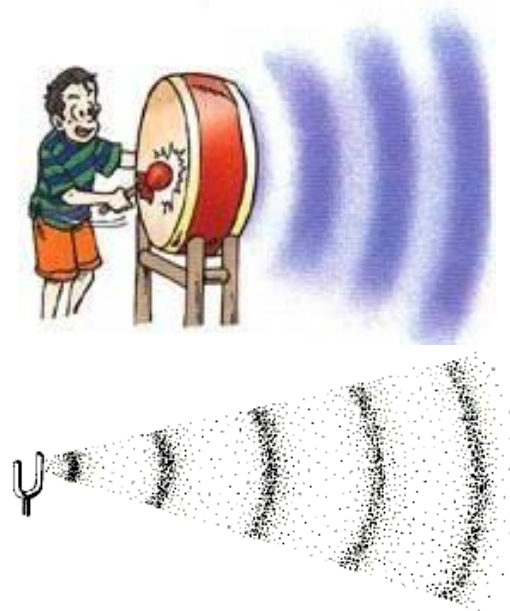
# 6.1.1 双折射的基本现象

## 横波和偏振概念的回顾

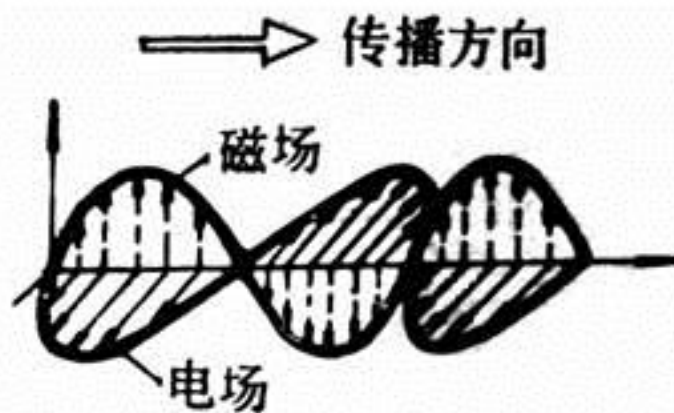
标量波：温度、密度、.....

矢量波：电磁波、.....

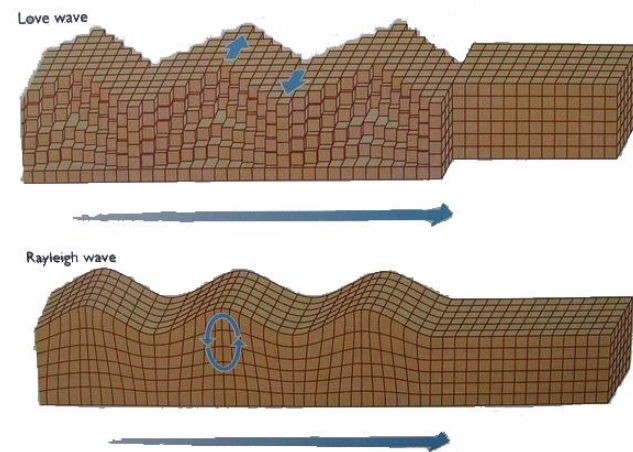
张量波：固体中的声波、地震波.....



空气中的声波  
—疏密波



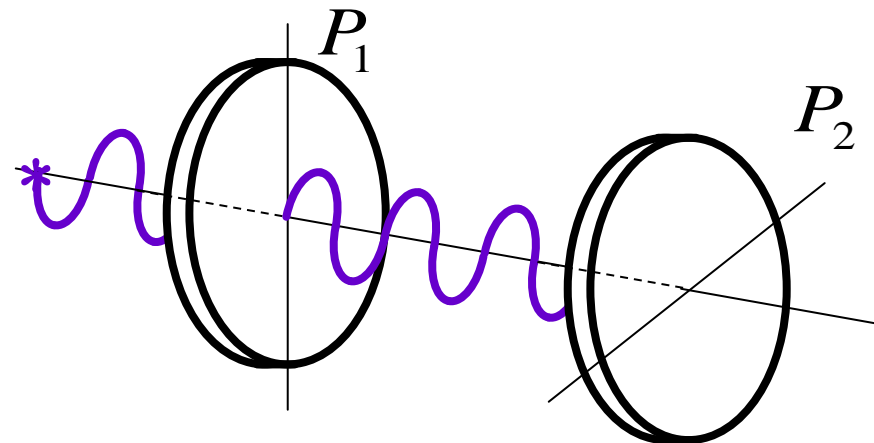
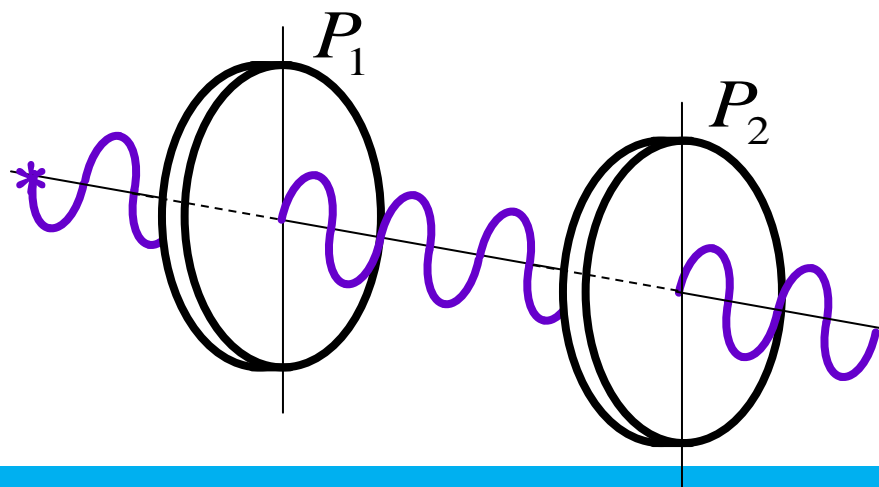
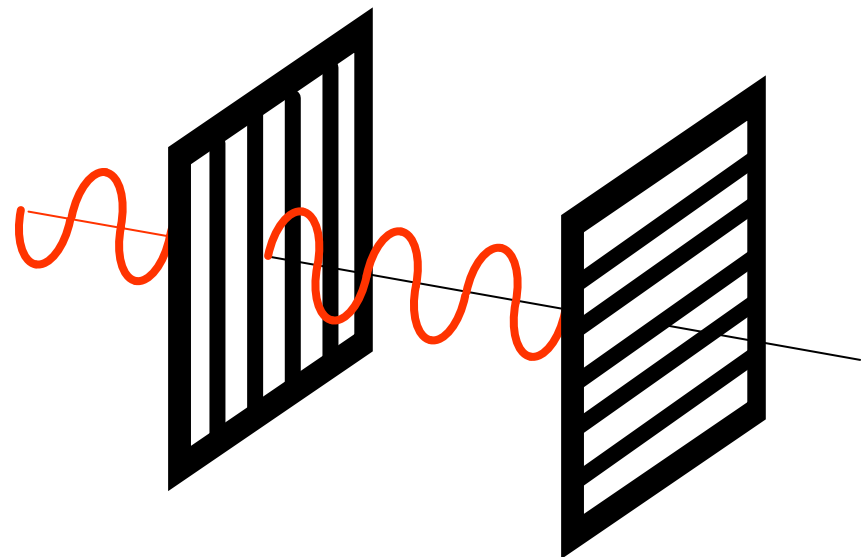
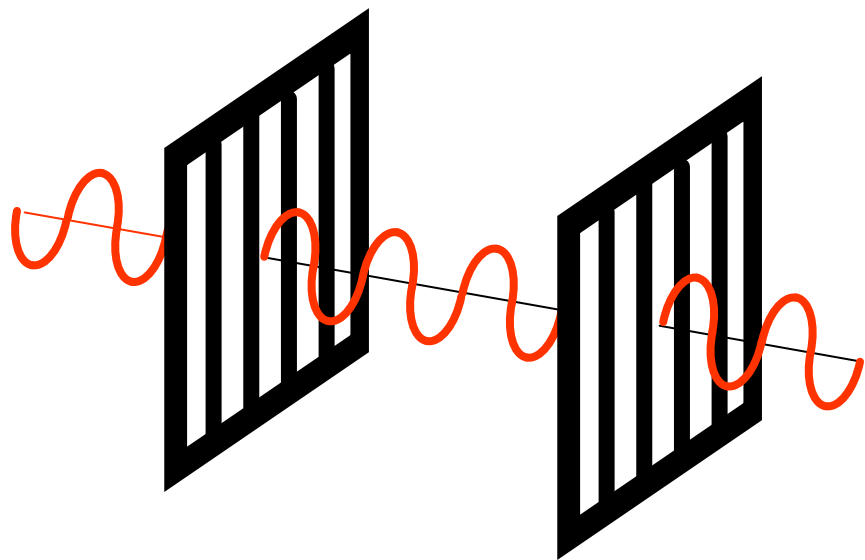
电磁场—矢量波



地震波—张量波

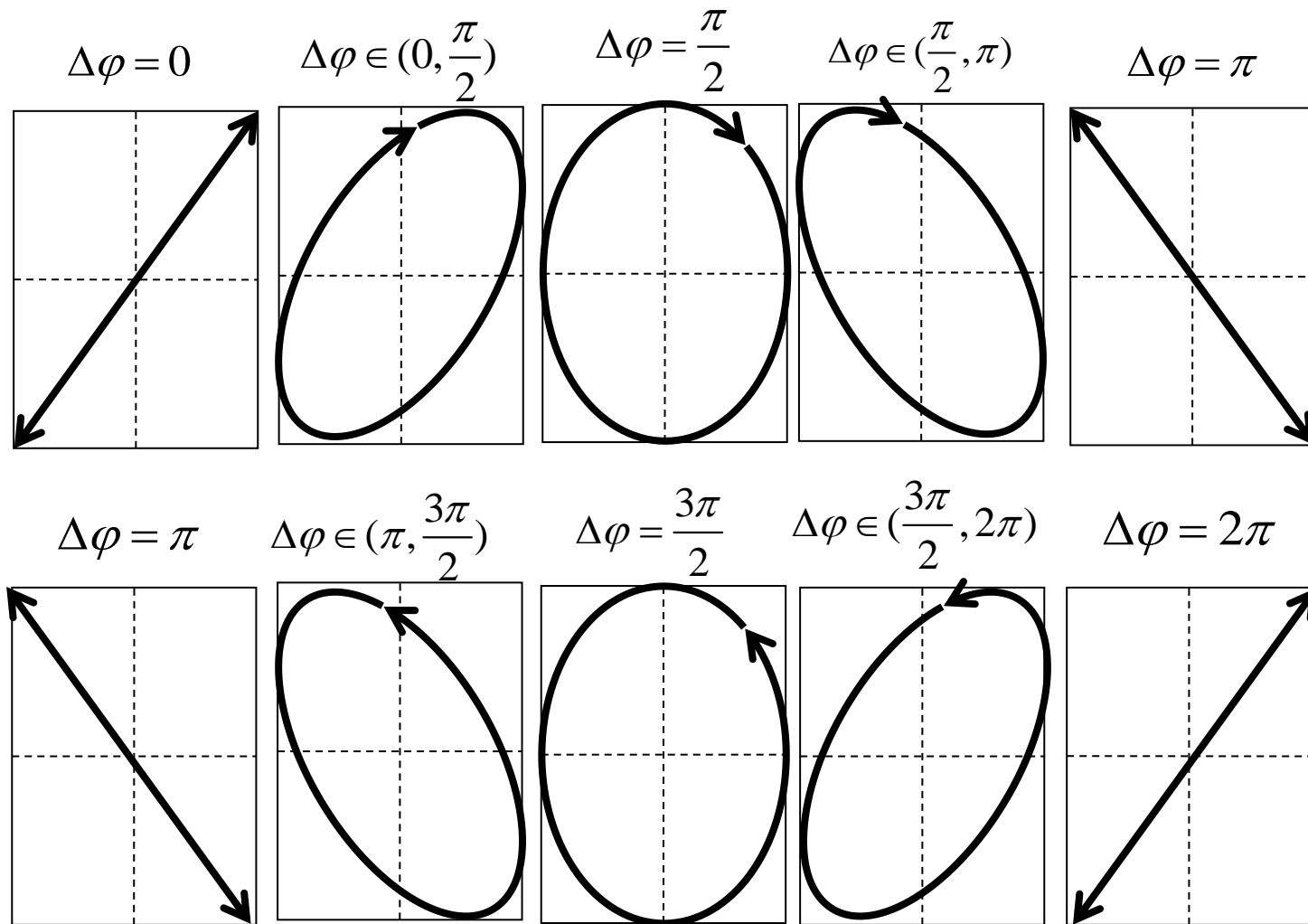
## 6.1.1 双折射的基本现象

### 横波和偏振概念的回顾



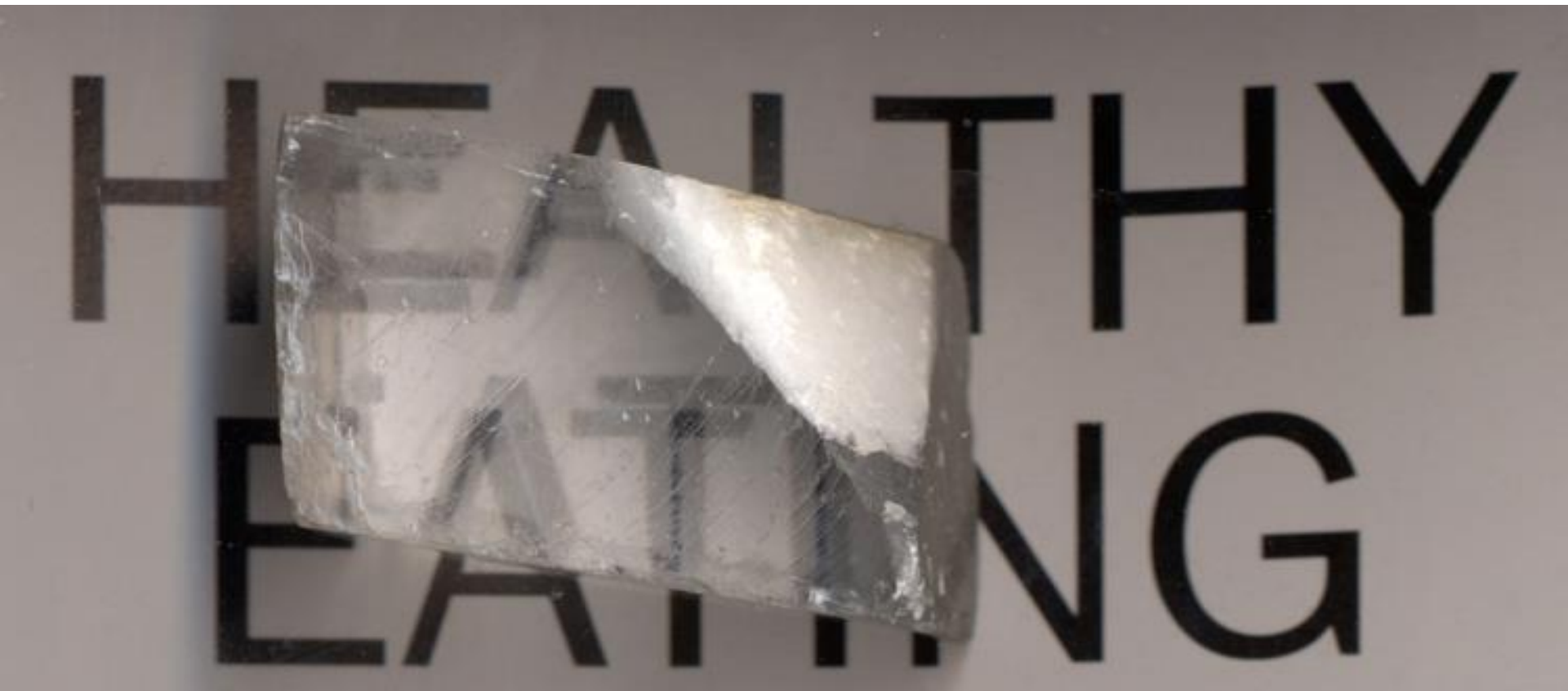
## 6.1.1 双折射的基本现象

### 横波和偏振概念的回顾



## 6.1.1 双折射的基本现象

### 双折射的基本现象

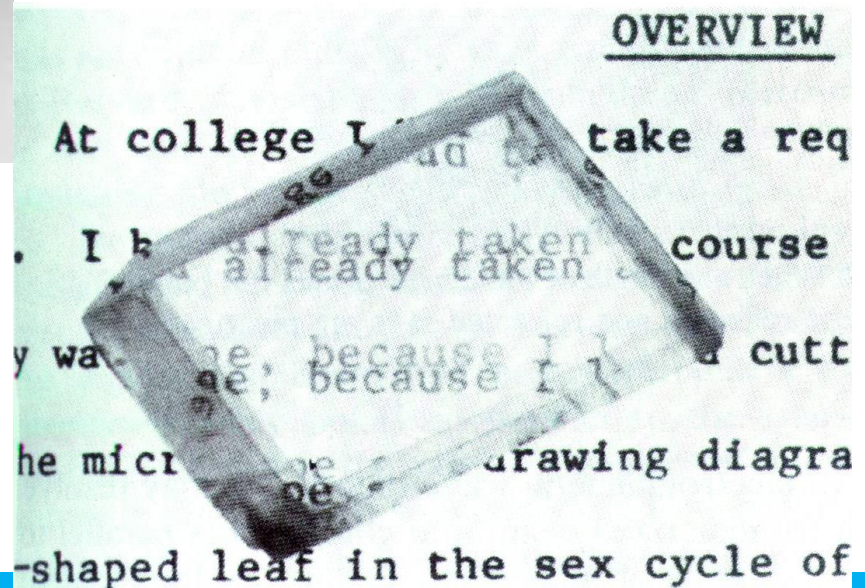
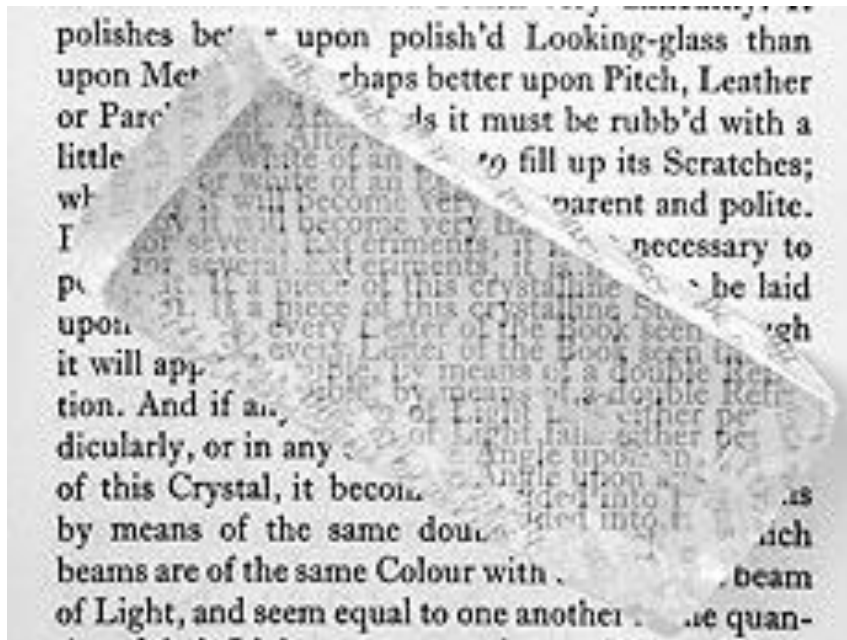


方解石晶体的双折射

( double refraction, birefringence )

# 6.1.1 双折射的基本现象

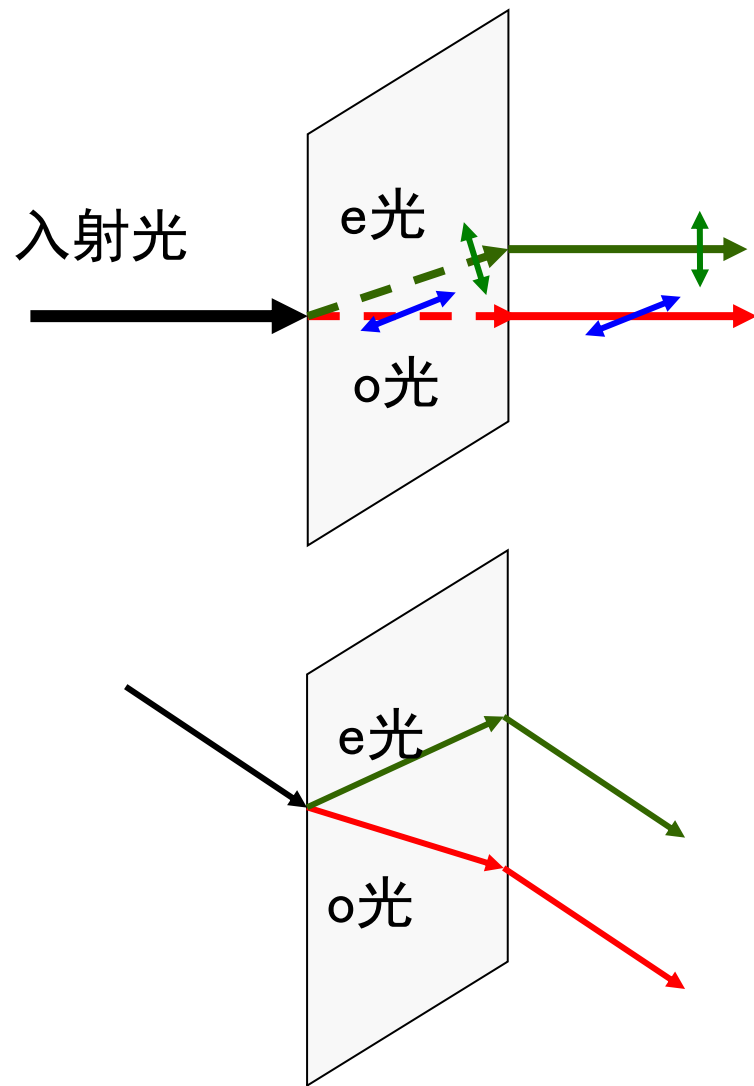
## 双折射的基本现象



## 6.1.1 双折射的基本现象

### 双折射的基本现象

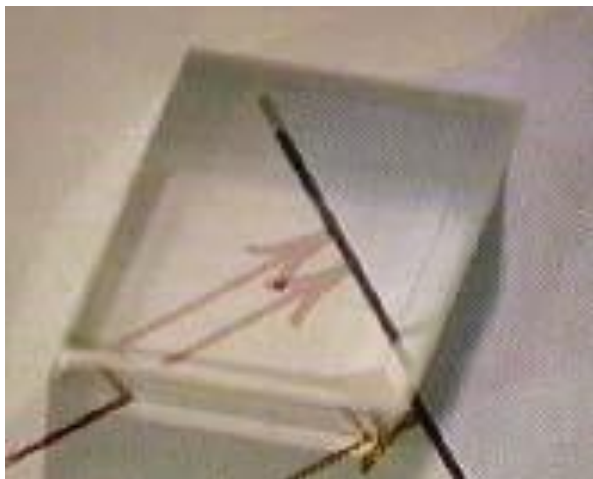
- 一束入射到介质中的光经折射后变为两束光，称为双折射。
- 折射后的两束光都是线偏光。
- 一束遵循折射定律，称为寻常光（o光）。o-ordinary
- 一束**不遵循折射定律**，不一定在入射面内，不满足 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 称为非常光（e光）。e-extraordinary
- 从晶体中射出后，不再称o光、e光





## 6.1.1 双折射的基本现象

### 双折射的基本现象



**红色箭头**经过方解石晶体的两个像



经过线偏振器后  
**o光的像**



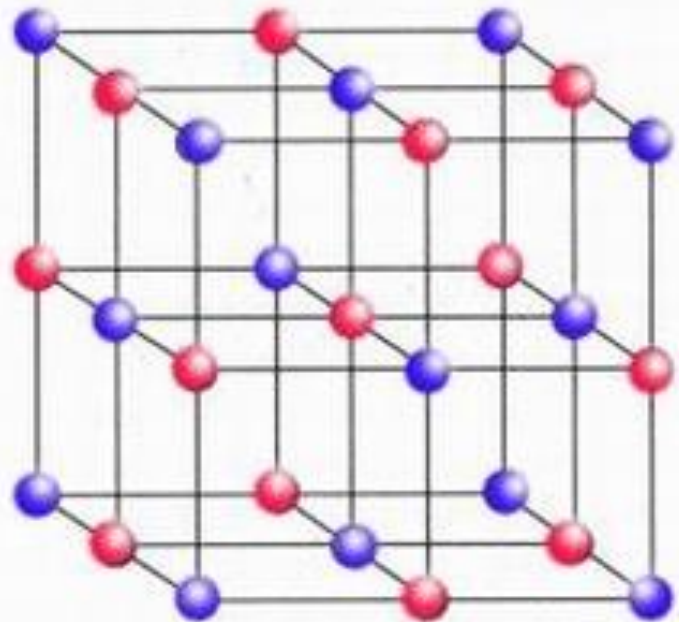
将线偏振器旋转  
90°后, **e光的像**

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 晶体的概念

**晶体**：外部具有规则的几何形状，内部原子具有周期性的排列结构，被称为有序或空间对称。

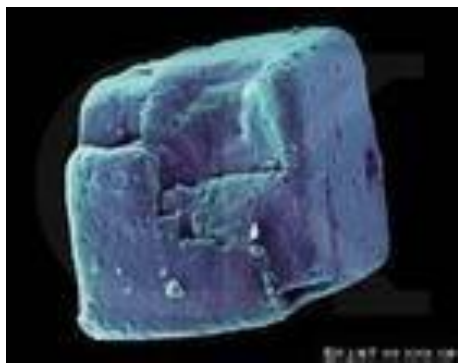
非晶和液体：无规则外形，内部原子无序排列



## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 单晶体与多晶体

- ① 固体分为晶体和非晶体，晶体可分为单晶体和多晶体。
- ② 单晶体：晶体内部原子都按周期性排列，如：食盐、雪花、天然水晶、单晶冰糖等。
- ③ 多晶体：晶体内部局部区域里原子按照周期性规则排列，但不同区域之间原子的排列并不相同。多晶体也可以看做是许多取向不同的小单晶体（晶粒）组成的。多晶体有金属、陶瓷、石头、陨石等。



食盐



雪花



单晶冰糖



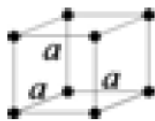
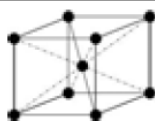
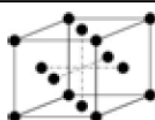
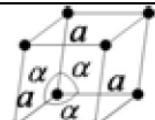
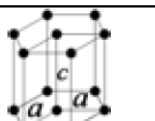
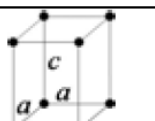
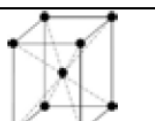
多晶冰糖

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

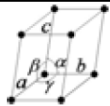
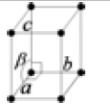
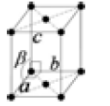
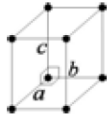
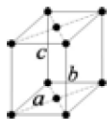
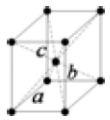
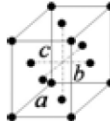
### 双折射晶体

- 能够产生双折射的晶体，都是具有各向异性结构的。
- 方解石晶体，即 $\text{CaCO}_3$ ，碳酸钙的三角晶系，是一种典型的双折射晶体（单轴）。常含杂质，无色的称冰洲石晶体
- 石英（水晶）、红宝石、冰等也是双折射晶体（单轴）。
- 云母、蓝宝石、橄榄石、硫黄等是另一类双折射晶体（双轴）。

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

光学性质	晶系	布拉斐格子	晶体
第一类：各向同性	立方	简单立方 	食盐 NaCl
		体心立方 	
		面心立方 	
第二类：单轴晶体	三角晶系	三角 	方解石、红宝石、
	六角晶系	六角 	石英、冰
	四方晶系	简单四方 	
		体心四方 	

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

第三类：双轴晶体	三斜晶系	简单三斜 	蓝宝石、云母、正方铅矿、
	单斜晶系	简单单斜 	硬石膏
		底心单斜 	
	正交晶系	简单正交 	
		底心正交 	
		体心正交 	
		面心正交 	

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体—方解石晶体



9x12cm

1克拉 = 200 毫克

1865 carats



150.6 carats



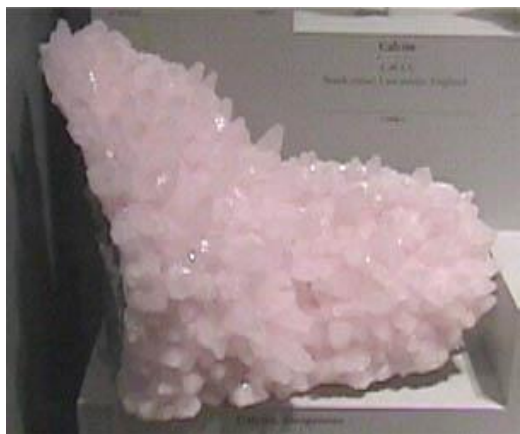
3.9 carat





## 6.1.2双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体—方解石晶体



含锰方解石 15-18 cm.



砷铜铅矿方解石 12 cm.



12cm



12-15 cm



冰洲石晶体, 30x45 cm



## 6.1.2双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体的特征参量

**1. 晶体的光轴**：光沿此方向入射时无双折射。

- **单轴晶体**：方解石晶体、石英、红宝石、冰，等等。
- **双轴晶体**：云母、蓝宝石、橄榄石、硫黄，等等。

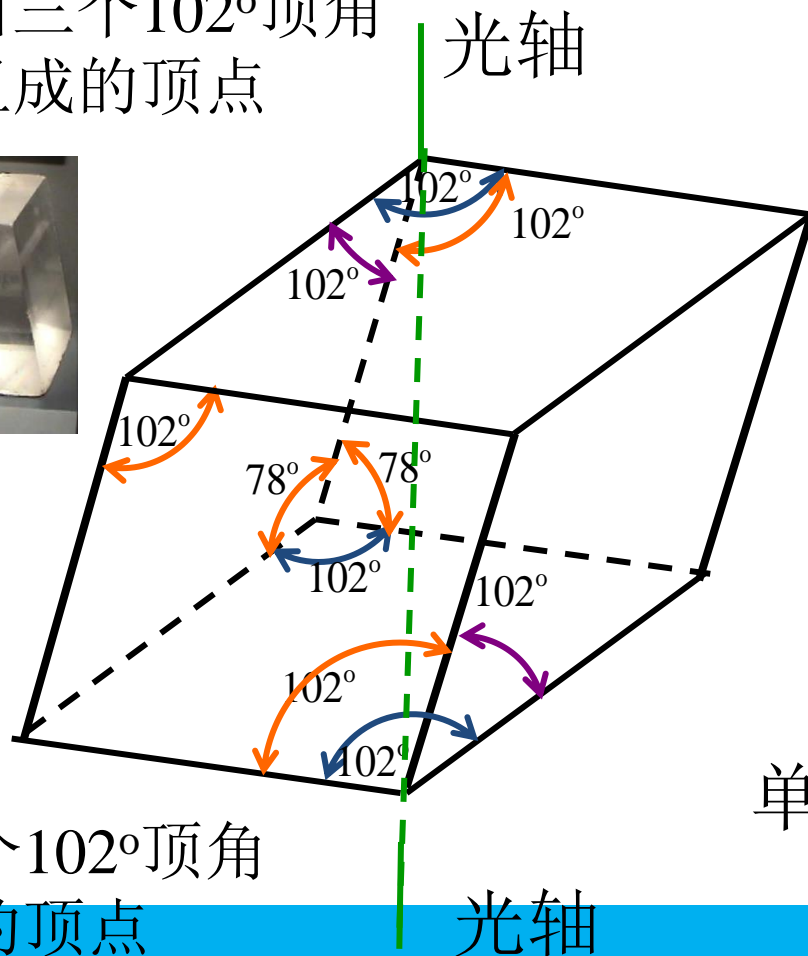
**注意和几何光学的光轴相区分**

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体的特征参量

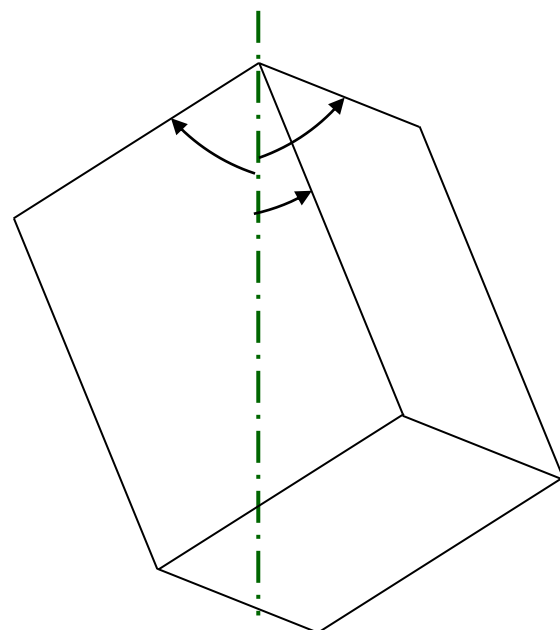
#### 1. 晶体的光轴—方解石的光轴

由三个 $102^\circ$ 顶角  
组成的顶点



单轴晶体

光轴



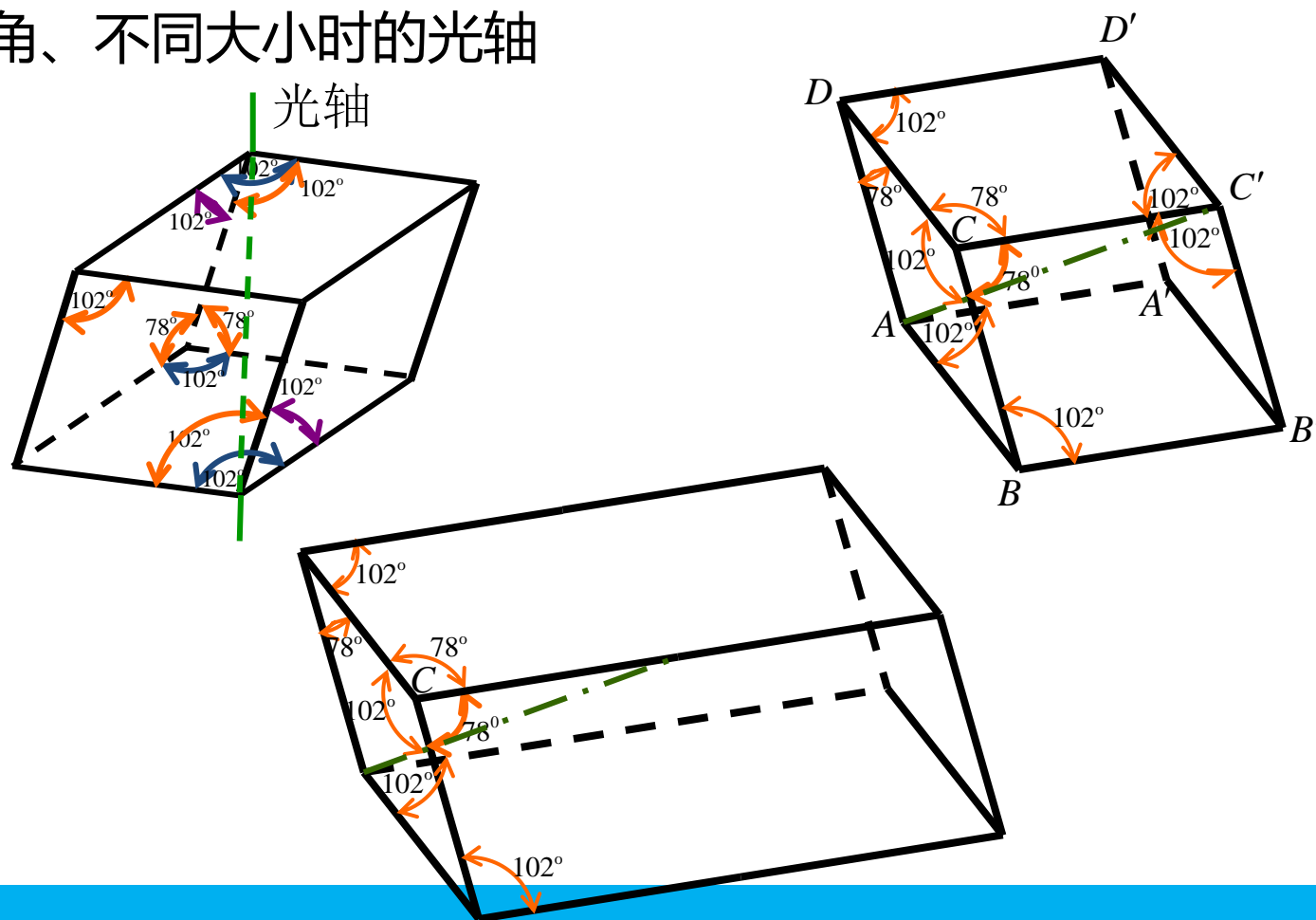
三角晶系

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体的特征参量

#### 1. 晶体的光轴

不同视角、不同大小的光轴

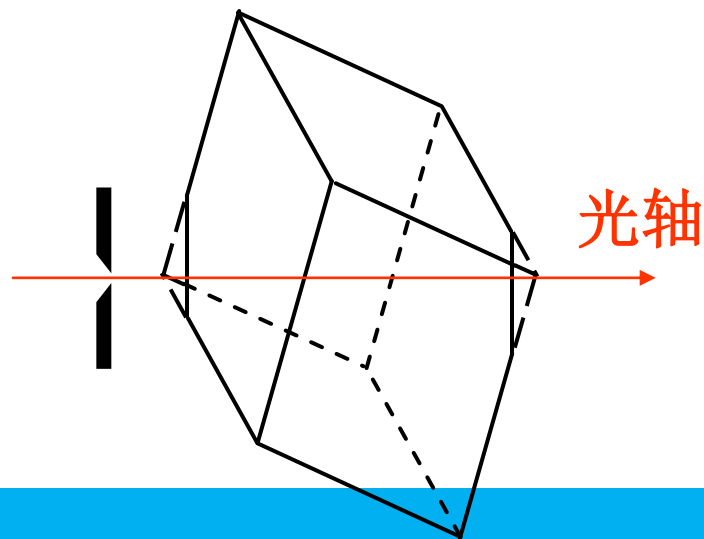
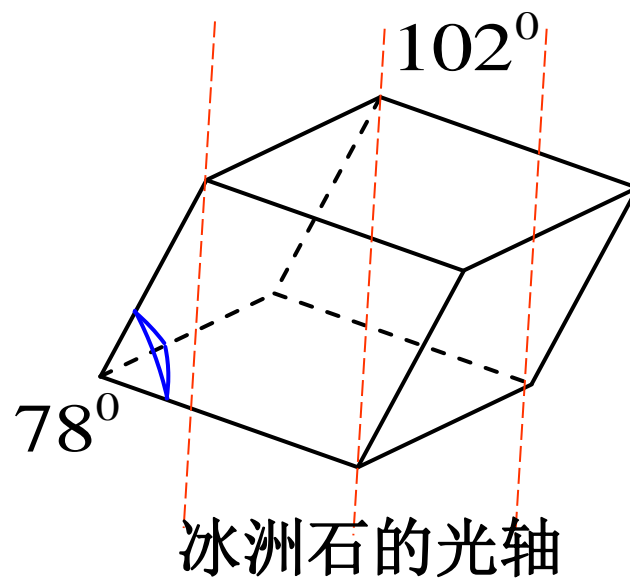
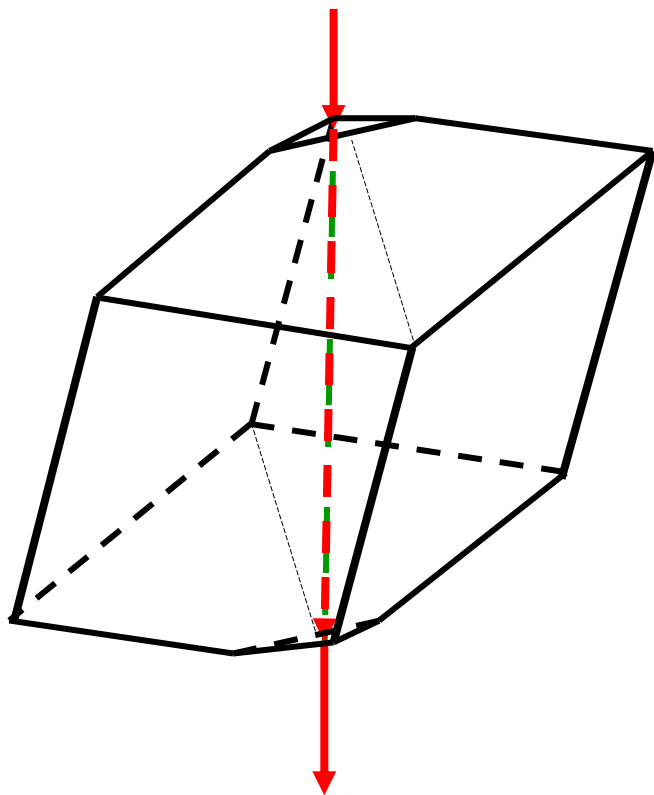


## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体的特征参量

#### 1. 晶体的光轴

沿光轴入射，无双折射

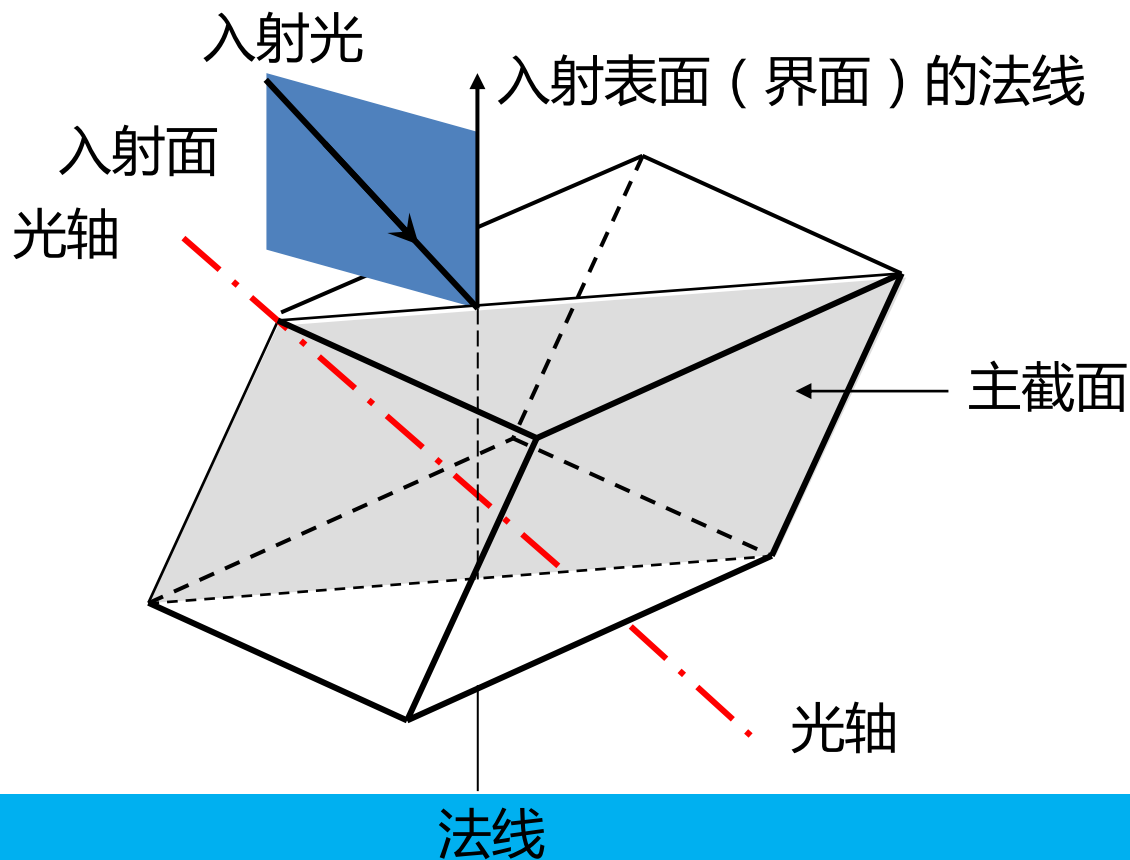


## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体的特征参量

#### 2. 主截面

入射界面（晶体表面）的**法线**与**光轴**形成的平面。**与晶体相关，与光线无关。**



## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

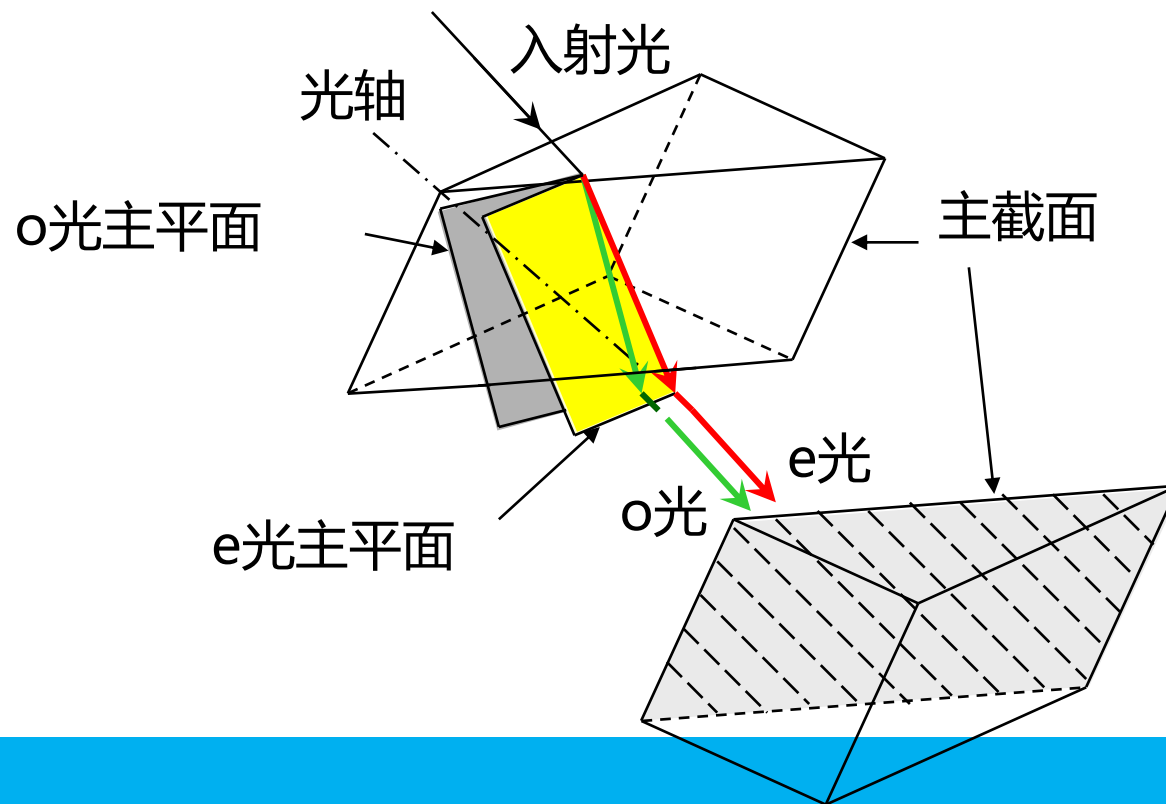
### 双折射晶体的特征参量

#### 3. 主平面

晶体中的**光线**与**光轴**所形成的平面。

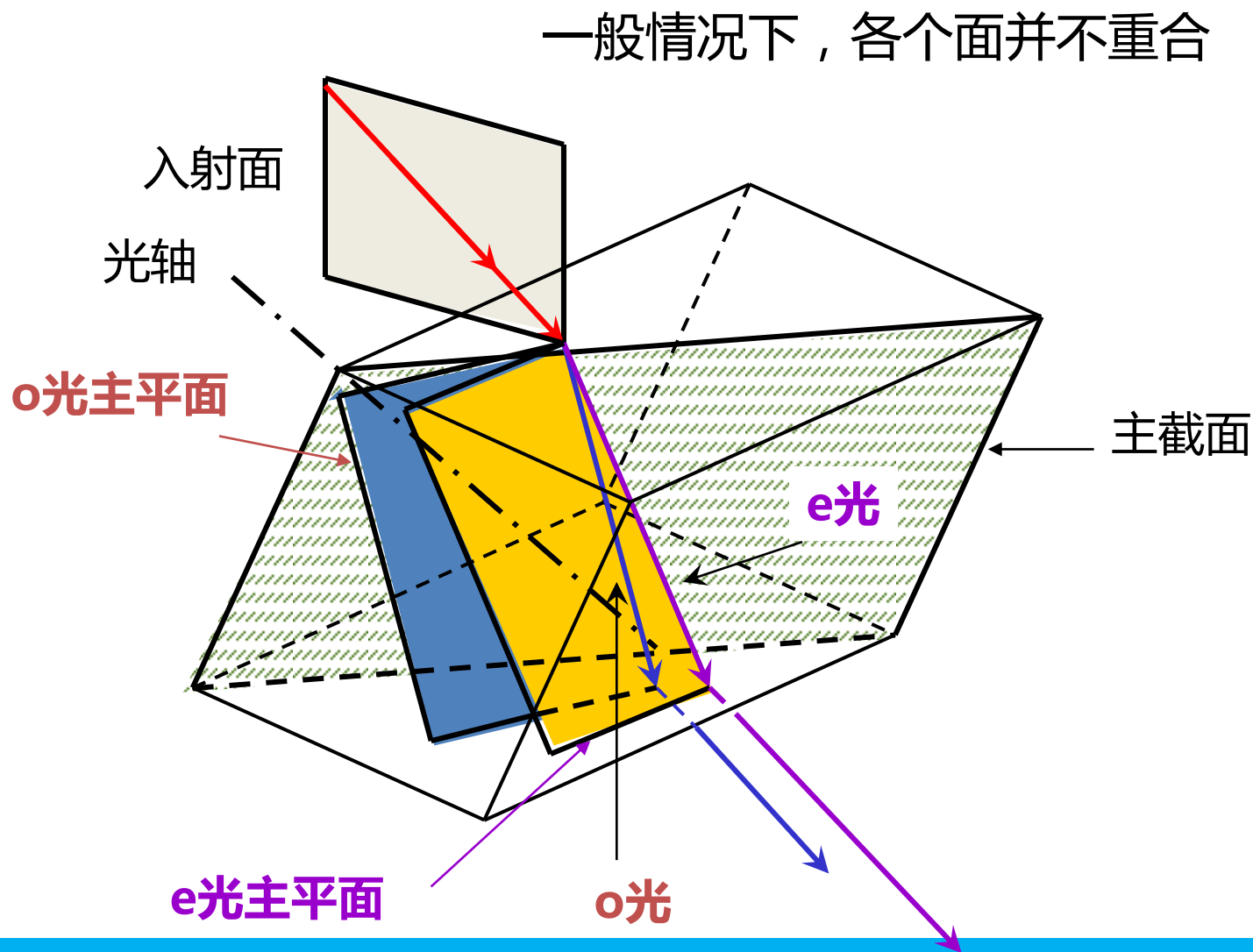
o光主平面： o光振动方向垂直于o光主平面，即电矢量垂直于光轴。

e光主平面： e光电矢量平行于e光主平面。



## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

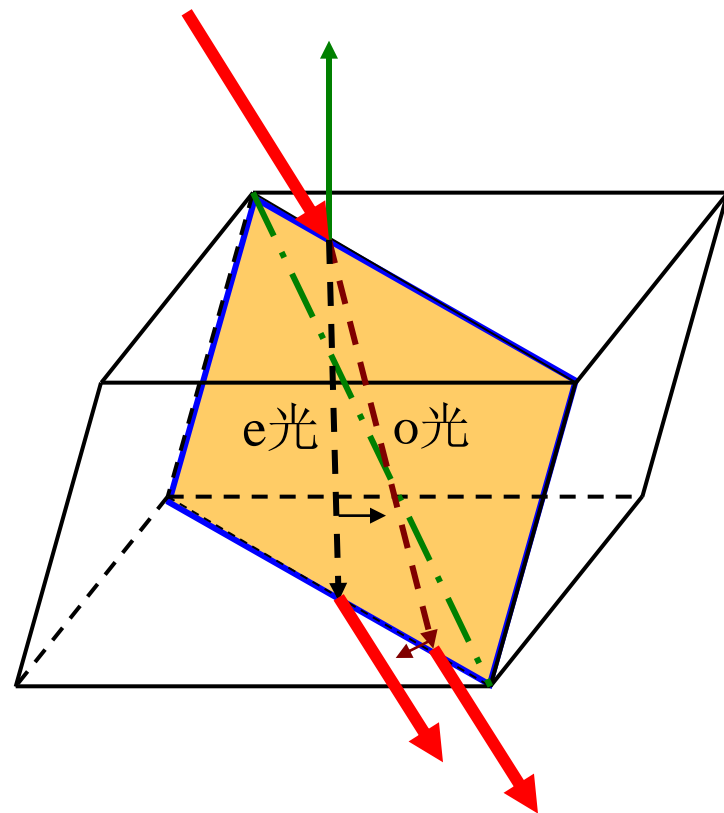
### 双折射晶体的特征参量



## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### 双折射晶体的特征参量

- 选择合适的入射方向，可以使入射面与主截面重合，这时光轴处于入射面之中。
- o光主平面、e光主平面重合，且均与主截面重合。
- o光：电矢量垂直于光轴，垂直于o光主平面（主截面）
- e光：电矢量平行于主平面，即电矢量在e光主平面（主截面）内。

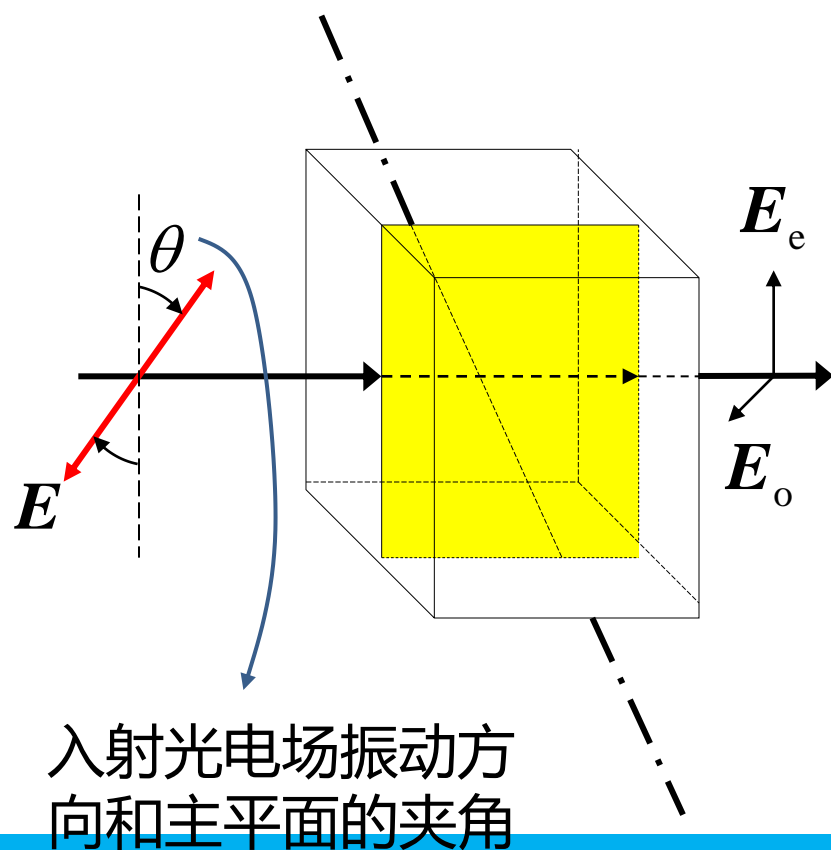




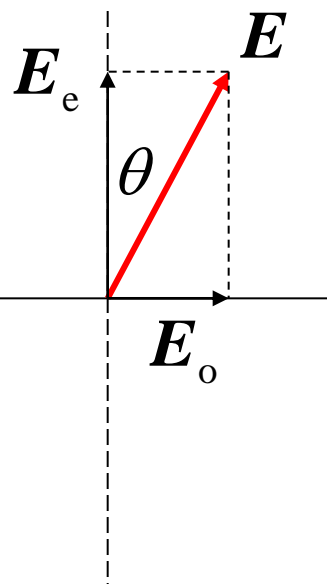
## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### o光和e光的光强

入射面与主截面重合  
o光e光主平面重合



主  
平  
面



$$E_e = E \sin \theta$$

$$E_o = E \cos \theta$$

$$A_e = A \sin \theta$$

$$A_o = A \cos \theta$$

$$I_e = I \sin^2 \theta$$

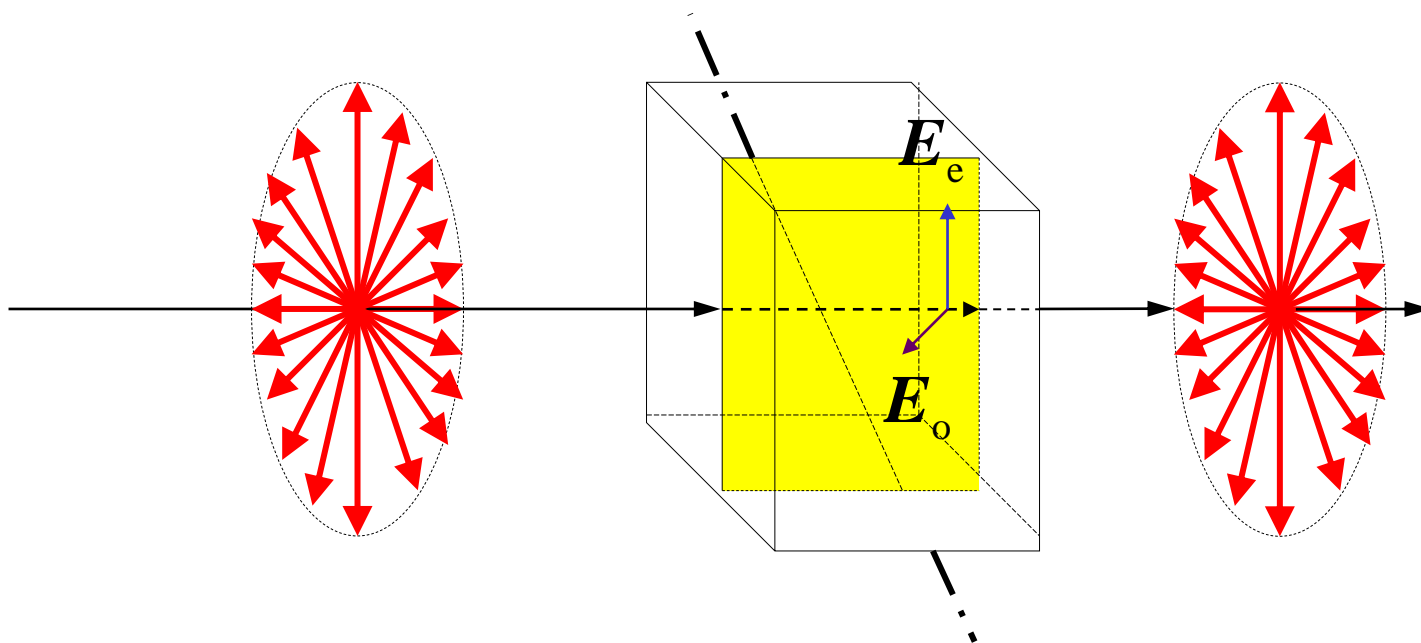
$$I_o = I \cos^2 \theta$$

## 6.1.2 双折射晶体及其基本特性

### o光和e光的光强

自然光入射时，如果不考虑吸收，有

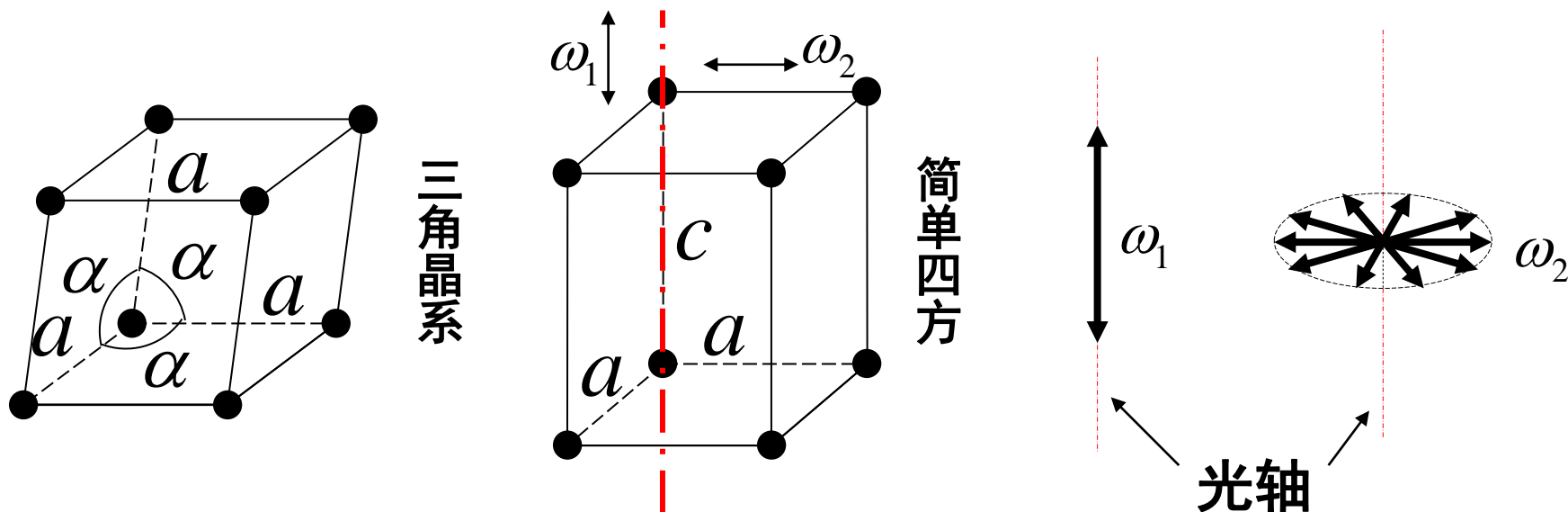
$$I_o = I_e = \frac{1}{2} I$$



## 6.1.3 单轴晶体中的波面

### o光、e光与晶体光轴的关系

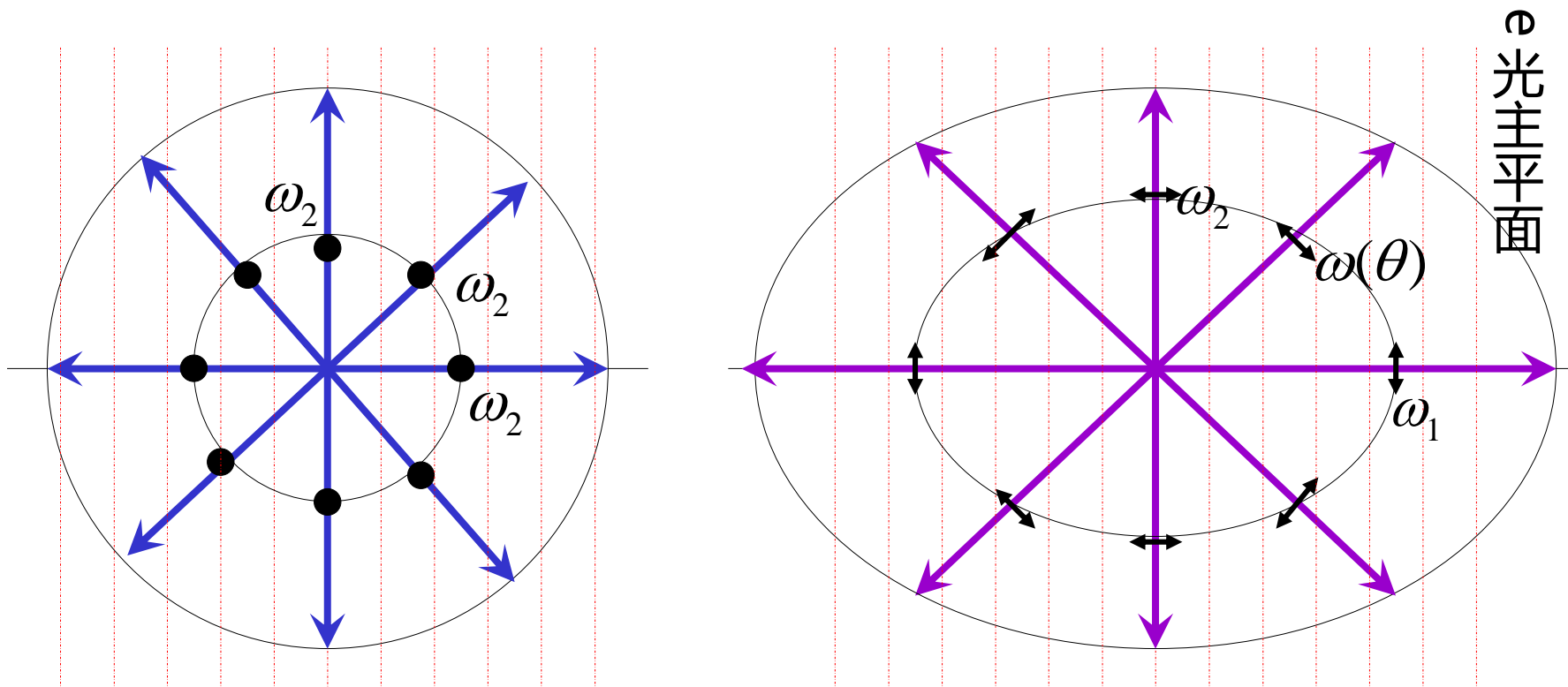
- 单轴晶体：只有一个光轴
- 单轴晶体的电子存在两个固有的振动频率.
- 一个是与光轴平行方向的振动  $\omega_1$
- 另一个是与光轴垂直方向的振动  $\omega_2$



## 6.1.3 单轴晶体中的波面

o光传播时，电矢量垂直于光轴，所以沿各个方向传播时，振动频率相同，则速度也相同，其波面为**球面**。

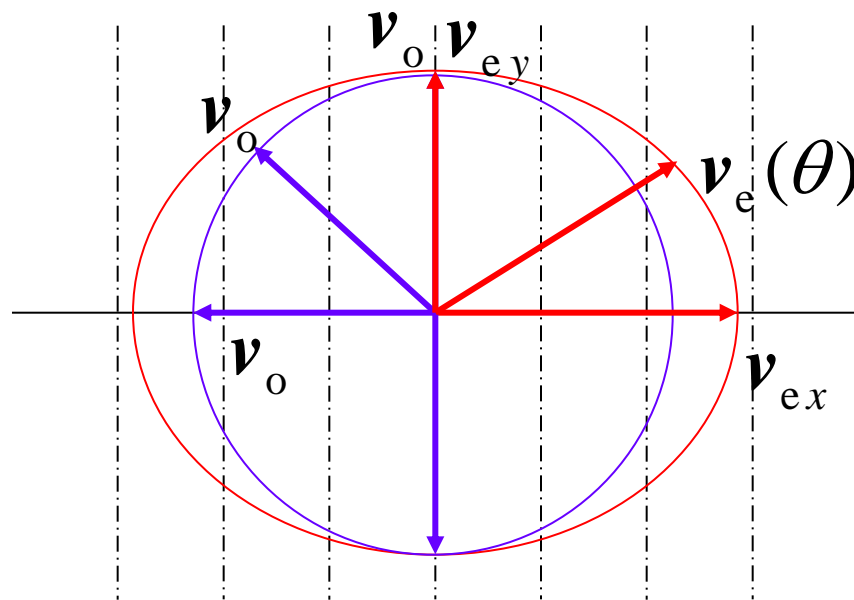
e光向不同方向传播时，电矢量相对于光轴的方向不同，其振动频率也不同，所以速度也不同，其波面为**旋转椭球面**。



## 6.1.3 单轴晶体中的波面

### 晶体中光波波面的特点

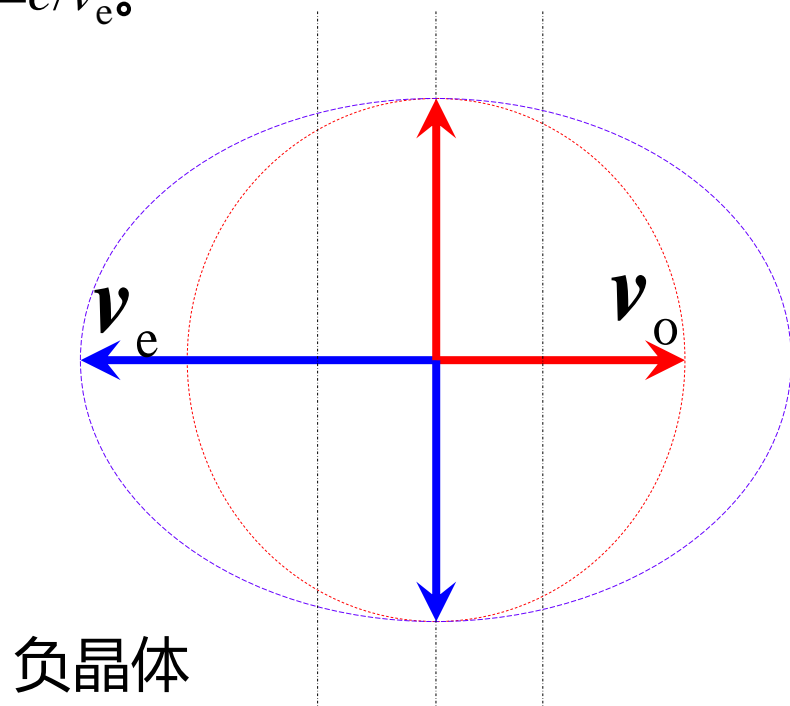
- 除了两个特殊的方向，**e光的传播方向与其波面不垂直**。这是因为其波面为椭球面。
- o光的波面是球面，故其传播方向处处与其波面垂直**。



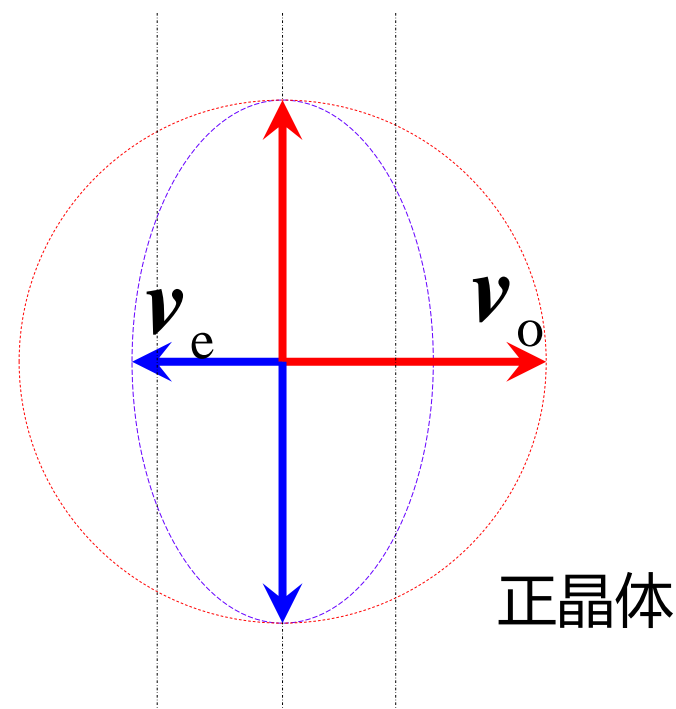
## 6.1.3 单轴晶体中的波面

### e光的主折射率

由于e光在不同方向传播速度不同，折射率也不同。定义e光的**主折射率**：e光沿与光轴垂直方向传播时的速度为 $v_e$ ，则其主折射率为 $n_e = c/v_e$ 。



冰洲石  $v_e > v_o$  e光为扁椭球  
 $n_e < n_o$

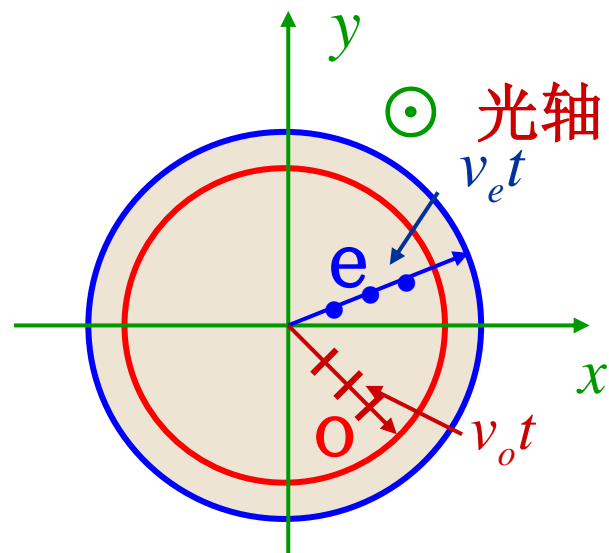
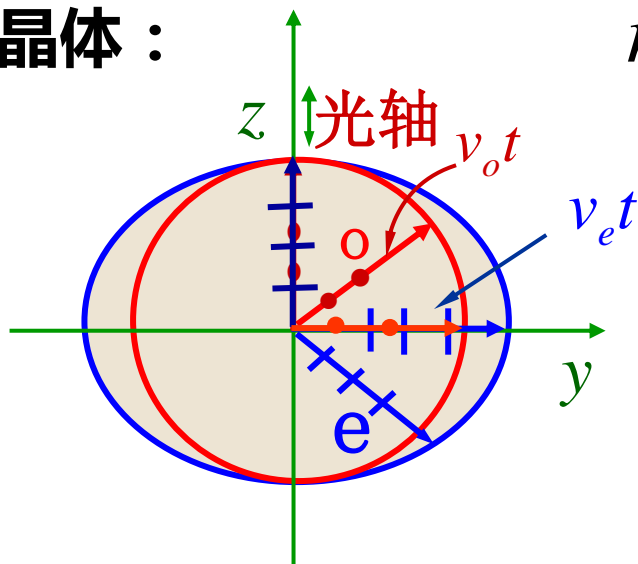


石英  $v_e < v_o$  e光为长椭球  
 $n_e > n_o$

## 6.1.3 单轴晶体中的波面

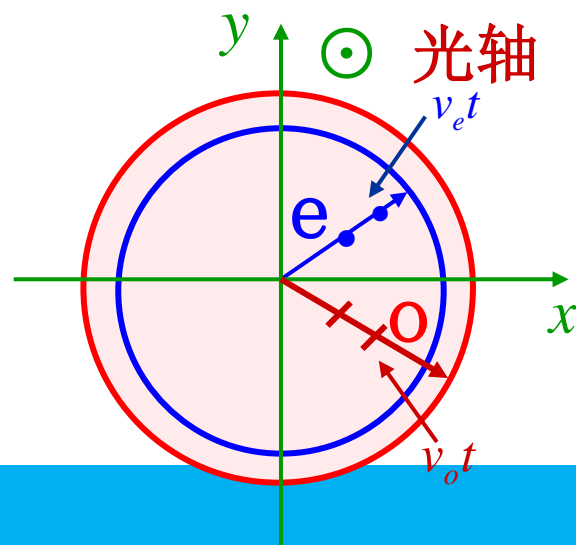
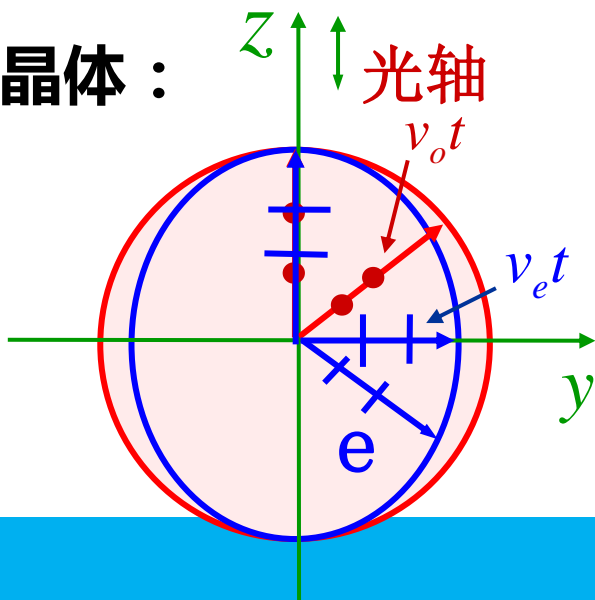
负晶体：

$$n_e < n_o$$



正晶体：

$$n_e > n_o$$



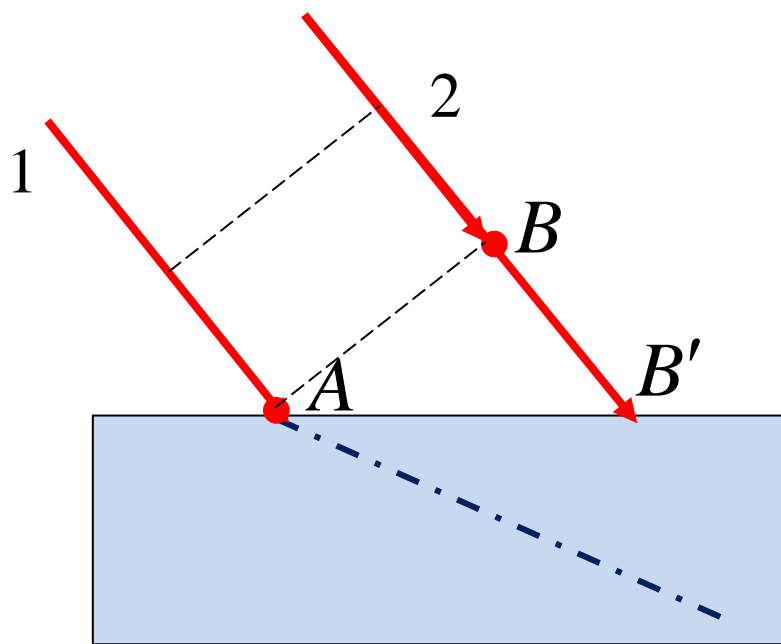
## 6.1.4 惠更斯作图法

### 针对光轴在入射面内的情形

步骤：

1、作出入射光的波面

由1与入射界面的交点A向2作垂线，交于B点。AB即为入射光波面。则光线2 到达界面B'时，A点的光已在介质中传播的时间为 $t=BB'/c$ 。



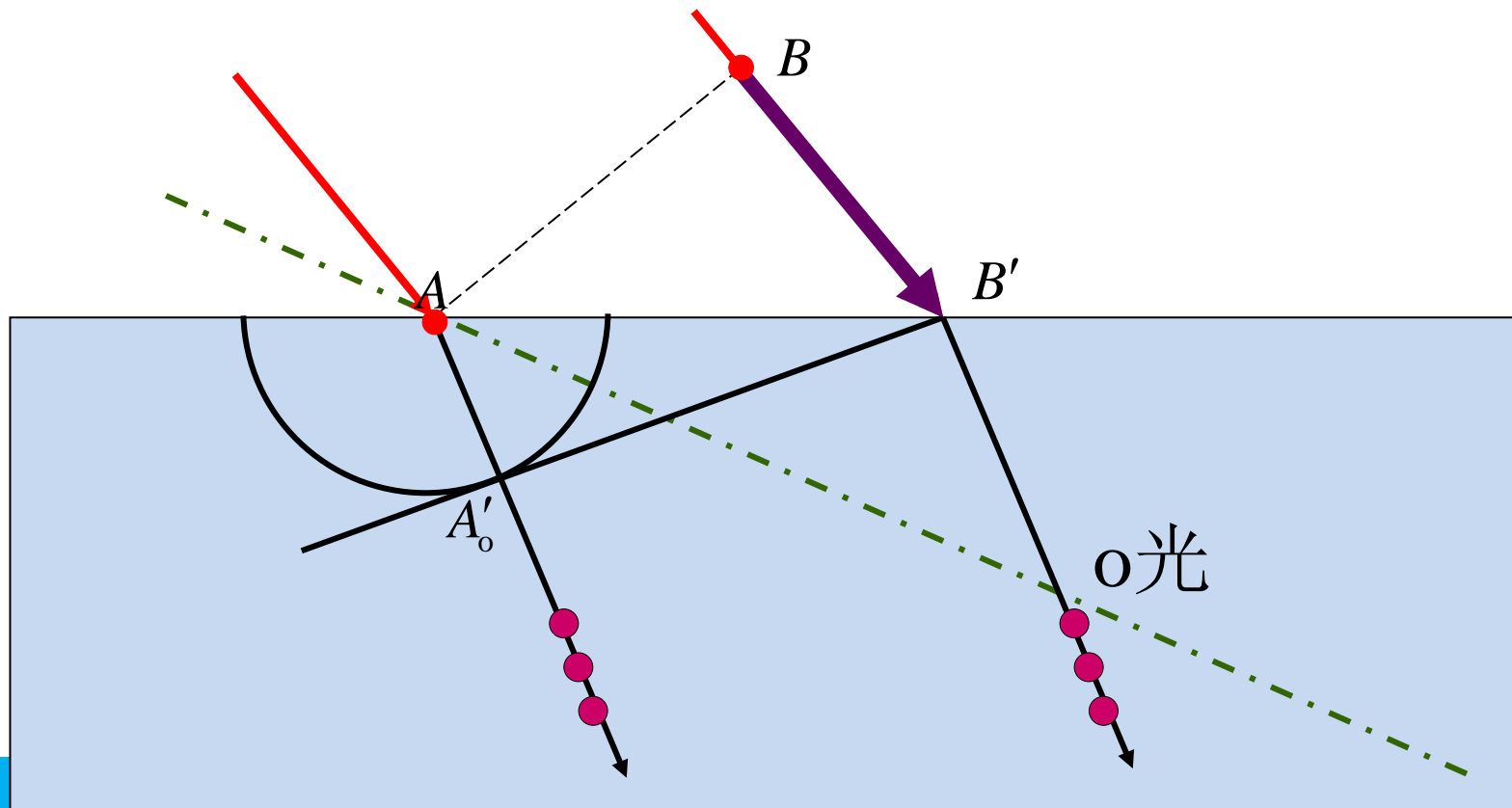


## 6.1.4 惠更斯作图法

### 针对光轴在入射面内的情形

步骤：

2、作o光波面：以A为中心， $v_o t$ 为半径作球面，该球面与过B'的平面的切点为 $A_o'$ ， $AA_o'$ 即为o光的方向。

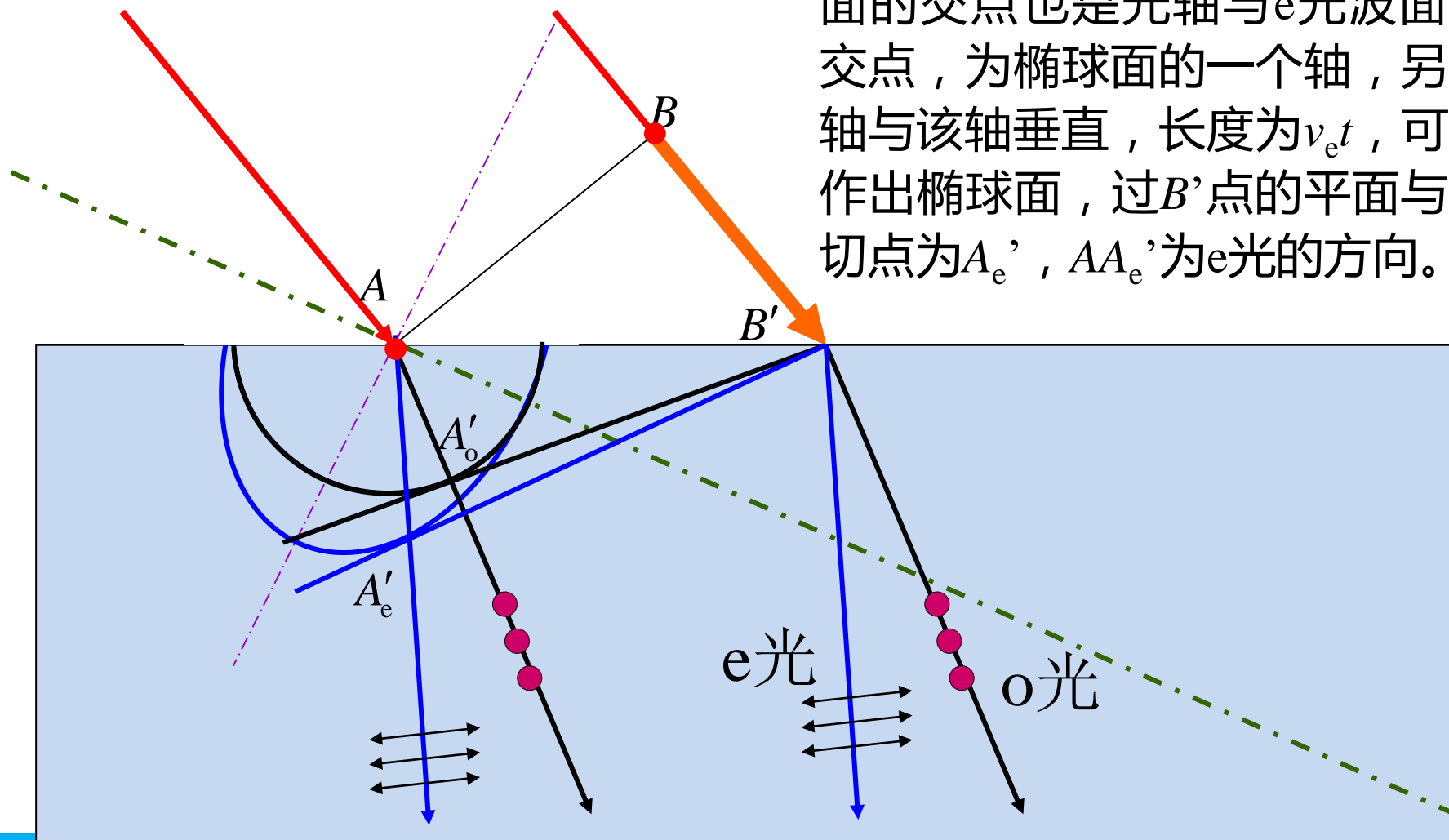


## 6.1.4 惠更斯作图法

针对光轴在入射面内的情形

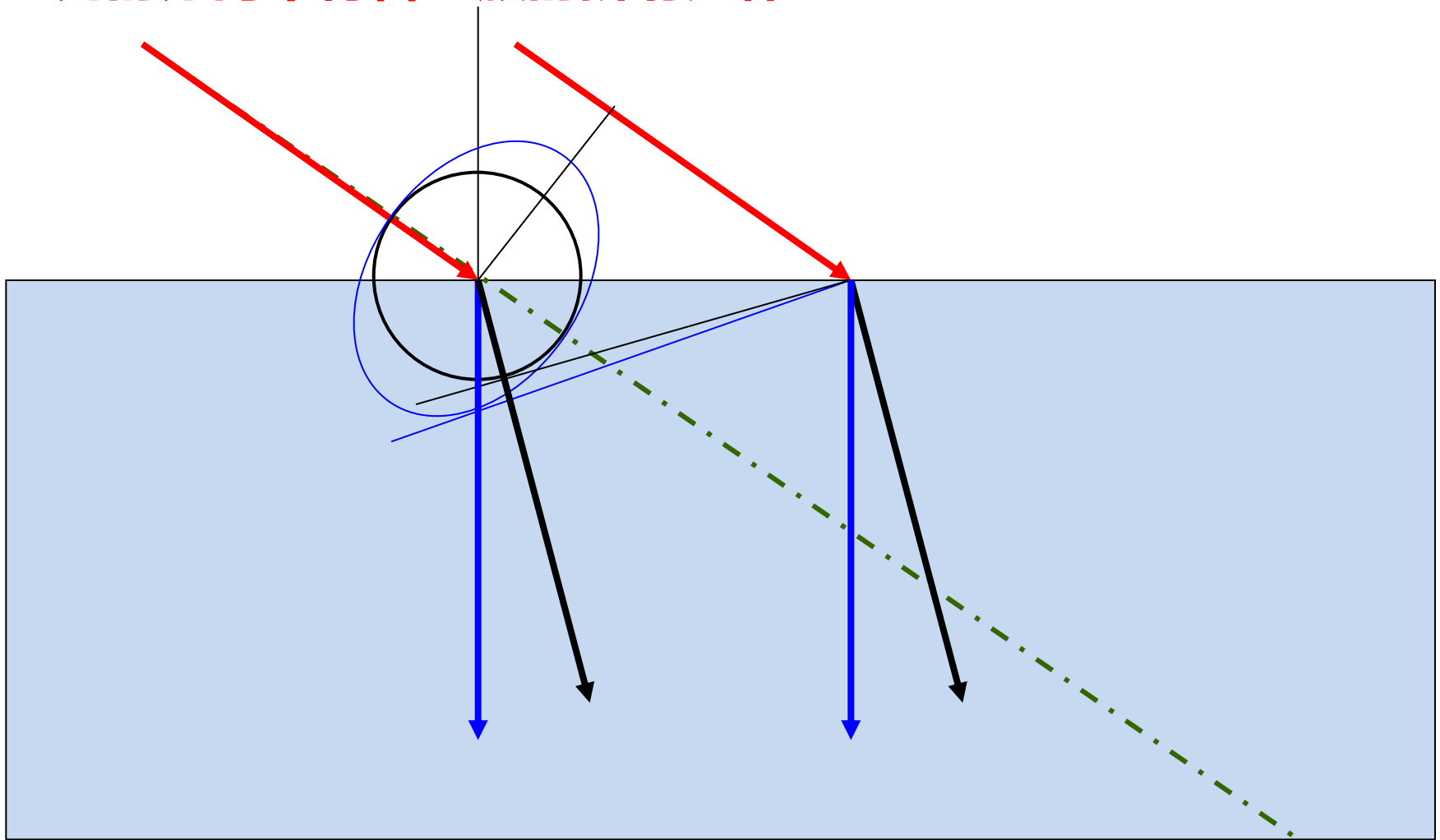
步骤：

2、作e光的波面：光轴与o光波面的交点也是光轴与e光波面的交点，为椭球面的一个轴，另一轴与该轴垂直，长度为 $v_e t$ ，可以作出椭球面，过B'点的平面与其切点为 $A'_e$ ， $AA'_e$ 为e光的方向。



## 6.1.4 惠更斯作图法

**e光的方向不符合一般的折射定律**

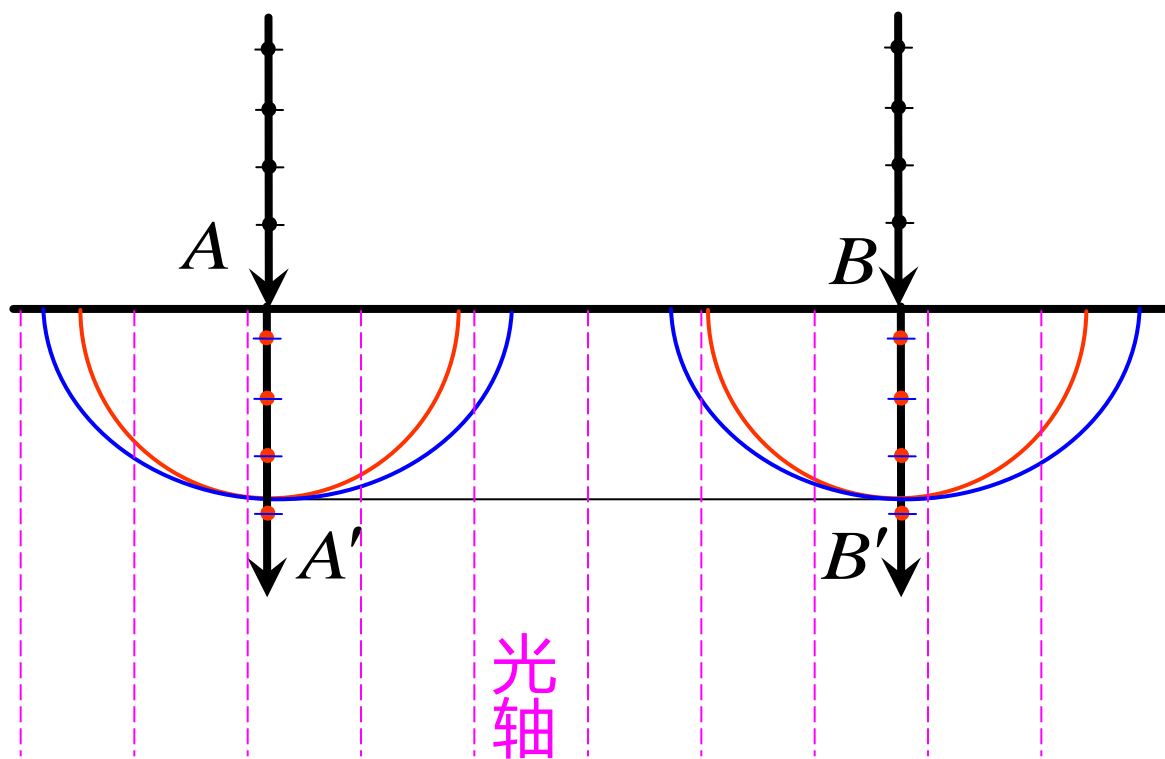


## 6.1.4 惠更斯作图法

### 几个特例

光轴垂直于界面，正入射（沿光轴入射）：

o光、e光波面不分开，不发生双折射

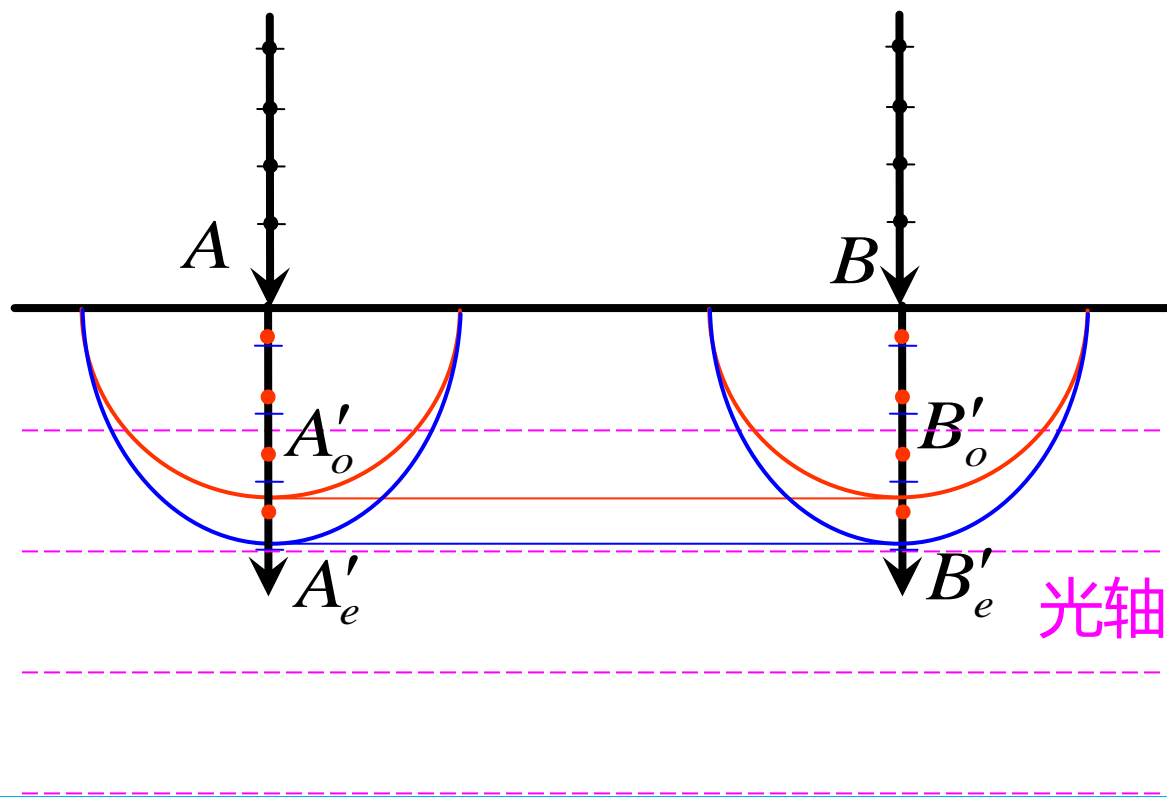


## 6.1.4 惠更斯作图法

### 几个特例

光轴平行于界面，垂直于光轴入射：

o光、e光方向相同，但速度不同，波面分开，发生双折射

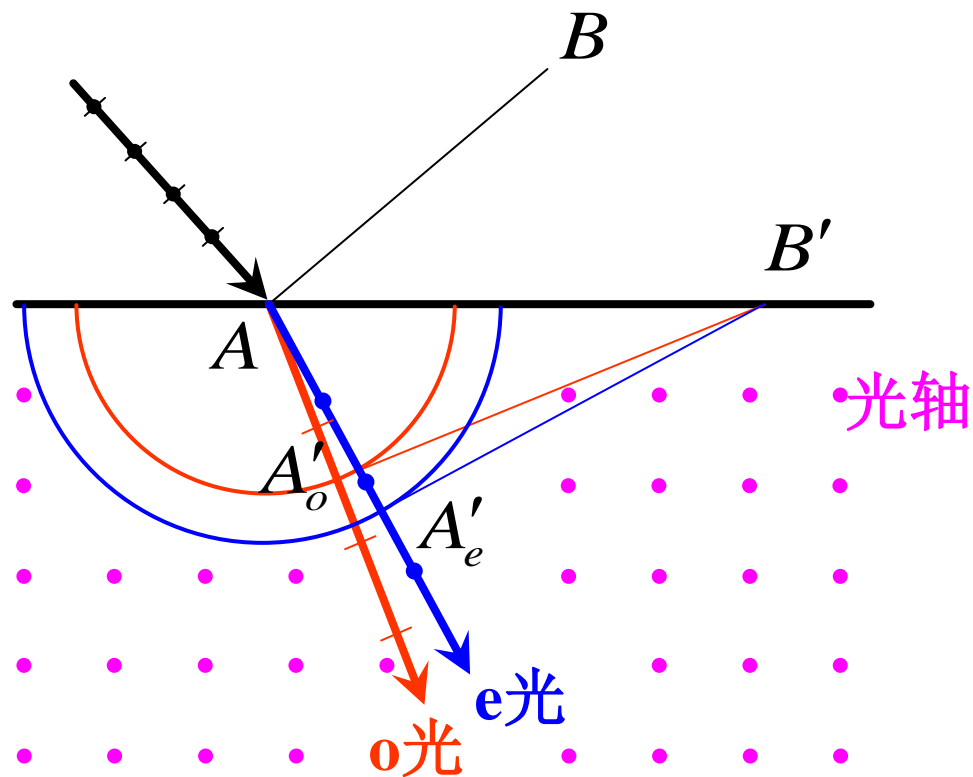


# 6.1.4 惠更斯作图法

## 几个特例

光轴垂直于入射面，斜入射：

入射面垂直于主截面，发生双折射



$$n \sin \theta = n_o \sin \theta_o = n_e \sin \theta_e$$

## 6.2 晶体光学器件

### 6.2.1 晶体偏振器

### 6.2.2 波片

### 6.2.3 相位补偿器

## 6.2 晶体光学器件

- 利用晶体的双折射特性可以制成光学器件
- 1、光在晶体中分开为o光和e光，它们都是平面偏振光，可以制成偏振棱镜，以获得平面偏振光
- 2、晶体中o光和e光的折射率不同，它们的波面是分开的；可以制成相位延迟波晶片，使两列正交分量之间有一定的相位差



## 6.2.1 晶体偏振器

利用双折射将两种偏振分开

常见的偏振器：反射、高分子膜拉伸，纳米光栅

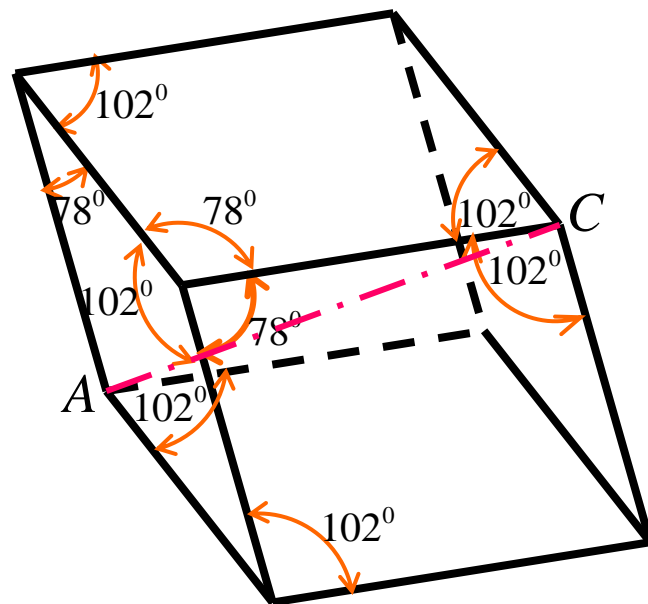
晶体偏振器：

1. 尼科耳 ( Nicol ) 棱镜
2. Glan—Thompson棱镜
3. 渥拉斯顿 ( Wollaston ) 棱镜
4. 洛匈 ( Rochon ) 棱镜

## 6.2.1 晶体偏振器

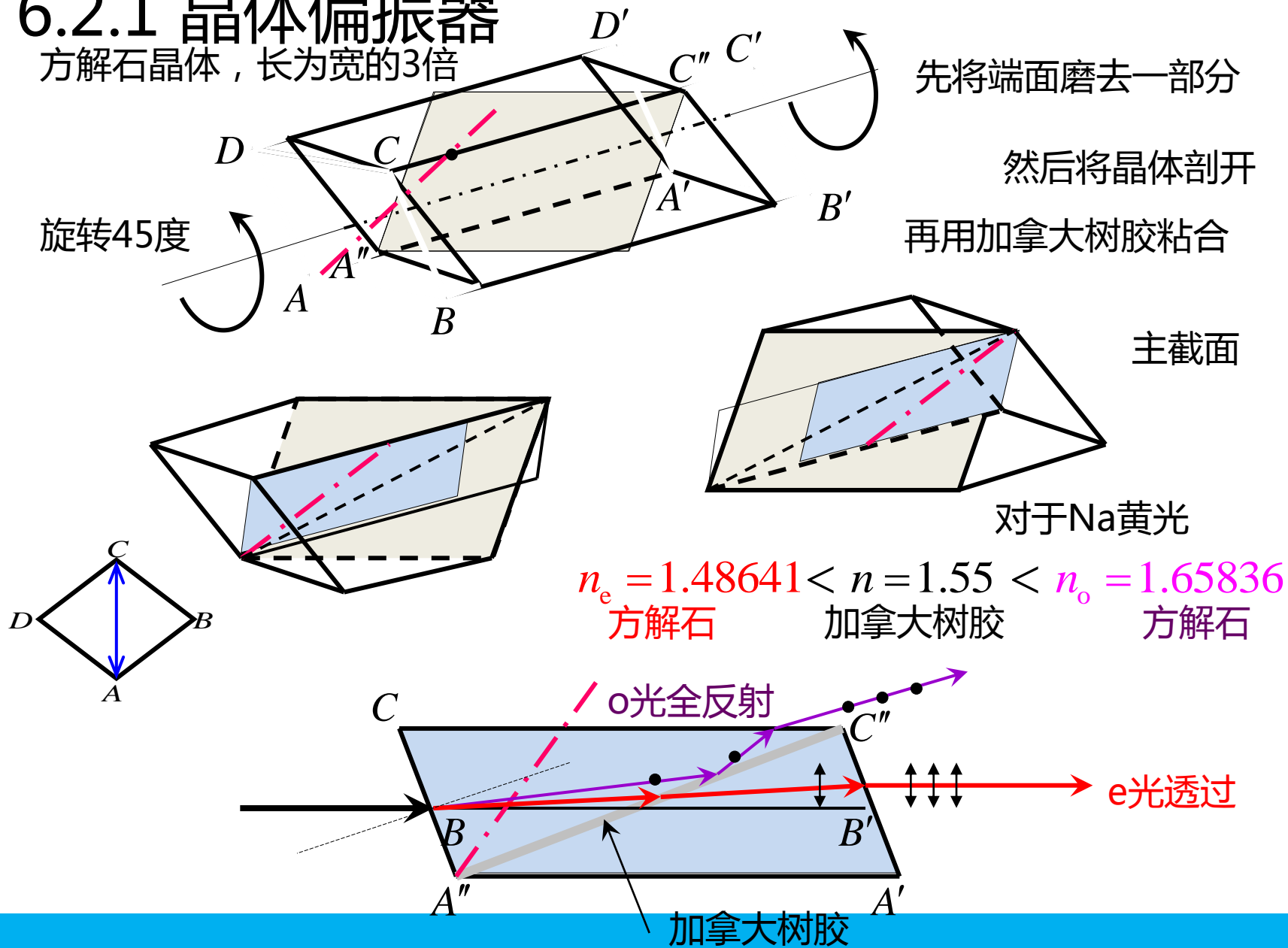
### 1、Nicol棱镜 ( W.Nicol, 1828 )

- 用**方解石晶体**制成
- 方解石是碳酸钙的三角晶系
- 每一个平行四边形表面有一对约为 $102^\circ$ 和 $78^\circ$ 的角
- **光轴**通过由3个 **$102^\circ$ 钝角构成**的**顶点**，并与3个表面成相等角度



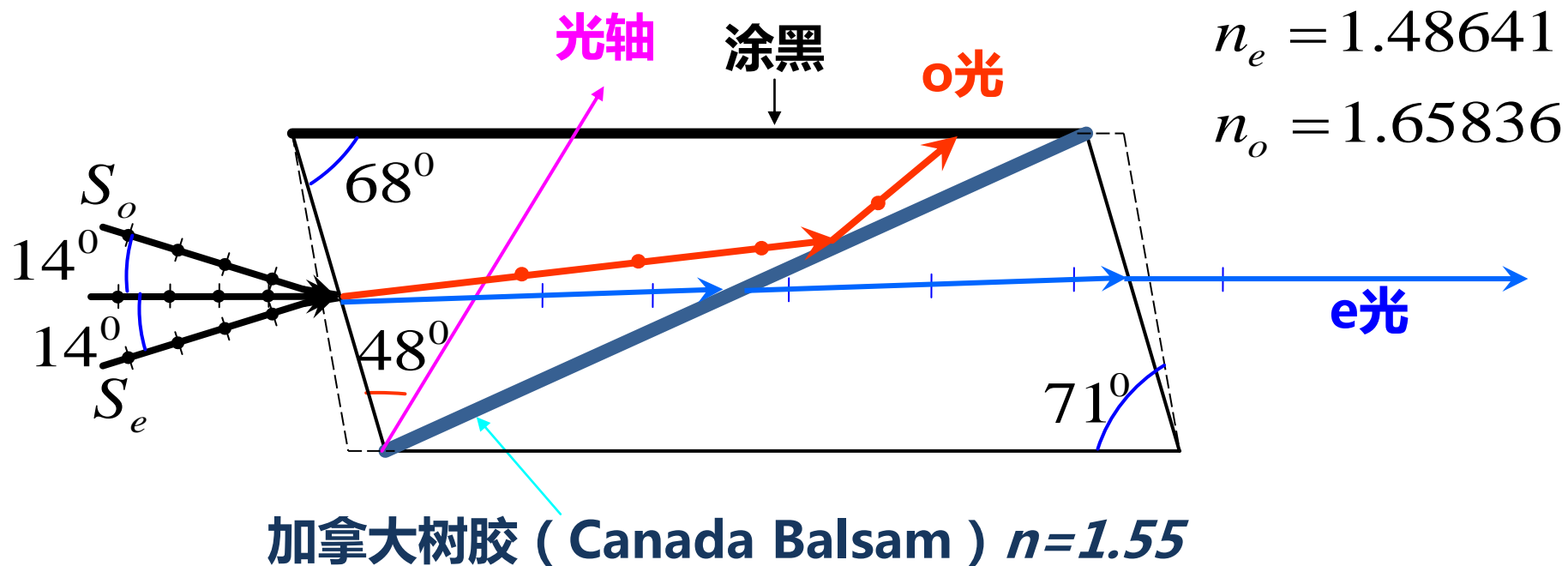
### 6.2.1 晶体偏振器

方解石晶体，长为宽的3倍



## 6.2.1 晶体偏振器

### 1、Nicol棱镜 ( W.Nicol, 1828 )



**e光折射率是角度的函数**  $\longrightarrow$  入射角度受限

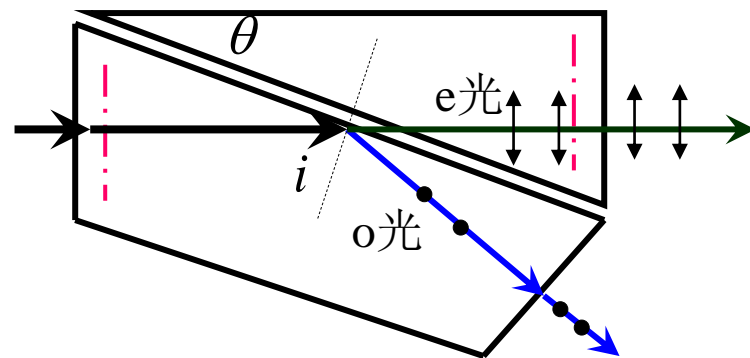
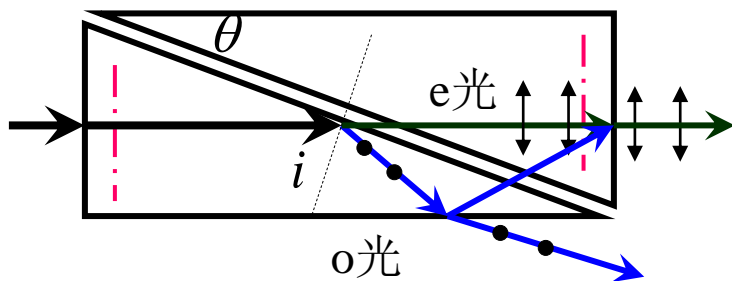
**加拿大  
树胶**

**吸收紫外线，不适用于紫外波段  
容易被大功率激光破坏**

## 6.2.1 晶体偏振器

### 2、Glan—Thompson棱镜

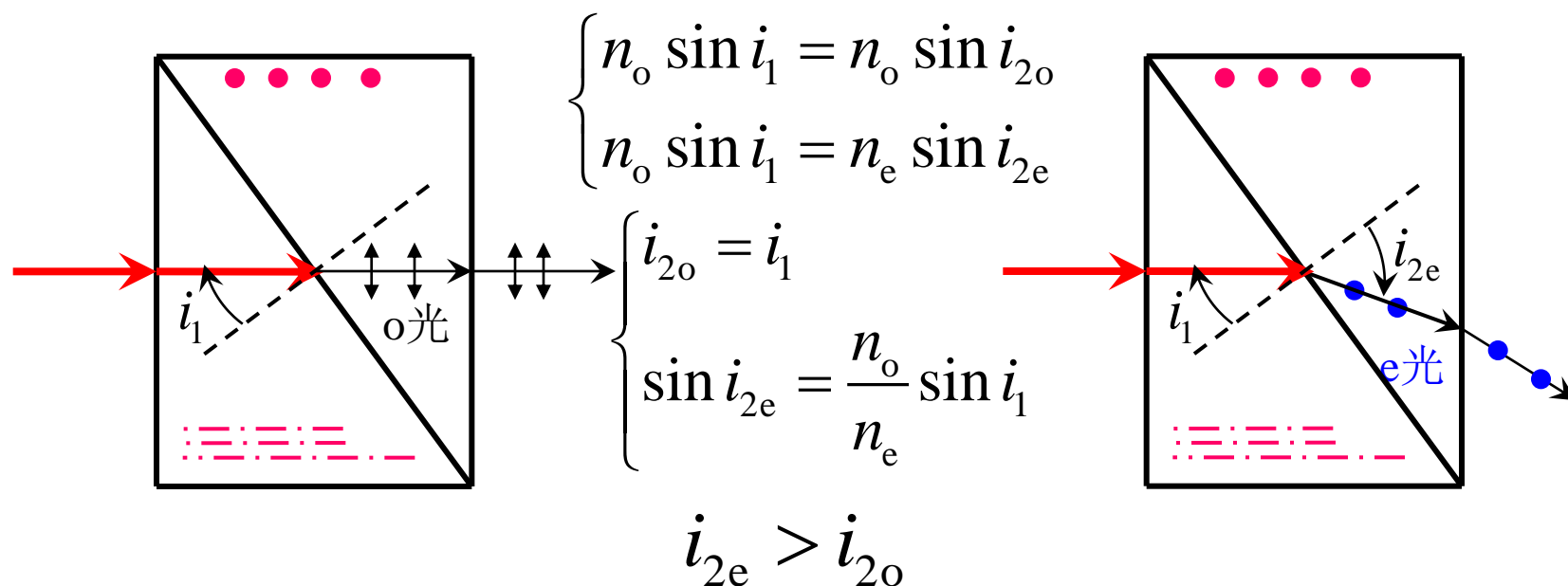
- 由两块方解石的直角三棱镜组成
- 两棱镜的光轴相互平行
- 两棱镜的斜面可以用甘油、树脂等胶合
- 也可直接接触（中间有空气层），透紫外（傅科棱镜）
- o光全反射，e光直进射出



## 6.2.1 晶体偏振器

### 3、洛匈 ( Rochon ) 棱镜

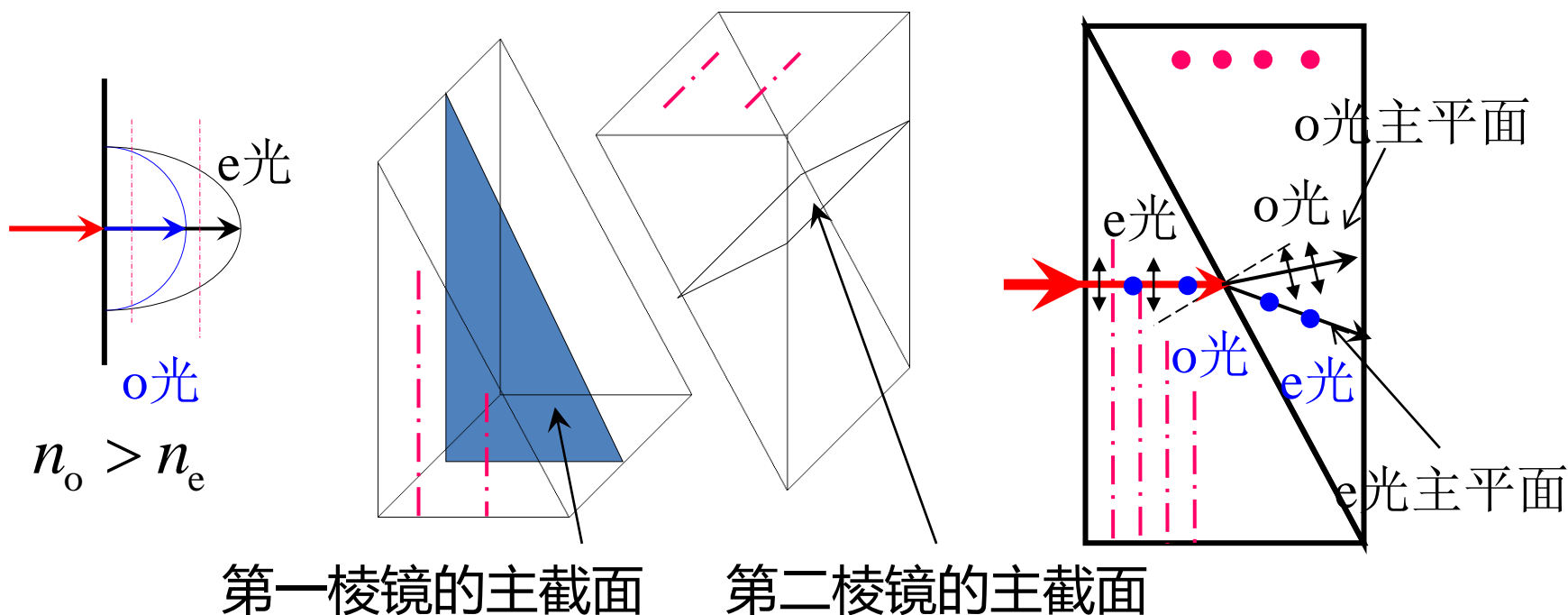
- 由两块冰洲石的直角三棱镜 ( **粘合** ) 而成
- 两棱镜的光轴相互垂直
- 入射光沿着第一棱镜的光轴方向
- 第一镜中无双折射，只有o光；第二镜中有双折射



## 6.2.1 晶体偏振器

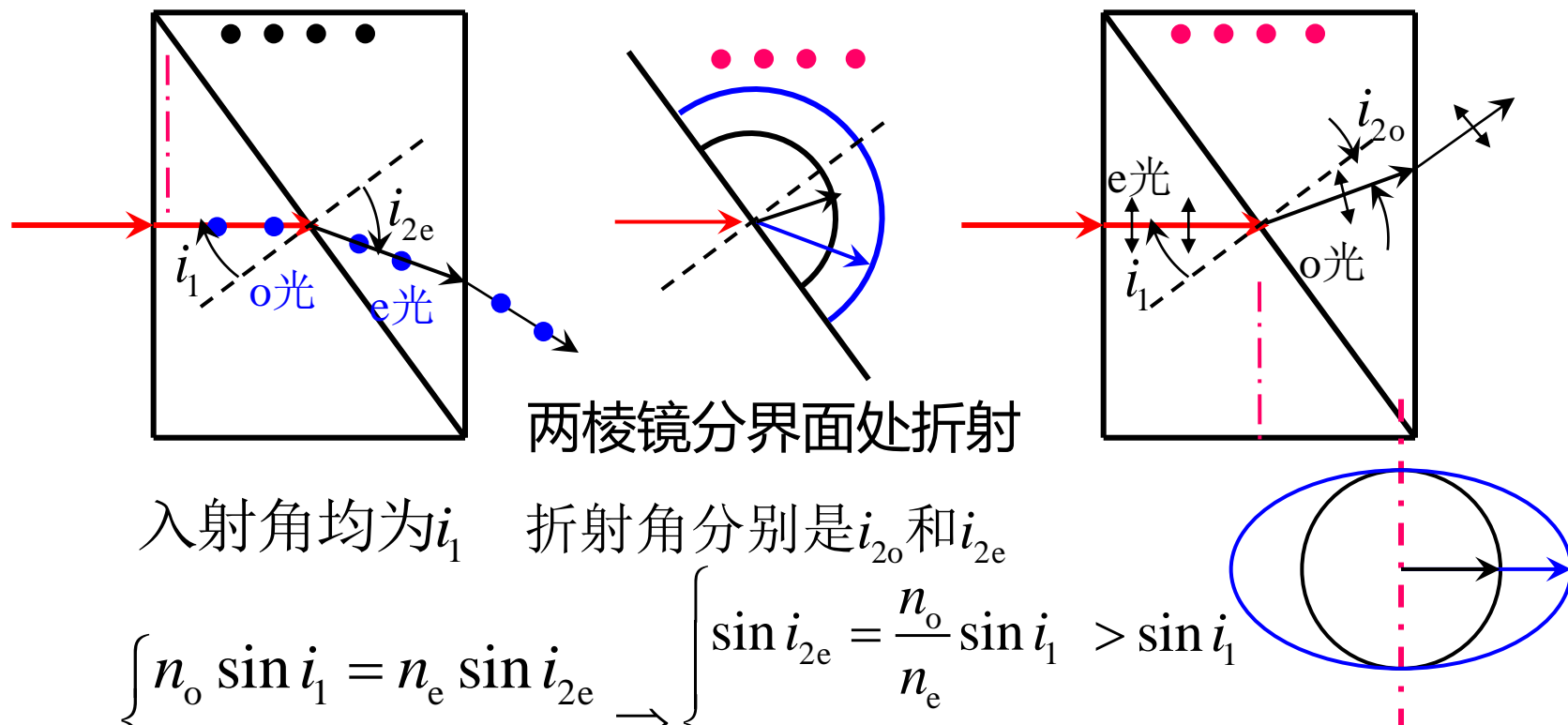
### 4、渥拉斯顿 ( Wollaston ) 棱镜

- 由两块冰洲石的直角三棱镜 ( 粘合 ) 而成
- 两棱镜的光轴相互垂直
- 第一镜中o光进入第二镜时，变为e光；第一镜中e光进入第二镜时，变为o光



## 6.2.1 晶体偏振器

### 4、渥拉斯顿 (Wollaston) 棱镜



方解石是负晶体  $n_o > n_e$   $i_{2o} < i_1 < i_{2e}$

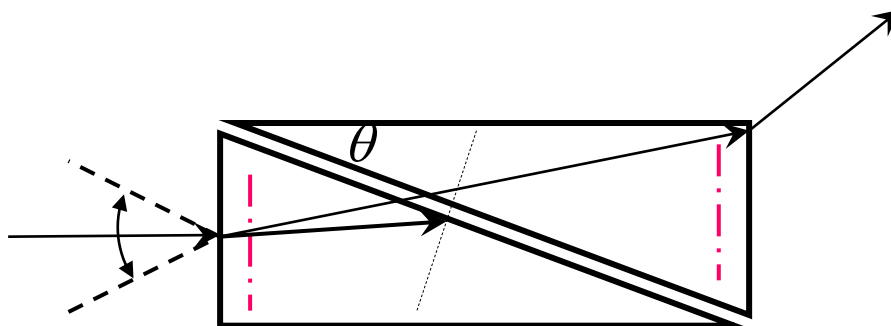
两列平面偏振光出射角度不同，在空间分开



## 6.2.1 晶体偏振器

### 偏振棱镜的主要参数

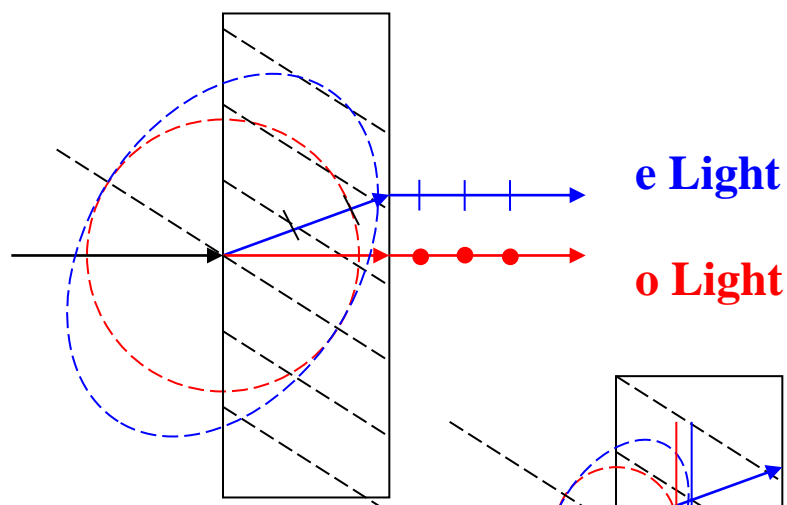
- 通光孔径：一般 $\Phi=5\sim 20\text{mm}$
- 孔径角：入射光束的锥角范围
- 消光比：通过偏振器后两正交偏振光的强度比，一般可达 $10^{-5}$ 。
- 抗损伤能力：主要是过高光强对胶合面的损伤



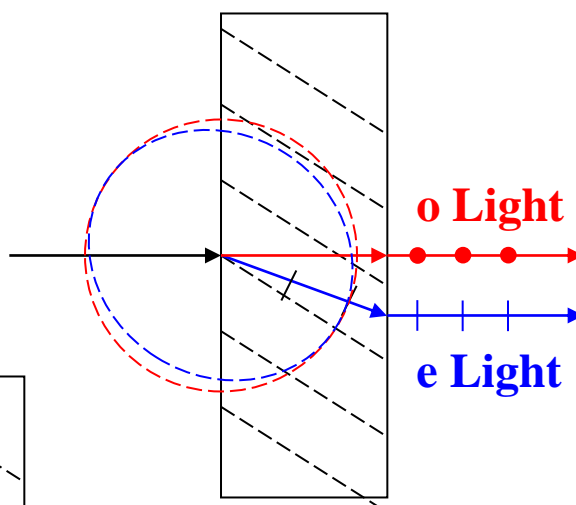
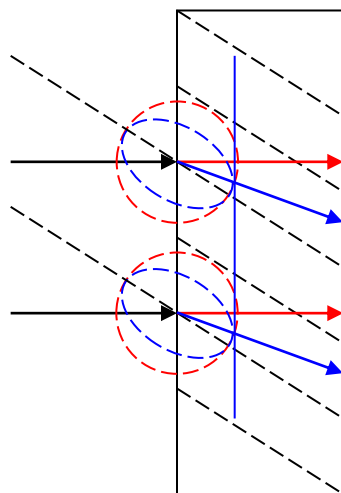
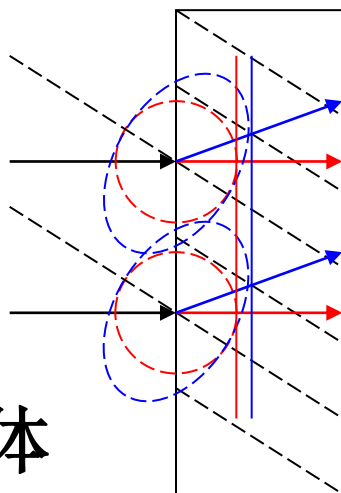
## 6.2.1 晶体偏振器

### 例题

根据图中光线双折射的情况判断晶体的正负

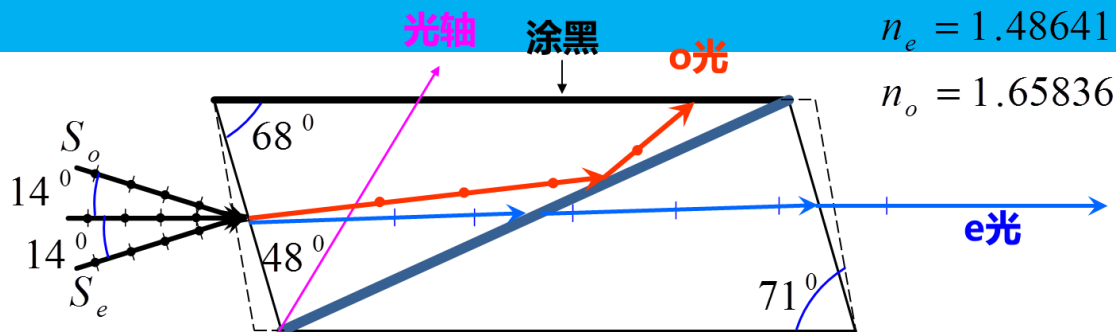


负晶体

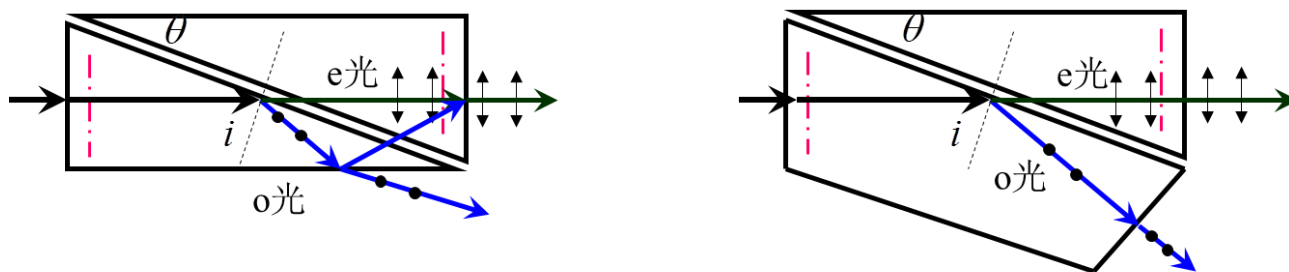


正晶体

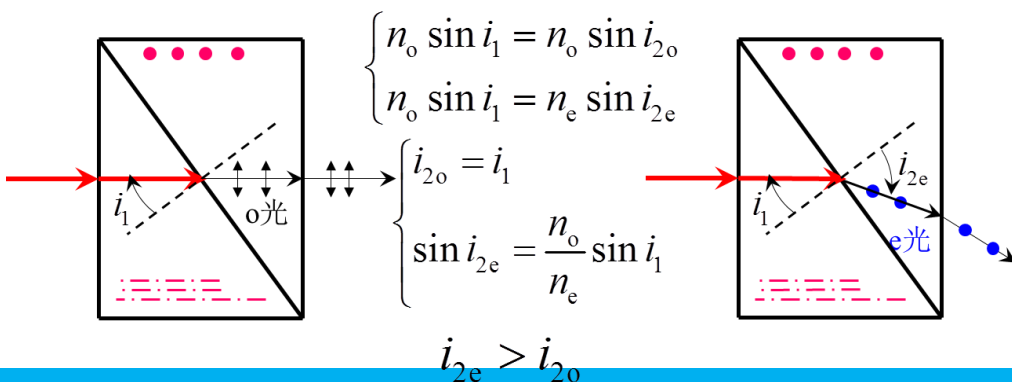
# 1、Nicol棱镜



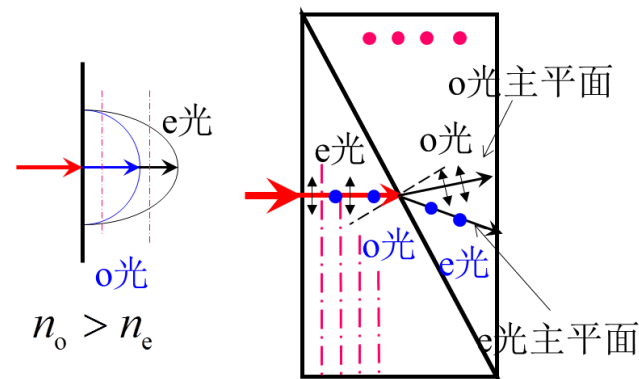
# 2、Glan—Thompson棱镜



# 3、洛匈 ( Rochon ) 棱镜



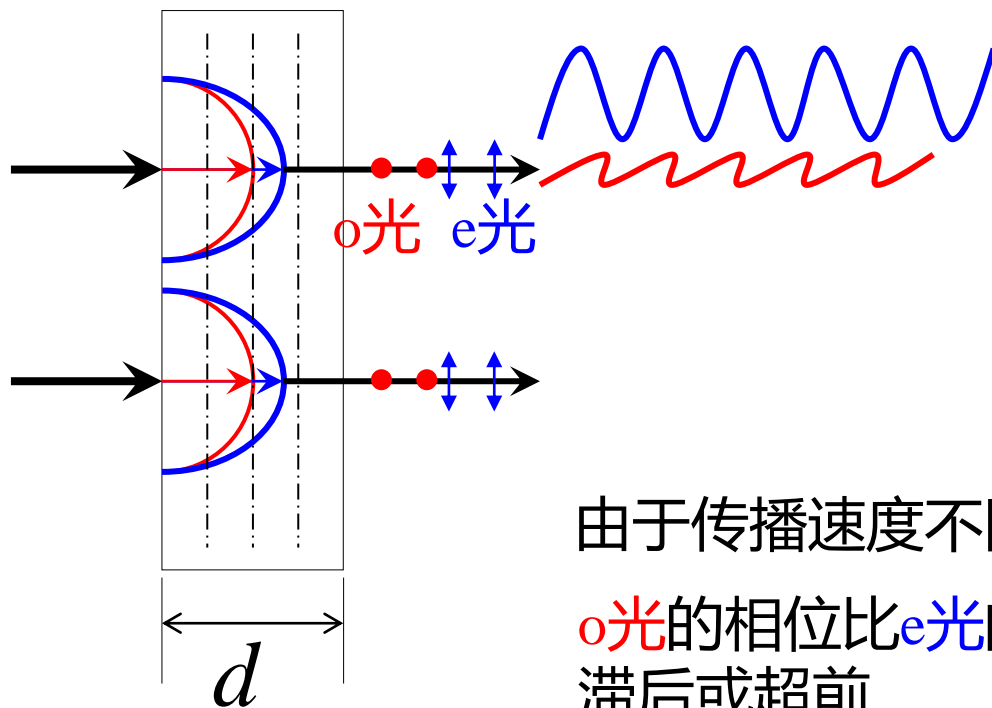
# 4、渥拉斯顿棱镜



## 6.2.2 波片

### 波片（波晶片）的相位延迟

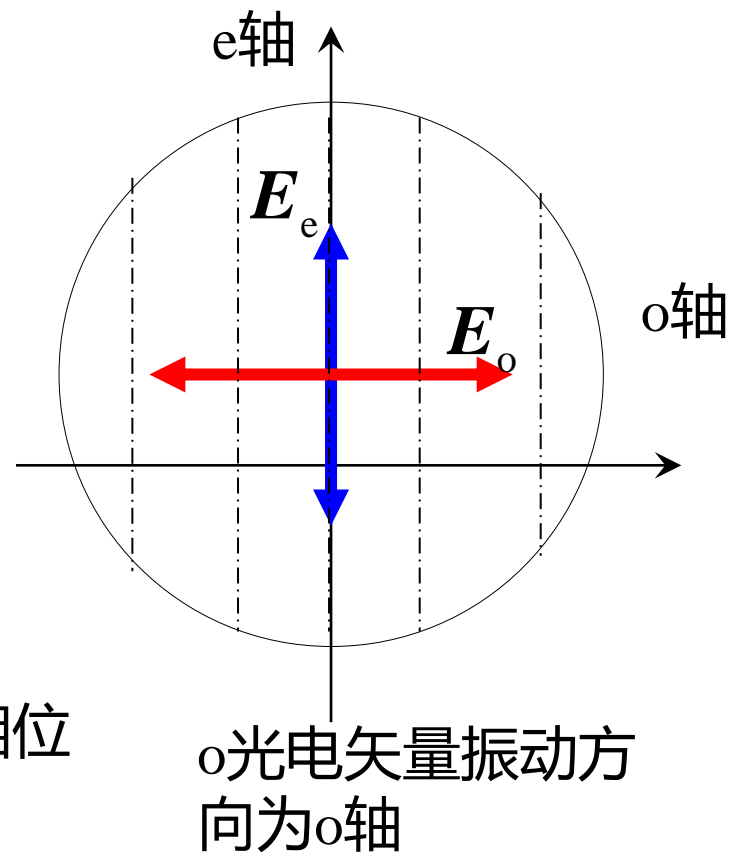
- 晶体的光轴与入射表面平行
- 平行光正入射



由于传播速度不同

o光的相位比e光的相位  
滞后或超前

e光电矢量振动  
方向为e轴



## 6.2.2 波片

### 各光在波片中的光程

$$L_o = n_o d \quad L_e = n_e d$$

从波片出射时的光程差  $\Delta L = L_e - L_o = (n_e - n_o)d$

相位差  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d$  e光相对于o光的相位延迟

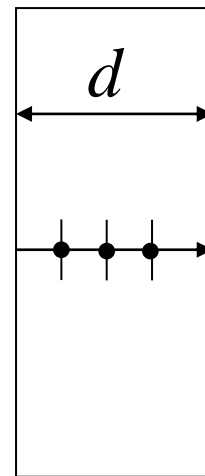
$$\Delta L = \frac{\lambda}{4} + \frac{1}{2}m\lambda \quad \Delta\varphi = m\pi + \frac{\pi}{2} \quad \frac{1}{4}\text{波片} \quad \frac{\lambda}{4}\text{片} \quad m\text{取整数}$$

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} + m\lambda \quad \Delta\varphi = 2m\pi + \pi \quad \frac{1}{2}\text{波片} \quad \frac{\lambda}{2}\text{片}$$

$$\Delta L = m\lambda \quad \Delta\varphi = 2m\pi \quad \text{全波片}$$

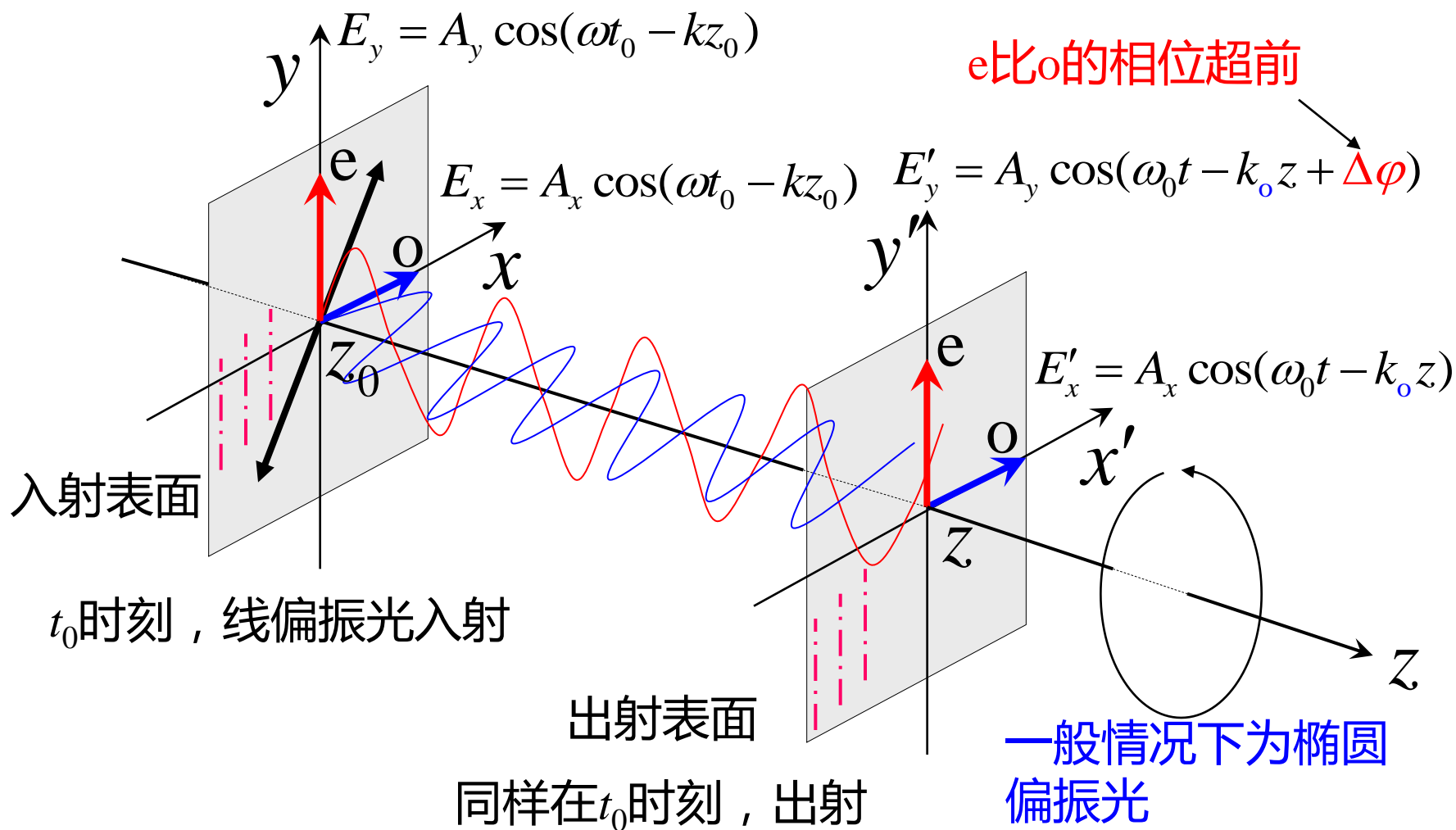
**快轴**：传播速度快的光矢量（light vector）的振动方向（轴）。  
负晶体的e轴（平行于光轴），  
正晶体的o轴（垂直于光轴）。

**慢轴**：传播速度慢的光的振动方向（轴）。  
负晶体的o轴，正晶体的e轴。



## 6.2.2 波片

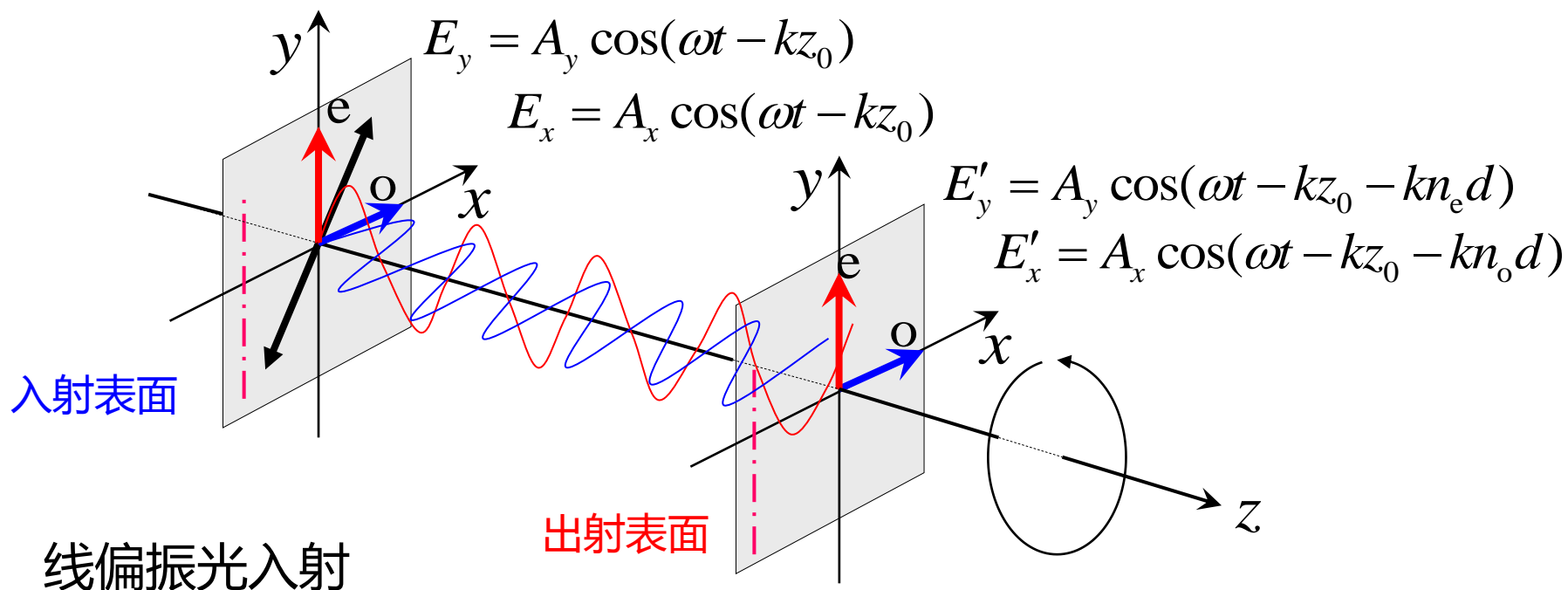
### 波片的相位延迟作用



## 6.2.2 波片

### 波片的相位延迟作用

应该在同一时刻比较入射光与出射光



出射表面的相位比入射表面滞后  $knd$

e光比o光  
超前的相位

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d$$

可简单记为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

真空中波长

$$\begin{cases} E'_x = A_x \cos \omega t \\ E'_y = A_y \cos(\omega t + \Delta\varphi) \end{cases}$$

## 6.2.2 波片

### 使用波片时的注意事项

#### (1) 波长问题

任何波片都是对特定波长而言的。

#### (2) 主轴方向问题

使用波片时应当知道波片允许的两个振动方向（即两个主轴方向）。及相应波速的快慢。通常制作时已标定。

#### (3) 波片只改变偏振，不改变光强（忽略反射）

虽然波片对入射光的两个分量增加了相位差 $\delta$ ，但在不考虑波片反射的情况下，因为振动方向垂直的光束不发生干涉，因此总光强与 $\delta$ 无关，保持不变。



## 6.2.3 相位补偿器

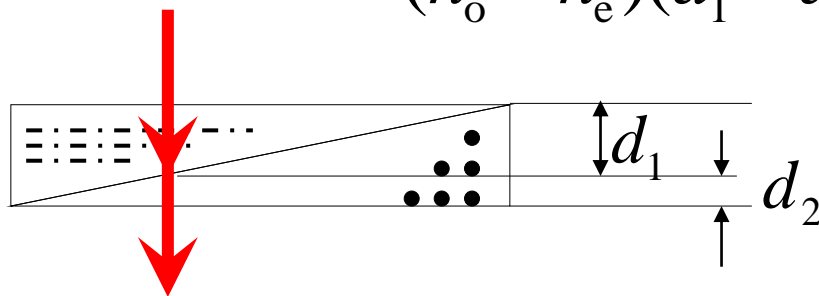
### 1. Babinet 补偿器

- 类似于Wallaston棱镜，但顶角要小得多
- 光在两棱镜中经过的厚度不同

光程  $L_{o1} = n_o d_1, L_{e1} = n_e d_1, L_{o2} = n_o d_2, L_{e2} \Rightarrow n_e d_2$

光程差  $\Delta = (n_o d_1 + n_e d_2) - (n_e d_1 + n_o d_2)$

$= (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$  厚度差不同，光程差不同



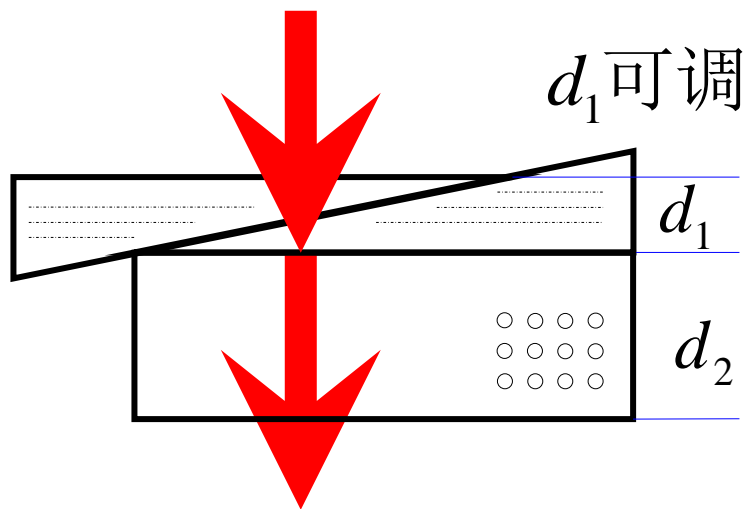
平移补偿器，可以使出射光两分量之间有不同的相位差

缺陷：由于折射，出射光的两个分量的方向会有不同

## 6.2.3 相位补偿器

### 2. Soleil补偿器

- 两直角三棱镜的光轴平行，可以沿斜面滑动
- 增加一块与三棱镜光轴垂直的晶片
- 可以克服Babinet补偿器的缺陷
- 光的方向不变



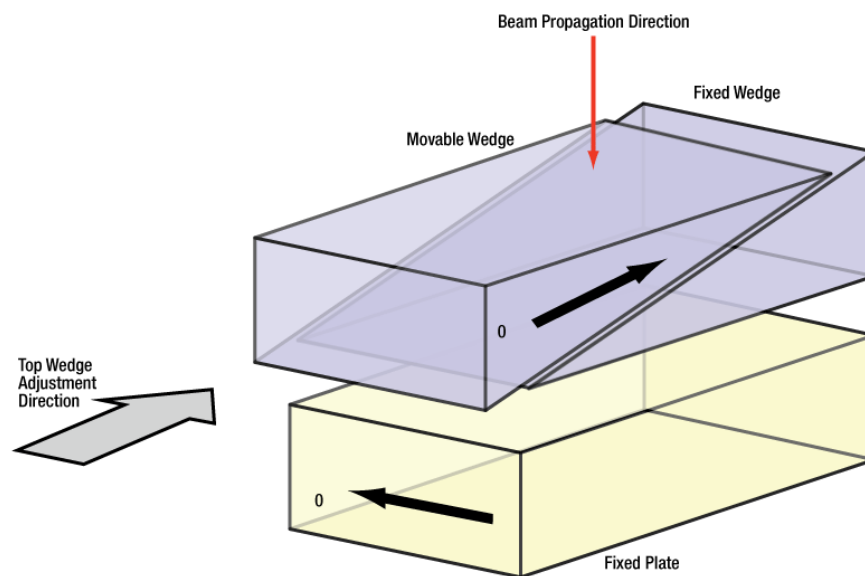
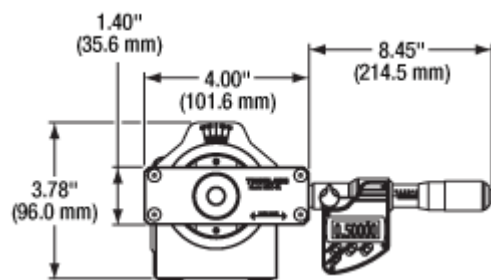
光程差  $\Delta = (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$

相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$$

## 6.2.3 相位补偿器

### 1. Babinet 补偿器



Thorlabs公司索累 - 巴比涅补偿器  
售价约2.5万元人民币

# 本节重点

1. 双折射的基本特性（理解）。
2. 光轴的概念和晶体双折射（理解、掌握）。
3. 波片及双折射光学器件（理解、掌握）。

# 作业

**p.181: 1, 2, 3**

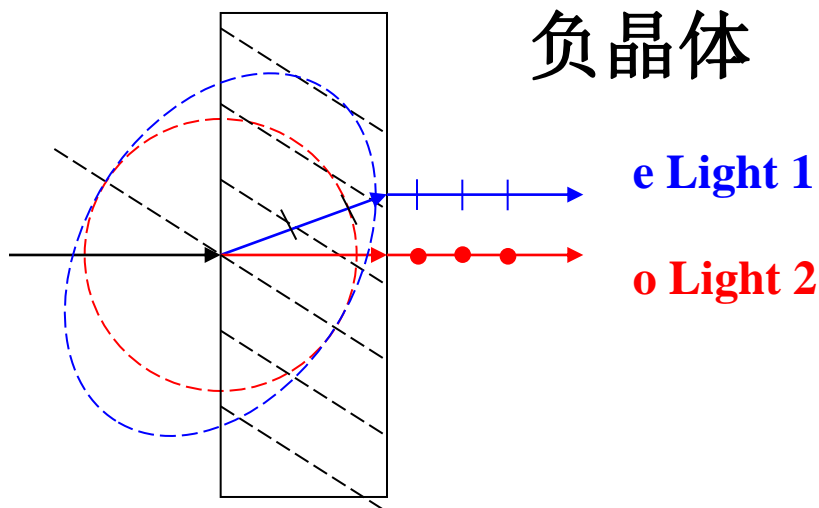
**p.187: 1, 2, 3**

## 重排版

**P390 : 1 , 2 , 3**

**394 : 1 , 2 , 3**

# 课堂练习



负晶体

e Light 1

o Light 2

(1) 如何利用 $N$ 个检偏器把光束2的偏振转成光束1的偏振，最大转换效率为多少？并证明当 $N$ 趋于无穷时，最大转换效率趋于100%。

(2) 当光强为 $I_0$ 的一束平行光通过某一介质后，振幅变为原来的 $4/5$ ，如果将介质厚度增加一倍，问透射光的强度应为\_\_\_\_\_。