

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

双折射的基本现象

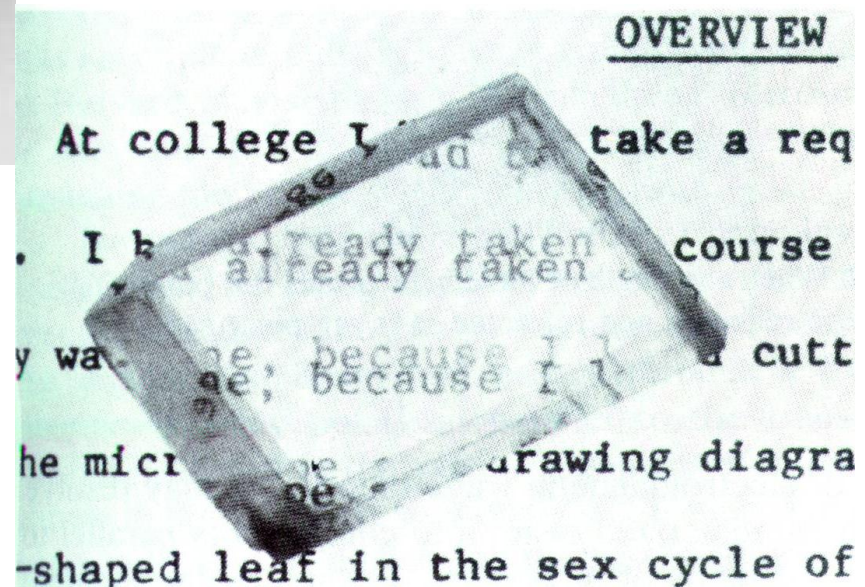
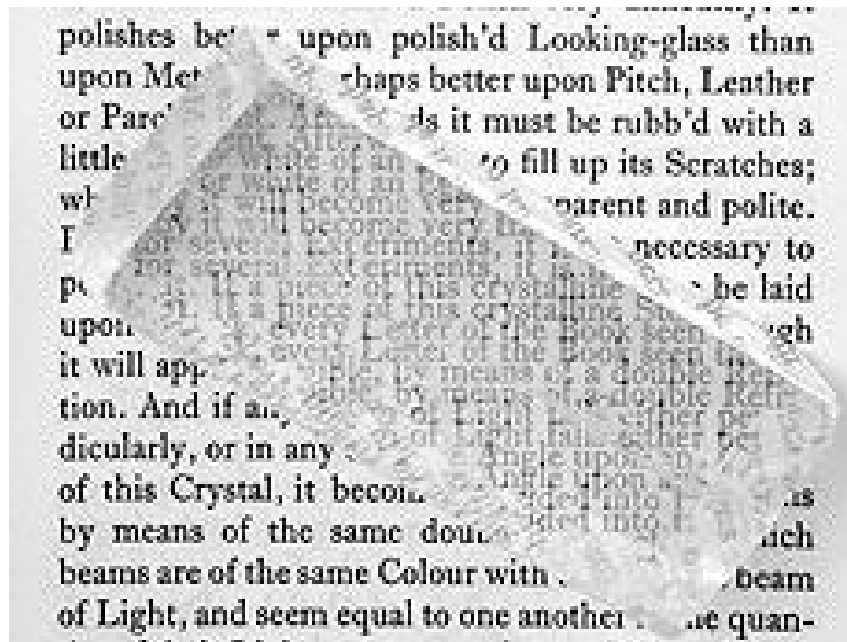


方解石晶体的双折射
(double refraction, birefringence)

如果放一块厚的各项同性介质，能看到双影吗？有什么区别？

6.1.1 双折射的基本现象

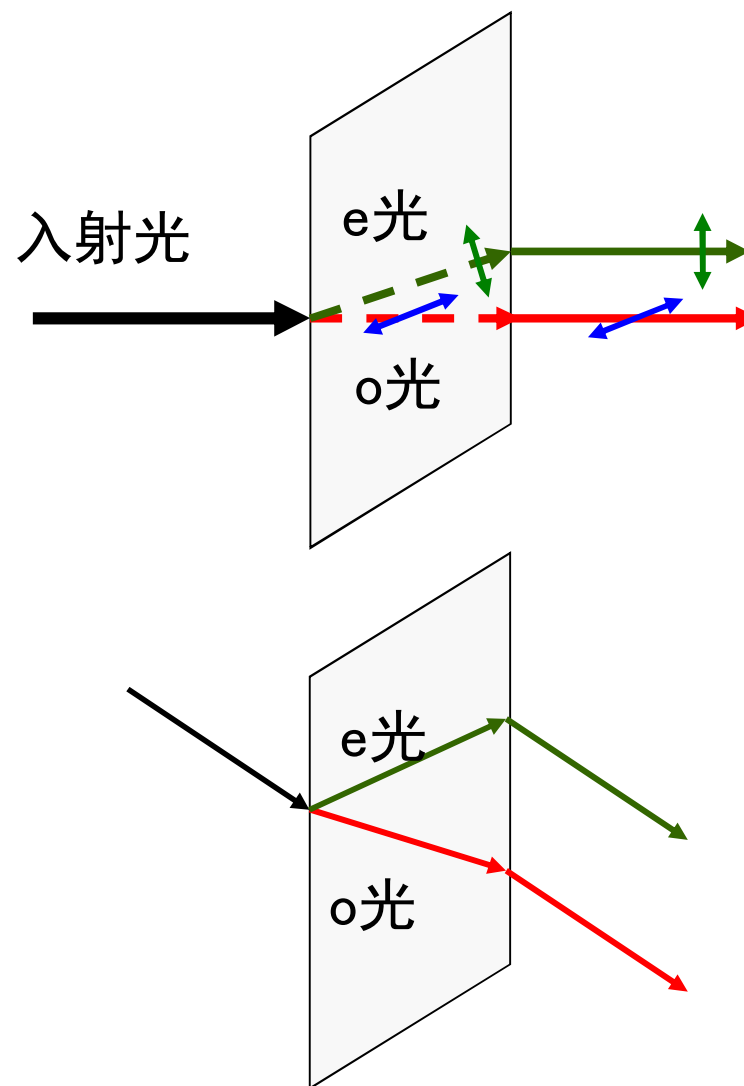
双折射的基本现象



6.1.1 双折射的基本现象

双折射的基本现象

- 双折射现象：一束入射到介质中的光经折射后变为两束光，。
- 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



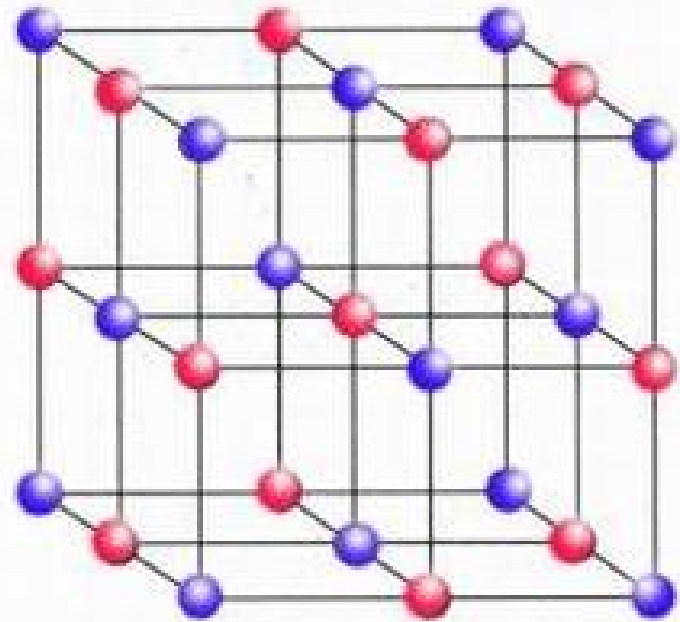
将线偏振器旋转
90°后, **e光的像**

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。

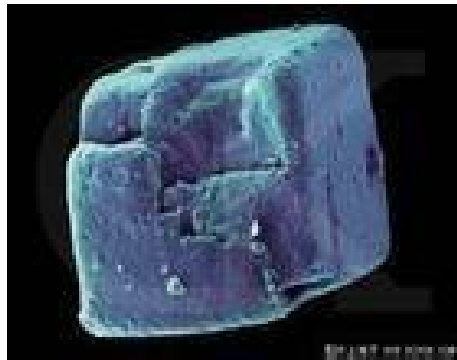
非晶和液体：无规则外形，内部原子无序排列



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



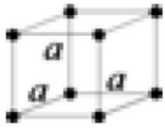
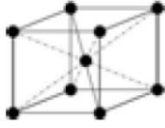
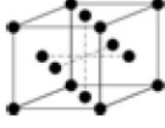
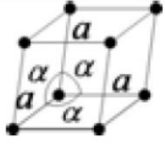
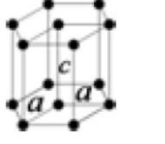
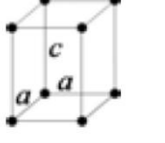
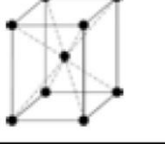
多晶冰糖

6.1.2 双折射晶体及其基本特性

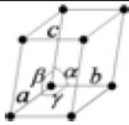
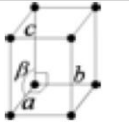
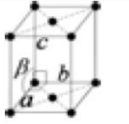
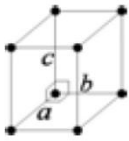
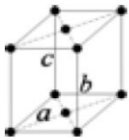
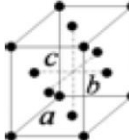
双折射晶体

- 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 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。

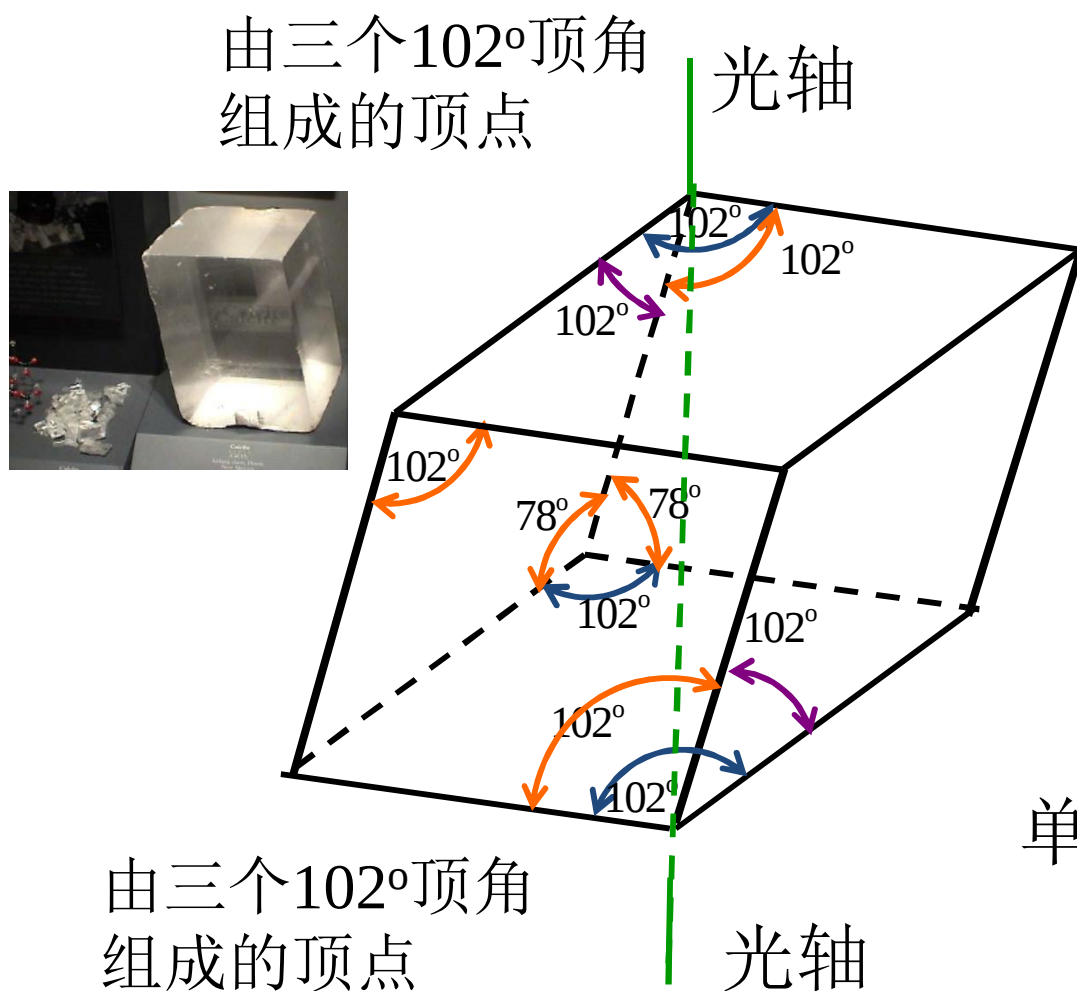
- 单轴晶体：方解石晶体、石英、红宝石、冰，等等。
- 双轴晶体：云母、蓝宝石、橄榄石、硫黄，等等。

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

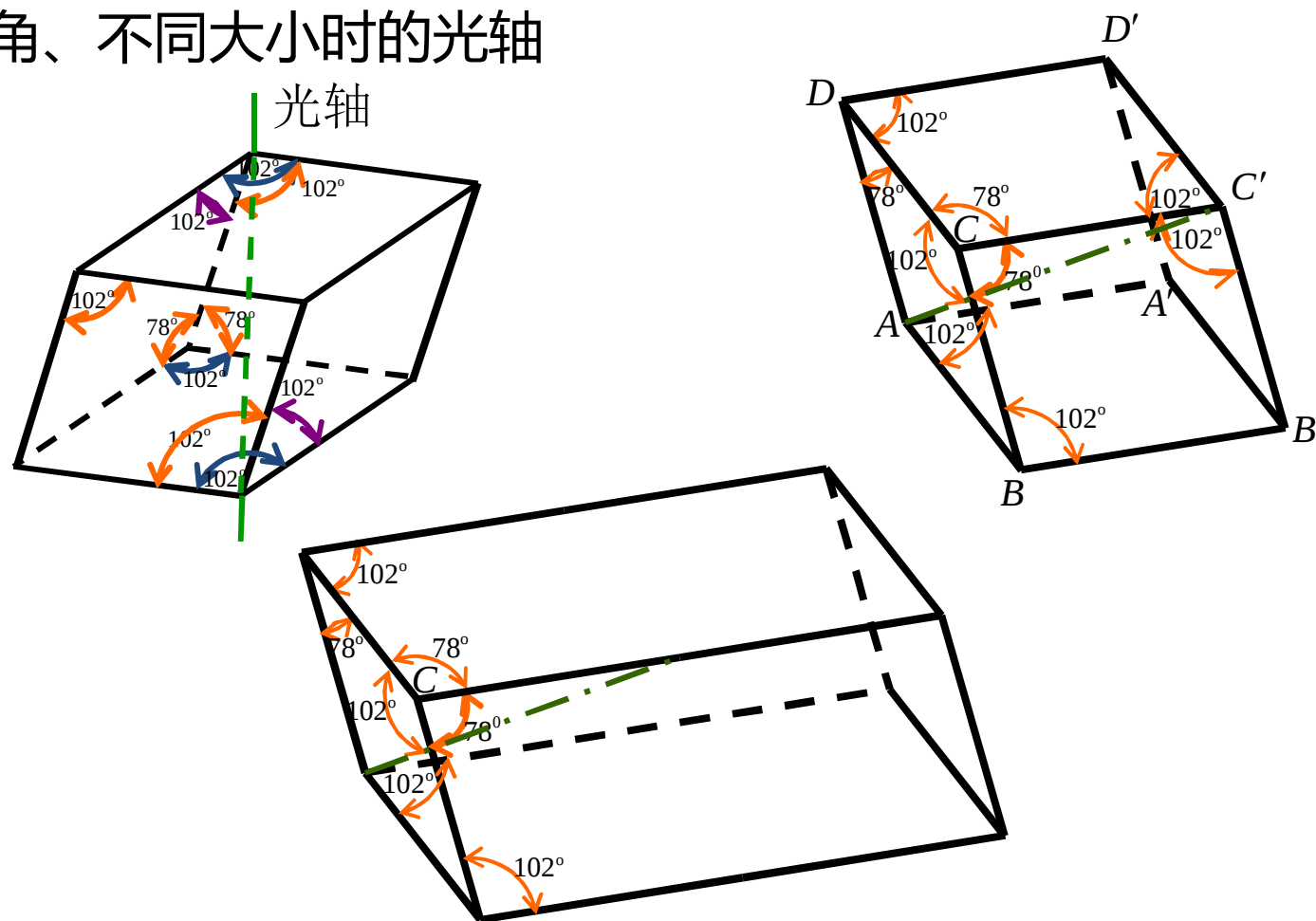


6.1.2双折射晶体及其基本特性

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

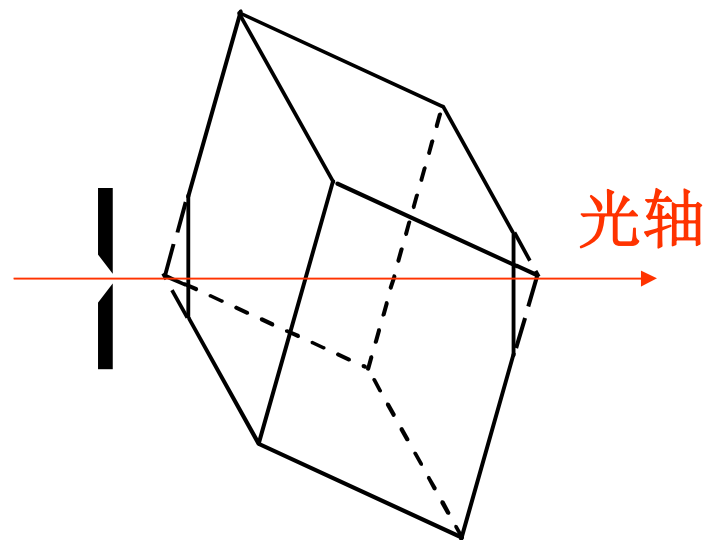
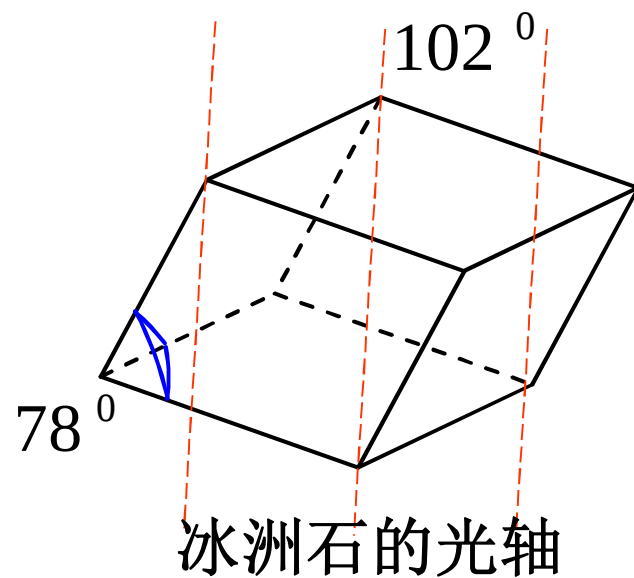
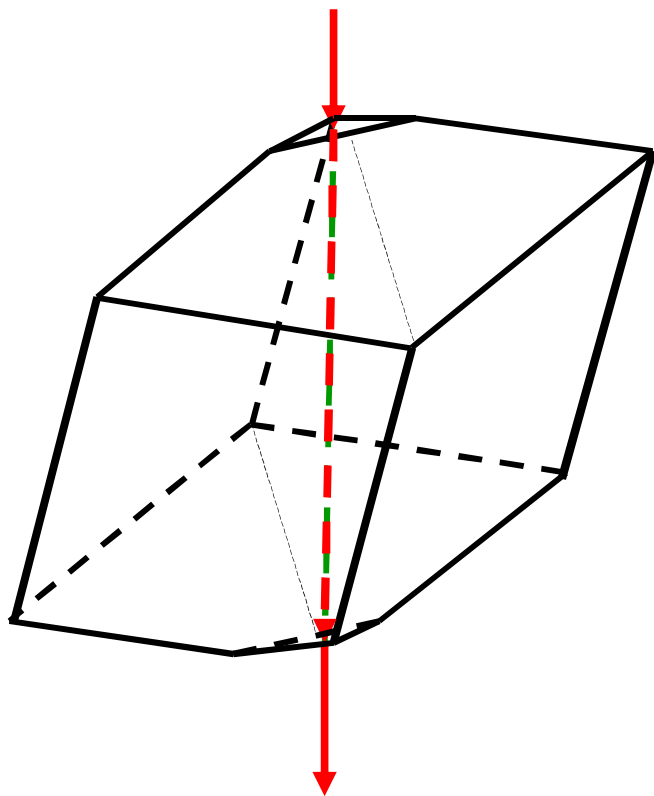


6.1.2双折射晶体及其基本特性

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

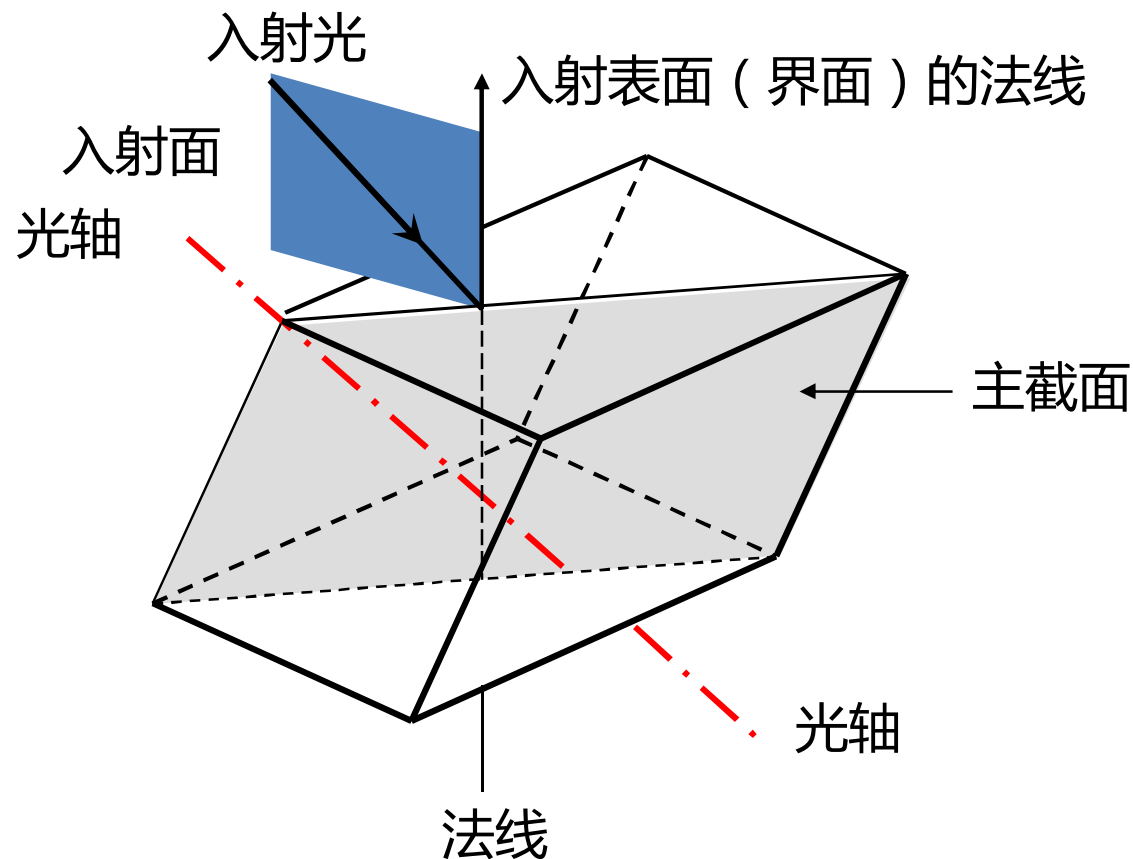


6.1.2双折射晶体及其基本特性

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

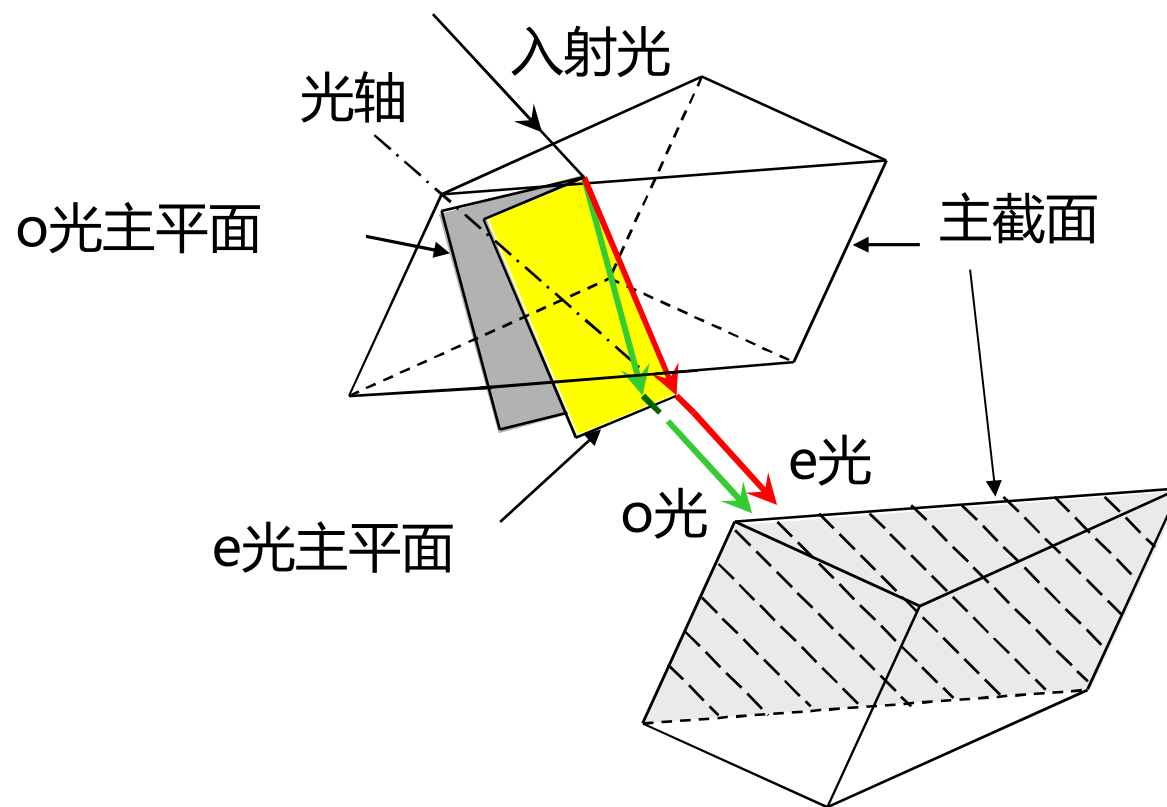
双折射晶体的特征参量

3. 主平面

晶体中的**光线**与**光轴**所形成的平面。

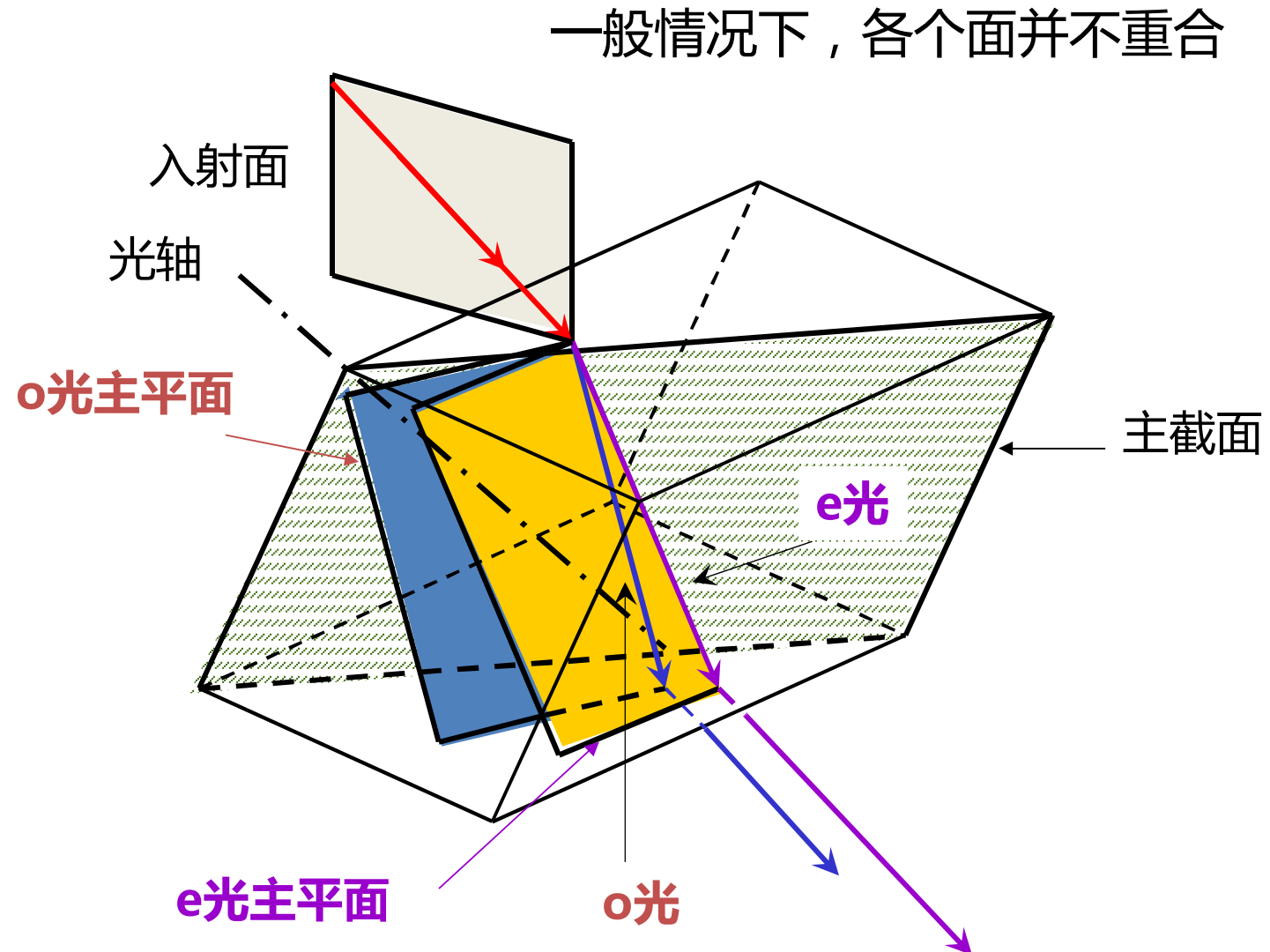
o光主平面： o光振动方向垂直于o光主平面，即电矢量垂直于光轴。

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

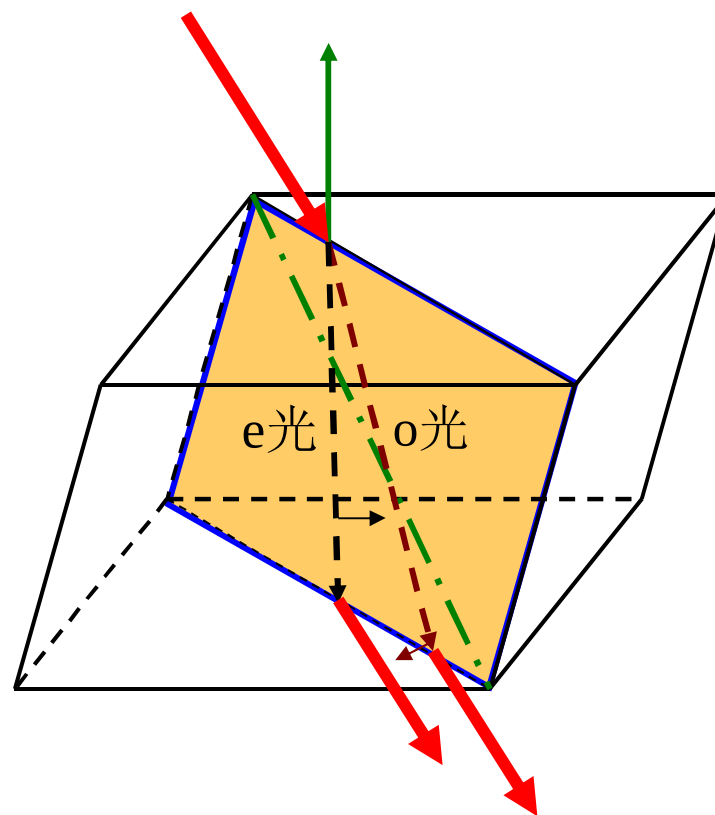
双折射晶体的特征参量



6.1.2双折射晶体及其基本特性

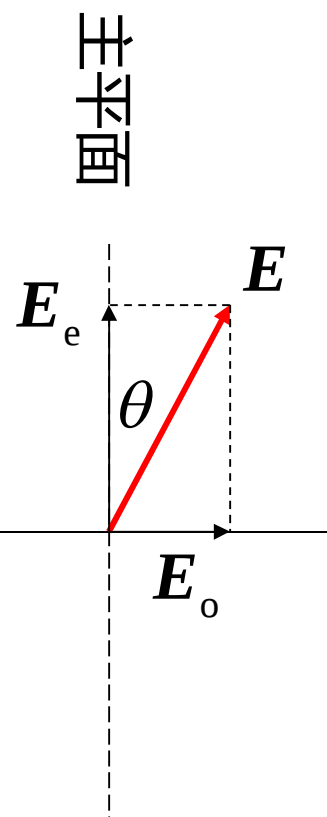
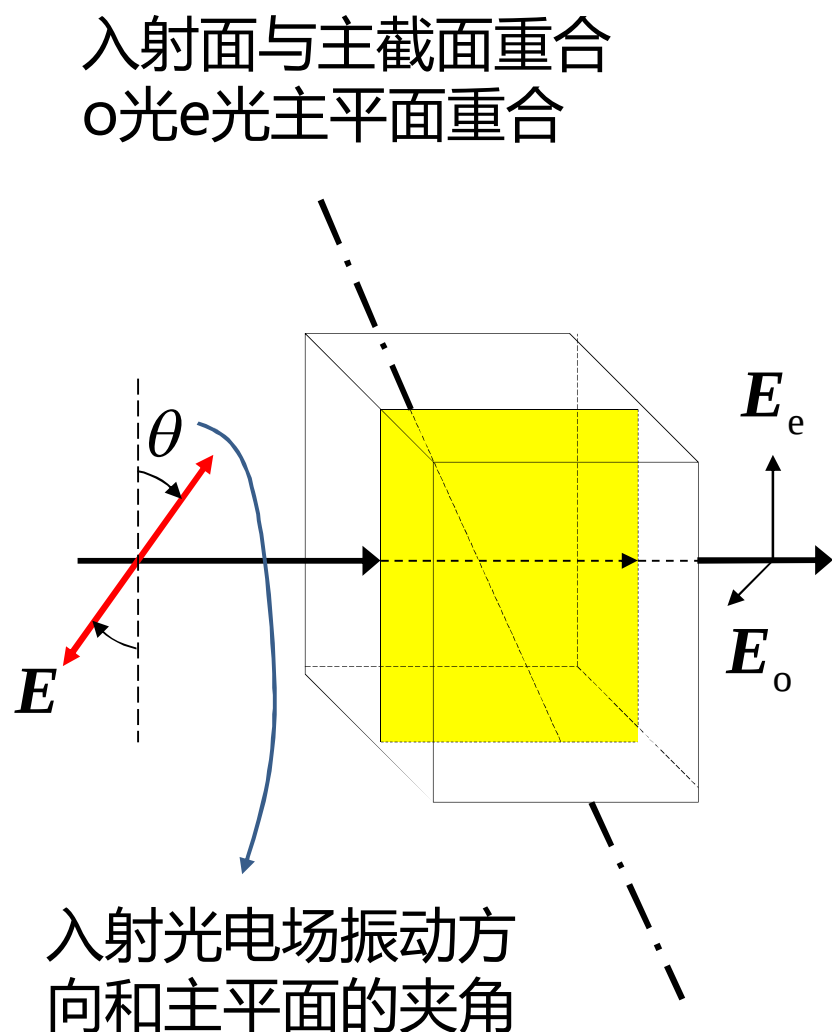
双折射晶体的特征参量

- 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



$$E_e = E \sin \theta$$

$$E_o = E \cos \theta$$

$$A_e = A \sin \theta$$

$$A_o = A \cos \theta$$

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

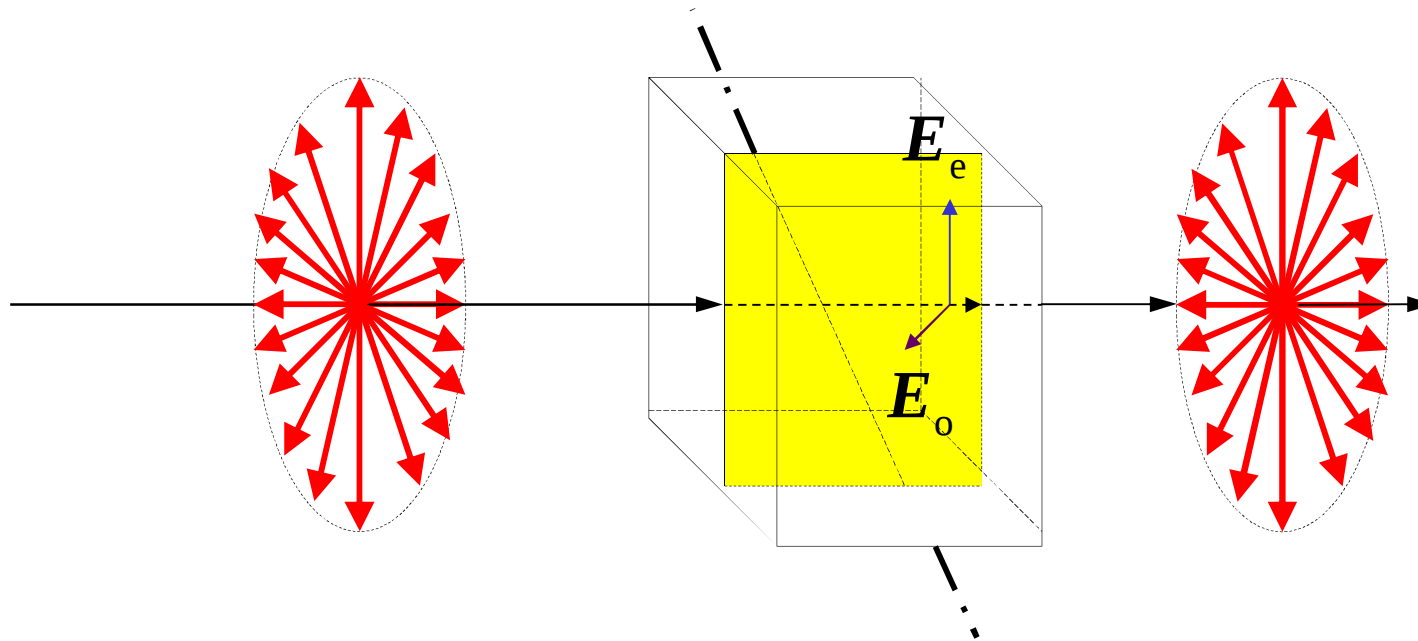
$$I_o = I \cos^2 \theta$$

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

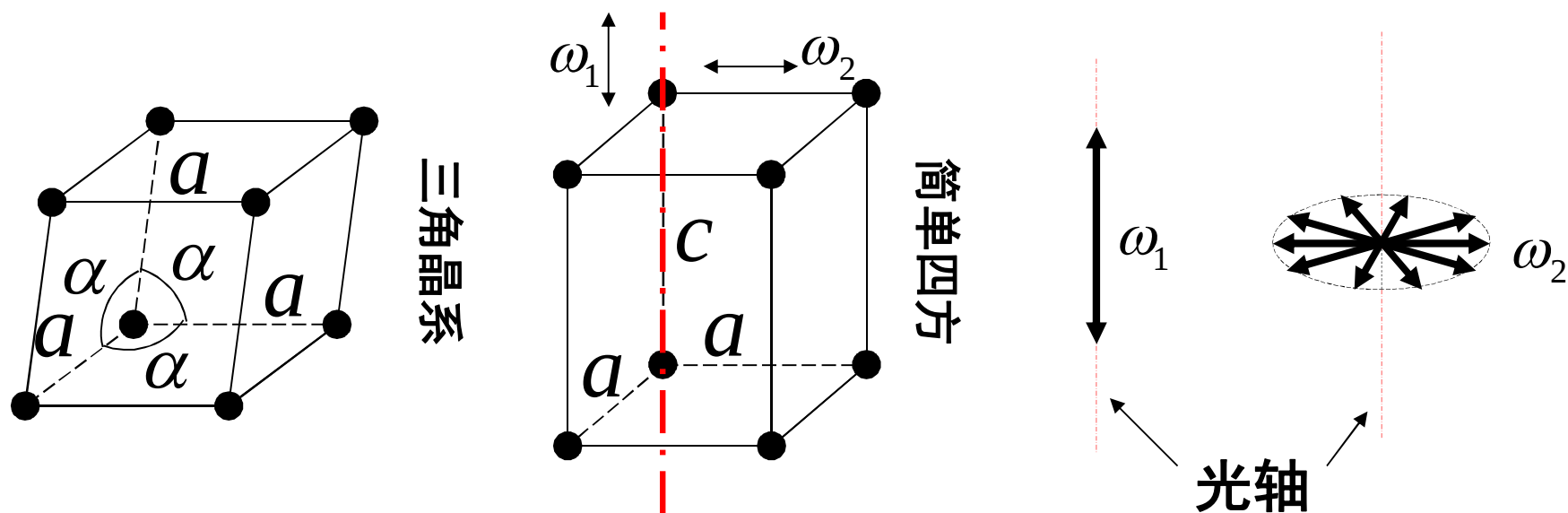
$$I_o = I_e = \frac{1}{2} I$$



6.1.3 单轴晶体中的波面

o光、e光与晶体光轴的关系

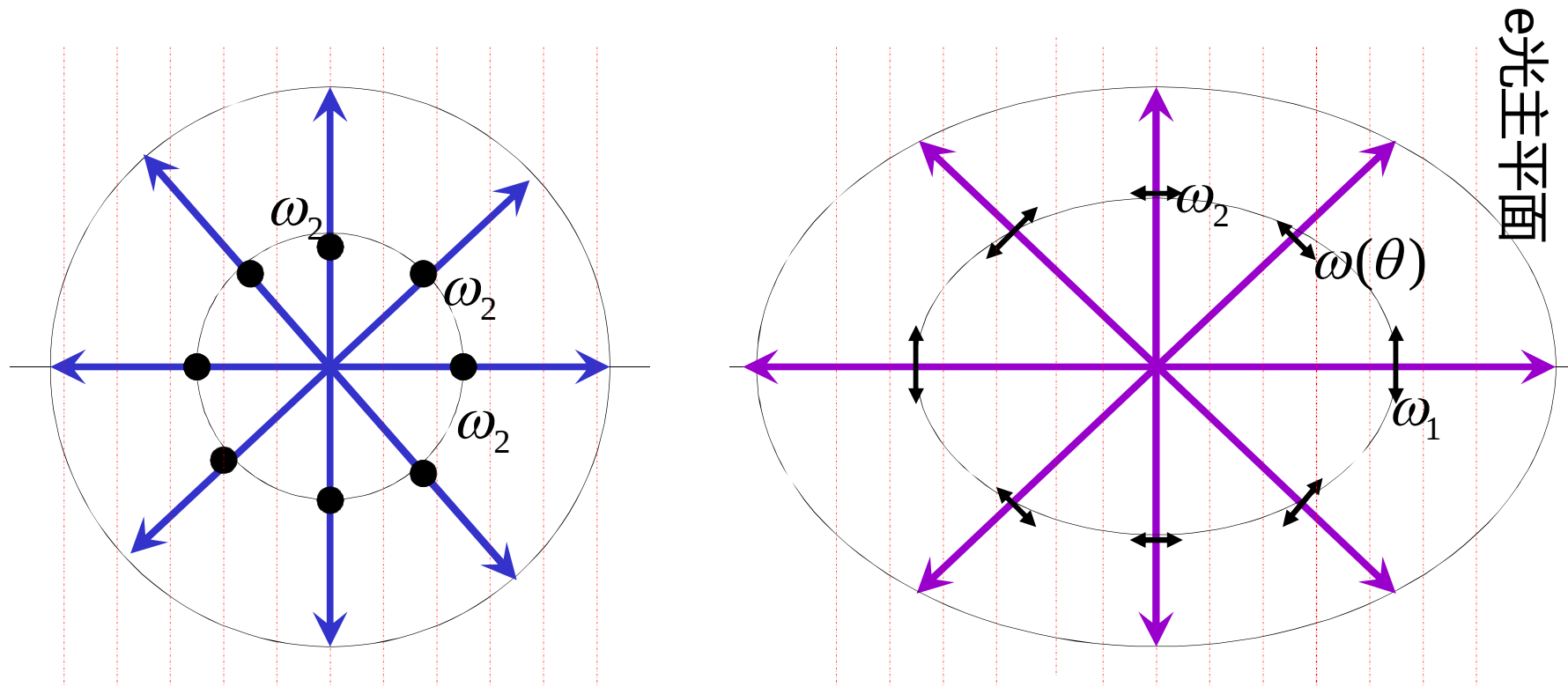
- 单轴晶体：只有一个光轴
- 单轴晶体的电子存在两个固有的振动频率.
- 一个是与光轴平行方向的振动 ω_1
- 另一个是与光轴垂直方向的振动 ω_2



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**。

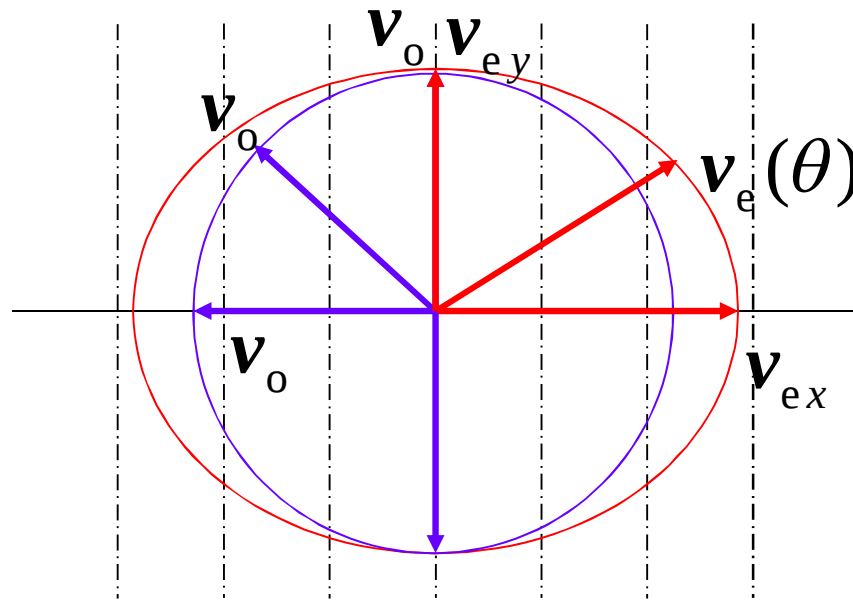
e光向不同方向传播时，电矢量相对于光轴的方向不同，其振动频率也不同，所以速度也不同，其波面为**旋转椭球面**。



6.1.3 单轴晶体中的波面

晶体中光波波面的特点

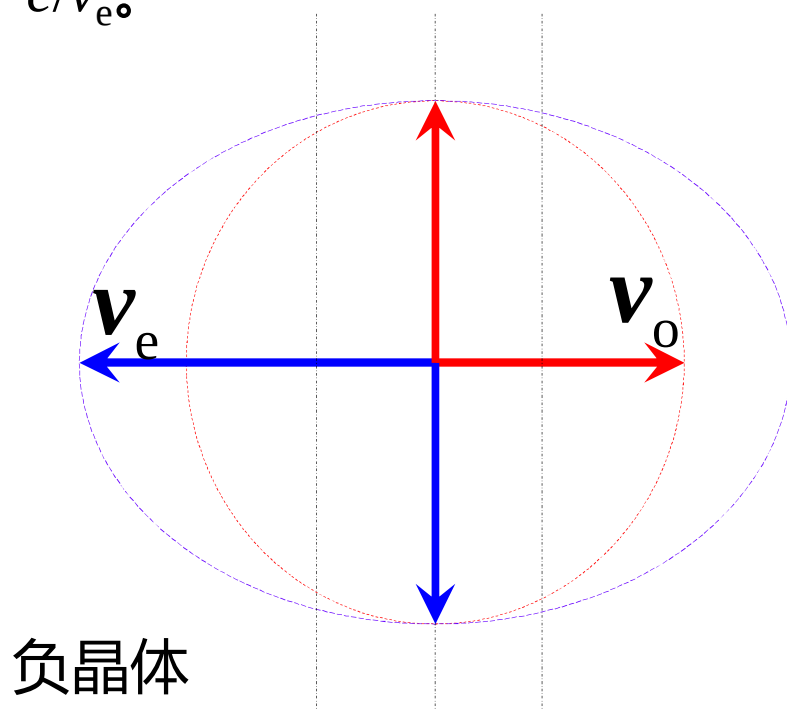
- 除了两个特殊的方向，**e光的传播方向与其波面不垂直**。这是因为其波面为椭球面。
- o光的波面是球面，故其传播方向处处与其波面垂直**。



6.1.3 单轴晶体中的波面

e光的主折射率

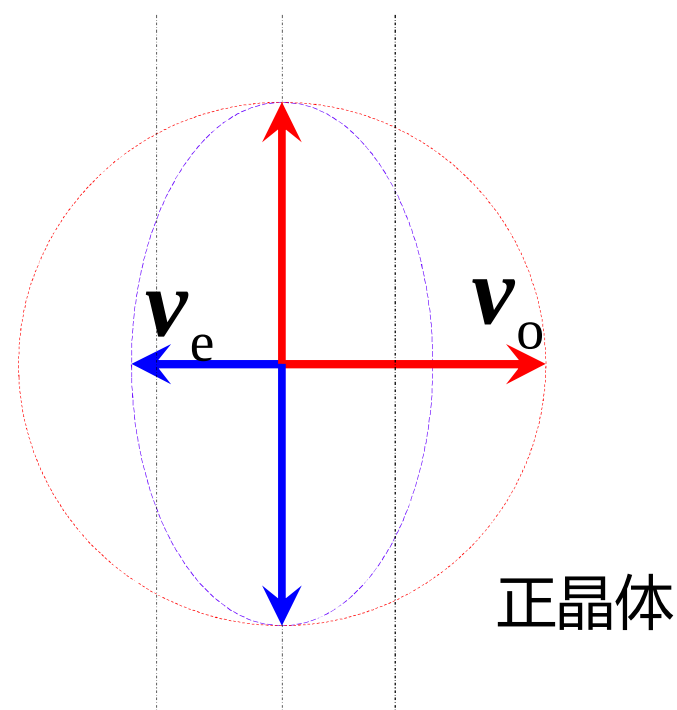
由于e光在不同方向传播速度不同，折射率也不同。定义e光的**主折射率**：e光沿与光轴垂直方向传播时的速度为 v_e ，则其主折射率为 $n_e = c/v_e$ 。



冰洲石

$$v_e > v_o$$
$$n_e < n_o$$

e光为扁椭球



石英

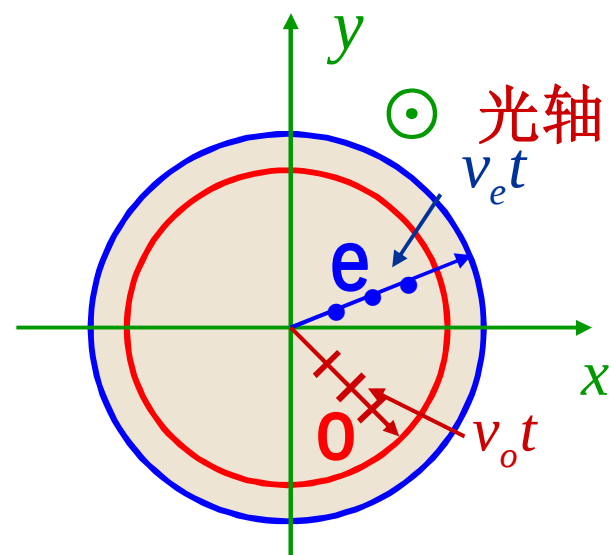
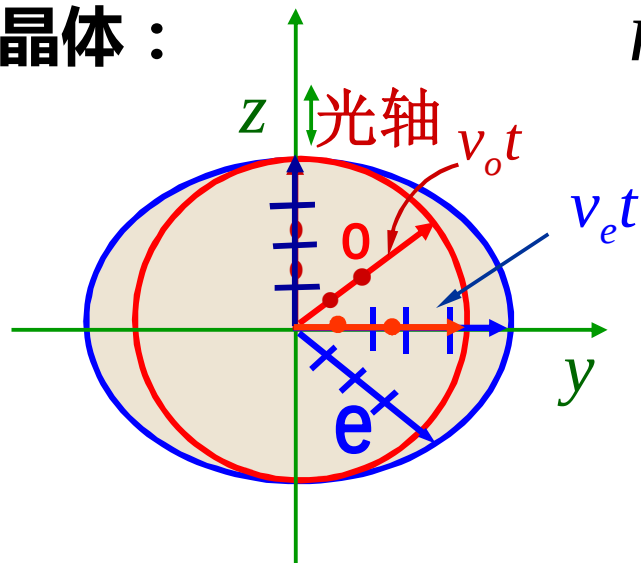
$$v_e < v_o$$
$$n_e > n_o$$

e光为长椭球

6.1.3 单轴晶体中的波面

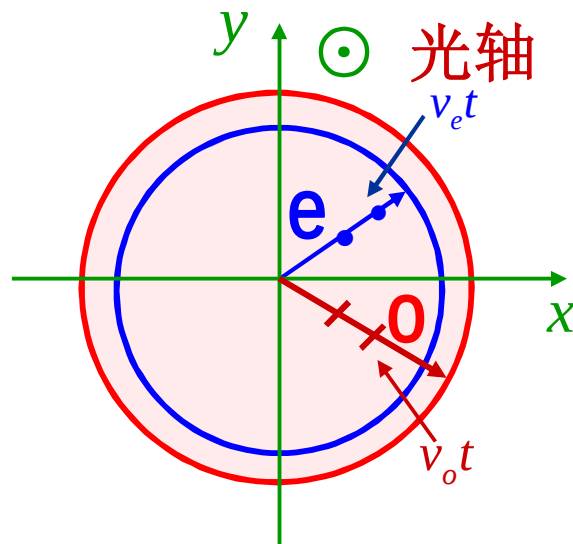
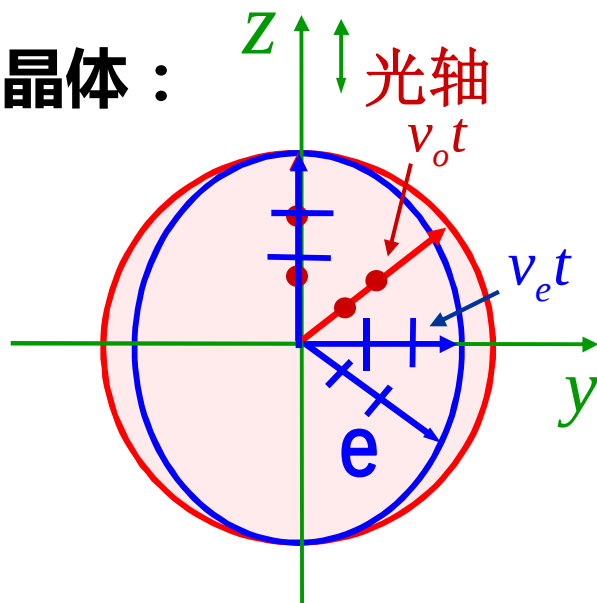
负晶体：

$$n_e < n_o$$



正晶体：

$$n_e > n_o$$



6.1.4 惠更斯作图法

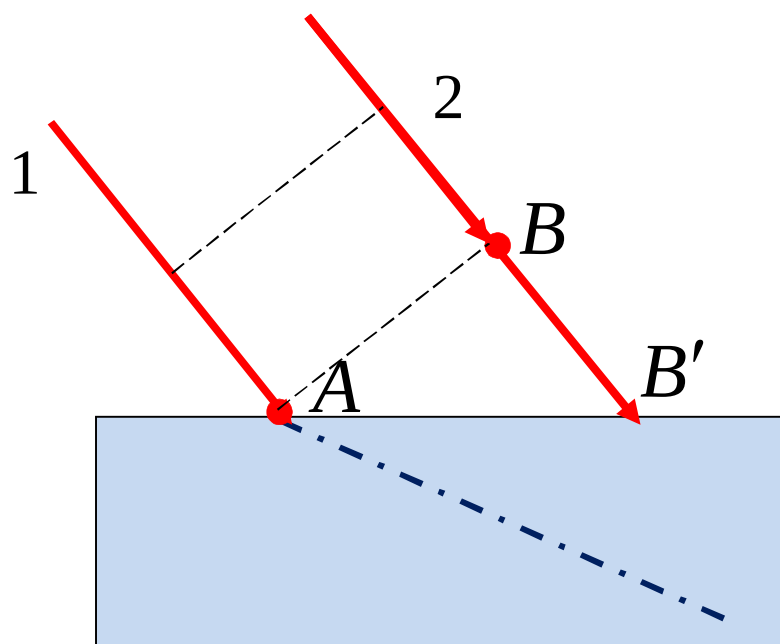
针对光轴在入射面内的情形

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 $t=BB'/c$ 。

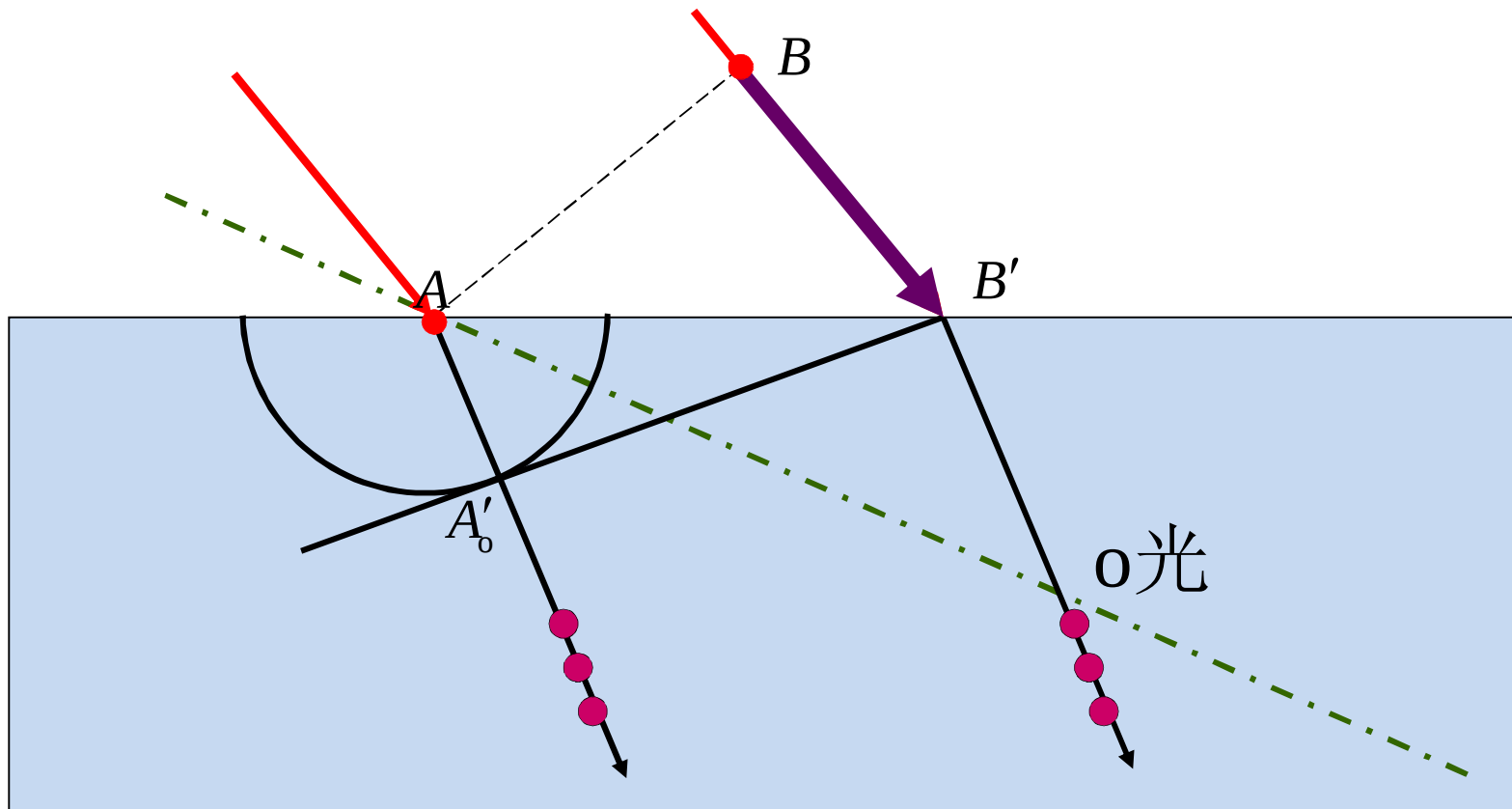


6.1.4 惠更斯作图法

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。

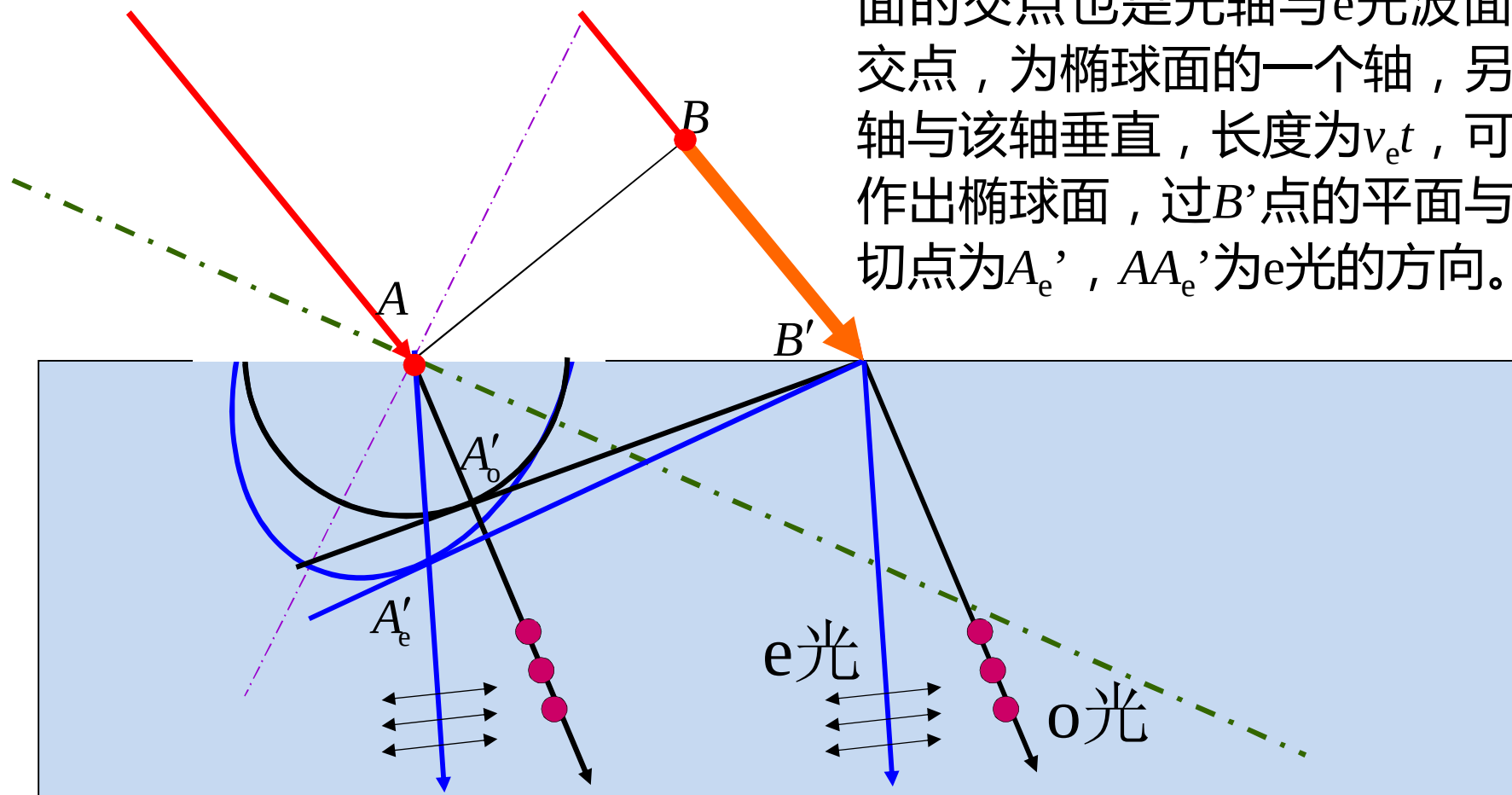


6.1.4 惠更斯作图法

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。

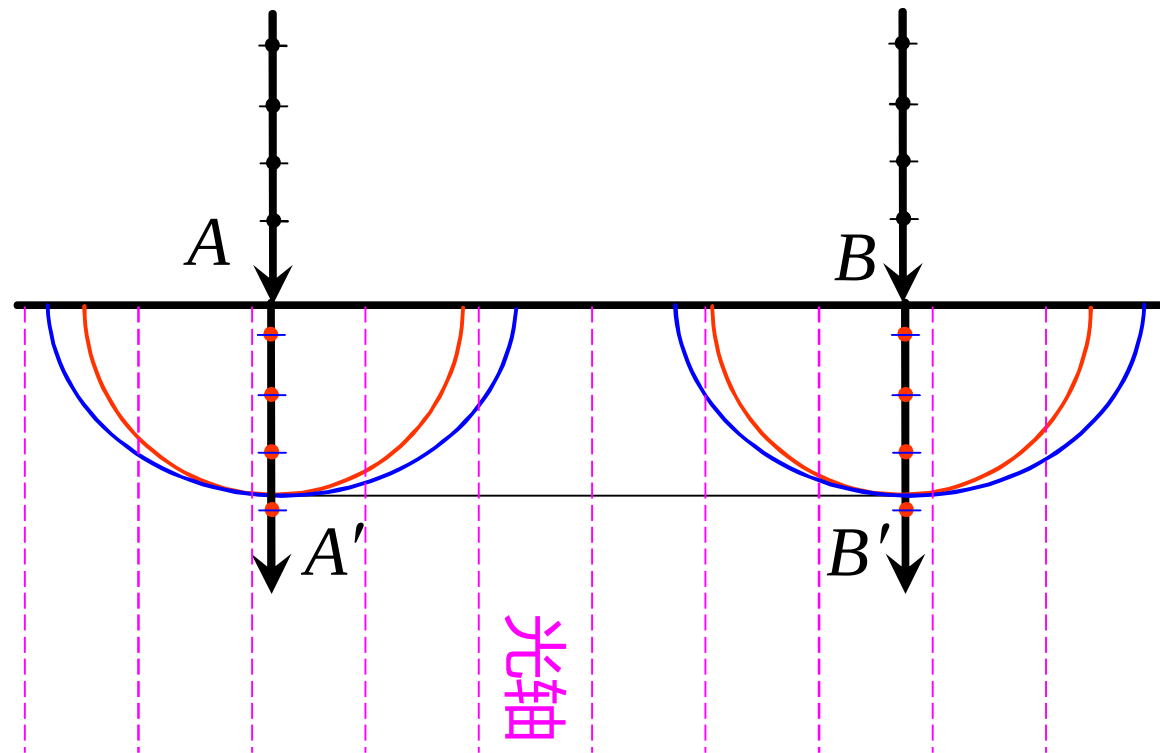


e光的方向不符合一般的折射定律

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

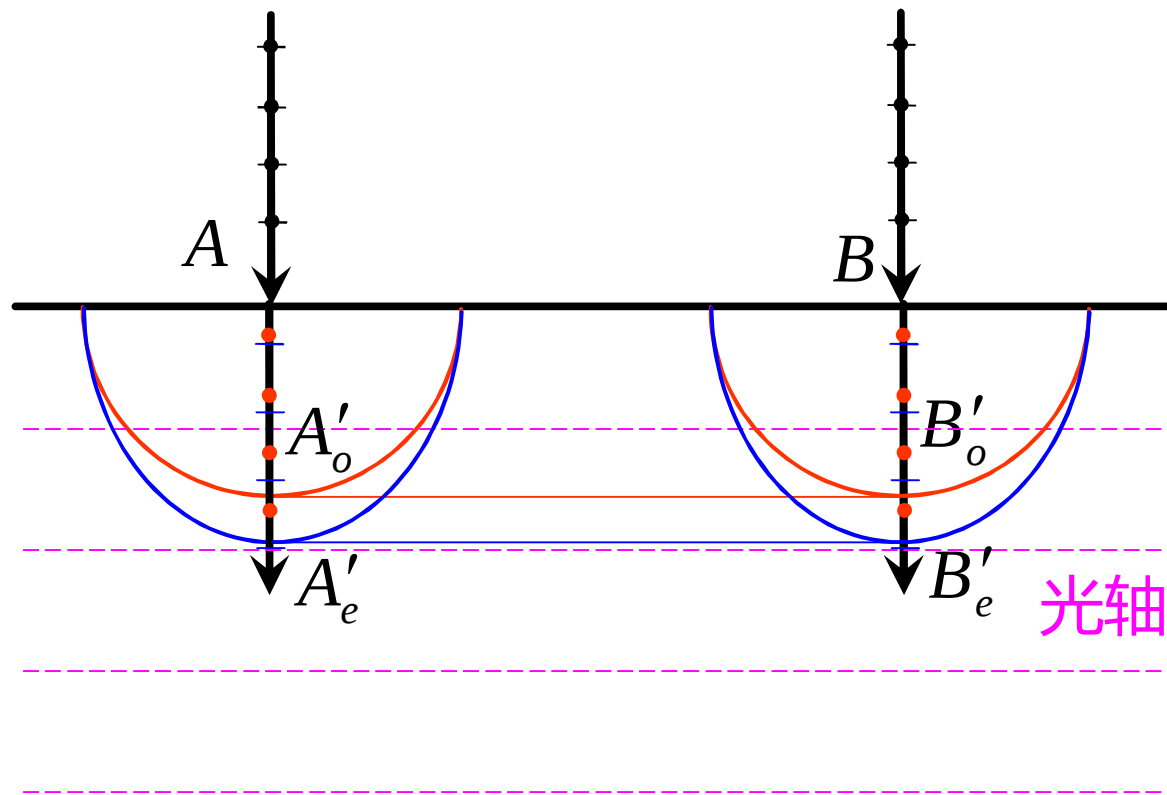


6.1.4 惠更斯作图法

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

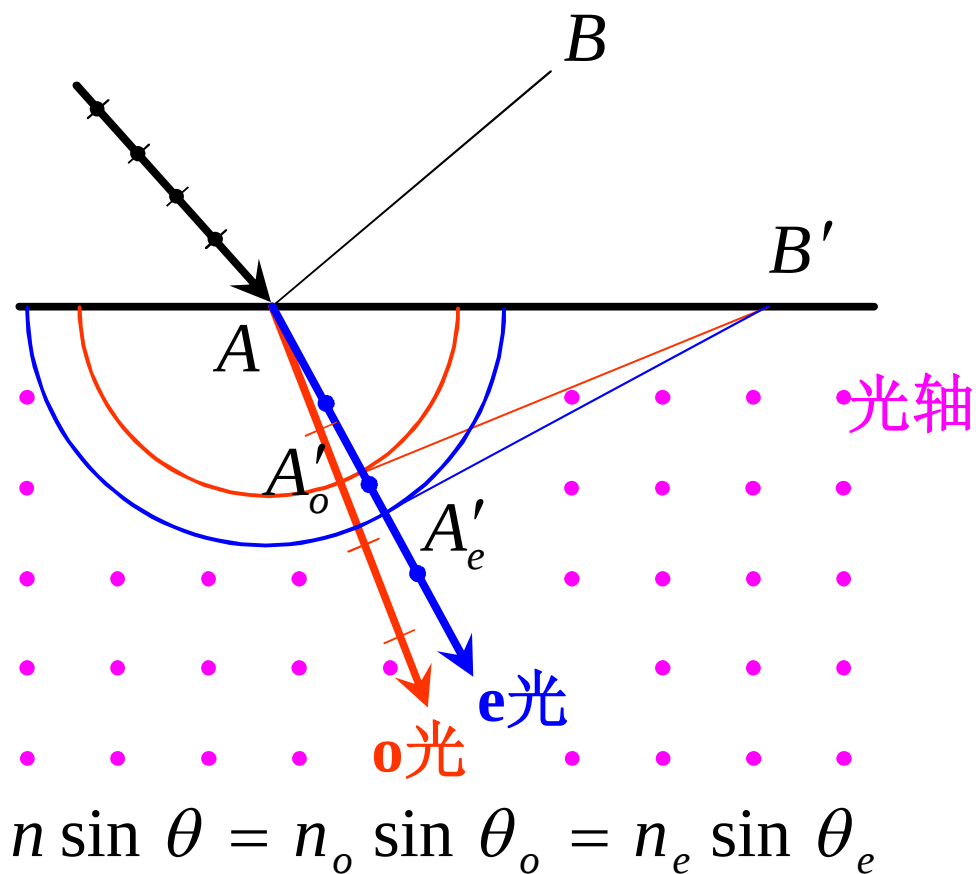


6.1.4 惠更斯作图法

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



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：

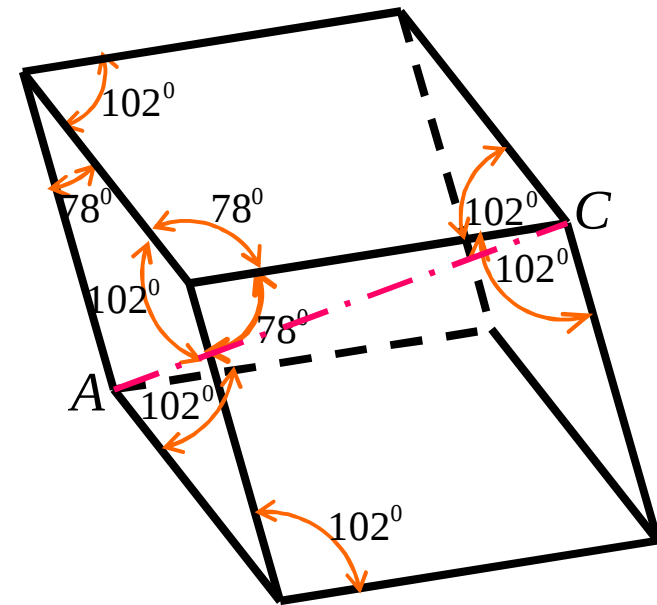
1. 尼科耳 (Nicol) 棱镜
2. Glan—Thompson棱镜
3. 渥拉斯顿 (Wollaston) 棱镜
4. 洛匈 (Rochon) 棱镜

问题：是否可用双折射晶体制作透镜？

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° 和 78° 的角
- **光轴**通过由3个 **102° 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

旋转45度

先将端面磨去一部分

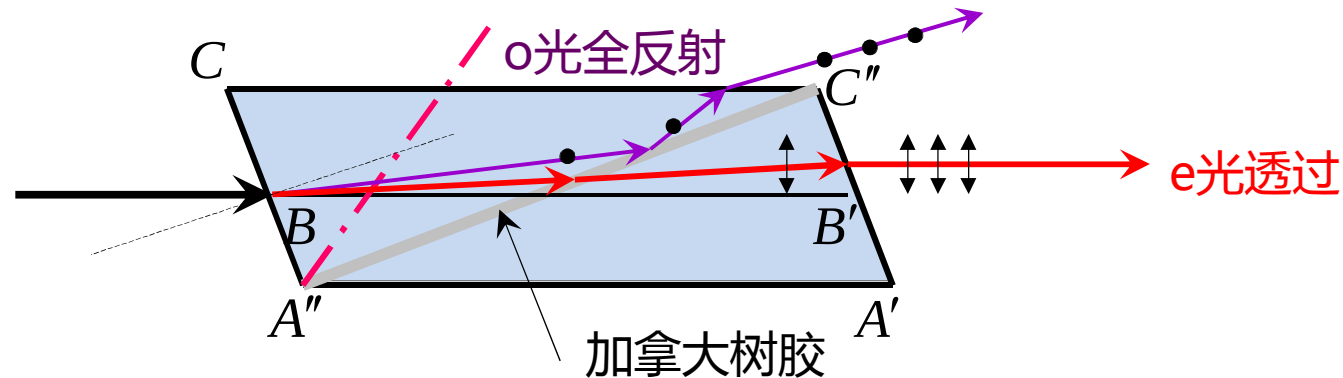
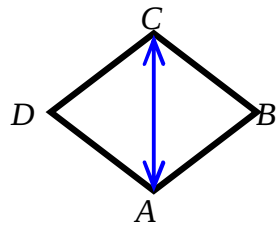
然后将晶体剖开
再用加拿大树胶粘合

主截面

对于Na黄光

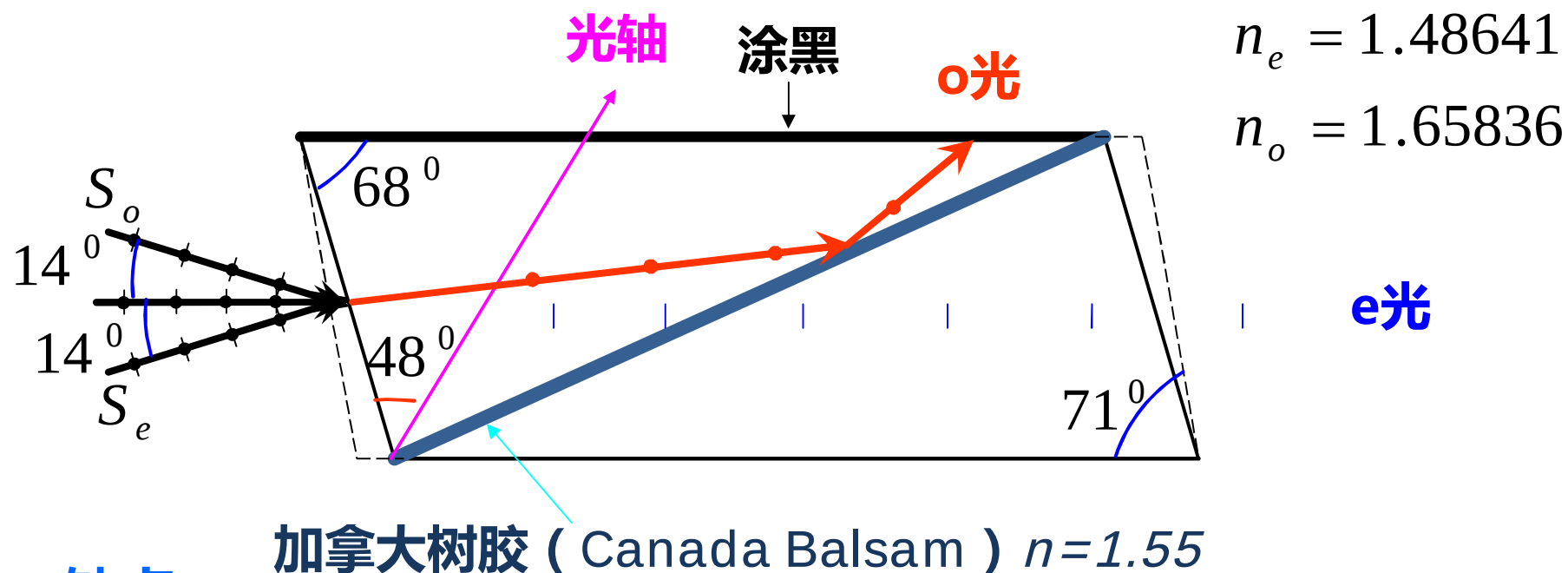
$$n_e = 1.48641 < n = 1.55 < n_o = 1.65836$$

方解石 加拿大树胶 方解石



6.2.1 晶体偏振器

1、Nicol棱镜 (W.Nicol, 1828)



缺点

e光折射率是角度的函数 →

- 入射角度受限，
- 出射会随光棱镜旋转而改变方向

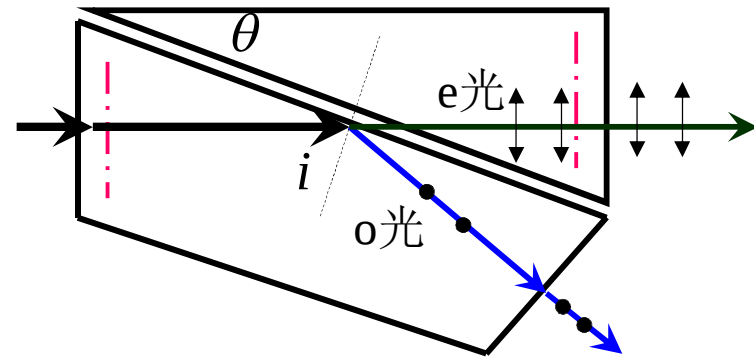
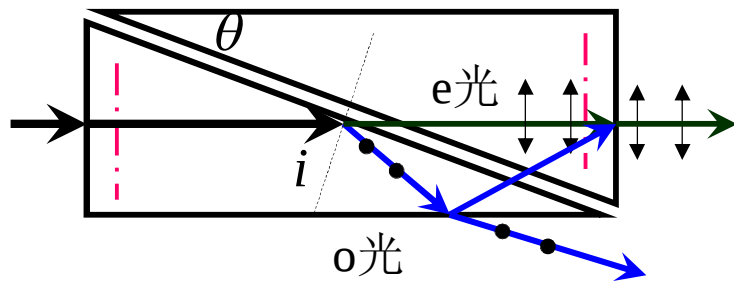
加拿大树胶 →

- 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

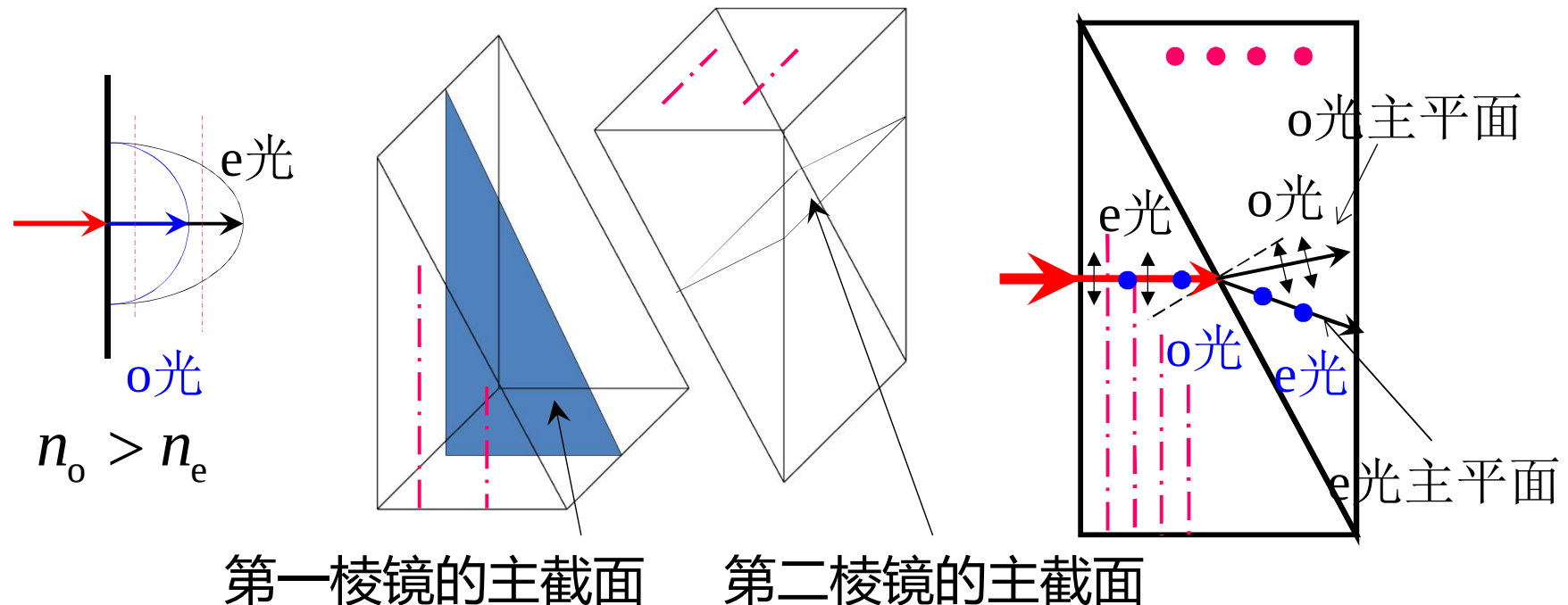
- 由两块方解石的直角三棱镜组成
- 两棱镜的光轴相互平行
- 两棱镜的斜面可以用甘油、树脂等胶合
- 也可直接接触（中间有空气层），透紫外（傅科棱镜）
- o光全反射，e光直进射出



6.2.1 晶体偏振器

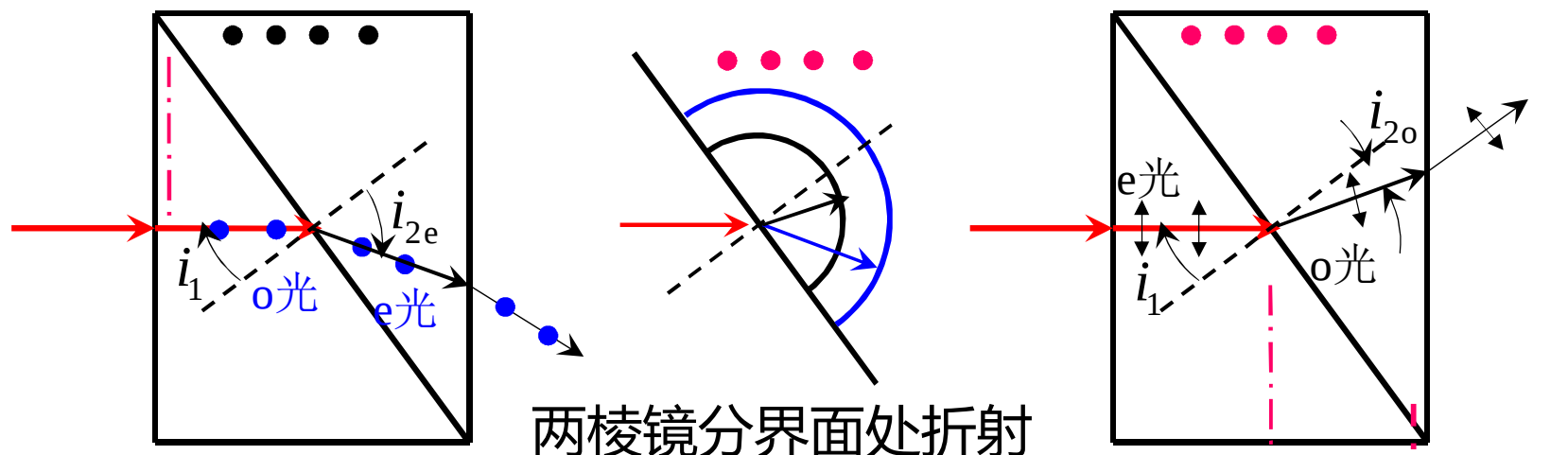
3、渥拉斯顿 (Wollaston) 棱镜

- 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

3、渥拉斯顿 (Wollaston) 棱镜



入射角均为 i_1 折射角分别是 i_{2o} 和 i_{2e}

$$\begin{cases} n_o \sin i_1 = n_e \sin i_{2e} \\ n_e \sin i_1 = n_o \sin i_{2o} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sin i_{2e} = \frac{n_o}{n_e} \sin i_1 > \sin i_1 \\ \sin i_{2o} = \frac{n_e}{n_o} \sin i_1 < \sin i_1 \end{cases}$$

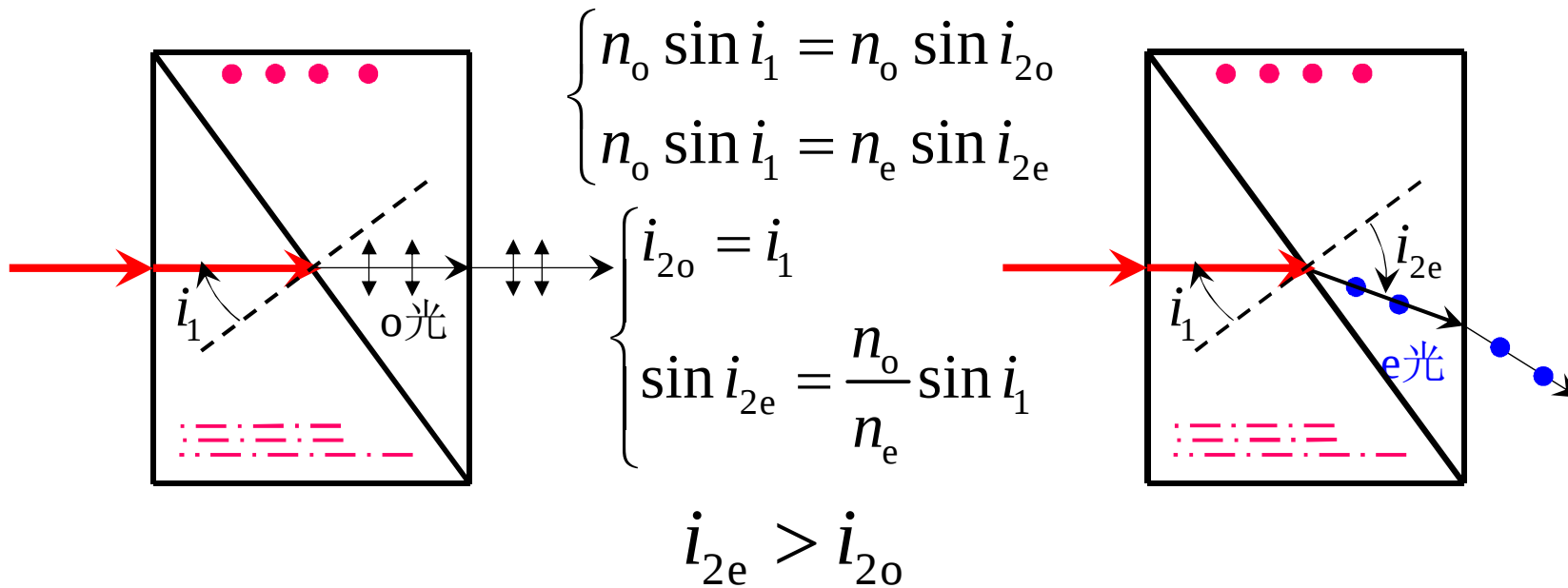
方解石是负晶体 $n_o > n_e$ $i_{2o} < i_1 < i_{2e}$

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

4、洛匈 (Rochon) 棱镜

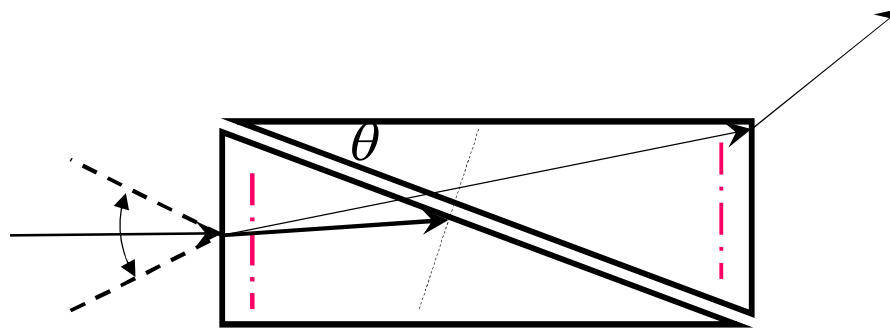
- 由两块冰洲石的直角三棱镜 (**粘合**) 而成
- 两棱镜的光轴相互垂直
- 入射光沿着第一棱镜的光轴方向
- 第一镜中无双折射，只有o光；第二镜中有双折射



6.2.1 晶体偏振器

偏振棱镜的主要参数

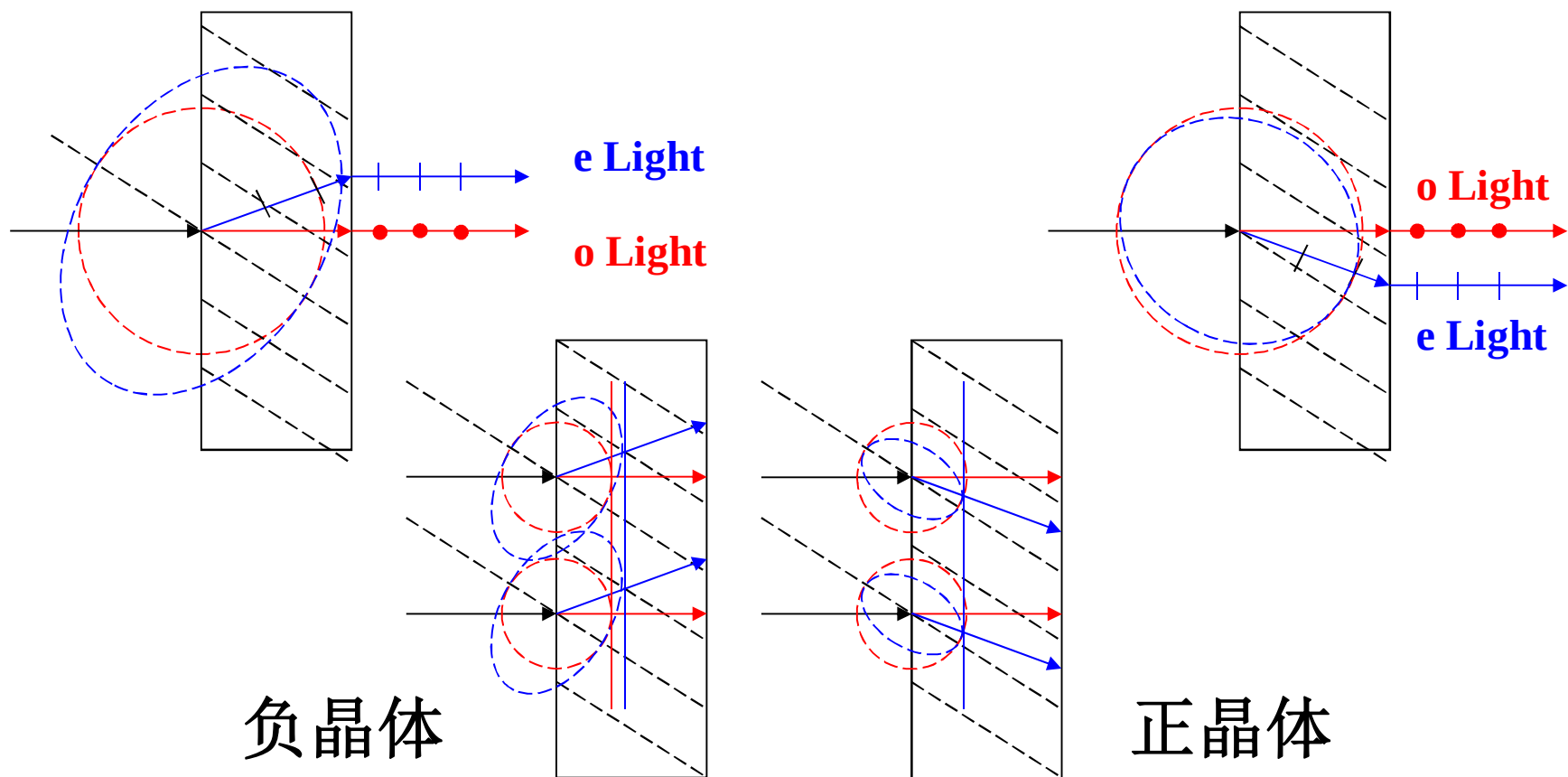
- 通光孔径：一般 $\Phi=5\sim 20\text{mm}$
- 孔径角：入射光束的锥角范围
- 消光比：通过偏振器后两正交偏振光的强度比，一般可达 10^{-5} 。
- 抗损伤能力：主要是过高光强对胶合面的损伤



6.2.1 晶体偏振器

例题

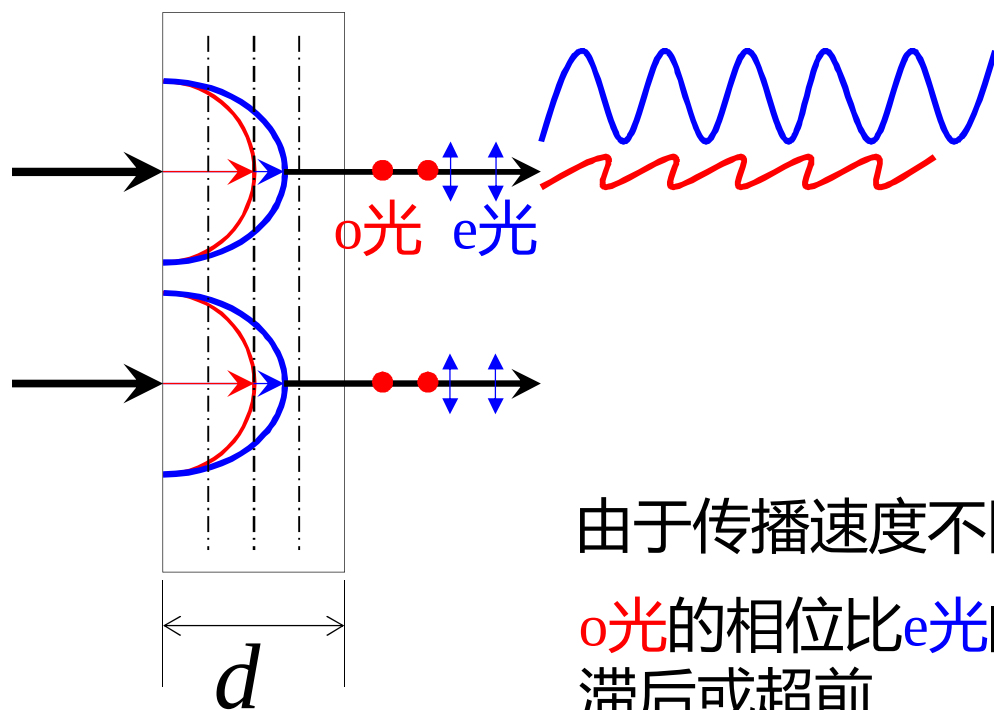
根据图中光线双折射的情况判断晶体的正负



6.2.2 波片

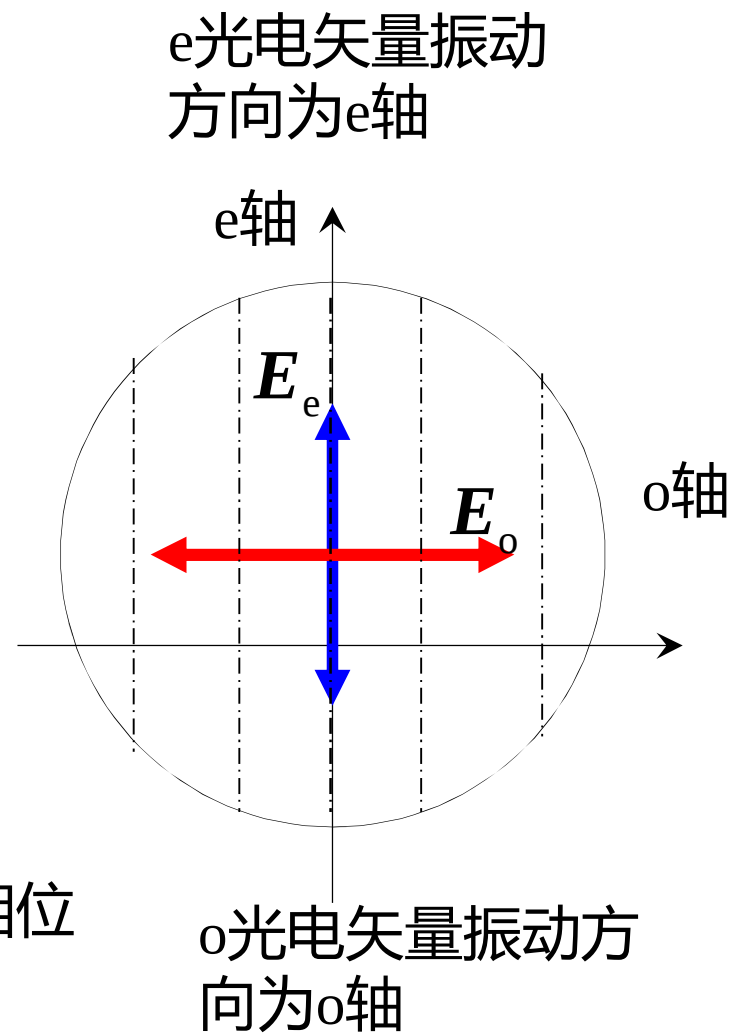
波片（波晶片）的相位延迟

- 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



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

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

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

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

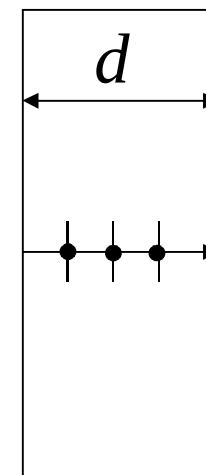
快轴：传播速度快的光矢量（light vector）的振动方向（轴）。

负晶体的e轴（平行于光轴），

正晶体的o轴（垂直于光轴）。

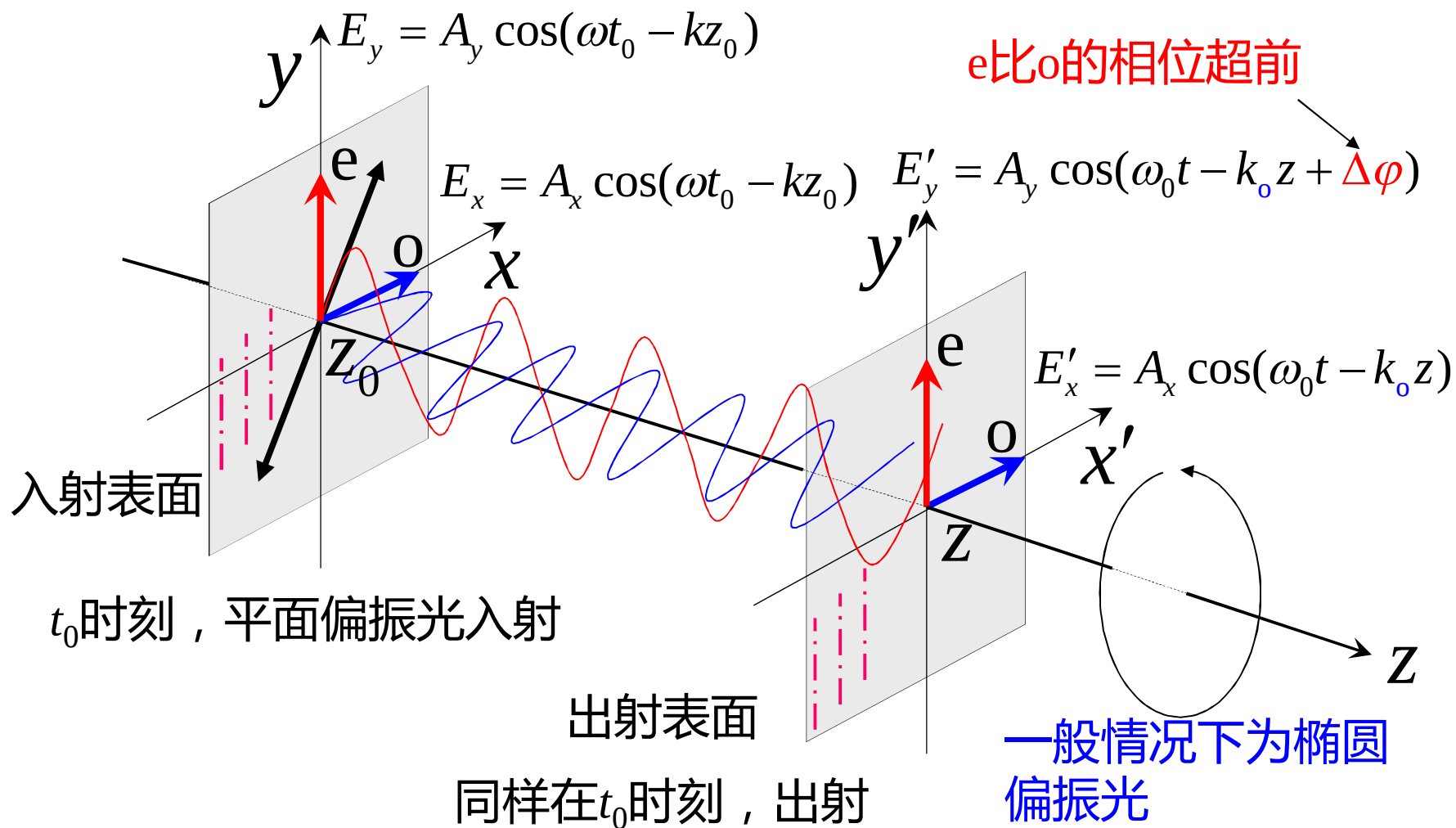
慢轴：传播速度慢的光的振动方向（轴）。

负晶体的o轴，正晶体的e轴。



6.2.2 波片

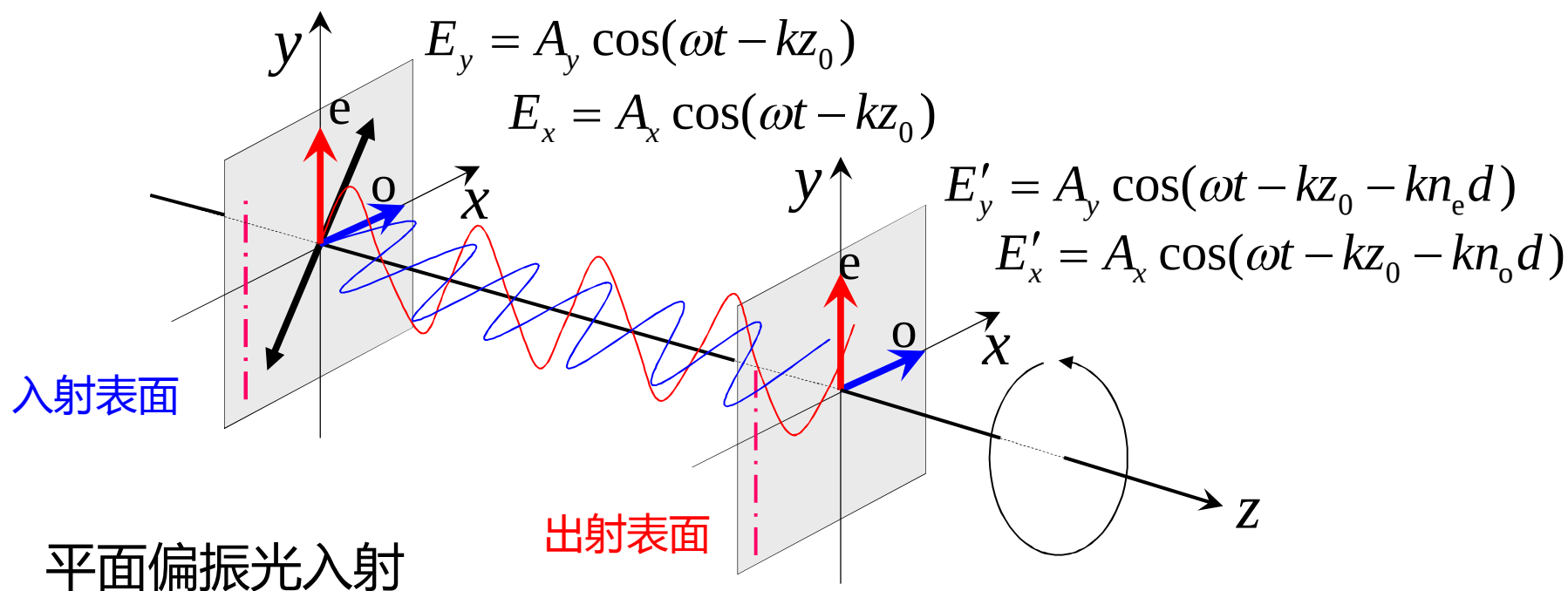
波片的相位延迟作用



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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{真空中波长}$$
$$\begin{cases} E'_x = A_x \cos \omega t \\ E'_y = A_y \cos(\omega t + \Delta\varphi) \end{cases}$$

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 δ ，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 δ 无关，保持不变。

6.2.3 相位补偿器

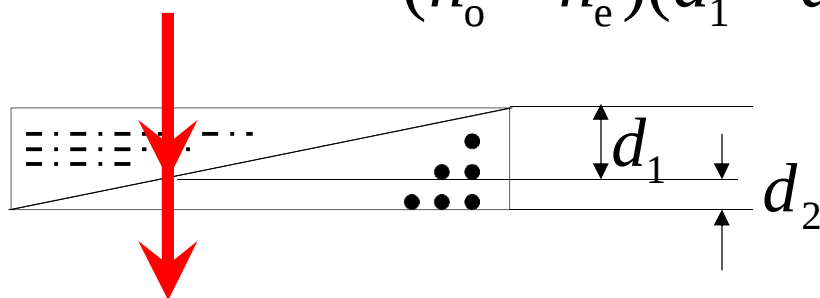
1. Babinet 补偿器

- 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 $L_{o1} = n_o d_1, L_{e1} = n_e d_1, L_{o2} = n_o d_2, L_{e2} = n_e d_2$

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

$$= (n_o - n_e)(d_1 - d_2) \quad \text{厚度差不同，光程差不同}$$



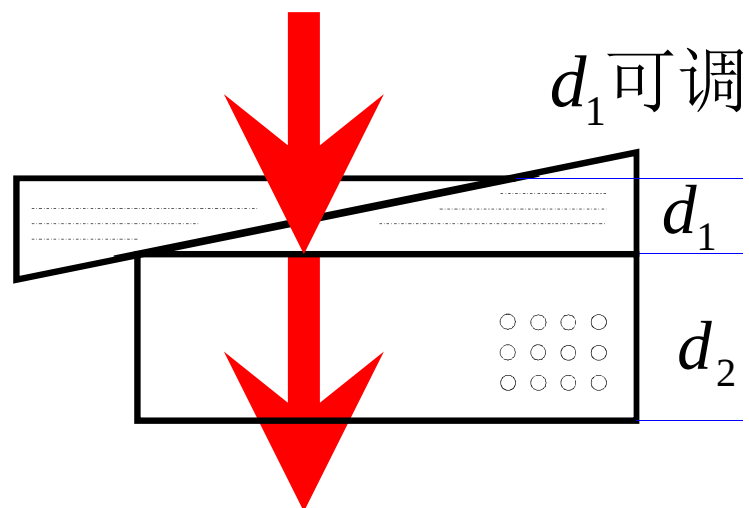
平移补偿器，可以使出射光两分量之间有不同的相位差

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



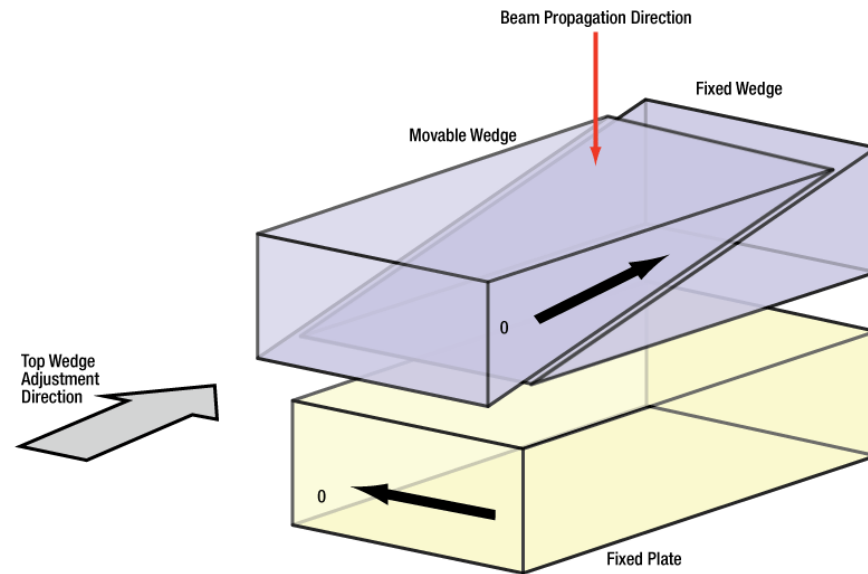
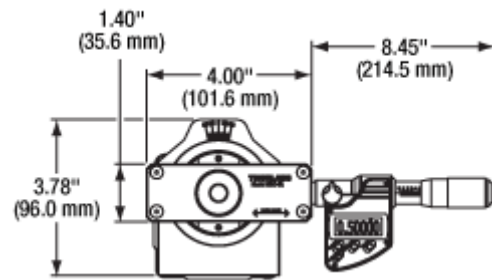
光程差 $\Delta = (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$

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

2 . Soleil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 (重排p390)

p.187: 1, 2, 3 (重排p394)

思考题：

在制作补偿器时，为什么不采用如图所示同样的棱镜来制作？

