

第3章 光的偏振

Polarization of Light

§ 3.1 自然光与偏振光（了解）

§ 3.2 线偏振光和部分偏振光（掌握）

§ 3.3 光通过单轴晶体时的双折射现象（掌握）

§ 3.4 光在晶体中的波面（了解）

§ 3.5 光在晶体中的传播方向（掌握）

§ 3.6 偏振器件（掌握）

§ 3.7 椭圆偏振光和圆偏振光（掌握）

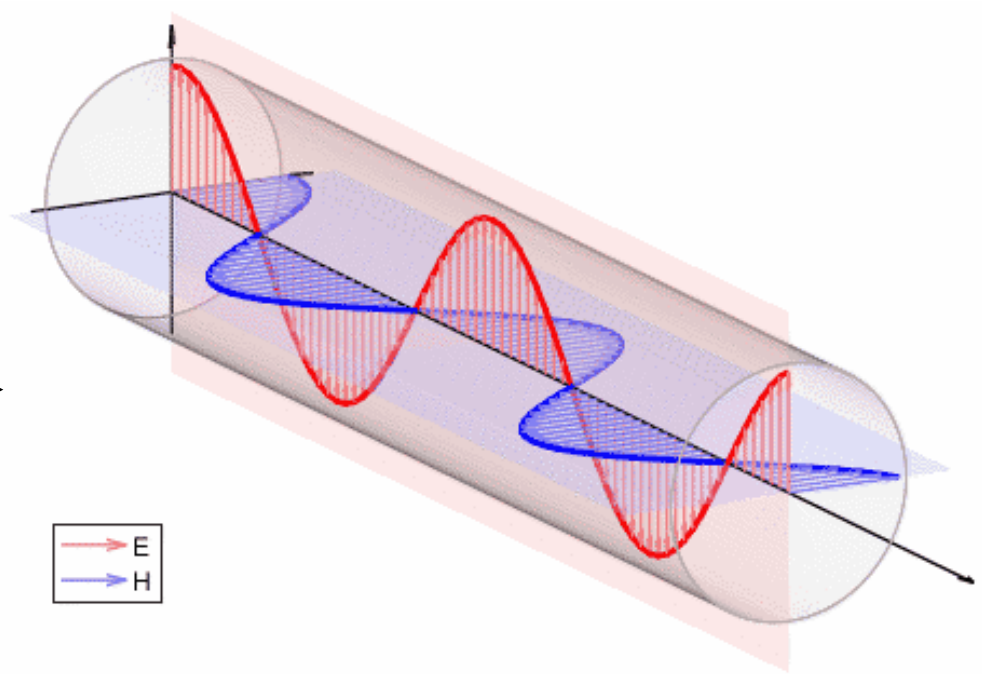
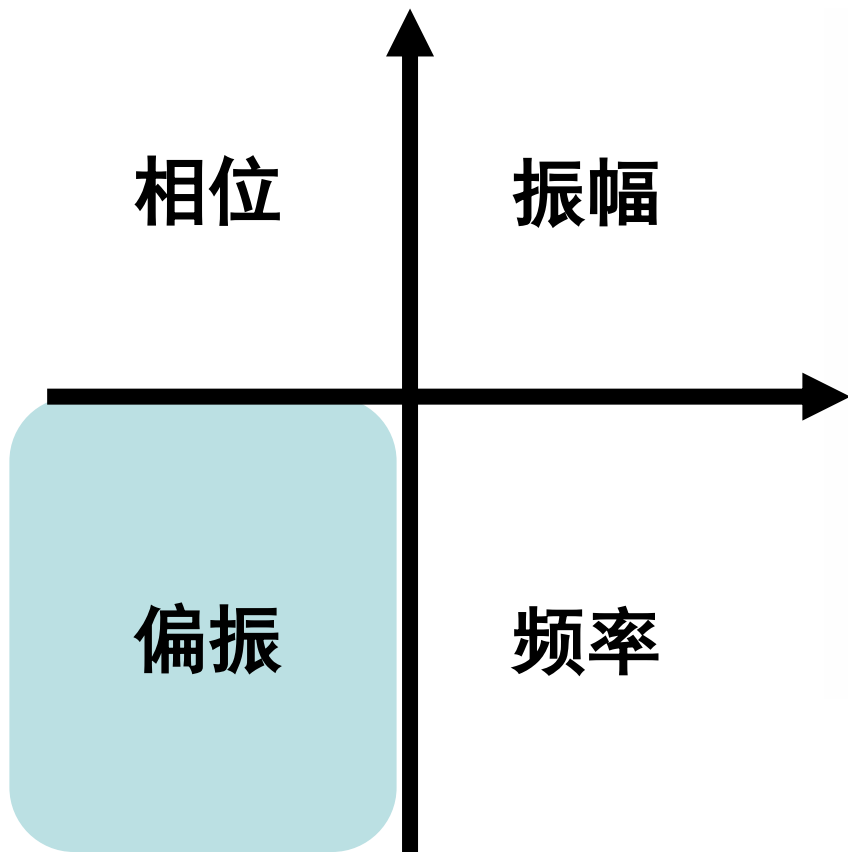
§ 3.8 偏振态的实验检验（掌握）

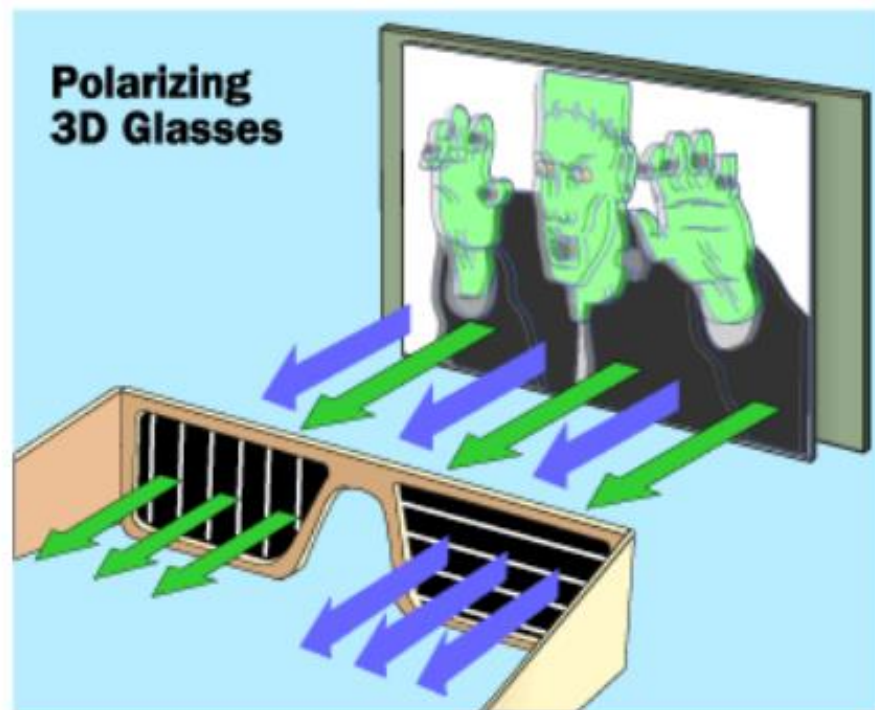
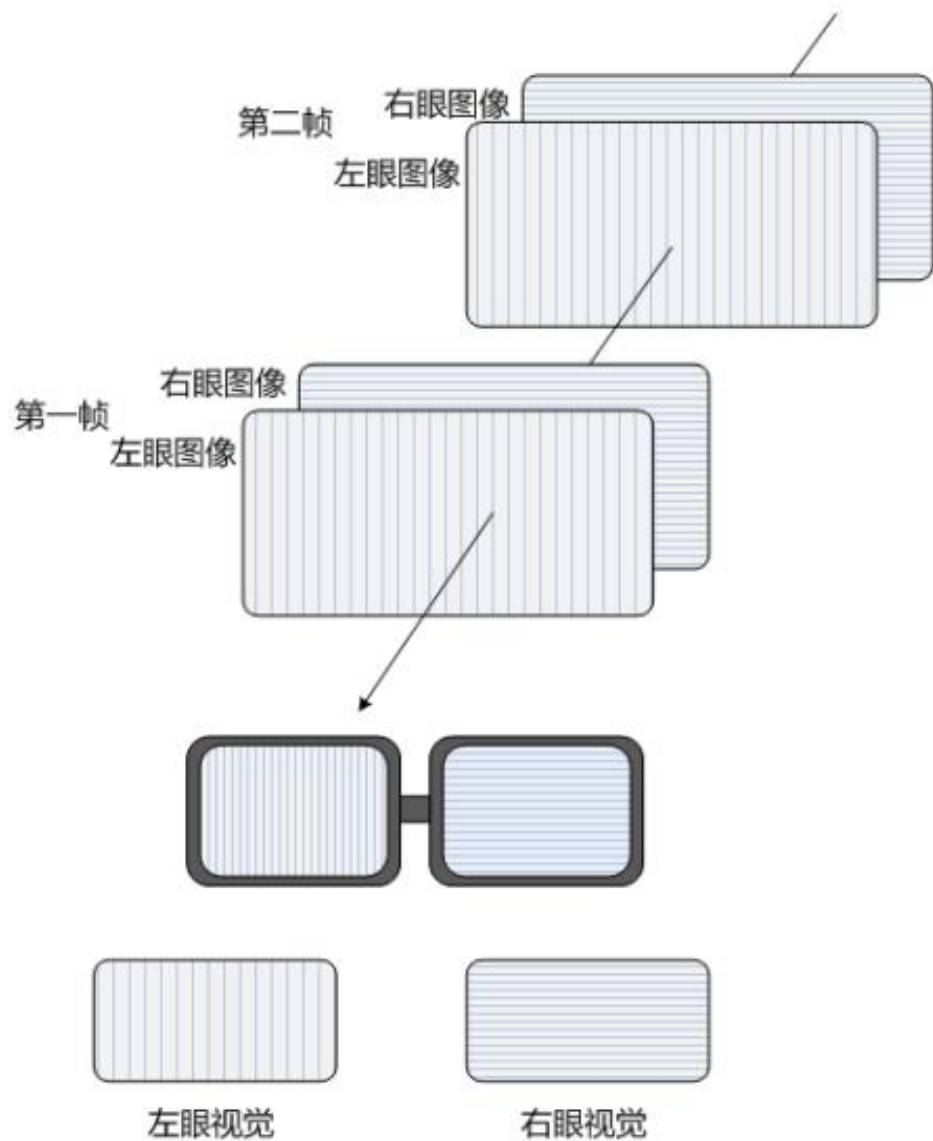
§ 3.9 偏振光的干涉（掌握）

§ 3.10 磁光效应和旋光效应（了解）

平面波表达式：

$$\bar{A} \exp(i \bar{k} \cdot \bar{r} + \omega t + \varphi_0)$$





偏光式立体眼镜

偏光滤镜



未使用偏光滤镜



使用偏光滤镜



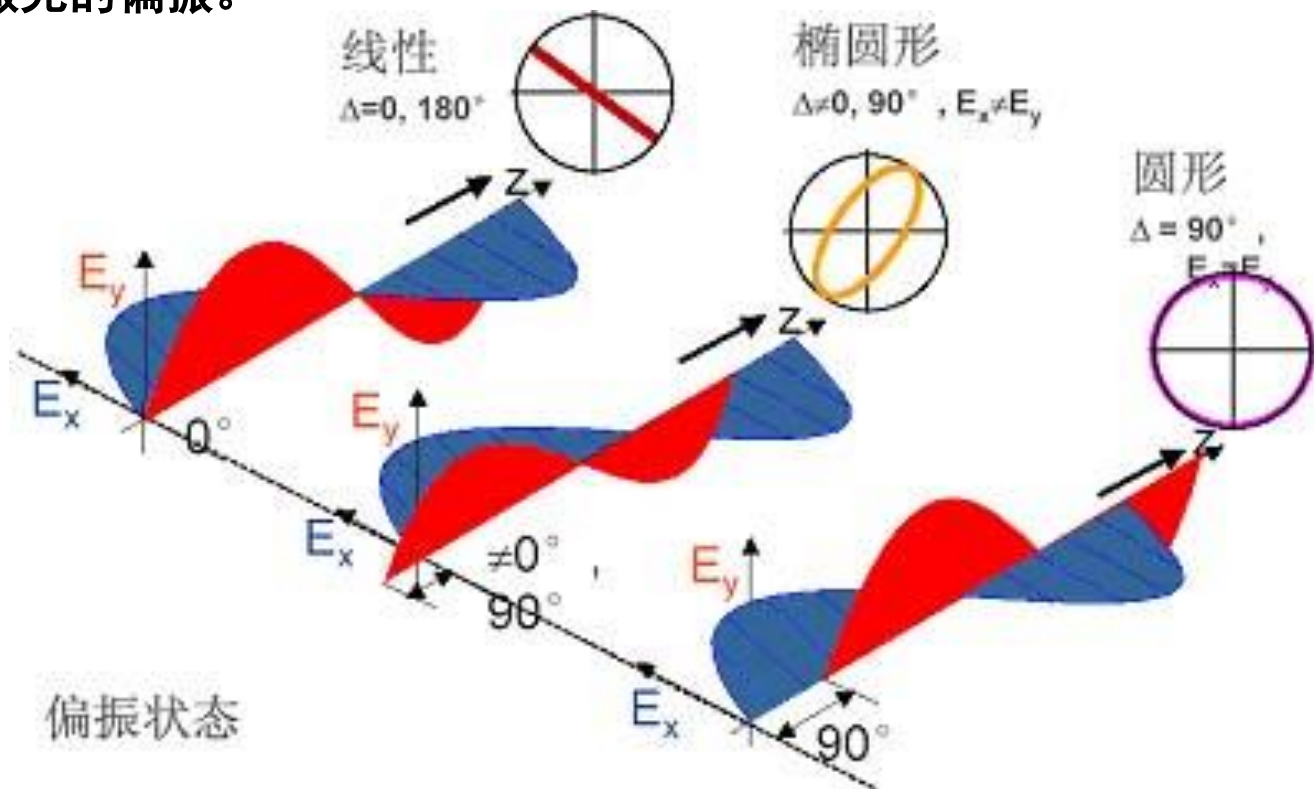
通过抑制反射光检测产品包装和印记



借助背光检测玻璃中的残余应力（包括应力的方向和大小）

➤ 知识窗：光的偏振(Polarization of Light)

光的偏振： 振动方向对于传播方向的不对称性叫做偏振，它是横波区别于其他纵波的一个最明显的标志。光波**电矢量**振动的空间分布对于光的传播方向**失去对称性**的现象叫做光的偏振。



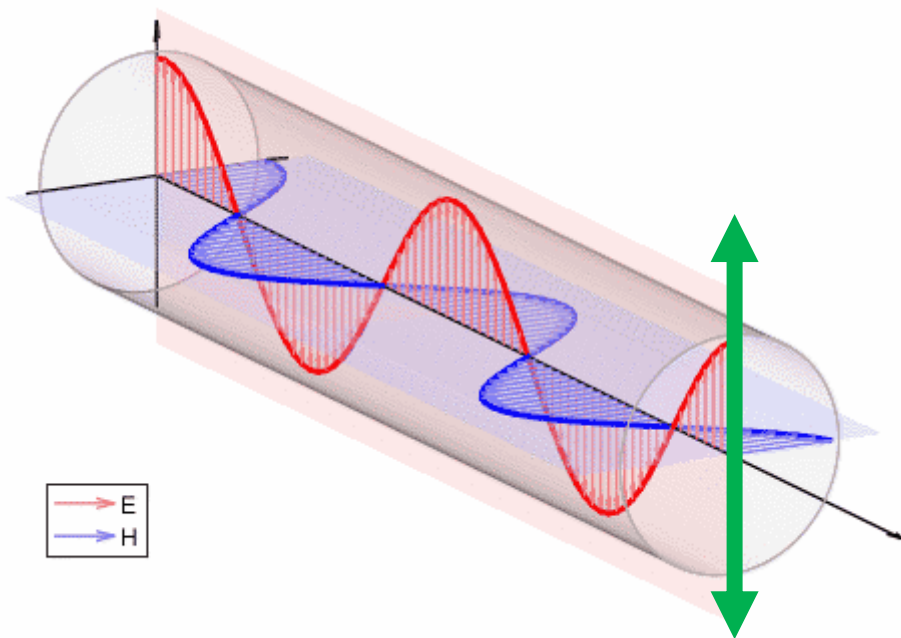
光的偏振**5种**可能的状态：**自然光、部分偏振光、线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光**

线偏振光：

光矢量的振动方向在传播过程中保持不变，只是它的大小随相位而改变。

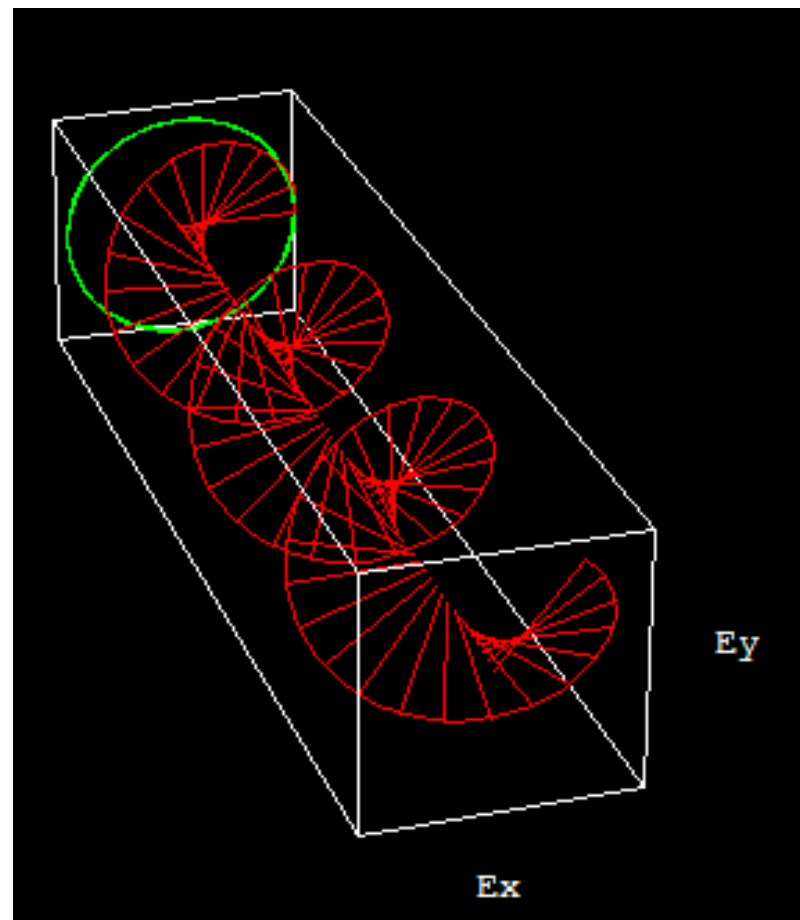
振动面：

光矢量与传播方向组成的面。



圆偏振光：

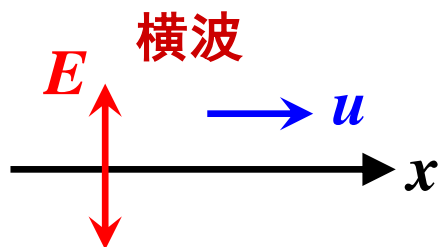
光矢量的大小不变，方向绕传播轴均匀转动，端点的轨迹是一个圆。



当迎着传播方向观察，
电矢量逆时针转动，称为左旋圆偏振光；
电矢量顺时针转动，称为右旋圆偏振光。

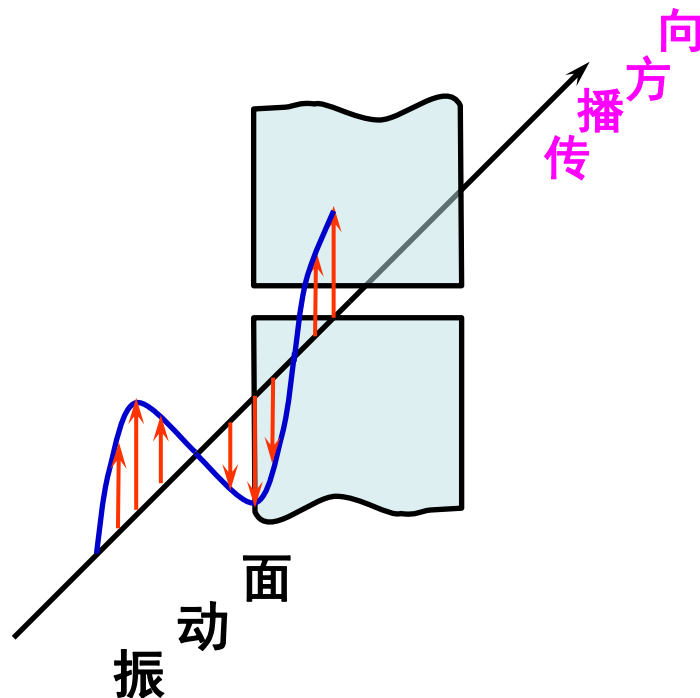
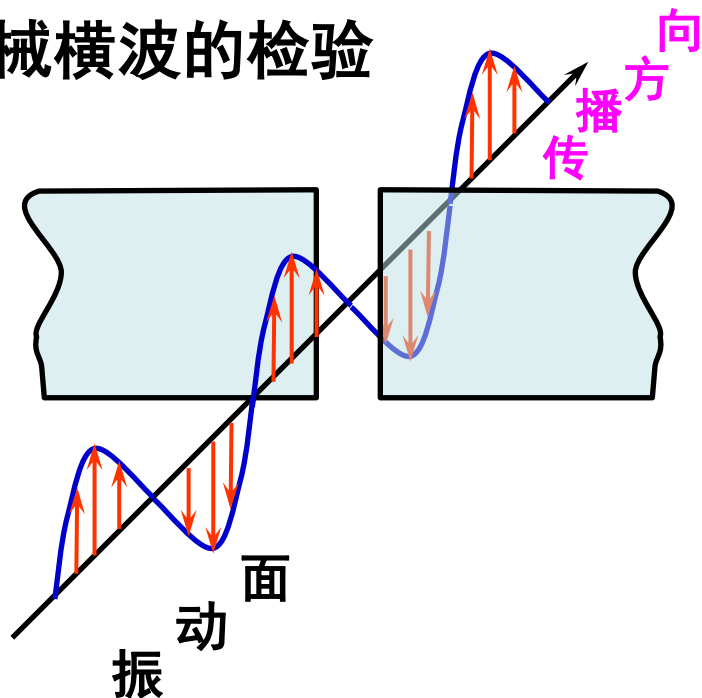
§3.1 自然光与偏振光

一、横波与偏振现象



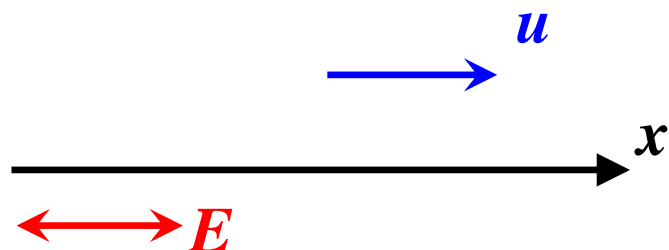
横波 (Transverse wave)：在传播介质中粒子的振动方向与波的传播方向垂直。

机械横波的检验

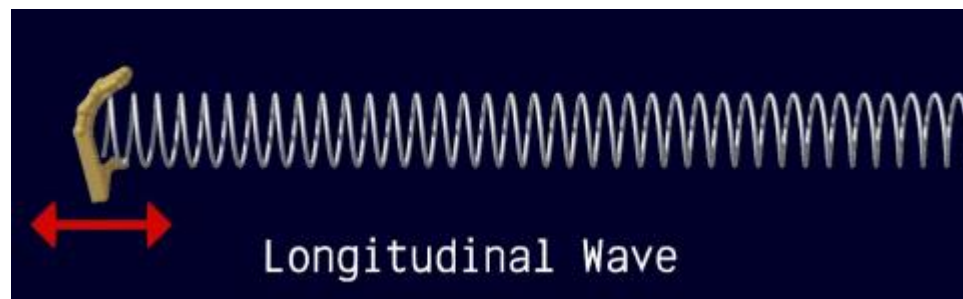


只有横波有偏振现象，而纵波无偏振问题！

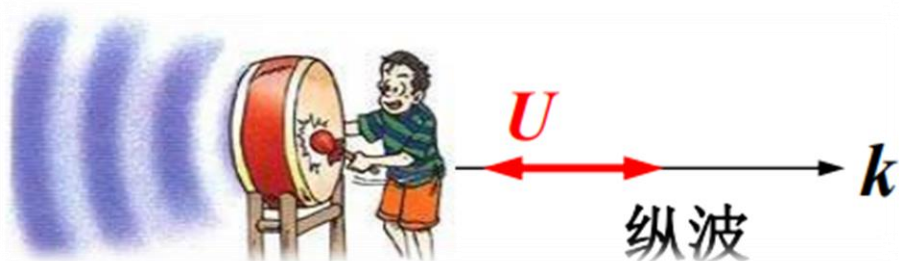
纵波



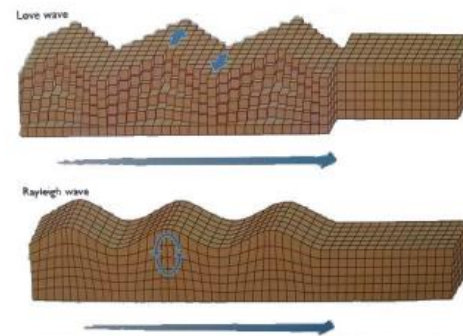
生活中的纵波



纵波（Longitudinal waves）：
在传播介质中粒子的振动方向与波的传播方向平行，也称P波。



只有横波有偏振现象，
而纵波无偏振问题！



地震波—张量波

二、普通光源发光的特点：间歇、随机

◆一个原子发光



发光时间 10^{-8} s (10 ns)

下一次发光：**偶然**

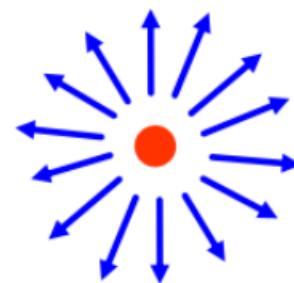
一个原子两次发光比较：

振动方向

波列长度

初位相 ($0-2\pi$)

均不一定相同



自发辐射



◆N个原子发光

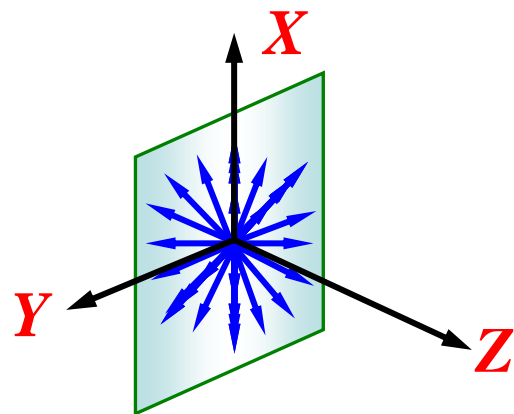
每个原子之间发光更无规律可言

普通光源发光：

在人们观察的时间内有**无穷次**的发光按统计的观点人们观察到的将是：在垂直传播方向的平面内

各个方向的光振动**全有**

各个振动方向的**强度相等**

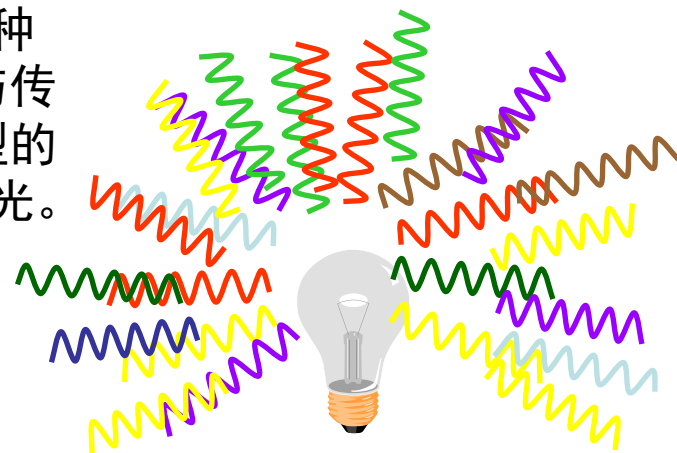


是各个振动的
无规混杂

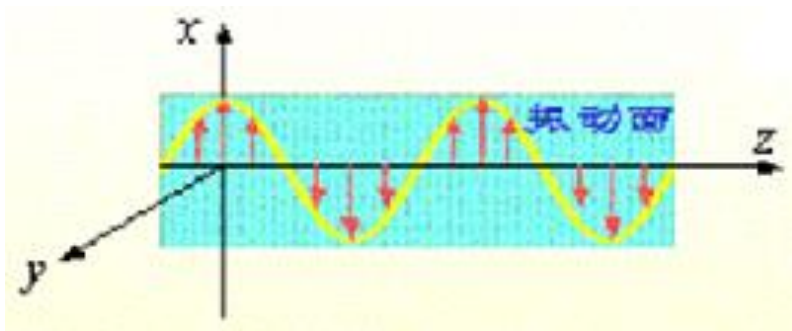
乱!

自然光

光场中的任一点、任一传播方向，都同时存在着大量各种随机取向的横振动，且没有固定的位相差，因而，在与传播方向垂直的任一方向上的振动都是相等的。这种类型的光称为自然光。一般的热辐射光源发出的光波都是自然光。



三、自然光与偏振光

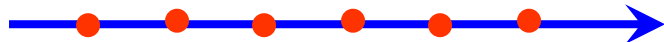


◆ 线偏振光(Linearly polarized beam)

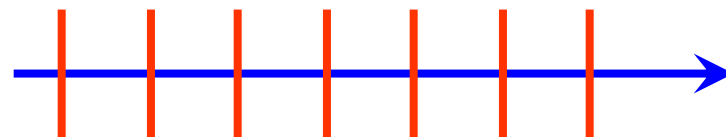
光振动矢量只在一个方向振动

振动面：光振动矢量与光的传播方向构成的平面

线偏振光的图示法：



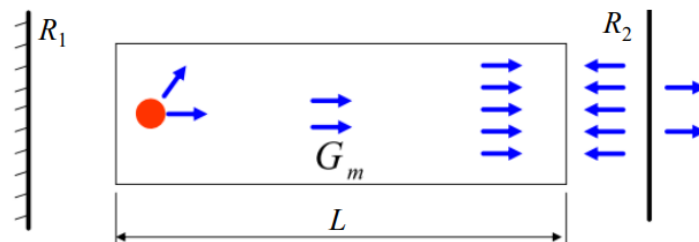
振动面与屏幕垂直



屏幕即为振动面

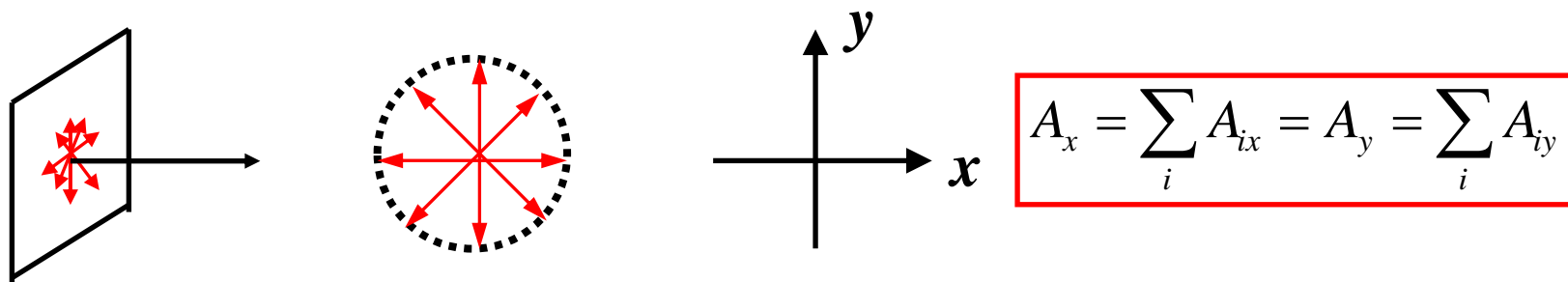
普通光源：一个原子的一次发光一定是偏振光，不同次发光无规律

激光器：可以实现偏振光发射
(偏振选择)



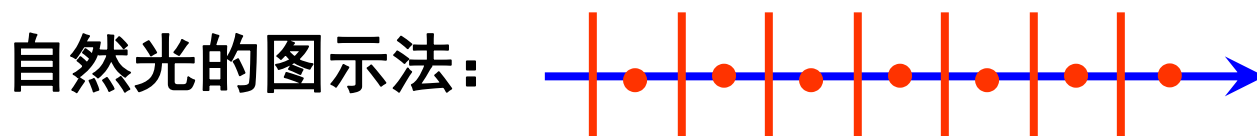
◆自然光（普通光源发光）

平均效果：任何方向上均有相同的平均振幅和能量，**没有哪个方向的振动占优势**



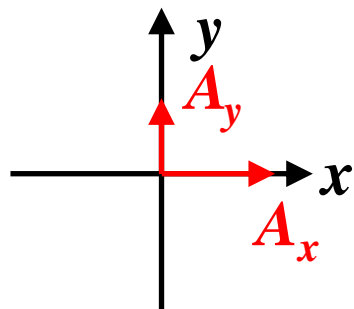
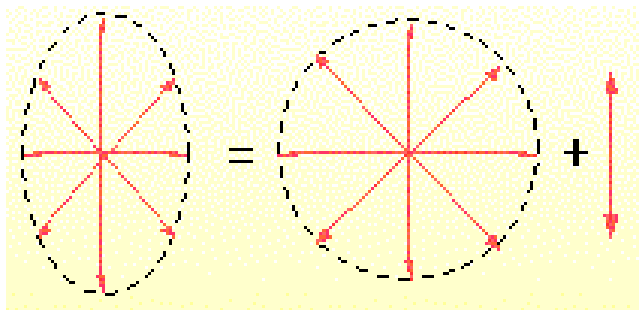
把自然光中所有方向的振动都投影到相互垂直的两个方向上，这两个方向上的平均振幅相等。

自然光可分解成两个 $\left\{ \begin{array}{l} \text{相互垂直} \\ \text{振幅相等} \\ \text{无固定位相关系} \end{array} \right\}$ 的线偏振光



◆部分偏振光

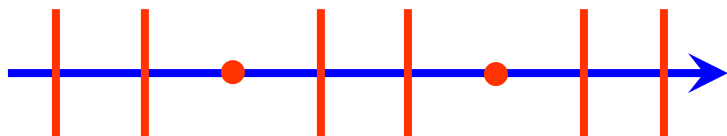
振动方向随机变化，某一方向振幅最大（振动占优势），与其垂直方向振幅最小。



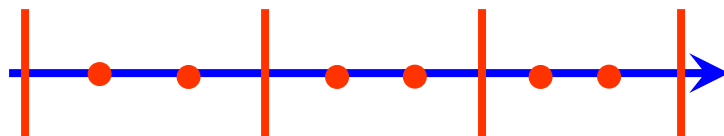
$$A_x = \sum_i A_{ix} \neq A_y = \sum_i A_{iy}$$

部分偏振光可视为一个平面偏振光和一个自然光的混合

部分偏振光的图示法：



// 占优



⊥ 占优

四、偏振度 (P201)

定义偏振度:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

I_{\max} : 强度最大方向光强

I_{\min} : 强度最小方向光强

$$\begin{cases} P = 0 & \text{偏振度最小, 自然光} \\ 0 < P < 1 & \text{部分偏振光} \\ P = 1 & \text{偏振度最大, 线偏振光} \end{cases}$$

从实用的角度看, 首先必须解决**两大问题**:

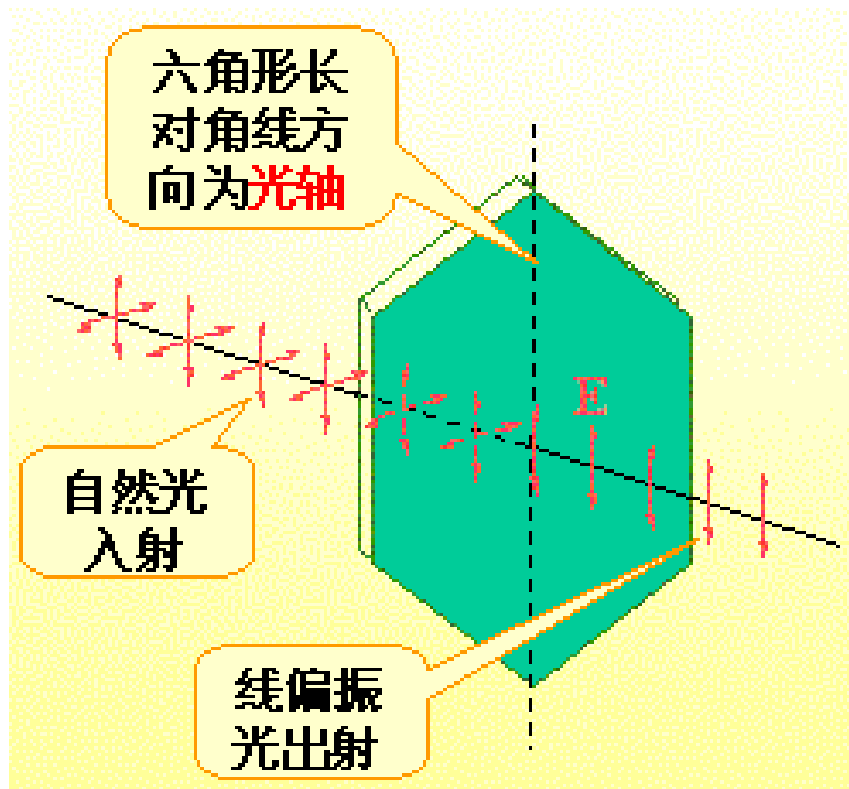
1. 如何判断光源的偏振态, **偏振光的检验**
2. 如何从普通光源中取得偏振光

- 利用反射和折射
- 利用二向色性
- 利用晶体的双折射

起偏振器: 用某种方式从自然光中获得偏振光的光学元件

§ 3.2 线偏振光与部分偏振光

一、二向色性与偏振片



二向色性：某些各向异性晶体对不同方向光振动具有选择吸收的性质

天然晶体中，电气石（六角形片状）具有最强的二向色性

$E // \text{光轴}$ ：吸收很少
通过较多

$E \perp \text{光轴}$ ：吸收较多
通过很少

1mm 厚的电气石晶体可把垂直于光轴振动的光矢量全部吸收！



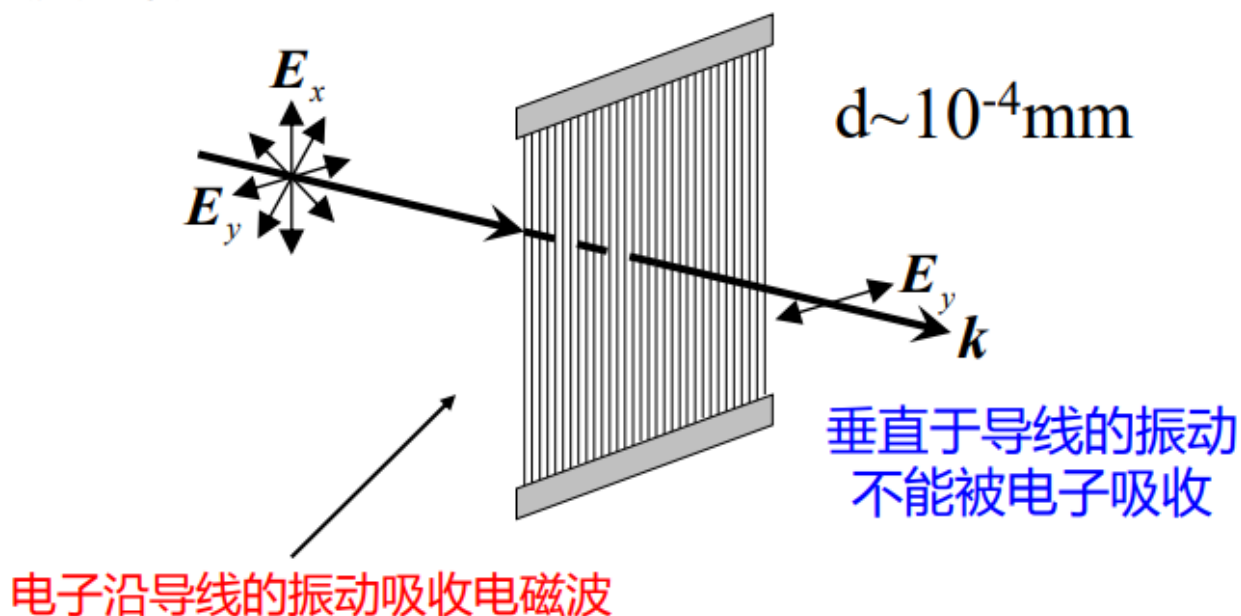
方解石双折射

二、人造偏振片

偏振片：只让某一振动方向光波通过的光学元件称为偏振片。这个方向被称为偏振片的透振方向或偏振方向。

几种典型的偏振片（偏光片）

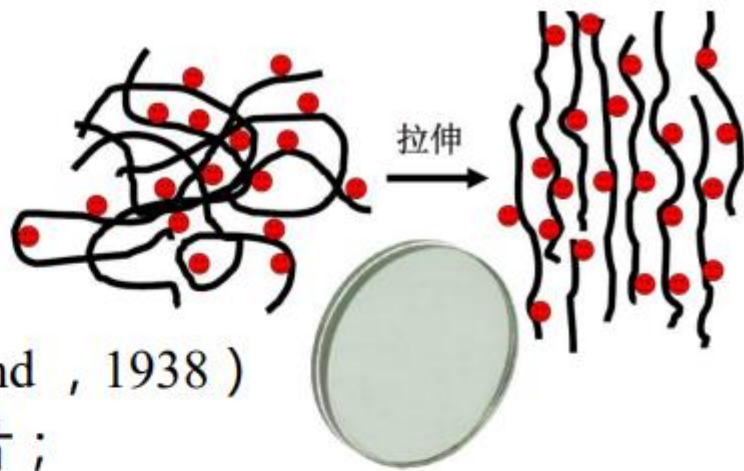
（1）金质线栅



(2) 人造偏振片—二向色性偏振片 包括J、H、K等类型的人造偏振片



Edwin Herbert Land
(1909~1991)



H偏振片 (E. H. Land, 1938)

- ① 聚烯醇薄膜基片；
- ② 在蒸汽中均匀加热拉伸，使长键分子整齐排列；
- ③ 浸碘，使碘分子聚合到已被拉直的分子链上；
- ④ 干燥后，形成导电的碘链
- ⑤ 称为性能优良的偏振片

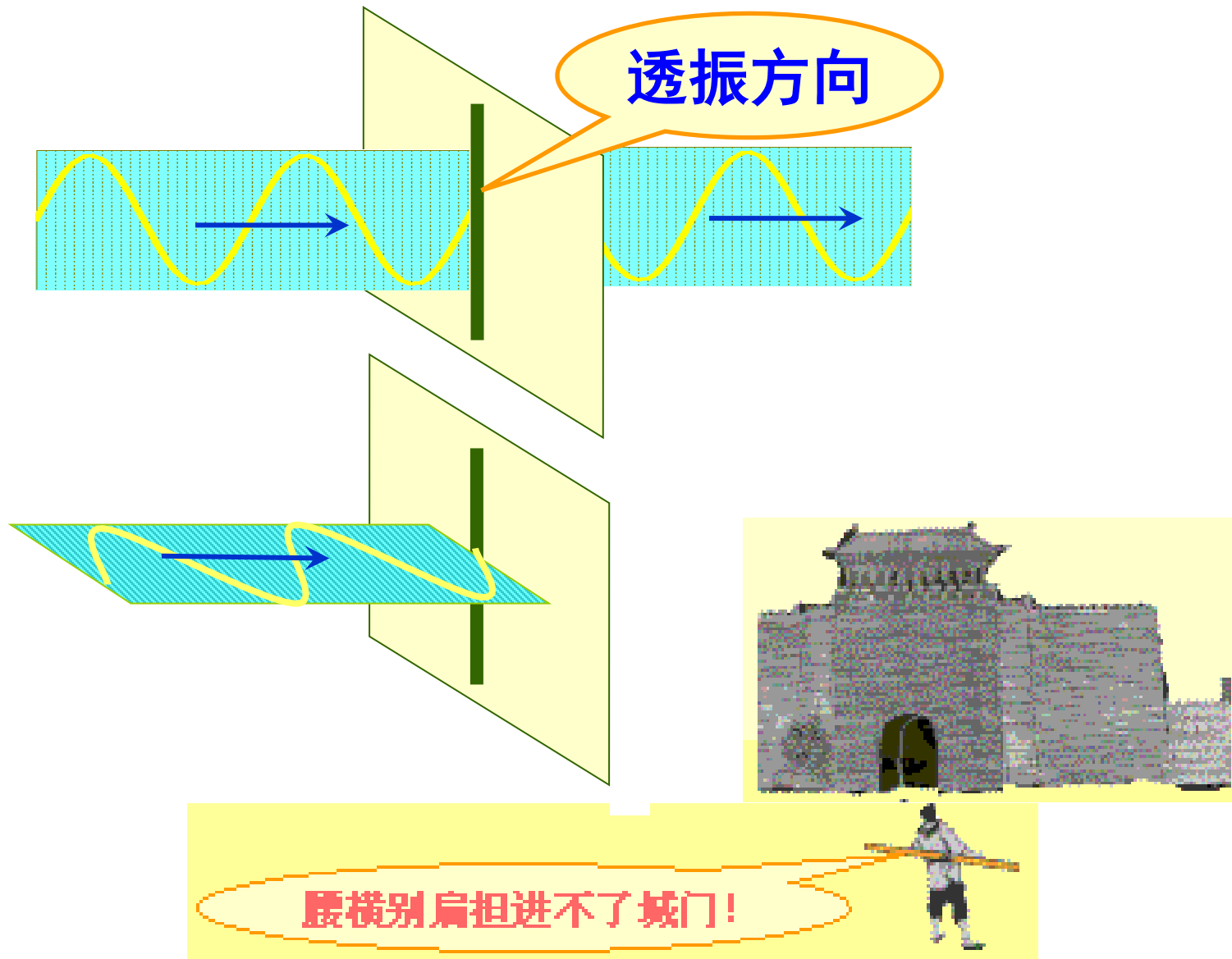
造价低廉；面积大，通光孔径大；轻便。

优点：偏振度高达99%以上，可用于整个可见光波段，是目前使用最广泛的人造偏振片

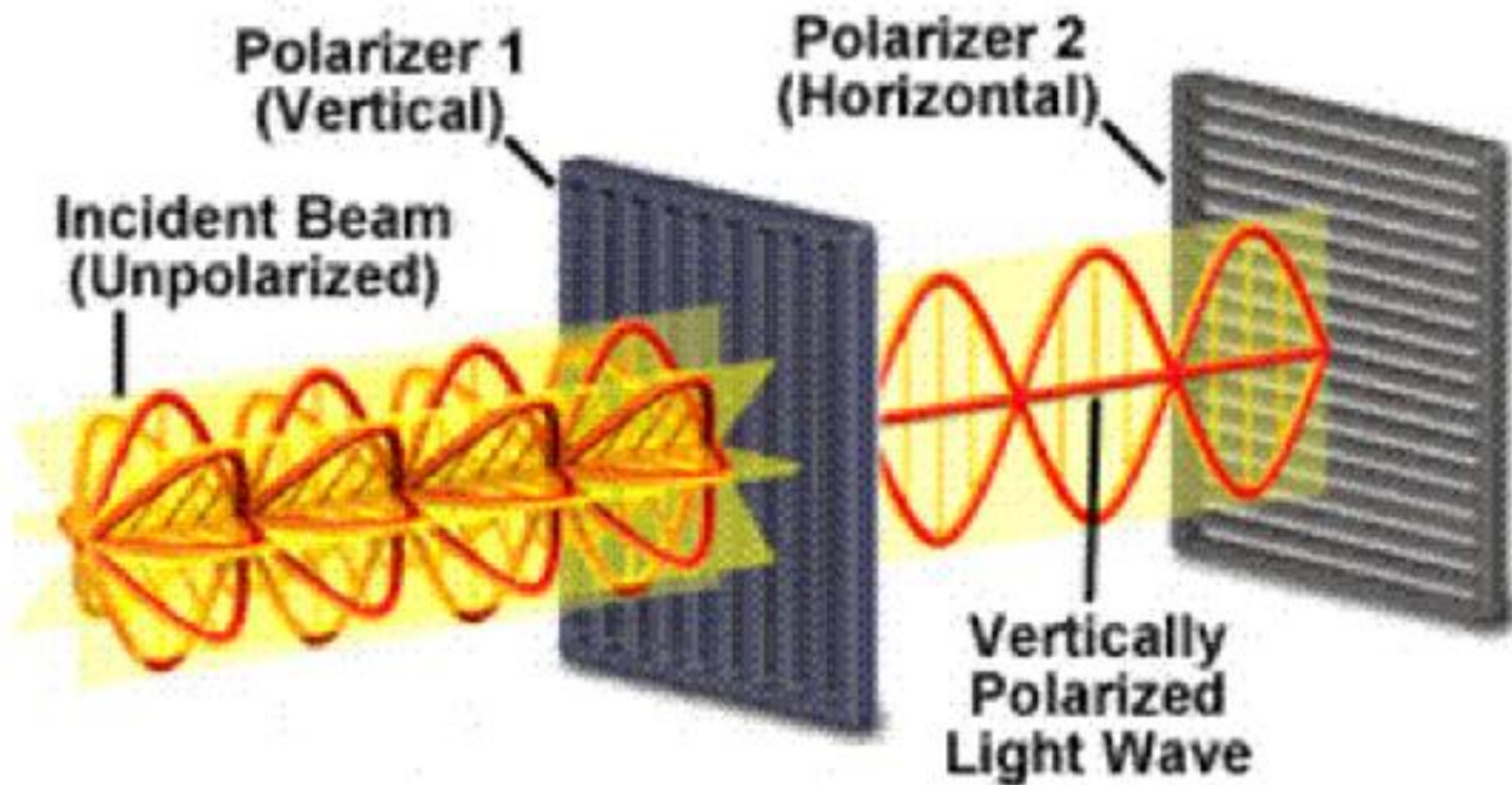
缺点：强度差，不能受潮，易退偏。

带有选择性吸收，使透射的偏振光略带颜色。

形象说明偏振片的原理



Polarization of Light Waves



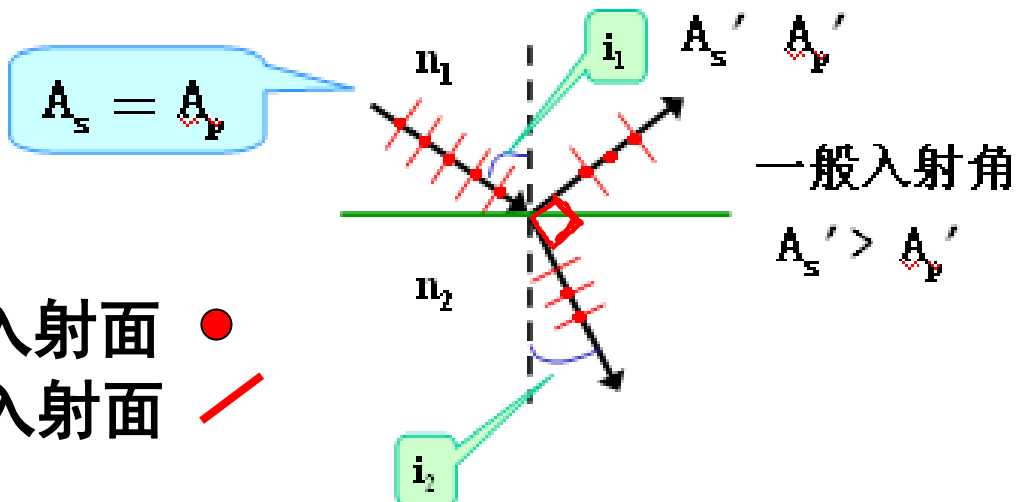
三、反射光的偏振态 (熟练运用结论)

1. 一般情况

自然光分解成：

S波：光矢量垂直于入射面 ●

P波：光矢量平行于入射面 /



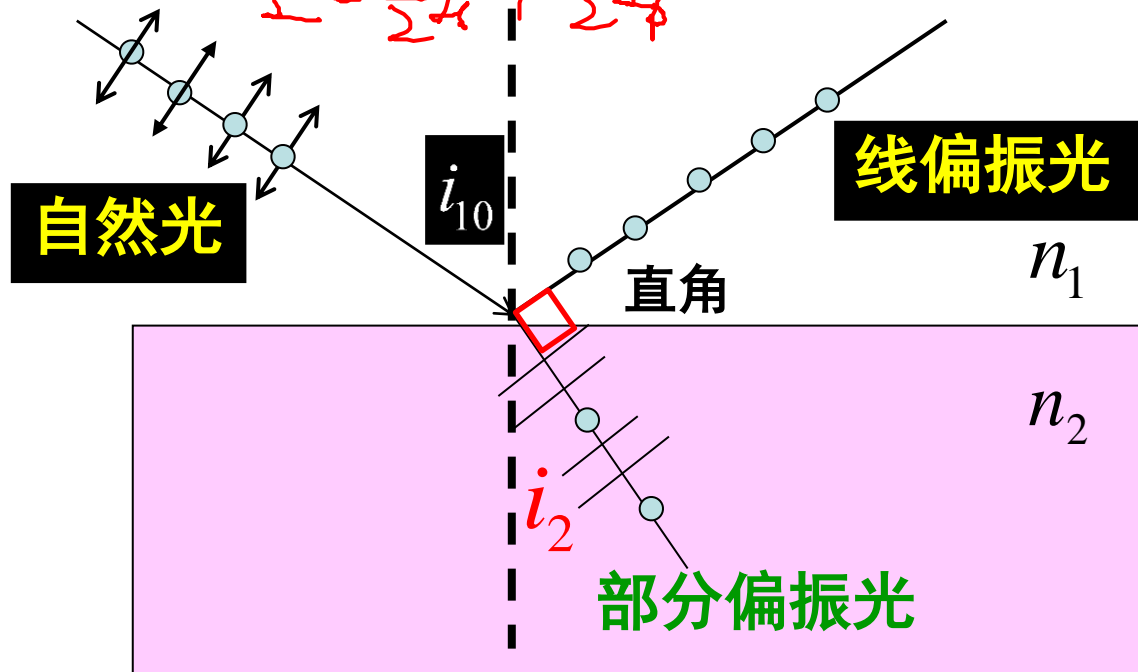
由菲涅耳公式 (P30 1.5节)：

$$\frac{A'_s}{A_s} = -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)} \quad \frac{A'_p}{A_p} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}$$

一般入射角 i_1 ($0^\circ, 90^\circ$ 除外)，反射光和透射光均为部分偏振光

2. 特殊情况（布儒斯特定律Brewster's Law）

$$I = \frac{1}{2}I_i + \frac{1}{2}I_r$$



$$i_{10} + i_2 = \frac{\pi}{2}$$

费涅耳公式

$$\frac{A'_p}{A_p} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} = 0$$

反射光为光矢量垂直于入射面的完全偏振光

S波

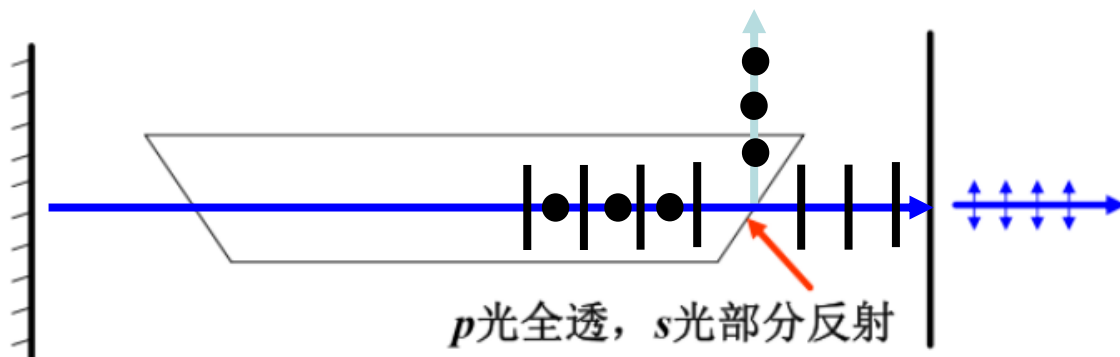
透射光为部分偏振光

i_{10} 称为起偏振角—布儒斯特角

$$\tan i_{10} = \frac{n_2}{n_1}$$

布儒斯特窗在激光器谐振腔中的作用

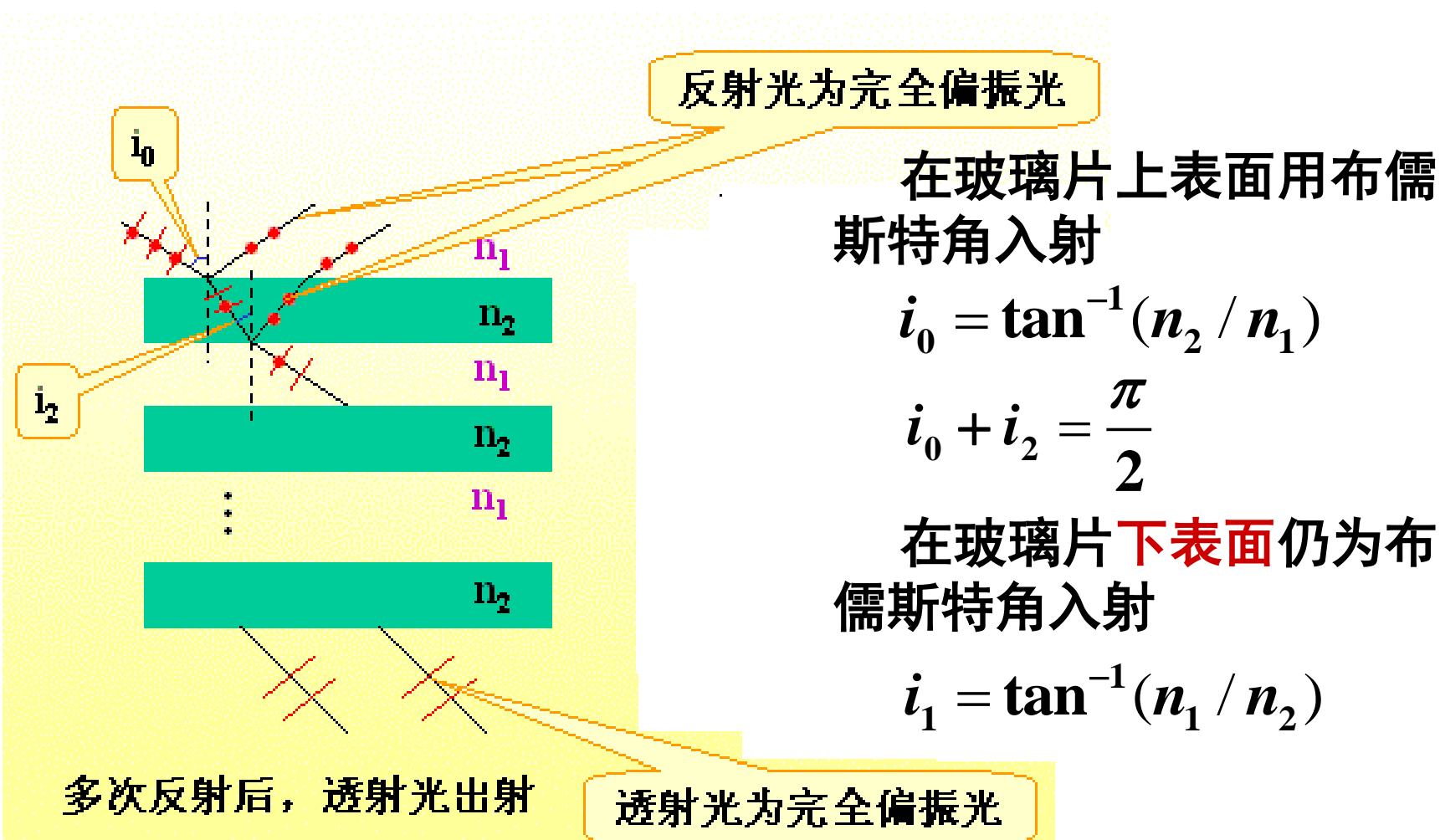
每一次反射，s波损失15%



s 光被抑制，不能成长为激光； p 光透过 → 偏振选择性

- 计算布鲁斯特角 θ_B
 - 光从空气 ($n_1=1$) 正入射到玻璃 ($n_2=1.5$) 表面
 - 计算全反射角 θ_C
 - 有半波损失吗?
 - 光从玻璃正入射到空气表面
 - 计算全反射角 θ_C
 - 有半波损失吗?

3. 用玻璃片堆获得线偏振光



• 玻璃 $n_2=1.5$,

布儒斯特角

$$i_0 = 56.3^\circ$$

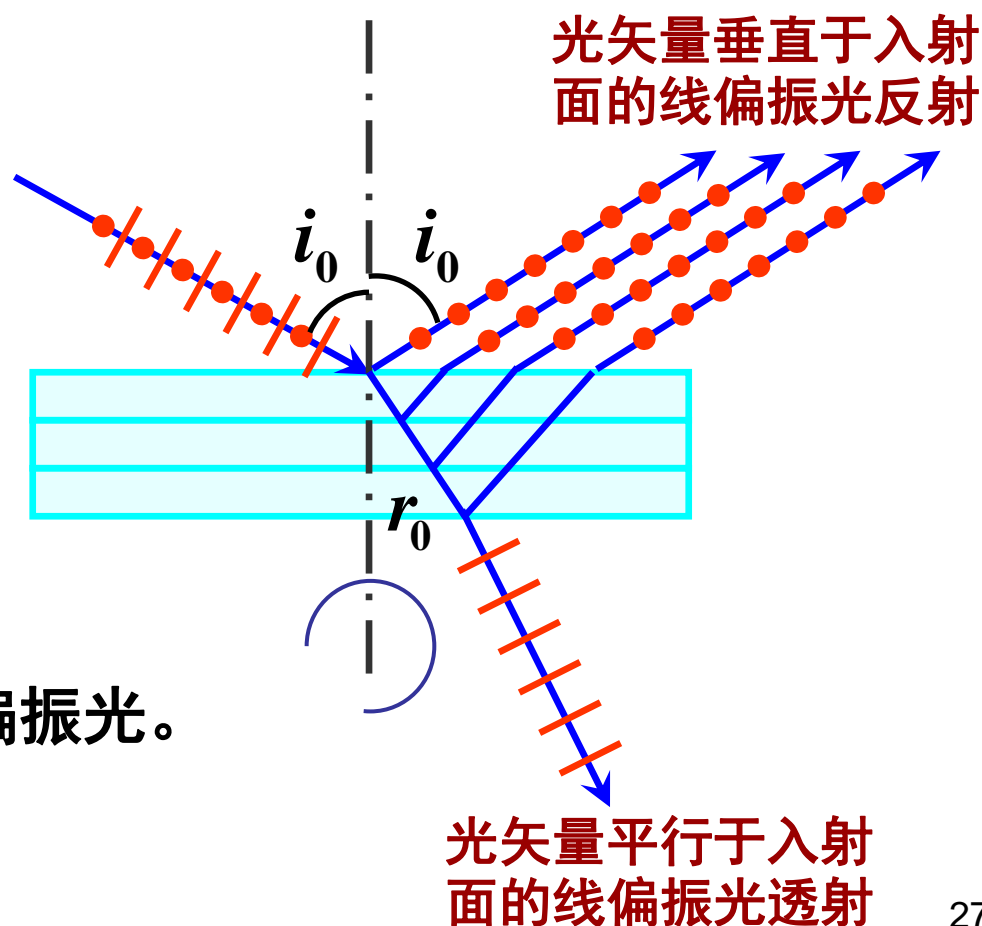
• 水 $n_2=1.33$,

$$i_0 = 53.1^\circ$$

玻璃片堆

玻璃堆可产生较强的反射偏振光。

$$\tan i_0 = \frac{n_2}{n_1}$$



在图像拍摄时，为了避免图像中的某些区域发生光反射和过度曝光现象，可使用偏振滤光片选择性抑制线性偏振光。



未加偏光镜

加偏光镜后

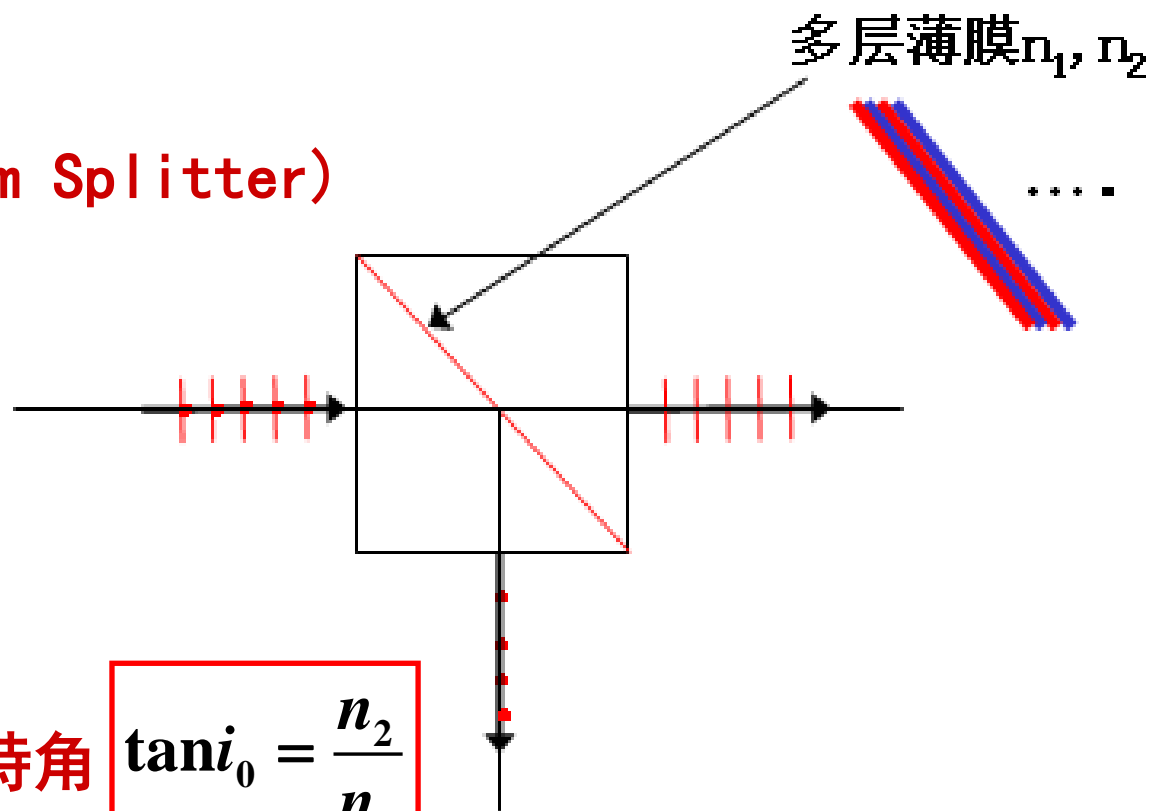




薄膜偏振分光棱镜

(Polarization Beam Splitter)

PBS



四、马吕斯定律 (Law of Malus)

➤人物介绍：马吕斯

马吕斯 (Etienne Louis Malus 1775-1812)法国物理学家及军事工程师。出生于巴黎，1796年毕业于巴黎工艺学院，曾在工程兵部队中任职。1808年起在巴黎工艺学院工作。1810年被选为巴黎科学院院士，曾获得过伦敦皇家学会奖章。



马吕斯从事光学方面的研究。1808年发现反射时光的偏振，确定了偏振光强度变化的规律（现称为马吕斯定律）。他研究了光在晶体中的双折射现象，1811年，他与J. 毕奥各自独立地发现折射时光的偏振，提出了确定晶体光轴的方法，研制成一系列偏振仪器。

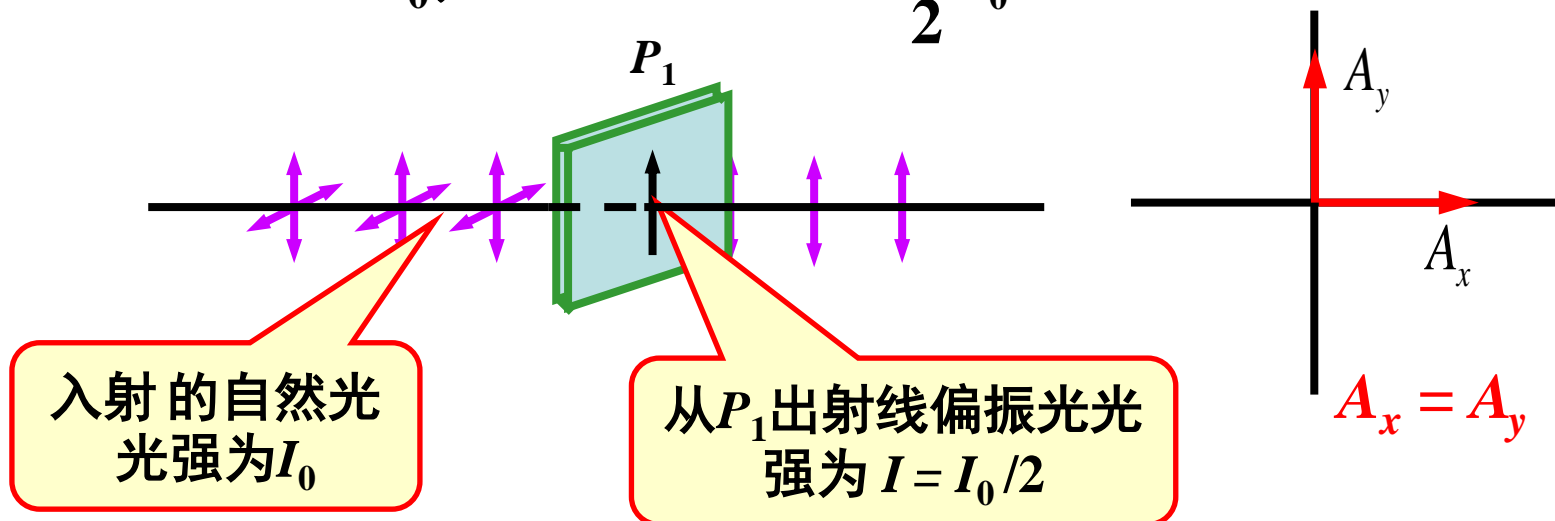
1808年法国军事工程师马吕斯 (E.L. Malus 1775-1812) 针对法兰西科学院的悬赏“给出双折射的数学理论，并用实验证实之”，对冰洲石的双折射现象进行了研究，首次将“偏振”概念用于描述光学现象。

四、马吕斯定律

偏振片可用于：① 使自然光变成线偏振光→起偏器
② 鉴别自然光、线偏振光、部分偏振光→检偏器

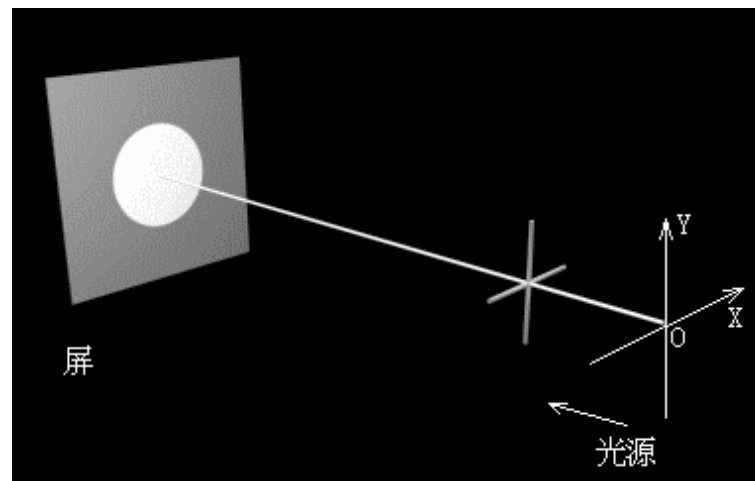
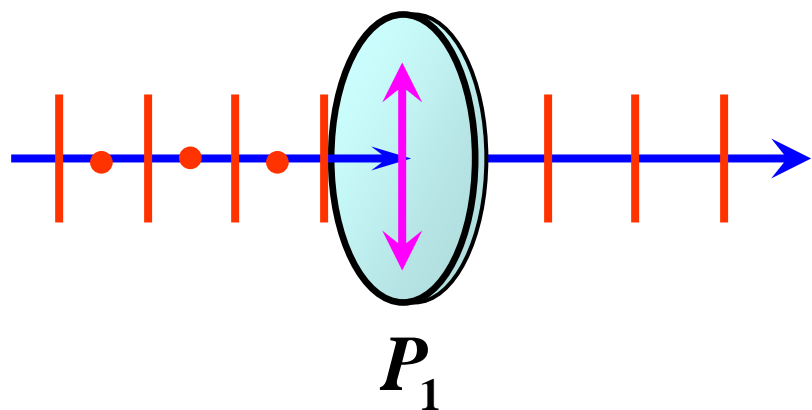
1. 自然光通过起偏器的情形

若入射光为 I_0 ，有出射光： $I = \frac{1}{2} I_0$

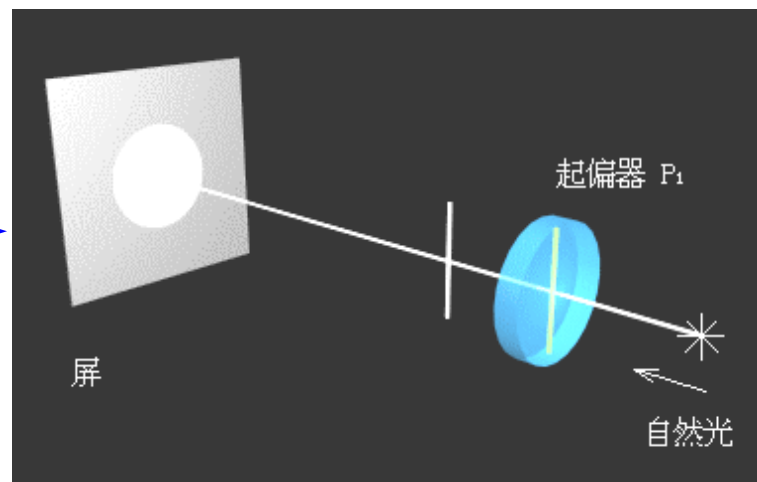
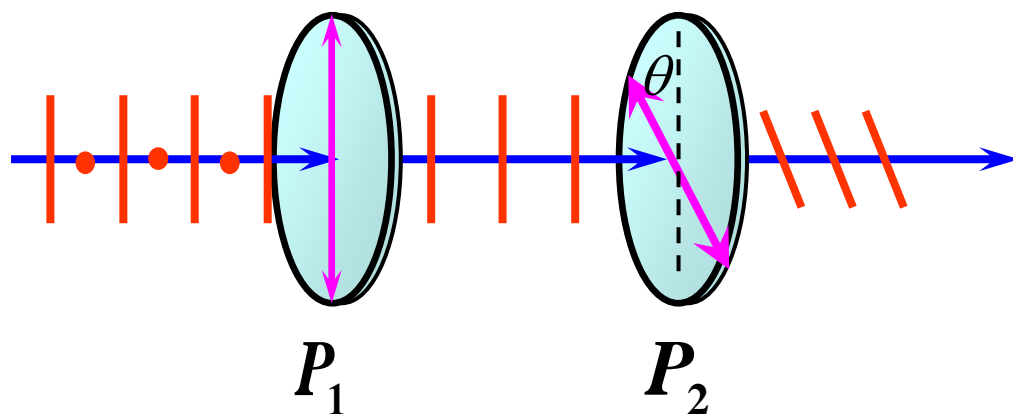


该偏振片可从自然光中取得线偏振光所以称为起偏器

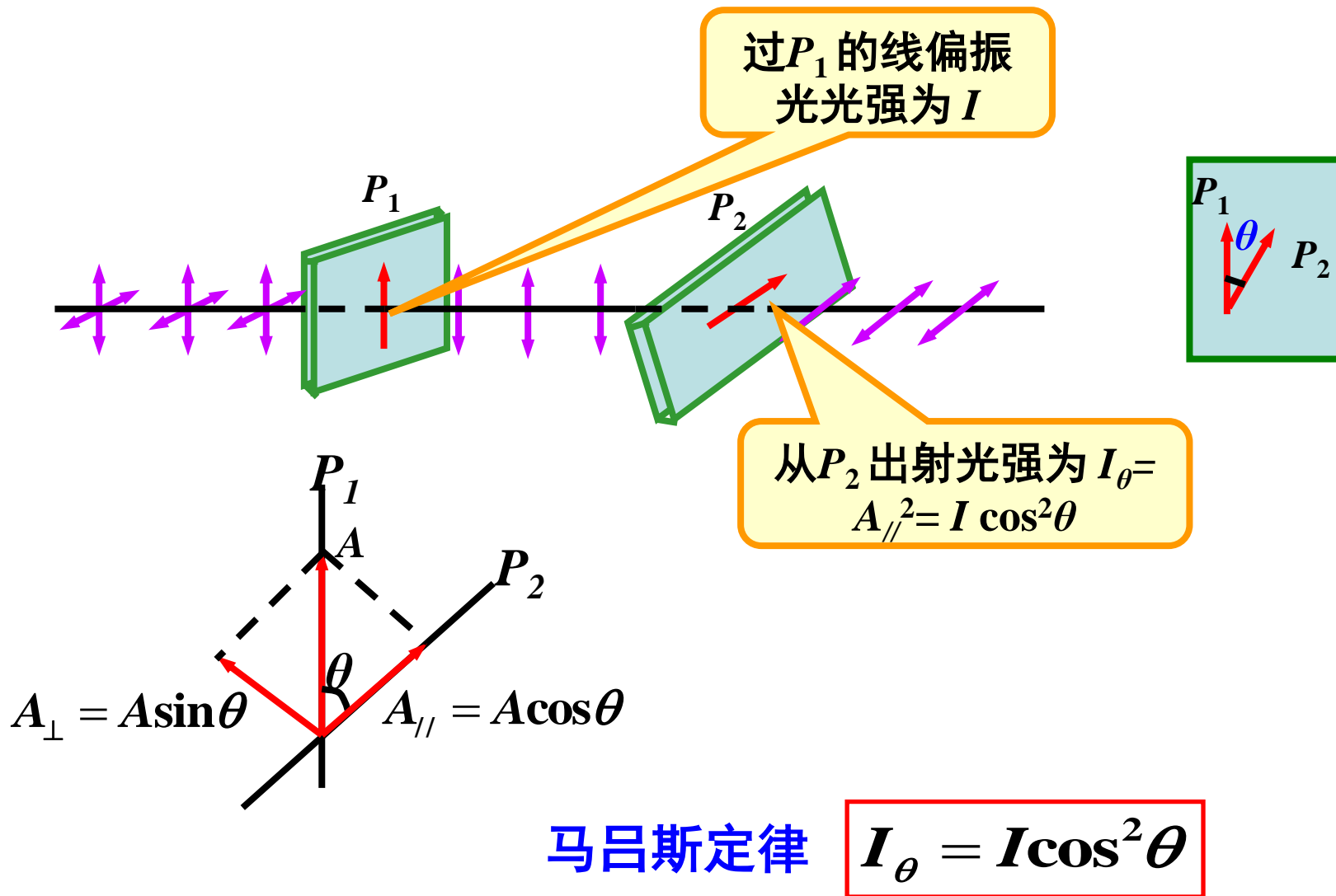
➤ **起偏** 将自然光转变成偏振光的过程。

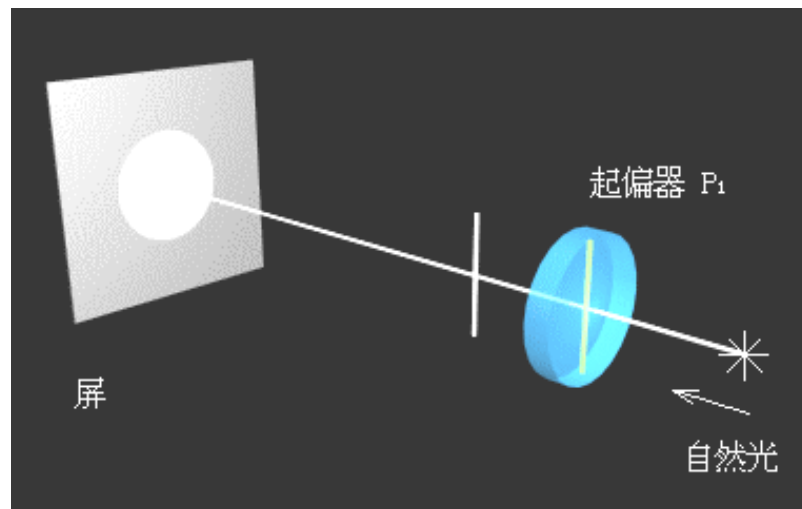
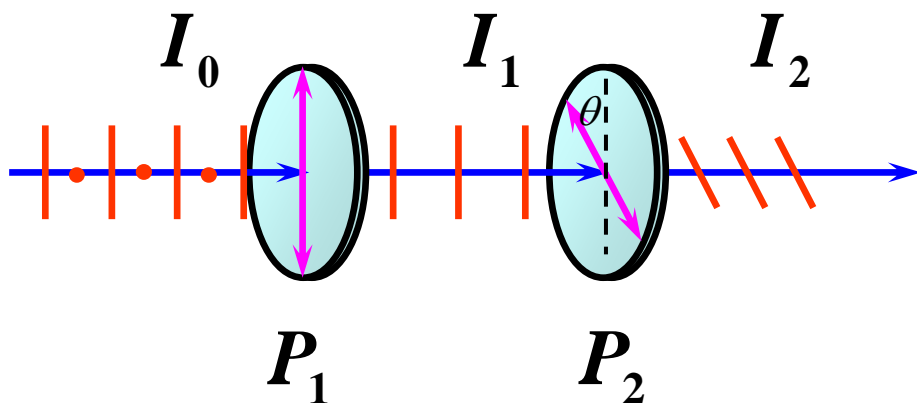


➤ **检偏** 检测偏振光的过程。



2. 线偏振光通过起偏器的情形





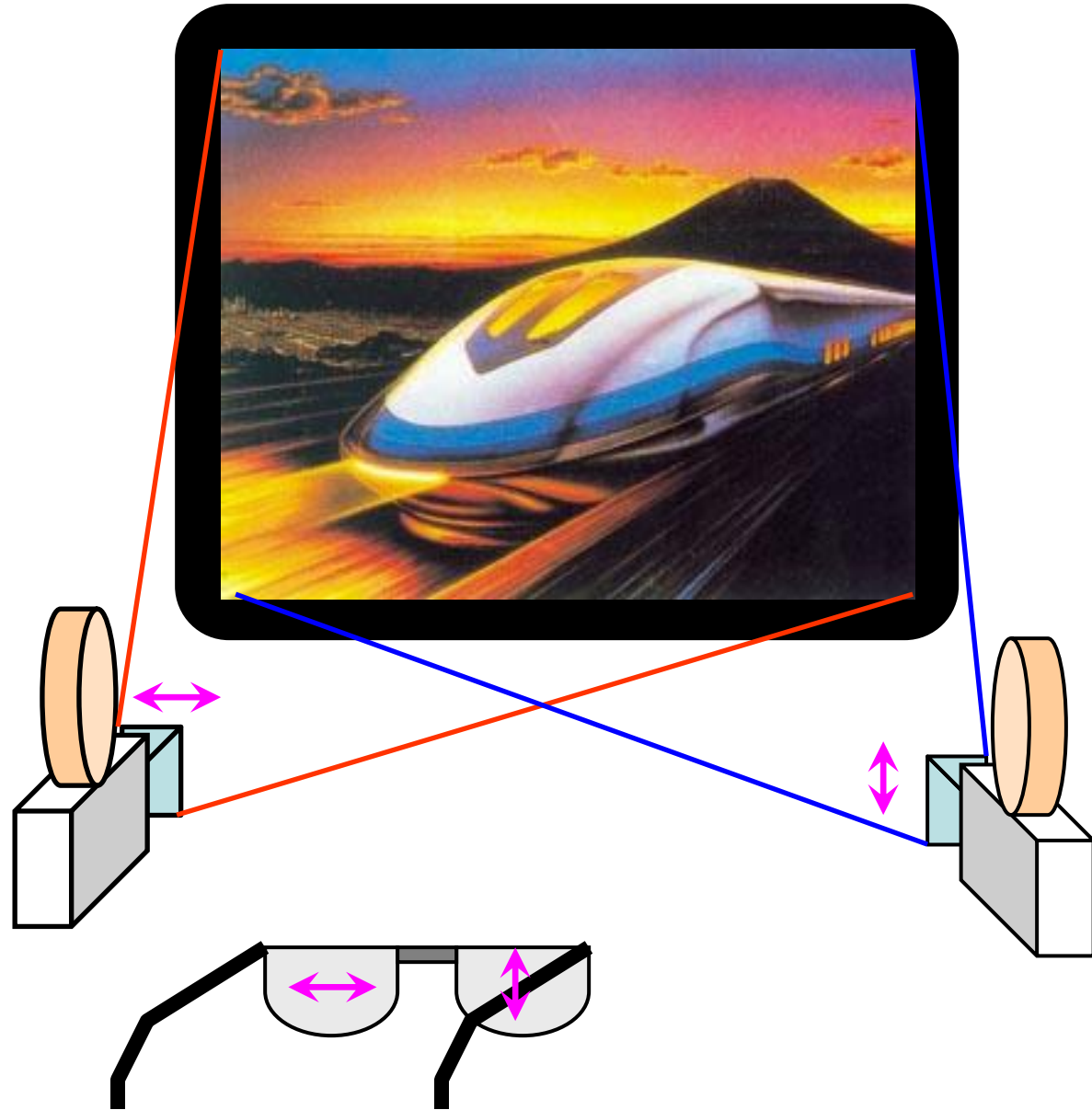
马吕斯定律

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta$$

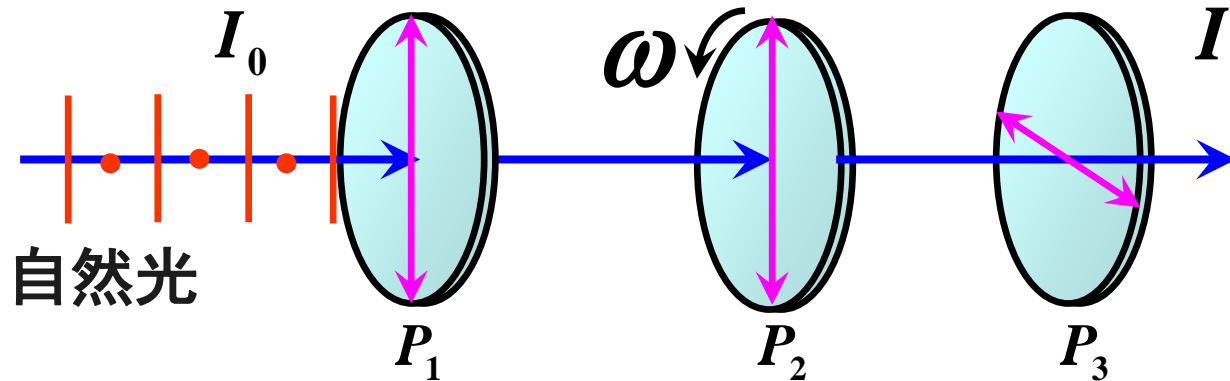
讨论:

1. 当 $\theta = 0$ 或 $\theta = \pi$ 时, $I_2 = I_1$
2. 当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 或 $\theta = \frac{3\pi}{2}$ 时, $I_2 = 0$

立体电影



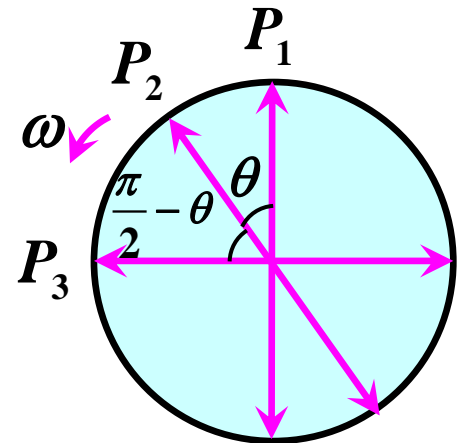
例(P245 5.4) 有三个偏振片堆叠在一起，第一块与第三块的偏振片化方向相互垂直，第二块和第一块的偏振化方向相互平行，然后第二块偏振片以恒定的角速度 ω 绕光传播的方向旋转，设入射自然光的光强为 I_0 。试证明：此自然光通过这一系统后，出射光的光强为

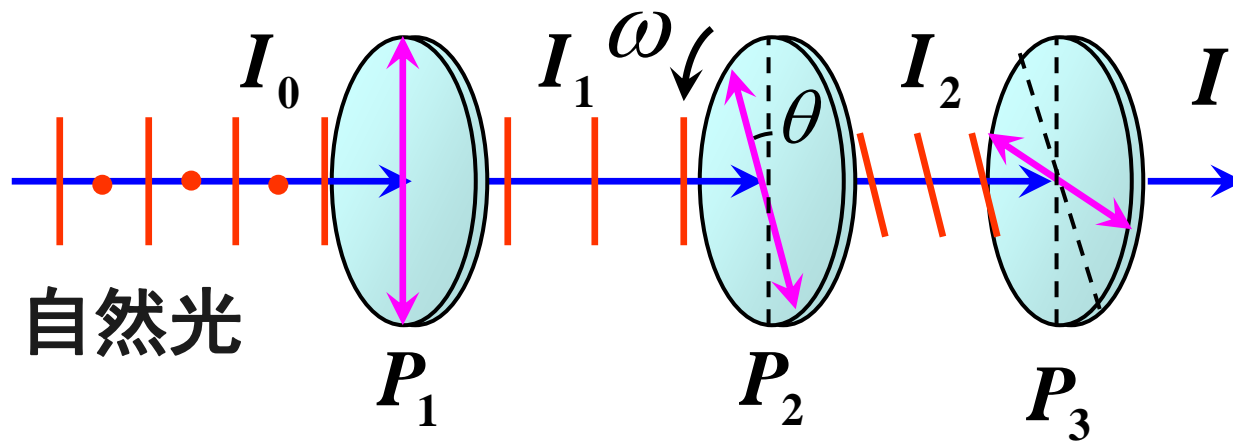
$$I = I_0(1 - \cos 4\omega t)/16$$


证明: 如图所示, 在 t 时刻

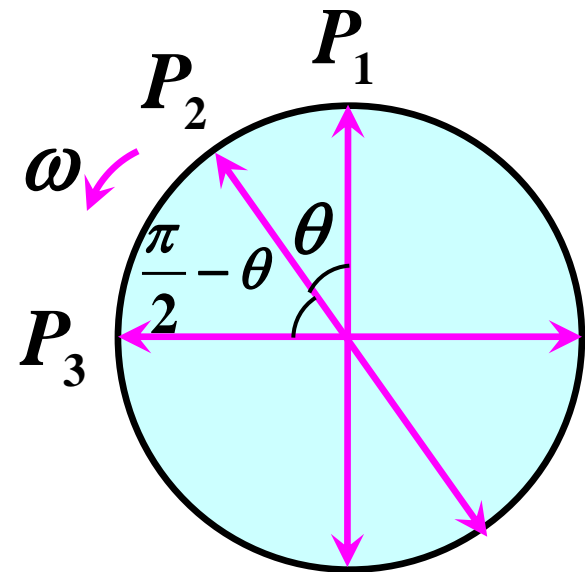
$$I_1 = I_0/2, \quad I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

$$I = I_2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) = \frac{I_0 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{2}$$





$$\begin{aligned}
 I &= \frac{I_0 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{2} = \frac{I_0 \sin^2 2\theta}{8} \\
 &= \frac{I_0 (1 - \cos 4\theta)}{16} \\
 &= \frac{I_0 (1 - \cos 4\omega t)}{16}
 \end{aligned}$$



例 有两个偏振片，一个用作起偏器，一个用作检偏器，当它们的偏振化方向之间的夹角为 30° 时，一束单色自然光穿过它们，出射光强为 I_1 ；当它们的偏振化方向之间的夹角为 60° 时，另一束单色自然光穿过它们，出射光强为 I_2 ，且 $I_1 = I_2$ ，求两束单色自然光的强度之比。

解： 设第一束光的强度为 I_{10} ，第二束光的强度为 I_{20} ，它们透过起偏片后，强度减半，根据马吕斯定律

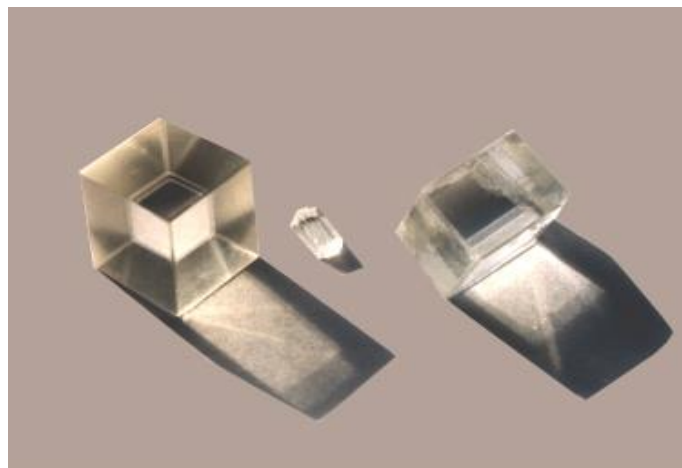
$$I_1 = \frac{I_{10}}{2} \cos^2 30^\circ \quad I_2 = \frac{I_{20}}{2} \cos^2 60^\circ \quad \frac{I_{10}}{I_{20}} = \frac{1}{3}$$

§ 3.3 晶体中的双折射

一、晶体的双折射现象

各向同性
各向异性

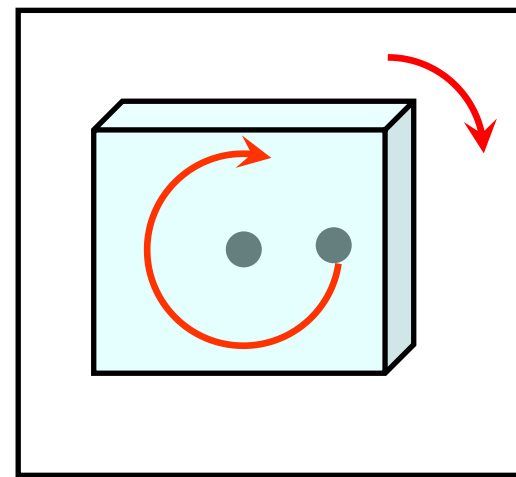
方解石晶体
实物照片



纸面

方解石晶体

双折射现象

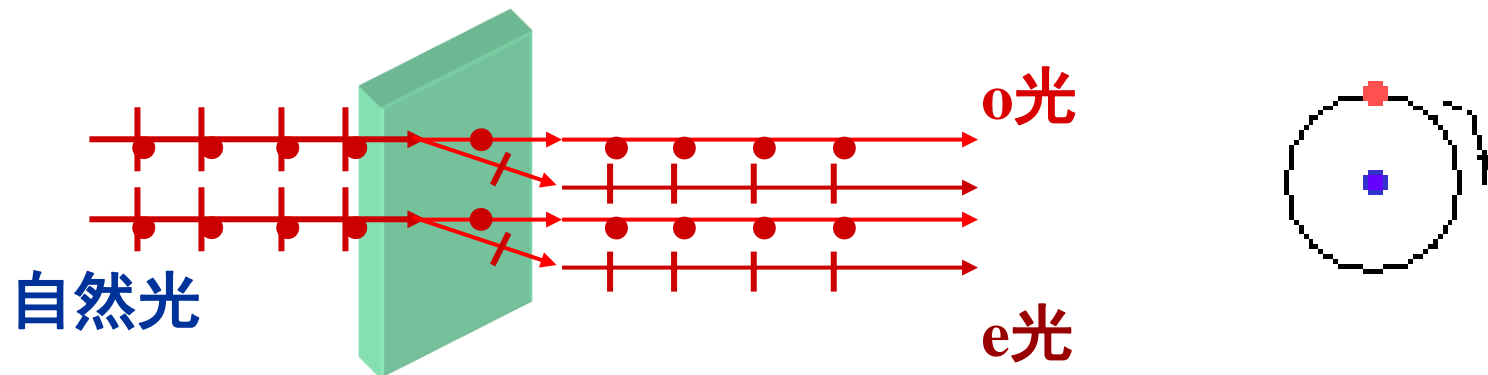


1. 双折射现象

用眼睛观看发光点，会看到两个像点，透过方解石晶体，纸面上的字成了双字。

2. o光和e光

自然光进入各向异性晶体中，光线怎样传播？



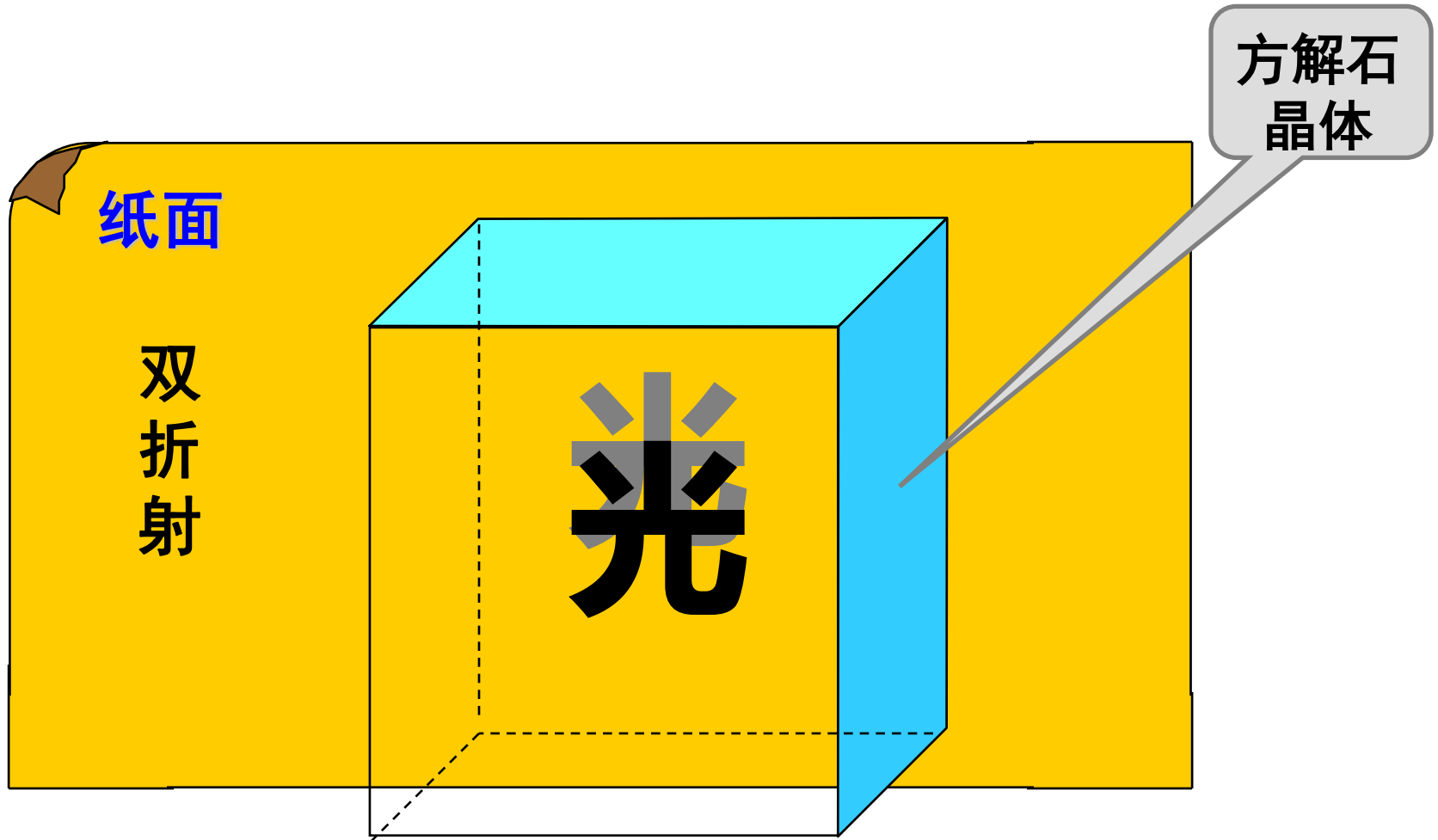
两束折射光：◆服从折射定律为寻常光线ordinary ray—o光
◆不服从折射定律为非常光线
extraordinary ray—e光

不服从折射定律是指：

- ① 折射光线一般不在入射面(界面法线与光线组成的面)内
- ② 不遵守折射定律，折射率（传播速度）和入射光线的方向有关。

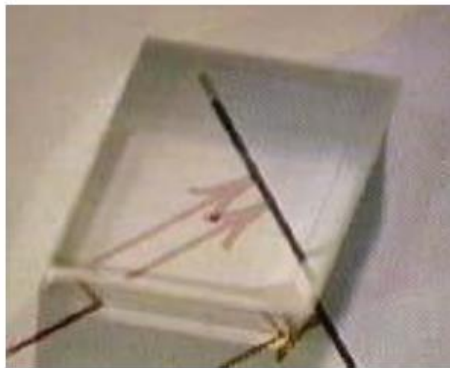
o光和e光仅在晶体内部有意义

当方解石晶体旋转时，o光不动，e光围绕o光旋转



3. o光和e光的偏振态

用检偏器检验 o光和e光 { 均为线偏振光
振动方向垂直
(条件见后, P208)



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



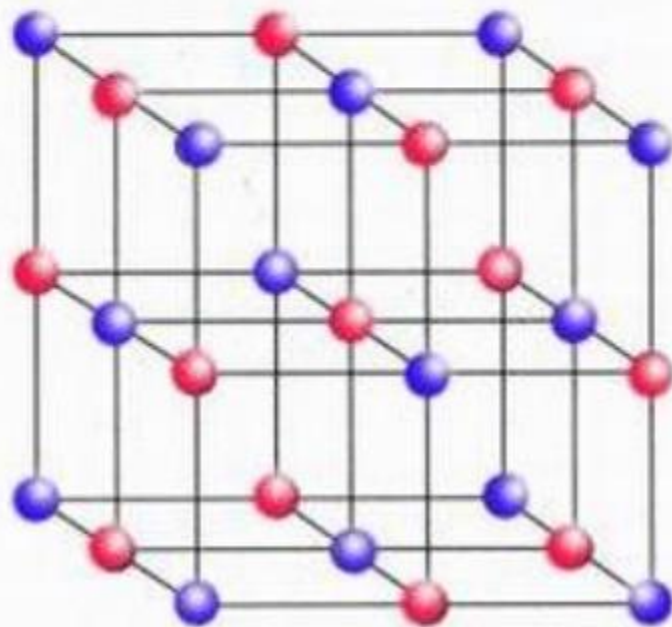
将线偏振器旋转
90°后, e光的像

问题: (1) e光在晶体内的传播方向?
(2) o光和e光的偏振方向

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



单轴晶体 (Uniaxial crystal)

只有一个光轴方向:

方解石 (冰洲石)、石英 (Quartz)、红宝石

人工拉制单轴晶体、APD(磷酸二氢氨)、铌酸锂(LiNiO_3)

双轴晶体 (Biaxial crystal)

有两个光轴方向:

云母 (Mica)、蓝宝石 (Sapphire)、黄玉



方解石



红宝石



云母



蓝宝石

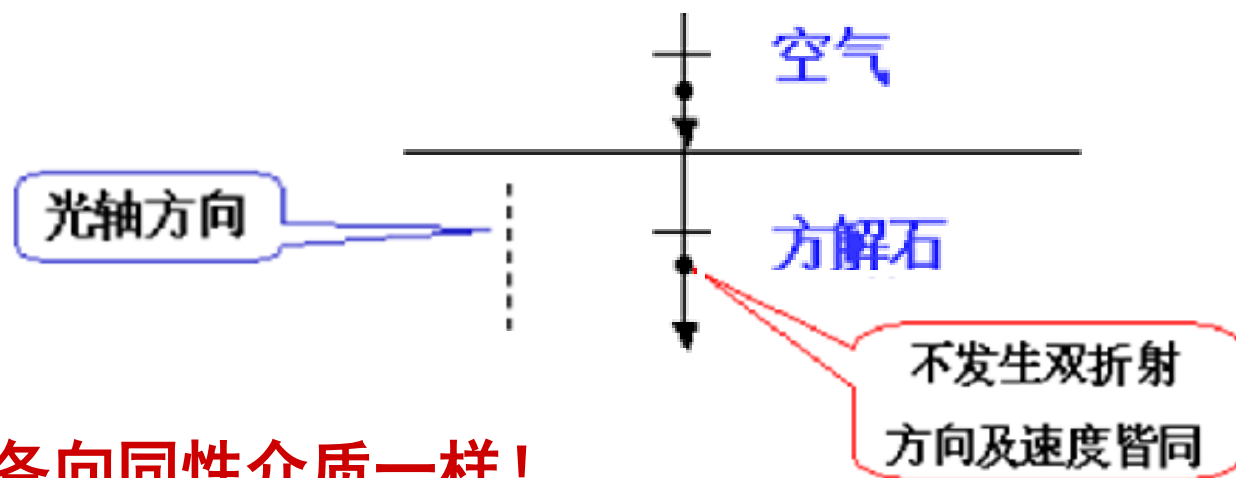
多晶体: 金属、陶瓷、陨石等

二、光轴、主平面与主截面（特征参量）

1. 光轴（特殊方向）

实验中改变入射光的方向，发现在晶体中存在特殊方向，光在晶体中沿这个方向传播时不发生双折射，该特殊方向称为晶体的光轴

注意：在晶体内光轴是一个方向，不限于某一条特殊直线
实验上怎么操作呢？令入射表面垂直光轴，光线沿光轴方向入射，光线在晶体内部传播不发生双折射。



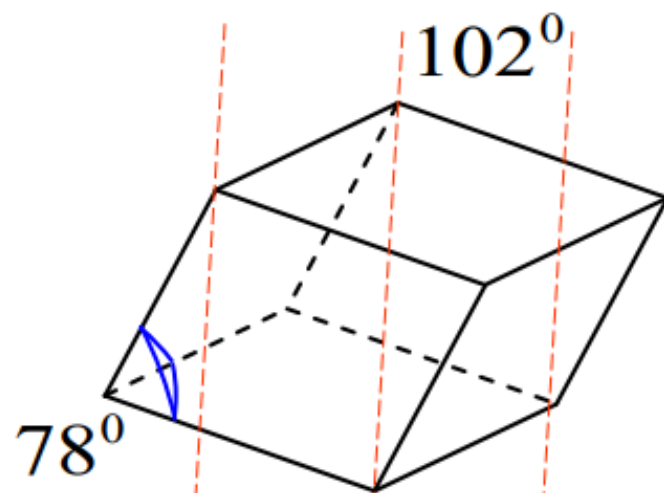
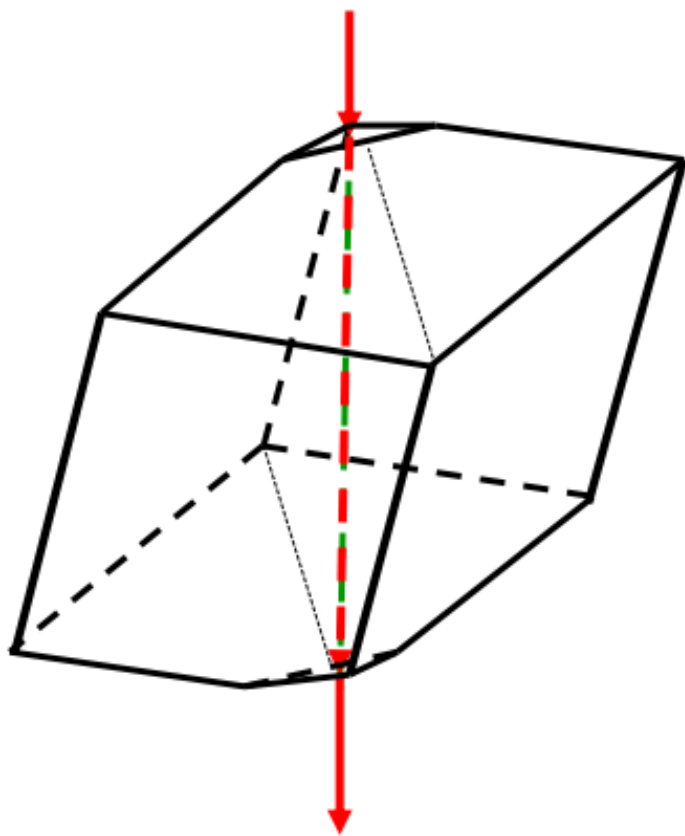
与各向同性介质一样！

几何光学中的光轴： 光具组的对称中心！

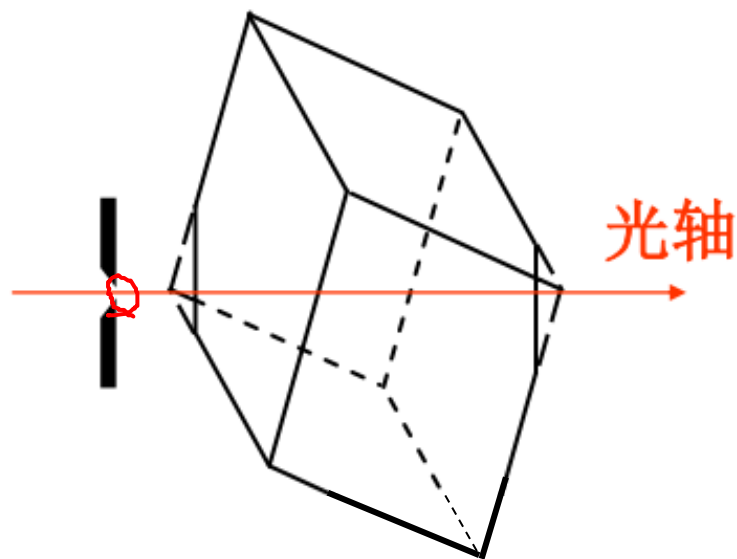
双折射晶体的特征参量

1. 晶体的光轴

沿光轴入射，无双折射

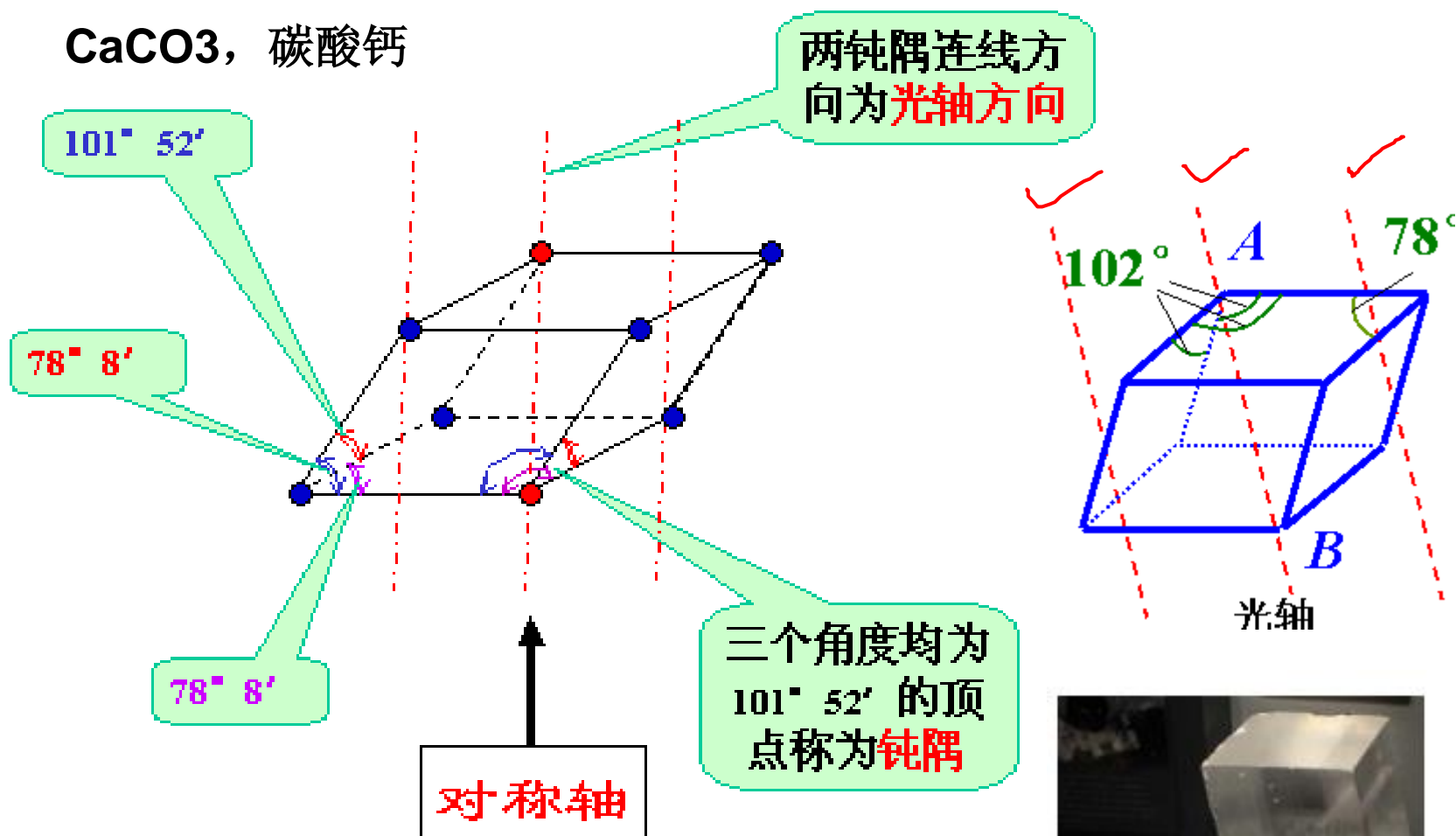


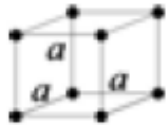
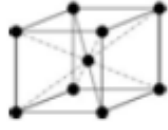
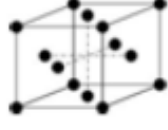
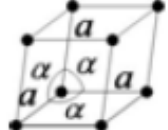

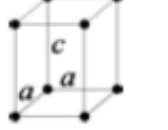
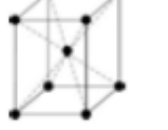
冰洲石的光轴

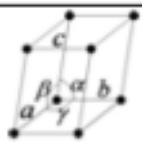
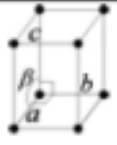
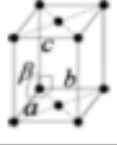
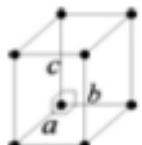
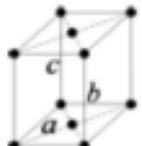
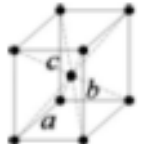
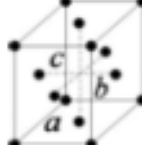


方解石晶体的光轴（方向）

CaCO₃, 碳酸钙

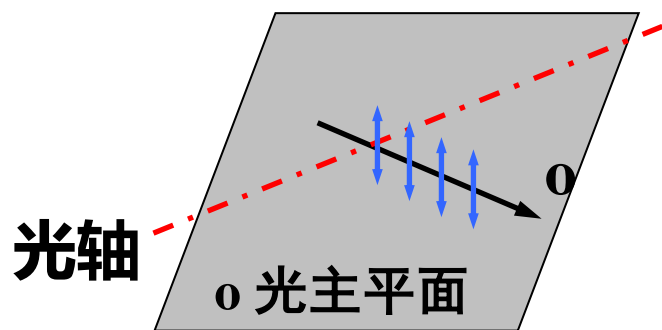


光学性质	晶系	布拉斐格子	晶体
第一类：各向同性	立方	简单立方 	食盐 NaCl
		体心立方 	
		面心立方 	
第二类：单轴晶体	三角晶系	三角 	方解石、红宝石、
	六角晶系	六角 	石英、冰
	四方晶系	简单四方 	
		体心四方 	

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 	

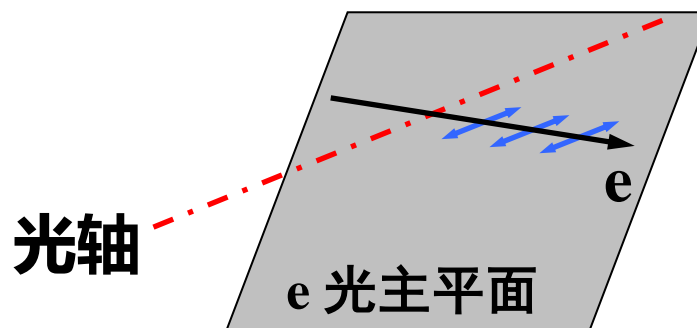
2. 光线主平面

光线的主平面： 单轴晶体中包含晶体光轴和一条给定光线的平面



o光主平面：

过o光线和晶体
光轴的平面



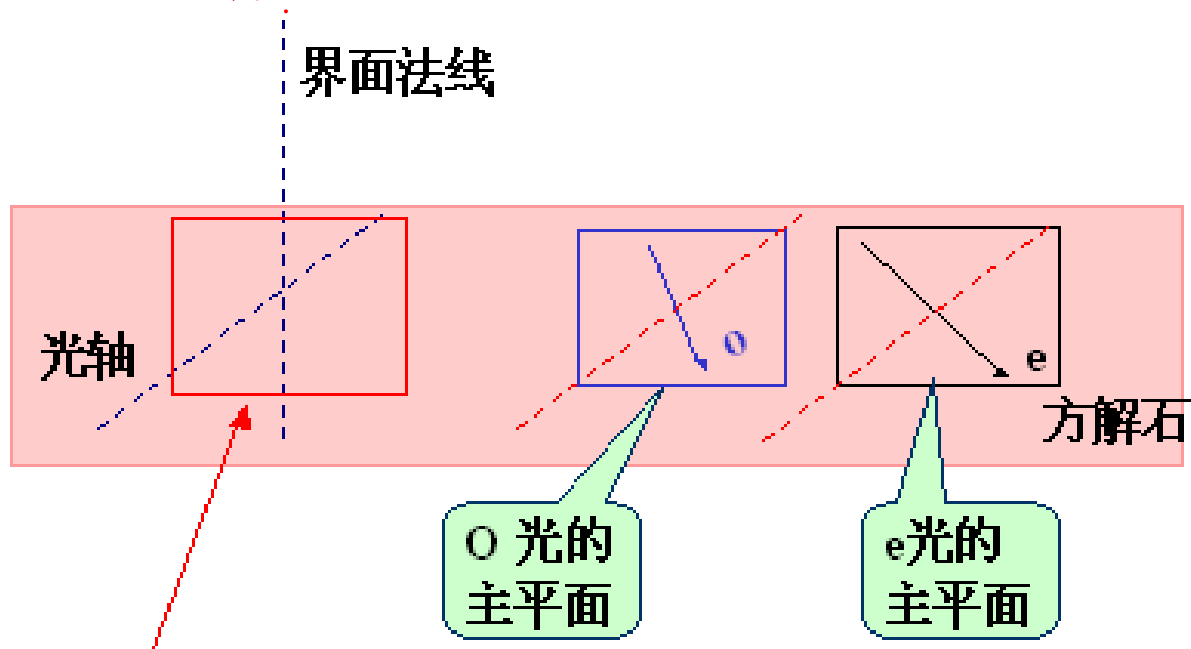
e光主平面：

过e光线和晶体
光轴的平面

给定一束入射光 

一般情况下，o光和e光的主平面**不重合**，但夹角很小

3. 晶体主截面



晶体的主截面：包含**晶体光轴**与**界面法线**的平面

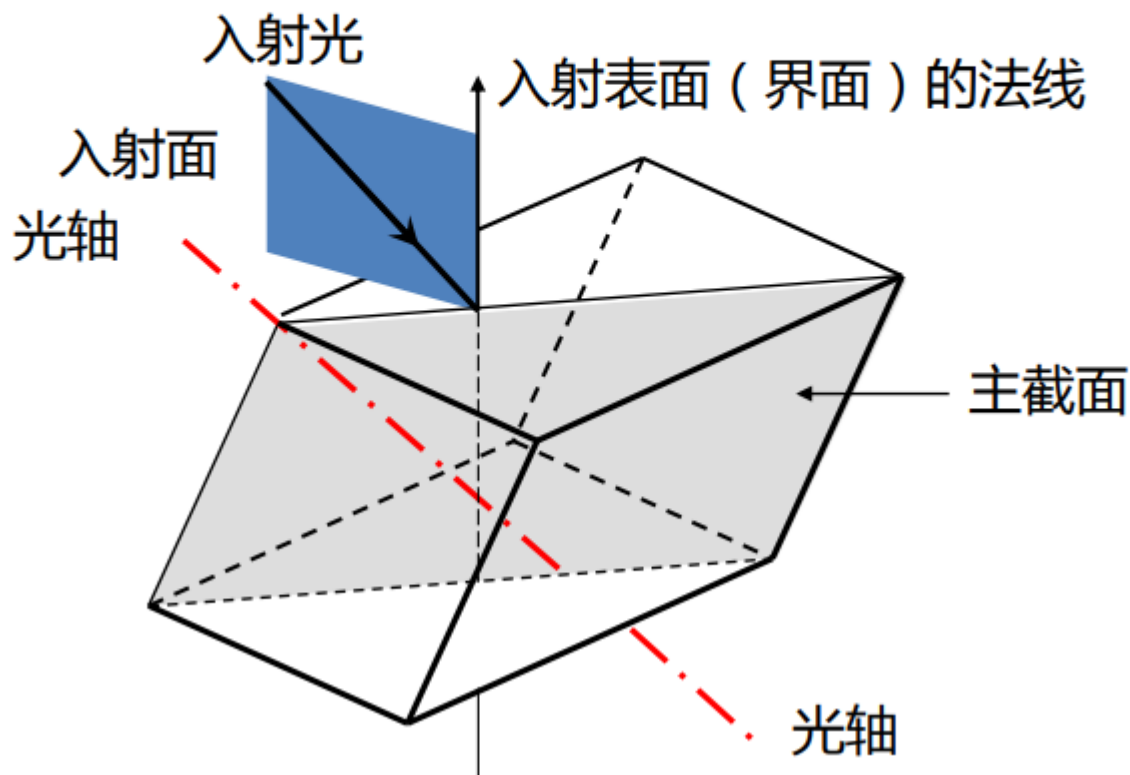
4. 光线入射面

包含入射光线与界面法线的平面。

入射光线在主截面内的特殊情况下：**o光和e光的主平面**与晶体的**主截面重合**—我们讨论的情况

主截面

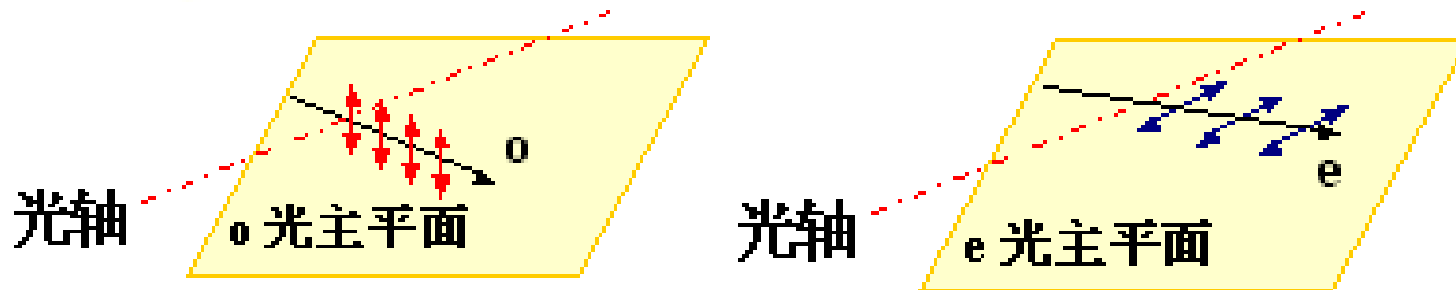
入射界面（晶体表面）的**法线**与**光轴**形成的平面。**与晶体相关，与光线无关。**



选择合适的入射方向，使入射面与主截面重合，这时光轴处于入射面中。

5. o光和e光的振动方向

o光和e光都是线偏振光，其振动方向如何？



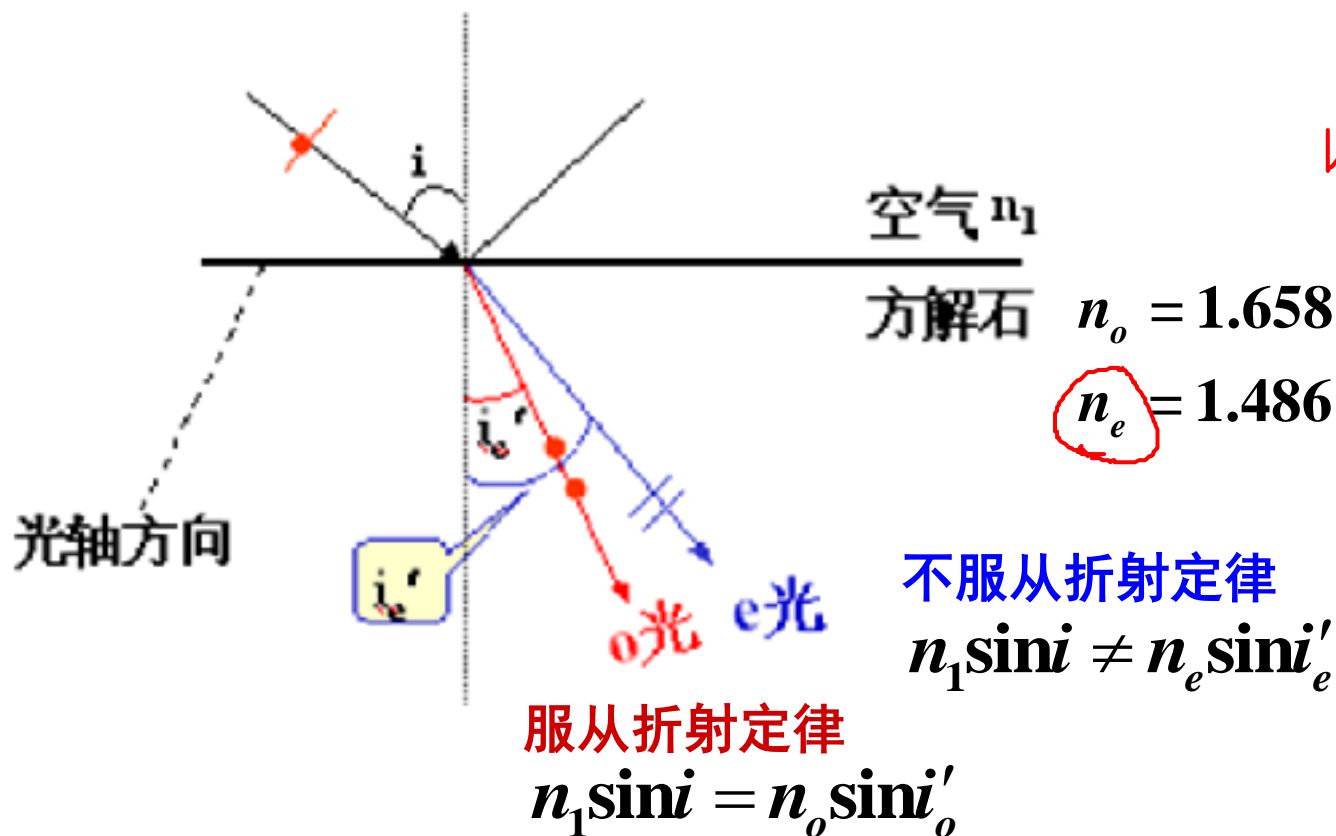
用检偏器检验知：

- o光的振动垂直o光的主平面
- e光的振动在e光的主平面内

◆ 入射光线在主平面内时，两条光线的主截面就是主平面

{ o光的振动垂直主截面
 e光的振动在主截面内

→ 两光偏振方向垂直

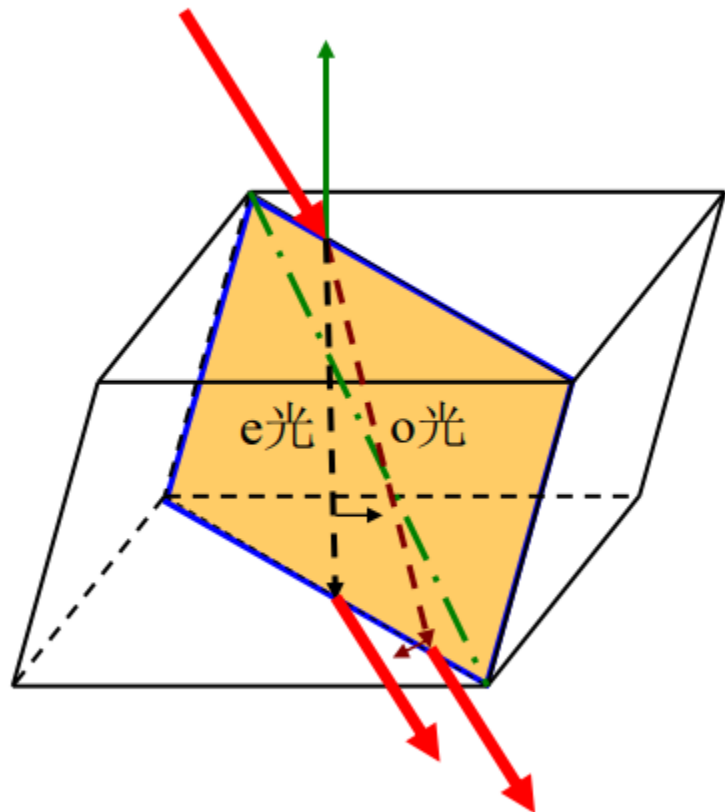


$$n = \frac{c}{v}$$

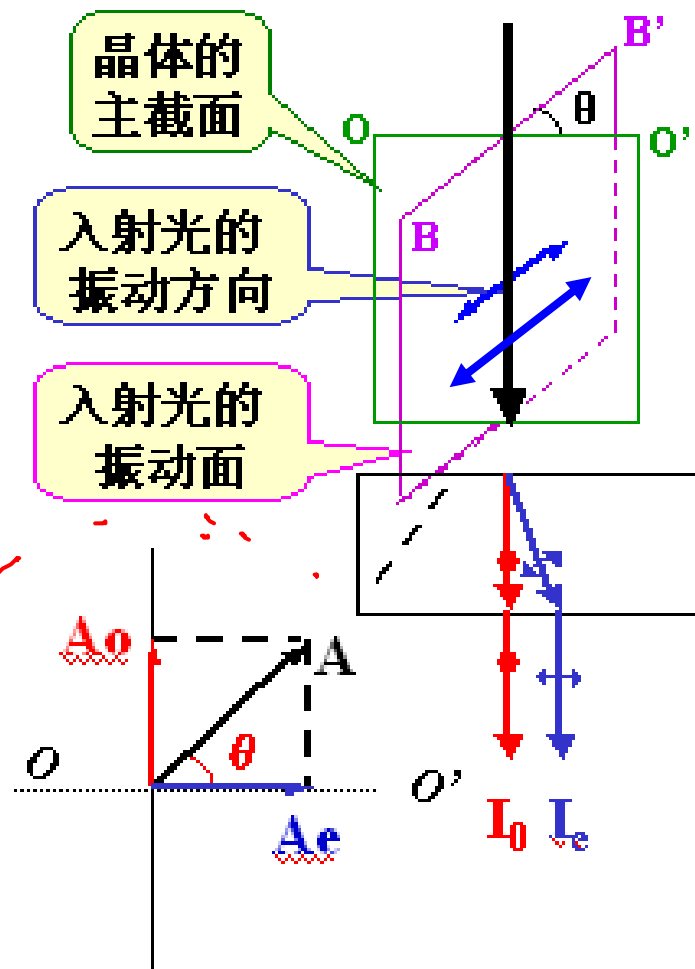
$$n_e(\theta)$$

◆入射光线在**主平面**内时，两条光线的主截面就是**主平面** 立体图

- 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。



5. o光和e光的相对光强



设入射光强为 I ，振幅为 A

1、自然光入射 $I_o = I_e = I / 2$

2、线偏振光垂直入射

$$\begin{cases} A_o = A \sin \theta \\ A_e = A \cos \theta \end{cases}$$

◆ o光e光的相对光强

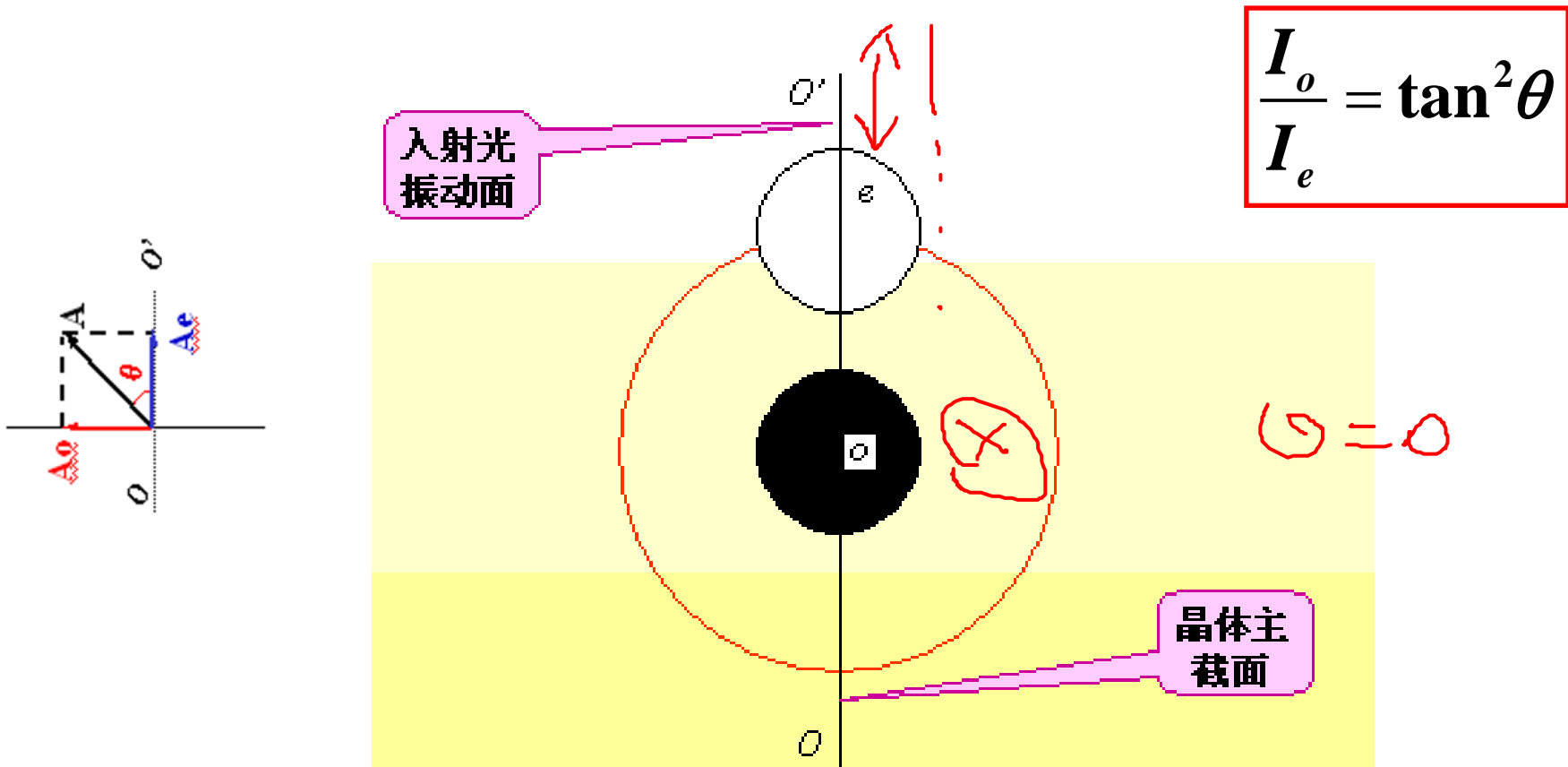
$$\frac{I_o}{I_e} = \tan^2 \theta$$

o光与e光的相对光强随着角度改变而改变

射出晶体后，两束光无 o光和e光之分

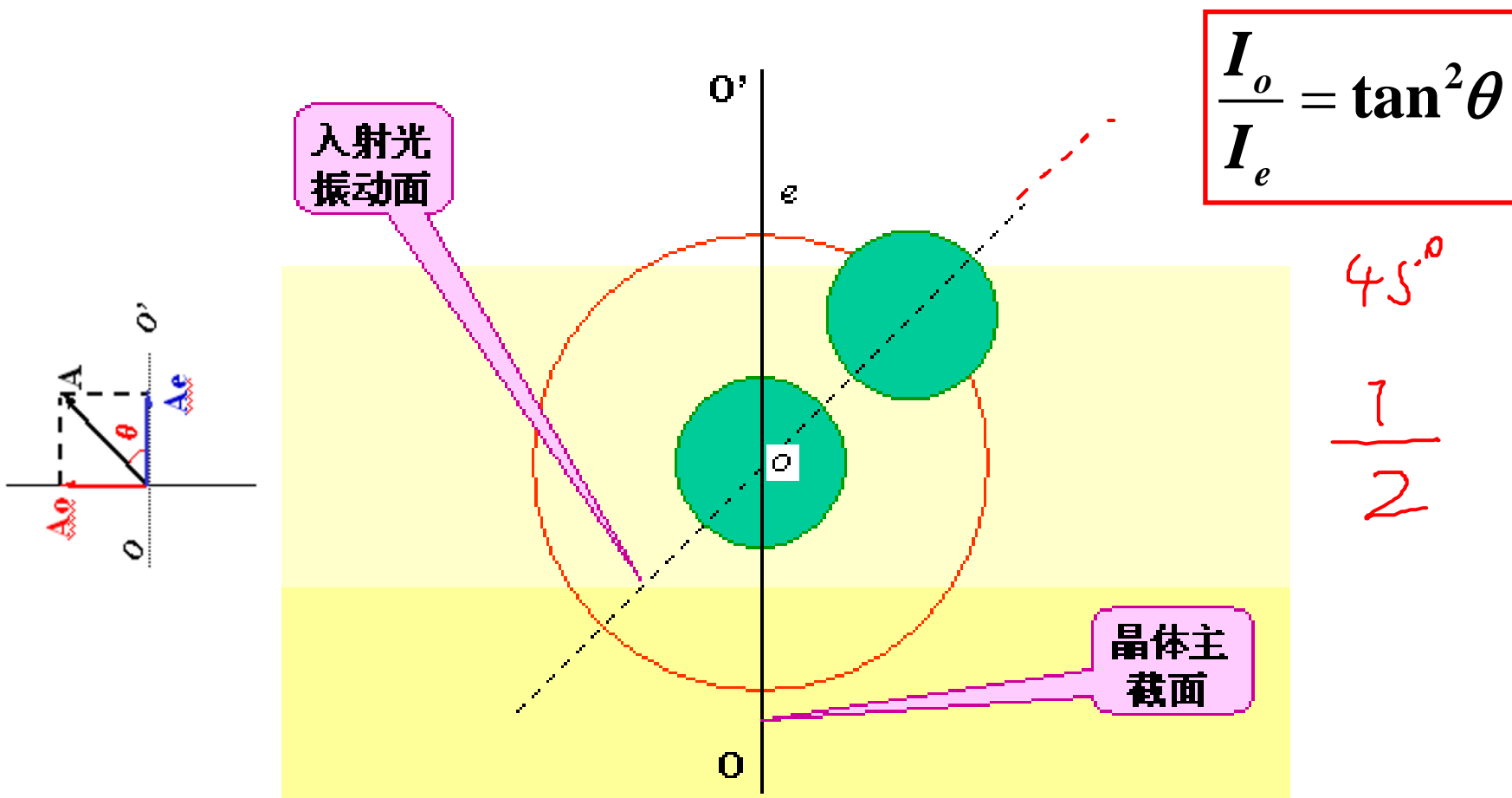
以下为实验

晶体绕入射光方向旋转时两束光的相对光强不断变化



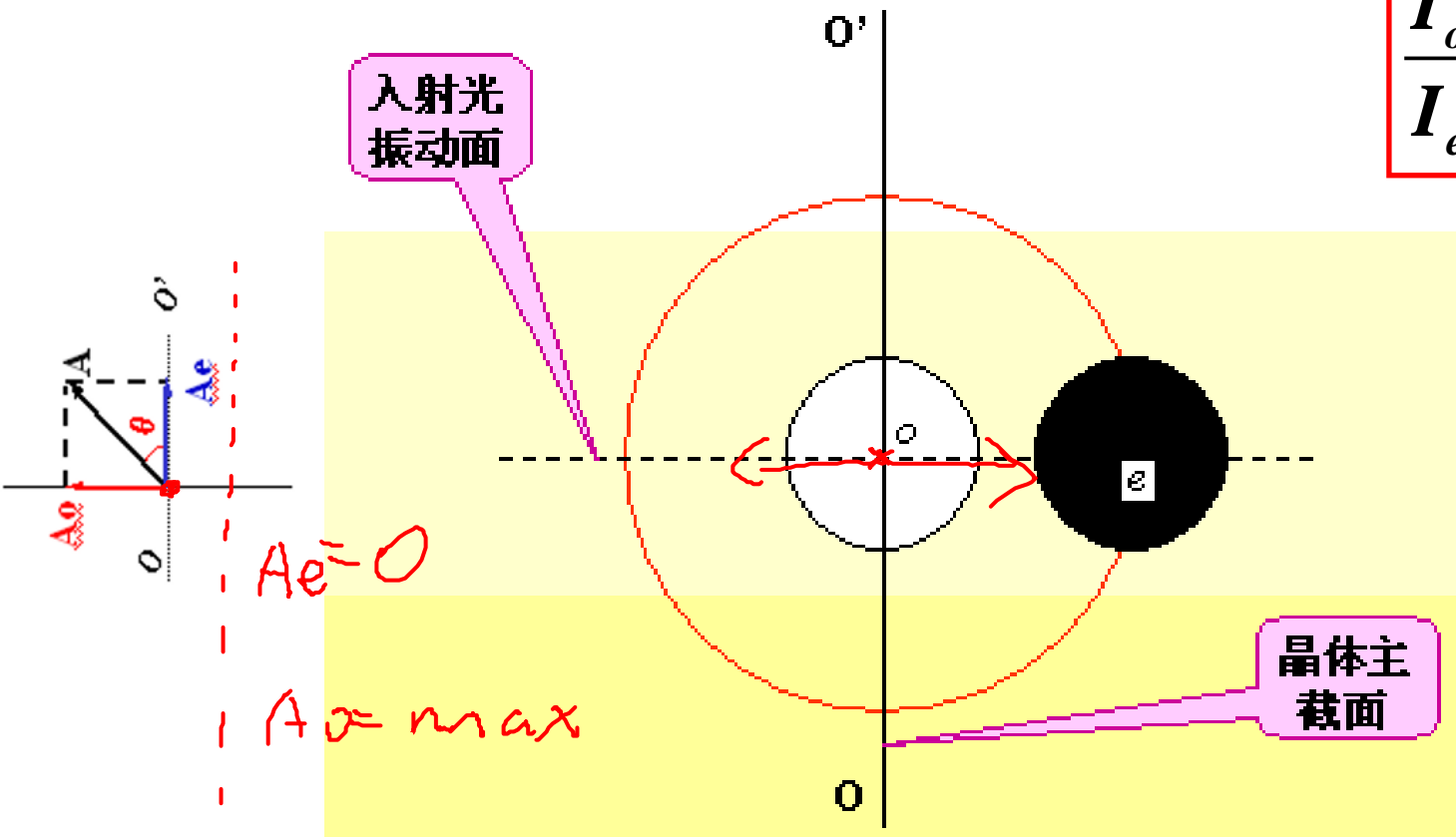
晶体主截面与振动面平行， o 光消失

晶体绕入射光方向旋转时两束光的相对光强不断变化



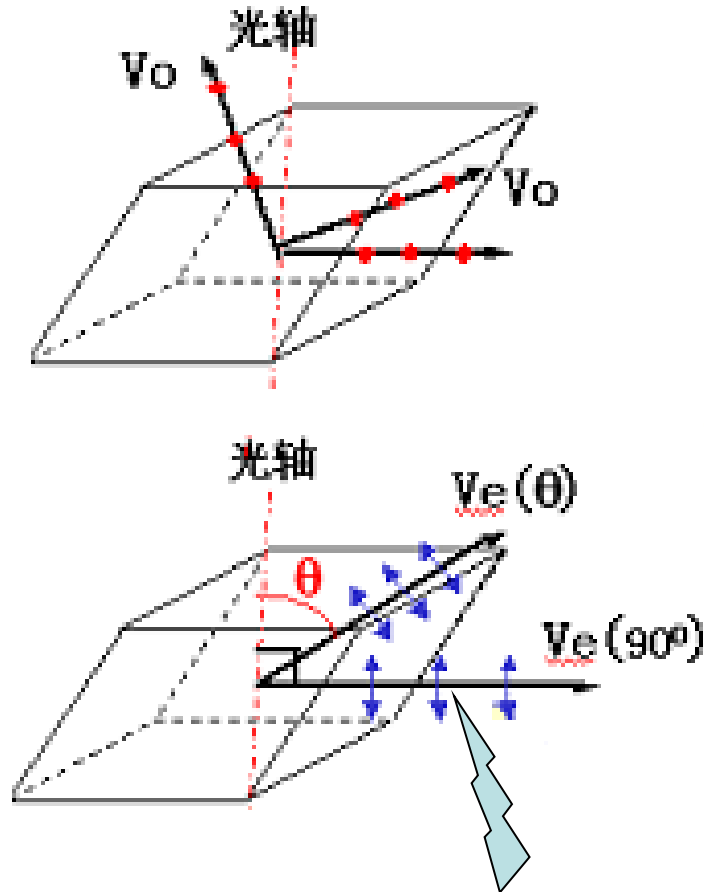
晶体绕入射光方向旋转时两束光的相对光强不断变化

$$\frac{I_o}{I_e} = \tan^2 \theta$$



晶体主截面与振动面垂直

6. 单轴晶体中o光和e光的主折射率 (P214)



V_e 与光轴垂直时取极值，此时e光振动方向与光轴平行

两个主折射率：

- ① o光振动方向与光轴垂直在晶体中的传播速度 V_o 不变

o光的主折射率：

$$n_o = \frac{c}{V_o}$$

- ② e光在晶体中的传播速度与传播方向有关 $V_e(\theta)$

e光的主折射率：

$$n_e = \frac{c}{V_e(90^\circ)}$$

$n_e < n_o (V_e > V_o)$: 负晶体 ✓

$n_e > n_o (V_e < V_o)$: 正晶体

研究自c点发出的所有光线

① 振动方向垂直于主截面(o光)

光振动E方向 \perp 光轴方向，
其折射率为 n_0 ，有相同的传播速度 V_0

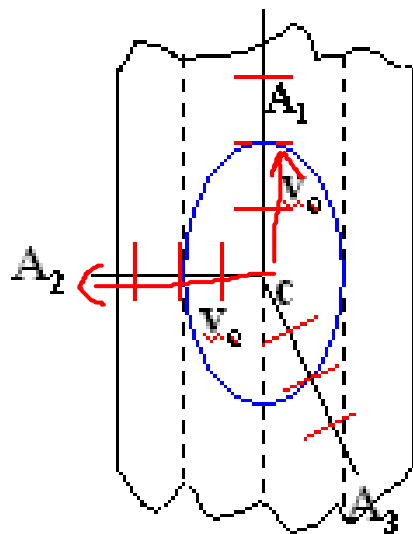
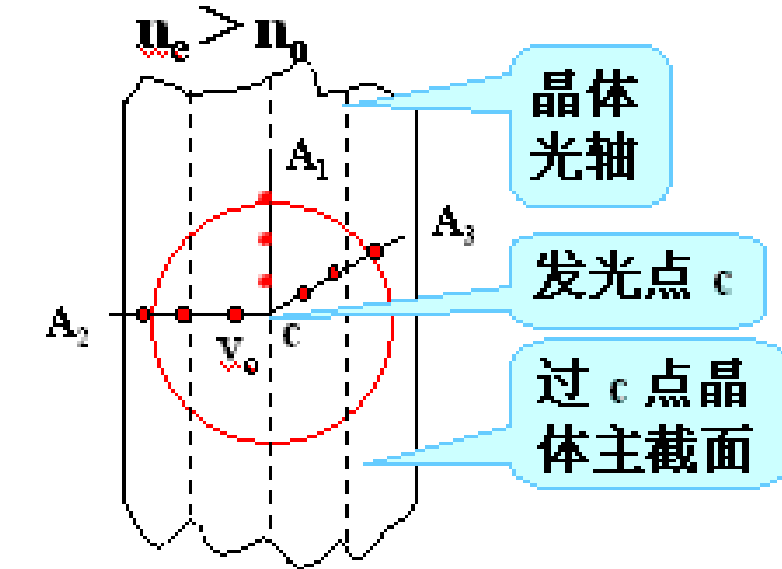
其波面为以光轴为轴的球面

② 振动方向平行于主截面(e光)

CA₁方向：光振动E方向垂直于光轴方向，
其折射率为 n_0 ，传播速度为 V_0

CA₂方向：光振动E方向平行于光轴方向，
其折射率为 n_e ，传播速度为 V_e

CA₃方向：光振动E方向与光轴成一夹角，
传播速度介于 V_0 和 V_e 之间



➤ 小结:

§ 5.1 自然光与偏振光
偏振度

§ 5.2 线偏振光和部分偏振光
布儒斯特定律
马吕斯定律
起偏和检偏

§ 5.3 光通过单轴晶体时的双折射现象
光轴、主平面、主截面的概念
o光和e光的鉴定
o光和e光的偏振方向和相对强度
单轴晶体的主折射率

作业(P245) 5-6, 5-8

下次课内容: 第3章 光的偏振 (4-6节)