



第10章 光的偏振

§ 10.1 光的偏振态

§ 10.2 线偏振光的获得与检验 马吕斯定律

§ 10.3 反射和折射时光的偏振

§ 10.4 光的双折射

§ 10.5 偏振光的干涉 人为双折射现象

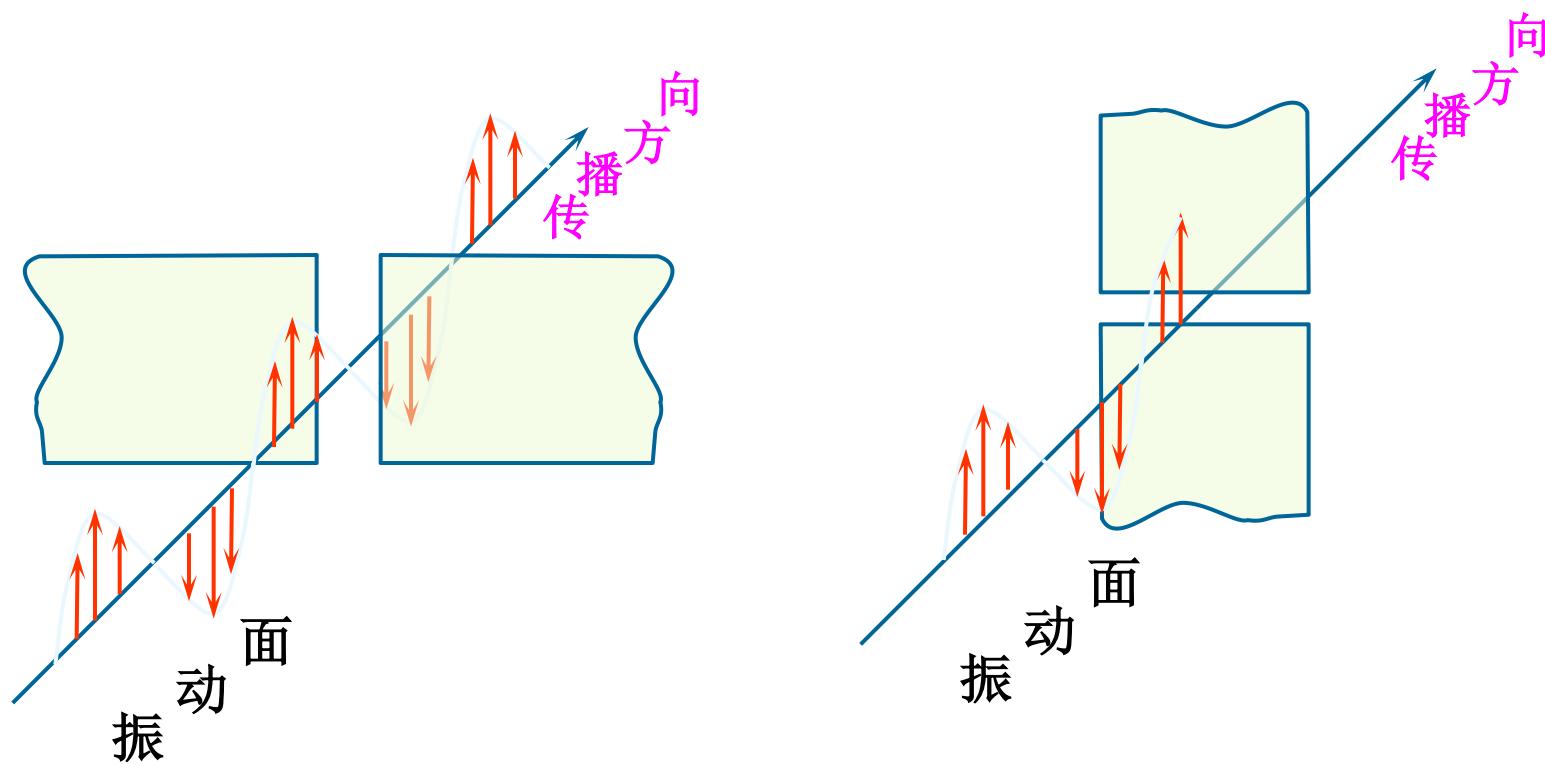


§ 10.1 光的偏振态



电磁波是横波，光矢量的振动方向与光的传播方向是垂直的。

横波特点：

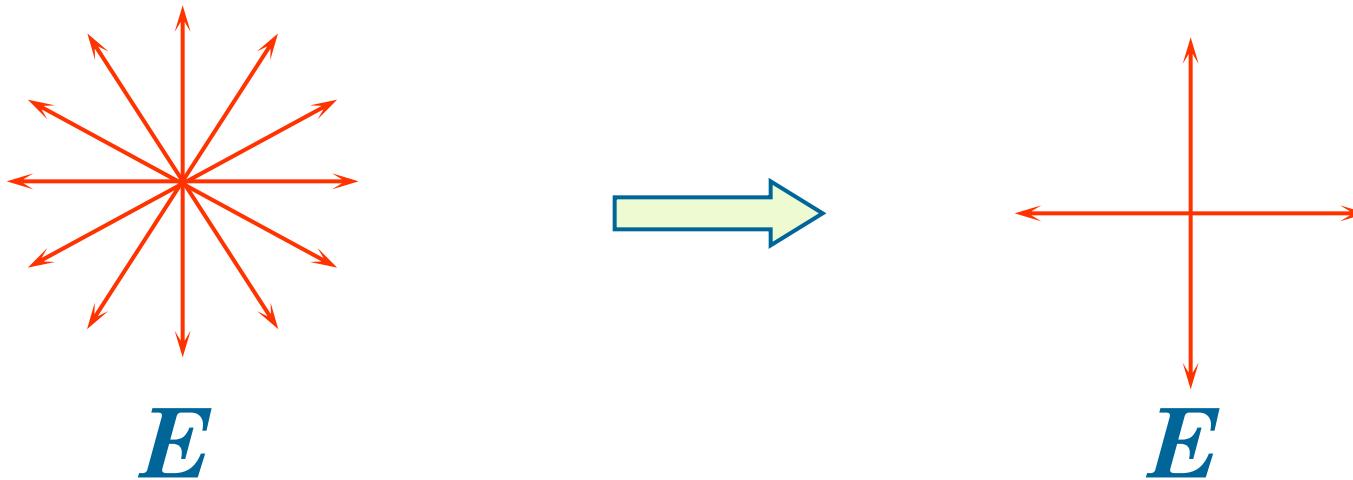


光波的特点：

光源发光是由大量原子发光组成，其振动方向都是随机的， E 和 B 在各方向的振动都存在。

引起人的视觉的只有 E 矢量（光矢量）。

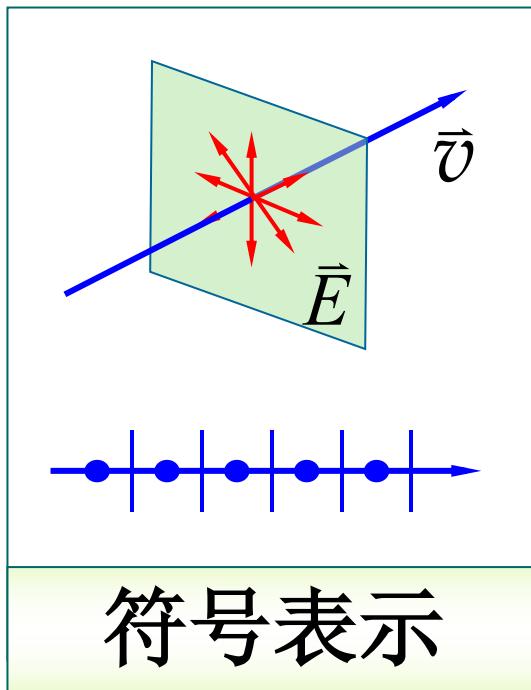
每个光矢量可分解为两相互垂直的振动。



一、自然光

在垂直于传播方向的平面内，沿各方向振动的光矢量分布均匀，且振幅都相同。

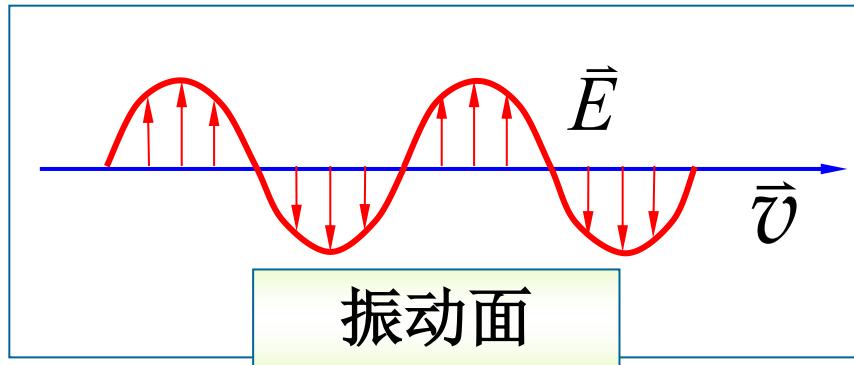
自然光可以用两互相垂直的互为独立的（无确定的相位关系）振幅相等的光振动表示。



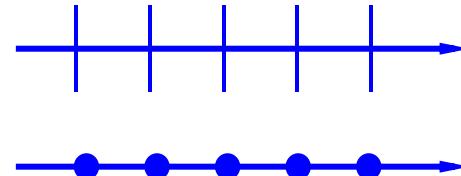
- 二互相垂直方向是任选的。
- 各光矢量间无固定的相位关系。

二、线偏振光(平面或完全偏振光)

在垂直于其传播方向的平面内，光矢量E只沿着某个确定的方向振动，这种光是一种完全偏振光，叫线偏振光。



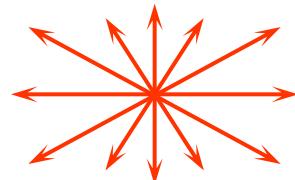
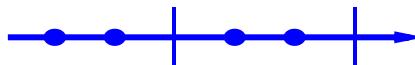
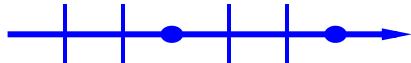
符号表示



三、部分偏振光

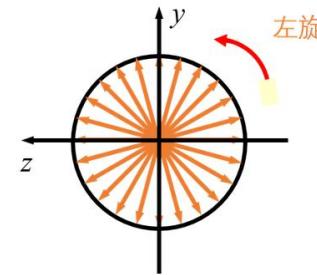
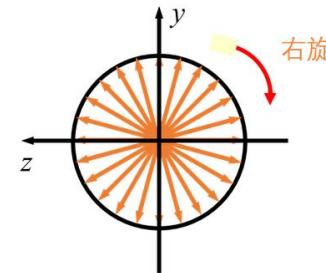
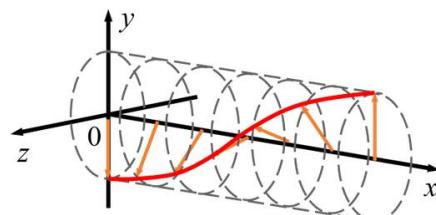
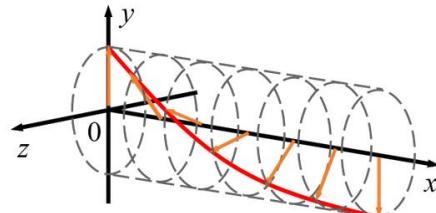
在垂直于其传播方向的平面内，光矢量E各个方向都有，但在某一方向的光振动比与之垂直方向上的光振动占优势的光。

符号表示



四、椭圆偏振光和圆偏振光

光的光矢量在沿着光的传播方向前进的同时，还绕着传播方向均匀转动。如果光矢量的大小不断改变，使其端点描绘出一个椭圆，这种光就叫椭圆偏振光。如果光矢量的大小保持不变，就成了圆偏振光。根据光矢量旋转方向的不同，分为左旋光和右旋光。





§ 10.2 线偏振光的获得 与检验 马吕斯定律



一、线偏振光的获得与检验

某些物质能吸收某个方向的光振动，当自然光照射上时，只允许某个特定方向的光振动通过，形成偏振光。

二向色性：某些物质能吸收某一方向的光振动，而只让与这个方向垂直的光振动通过，这种性质称二向色性。

- 利用选择吸收获得线偏振光
- 利用反射获得线偏振光
- 利用晶体的双折射获得线偏振光

1. 偏振片

涂有二向色性材料的透明薄片。

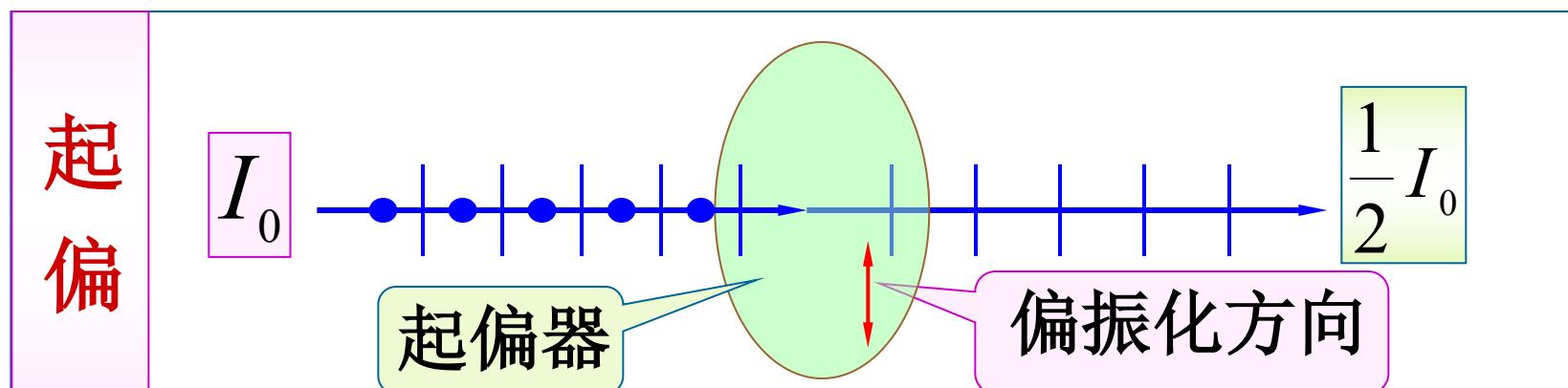
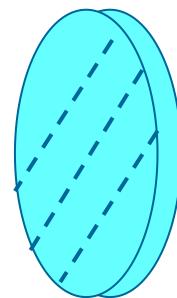
如：聚乙烯醇浸碘后拉成薄膜，夹在两玻璃片间制成偏振片。

偏振化方向 当自然光照射在偏振片上时，它只让某一特定方向的光通过，这个方向叫此偏振片的偏振化方向。

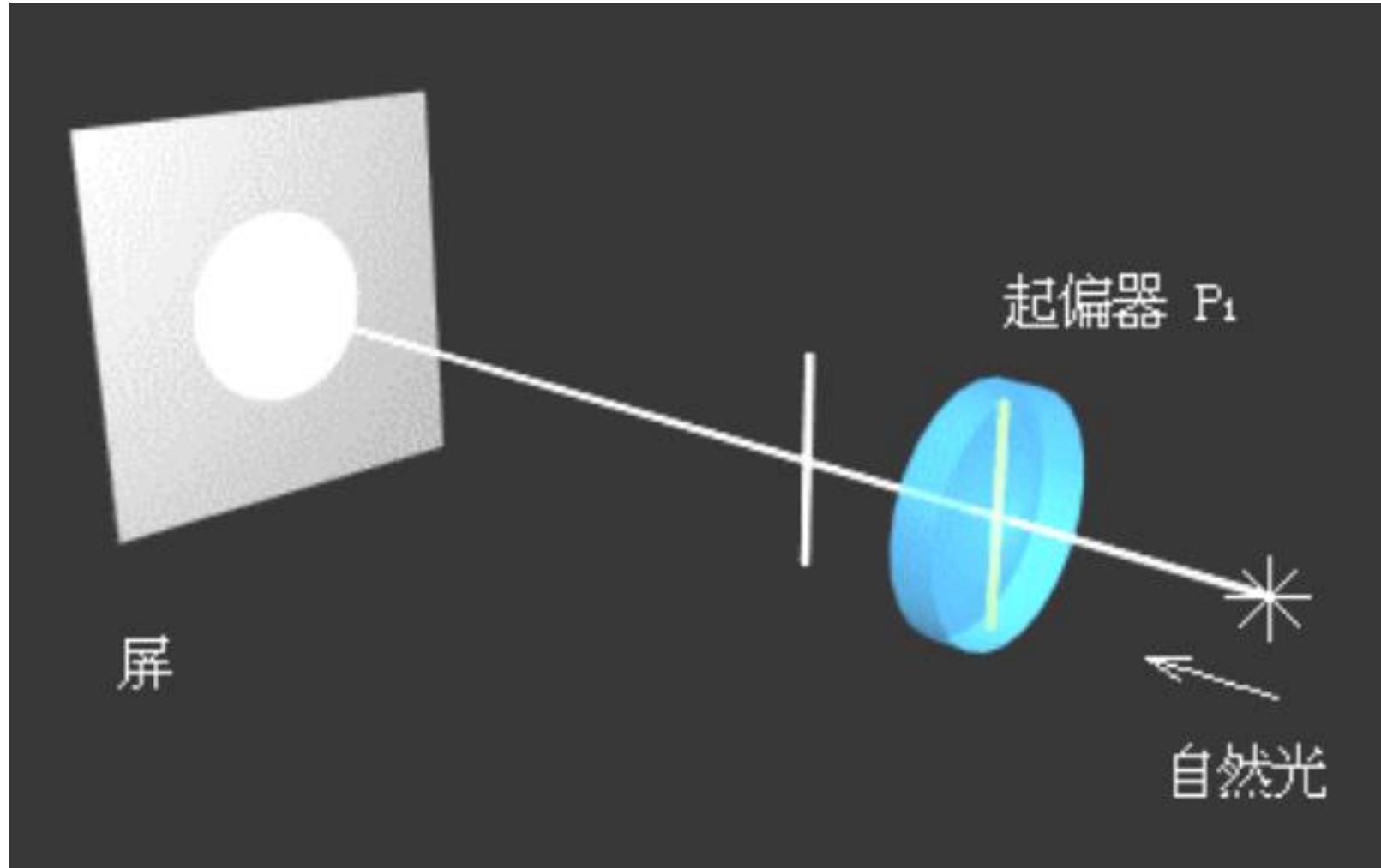
2. 起偏

偏振片用来产生偏振光时叫**起偏器**。

将自然光转变成偏振光的过程称为**起偏**。



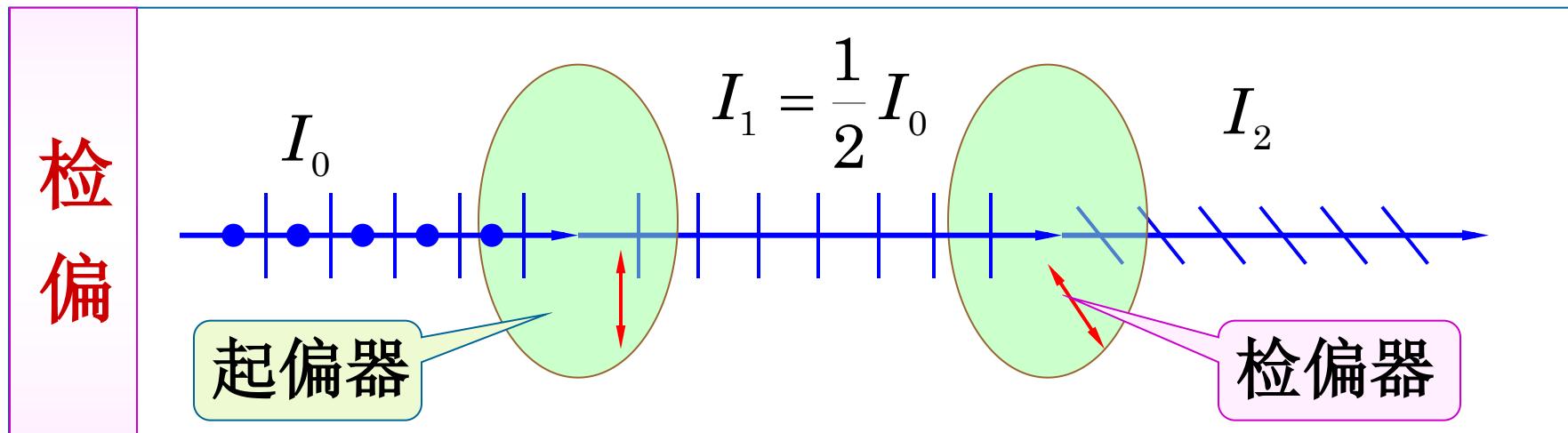
人眼是不能直接区分自然光与偏振光的，而利用偏振片能够检验一束光是否是偏振光，此时偏振片就叫做**检偏器**。



3. 检偏

偏振片用来检验光的偏振状态时叫**检偏器**。

检测偏振光的过程称为**检偏**。



实验发现

当 $P_1 \parallel P_2$ 时, $\theta = 0$ 透射光最强。

当 $P_1 \perp P_2$ 时, $\theta = \frac{\pi}{2}$ 透射光为0。 (消光)

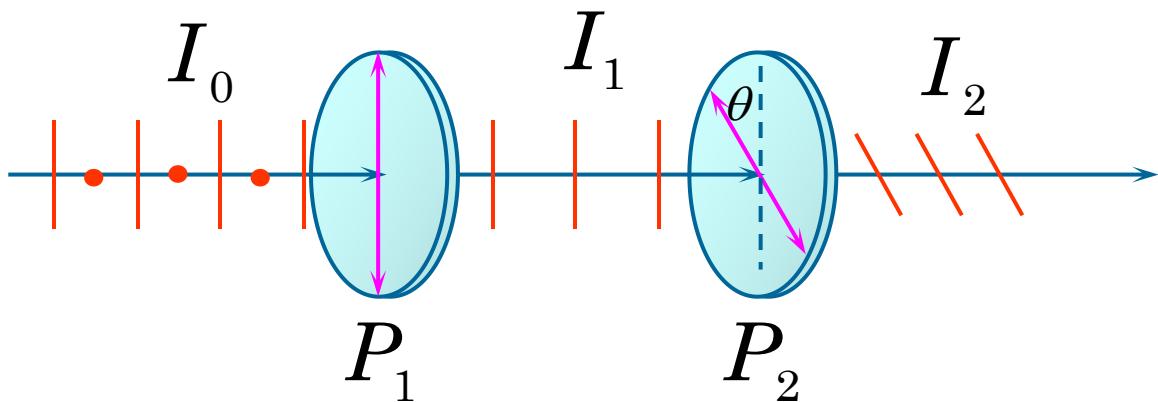
二、马吕斯定律

马吕斯 (Etienne Louis Malus 1775–1812)。法国物理学家及军事工程师。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。

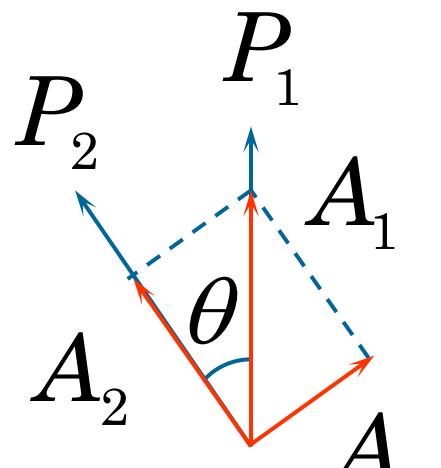


马吕斯从事光学方面的研究。1808年发现反射时光的偏振，确定了偏振光强度变化的规律（现称为马吕斯定律）。他研究了光在晶体中的双折射现象，1811年，他与J. 毕奥各自独立地发现折射时光的偏振，提出了确定晶体光轴的方法，研制成一系列偏振仪器。

两偏振片偏振化方向夹角为 θ 。



将通过 P_1 的光矢量振幅 A_1 ，
分解为平行于 P_2 的分量 A_2 和垂直
于 P_2 的分量 A_{\perp} 。垂直分量 A_{\perp} 不能
通过 P_2 ，平行分量 A_2 可通过 P_2 。

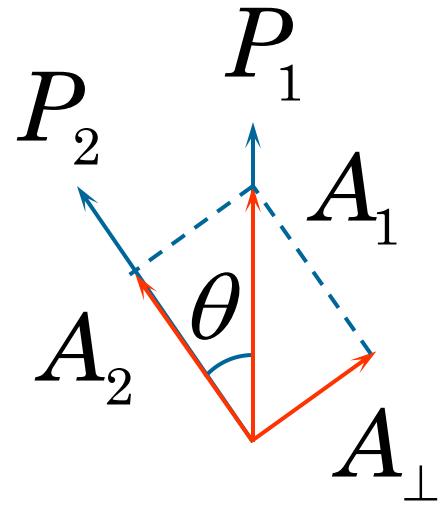


$$A_2 = A_1 \cos \theta$$

由于光强与光振幅平方成正比，

$$I \propto A^2, \quad I_1 \propto A_1^2, \quad I_2 \propto A_2^2$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{A_2^2}{A_1^2} = \frac{A_1^2 \cos^2 \theta}{A_1^2} = \cos^2 \theta$$



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, $I_2 = 0$

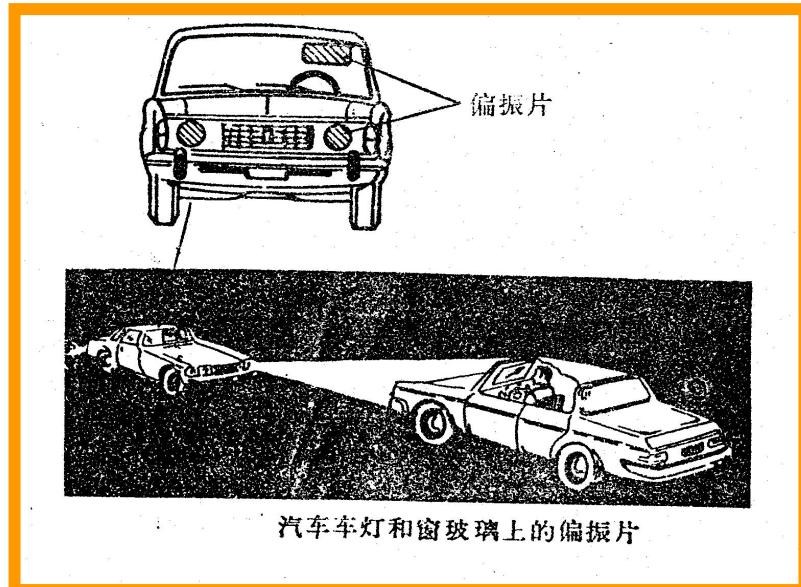
人的眼睛对光的偏振状态是不能分辨的，但某些昆虫的眼睛对偏振却很敏感。比如蜜蜂有五支眼、三支单眼、两支复眼，每个复眼包含有6300个小眼，这些小眼能根据太阳的偏光确定太阳的方位，然后以太阳为定向标来判断方向，所以蜜蜂可以准确无误地把它的同类引到它所找到的花丛。再如在沙漠中，如果不带罗盘，人是会迷路的，但是沙漠中有一种蚂蚁，它能利用天空中的紫外偏光导航，因而不会迷路。



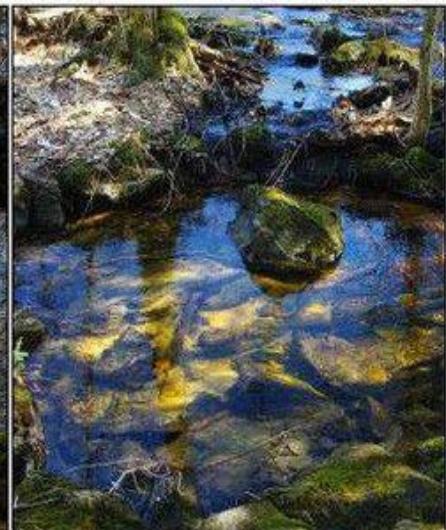
三、偏振光的应用

1. 防止对面来的灯光耀眼

汽车车灯与窗玻璃用同一偏振化方向的透明膜



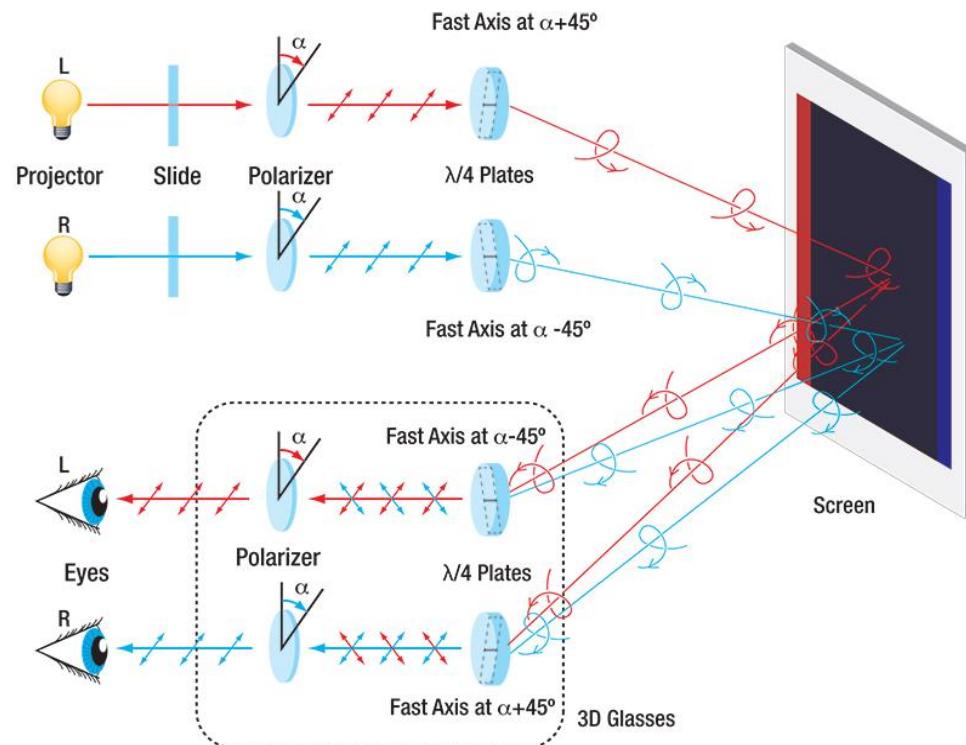
无偏振镜



有偏振镜

2. 立体电影原理

立体电影利用了人类的双眼视差原理。人类的两只眼睛在观看物体时，由于位置略有差异，会接收到不同的图像信息。这些不同的图像信息在大脑中合成，使我们感知到物体的深度和距离。



人眼的双眼效应



双眼睁开



一只眼睁开，
一只眼关闭

例10-1 有两个偏振片,一个用作起偏器,一个用作检偏器.当它们偏振化方向间的夹角为 30° 时,一束单色自然光穿过它们,出射光强为 I_1 ;当它们偏振化方向间的夹角为 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 设两束单色自然光的强度分别为 I_{10} 和 I_{20} .

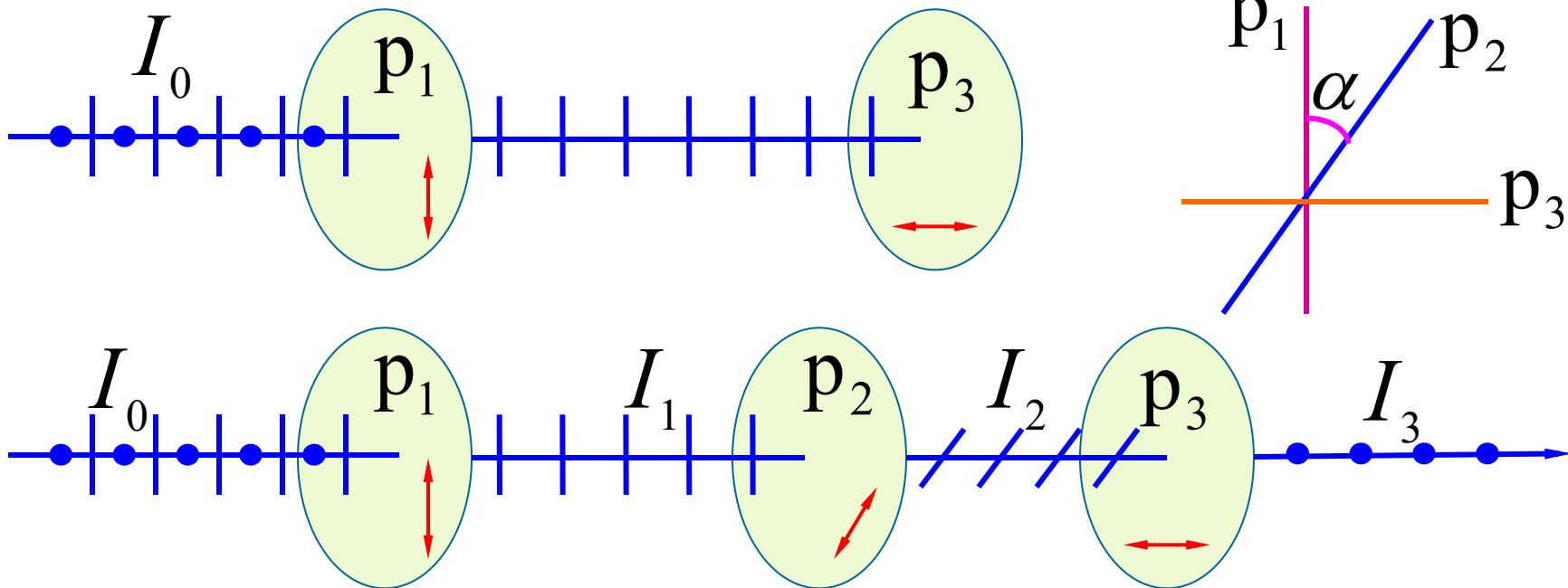
经过起偏器后光强分别为 $\frac{I_{10}}{2}$ 和 $\frac{I_{20}}{2}$.

经过检偏器后 $I_1 = \frac{I_{10}}{2} \cos^2 30^\circ$ $I_2 = \frac{I_{20}}{2} \cos^2 60^\circ$

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

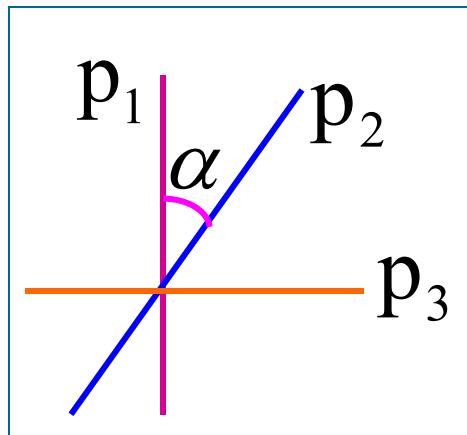
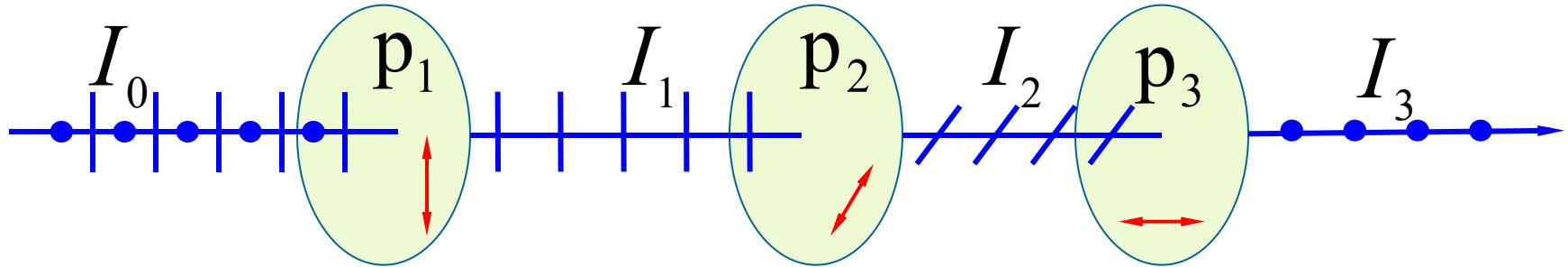
讨论

在两块正交偏振片 p_1, p_3 之间插入另一块偏振片 p_2 ，光强为 I_0 的自然光垂直入射于偏振片 p_1 ，讨论转动 p_2 透过 p_3 的光强 I 与转角的关系。



$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

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

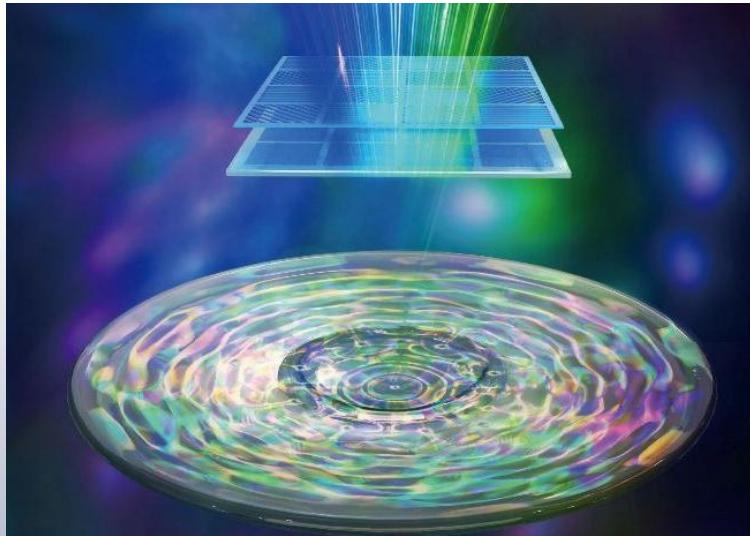


$$\begin{aligned}
 I_2 &= \frac{I_0}{2} \cos^2 \alpha & I_3 &= I_2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \\
 I_3 &= I_2 \sin^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \\
 I_3 &= \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\alpha
 \end{aligned}$$

若 α 在 $0 \sim 2\pi$ 间变化, I_3 如何变化?

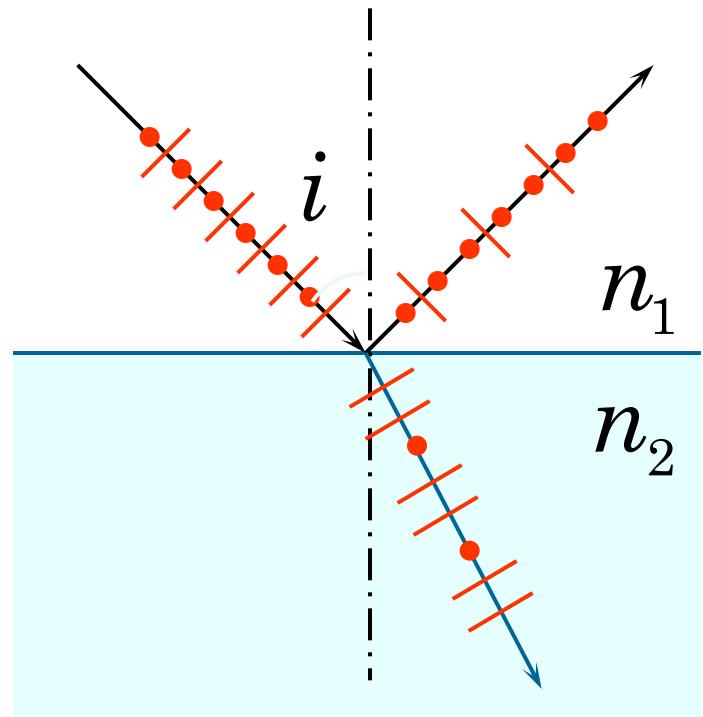
$$\alpha = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}, \quad I_3 = 0 \quad \alpha = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}, \quad I_3 = \frac{I_0}{8}$$

§ 10.3 反射与折射时光的偏振



一、反射光与折射光的偏振

当自然光入射到媒质表面时，光的传播方向会发生变化，形成折射光和反射光，同时折射光和反射光的偏振状态也发生变化。反射光和折射光都是部分偏振光。



入射面：入射光线和法线所成的平面。

➤ 反射光：

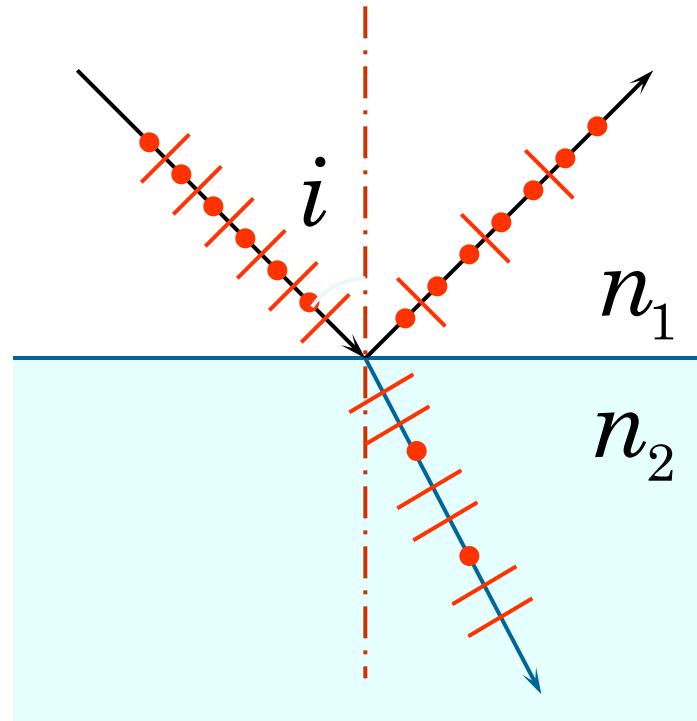
部分偏振光，垂直于入射面的振动大于平行于入射面的振动。

➤ 折射光

部分偏振光，平行于入射面的振动大于垂直于入射面的振动。

理论和实验证明：

反射光的偏振化程度与入射角有关。



二、布儒斯特定律

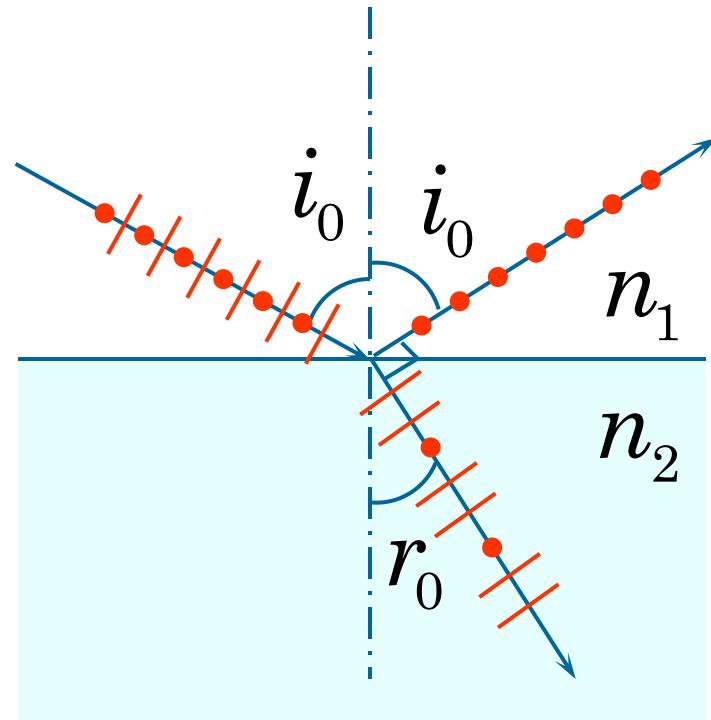
当入射角满足 $\text{tg} i_0 = \frac{n_2}{n_1}$ 时，反射光为完全偏振光，

且振动面垂直入射面，折射光为部分偏振光。

这个特定的入射角称为起偏振角或者布儒斯特角。

当光线以布儒斯特角入射时，反射线与折射线垂直。

$$\text{即 } i_0 + r_0 = \frac{\pi}{2}$$



证明：

由折射定律

$$\frac{\sin i_0}{\sin r_0} = \frac{n_2}{n_1}$$

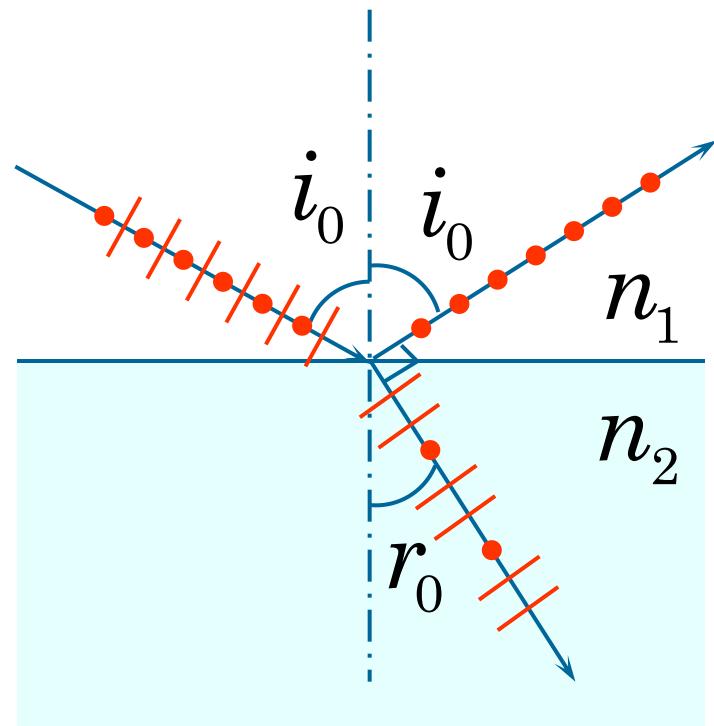
和布儒斯特定律

$$\operatorname{tg} i_0 = \frac{\sin i_0}{\cos i_0} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin i_0}{\sin r_0} = \frac{\sin i_0}{\cos i_0}$$

$$\sin r_0 = \cos i_0 = \sin\left(\frac{\pi}{2} - i_0\right) \rightarrow r_0 = \frac{\pi}{2} - i_0$$

即反射线与折射线垂直。

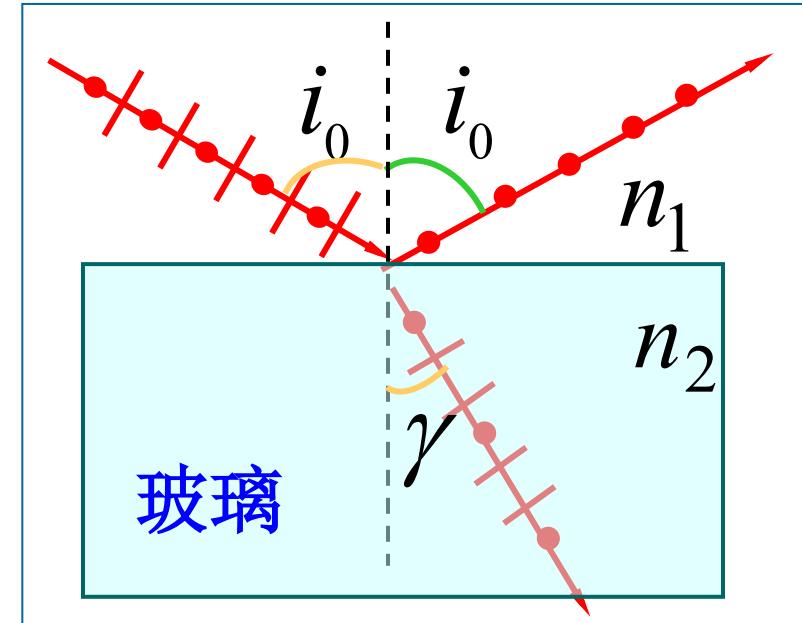


$$i_0 + r_0 = \frac{\pi}{2}$$

- 玻璃 $n_2=1.5$,

布儒斯特角 $i_0 = 56.3^\circ$

- 水 $n_2=1.33$, $i_0 = 53.1^\circ$



注意

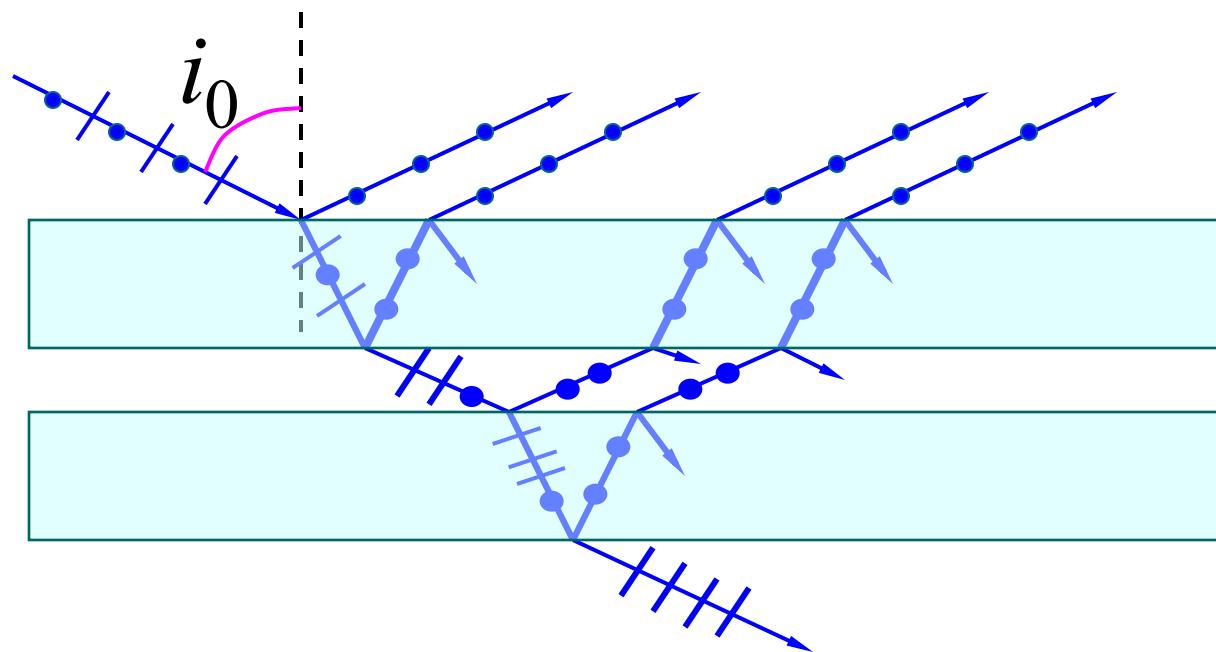
当自然光以起偏角入射时，由于反射光中只有垂直于入射面的光振动，所以入射光中平行于入射面的光振动全部被折射。又由于垂直于入射面的光振动也大部分被折射，而反射的仅是其中的一部分，所以，反射光虽然是完全偏振的，但光强较弱，而折射光是部分偏振的，光强却很强。

对于一般的光学玻璃，反射光的强度约占入射光强度的7.5%，大部分光将透过玻璃。

三、 玻璃堆

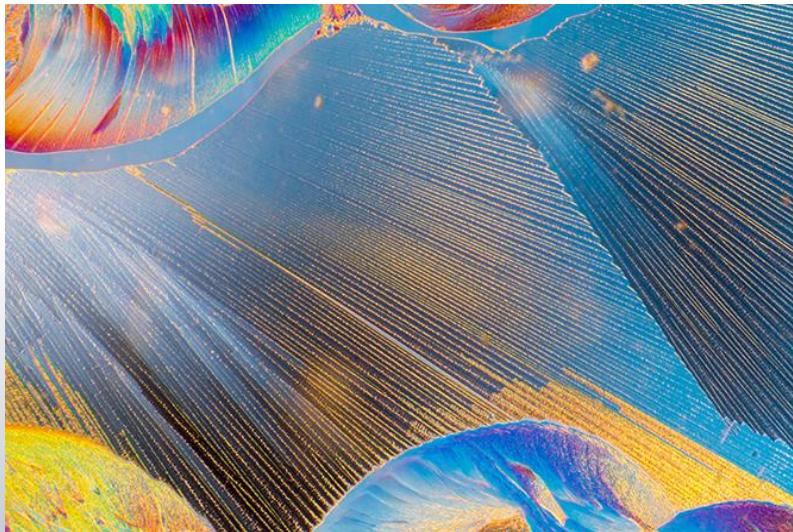
玻璃堆可产生较强的折射偏振光。

利用玻璃片堆产生线偏振光





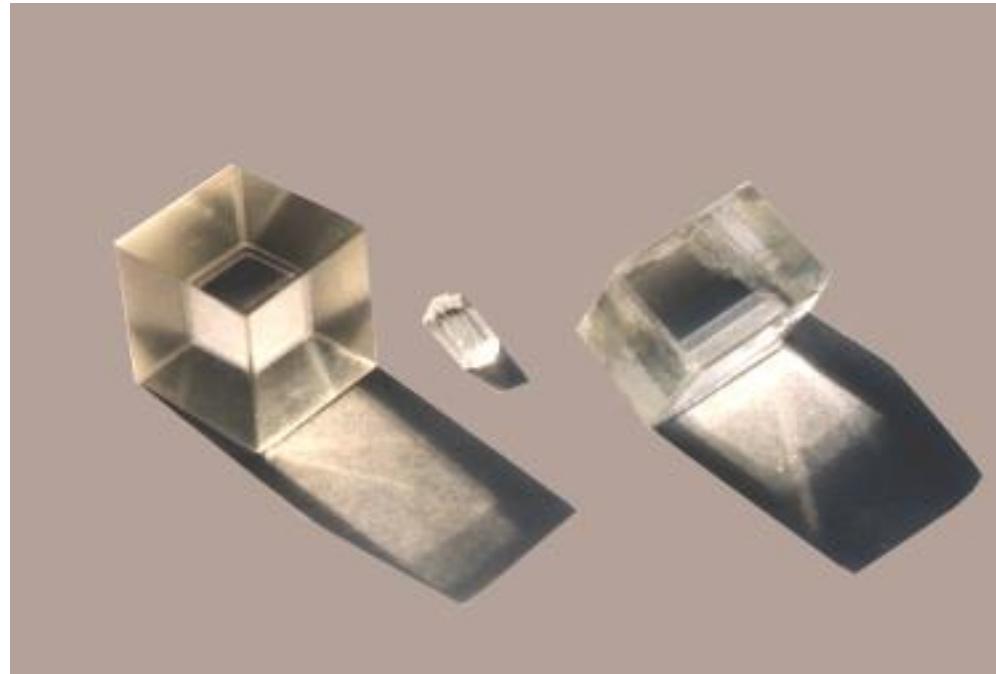
§ 10.4 光的双折射现象

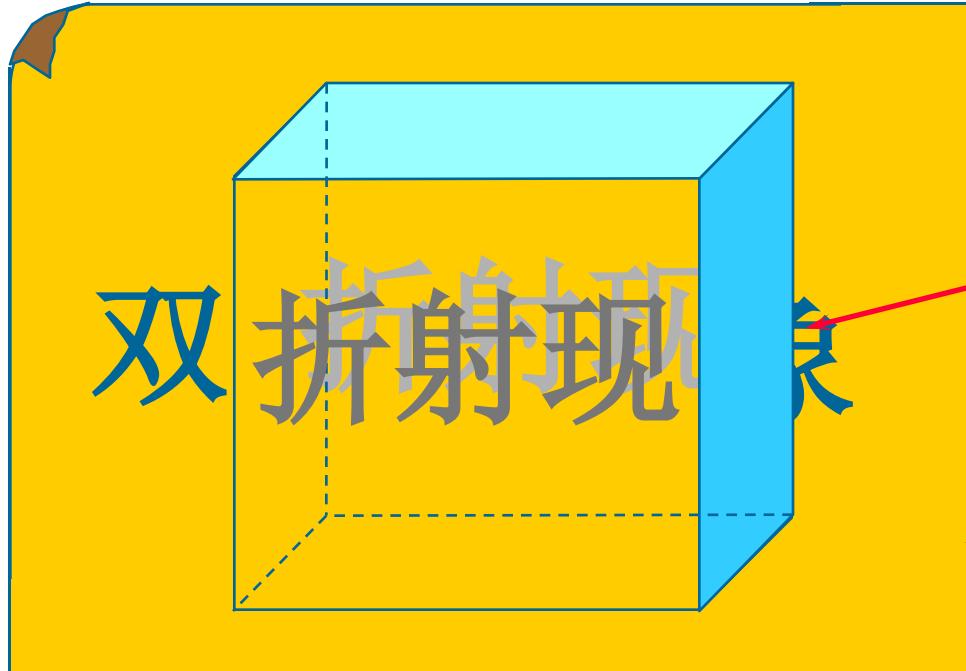


偏振显微镜下美图

一、双折射现象 晶体的光轴

自然光通过晶体后，可以观察到偏振现象。它是和双折射现象同时发生的。如方解石晶体。





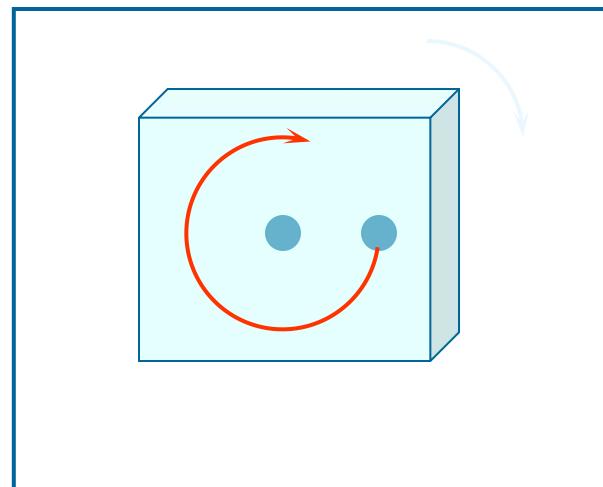
方解石晶体
 CaCO_3

纸面

纸上的字呈双像。说明光进入方解石以后分成了两束。这种一束光射入各向异性介质中折射光分为两束的现象叫双折射现象。

当光垂直晶体表面入射而产生双折射现象时，如果将晶体绕光的入射方向慢慢转动时，则其中按原方向传播的那一束光方向不变，而另一束光随着晶体的转动绕前一束光旋转。

例如：白纸上涂一个黑点，将方解石放在纸上，可观察到两个黑点，旋转方解石，一个黑点不动，另一个黑点旋转。

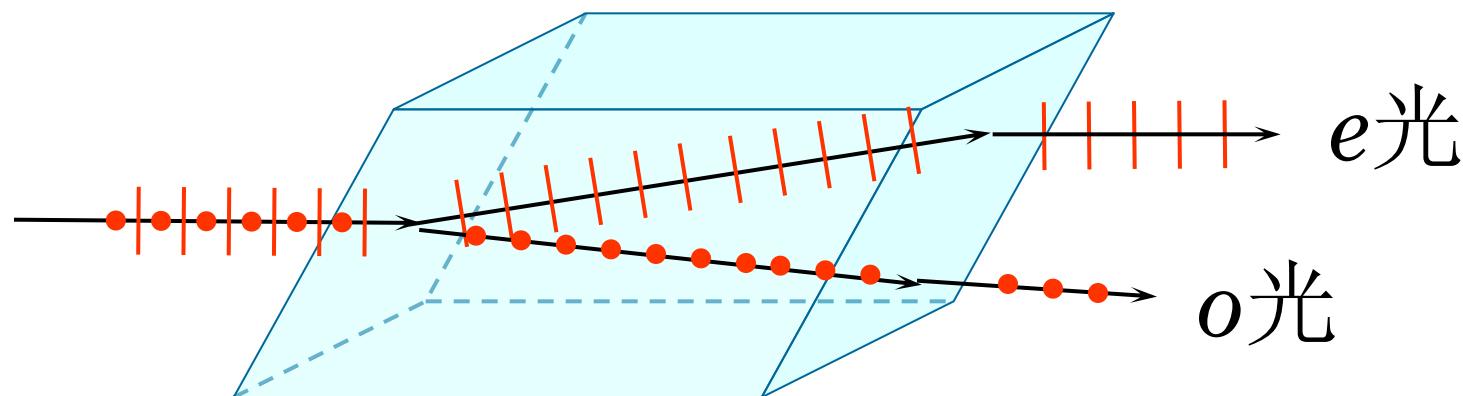


寻常光 --- o 光

服从折射定律，沿各方向的光的传播速度相同，各向折射率 n_o 相同，为偏振光。

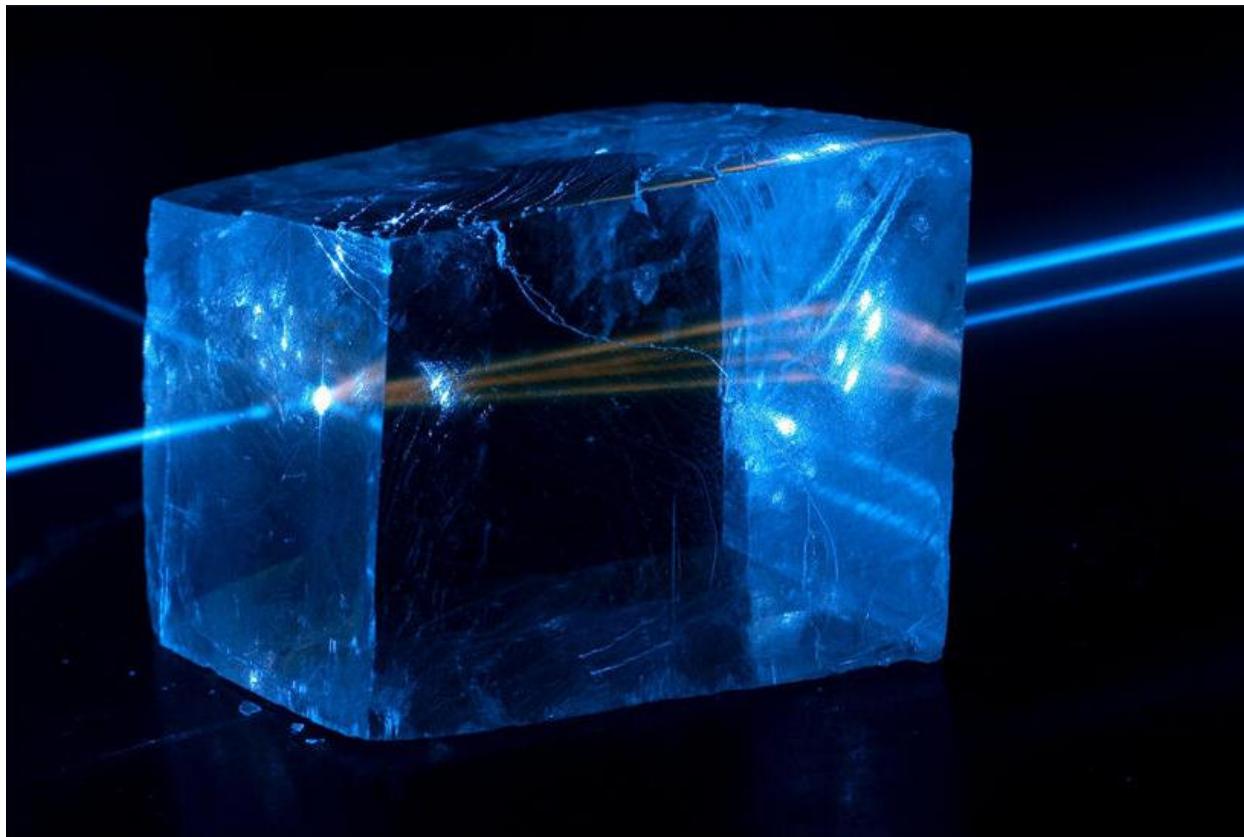
非常光 --- e 光

不服从折射定律，沿各方向的光的传播速度不相同，各向折射率 n_e 不相同，为偏振光。



实验证明：O光和e光均为偏振光。

光通过双折射晶体

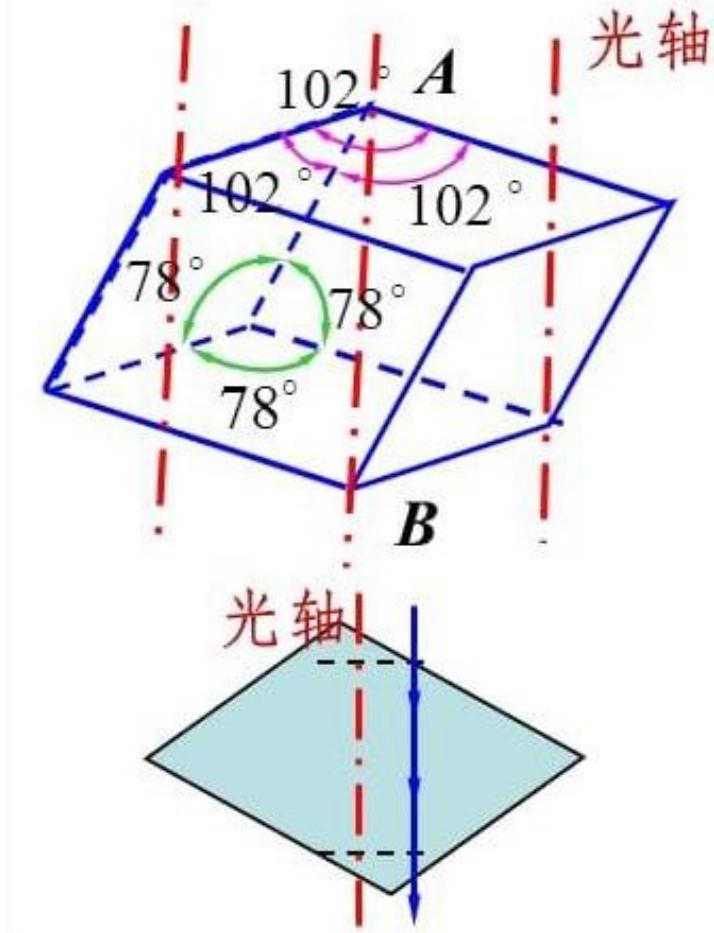


1. 方解石的光轴

在方解石这类晶体中存在一个特殊的方向，当光线沿这一方向传播时不发生双折射现象。称这一方向为晶体的光轴。

仅有一个光轴的晶体称单轴晶体（如方解石、石英）

有两个光轴的晶体称双轴晶体（云母、硫磺等）



方解石晶体

主截面

晶面法线与光轴组成的平面主截面由许多平行平面构成。

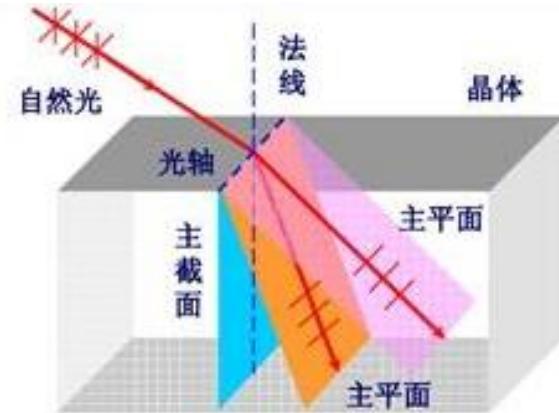
主平面

光轴和晶体内 任一条光线组成的平面。

注意：

(1) o光与e光都有各自的主平面，
入射面在主截面内时， o光e光的主
平面重合并同在主截面内。

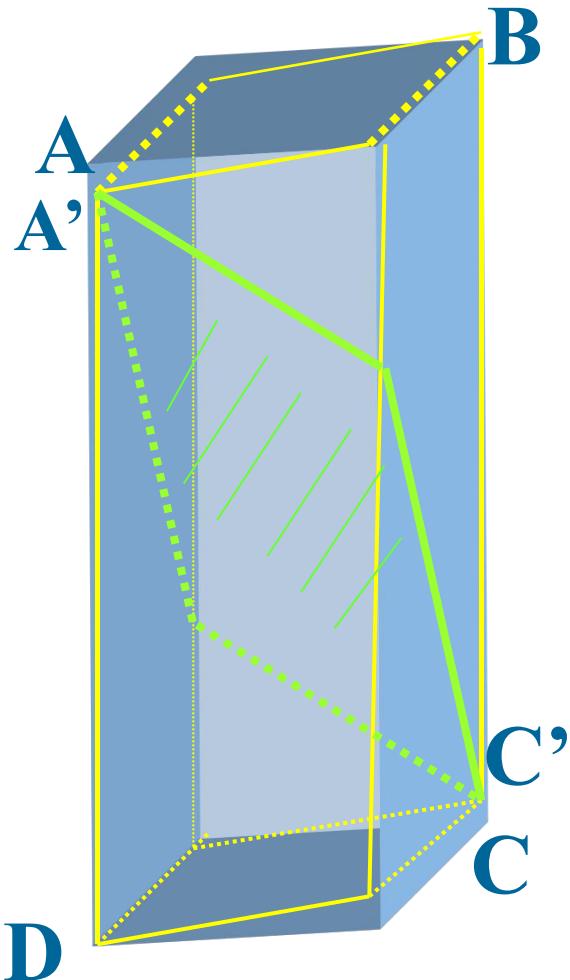
(2) 入射面在主截面内时， o光e光的振动面互相垂直且o光为
振动面垂直于主截面的偏振光； e光为振动面平行于主截面
的偏振光。



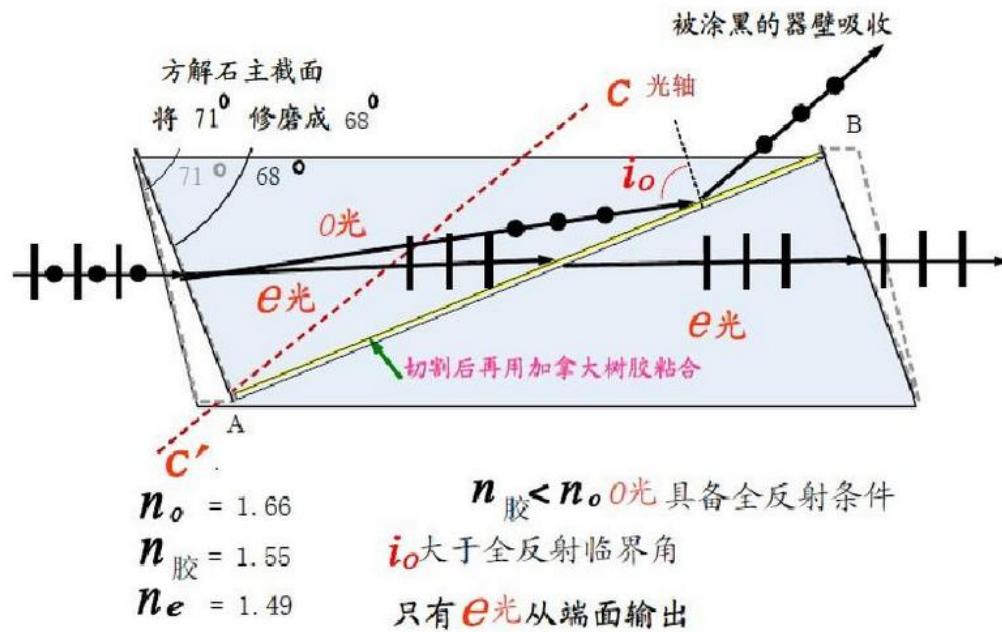
一般情况o 、 e二光的光振动并不完全垂直有一定大小的夹
角， e光也不在主截面内。

2. 偏振棱镜

尼科尔棱镜 (W·Nicol 1928年)



方解石

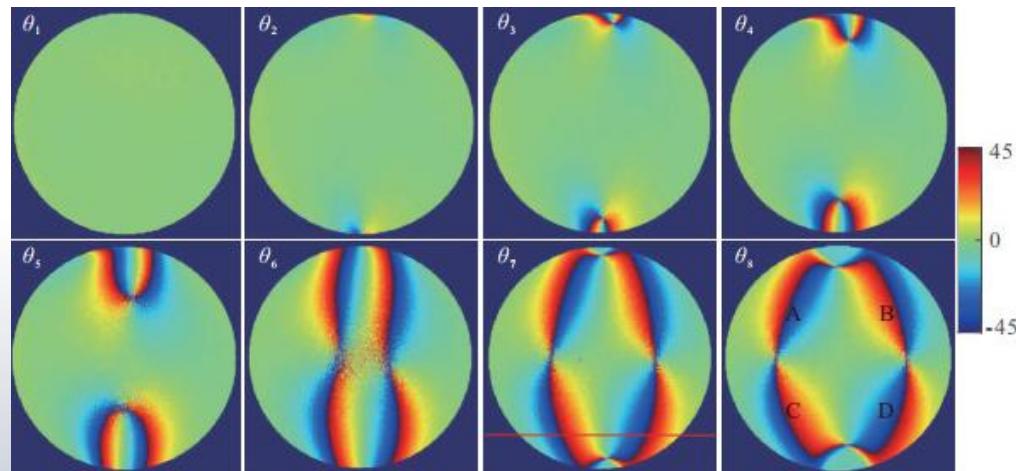


O光以 76° 入射到阿拉伯树胶，产生全反射后被吸收。

$$i_{\text{临介}} = \arcsin \frac{1.550}{1.658} = 70^\circ$$

e光出射成为偏振光

§ 10.5 偏振光的干涉 人为双折射现象



基于偏振态颜色编码



一、椭圆偏振光

两个相位相同、振动方向互相垂直的线偏振光，它们的振动方程为：

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t + \phi_2)$$

则任一时刻这两个光振动的合成光矢量为：

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j}$$

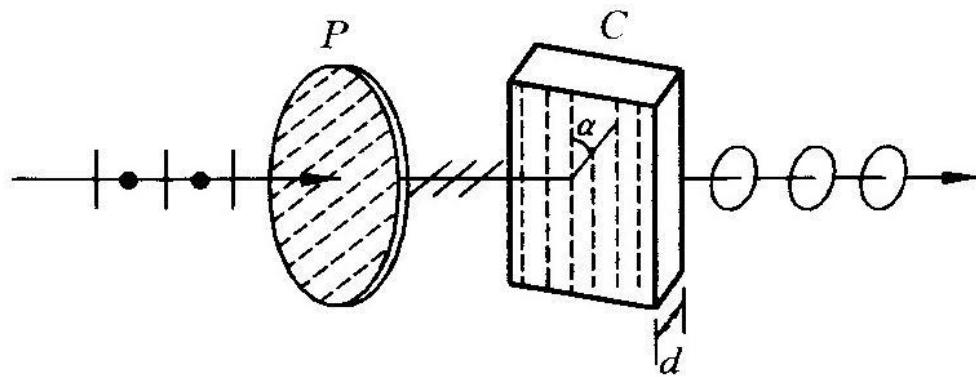
光矢量 \vec{E} 以角速度 ω 旋转， \vec{E} 的端点描绘出椭圆轨迹，这样的光就是椭圆偏振光。椭圆偏振光可以看成是两个偏振方向互相垂直、频率相同、有一定相位差的线偏振光的合成。

迎着光的传播方向看，若光矢量沿顺时针方向转动，称为右旋椭圆偏振光，反之称为左旋的。

二、圆偏振光

在椭圆偏振光中，如果两个分振动的光振幅相等，即 $E_{0x}=E_{0y}$ ，而且两个分振动的相位差 $\phi_2-\phi_1=\pm\pi/2$ ，此时椭圆轨迹变为圆，这样的光就是圆偏振光。

三、椭圆偏振光的获得



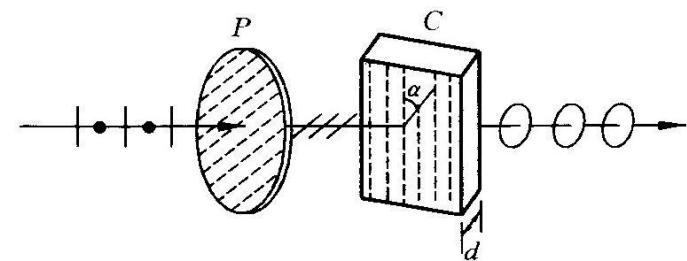
图中P为偏振片，C为单轴晶片，与P平行放置，其厚度为d，主折射率为 n_o 和 n_e ，光轴平行于晶面并与p的偏振化方向成夹角 α 。

单色自然光通过偏振片P成为线偏振光，其振幅为 E ，光振动方向与晶片光轴的夹角为 α 。此线偏振光垂直射入晶片C后，产生双折射， o 光振动垂直于光轴，振幅为 $E_o = E \sin \alpha$
 e 光振动平行于光轴，振幅为 $E_e = E \cos \alpha$

在这种情况下， o 光和 e 光在晶体中沿同一方向传播，但传播速度不同，可得两束光通过晶片后的相位差为

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

式中 λ 是单色光在真空中的波长。



这样的两束频率相同、振动方向互相垂直、有一定相位差的光互相叠加，就形成椭圆偏振光。

讨论

(1) 适当地选择晶片的厚度d, 使得**o**光和**e**光的光程差

$$\delta = (n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4}$$

这时相应地相位差为

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

则两束光通过晶片后叠加的结果是一正椭圆偏振光, 其厚度为

$$d = \frac{\lambda}{4(n_o - n_e)}$$

此时, 如果再使 $\alpha=\pi/4$, 则 $E_o=E_e$, 通过晶片的光即成为圆偏振光。

使**o**光和**e**光的光程差等于四分之一波长的晶片成为四分之一波片。显然, 四分之一波片是对特定波长而言的。

(2) 如果晶片的厚度 d 使得o光和e光的光程差为

$$\delta = (n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{2}$$

相应的相位差为

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

则两束光通过晶片后叠加的结果仍为线偏振光，但它的振动面入射的线偏振光转过了 2α 角。 $\alpha=\pi/4$ 时，可使线偏振光的振动面旋转 $\pi/2$ ，这样的晶片称为二分之一波片，其厚度为

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

四、椭圆偏振光和圆偏振光的检验

当入射到检偏器上的光是圆偏振光或椭圆偏振光时，随着检偏器的转动，对于圆偏振光，其透射光强将和自然光的情况一样，光强不变化；对于椭圆偏振光，其透射光强的变化和检验部分偏振光是的情况一样。因此，仅用检偏器观察光强的变化，无法将圆偏振光和自然光区分开来；同样也无法将椭圆偏振光和部分偏振光分开。

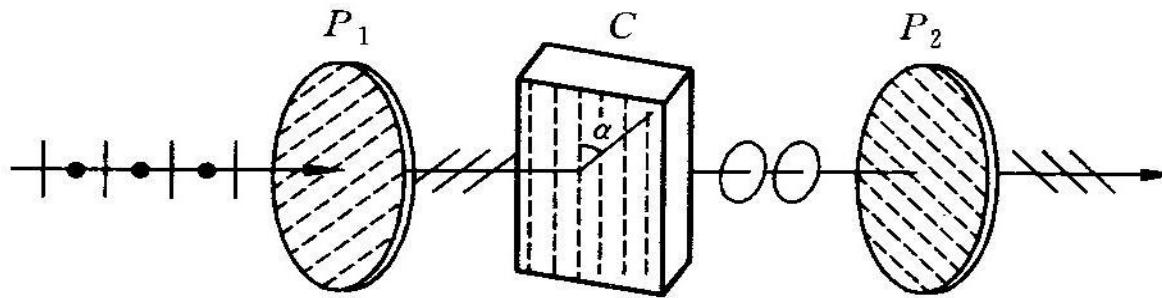
圆偏振光和自然光或者椭圆偏振光和部分偏振光的根本区别是相位关系的不同。圆偏振光和椭圆偏振光是由两个有确定相位差的互相垂直的光振动合成的，合成光矢量作有规律的旋转。而自然光和部分偏振光在不同振动面上的光振动是彼此独立的，因而表示它们的两个互相垂直的光振动之间没有恒定的相位差。根据这一区别就可以将它们区分开。

通常区分圆偏振光和自然光的方法是在检偏器上加上一块四分之一波片。圆偏振光通过四分之一波片后变成线偏振光，这样再转动检偏器时就可观察到光强有变化，并出现最大光强和消光。如果是自然光，通过四分之一波片后仍为自然光，转动检偏器时光强没有变化。

检验椭圆偏振光时，应使四分之一波片的光轴方向平行于椭圆偏振光的长轴或短轴，这样椭圆偏振光通过四分之一波片后也变成线偏振光，而部分偏振光通过四分之一波片后仍为部分偏振光。

五、偏振光的干涉

产生偏振光干涉的装置如图所示，它与获得偏振光的不同之处只是在晶片C的后面再加上一块偏振片P₂，并使P₂与P₁的偏振化方向正交。



单色自然光垂直入射偏振片P₁，通过P₁后成为线偏振光，再通过晶片C成为椭圆偏振光。椭圆偏振光是由两束振动方向互相垂直、频率相同、有一定相位差的线偏振光合成的。这两束光再射入P₂时，只有沿P₂的偏振化方向的光振动才能通过。这样就得到了两束振动方向相同、频率相同、相位差恒定的相干光。

下图为通过 P_1 、 C 和 P_2 的光的振幅矢量图。这里 P_1 、 P_2 表示两正交偏振片的偏振化方向， C 表示晶片的光轴方向。 A_1 为入射晶片的线偏振光的振幅， A_o 和 A_e 为通过晶片后两束光的振幅， A_{2o} 和 A_{2e} 为通过 P_2 后两束相干光的振幅。

$$A_o = A_1 \sin \alpha$$

$$A_e = A_1 \cos \alpha$$

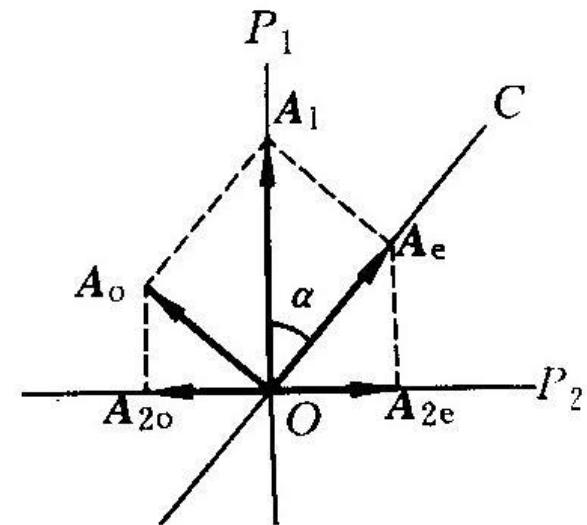
$$A_{2o} = A_o \cos \alpha = A_1 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$A_{2e} = A_e \sin \alpha = A_1 \sin \alpha \cos \alpha$$

可见，当 P_1 、 P_2 正交时，

$$A_{2o} = A_{2e}$$

即两分振动振幅相等。在这种情况下观察干涉现象最清晰。



偏振光干涉的振幅矢量图

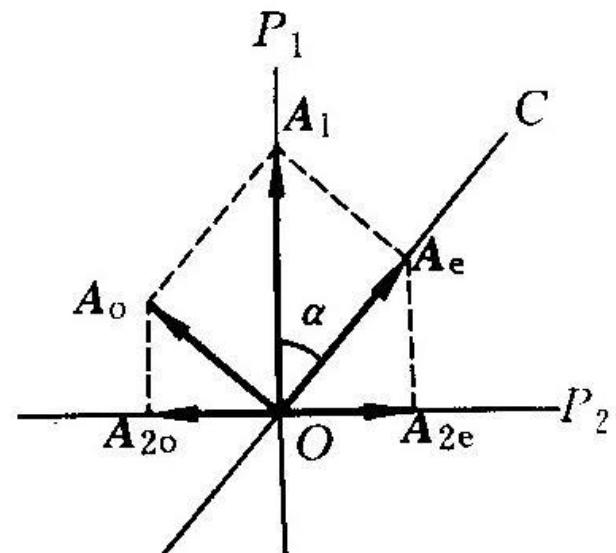
从下图还可以看出, A_{2o} 和 A_{2e} 的方向相反, 这表明从晶片C射出时, 两束光通过偏振片P₂后, 产生了附加的相位差 π , 这一附加的相位差和P₁、P₂的偏振化方向间的相对位置有关, 在二者平行时就没有附加相位差。

由于从晶片C射出时, 两束光的相位差满足

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

再考虑到附加相位差, 从偏振片P₂射出的两束相干光的相位差为:

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



偏振光干涉的振幅矢量图

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

当 $\Delta\phi = \pm 2k\pi$ 或 $(n_o - n_e)d = \pm(2k-1)\frac{\lambda}{2}$ 干涉加强；
当 $\Delta\phi = \pm(2k+1)\pi$ 或 $(n_o - n_e)d = \pm k\lambda$ 干涉减弱。

如果晶片厚度均匀，当用单色自然光入射时，干涉加强， P_2 后面的视场最明亮；干涉减弱时，视场最暗，并无干涉条纹。当晶片厚度不均匀时，各处干涉情况不同，视场中将出现干涉条纹。

白光照，不同波长可在不同厚度处加强，故呈彩色称色偏振。

O光e光两线偏振光能否发生干涉？

不能！O光、e光振动垂直，不是相干光。

应用：

(1) 偏光显微镜。

(2) 利用偏振光的干涉研究材料内部应力分布
——光测弹性学。

有些材料在力作用下变为各向异性，产生双折射

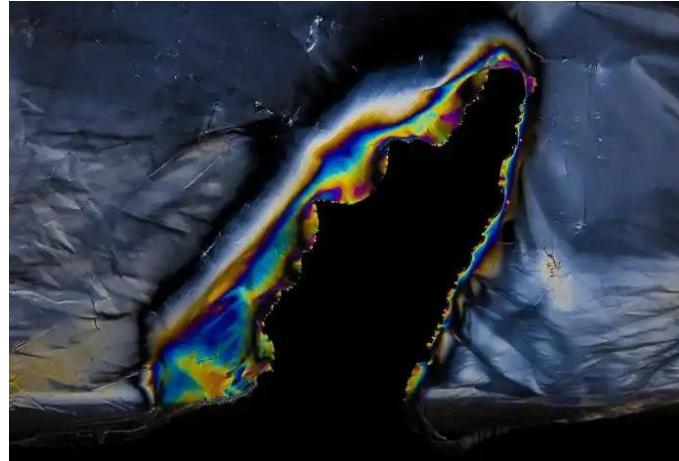
$$n_o - n_e \propto \text{应力}$$

同一应力处，对应同一条纹，白光照呈彩条。

六、人为双折射现象

1. 光弹效应

当塑料、玻璃、环氧树脂等非晶体受到机械应力时，会呈现出光学各向异性而产生双折射性质。



撕裂的塑料膜的光弹效应

2. 电光效应

1875年，克尔在实验中发现有些非晶体或液体在电场的作用下会定向排列，从而具有类似于晶体的各向异性，称为克尔效应。克尔效应是一种电光效应，可作为一种高速开关。

