

第十五章 波动光学

第三部分：偏振

§ 15. 11 光的偏振 五种偏振光

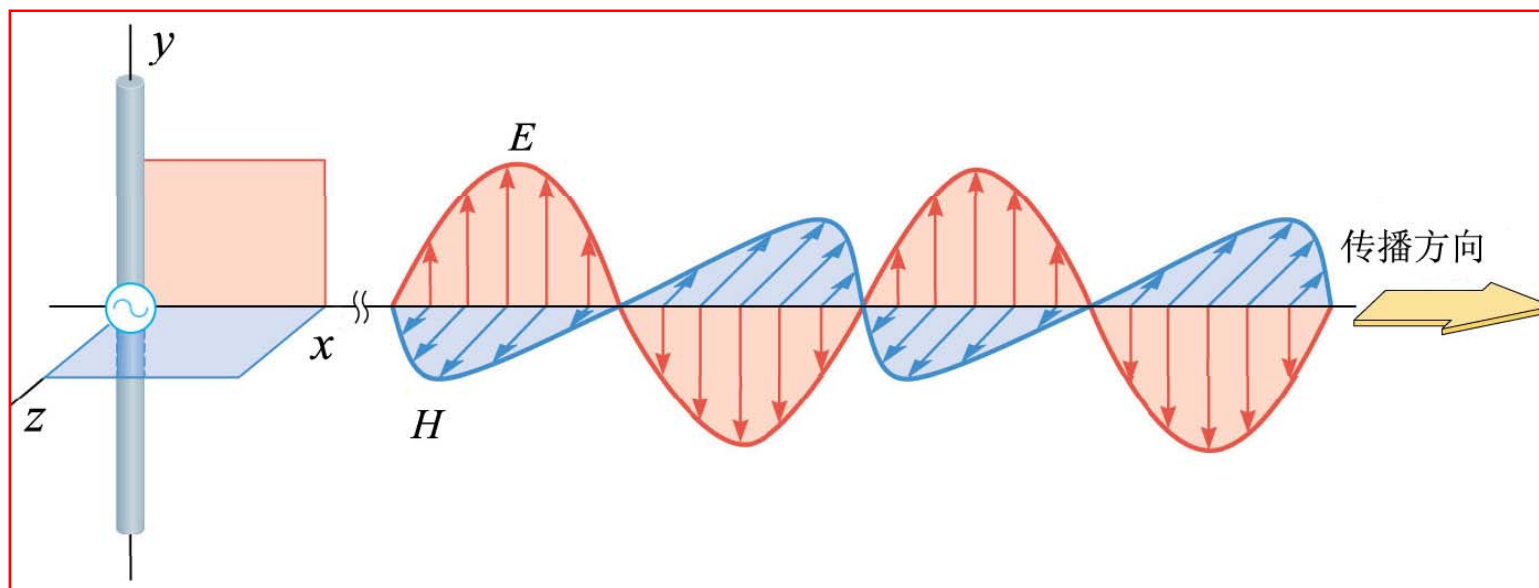
§ 15. 12 偏振片 马吕斯定律

§ 15. 13 光在反射折射时的偏振 布鲁斯特定律

§ 15. 14 光的双折射

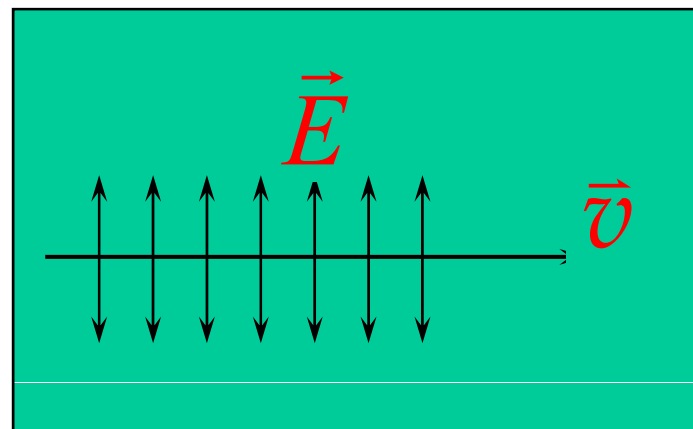
§ 15. 15 尼科尔棱镜 沃拉斯顿棱镜 波晶片

§ 15.11 光的偏振 线偏振光和自然光

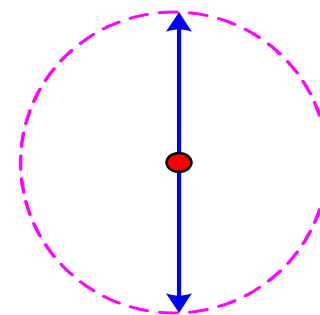
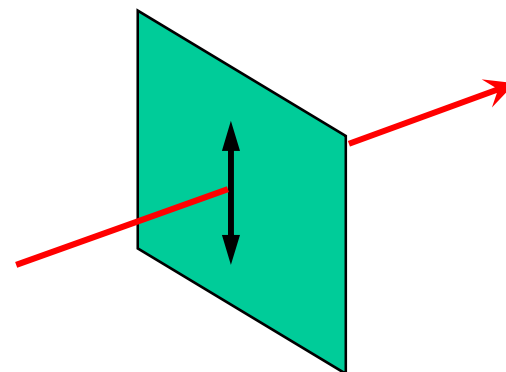
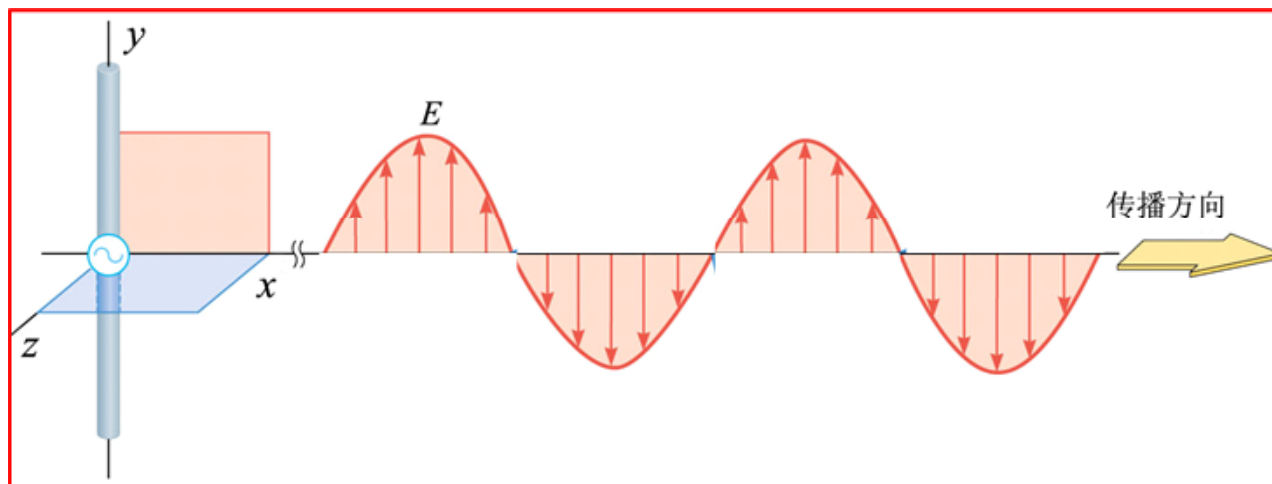


光振动：电磁波的 \vec{E} 振动。

光矢量：电磁波的 \vec{E} 矢量。

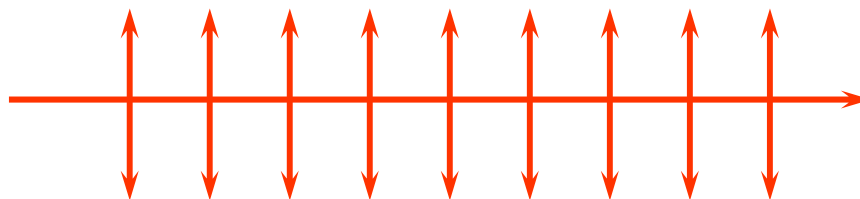


线偏振光（平面偏振光）



线偏振光表示法：

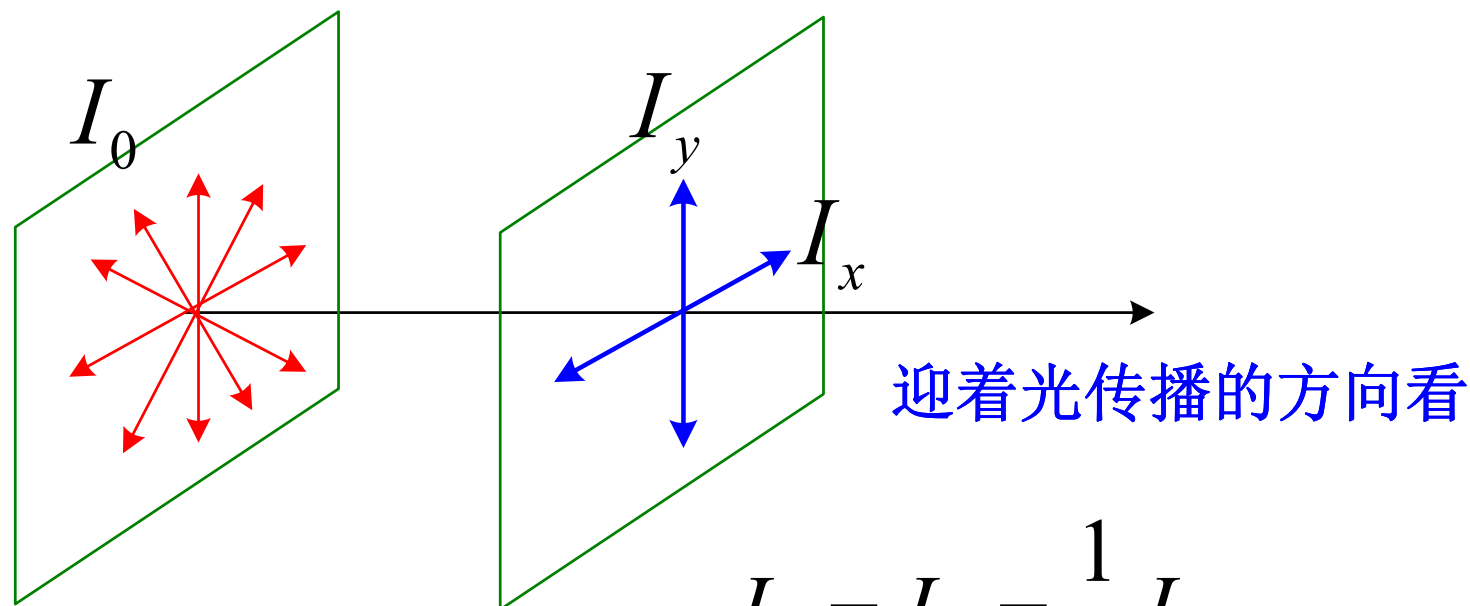
光矢量在屏平面内



光矢量与屏平面垂直

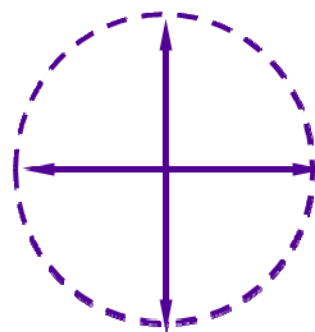


自然光:

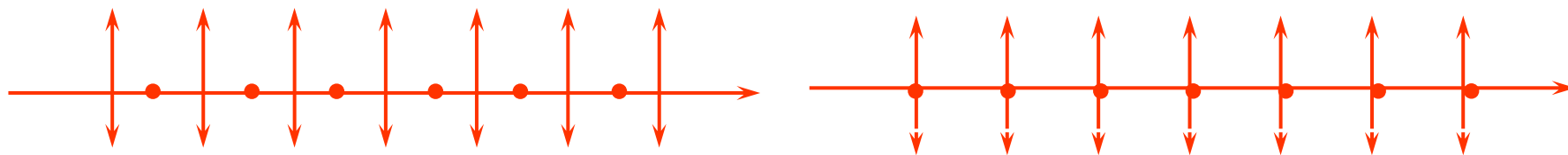


$$I_x = I_y = \frac{1}{2} I_0$$

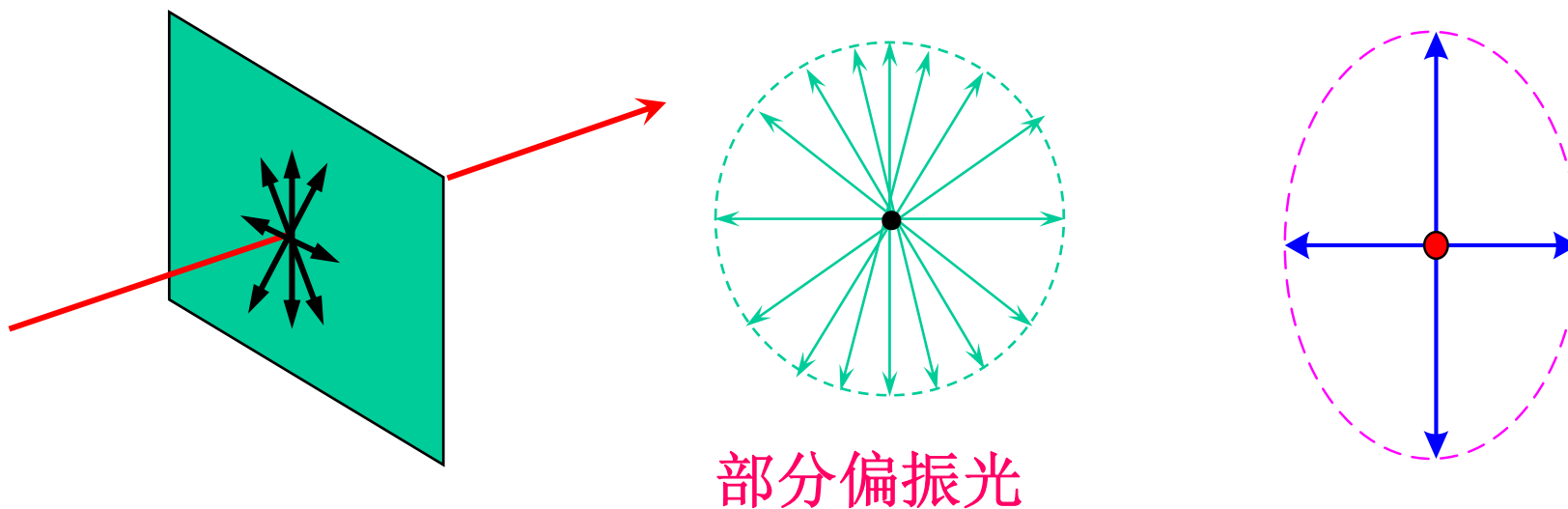
各个方向的光振动全有
各个振动方向的强度相等



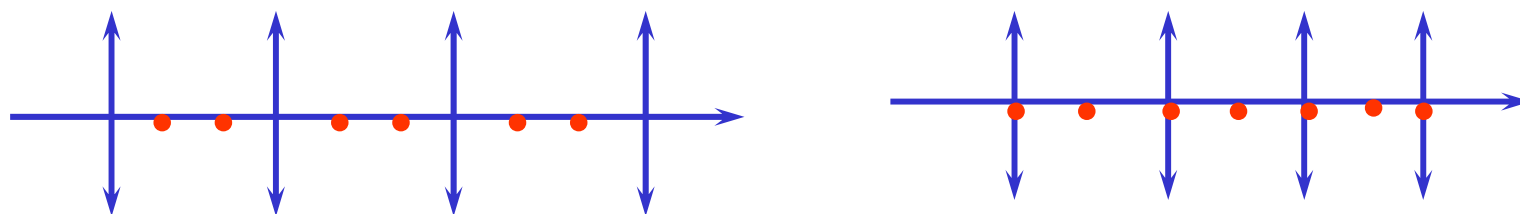
自然光的表示法:



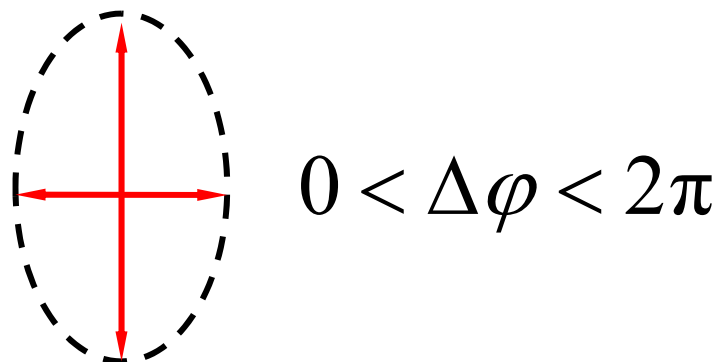
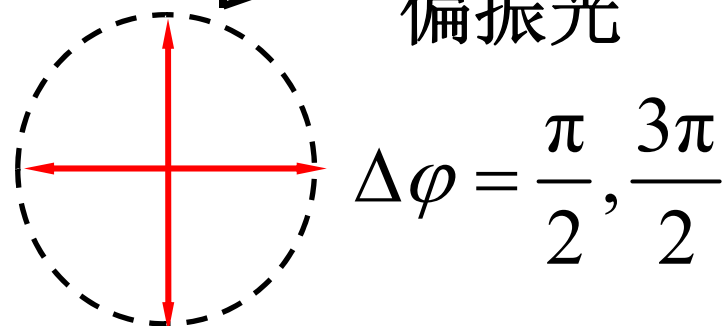
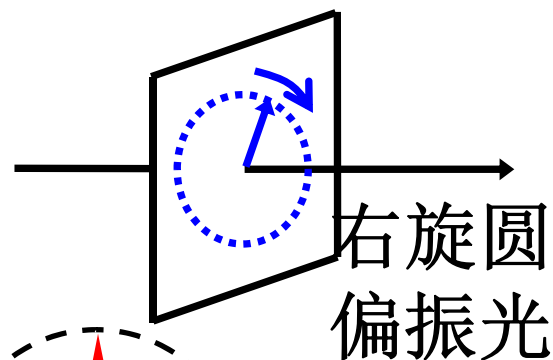
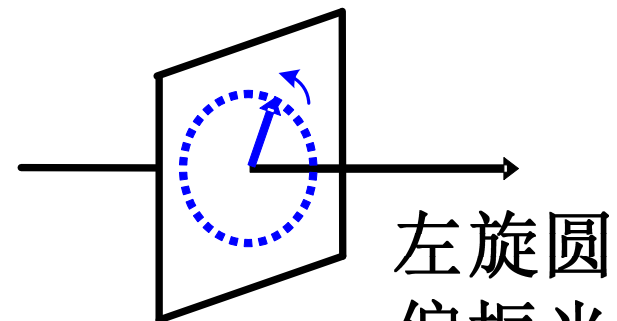
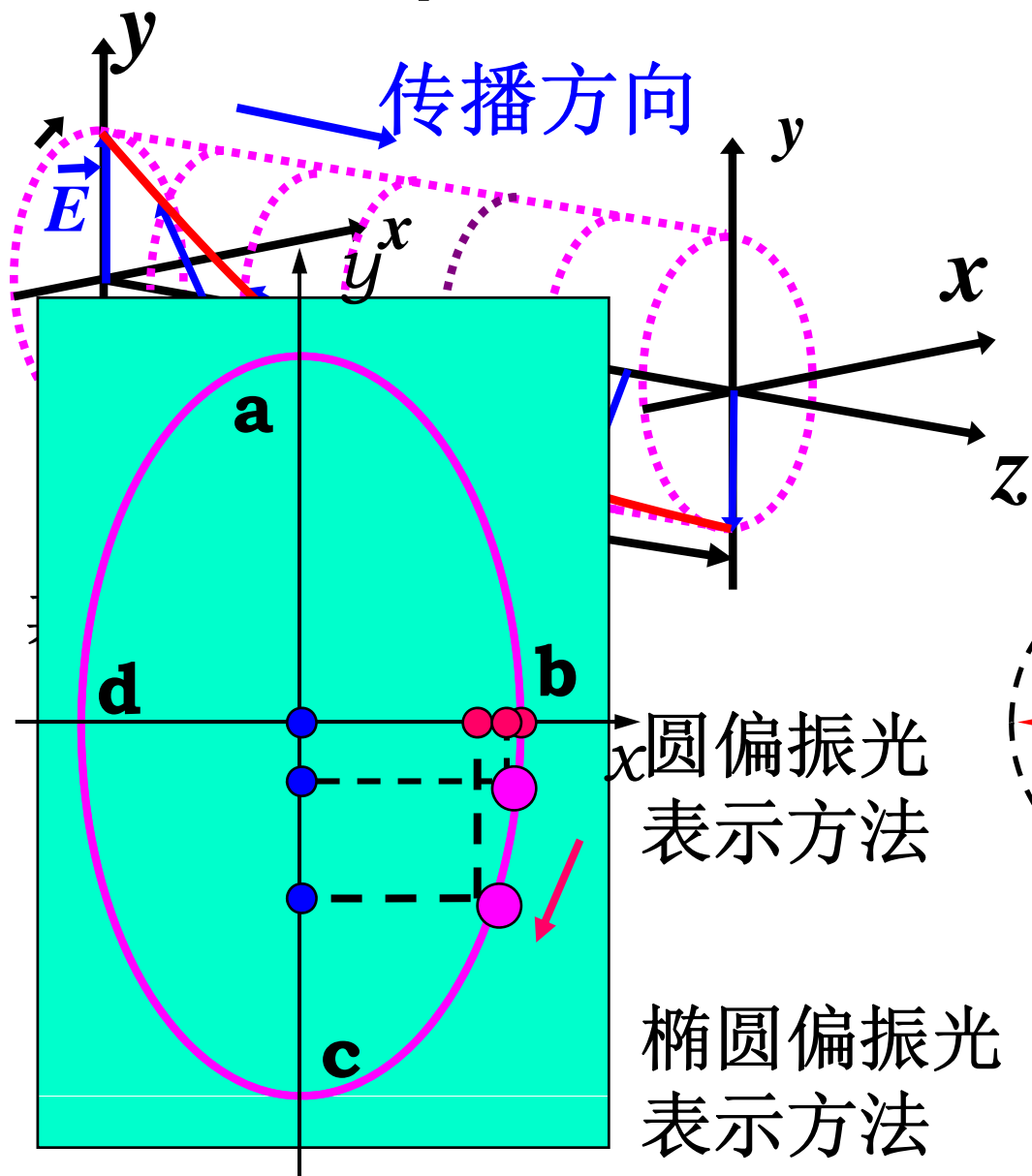
部分偏振光



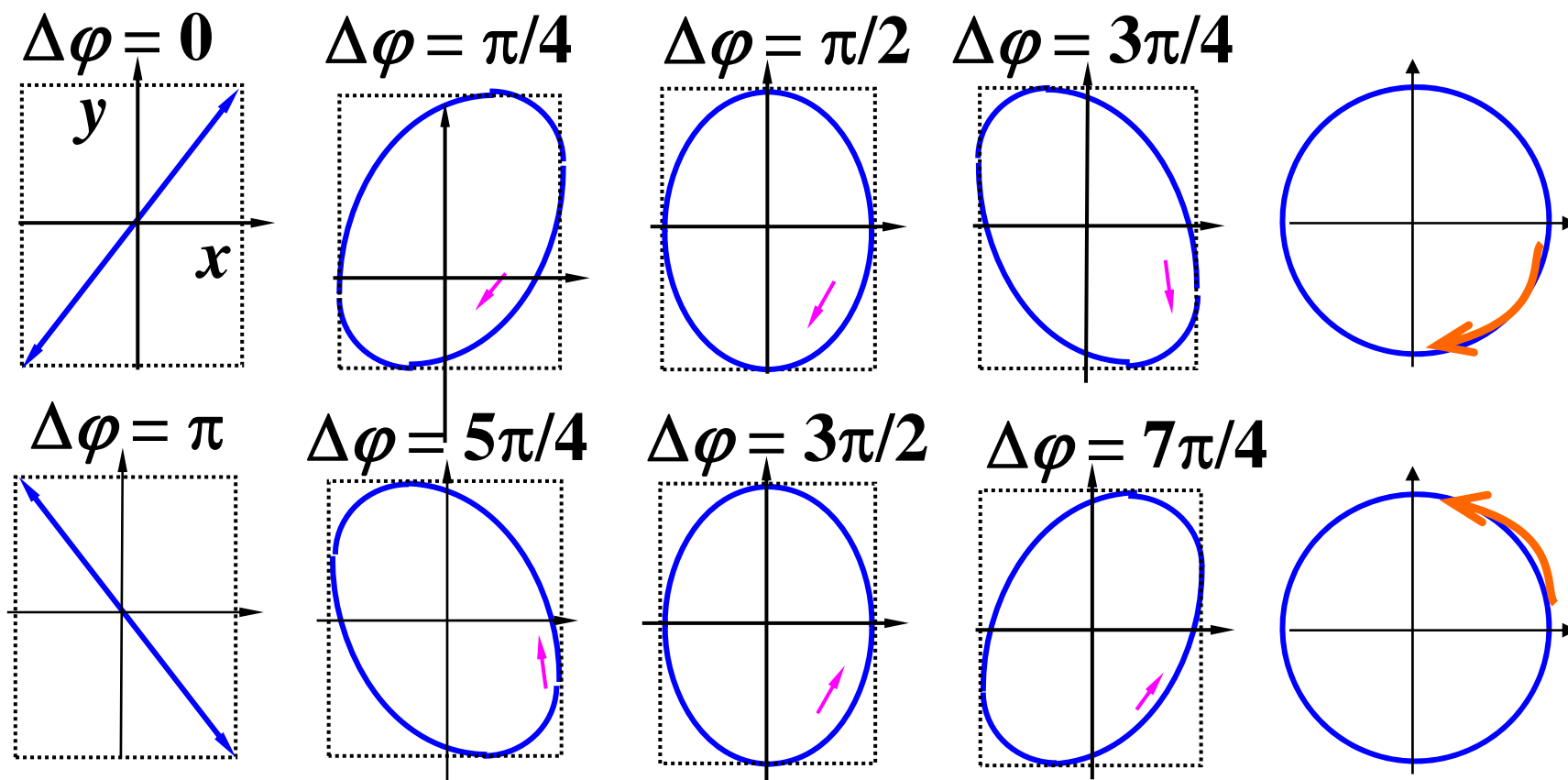
部分偏振光表示法:



圆偏振光 \ 椭圆偏振光



光矢量末端点的运动轨迹是椭圆或圆

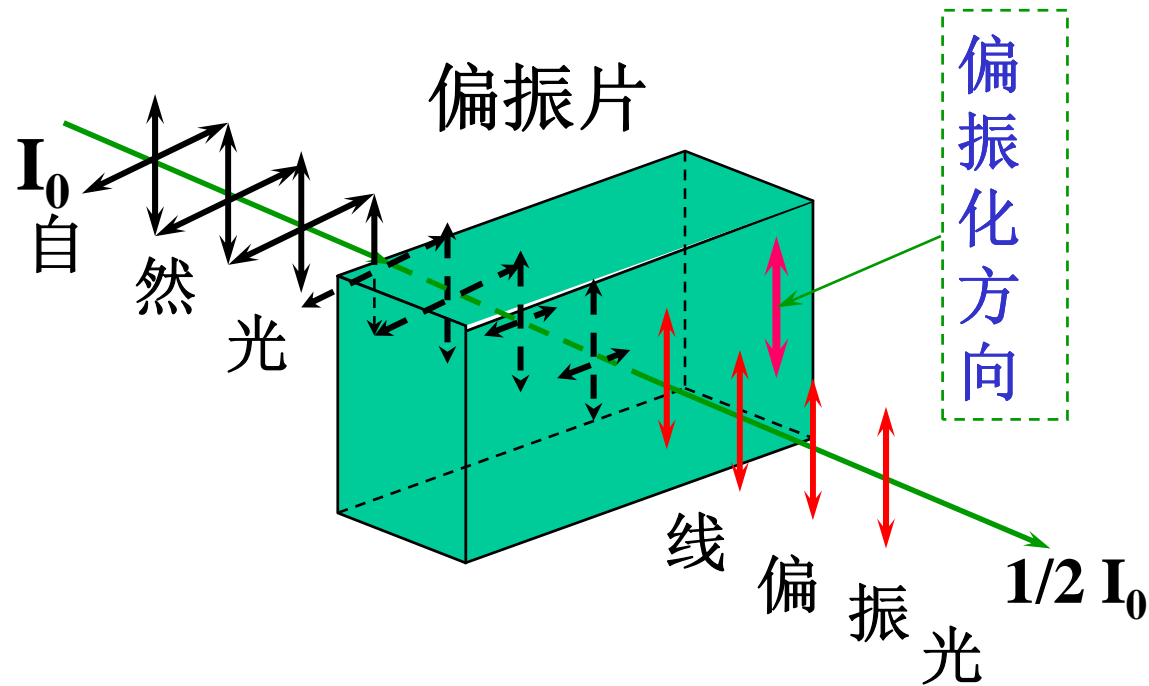


椭圆和圆偏振光可看成两束频率相同、振动方向相互垂直、相位差恒定的线偏振光的合成。

§ 15.12 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律

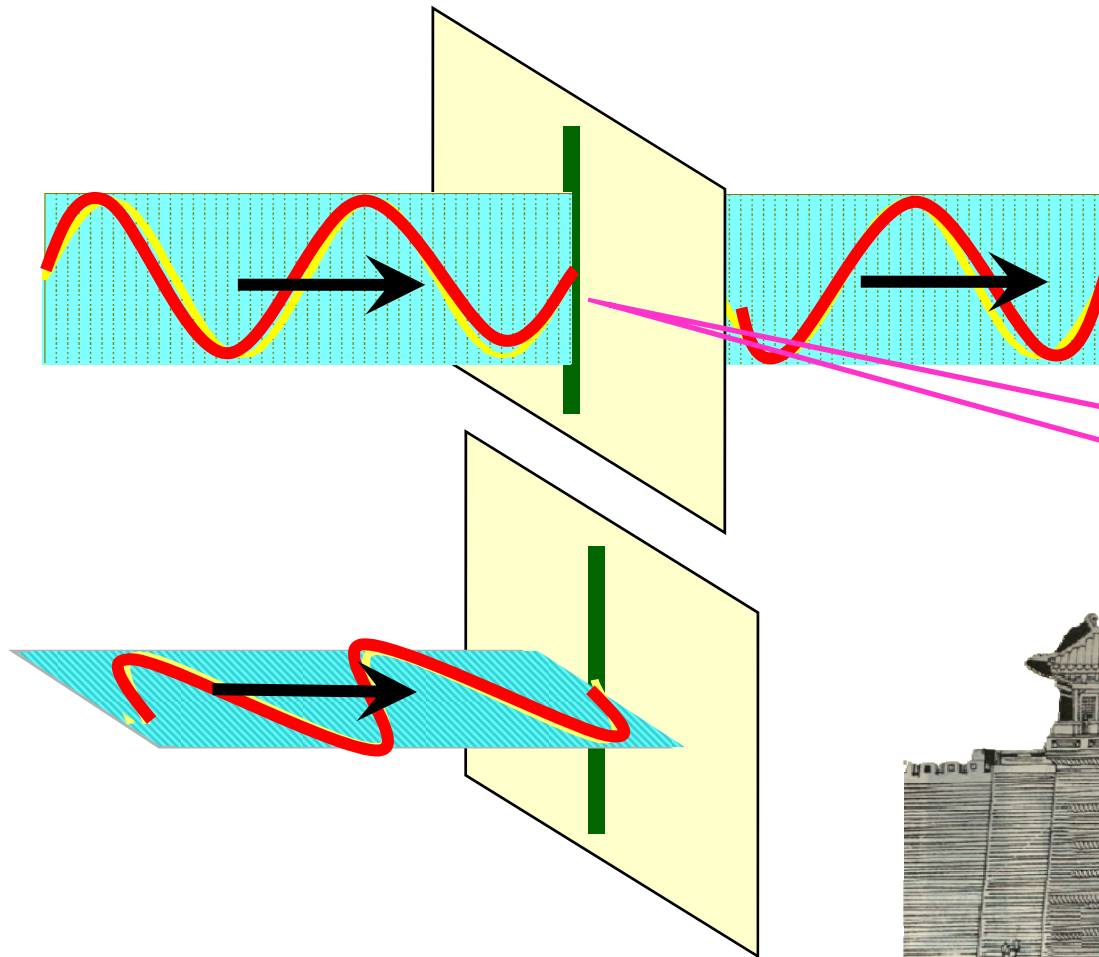
一、偏振片：

能吸收某一方向的光振动，而只让与其偏振化方向一致的光振动通过的一种透明薄片。

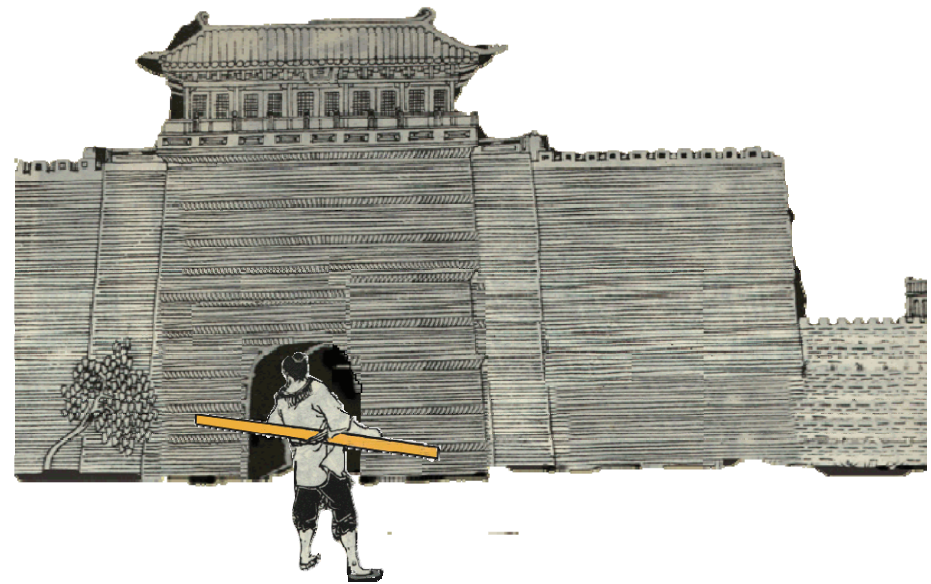


自然光通过偏振片后变为线偏振光，称为**起偏**。

形象说明偏振片的原理

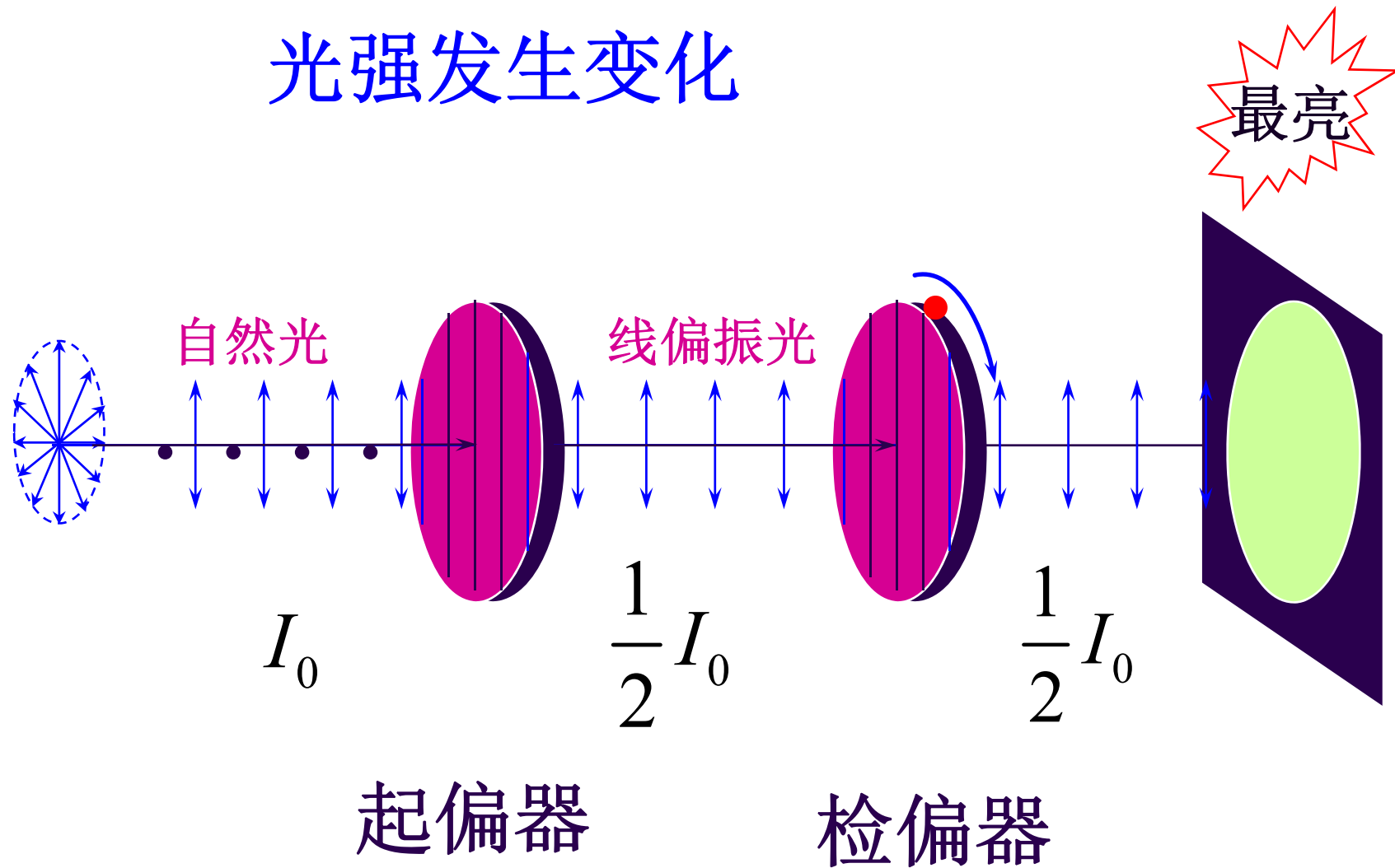


通光方向



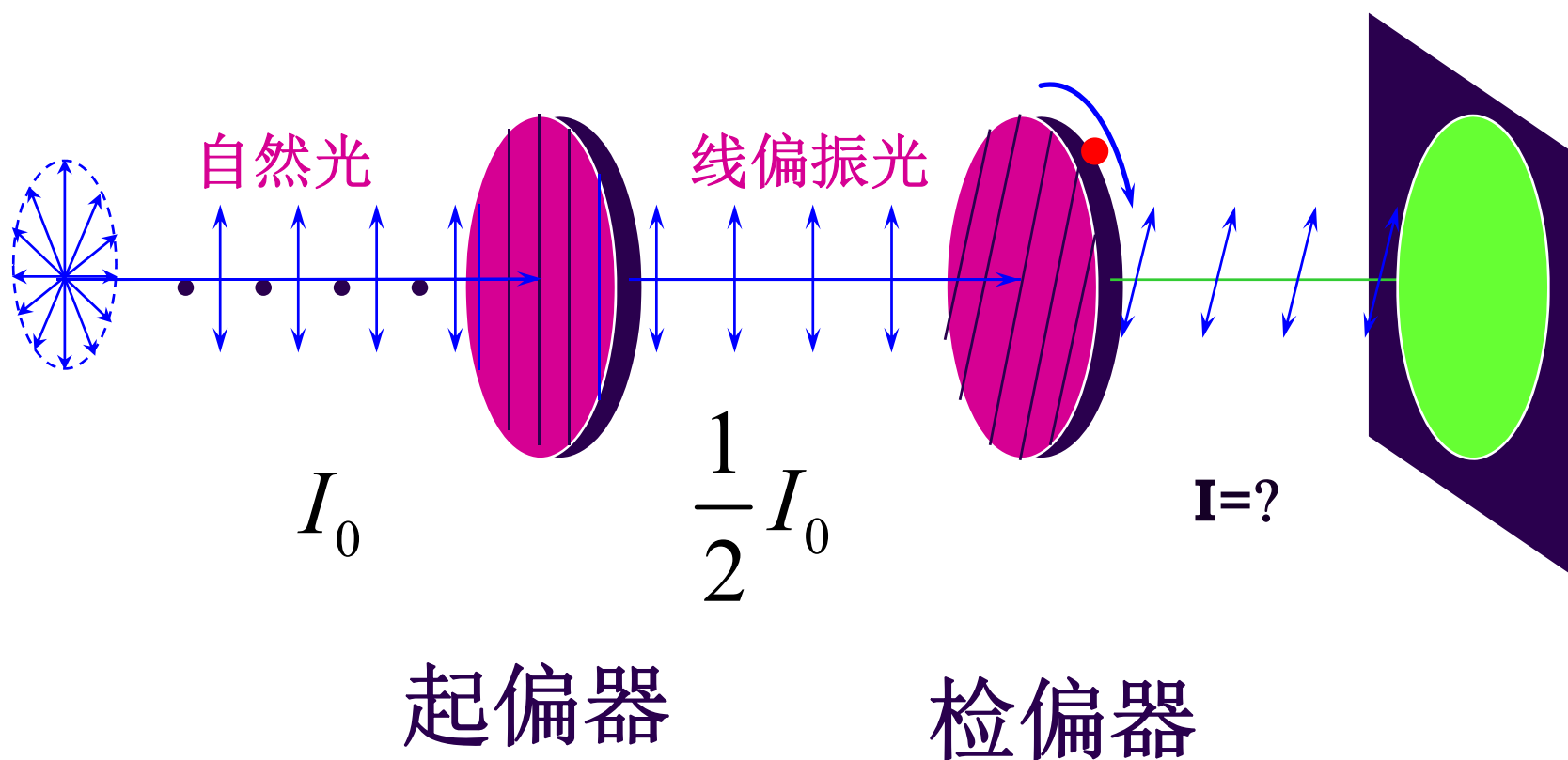
横拿扁担进不了城门

线偏振光通过旋转的检偏器， 光强发生变化

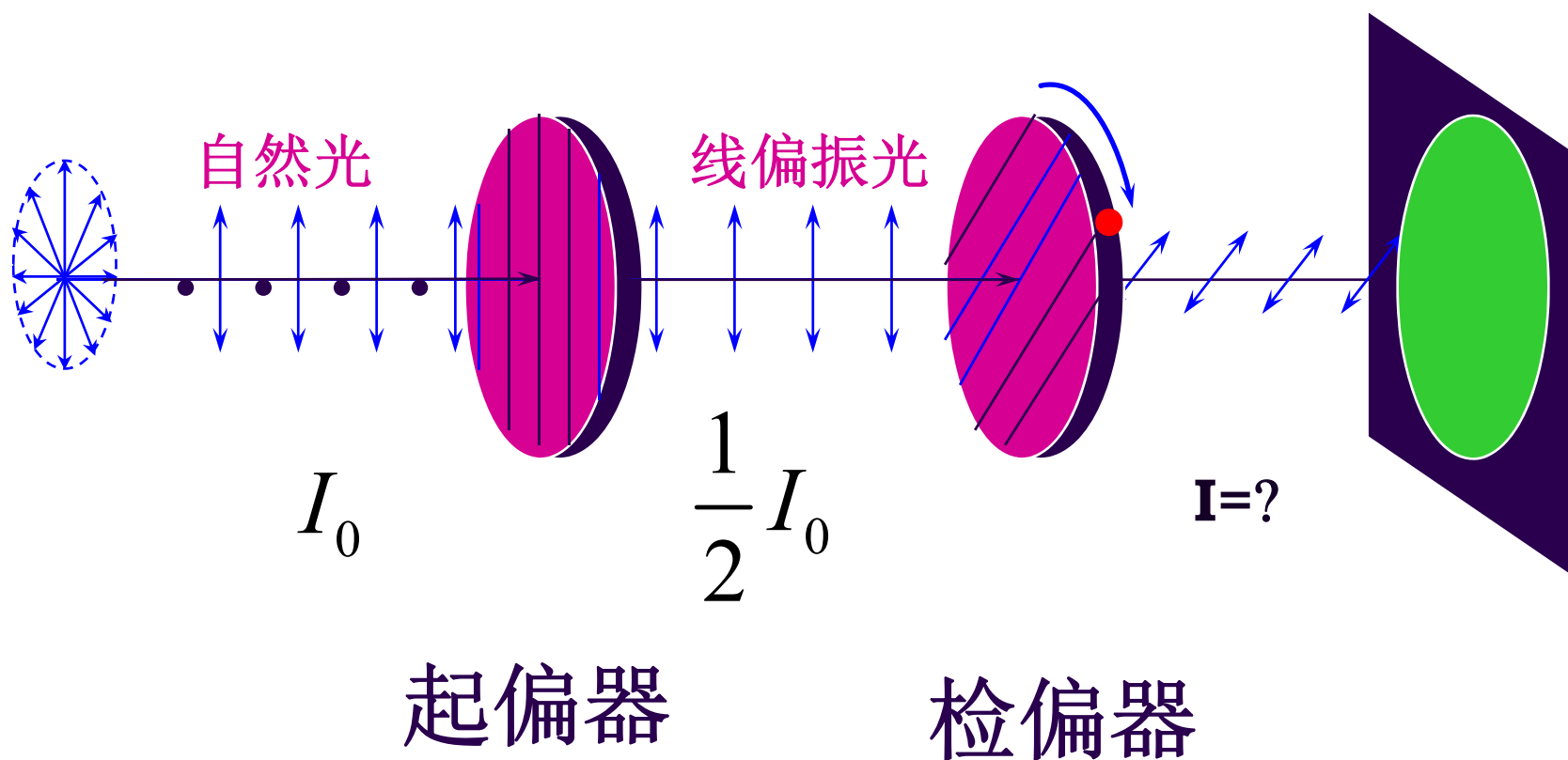


偏振片又可用于检验光线的偏振化程度，称为**检偏**。

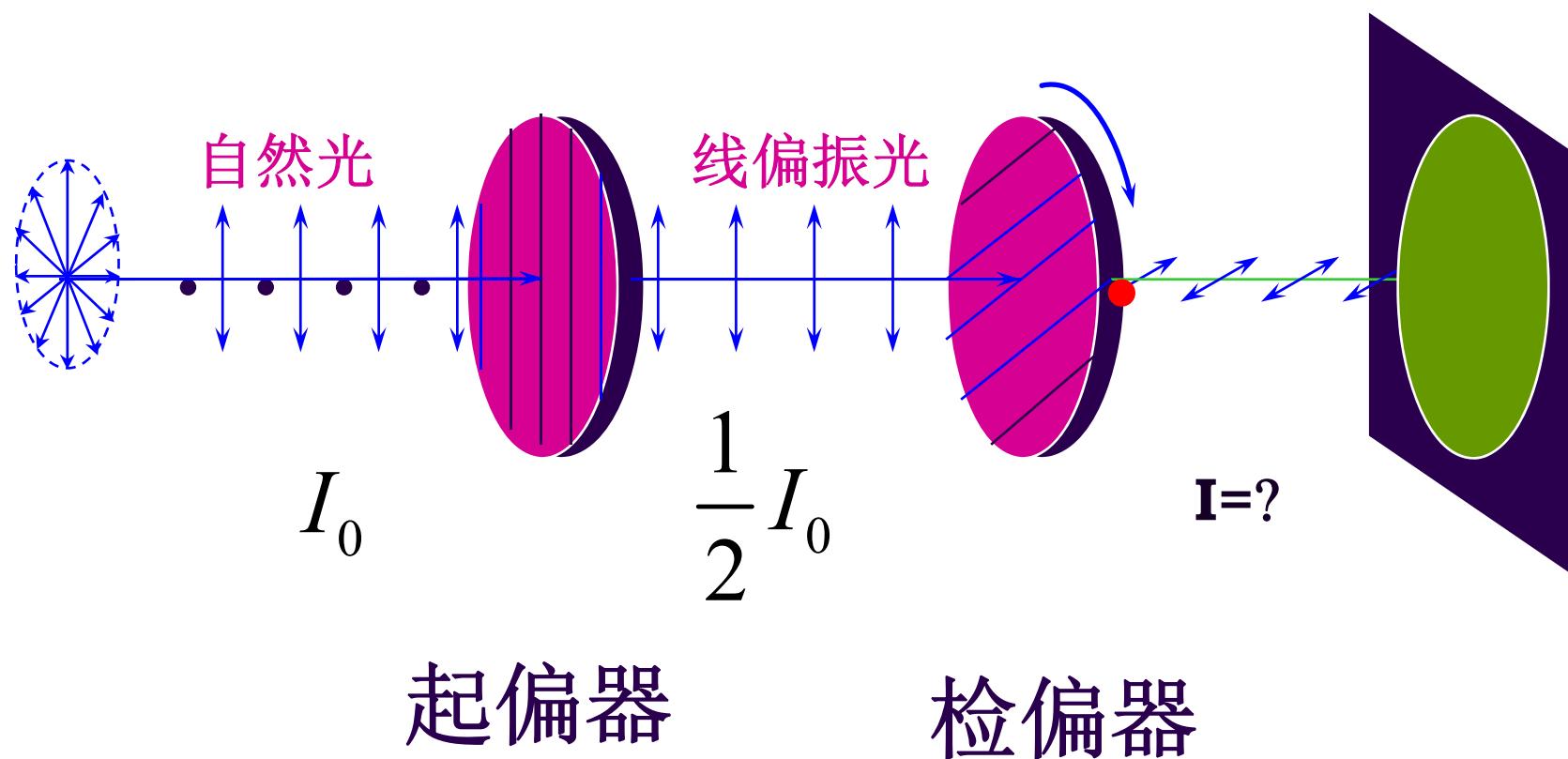
线偏振光通过旋转的检偏器，
光强发生变化



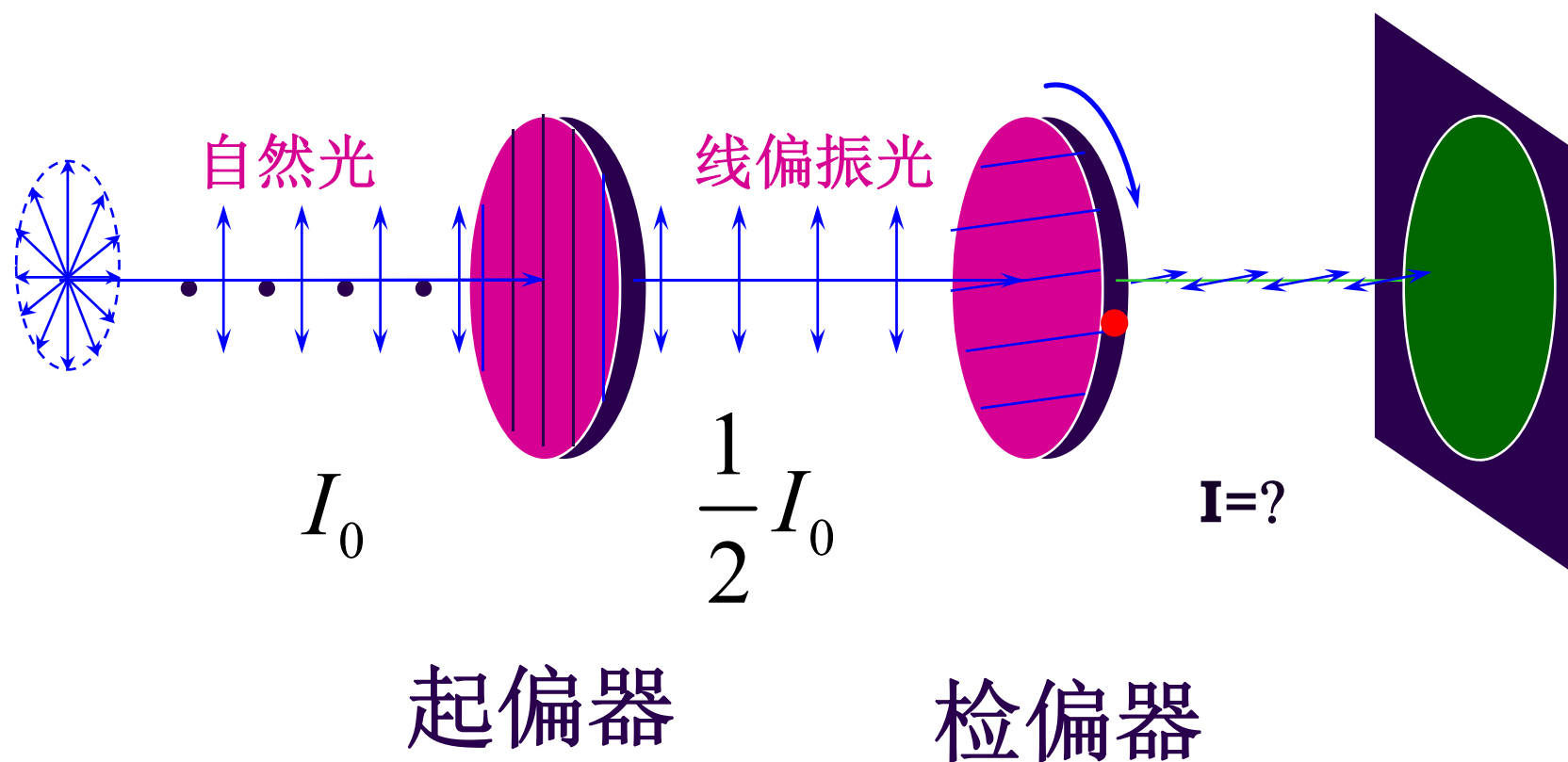
线偏振光通过旋转的检偏器，
光强发生变化



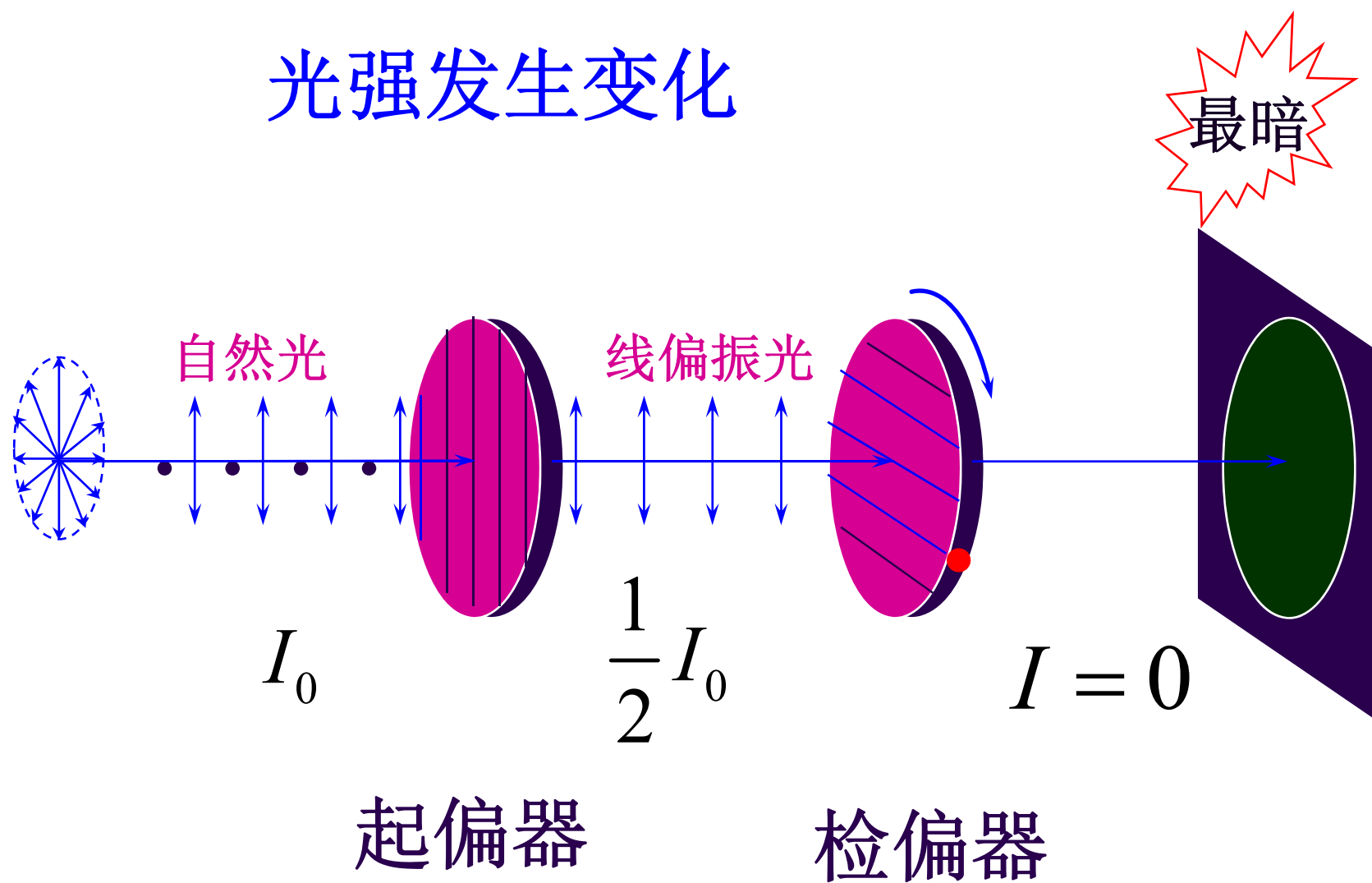
线偏振光通过旋转的检偏器，
光强发生变化



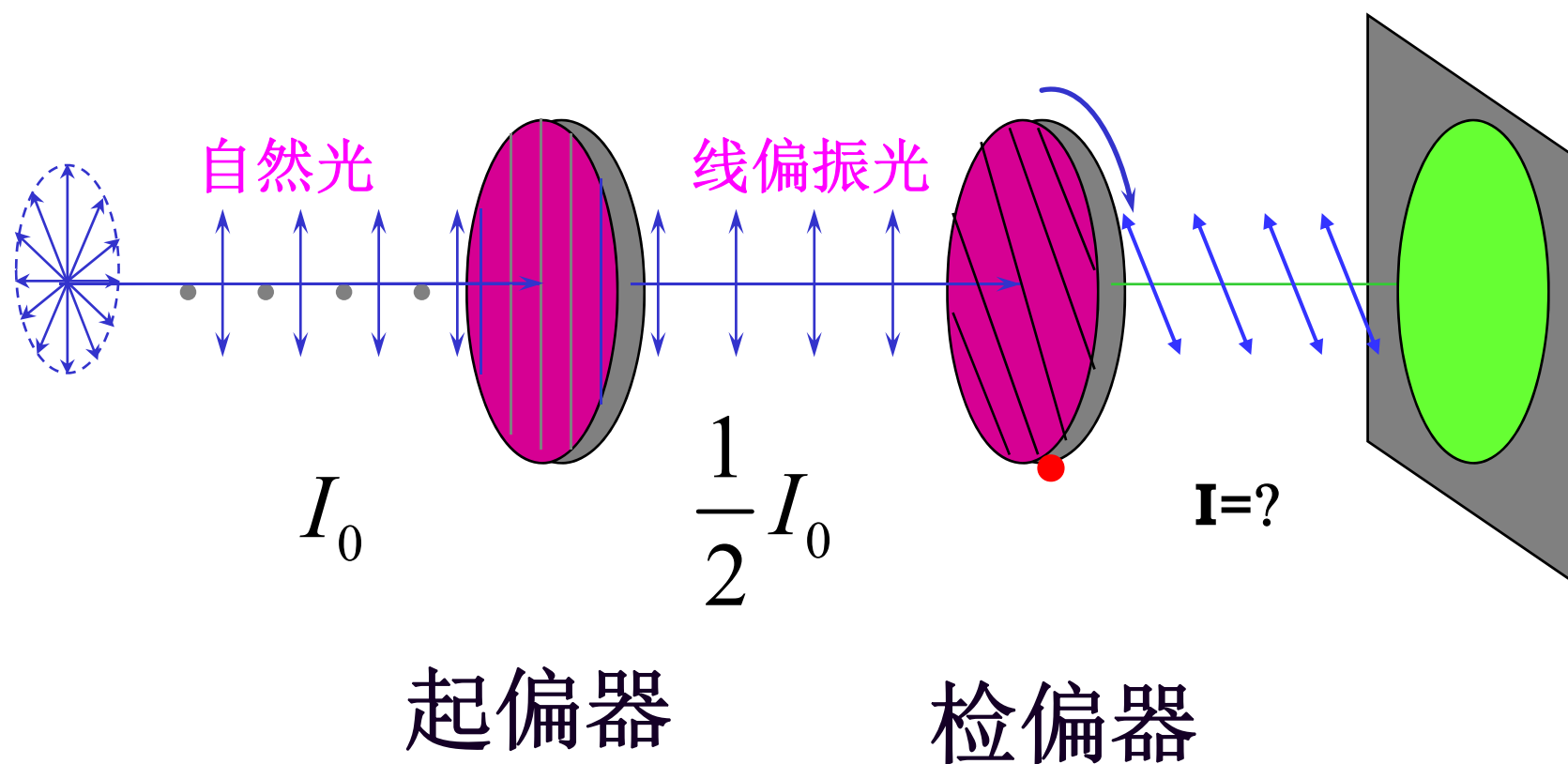
线偏振光通过旋转的检偏器，
光强发生变化



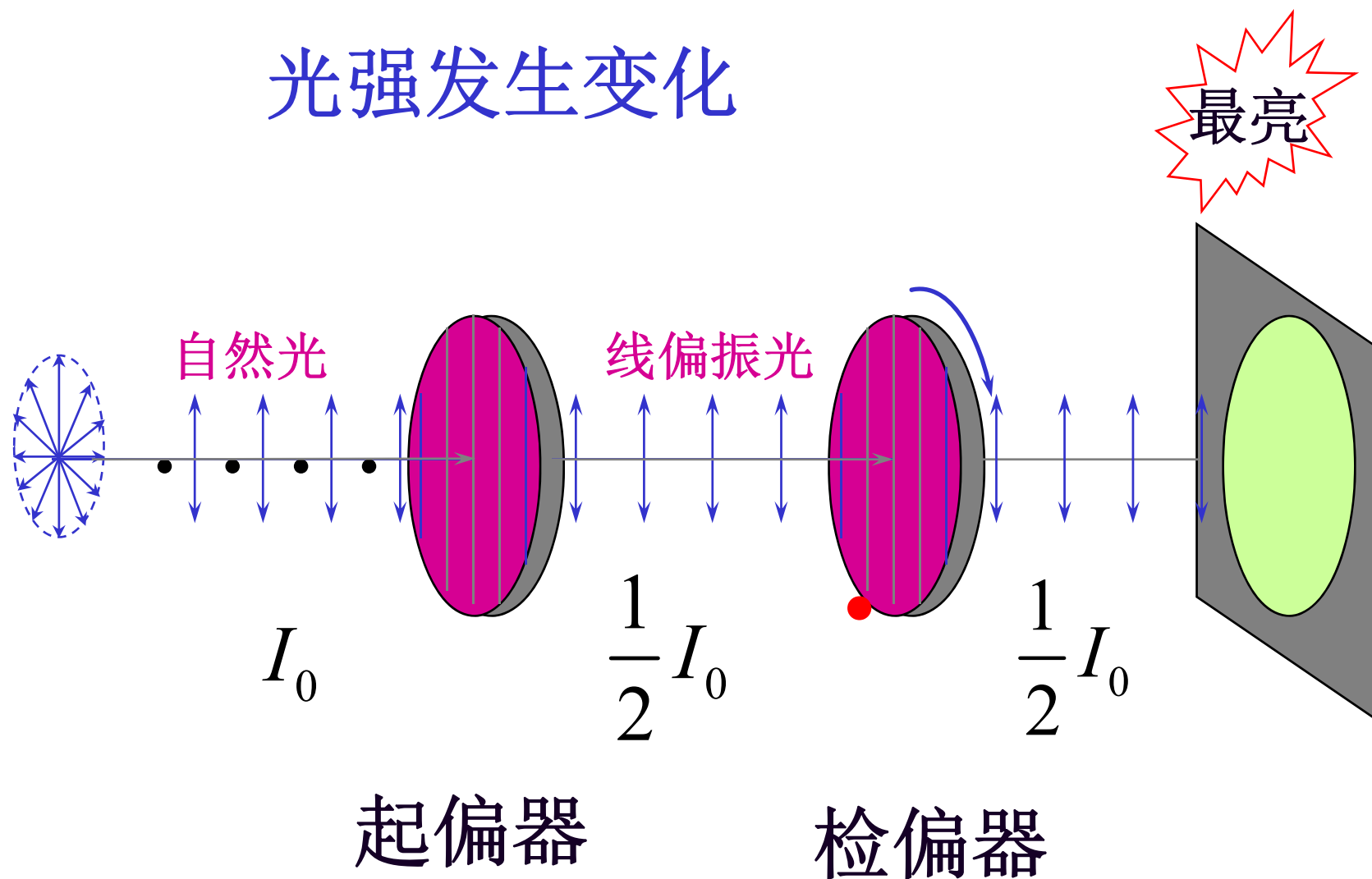
线偏振光通过旋转的检偏器，
光强发生变化



线偏振光通过旋转的检偏器，
光强发生变化

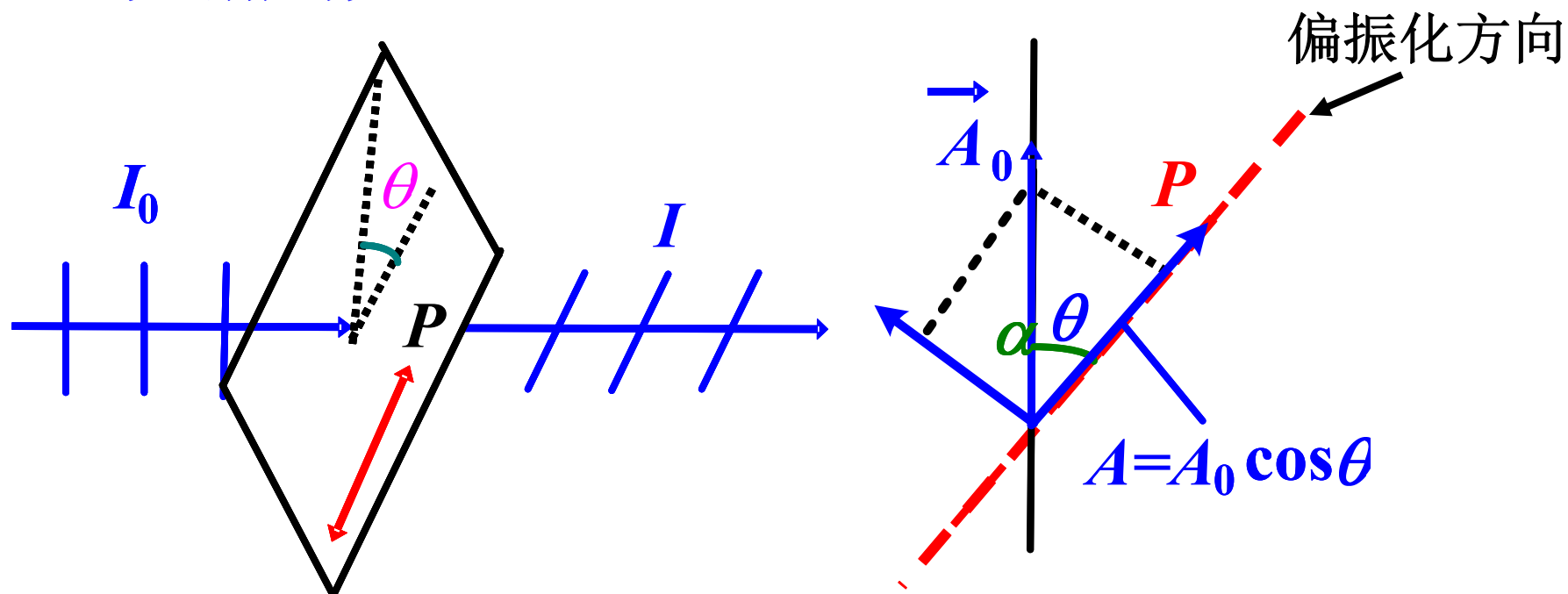


线偏振光通过旋转的检偏器， 光强发生变化



结论：当旋转检偏器一周时，会出现两次全明和两次全暗。

二、马吕斯定律：



$$I \propto A^2 = A_0^2 \cos^2 \theta$$

$$I = I_0 \cos^2 \theta \text{ —— 马吕斯定律 (1809)}$$

讨论：

$$\theta = 0, \quad I = I_{\max} = I_0$$

$$\theta = \frac{\pi}{2}, \quad I = 0 \text{ —— 消光现象}$$

例. 一束光由自然光和线偏振光混合组成，当它通过一偏振片时，发现透射光的强度随偏振片的转动可以变化到五倍。求入射光中自然光和线偏振光的强度各占入射光强度的几分之几？

解： 设入射光强度： I_0 ； 自然光强度： I_{10} ；
偏振光强度： I_{20}

$$I_o = I_{10} + I_{20}$$

设通过偏振片后的光强分别为： I ， I_1 ， I_2

$$I_1 = \frac{1}{2} I_{10} \qquad I_2 = I_{20} \cos^2 \alpha$$

$$I = I_1 + I_2 = \frac{1}{2} I_{10} + I_{20} \cos^2 \alpha$$

$$\alpha = 0 \text{ 时} \quad \rightarrow I = I_{\max} = \frac{1}{2} I_{10} + I_{20}$$

$$\alpha = 90^\circ \text{ 时} \quad \rightarrow I = I_{\min} = \frac{1}{2} I_{10}$$

$$I_{\max} = 5I_{\min} \quad \rightarrow \frac{1}{2} I_{10} + I_{20} = 5 \times \frac{1}{2} I_{10}$$

$$I_{20} = 2I_{10} \quad \frac{I_{10}}{I_o} = \frac{I_{10}}{I_{10} + I_{20}} = \frac{1}{3} \quad \frac{I_{20}}{I_o} = \frac{2}{3}$$

例 自然光通过两个偏振化方向成 60° 偏振片后的强度为 I_e 。若在这两个偏振片之间再插入一个偏振片并令其偏振化方向与前两个偏振片的偏振化方向互成 30° 。
求 透过整个系统的光强。

解：

设入射自然光强度为 I_0 ，则透过第一个偏振片的偏振光强度

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

根据题意，透过第二个偏振片的偏振光强度为 I_e ，有

$$I_e = I_1 \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 60^\circ = \frac{1}{8} I_0$$

即入射光强度 $I_0 = 8I_e$

插入偏振片后，透过第一个偏振片的偏振光强度为

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 = \frac{1}{2} \times 8I_e = 4I_e$$

透过第二个偏振片的偏振光强度为

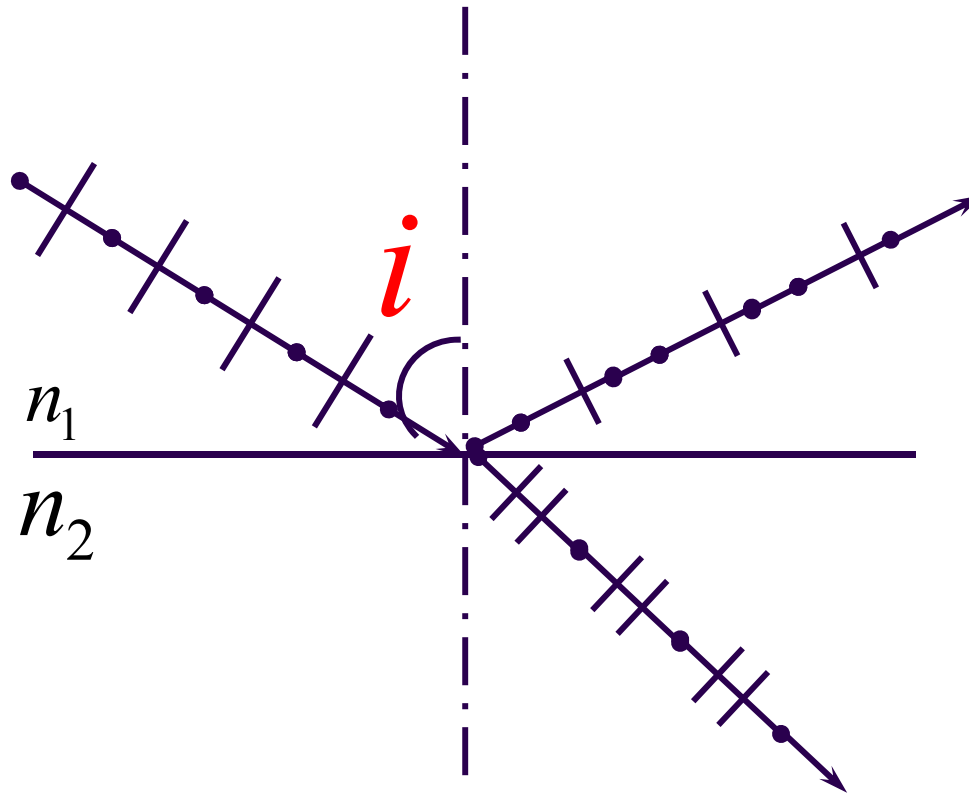
$$I_2 = I_1 \cos^2 30^\circ = 4I_e \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 = 3I_e$$

通过整个系统后，透射光强度为

$$I = I_2 \cos^2 30^\circ = 3I_e \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 = 2.25I_e$$

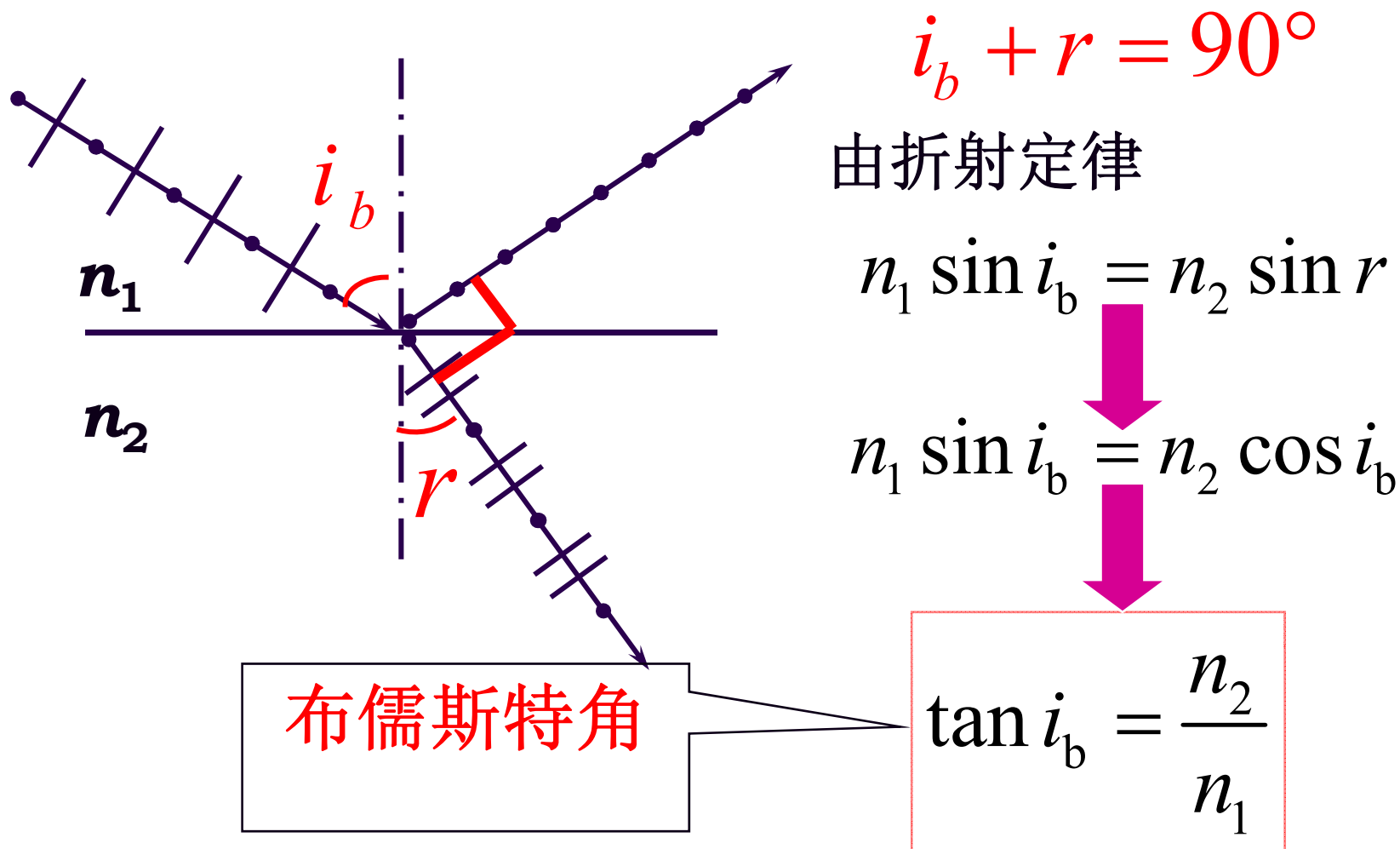
§ 15.13 光在反射和折射时的偏振 布儒斯特特定律

一、自然光经反射和折射后成为部分偏振光



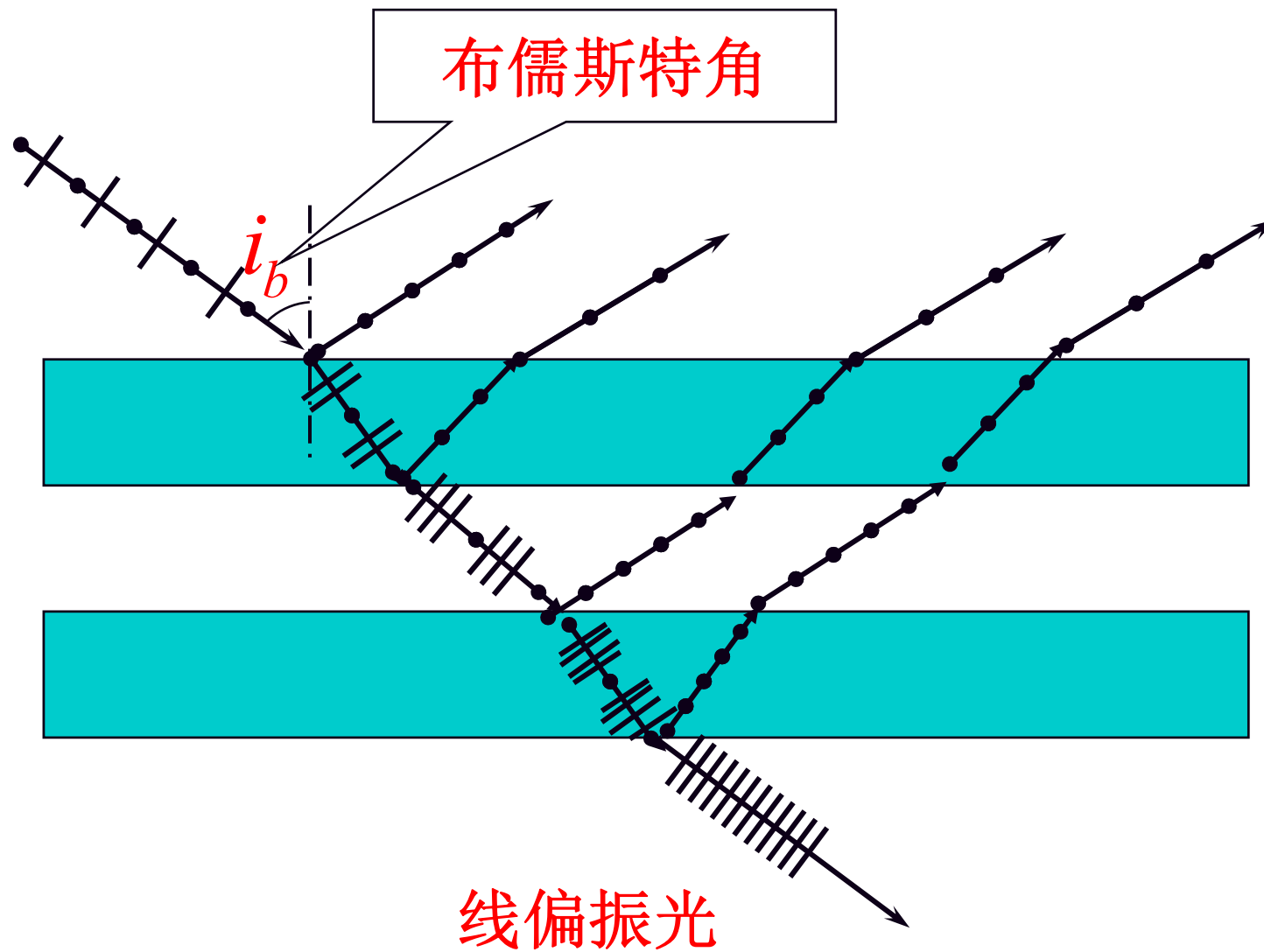
结论： 反射光和折射光均为部分偏振光

二、布儒斯特定律



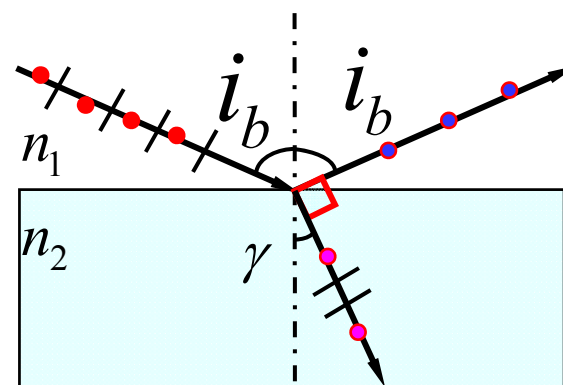
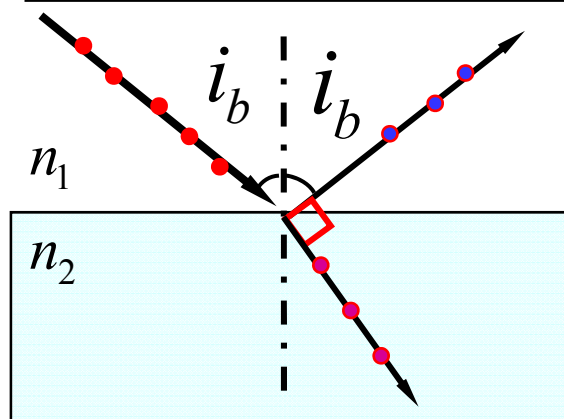
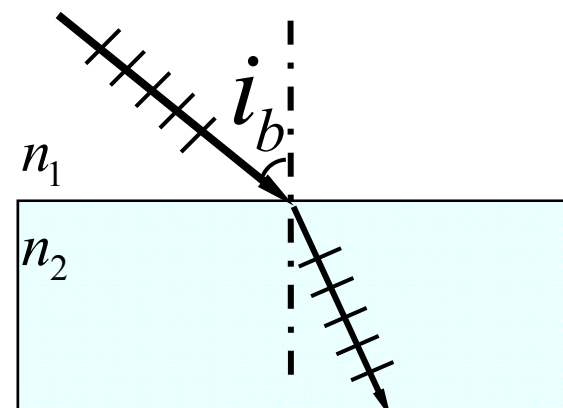
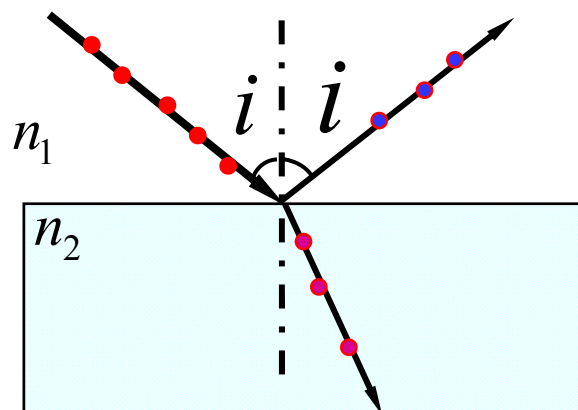
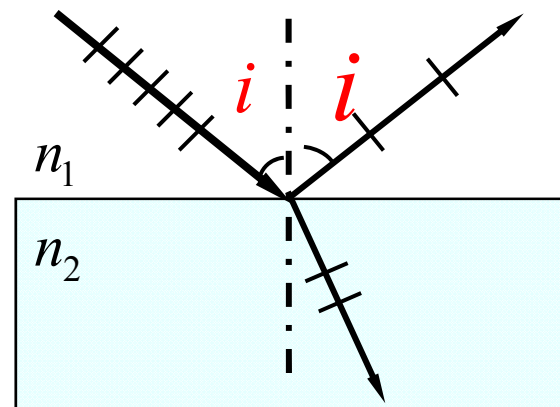
布儒斯特定律：当自然光以布儒斯特角入射到两不同介质的表面时，其反射光为线偏振光，光振动垂直于入射面。

三、玻璃片堆



例 画出相应的反射光，折射光的方向及偏振态($n_2 > n_1$)

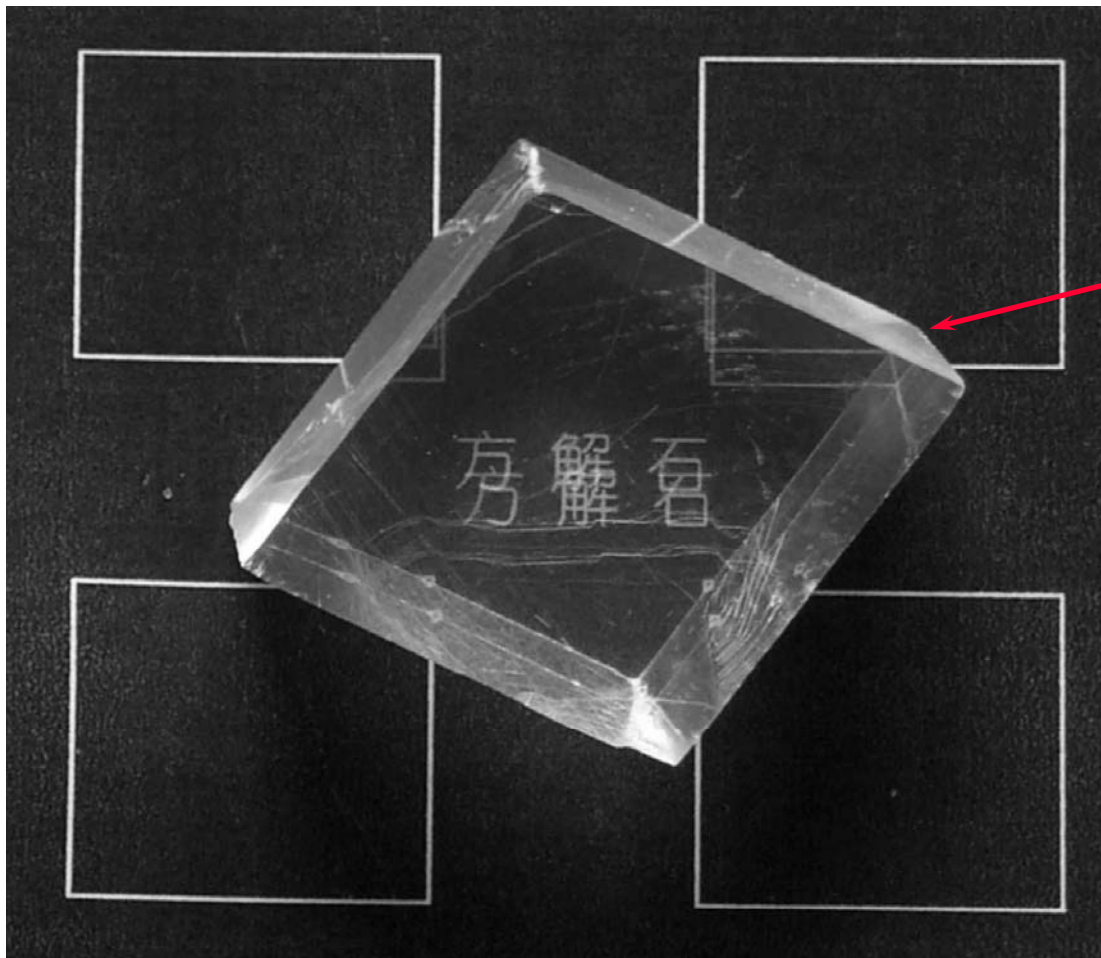
解



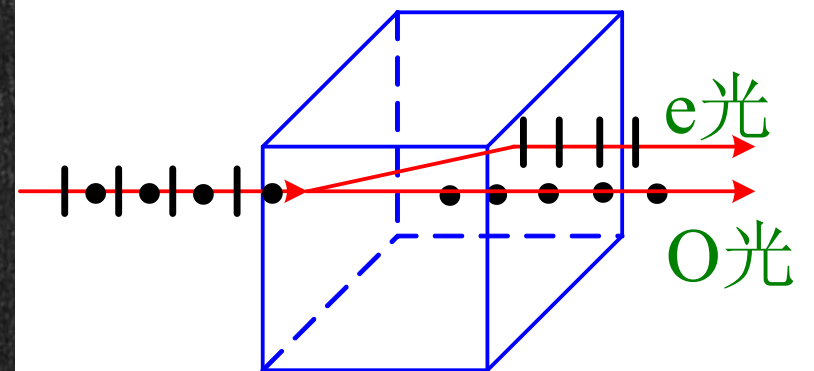
§ 15.14 光的双折射

一、双折射

一束光入射到各向异性的介质后出现两束折射光的现象.

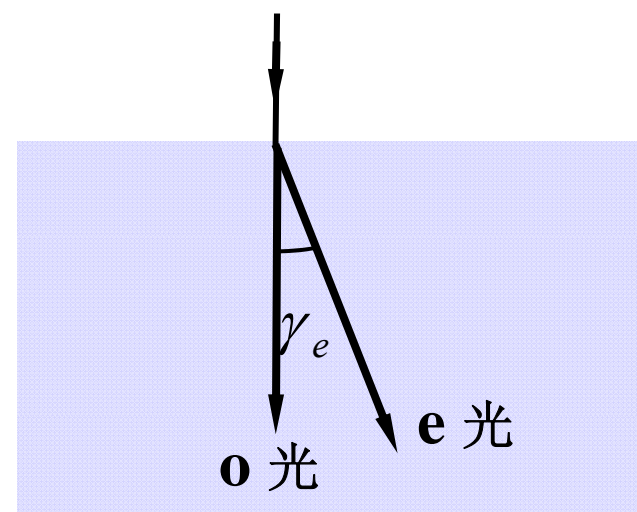
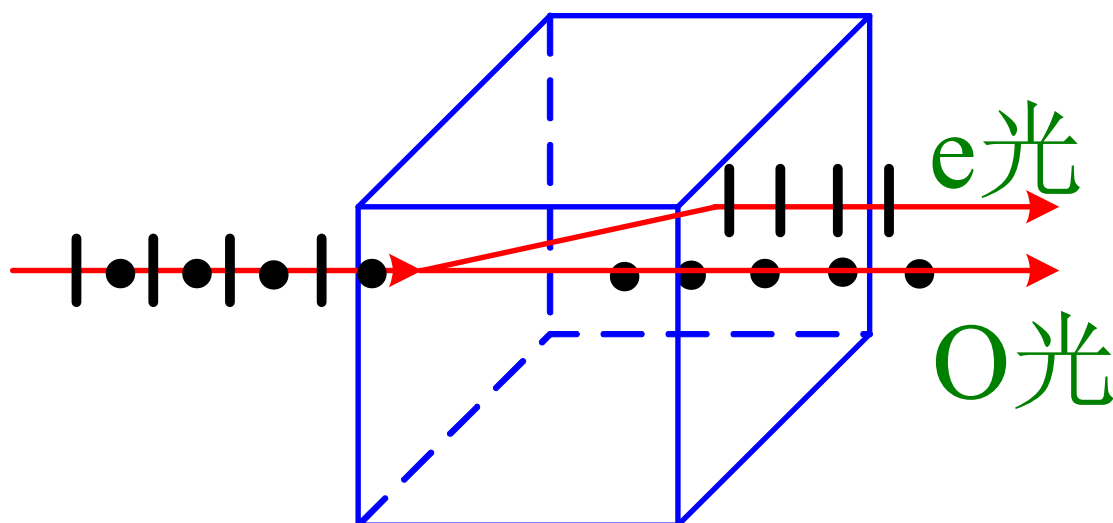


方解石
晶体

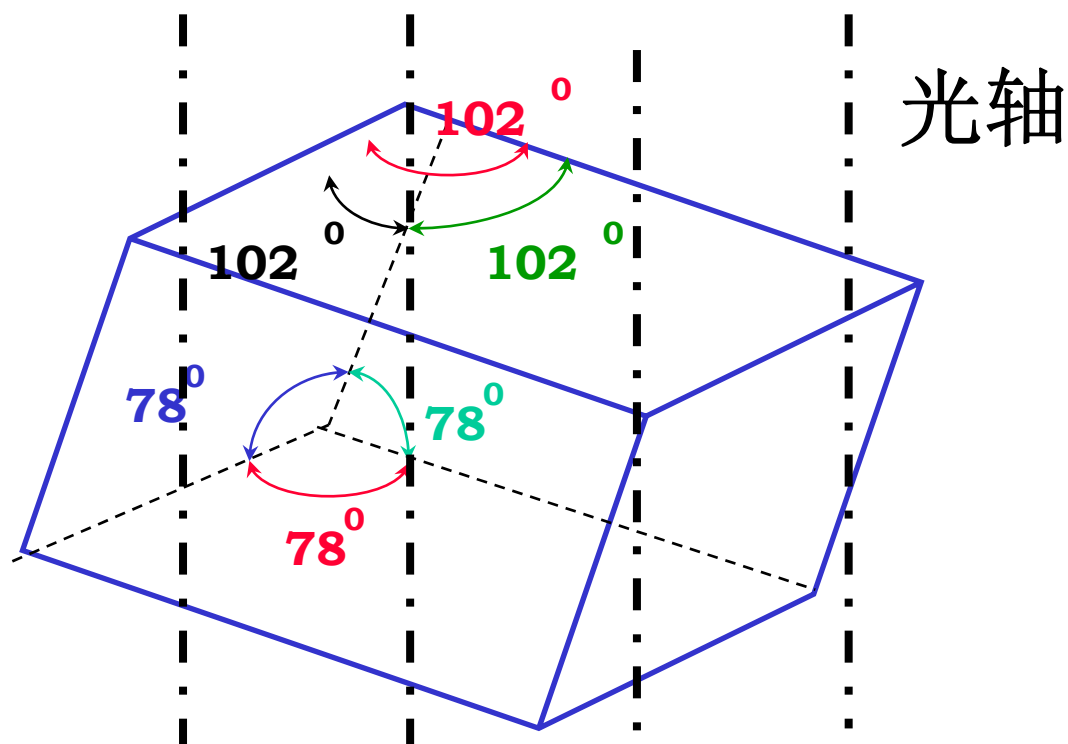


双折射(晶体各向异性) ----- 折射光分成两束, 且都是线偏振光

寻常光(o光) ordinary	非寻常光(e光) extraordinary
遵守折射定律	不遵守折射定律
折射光线在入射面内	折射光线不在平面内
在晶体内沿任一方向的速度都相同	在晶体内沿任一方向的速度都 不相同



二、晶体的光轴



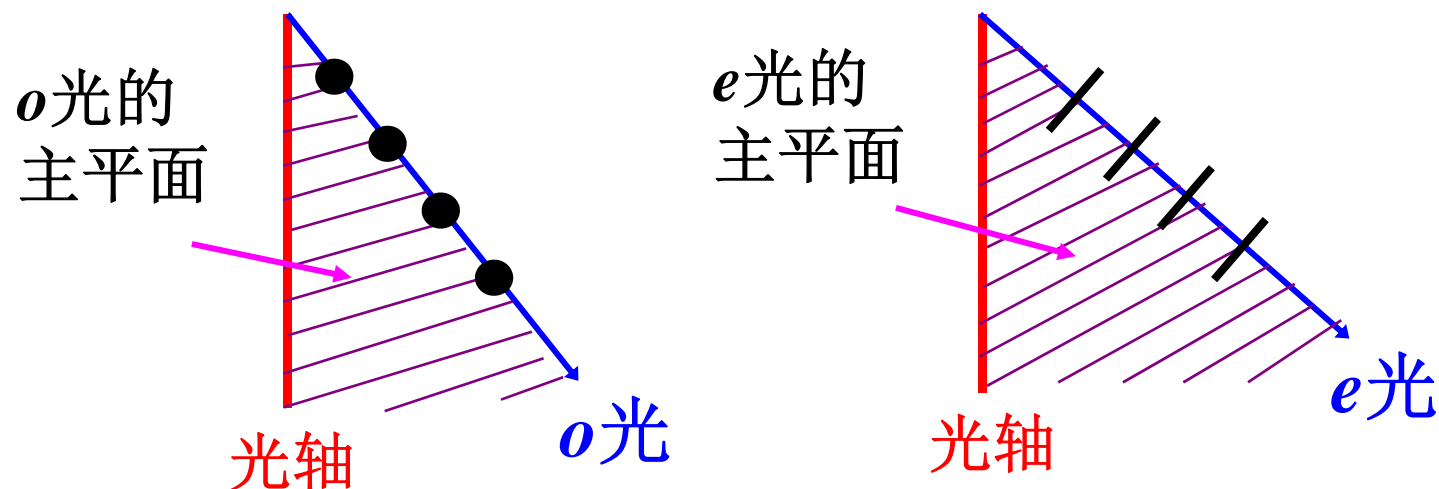
光轴：在方解石这类晶体中存在一个特殊的方向，当光线沿这一方向传播时不发生双折射现象。称这一方向为晶体的光轴。

单轴晶体：只有一个光轴（方解石、石英）

双轴晶体：有两个光轴（云母、硫磺）

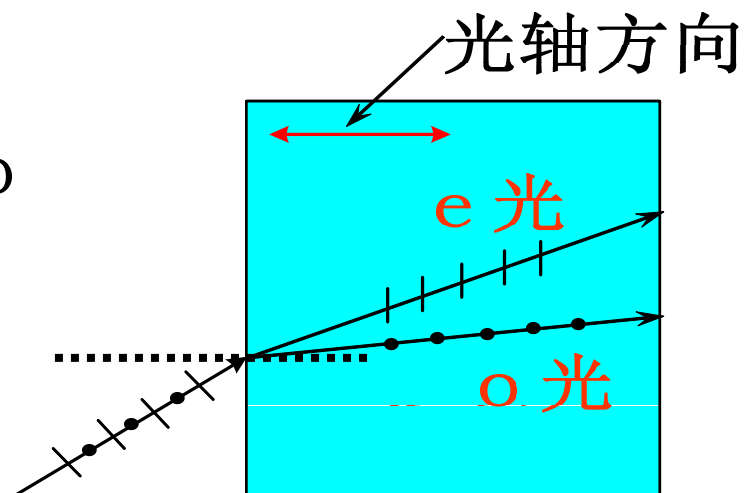
三、晶体的主平面

主平面：光的传播方向与晶体光轴的平面



注意：o光的振动方向垂直于它的主平面；
e光的振动方向就在它的主平面内。

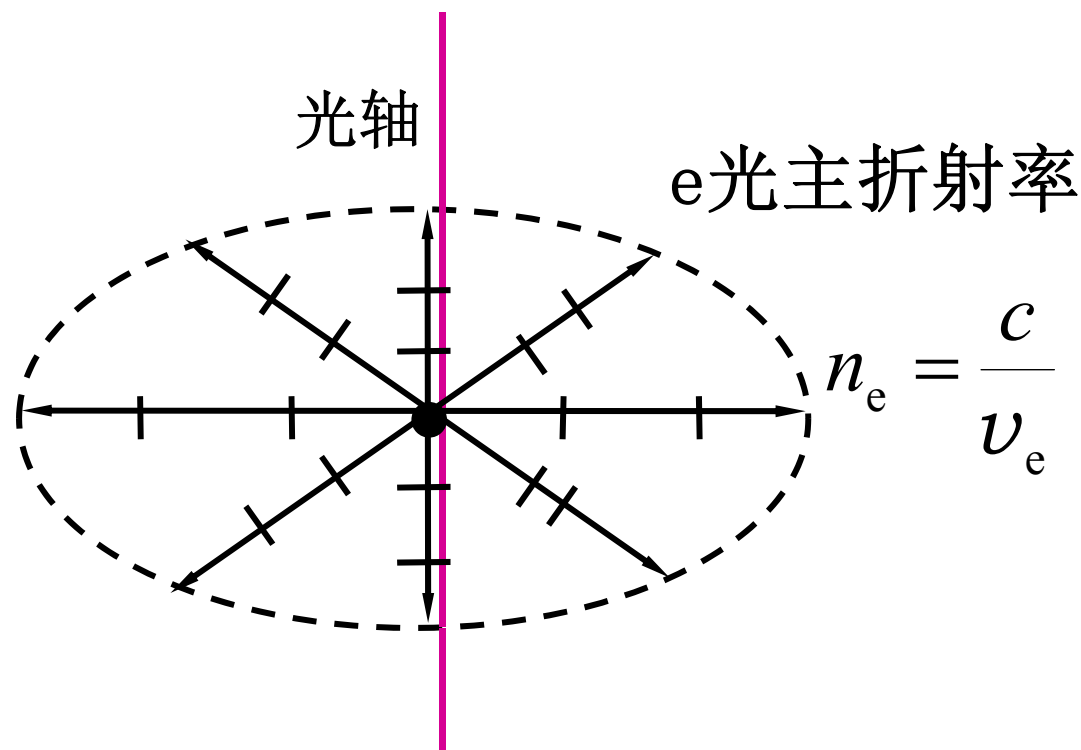
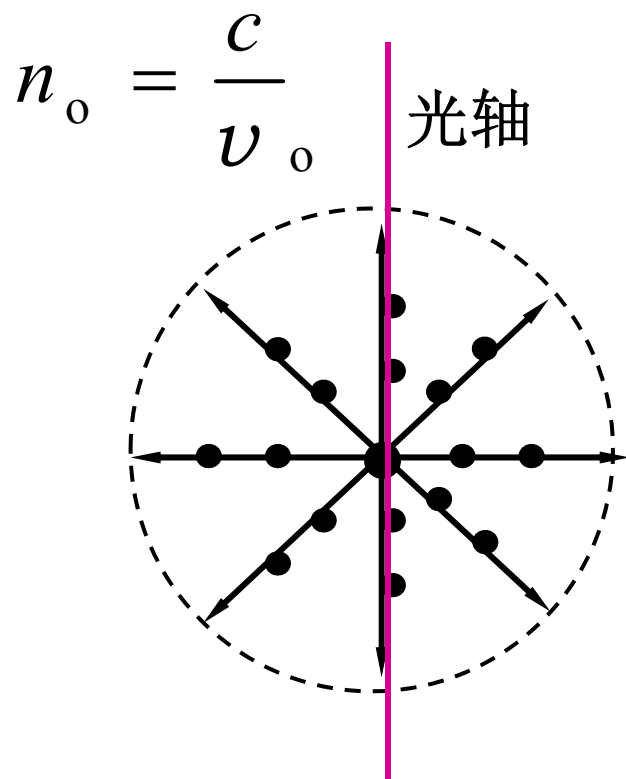
光轴在入射面时，o
光主平面和e 光主
平面重合

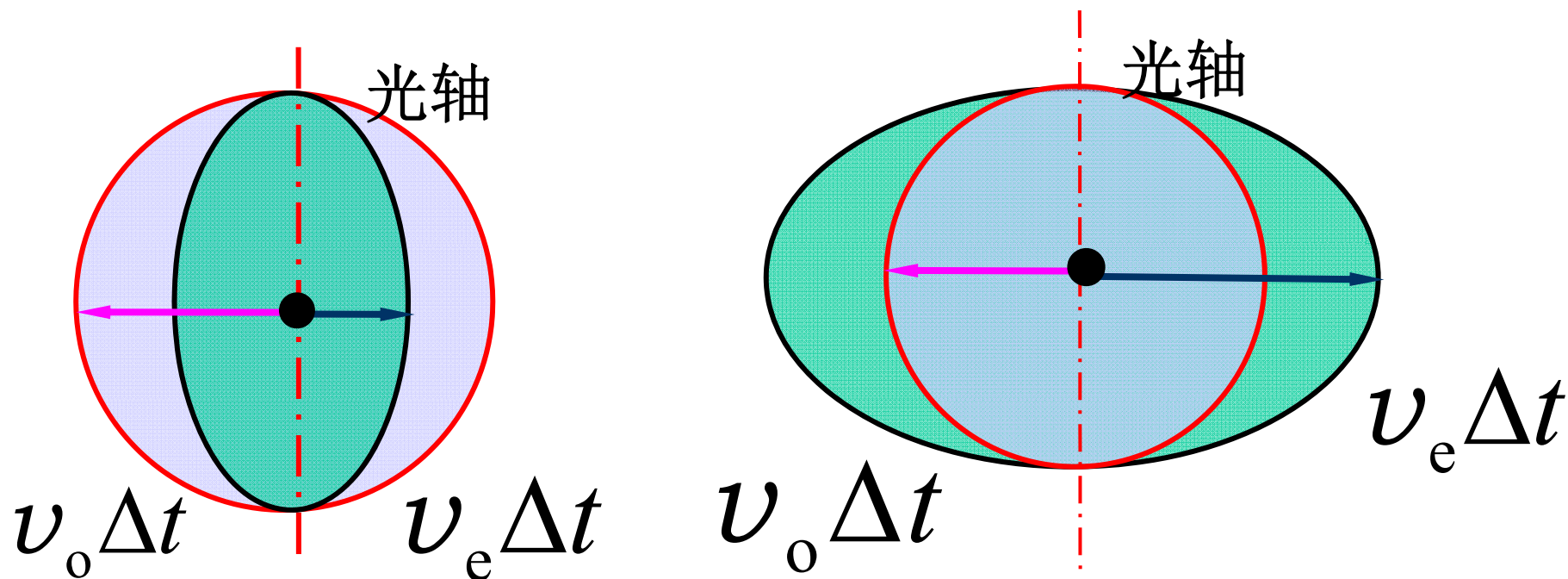


四、晶体的主折射率

光的双折射实质上是由于光在晶体中的传播速率与光的传播方向和光的偏振状态有关.

- ◆ o光沿不同方向的传播速率相同，其波面是球面
- ◆ e光沿不同方向的传播速率不相同，其波面是以光轴为轴的旋转椭球面.

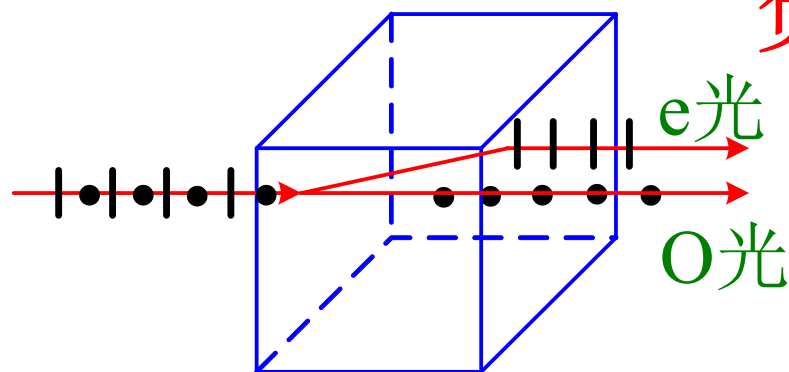




$n_e > n_o$
正晶体

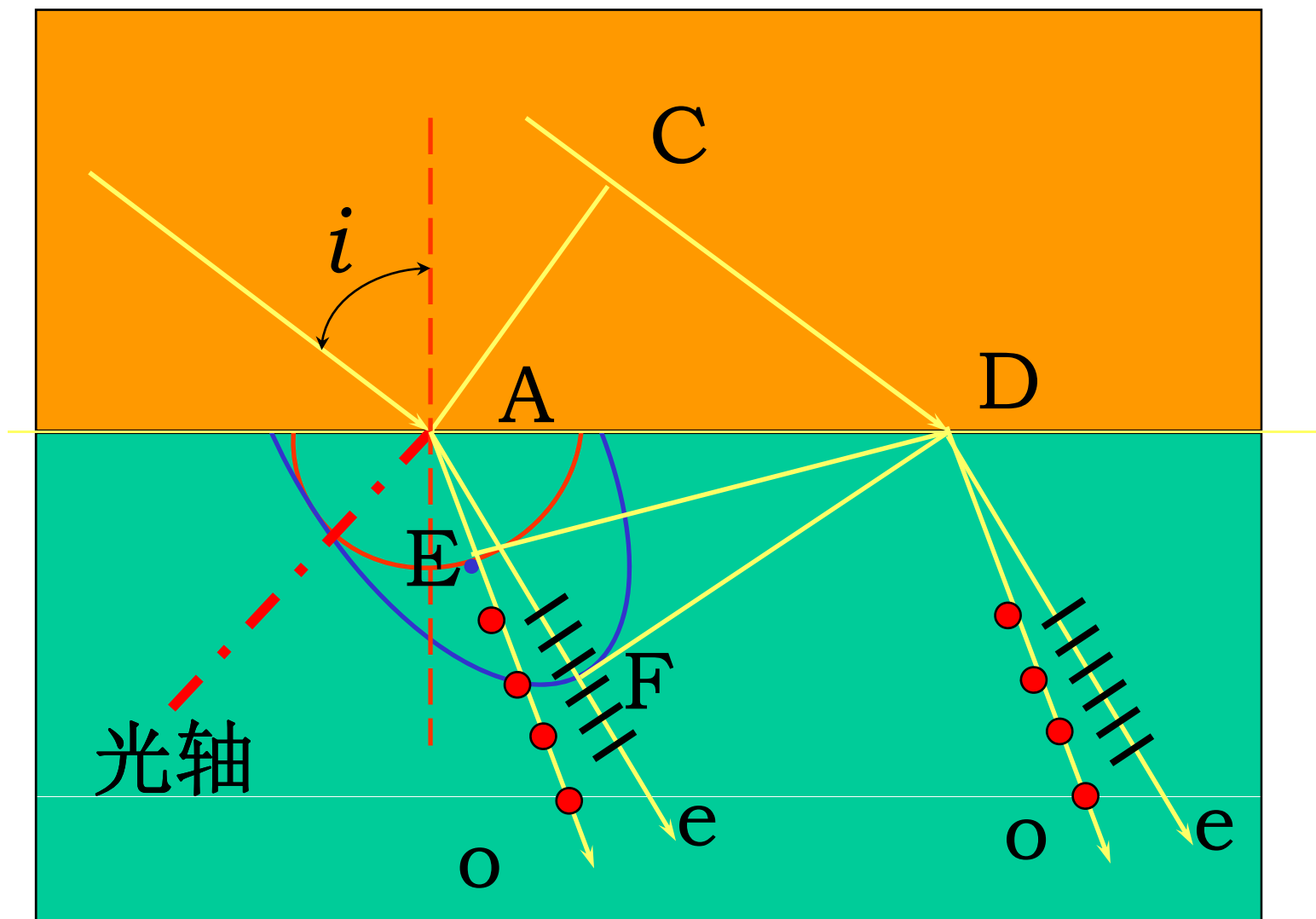
$n_e < n_o$

负晶体

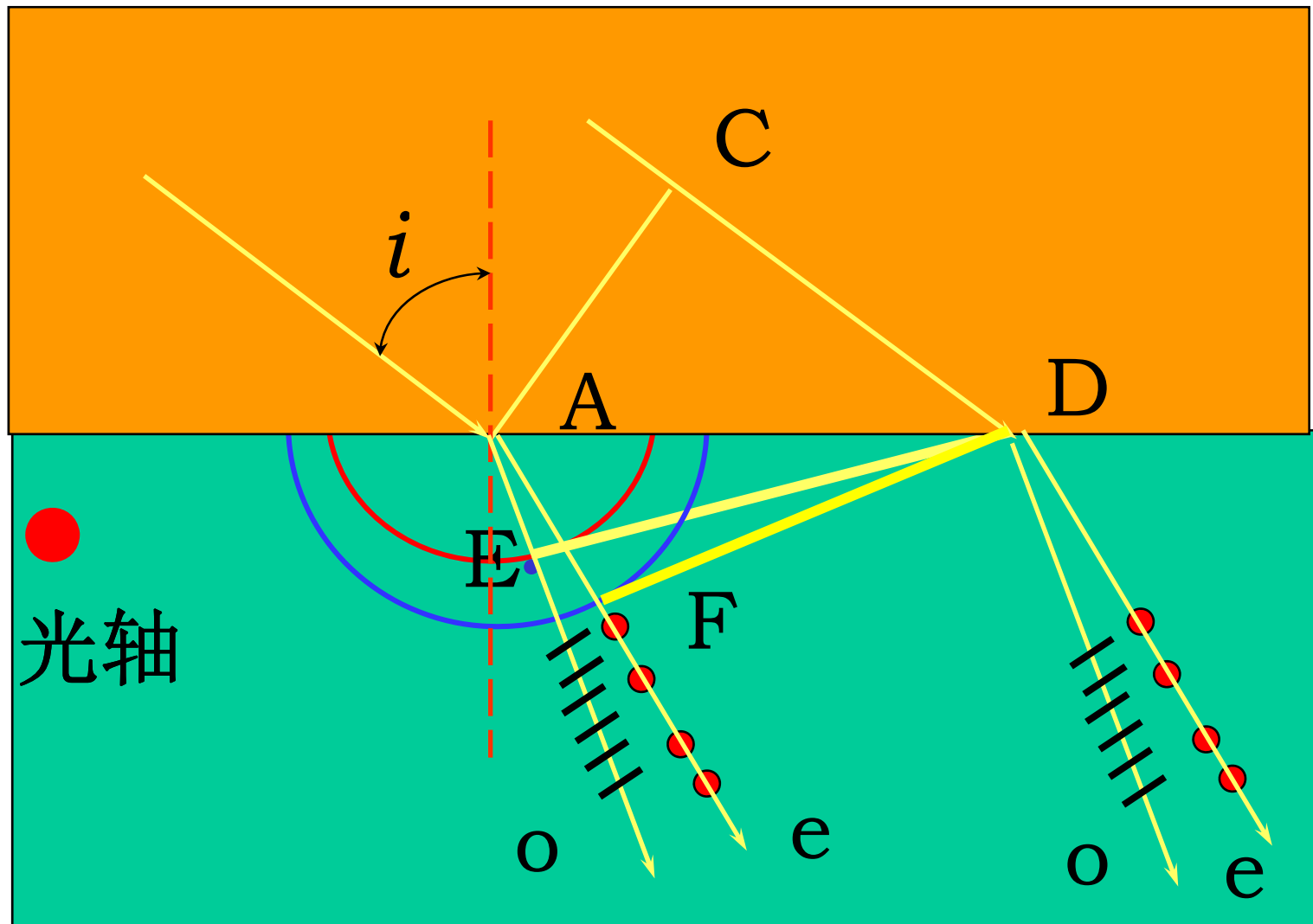


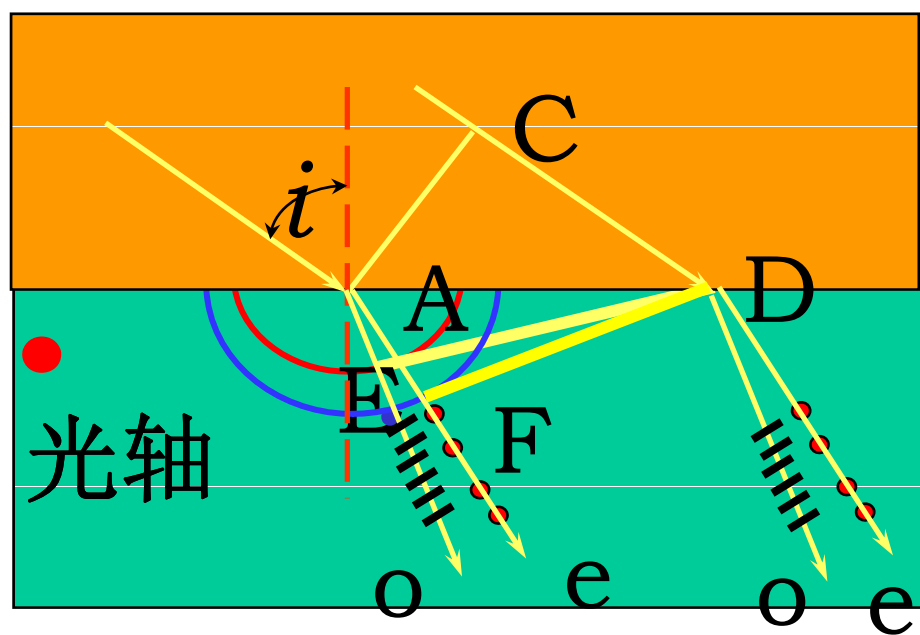
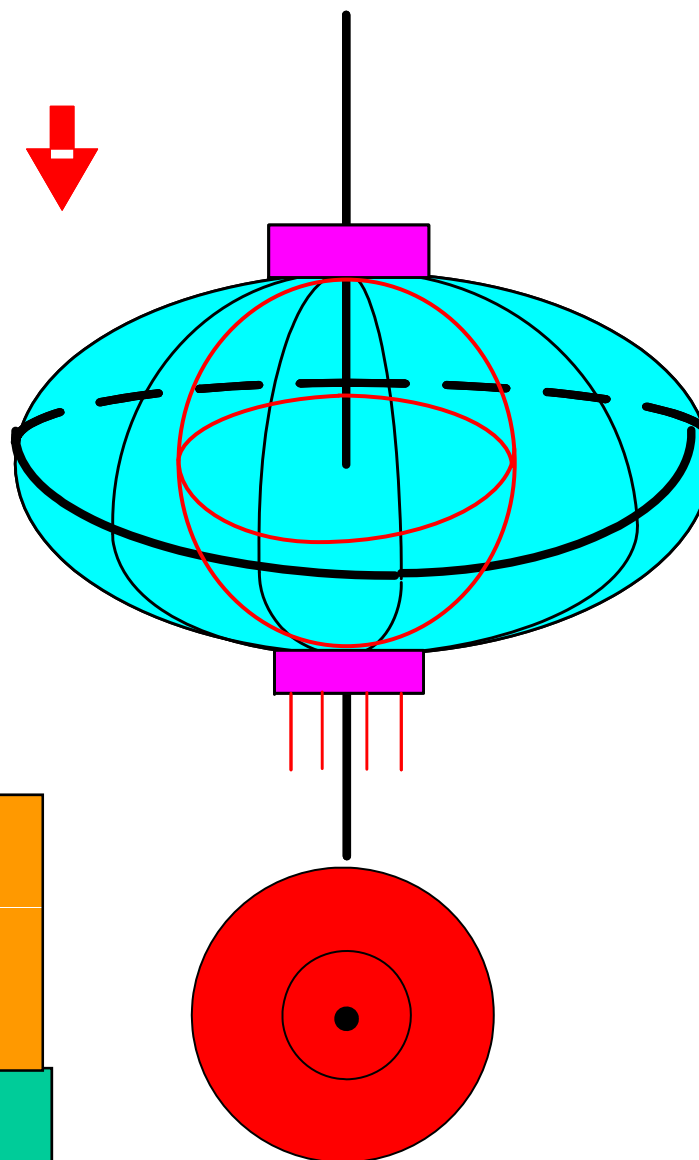
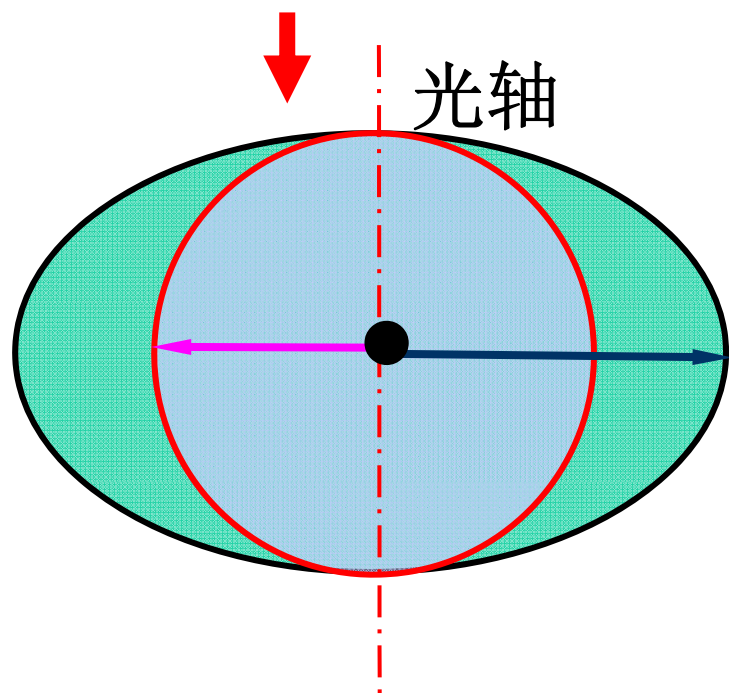
五、惠更斯作图法

(1) 平面波倾斜入射方解石晶体

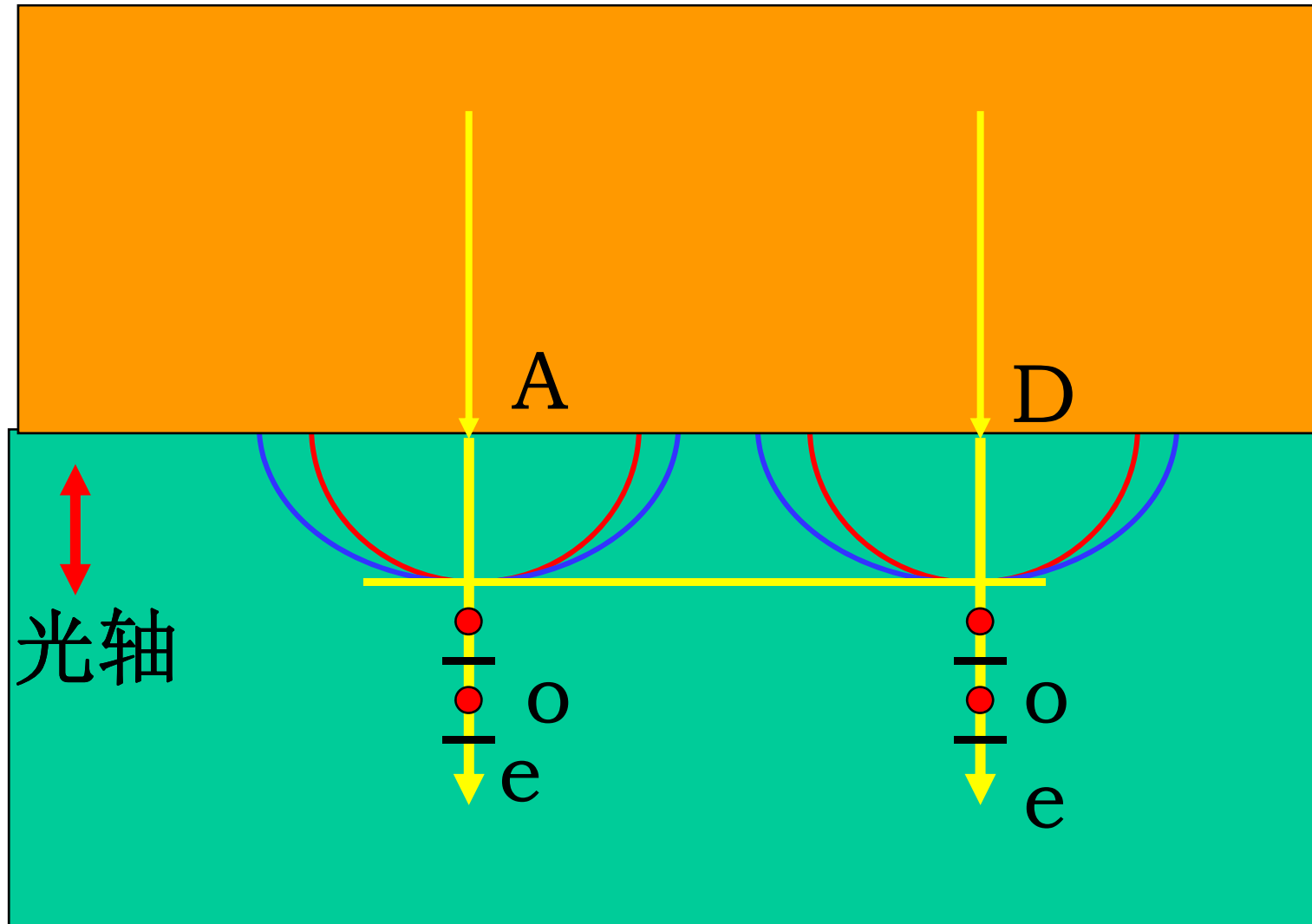


(2) 入射光斜入射，光轴沿垂直方向

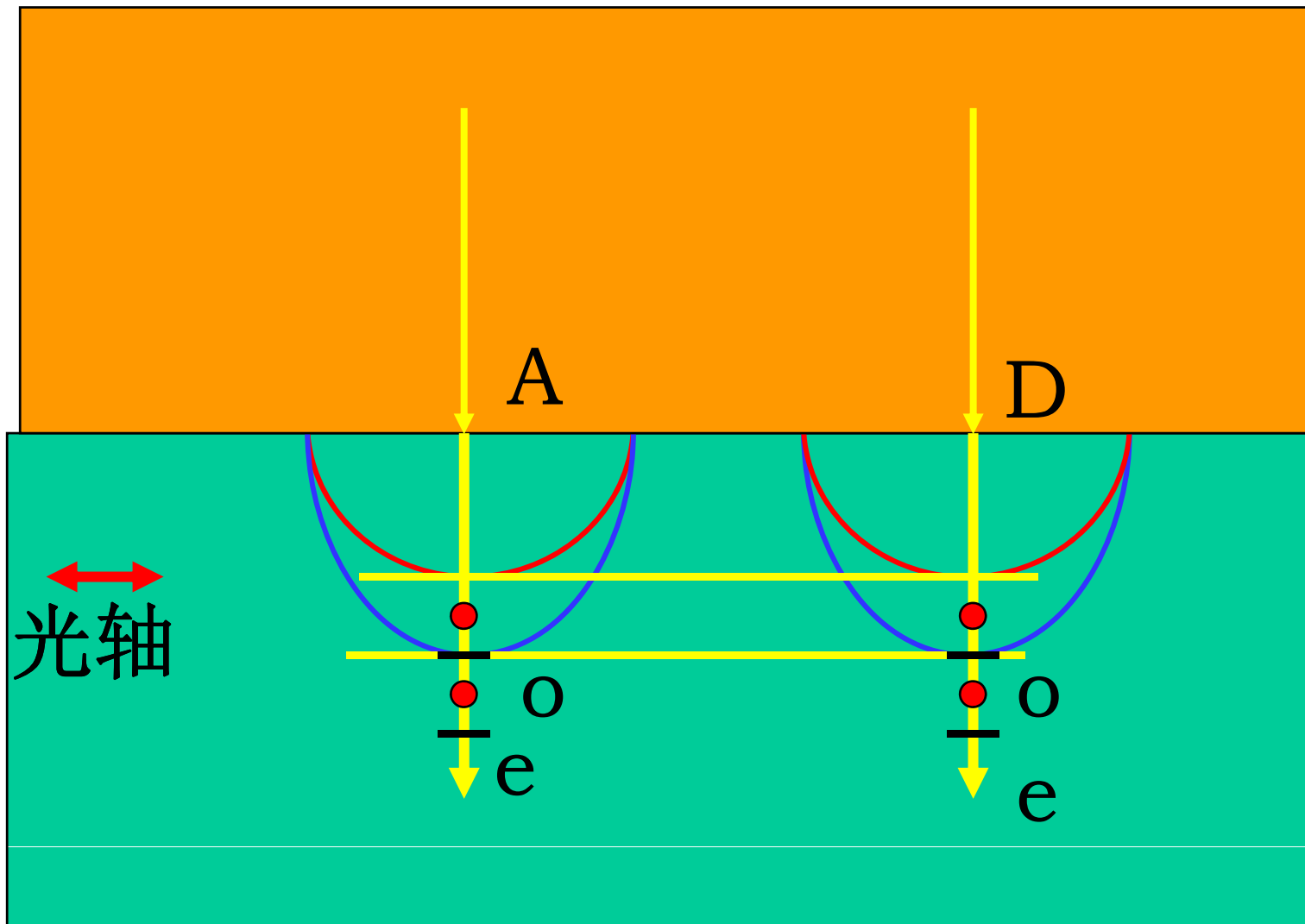




(3) 垂直入射，光轴沿竖直方向

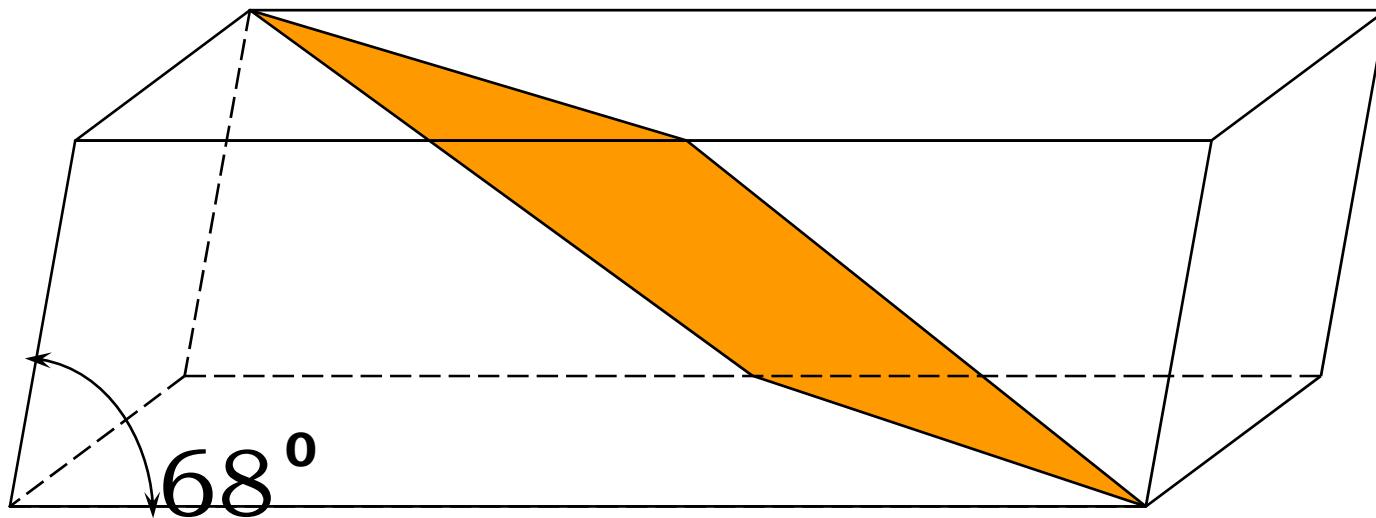


(4) 垂直入射，光轴沿竖直方向

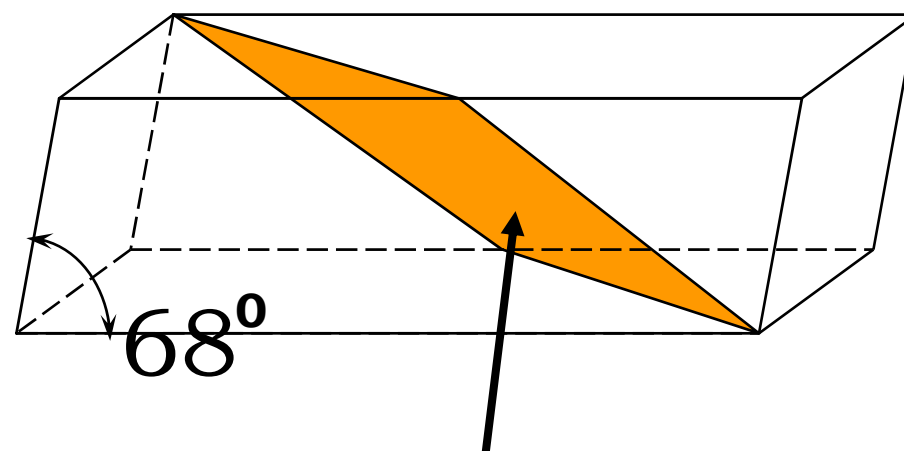
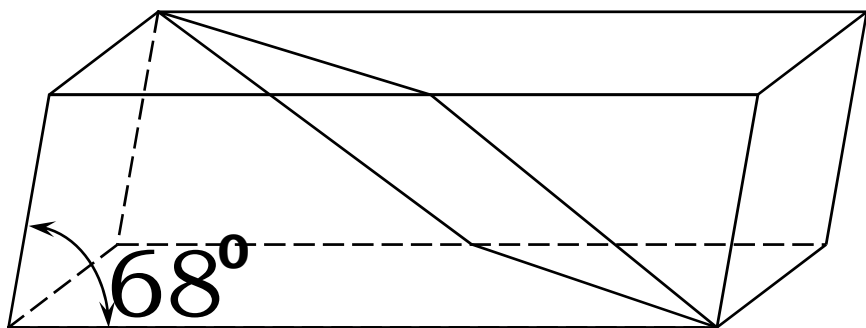
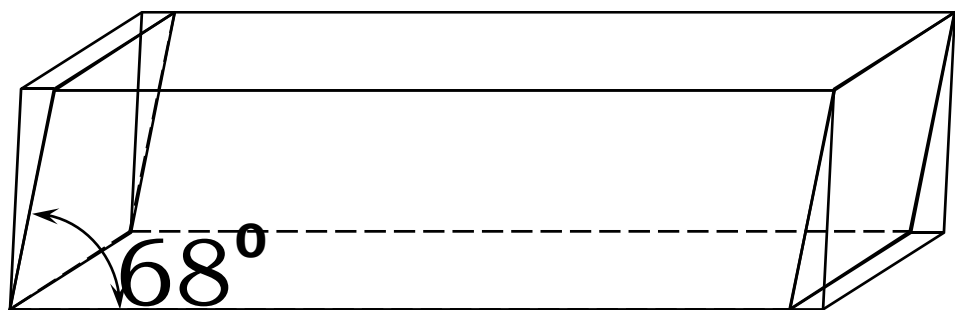
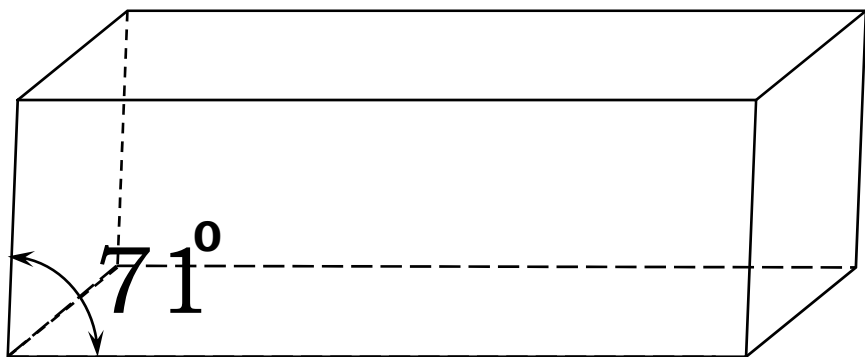


§ 15.15 尼科耳棱镜 渥拉斯顿棱镜 波晶片

一、尼科耳棱镜



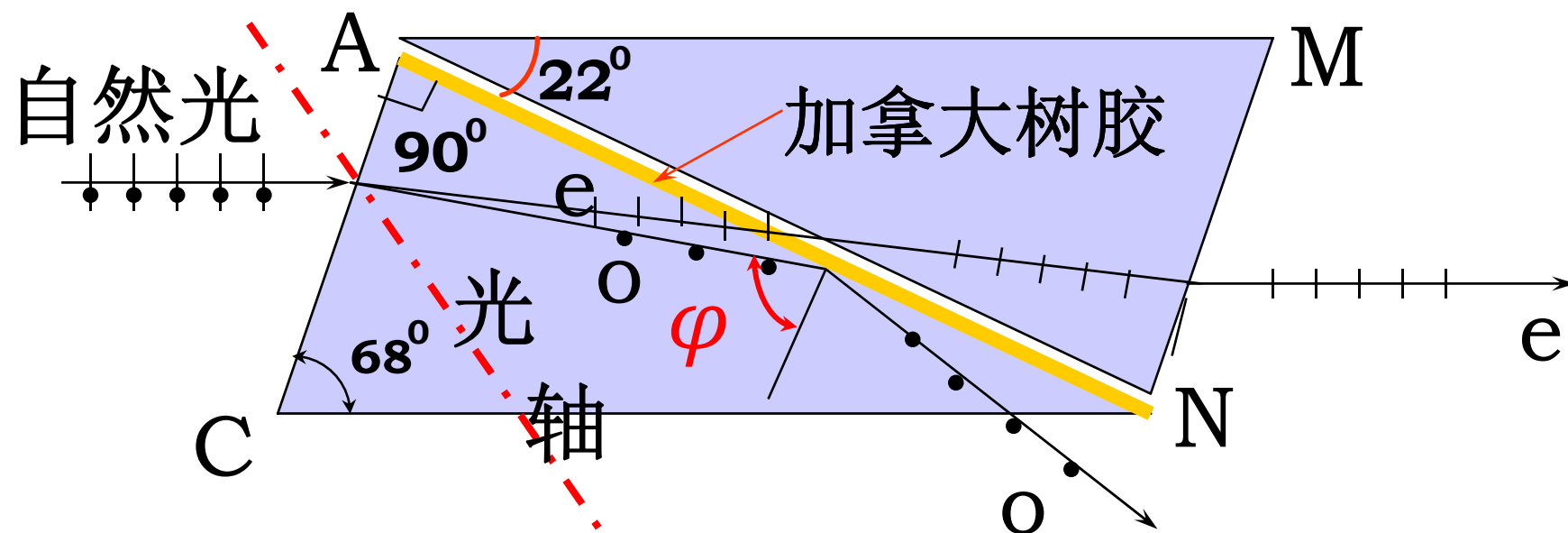
尼科耳棱镜的制作过程



加拿大树胶

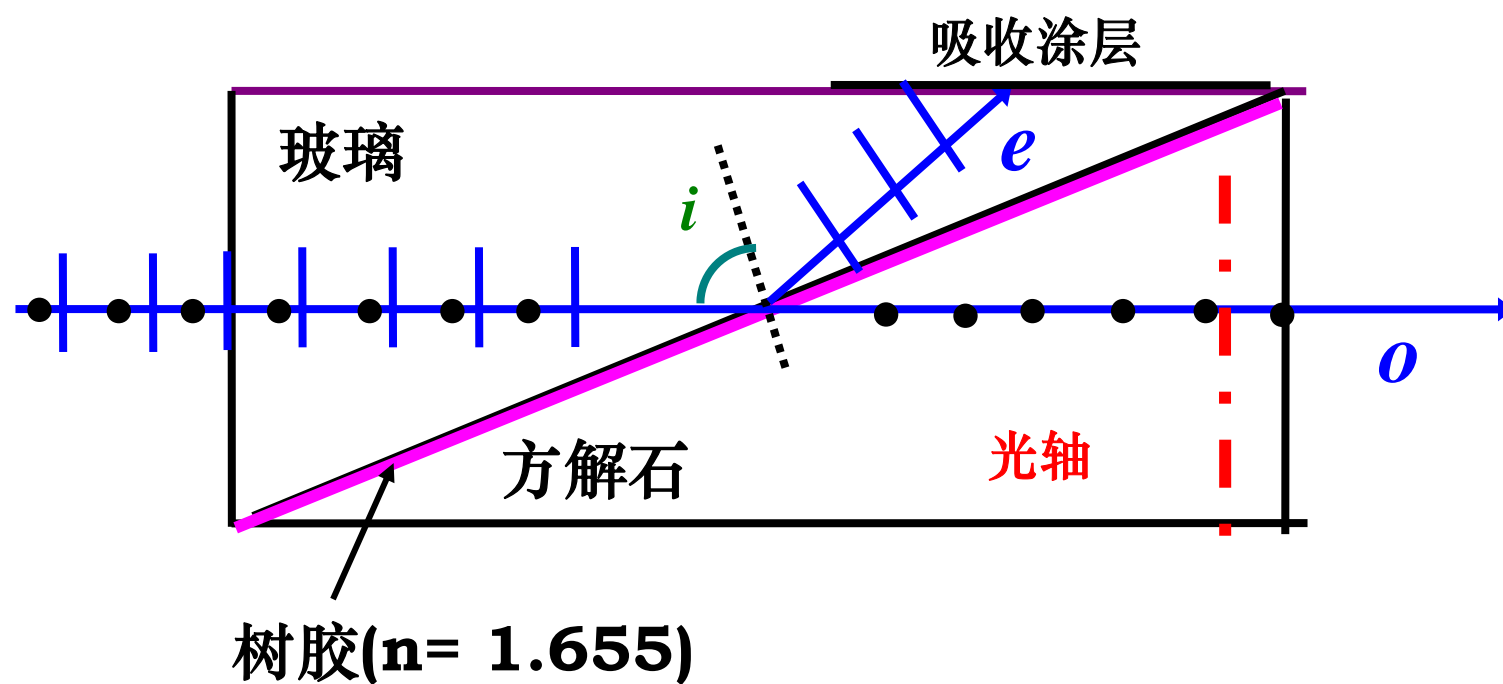
尼科耳棱镜

$$n_{\text{加}} = 1.55, \quad n_e = 1.516, \quad n_o = 1.6584$$

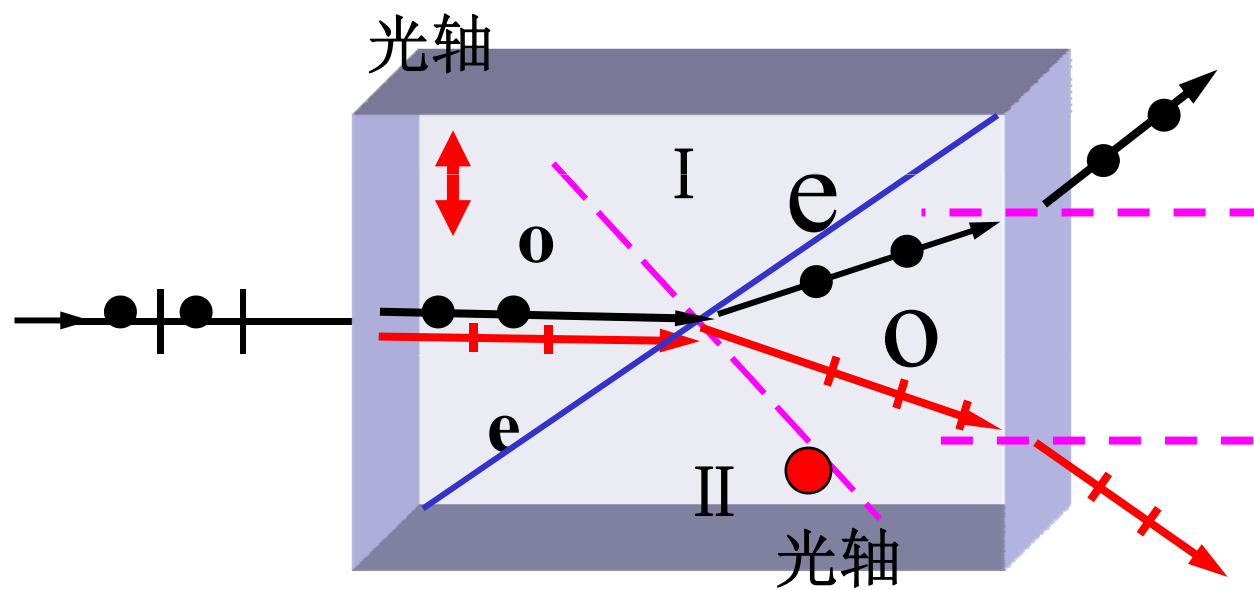


偏光镜:

格兰—汤姆逊棱镜



二、偏光分束镜：沃拉斯顿棱镜



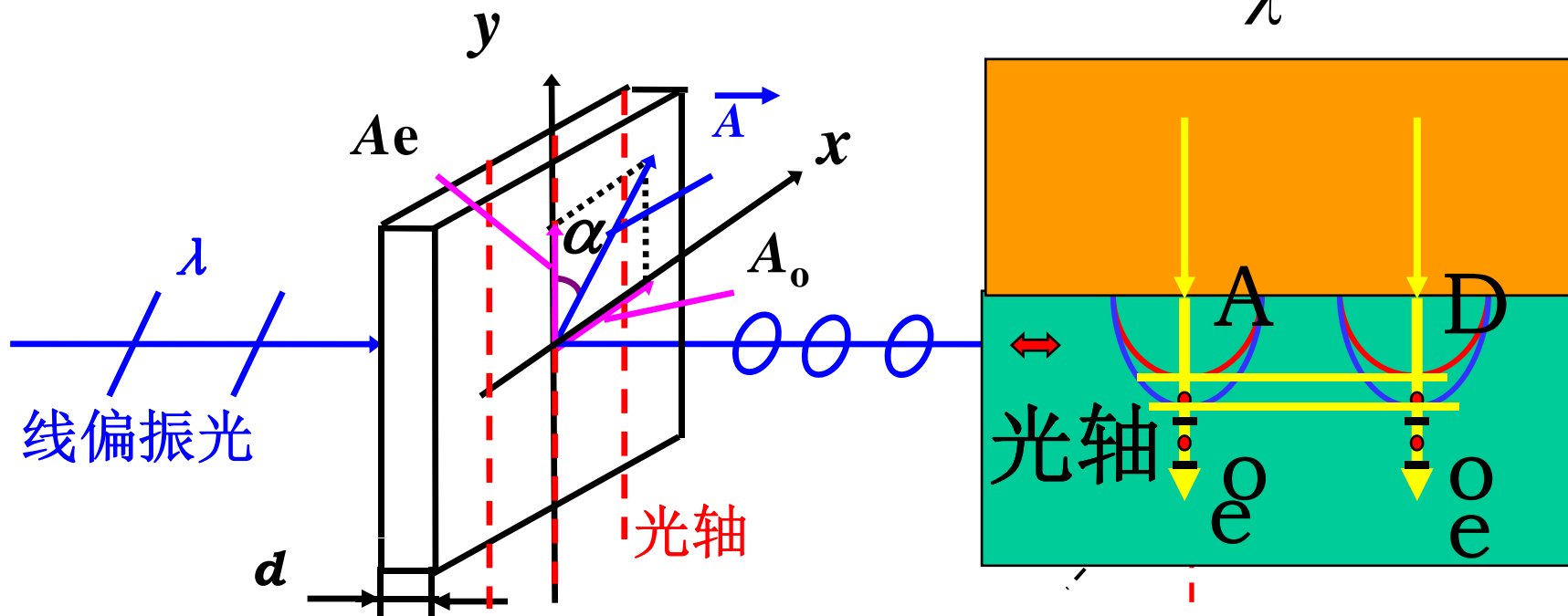
三、波片 圆(椭圆)偏振光的获得

1、波片

一种由晶体制造的光学器件. 由单轴晶体上切割下来的平行薄片, 其表面与晶体的光轴平行.

$$A_o = A \sin \alpha, A_e = A \cos \alpha$$

o 、 e 光产生相位差: $|\Delta\varphi| = |n_e - n_o| \cdot d \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$

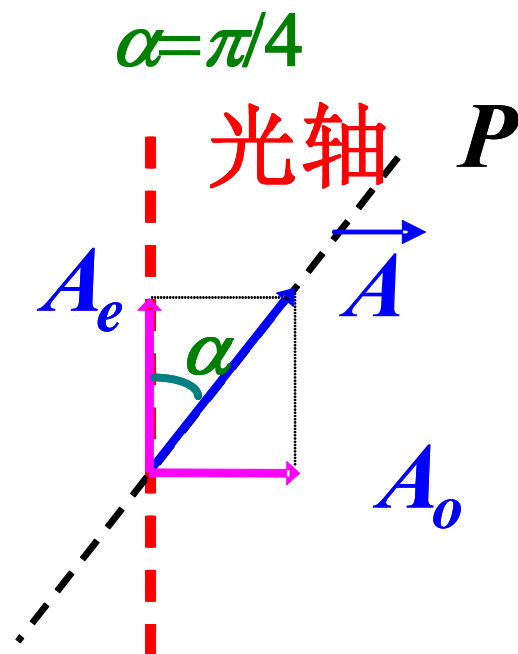
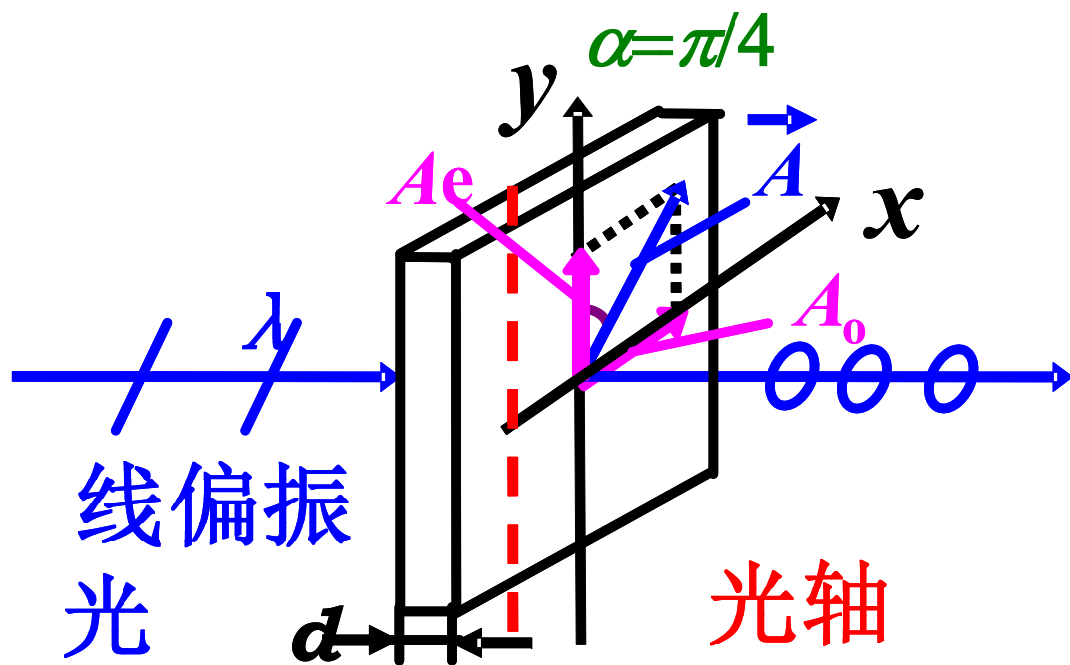


(1) 当 $\Delta\varphi = \pi/2$ 时, $|\Delta\varphi| = |n_e - n_o| \cdot d \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\alpha = \pi/4 \quad A_o = A \sin \alpha = A_e = A \cos \alpha$$

光程差为: $\delta = (n_o - n_e) \cdot d = \lambda/4$

1/4波片 : 线偏振光 \Rightarrow 圆偏振光

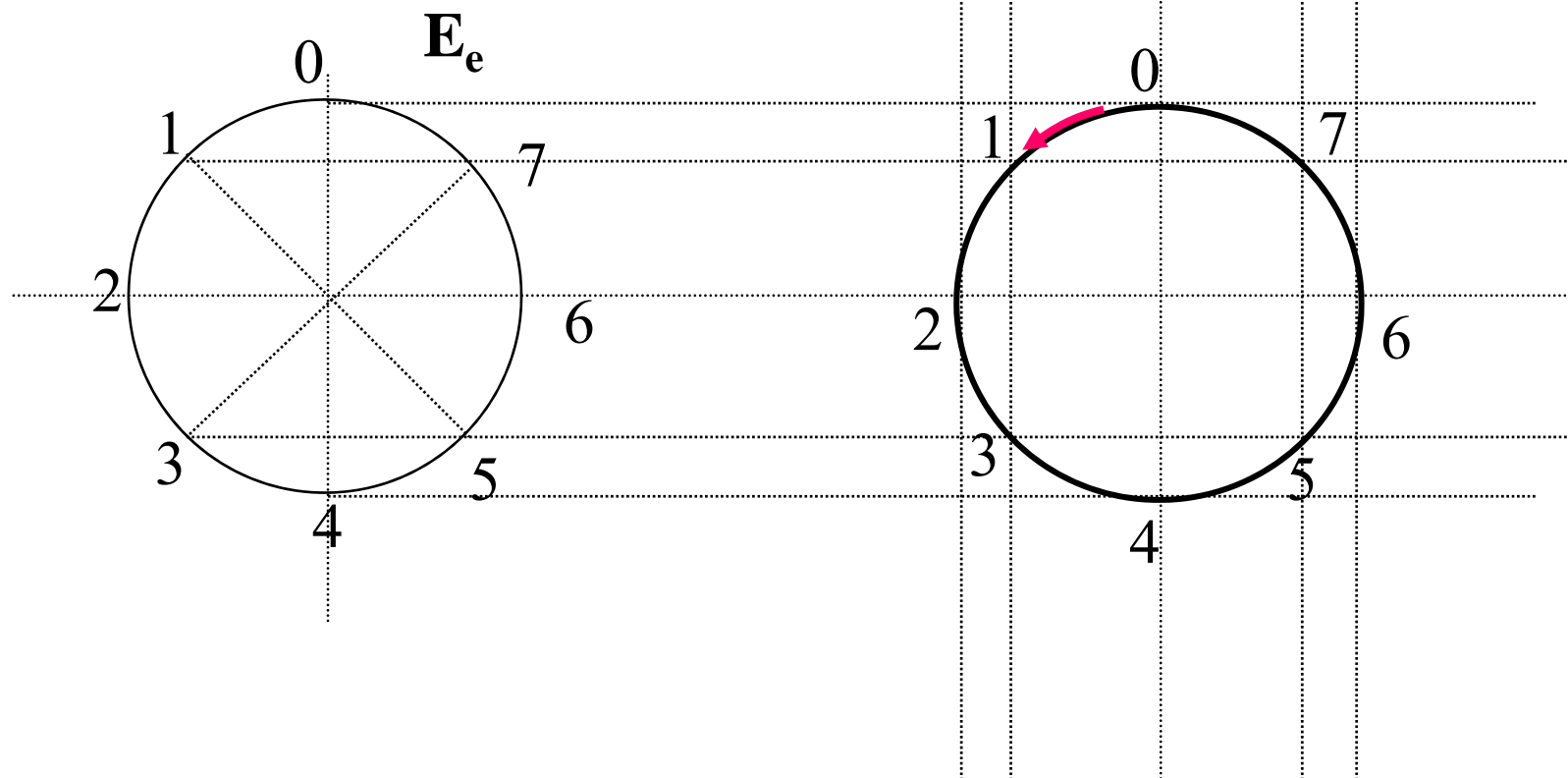


$$E_0 = A_0 \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$E_e = A_e \cos(\omega t)$$

利用**1/4**玻片

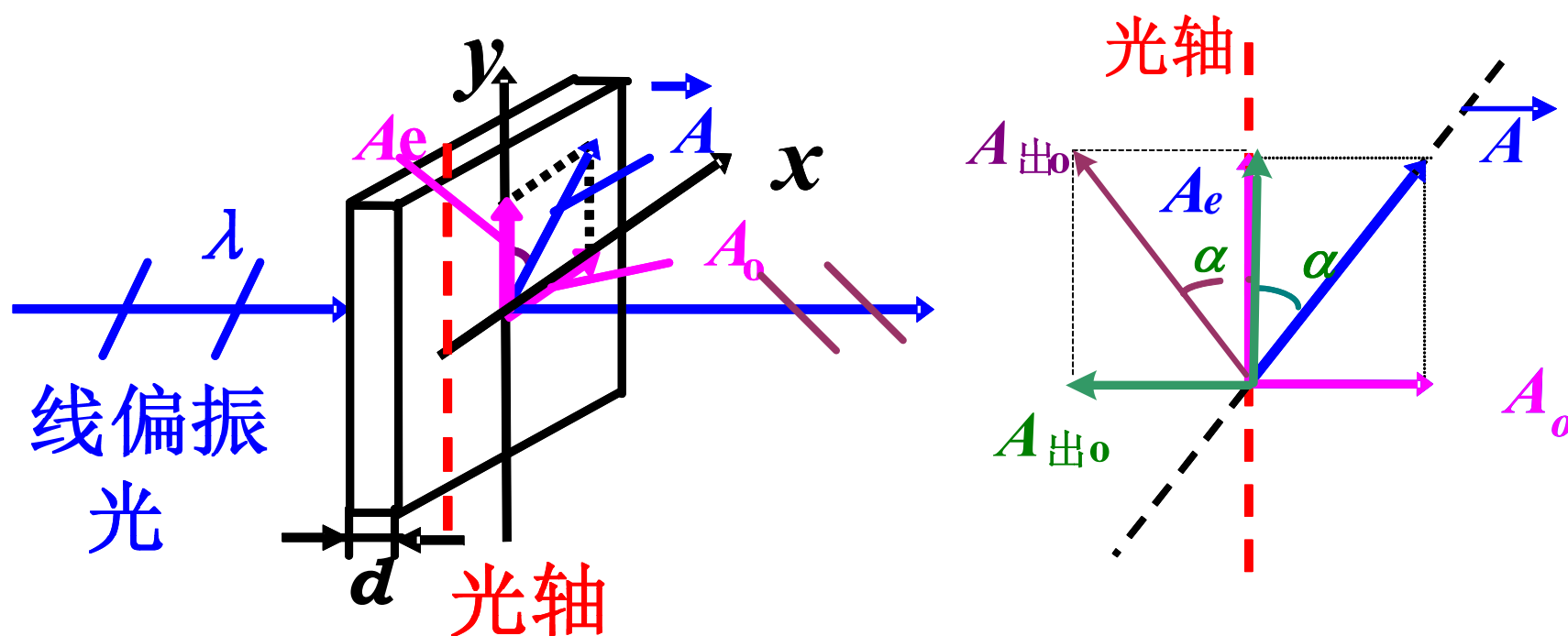
线偏振光 \Rightarrow 圆偏振光



(1) 当 $\Delta\varphi=\pi$ 时, $|\Delta\varphi|=|n_e - n_o| \cdot d \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$

光程差为: $\delta = (n_o - n_e) \cdot d = \lambda/2$

1/2波片 : 线偏振光 \Rightarrow 线偏振光

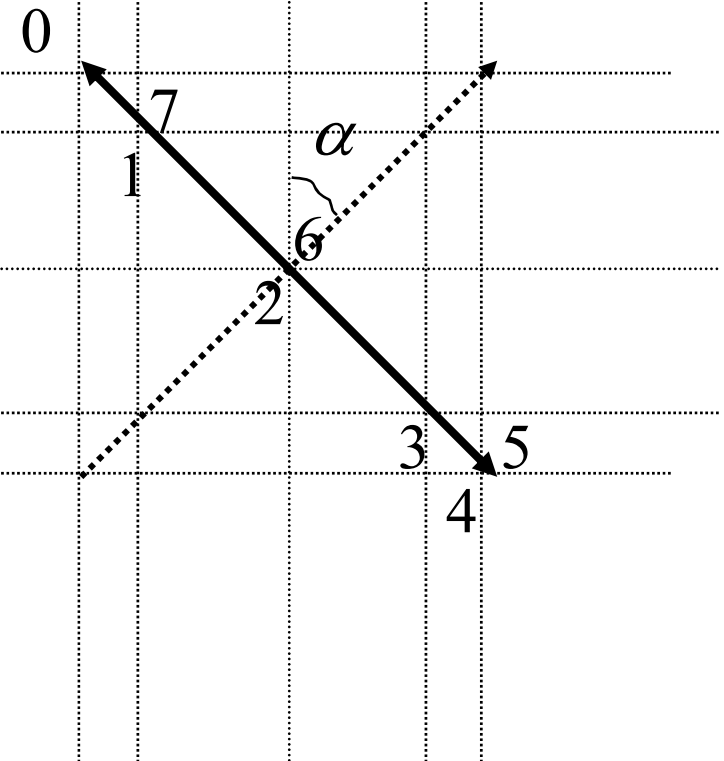
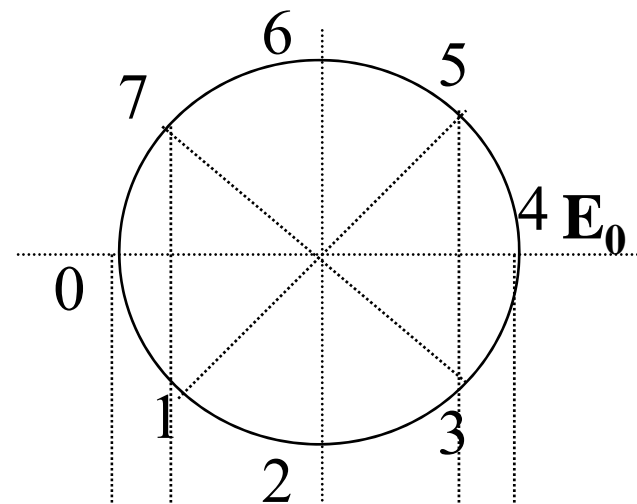
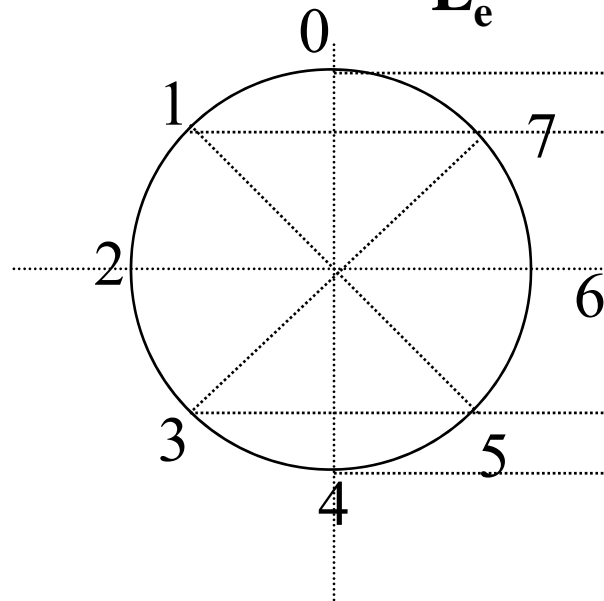


$$E_0 = A_0 \cos(\omega t + \pi)$$

$$E_e = A_e \cos(\omega t)$$

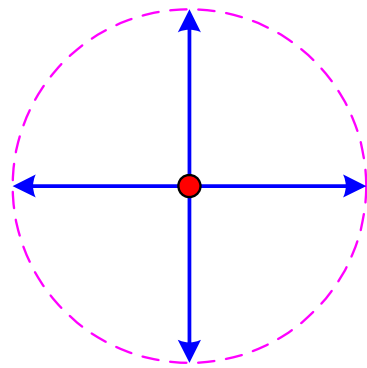
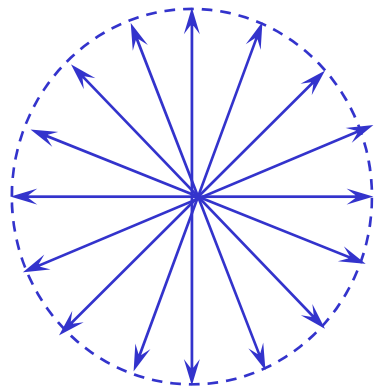
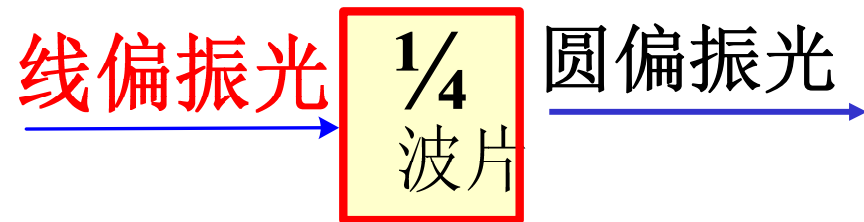
利用**1/2**玻片

线偏振光 \Rightarrow 线偏振光 \mathbf{E}_e

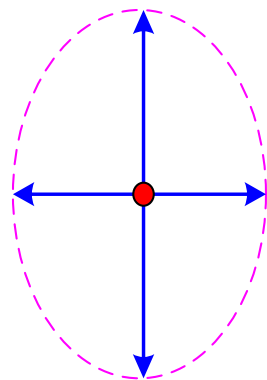
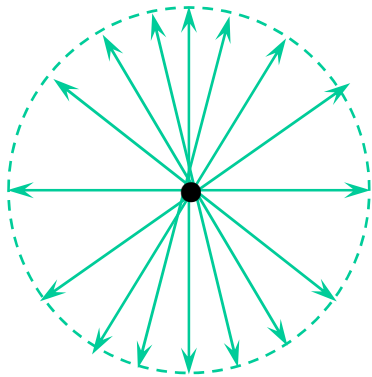


(3) 偏振光通过1/4波片的情况

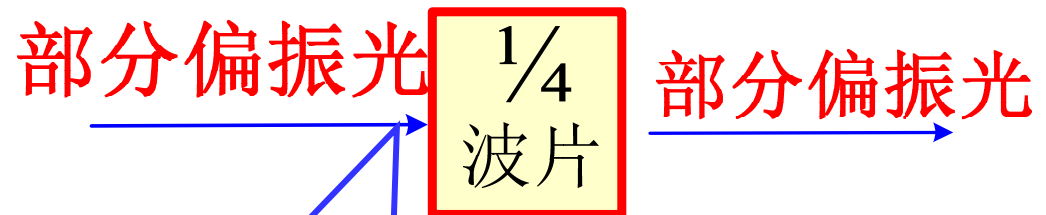
1/4波片特点: $\pi/2$



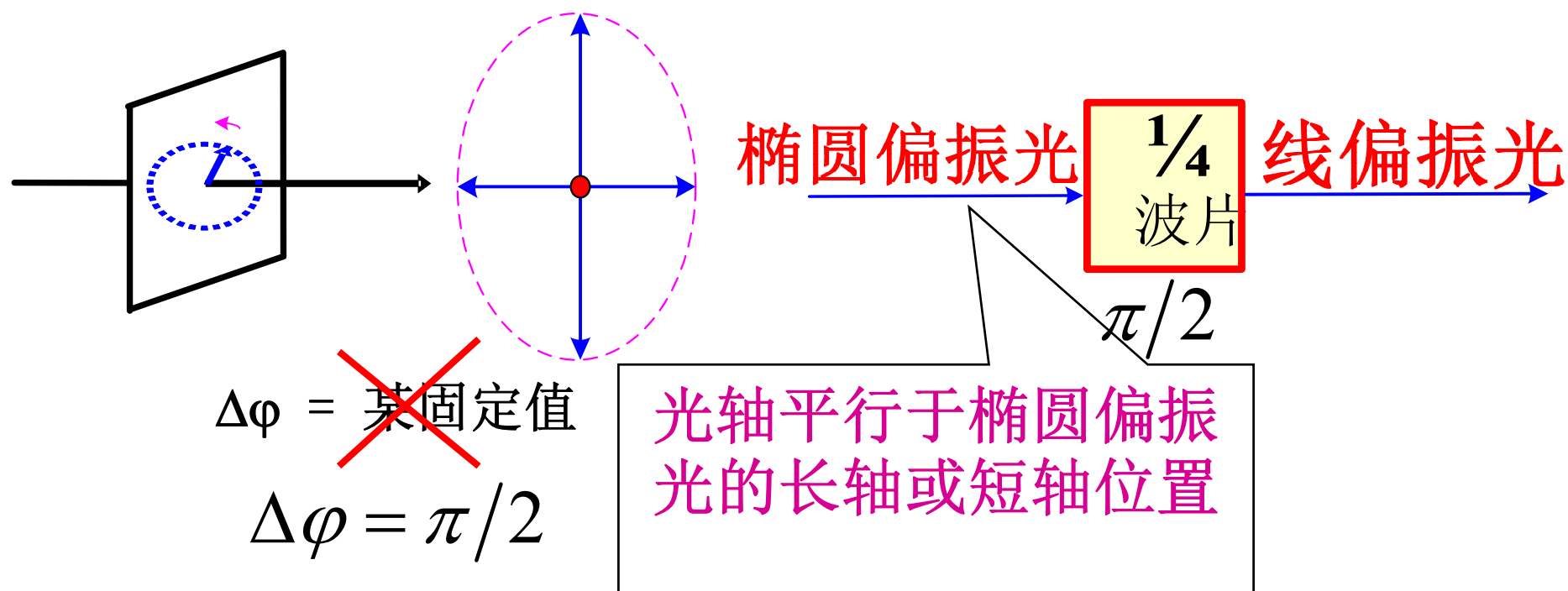
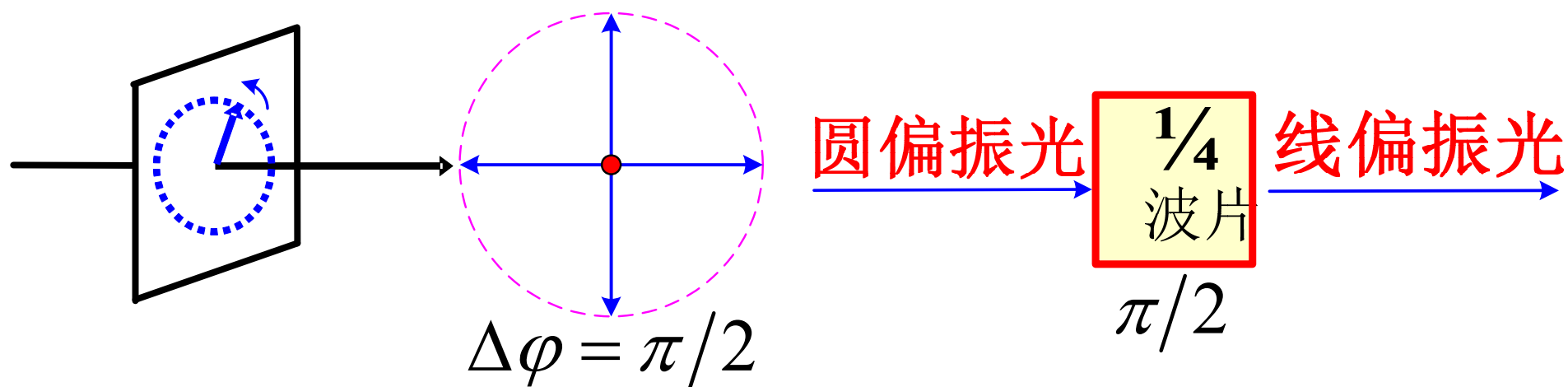
$\Delta\varphi = \text{任意值}$



$\Delta\varphi = \text{任意值}$

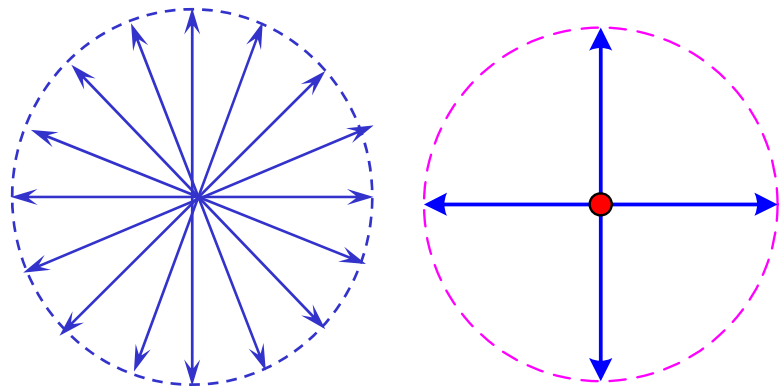


光轴平行于部分偏振光的
长轴或短轴位置

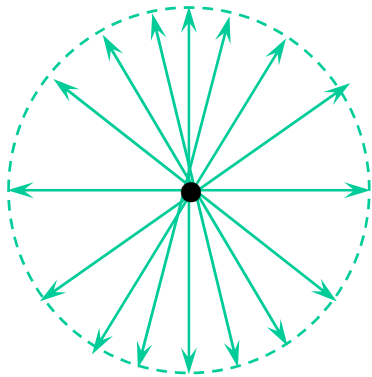


(3) 偏振光通过1/2波片的情况

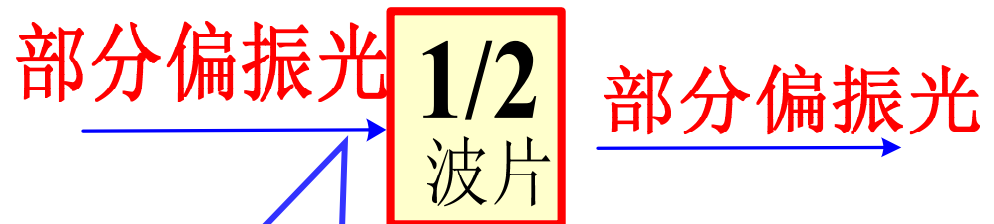
$\frac{1}{2}$ 波片特点: π



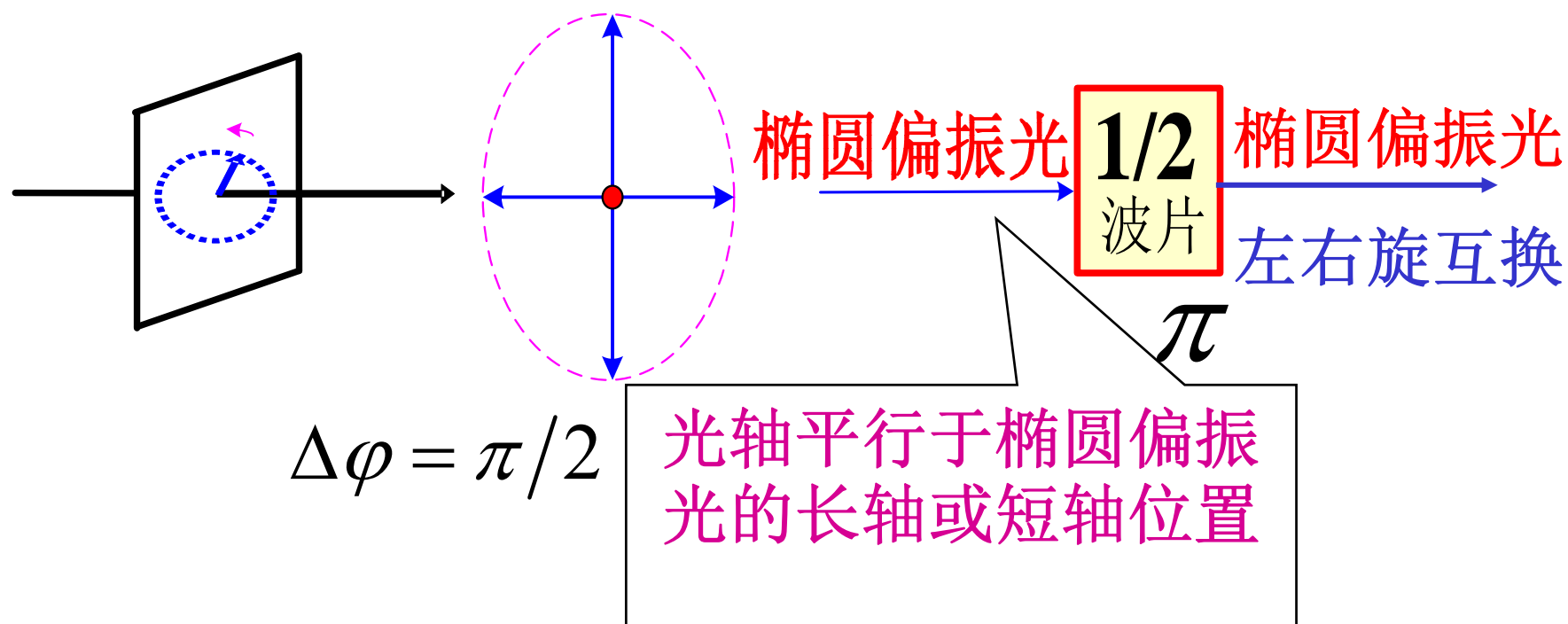
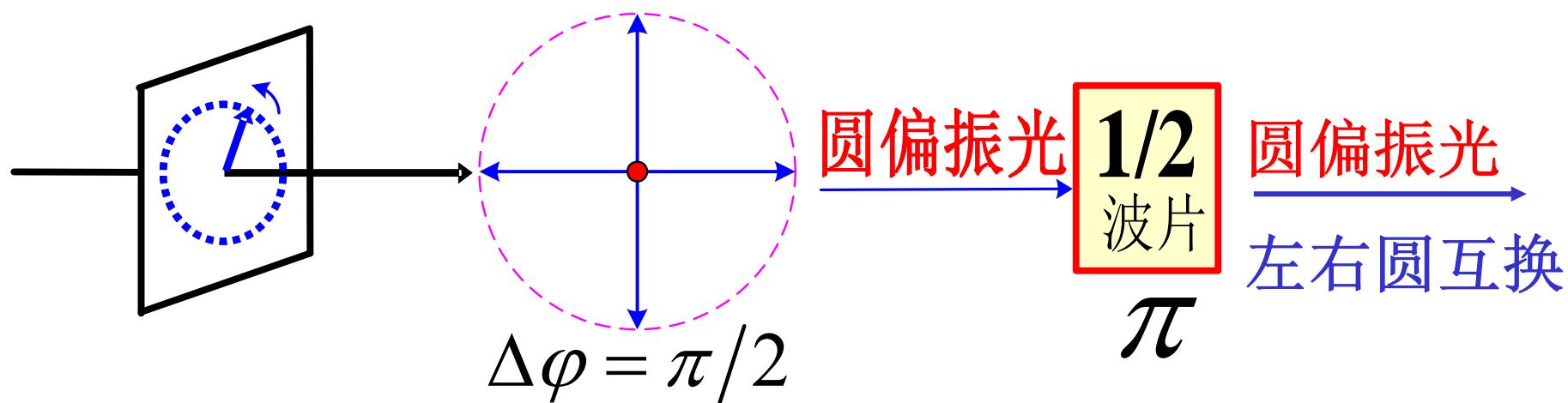
$\Delta\varphi = \text{任意值}$



$\Delta\varphi = \text{任意值}$



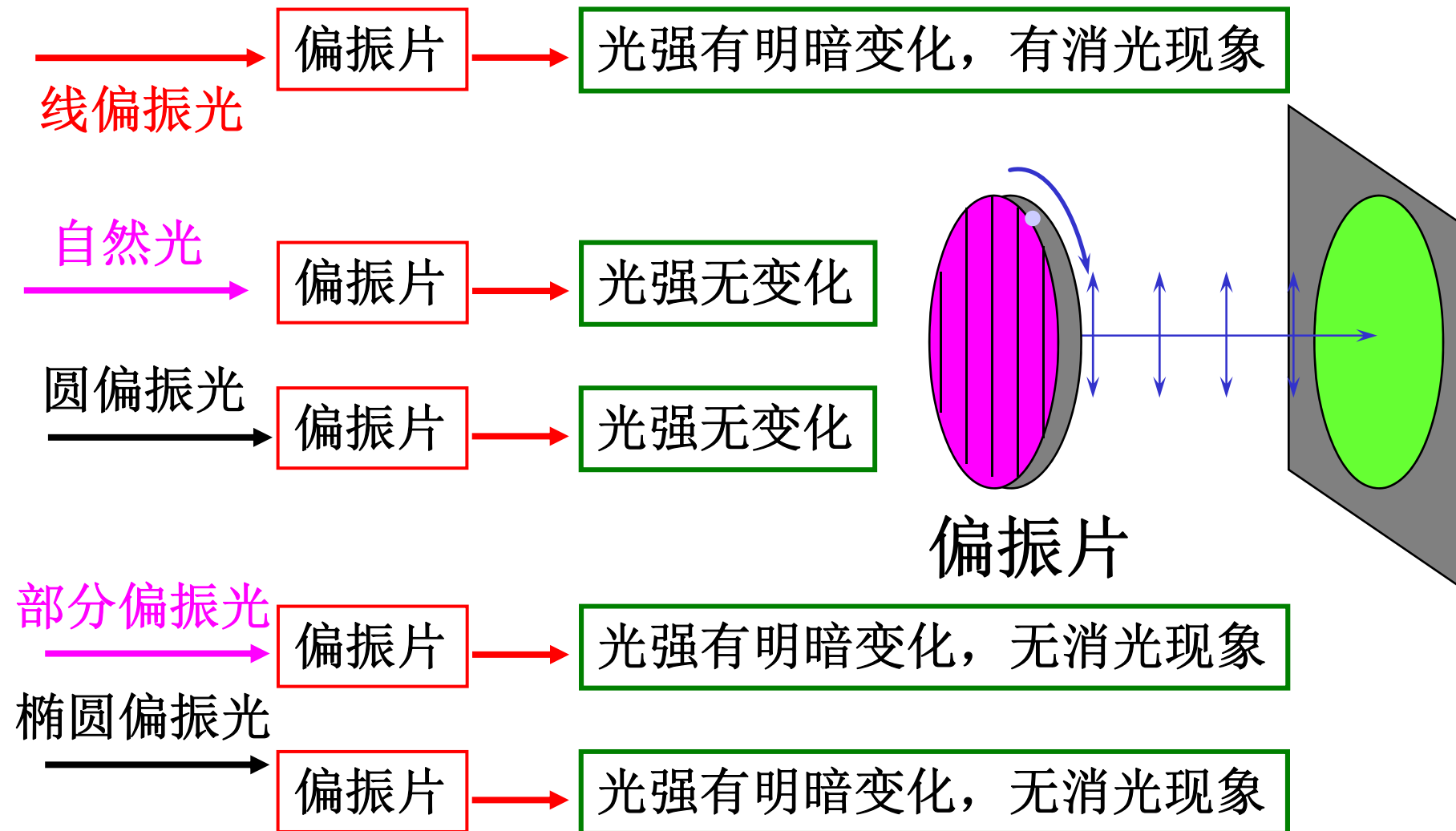
光轴平行于部分偏振光的
长轴或短轴位置



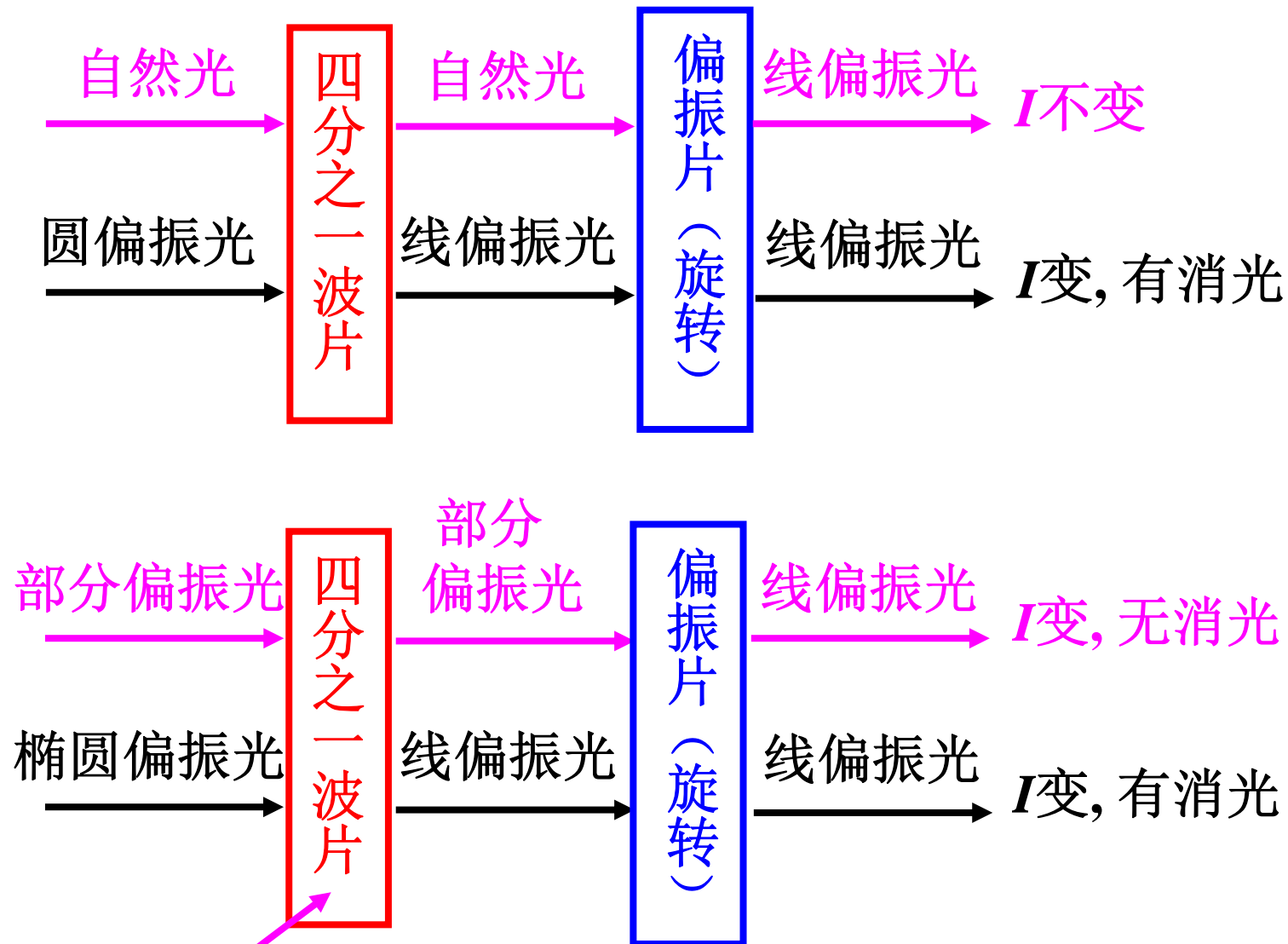
2、五种偏振光的判断

现有2个偏振片，一个1/4波片，来区分五种偏振光

第一步：



第二步:



光轴平行最大光强或最小光强方向放置或光轴平行椭圆偏振光的长轴或短轴放置

例题：一束部分椭圆偏振光沿着 z 方向传播通过一个完全线偏振的检偏器。当检偏器的透光方向沿 x 轴时，透射强度最大，其值为 $1.5 I_0$ ；当透射方向沿 y 轴时，透射强度最小，其值为 I_0 。问

- (1) 当透射方向与 x 轴成 θ 角时，透射强度如何？
- (2) 若令原来的光束先通过一个 $1/4$ 波片，然后再通过检偏器，且 $1/4$ 波片的光轴沿 x 轴或 y 轴方向。现在发现，当检偏器的透光方向与 x 轴成 30° 时，透射的强度最大，试确定这个最大强度的值。

解：

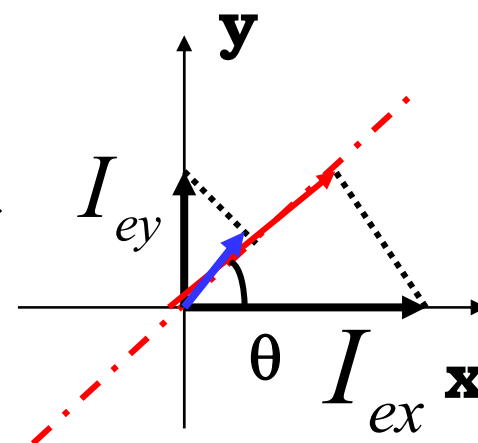
(1) 部分椭圆偏振光看作 椭圆偏振光+自然光

设自然光强为 I_a ，椭圆沿x与y轴的强度为 I_{ex} I_{ey}

$$1.5I_0 = I_{ex} + 1/2 I_a \quad (1)$$

$$I_0 = I_{ey} + 1/2 I_a \quad (2)$$

设偏振化方向与x轴夹角为 θ ，则出射光强为



$$I_{\theta} = I_{ex} \cos^2 \theta + I_{ey} \sin^2 \theta + 1/2 I_a$$

$$= I_{ex} \cos^2 \theta + I_{ex} \sin^2 \theta + I_{ey} \sin^2 \theta - I_{ex} \sin^2 \theta + 1/2 I_a$$

$$= I_{ex} + \sin^2 \theta (I_{ey} - I_{ex}) + 1/2 I_a$$

$$= 1.5I_0 - 1/2 I_0 \sin^2 \theta$$

(2) 长轴或短轴与1/4波片光轴平行，故椭圆偏振光经过1/4波片后成为线偏振光，设光强为 I_1 ，而线偏振光与x轴夹角为30度，沿xy方向取分量，则有

$$\frac{A_{ey}}{A_{ex}} = \tan 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{3} \quad \therefore \frac{I_{ey}}{I_{ex}} = \frac{1}{3} \quad (3)$$

设自然光强为 I_a ，依题意则有

$$1.5I_0 = I_{ex} + 1/2 I_a \quad (1)$$

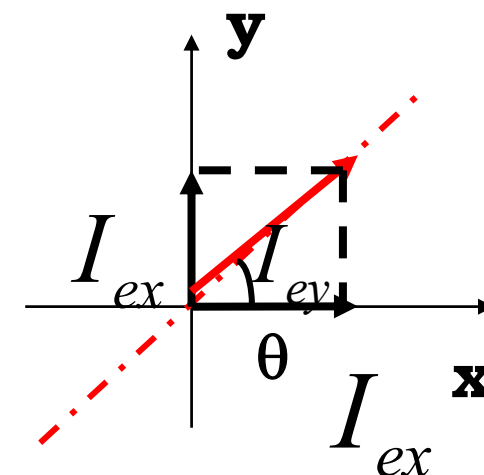
$$I_0 = I_{ey} + 1/2 I_a \quad (2)$$

连立(1) (2) (3)，可得

$$I_a = 1.5I_0 \quad I_{ex} = 0.75I_0 \quad I_{ey} = 0.25I_0$$

出射光强最强时，则

$$I = I_l + \frac{1}{2} I_a = I_{ex} + I_{ey} + \frac{1}{2} I_a = 1.75I_0$$



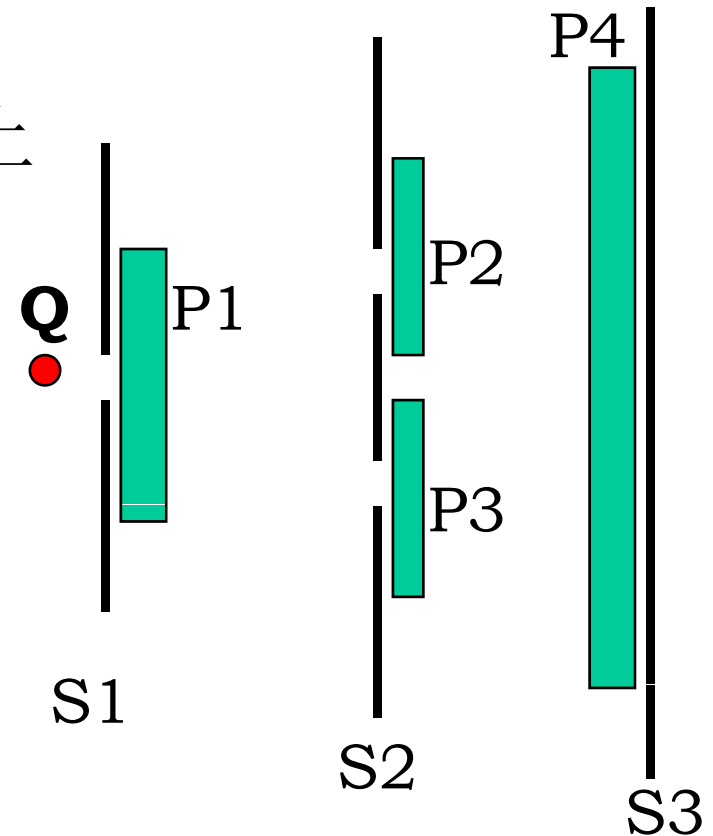
例题：如图, Q为波长 λ 的单色光源, S1上具有一长狭缝, S2上具有两个宽度为 a 而相距为 $d \gg a$ 的狭缝, P1, P2, P3和P4是偏振片, 对下面每一种情况简单解释S3屏上的强度和图形.

(1) 所有偏振片均除去 (要导出S3上光强最大和最小的位置);

(2) P1除去, P2和P3互相正交而P2与P4成45度;

(3) 同(2), 但P4除去;

(4) P1与P2成45度角, P2和P3仍相互垂直, P4垂直于P1;



解

(1) 此为杨氏双缝干涉，屏上为明暗相间的条纹。明纹中心位置与暗纹中心位置分别为：

$$x = \pm k \frac{D}{d} \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad x = \pm (2k - 1) \frac{D}{2d} \lambda$$

(2) 自然光经过P1, P2后为振动方向相互垂直的线偏振光，但他们之间没有固定的相位差，经P4偏振片后，相互垂直的线偏振光引到同一振动方向，但它们仍然是不相干的，故屏幕上是一片均匀亮区

(3) 在屏上叠加的是相互垂直，无固定相位差的两个振动，因而屏上是一片均匀亮区，但强度是(2)的2倍。

(4) 光经过P1后成为线偏振光，光振动沿P1透光方向，此线偏振光经过P2, P3后，出射光为光振动沿P2P3透光方向的线偏振光，他们是从同一线偏振光分解而得，因而有固定的相位差，经P4后，被引到同一振动方向，成为相干光，屏上可得到干涉条纹。同(1)的分布情况一样，但明条纹中心的强度减弱，其强度为

$$I = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} I_0 = \frac{I_0}{8}$$

I_0 为(1)中亮条纹中心强度。

偏振-总结:

1 偏振片——马吕斯定律

注意: 两个或三个偏振片并用的情况

2 入射光、反射光与折射光的偏振问题, 布鲁斯特定律

3 光的双折射现象: 知道o光e光均为线偏振光, 偏振方向的判断, 各自的波面, 会用惠更斯作图法作简单的图

4 $1/4$ 和 $1/2$ 波片的作用, 五种偏振光经过波片后变为哪种偏振光, 五种偏振光的区分。