大学物理(下)

华 中 科 技 大 学

张智

zzhang@hust.edu.cn

第五篇
光学
(Optics)

●圆孔径光学仪器的最小分辨角

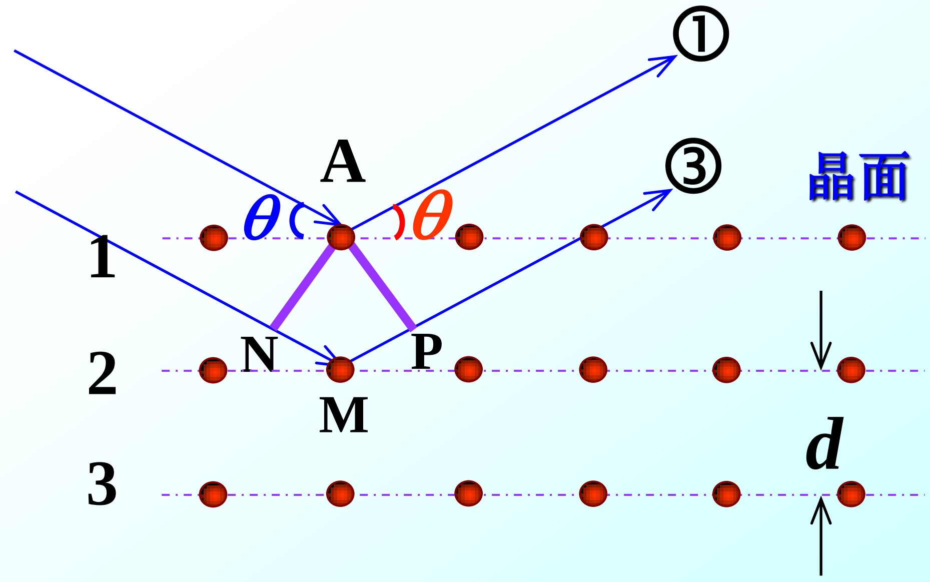
最小分辨角 $\delta\varphi=\theta_1=1.22\dfrac{\lambda}{D}$

分辨率R（分辨本领）$\propto\dfrac{1}{\delta\varphi}=\dfrac{D}{1.22\lambda}$

● X 射线晶体衍射

$$\boxed{2d\cdot\sin\theta=k\lambda}$$

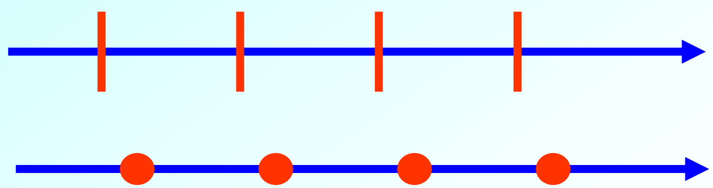
布喇格公式



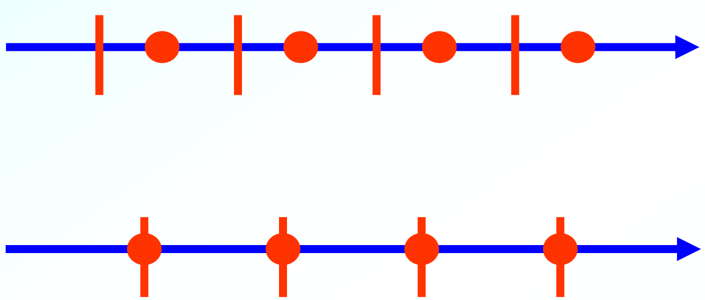
●光的偏振状态

1. 线偏振光

（平面或完全偏振光）



2. 自然光（非偏振光）

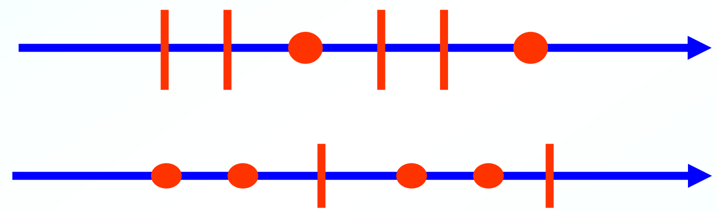


(可分解为两个垂直的、振幅相等的独立光振动)

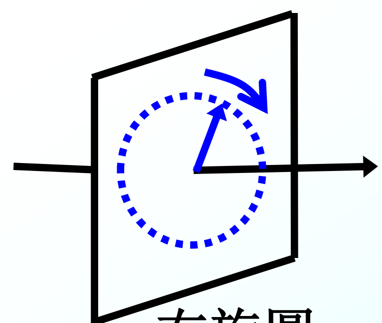
两振动无确定的位相关系

3. 部分偏振光

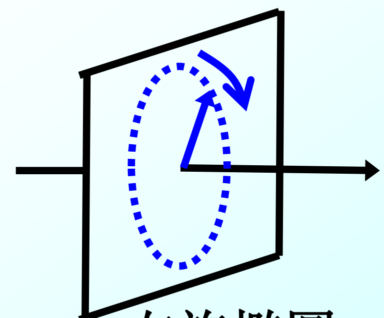
(可分解为两个垂直的、振幅不等的独立光振动)



4. 圆偏振光、 椭圆偏振光



右旋圆偏振光

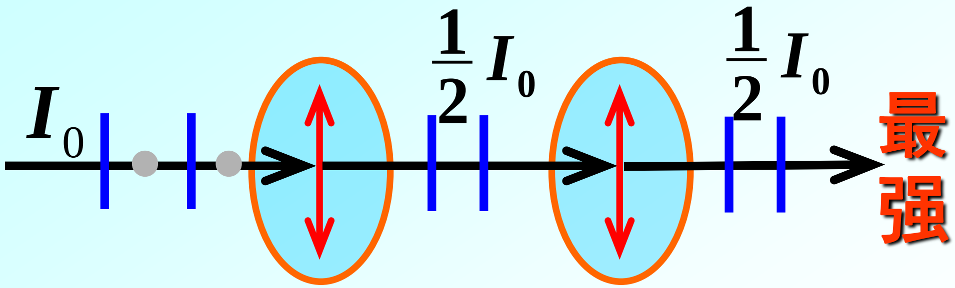


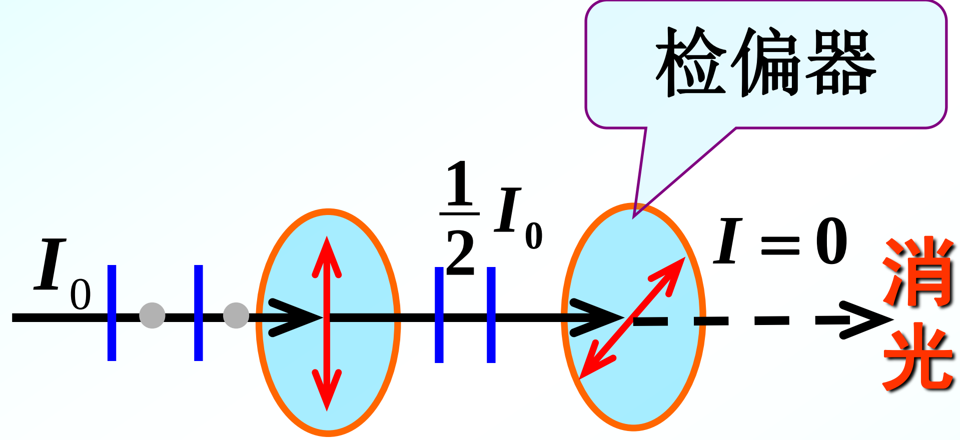
右旋椭圆偏振光

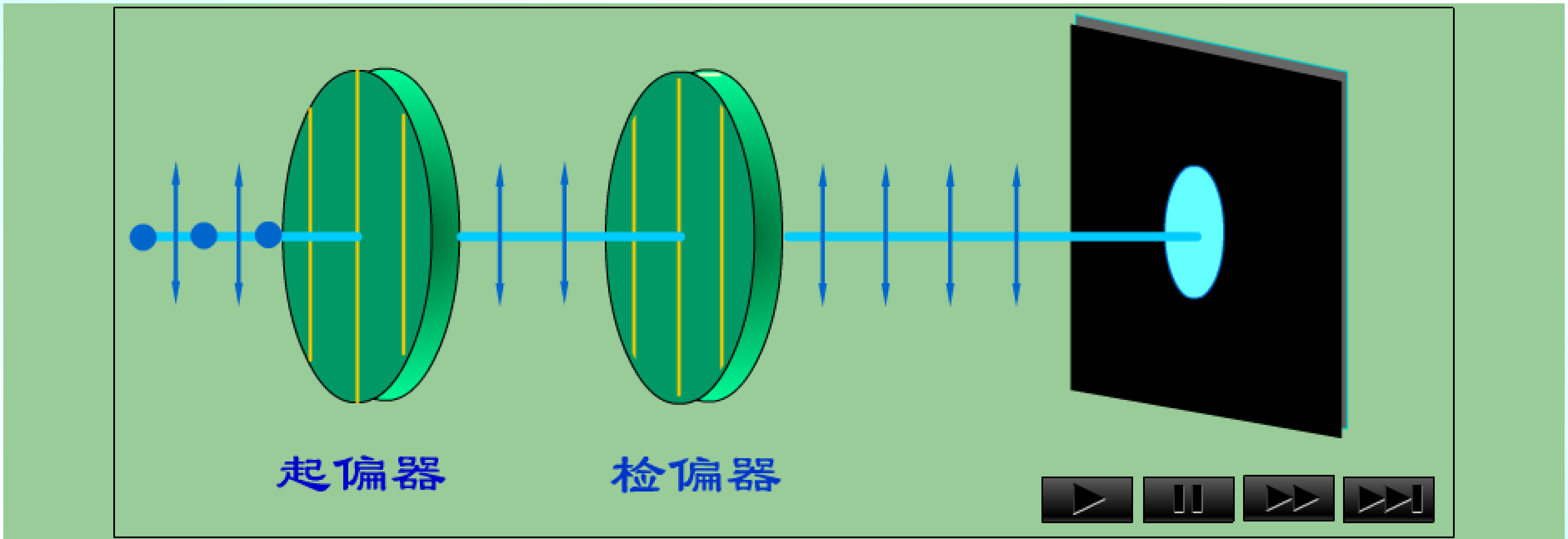
(可分解为两束振动方向垂直的、振幅相等（圆），或不等（椭圆）的线偏振光)

两振动有确定的位相差，如 $\pi/2$

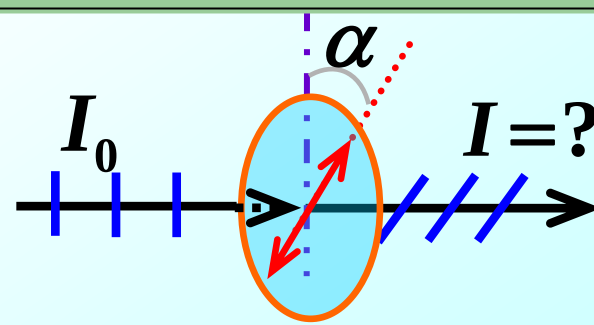
3. 检偏 ——线偏振光的检验



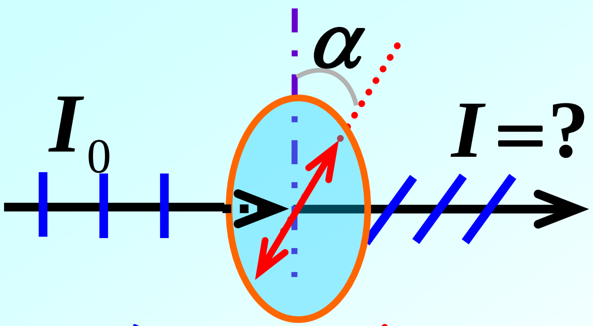




检偏器旋转一周，透射光强出现**两次最强**，**两次消光**。

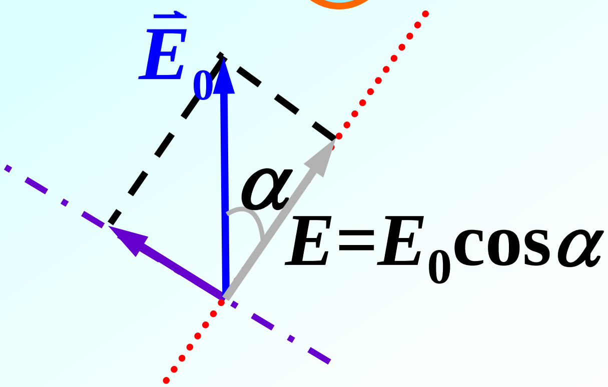


4. 马吕斯定律



入射的线偏振光的光矢量振动方向与检偏器偏振化方向间的夹角为 α。

$$I_0 = E_0^2 \qquad I = E^2 = E_0^2 \cos^2\alpha$$



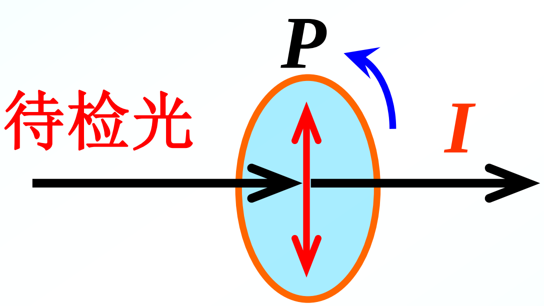
$$\boxed{I = I_0\cos^2\alpha}$$ ——马吕斯定律

$\alpha = 0,\ \pi \Rightarrow \quad I = I_{max} = I_0$ ——最强

$\alpha = \dfrac{\pi}{2},\ \dfrac{3\pi}{2} \Rightarrow \quad I = 0$ ——消光

5. 偏振光的检验

：用偏振片检验光的偏振态。



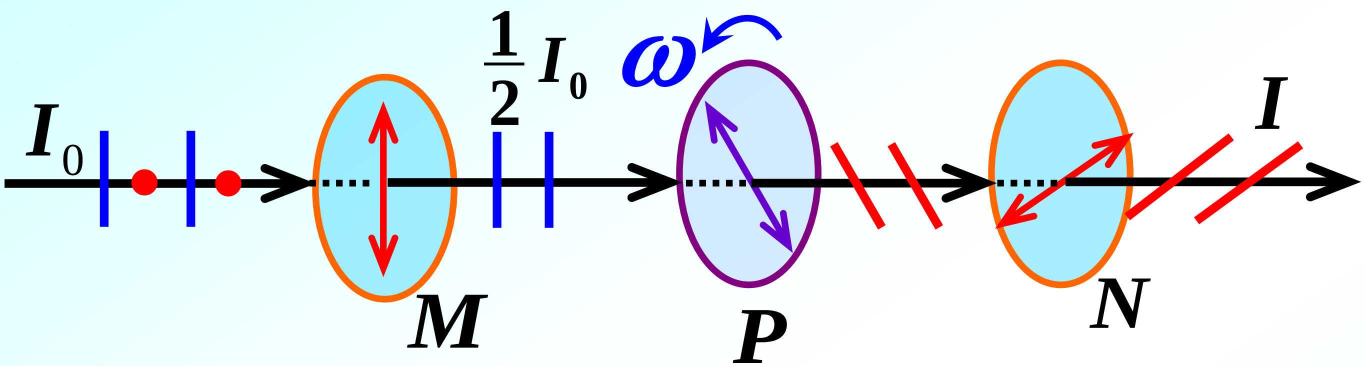
I变，有消光→？ 线偏振光

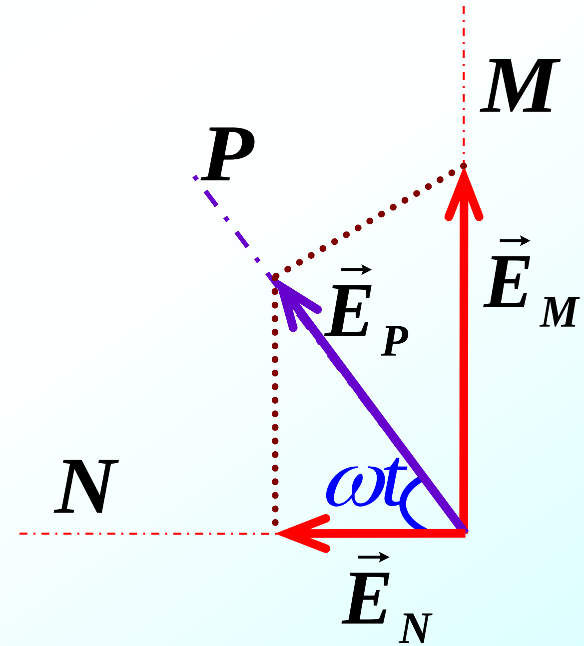
I不变→？ 自然光 / 圆偏

I变，无消光→？ 椭圆偏 / 部分偏

仅一个偏振片无法区分？

例. 在偏振方向正交的起偏器M和检偏器 N 之间，插入一片以角速度 ω旋转的偏振片P，入射自然光光强 I_0，试求该系统的出射光强。





$$E_N = E_P\cos\omega t = E_M \sin\omega t\cos\omega t$$

$$I = E_N^2 = \frac{1}{2}I_0\sin^2\omega t\cos^2\omega t$$

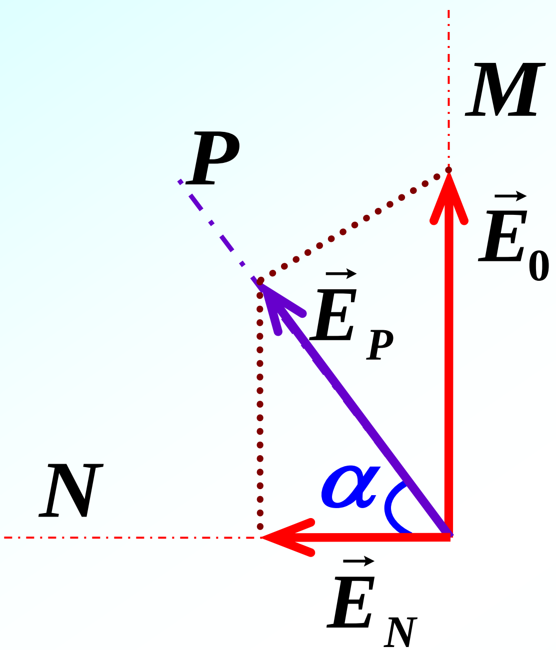
$$I = \frac{1}{8}I_0\sin^2 2\omega t\begin{cases}\alpha = 0, \dfrac{\pi}{2}, \pi, \dfrac{3\pi}{2}, & I = 0\\ \alpha = \dfrac{\pi}{4}, \dfrac{3\pi}{4}, \dfrac{5\pi}{4}, \dfrac{7\pi}{4}, & I = \dfrac{I_0}{8}\end{cases}$$

P每旋转一周，输出光强出现"四明四零"。

I 的变化圆频率为4ω

例. 要使一束线偏振光通过偏振片之后振动方向转过90^0，至少需要让这束光通过__2__块理想的偏振片，

在此情况下透射光强最大是原来光强的__$1/4$__倍。



$$E_N = E_0 \sin\alpha \cos\alpha$$

$$= \frac{1}{2} E_0 \sin 2\alpha$$

$$I = \frac{1}{4} I_0 \sin^2 2\alpha$$

例. 由线偏振光和自然光混合而得的光束通过一偏振片，透射光强度随偏振片的旋转而变化。如最大光强是最小光强的2倍，求入射光束中两种成分的相对强度。

解：入射光强I_0，其中线偏振光强为I_{01}，自然光强为I_{02}，则：

$$I_0 = I_{01} + I_{02}$$

自然光：
$$I_{透2} = \frac{1}{2} I_{02}$$

线偏振光：
$$I_{透1} = 0 \sim I_{01}$$

$$I_{01} + \frac{I_{02}}{2} = 2 \times \frac{I_{02}}{2} \Rightarrow I_{01} = \frac{I_{02}}{2}$$

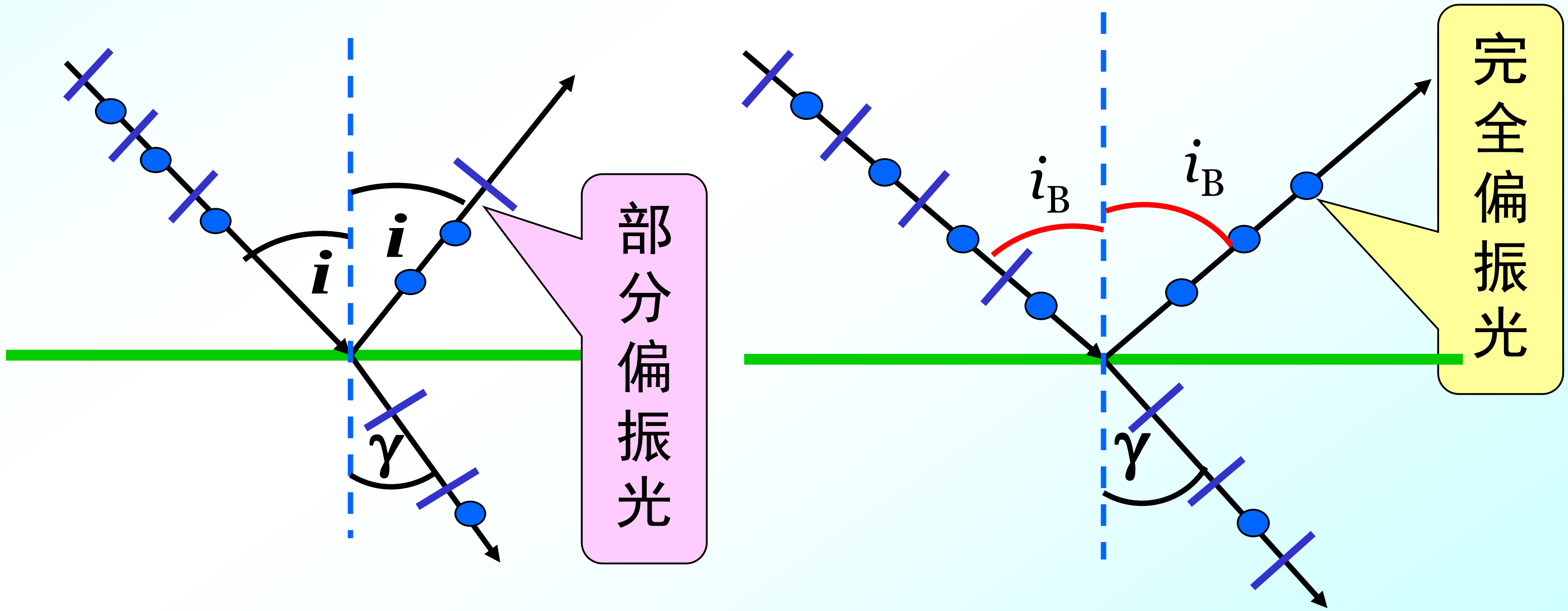
$$\Rightarrow \frac{I_{01}}{I_0} = \frac{1}{3} \qquad \frac{I_{02}}{I_0} = \frac{2}{3}$$

三. 布儒斯特定律

(1) 反射光的偏振

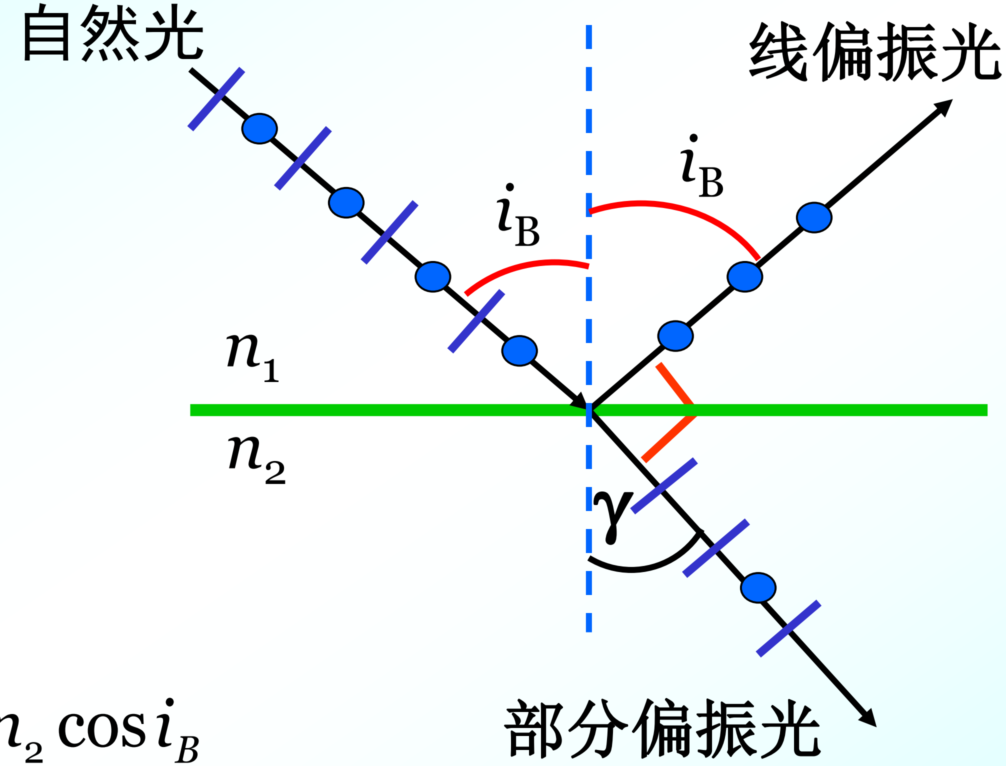
马吕斯发现：两种介质的分界面上，**自然光**反射时，可以产生部分偏振光或完全偏振光。

当 $i = i_B$时,反射光为完全偏振光, i_B叫“起偏角”，或“布儒斯特角”。



(2) 布儒斯特定律

实验证明：　　$i_B + \gamma = \dfrac{\pi}{2}$



反射光是线偏振光，
且反射光的$\vec{E}$ 垂直于入射面。

$$n_1 \sin i_B = n_2 \sin\gamma$$

$$= n_2 \sin(\frac{\pi}{2} - i_B) \quad = n_2 \cos i_B$$

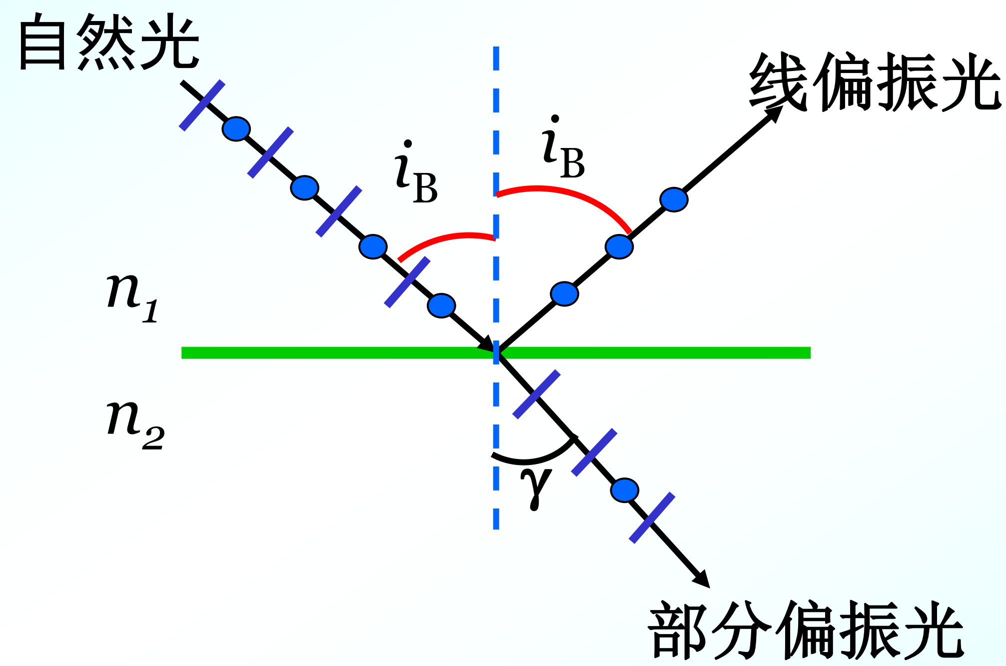
$$\mathrm{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

起偏角 $\boxed{i_B = \mathrm{tg}^{-1}\dfrac{n_2}{n_1}}$

----布儒斯特定律

它表示：当光从n_1介质入射到n_2介质，反射光为线偏振光时，入射角与折射率的关系。

$$\boxed{\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1}}$$



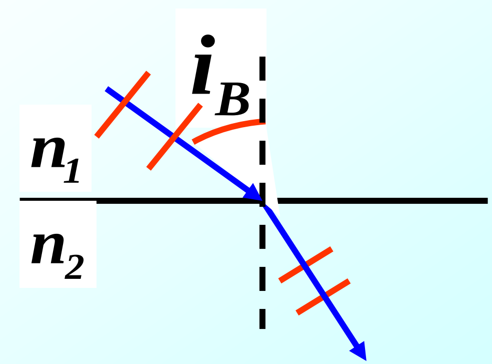
例： 求玻璃的起偏角？

设 n_1=1，n_2=1.5

则 $i_B = \operatorname{tg}^{-1}\dfrac{n_2}{n_1}$

$= \operatorname{tg}^{-1}1.5 = 56.3^{\circ}$

讨论： 当光以i_B入射时，无反射光，你能对入射光作出什么结论？



■ 是线偏振光，且$\vec{E}$ 平行入射面。

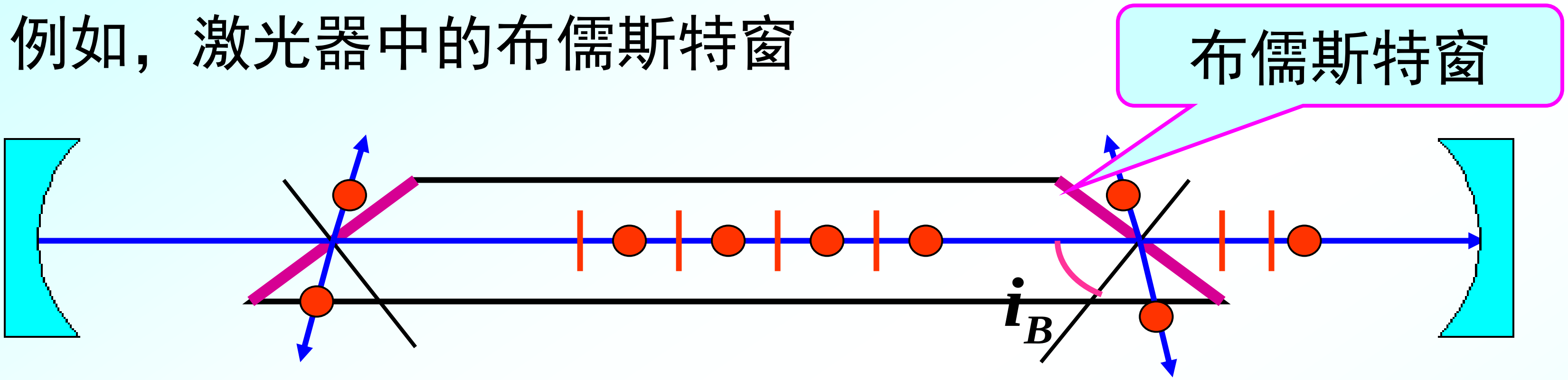
布儒斯特定律的实质：

E 的平行分量在i_B角入射时，不反射，全部透射。

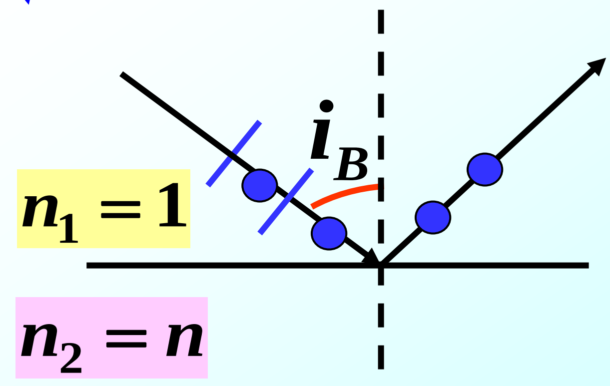
应用:

1^{o} 可由反射获得线偏振光

例如，激光器中的布儒斯特窗

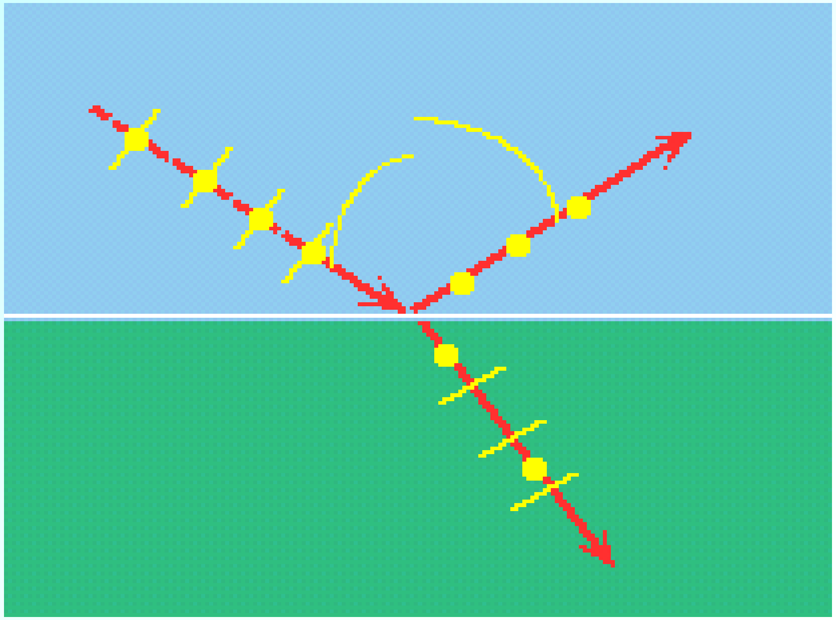


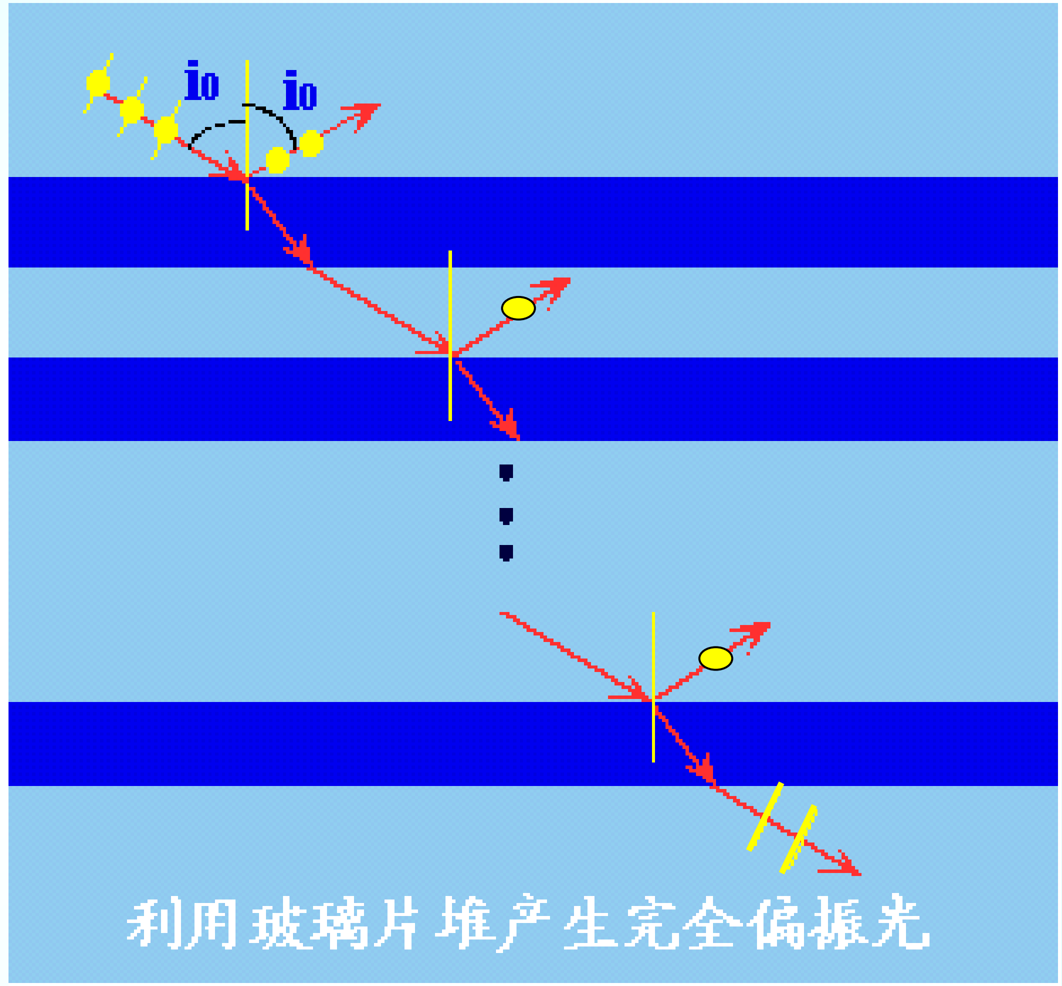
2^{o} 可测不透明媒质折射率 $\mathrm{tg}\, i_B = n$



3^{o} 若反射光是部分偏振光，利用偏振片可消去大部分反射光（如镜头前加偏振片、偏光望远镜等）。

（3）折射光的偏振

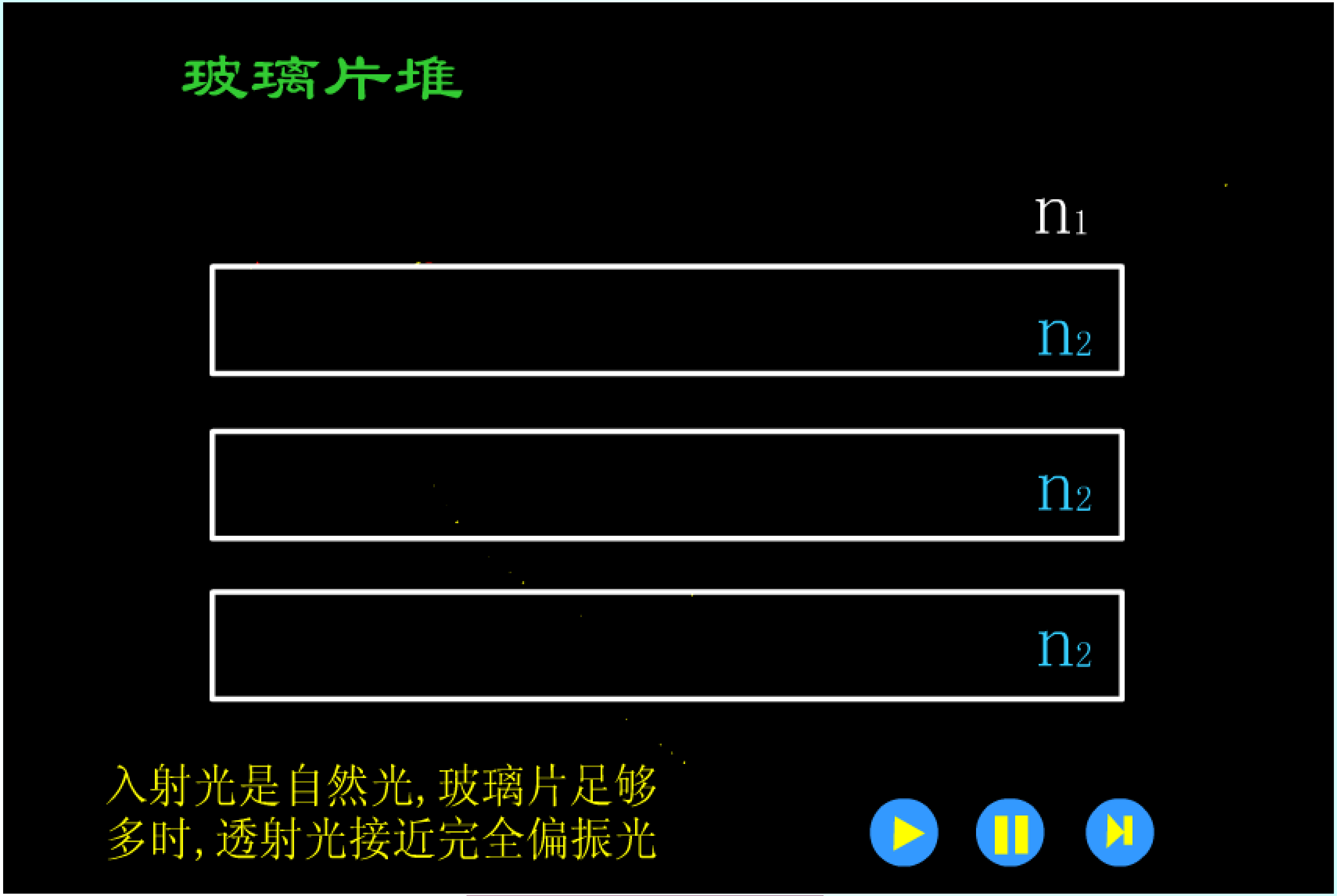




■ 许多玻璃片平行放置于空气中，自然光以起偏振角入射，各界面多次反射和折射。

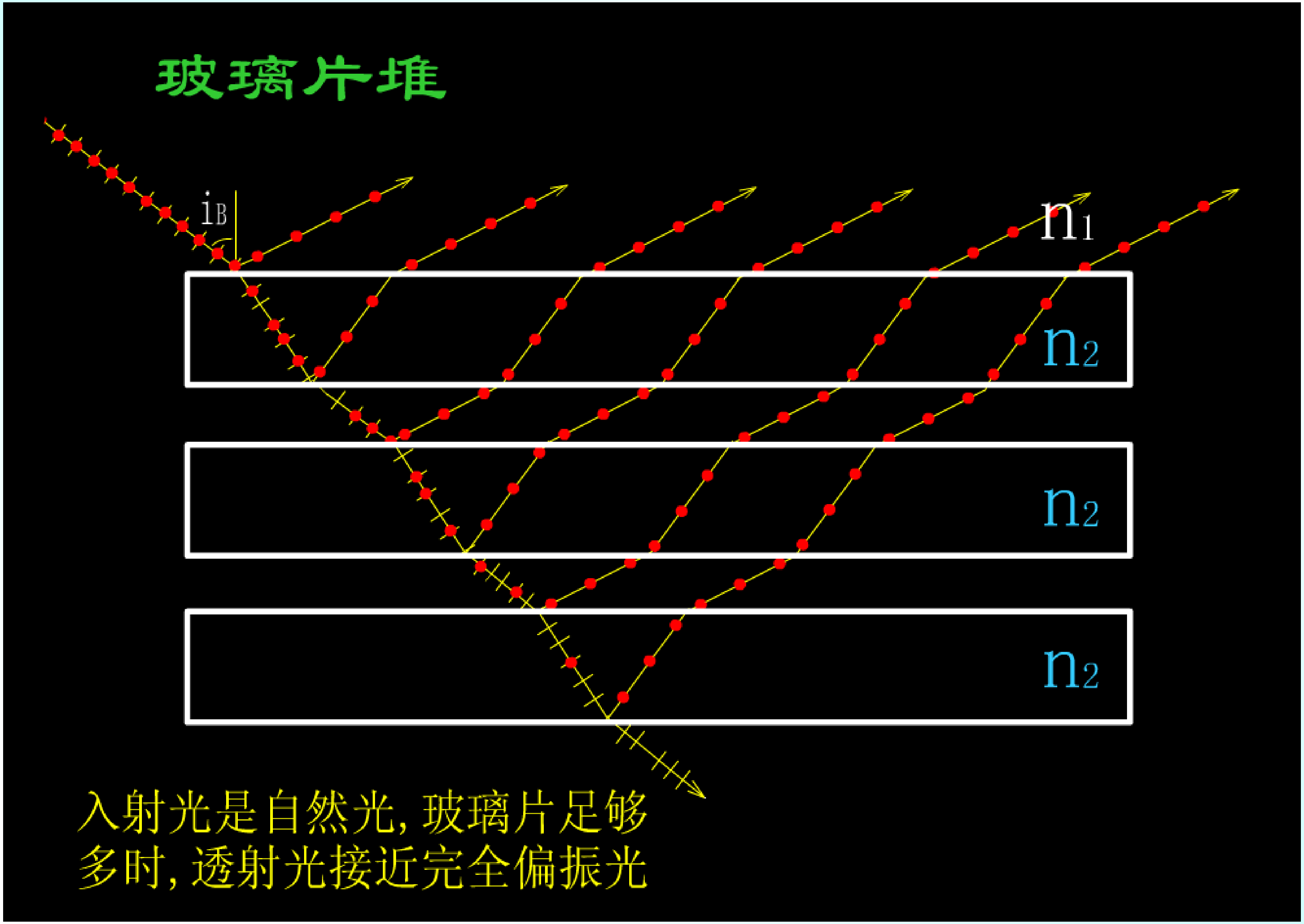
◆ 各界面都是布儒斯特角入射，反射光都是线偏振光。各界面的反射增强了反射光的强度，同时也增加了透射光的偏振程度。

利用玻璃片堆从透射光可获得较强线偏振光



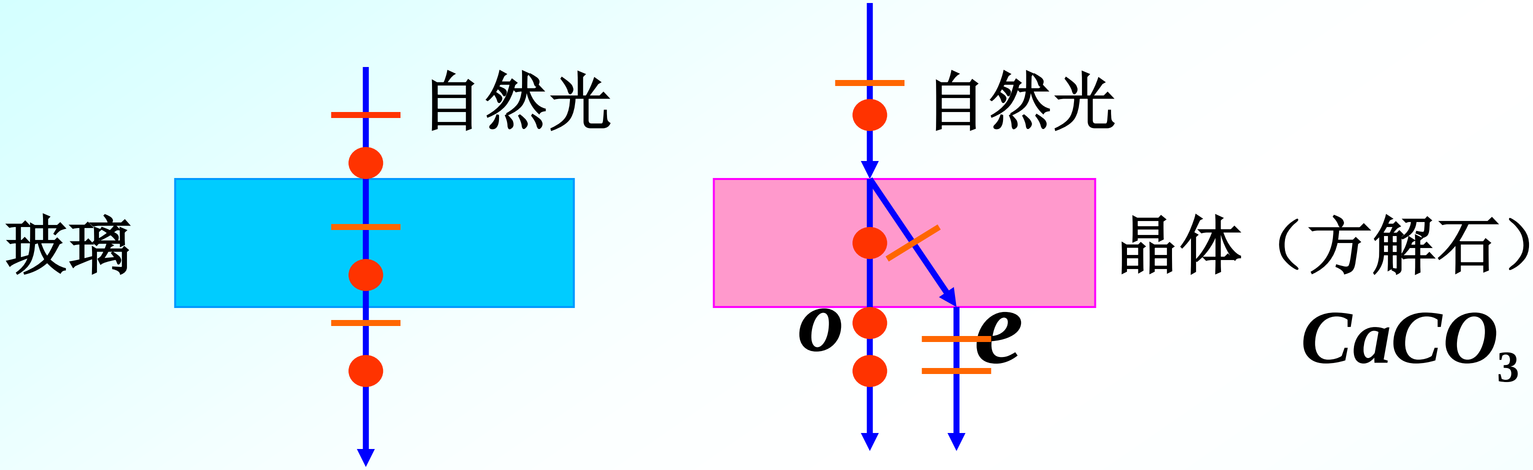
演示：玻璃堆

利用玻璃片堆从透射光可获得较强线偏振光



第7节　双折射

1、现象



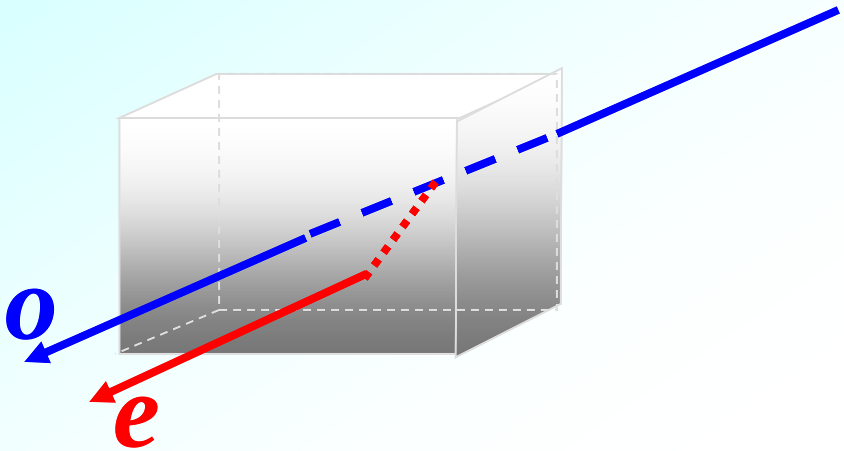
自然光入射到光学各向异性晶体，一般产生两条折射光：

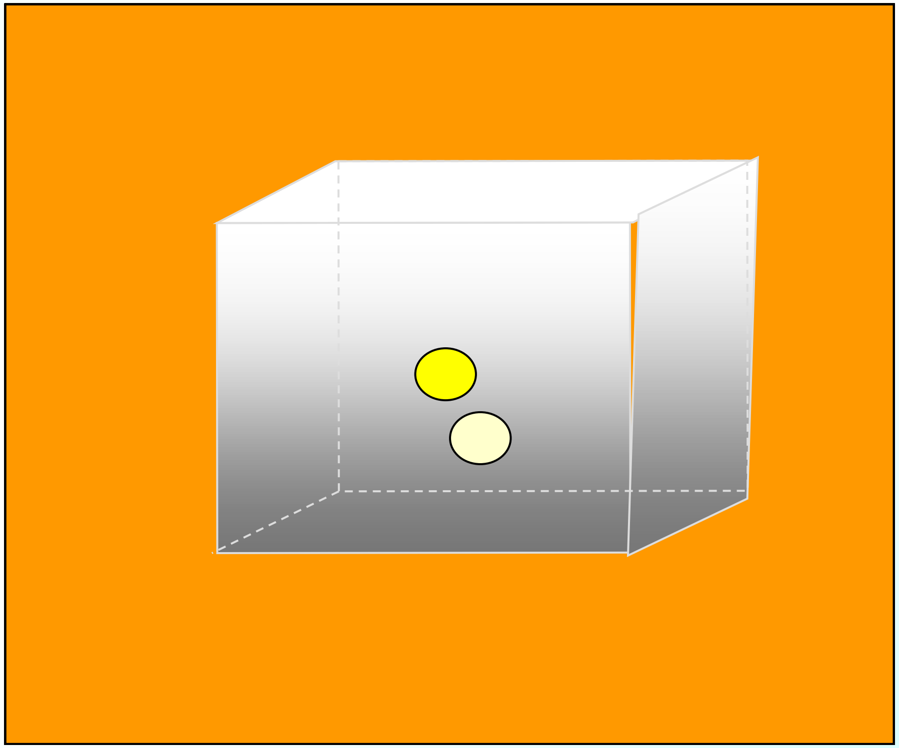
一条遵守折射定律，称寻常光（*o*光）
一条不遵守折射定律，称非寻常光（*e*光）

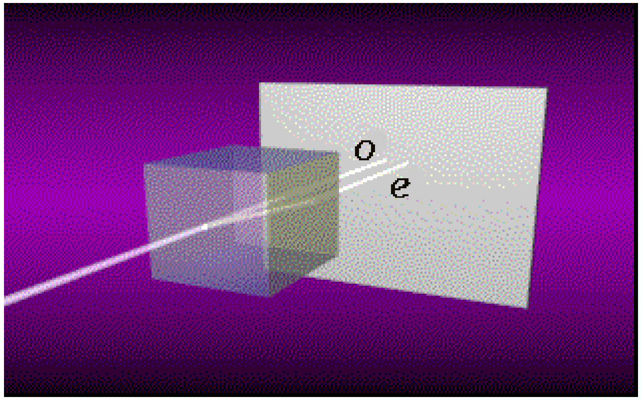
◆ 它们都是线偏振光，且振动方向互相垂直。

■ 产生双折射的原因是晶体对两光束有不同的折射率n_o，n_e。

◆ 当方解石晶体旋转时，*o*光不动，*e*光围绕*o*光旋转。







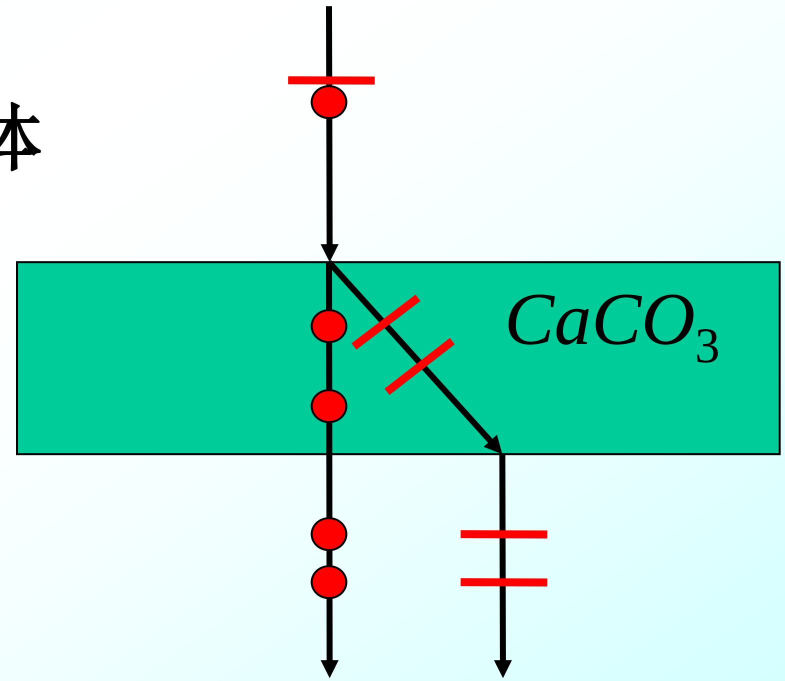
演示：双折射

◆ 双折射现象产生的原因：

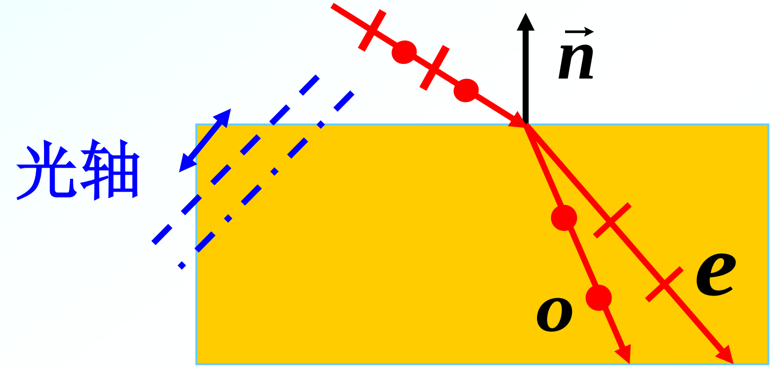
各向同性的介质各方向对光的折射率*n*相同，不产生双折射。

但$CaCO_3$等对光学各向异性的晶体

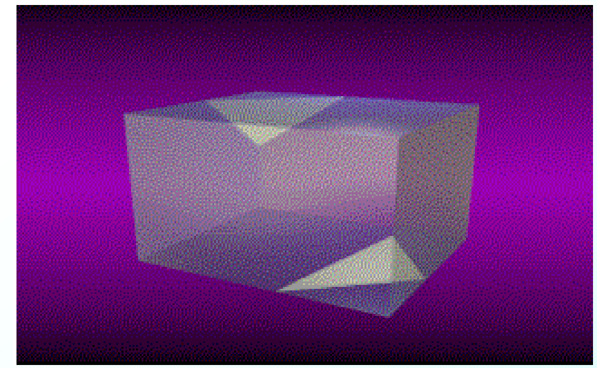
对*o*光：一个折射率
对*e*光：无数个折射率
(与方向有关)



2.几个概念：

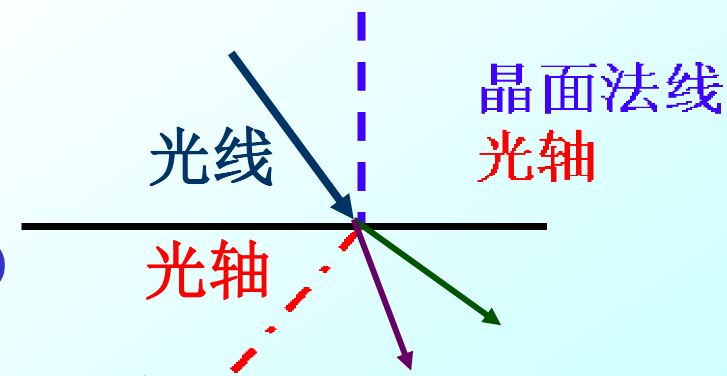


（1）晶体的光轴：表示一个特殊的方向，沿此方向o、e光速度相同，折射率n_o，n_e也相同，不发生双折射。



注：凡平行于光轴方向的直线均为光轴。

一般 { 单轴晶体：只有一个光轴的晶体
双轴晶体：有两个光轴的晶体 }



（2）晶体的主截面（晶面法线+光轴）

（3）光线的主平面（晶体内光线方向+光轴）

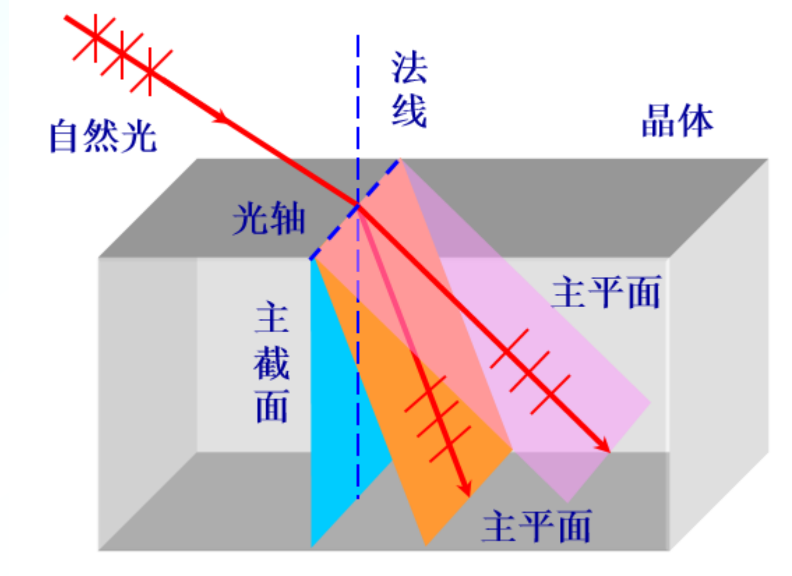
注意：

1) *o* 光 *e* 光的主平面不一定相同

2) 主平面，主截面不一定相同。

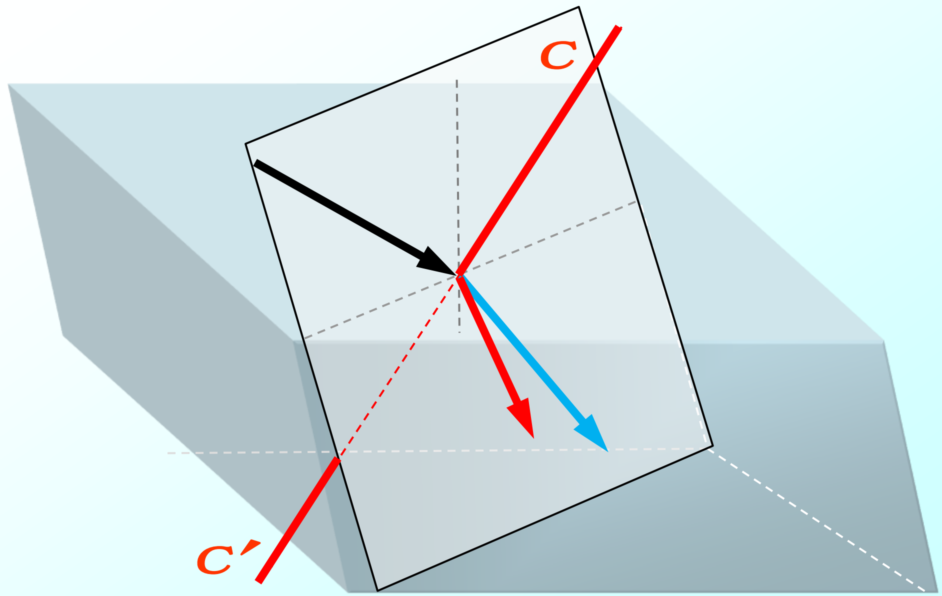
*o*光的振动方向 ⊥ *o*光的主平面

*e*光的振动方向 // *e* 光的主平面



重点研究：

* 入射光在主截面内
* 主平面、主截面为同一平面
* *o*光振动方向 ⊥*e* 光振动方向



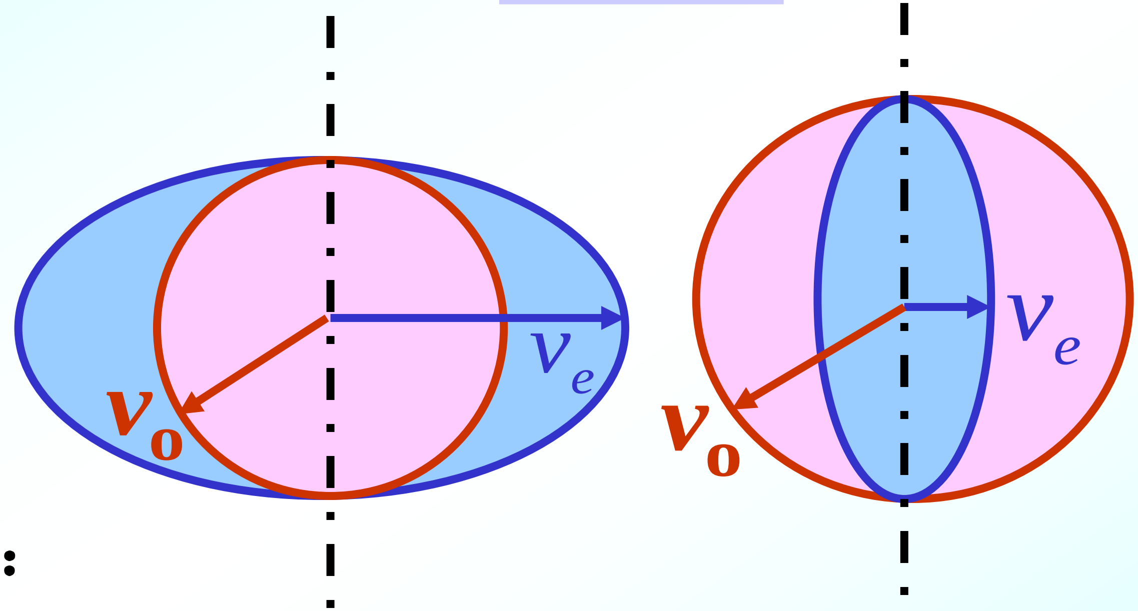
（4）正晶体　负晶体

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

负晶体（如方解石）

$$v_o < v_e,\ n_o > n_e$$

$\begin{cases} n_o\ \text{常数} \\ n_e\text{变化} \end{cases}$



负晶体　　　　正晶体

在垂直于光轴的方向上：

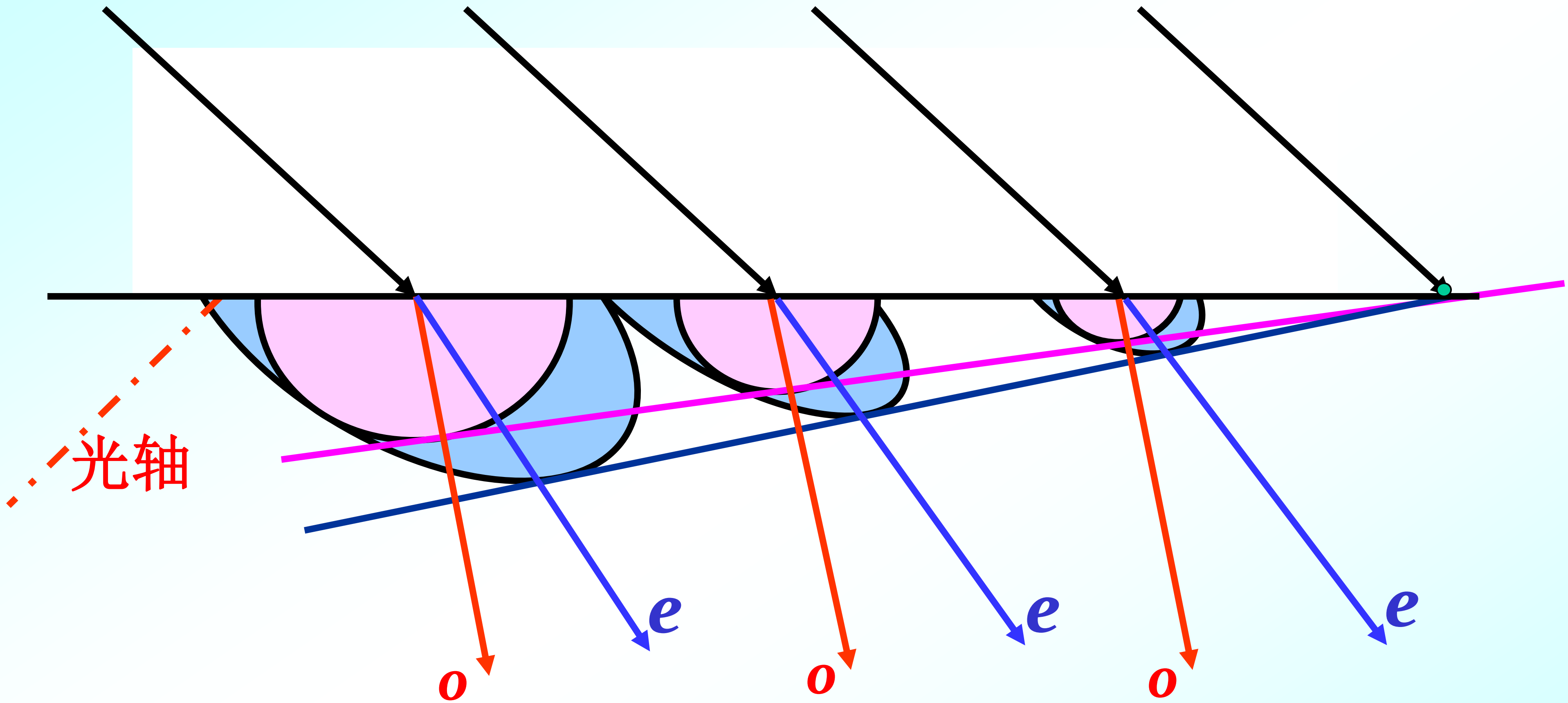
$\begin{cases} v_e\,(max) \\ n_e\,(min) \end{cases}$　$n_e\,(min) \Rightarrow$ 晶体的主折射率

根据惠更斯原理，晶体中任一子波源要激发o光和e光的两个波面。

- 晶体对o光各向同性，各方向传播速率相同，因此o光的子波面为球面。
- 晶体对e光各向异性，各方向传播速率不同，因此e光的子波面为以光轴为轴的旋转椭球面。

◆ 任一子波源的两个子波波面在光轴方向上相切，在垂直方向上，两束光的速率相差最大。

3. 用惠更斯原理解释双折射现象

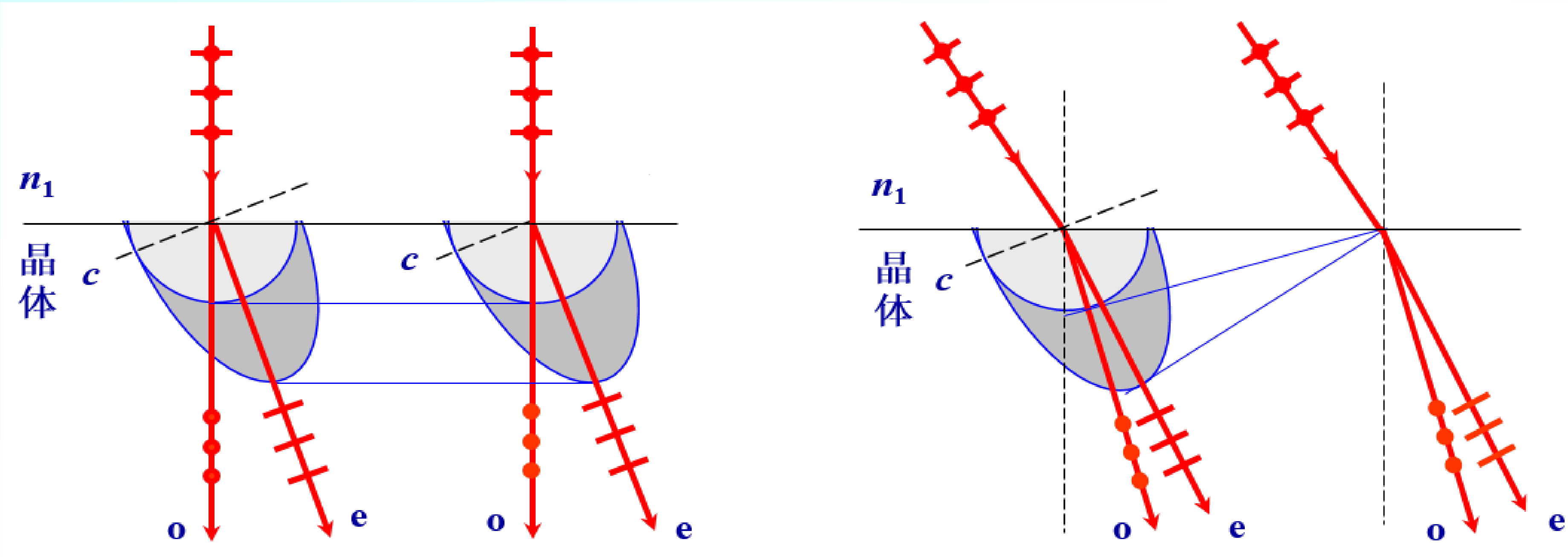


■ 根据惠更斯原理，界面上任一子波源向晶体内发出球面子波和椭球面子波。

■ 在较迟时刻t，与各组子波相切的平面就代表该时刻对应的o光和e光的波面，自入射点引向相应的子波波面和光波面切点的连线方向，即为晶体中o光和e光的传播方向。

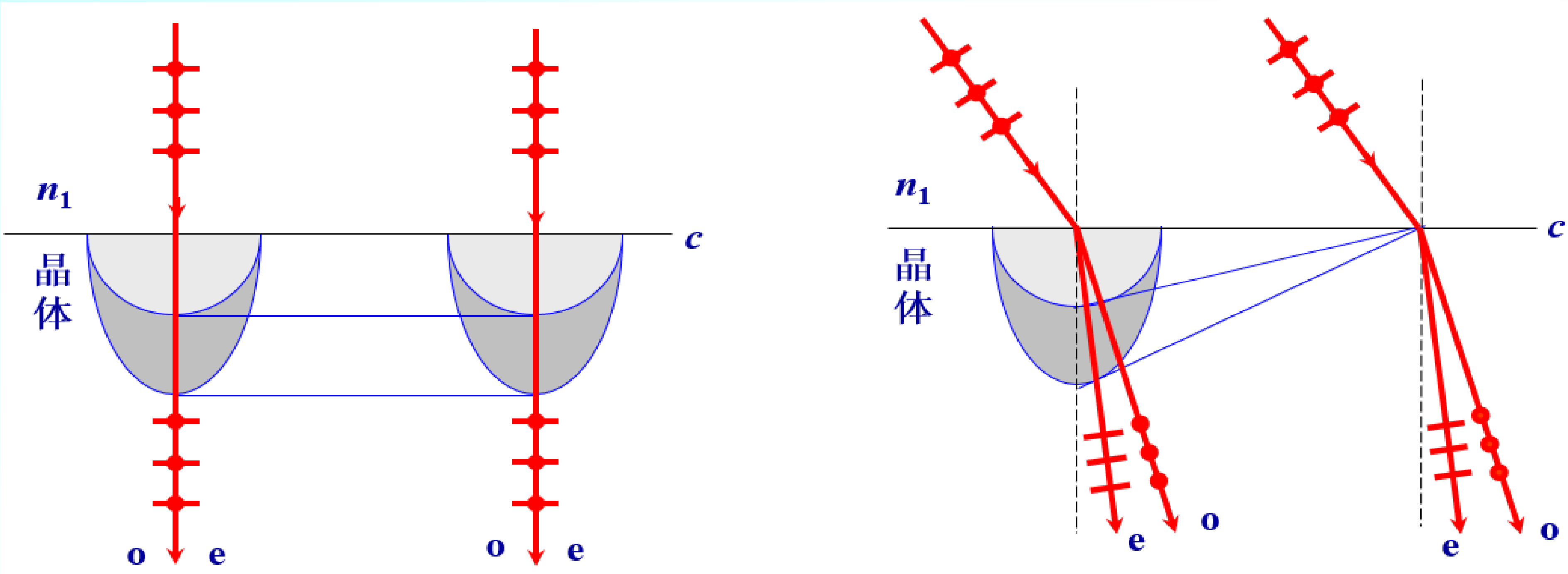
双折射的几种情况（以负单轴晶体为例）

a) 光轴平行于入射面，且与界面相交一角度



结论：无论垂直入射还是斜入射，o光和e光分开，但因为主截面与入射面重合，故o光主平面与e光主平面重合，e光仍位于入射面内。

b) 光轴平行于入射面与界面

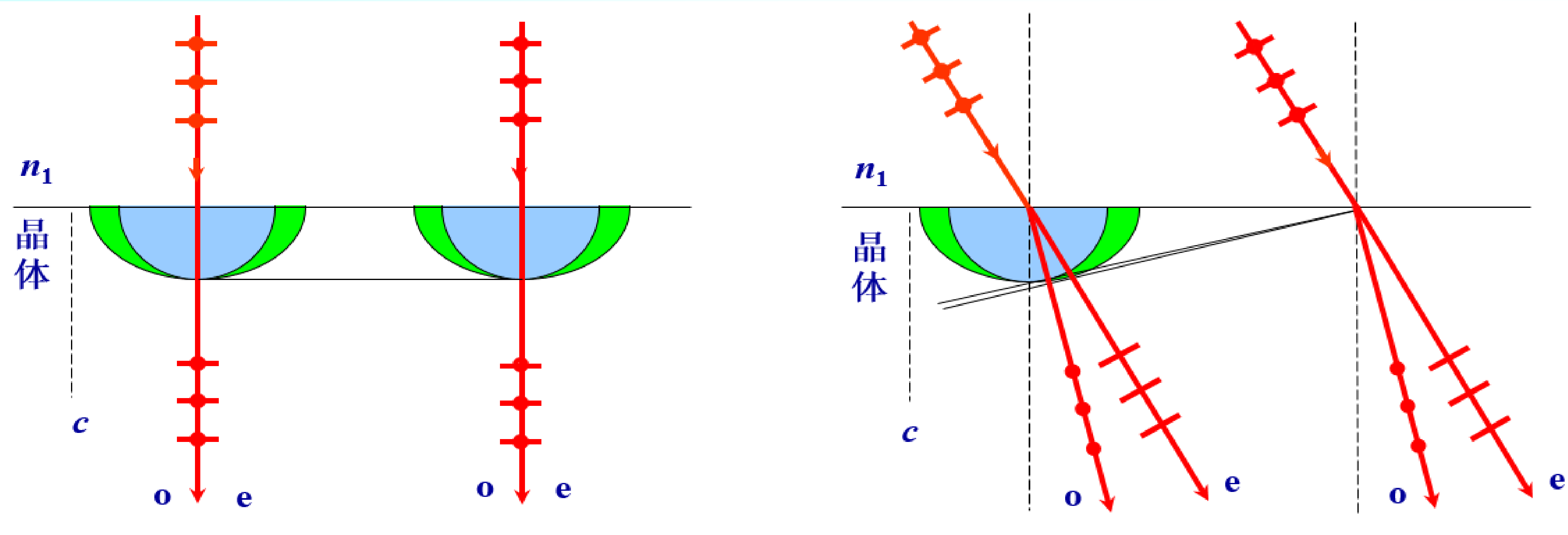


结论：主截面与入射面重合，*o*光和*e*光的主平面重合且振动方向垂直。

- 垂直入射时： *o*光和*e*光不分开，只是速度不同。
- 斜入射时： *o*光偏离*e*光， *e*光不满足主折射率的折射定律。

重要！

c) 光轴平行于入射面，且与界面垂直

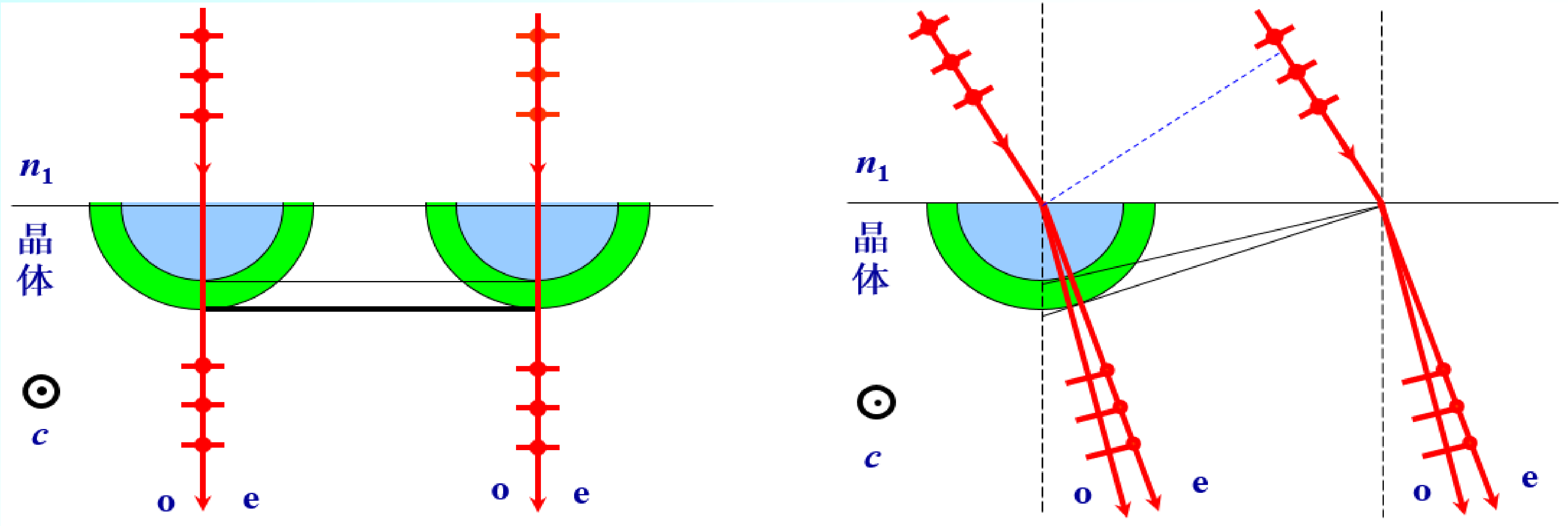


结论： 主截面与入射面重合，*o*光和*e*光的主平面重合且振动方向垂直。

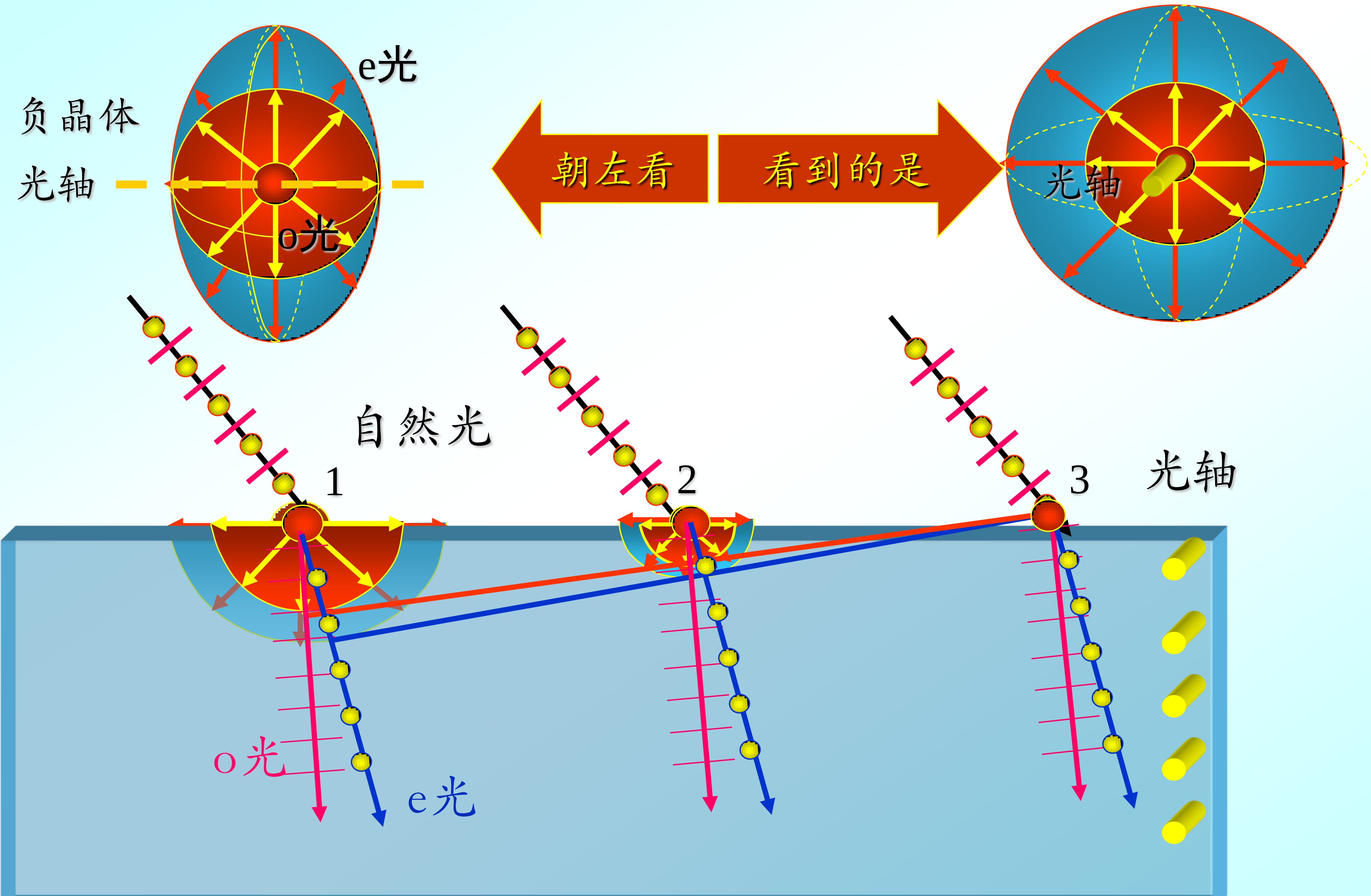
垂直入射时： *o*光和*e*光不分开，且速度相同。

斜入射时： *o*光偏离*e*光， *e*光不满足主折射率的折射定律。

d) 光轴垂直于入射面，且与界面平行（拓展情形）



结论： o光和e光与入射面的交线均为圆。主截面与入射面垂直。
垂直入射时：o光和e光不分开，但速度不同，因而产生的相位延迟不同，取决于各自的主折射率。
斜入射时：o光偏离e光， 分别按n_o与n_e折射分开，满足折射定律，主平面不重合，但振动方向正交。



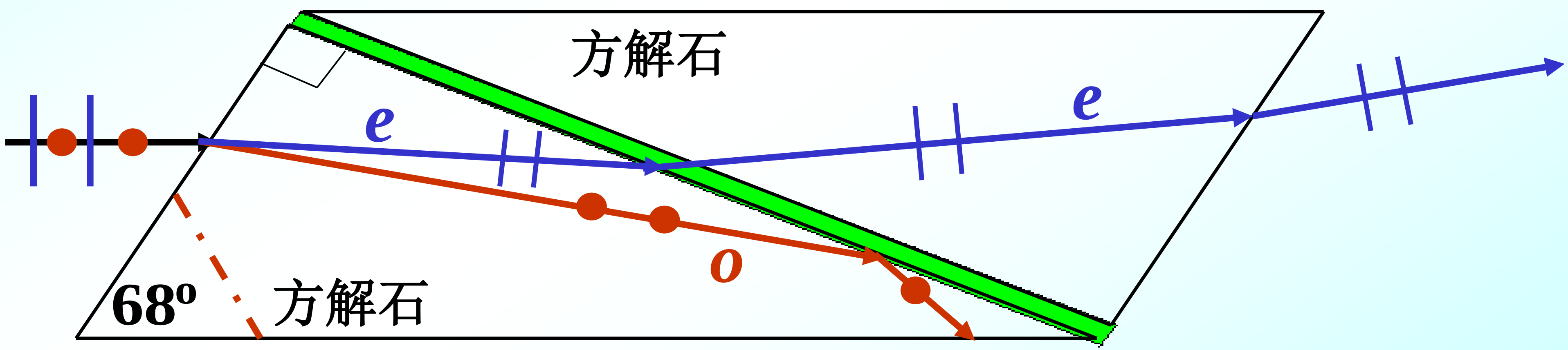
负晶体
光轴
e光
o光
朝左看
看到的是
光轴
自然光
1
2
3
光轴
o光
e光

4. 利用双折射获得线偏振光

- ◆ o光和e光均是线偏振光，如果设法把它们分开，就从自然光中获得了线偏振光。
- ◆ 常用的方法：把双折射晶体做成棱镜，自然光通过时，一束偏振光透过，另一束经全反射偏移到一边。

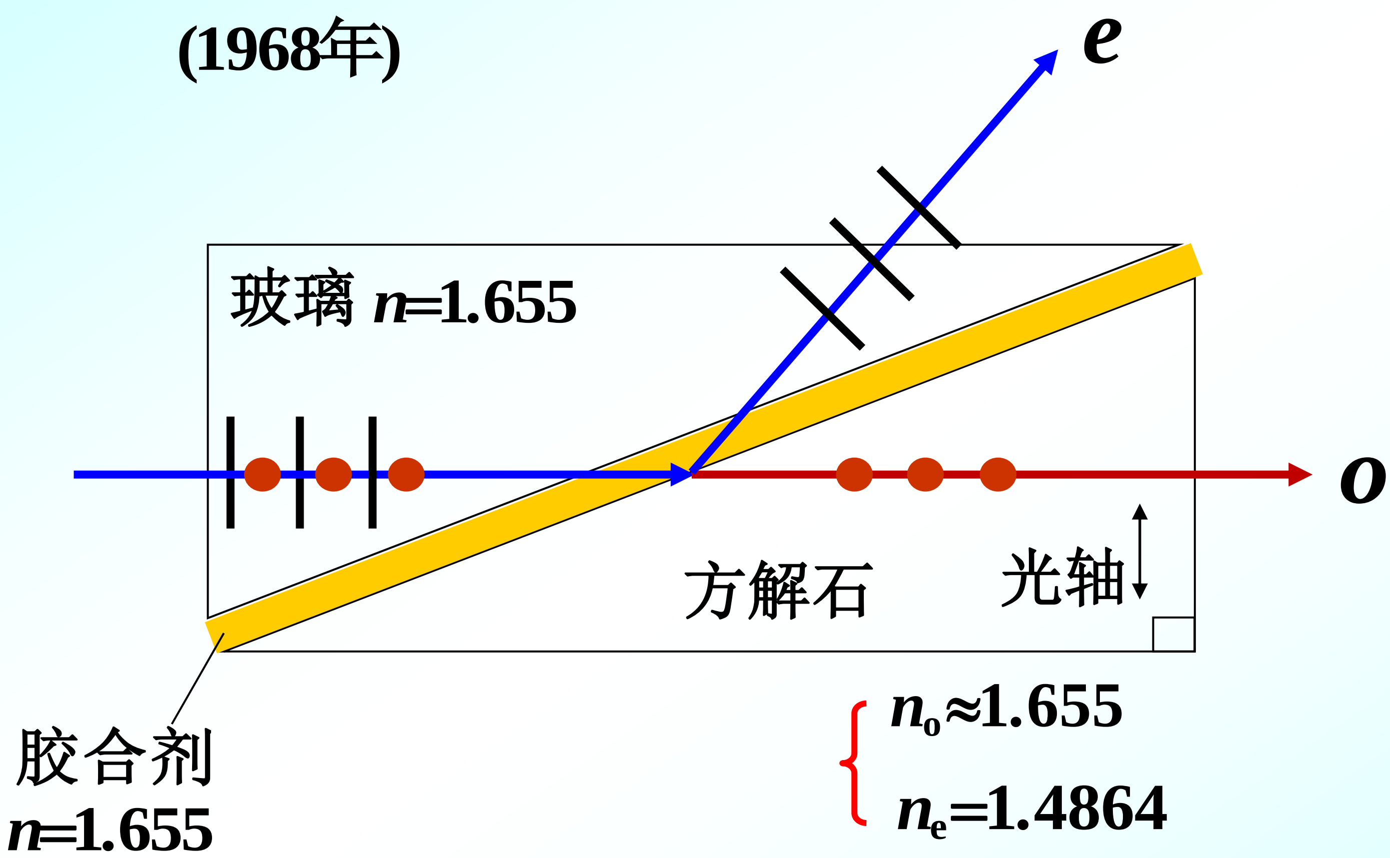
（1）尼科尔棱镜 （用方解石粘结而成, 出射*e*光）

(1828年)



方解石 $\begin{cases} n_o \Rightarrow 1.658 \\ n_e \Rightarrow 1.486 \end{cases}$ 加拿大树胶 $n = 1.55$

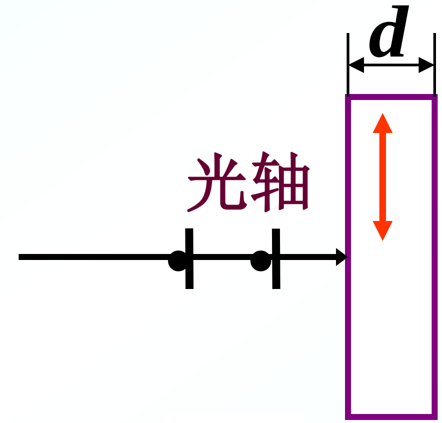
（2）格兰——汤普逊棱镜（出射 *o*光）
(1968年)



由材料的折射率的值可以看出，在胶合剂与方解石界面：

- o光沿原方向前进；
- *e*光由光密介质进入光疏介质，当入射角大于临界角时会发生全反射。

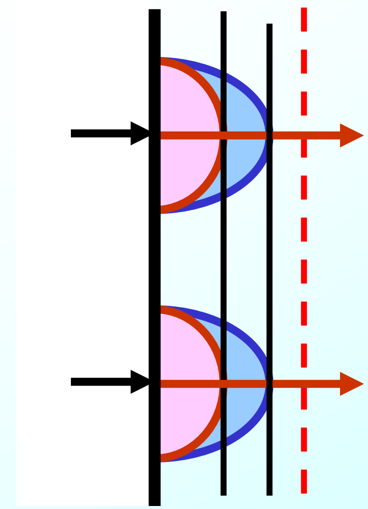
5. 波晶片——相位延迟片



波晶片是光轴平行表面的晶体薄片。

通过厚为d 的晶片，o、e光不可分开，但产生光程差：

$$\Delta r = l_o - l_e = (n_o - n_e)d$$



出射时位相改变：$\Delta\varphi = \dfrac{\Delta r}{\lambda} 2\pi = (n_o - n_e)\cdot d \cdot \dfrac{2\pi}{\lambda}$

可见：λ一定，适当选择 d 可使两分振动产生任意数值的位相差。

常用的几种波晶片

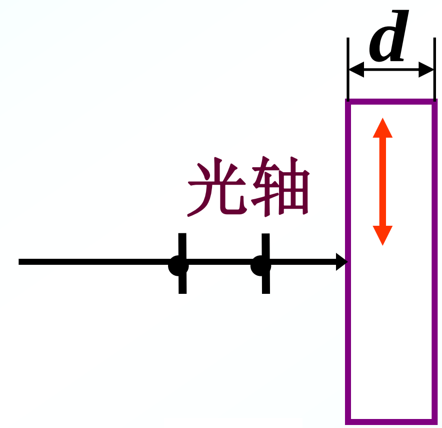
(1) 四分之一波片 $\quad |n_e - n_o|\cdot d = \dfrac{\lambda}{4} \rightarrow |\Delta\varphi| = \dfrac{\pi}{2}$

(2) 二分之一波片 $\quad |n_e - n_o|\cdot d = \dfrac{\lambda}{2} \rightarrow |\Delta\varphi| = \pi$

(3) 全波片 $\quad |n_e - n_o|\cdot d = \lambda \rightarrow |\Delta\varphi| = 2\pi$

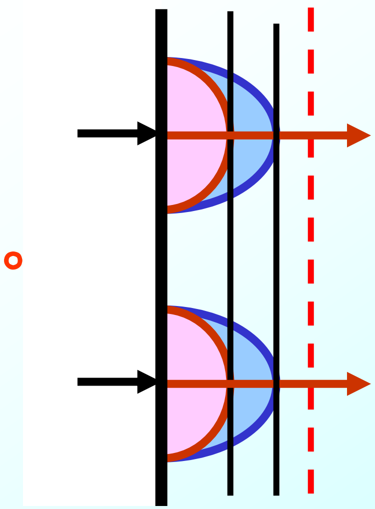
讨论

对 $\lambda/2$ 波片：晶片的厚度 d，使光程差为 $\lambda/2$



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

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



■ 线偏振光入射 $\lambda/2$ 波片时，出来 仍是线偏振光。

对 $\lambda/4$ 波片：晶片的厚度 d，使光程差为 $\lambda/4$

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

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

■ 线偏振光入射 $\lambda/4$ 波片时，出来是 (椭)圆偏振光。

$$\frac{x^2}{A_1^2}+\frac{y^2}{A_2^2}-\frac{2xy}{A_1A_2}\cos(\varphi_2-\varphi_1)=\sin^2(\varphi_2-\varphi_1)$$

● 两个互相垂直的谐振动的合成:

$$\begin{cases} x = A_1\cos(\omega t+\varphi_1) \\ y = A_2\cos(\omega t+\varphi_2) \end{cases}$$

$\Delta\varphi$ 任意, 合振动的轨迹为椭圆.

$$\begin{cases} \Delta\varphi \neq k\pi & \text{为椭圆} \quad k=0,1,2,\cdots \\ \Delta\varphi = (2k+1)\frac{\pi}{2} & \text{为正椭圆，} A_1{=}A_2 \text{为圆.} \\ \Delta\varphi = k\pi & \text{为直线} \end{cases}$$

对光振动: $\begin{cases} E_x = E_1\cos(\omega t+\varphi_1) \\ E_y = E_2\cos(\omega t+\varphi_2) \end{cases}$ (振动方向互相垂直)

若$\Delta\varphi$恒定, 且 $(E_1{=}E_2)$

$\Delta\varphi \neq k\pi \Rightarrow$ 合振动为任一椭圆 $\begin{cases} \Delta\varphi = (2k+1)\frac{\pi}{2} & \text{正椭圆 (圆)} \\ \Delta\varphi = k\pi & \text{直线} \end{cases}$