

# 24. 偏振

24.1 光的偏振状态

24.2 线偏振光的获得与检验

24.3 反射和折射时光的偏振

24.4 由散射引起的光的偏振

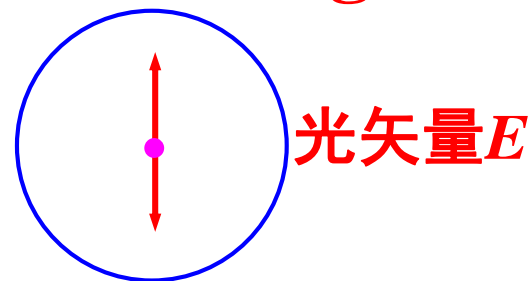
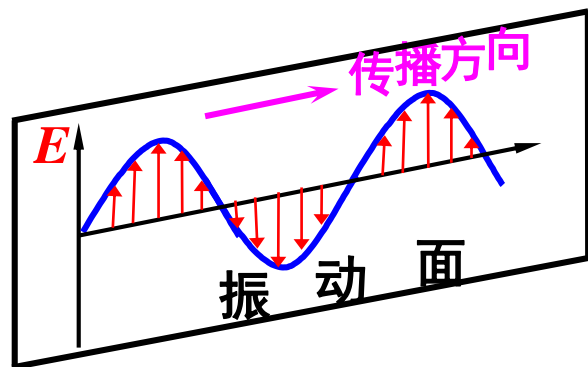
24.5 双折射现象

24.6 椭圆偏振光和圆偏振光

## 24.1 光的偏振状态 — 光矢量垂直于传播方向

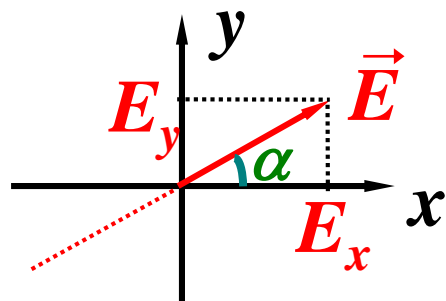
### 一、完全偏振光

#### 1、线偏振光 (linearly polarized light)



面对光的传播方向看

线偏振光可沿两个相互垂直的方向分解：

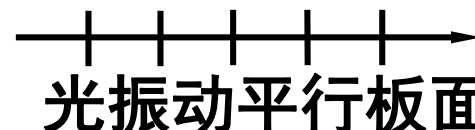


$$\begin{cases} E_x = E \cos \alpha \\ E_y = E \sin \alpha \end{cases}$$

线偏振光表示法：

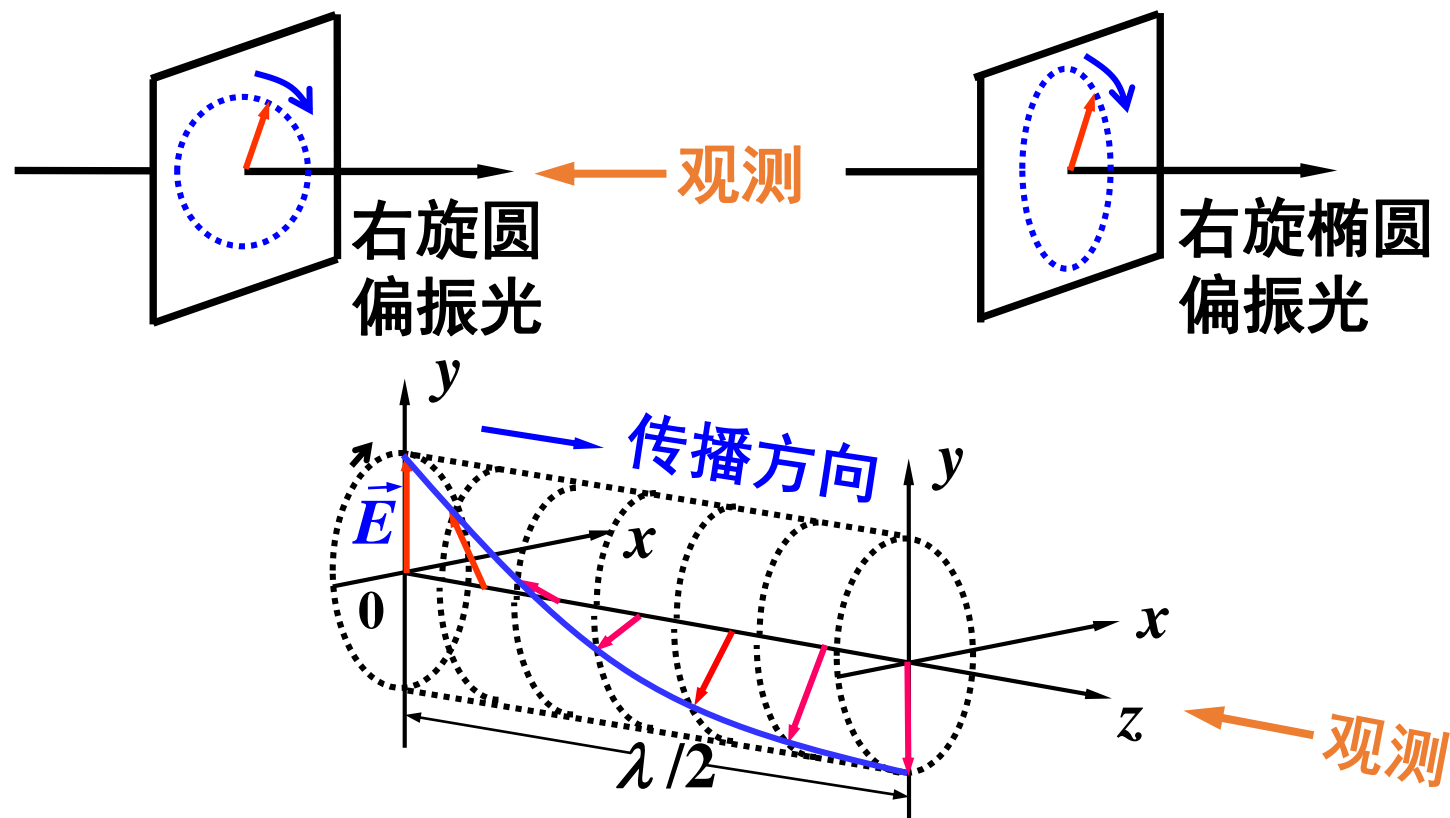


光振动垂直板面



光振动平行板面

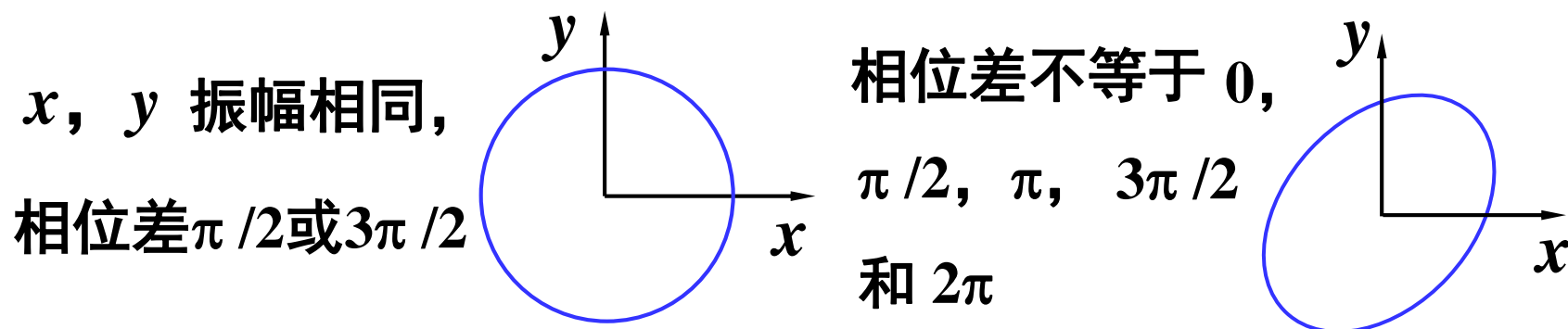
## 2、圆偏振光 (circularly polarized light) 椭圆偏振光 (elliptically polarized light)



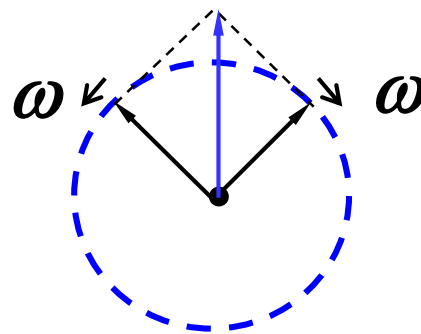
某时刻右旋圆偏振光  $\vec{E}$  随  $z$  的变化

线、圆和椭圆偏振光——完全偏振光

- **圆和椭圆偏振光**可看成是两束频率相同、传播方向一致、振动方向相互垂直、相位差为某个确定值的**线偏振光的合成**。



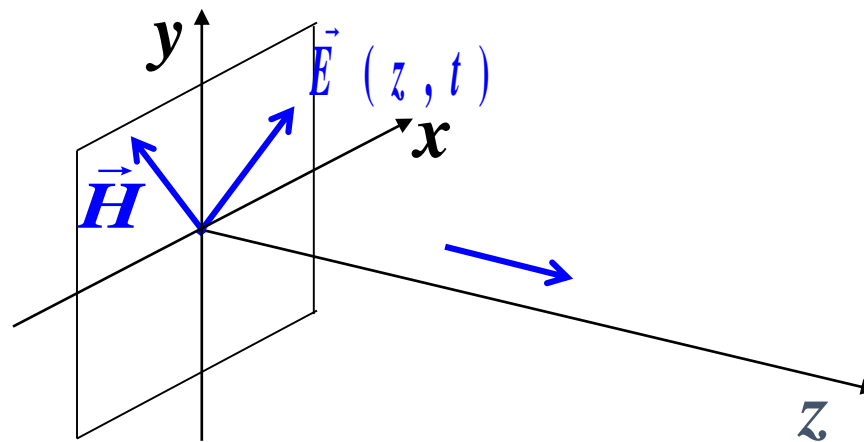
- **线偏振光**则看成是两束频率相同、相位相同、振幅相同、传播方向也相同的**左、右旋圆偏振光的合成**。



光是电磁波。

横波 — 偏振性

如果  $\vec{E}$  的方位是确定的，不随时间而变，就叫做 **线偏振光**。



**沿  $z$  方向传播的单色平面光波，光矢量  $\vec{E}$  只有  $x$  分量和  $y$  分量不为零，可写成**

$$\begin{cases} E_x(z, t) = A_x \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_y(z, t) = A_y \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{cases}$$

$$\Delta \varphi = \varphi_y - \varphi_x, \quad r = \frac{A_y}{A_x}$$

**$\Delta \varphi$  和  $r$  二参量决定偏振状态。参考：**

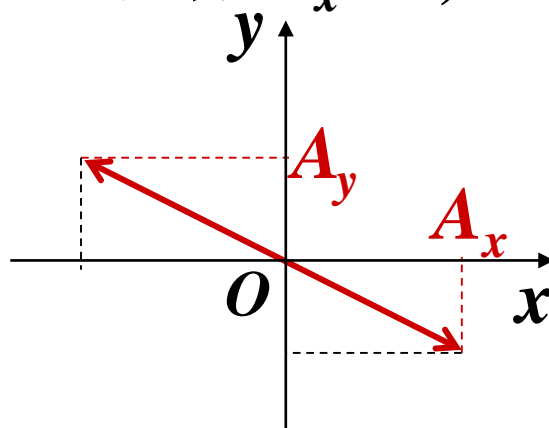
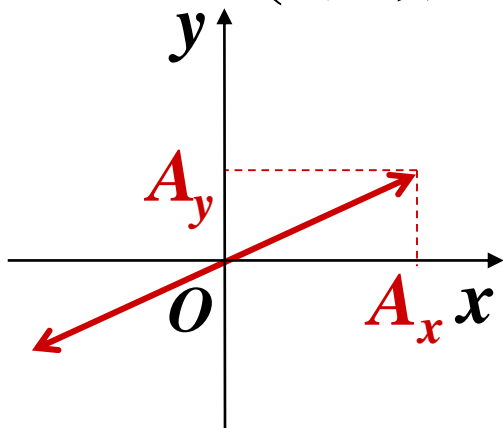
张三慧，大学物理学（力学、热学），第三版，A版，北京：清华大学出版社，2008

p. 204

# 三种 (完全)偏振态

(a) 线偏振,  $\Delta\varphi=0$  或  $\pi$  (或者  $r=0$ , 或者  $A_x=0$ )

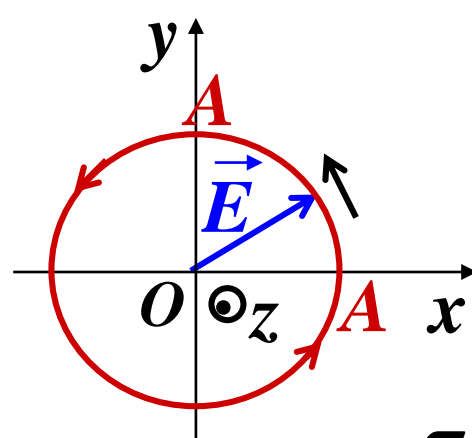
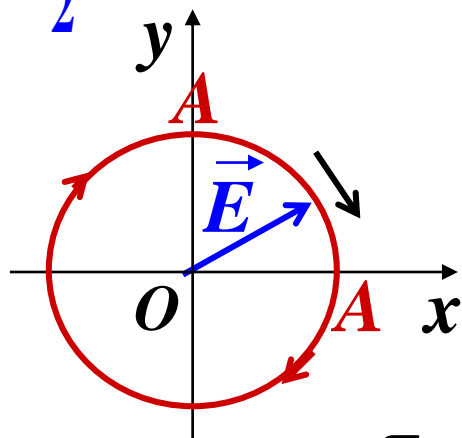
$$\frac{E_y}{E_x} = \pm \frac{A_y}{A_x} = \pm r$$



(b) 圆偏振,  $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$  且  $r=1$  (即  $A_y = A_x$ )

$$E_x^2 + E_y^2 = A^2$$

$\vec{E}$  矢端划圆



● 光学惯例：右旋,  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$   
对着  $z$  轴看(看光源)：顺时针

左旋,  $\Delta\varphi = -\frac{\pi}{2}$   
逆时针

这种“左、右旋”的叫法只用于光学。在讨论基本粒子或微波技术时是按手征来说，与这里的叫法相反。

(c) 椭圆偏振， $\Delta\varphi$ 有固定值，且前述情形除外。

$$\left( \begin{array}{l} \text{即: } A_x \neq 0, A_y \neq 0; \quad \Delta\varphi \neq 0, \pi \\ \text{并且 } A_x \neq A_y, \quad \text{或虽 } A_x = A_y \text{ 但 } \Delta\varphi \neq \pm \frac{\pi}{2} \end{array} \right)$$

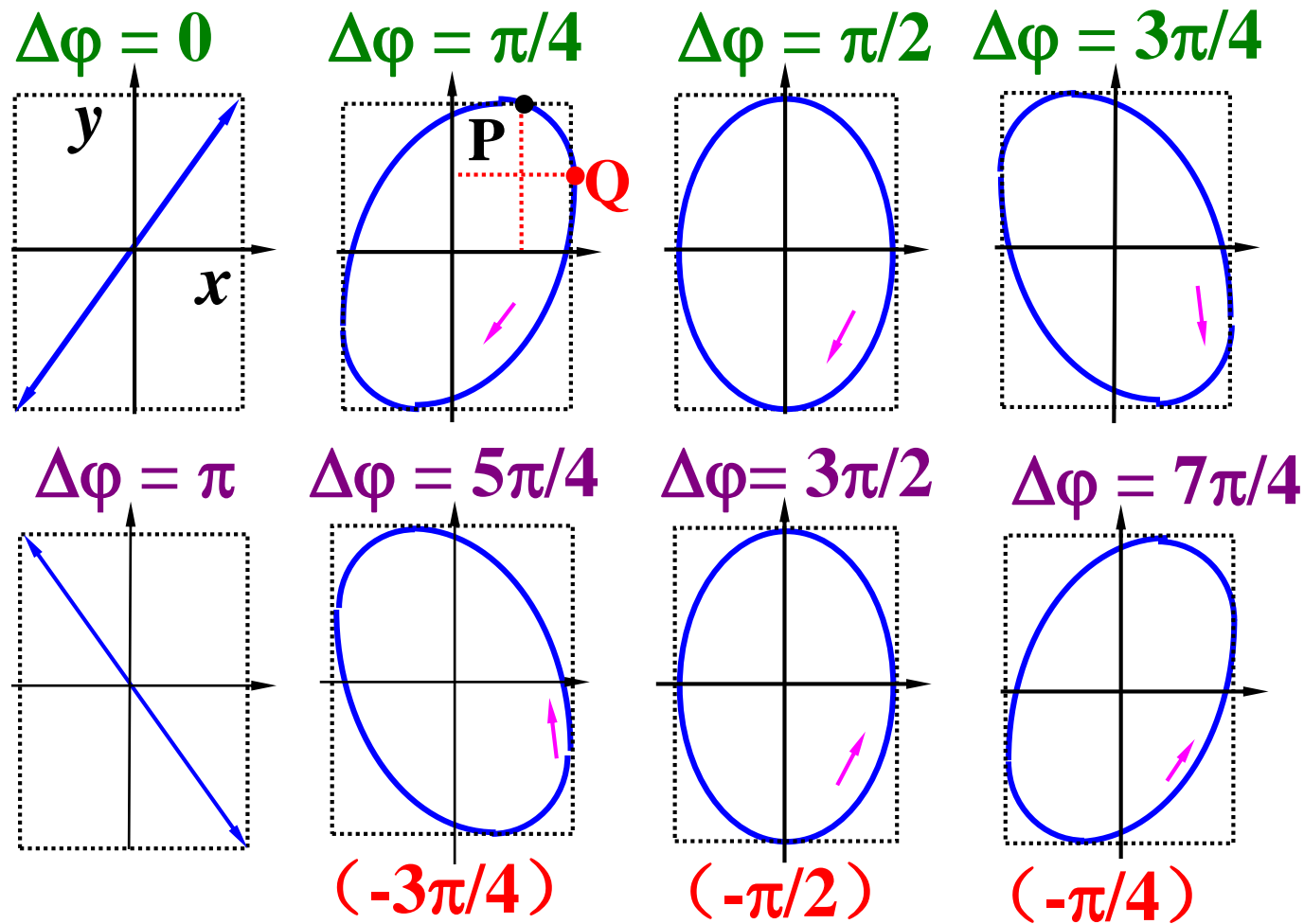
$\vec{E}$  的矢端划椭圆： $0 < \Delta\varphi < \pi$ ，右旋；  
 $-\pi < \Delta\varphi < 0$ ，左旋。

- 椭圆偏振 是一般情形，在特殊条件下退化为线偏振、圆偏振。

$\Delta\varphi$ 不同，椭圆形状、旋向也不同。

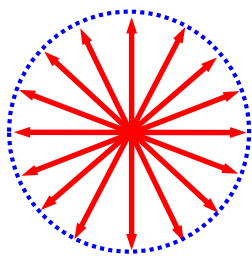
$\vec{E}$  的矢端划椭圆： $0 < \Delta\varphi < \pi$ ，右旋；

$-\pi < \Delta\varphi < 0$ ，左旋。

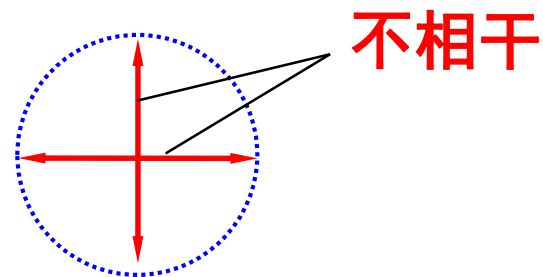




## 二、完全非偏振光—自然光 (natural light)



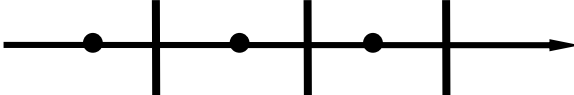
没有优势方向



自然光的分解

一束自然光可分解为两束振动方向相互垂直的、等幅的、不相干的线偏振光。

$$\overline{E}_x = \overline{E}_y \quad I = I_x + I_y = 2I_x$$

自然光的表示法: 

### 三、部分偏振光

( 介于完全偏振光和非偏振光之间 )

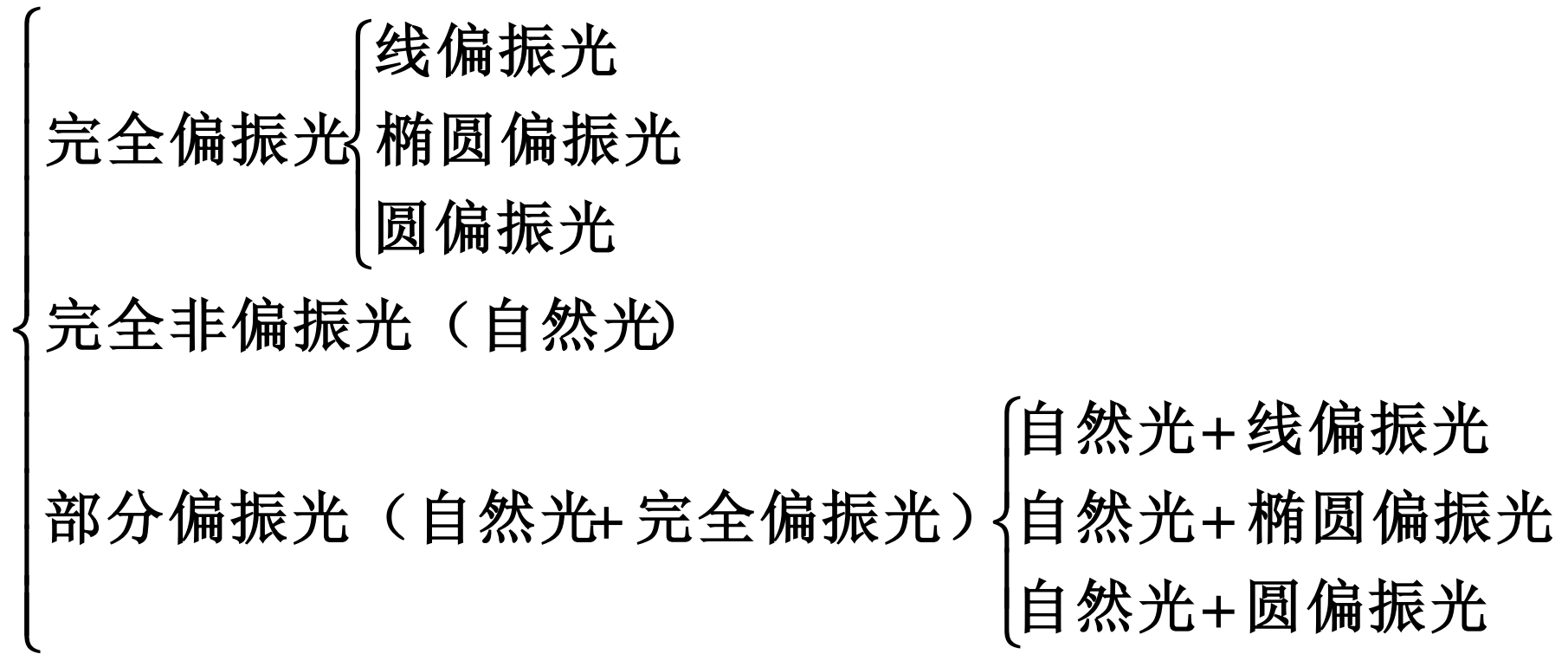
- 可以证明：任一束给定的准单色光，可以分解为一束自然光与一束完全偏振光（线偏振光、圆偏振光 或 椭圆偏振光）之和，且这种分解结果是唯一的。

$$I_{\text{总}} = I_{\text{自}} + I_{\text{偏}}$$

Max Born and Emil Wolf, **Principles of Optics**, 7th edition, Cambridge university press, p.626

“一般地，部分偏振光都可看成是自然光和线偏振光的混合。” **不对**。

# 光的偏振态的分类



光的偏振态除上述三类七种（论及左右旋，则为11种）外，再没有别的偏振态了。

## 四、偏振度 (degree of polarization)

定义：

$$P = \frac{I_p}{I_t} = \frac{I_p}{I_n + I_p}$$

$I_t$ ——部分偏振光的总强度

$I_p$ ——部分偏振光中包含的完全偏振光的强度

$I_n$ ——部分偏振光中包含的自然光的强度

完全偏振光 (线、圆、椭圆)  $P = 1$

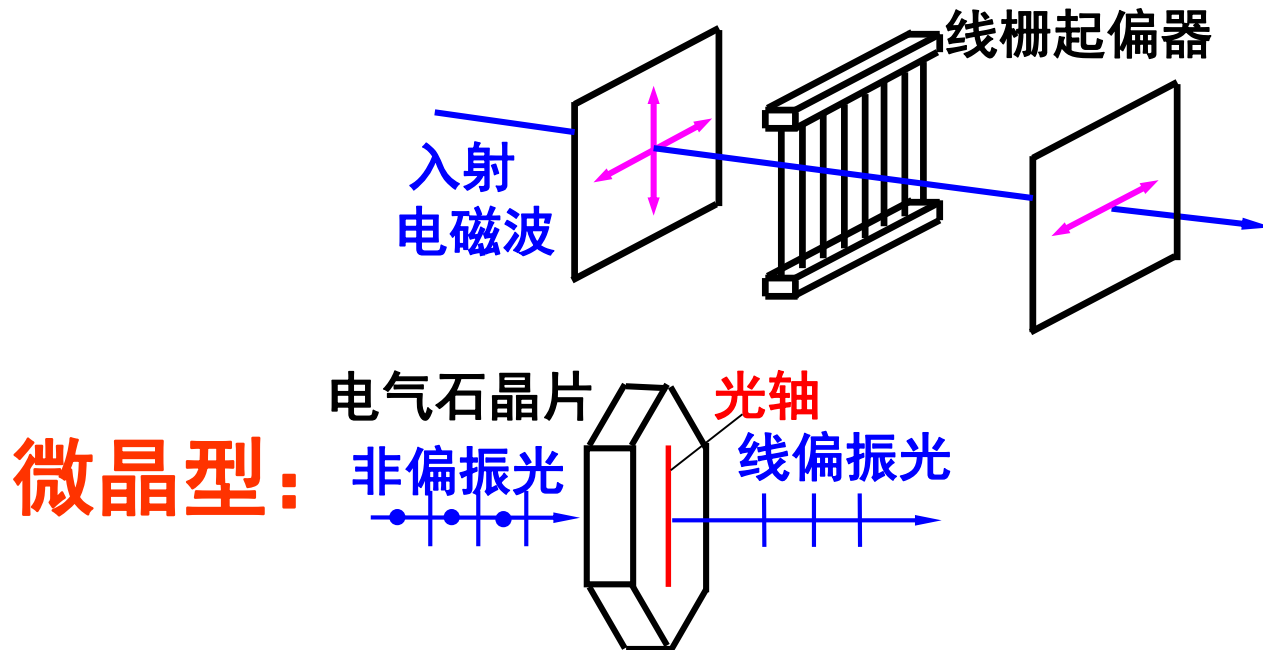
自然光 (非偏振光)  $P = 0$

部分偏振光  $0 < P < 1$

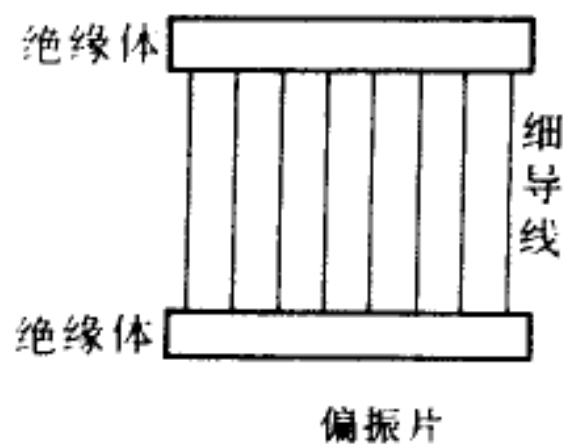
## 24.2 线偏振光的获得与检验

### 一、起偏：从自然光获得偏振光

- 起偏器（polarizer）：起偏的光学器件
- 起偏的原理：利用某种光学的不对称性
- 偏振片（Polaroid） $P$ （获得线偏振光）



为了检测偏振于指定方向的线偏振光,需要一种特殊的光学元件.这种元件应只能透过或反射指定偏振方向的线偏振光,叫做起偏器.最常用的起偏器就是偏振片.偏振片是 E. H. Land 在 1928 年发明的.他把针状



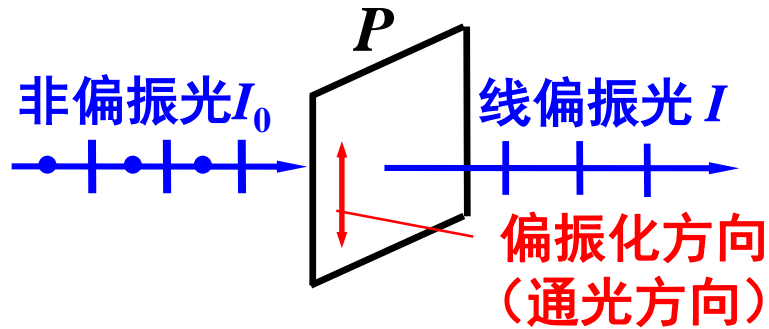
晶粒的硫酸奎宁,蒸镀到透明的赛璐璐基片上,通过拉伸使晶粒排列整齐,就成为偏振片.在市场上叫做 J 偏振片.这些细长的分子链中有自由电子,犹如平行细导线组成的栅网一样.

在入射波的电场平行于导线时,必激励出导线中的传导电流,其效果是使入射波被吸收和反射;若电场垂直于导线,则不会有显著的传导电流,因而入射波可以透过栅网.

如上所述,偏振片实际上是由各向异性物质组成,表现为对两个方向的线偏振光允许透过和强烈地吸收(或反射).这一对方向分别叫做通光方向(或偏振化方向)和消光方向.

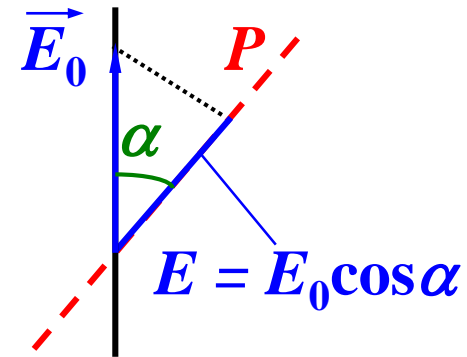
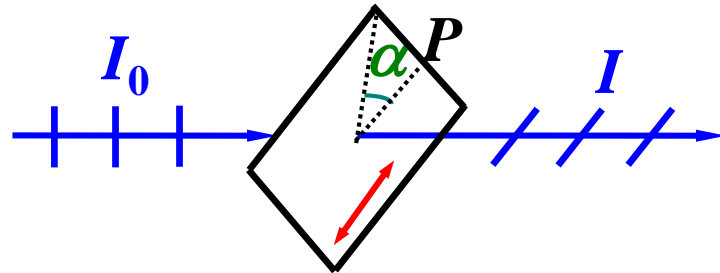
现在常用的偏振片是 H 偏振片. 把聚乙烯醇塑胶片加热并在一个方向拉伸, 使它的长分子排列整齐, 然后浸入碘溶液中. 碘分子会附着在直线状的长链聚合分子上, 形成一条碘分子链, 使碘的自由电子能沿长链运动, 犹如碘链是一条细长导线一样. H 偏振片只适用于可见光波段. 现在还有一种 HR 偏振片, 它是近红外偏振片.

## ● 线偏振光的起偏



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

## 二、马吕斯定律 (Malus law)



$$I_0 \propto E_0^2, \quad I \propto E^2 = E_0^2 \cos^2 \alpha$$

$I = I_0 \cos^2 \alpha$

 — 马吕斯定律 (1809)

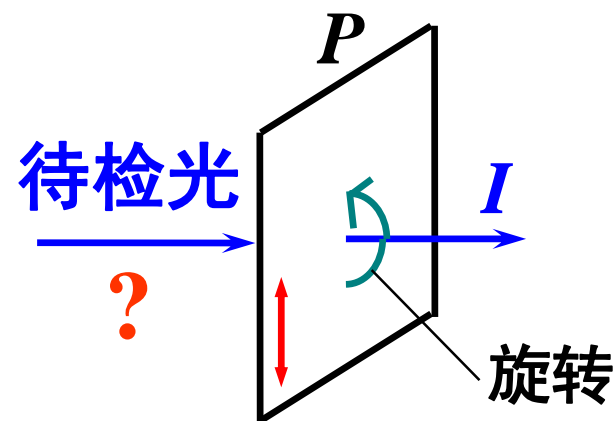
$$\alpha = 0, \quad I = I_{\max} = I_0, \quad \alpha = \frac{\pi}{2}, \quad I = 0 \quad \text{— 消光}$$



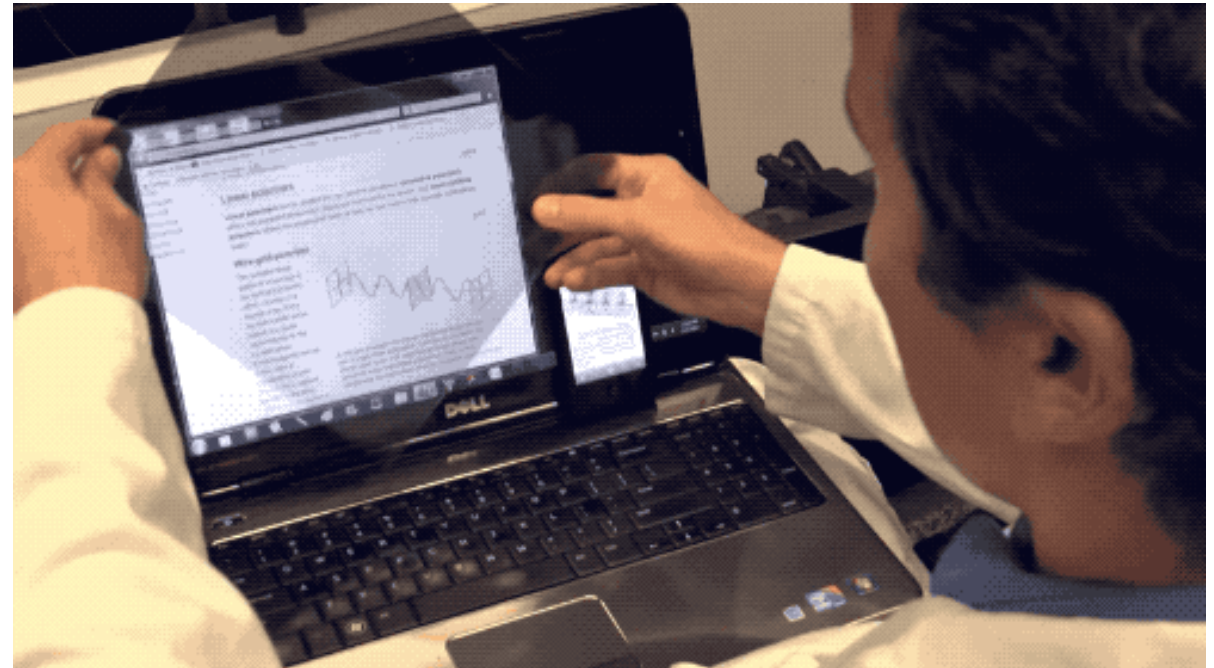
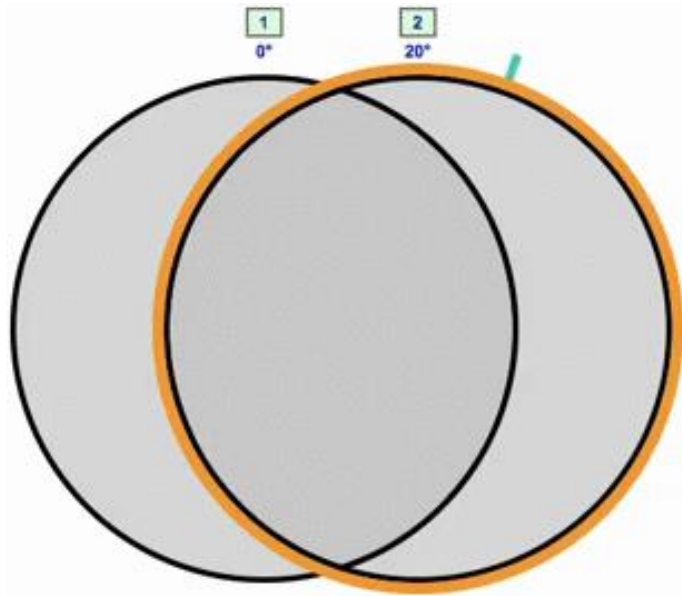
### 三、线偏振光的检偏

**检偏：**用偏振器件检验光的偏振态

设入射光可能是**自然光**或  
**线偏振光**或由线偏振光与自然  
光混合而成的**部分偏振光**



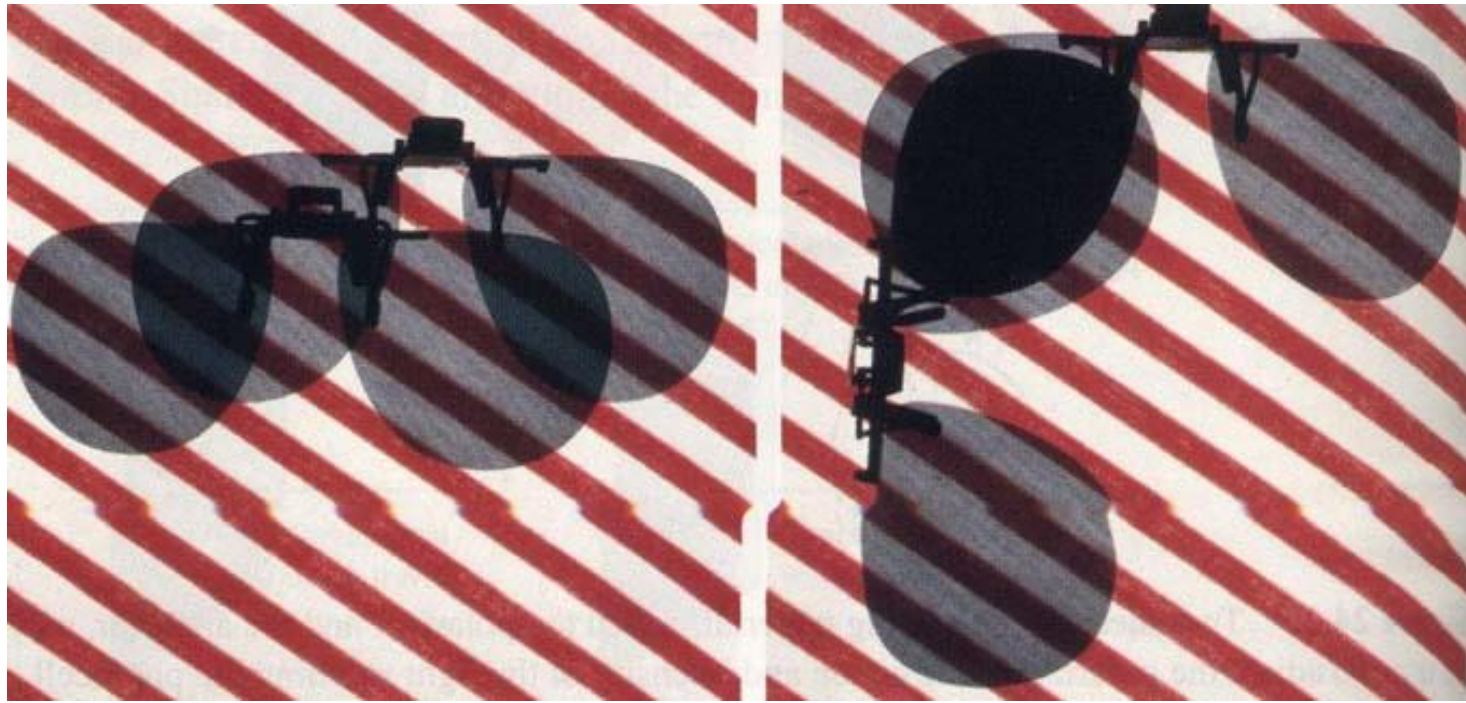
- 若  $I$  不变，是什么光？
- 若  $I$  变，有消光，是什么光？
- 若  $I$  变，无消光，是什么光？



## 四、偏振片的应用

偏振片的应用很多，例如：

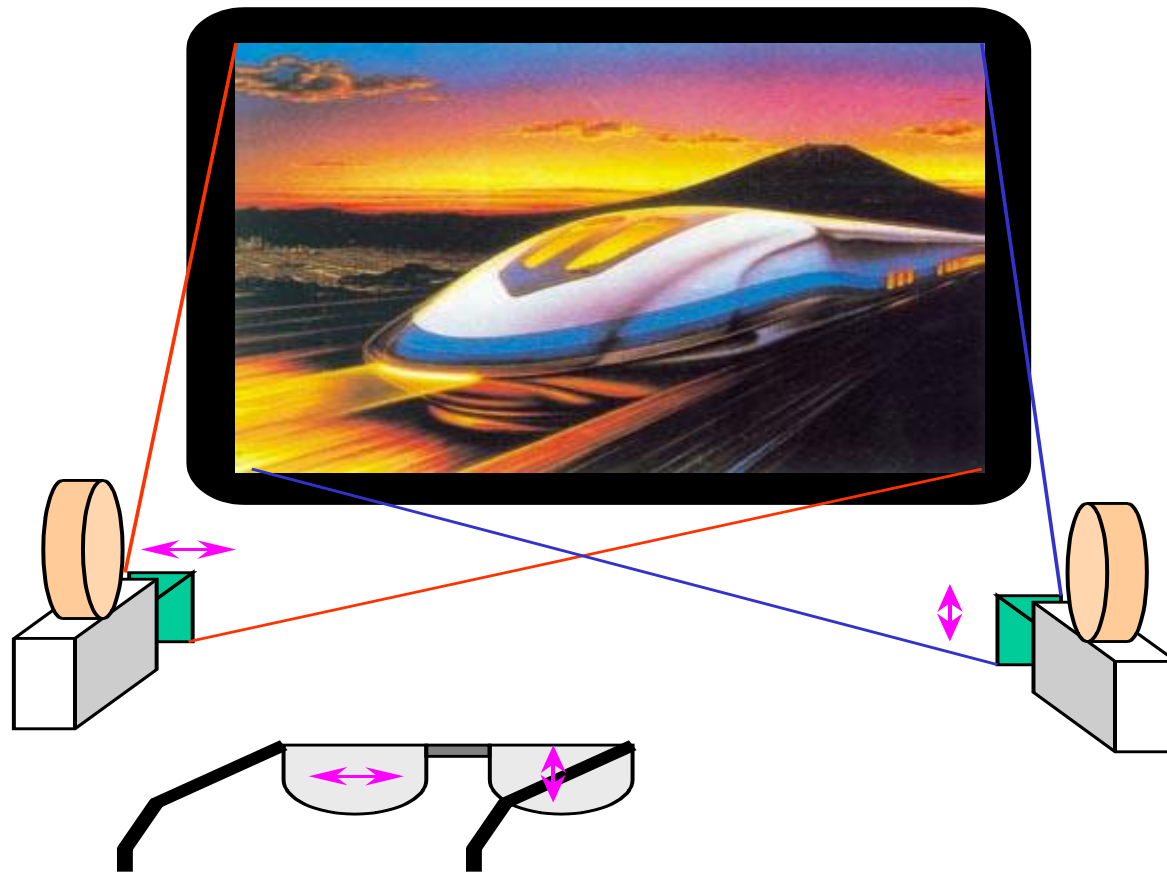
- 作为许多光学仪器中的起偏和检偏装置。
- 作为照相机的滤光镜，可以滤掉不必要的反射光。
- 制成偏光眼镜，可观看立体电影。



**When Polaroid sun-glasses are uncrossed, the transmitted light is dimmed due to the extra thickness of tinted plastic.**

**However, when they are crossed, the transmitted light is reduced to zero because of the effects of polarization.**

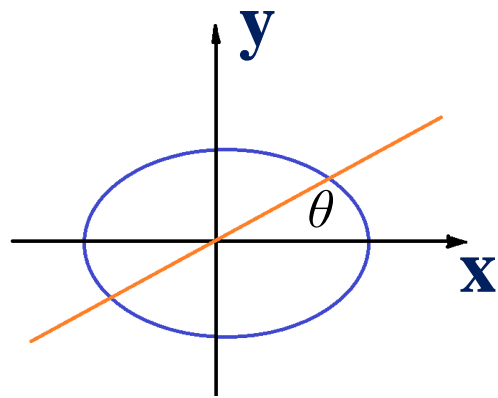
# 立体电影



**例24.1** 一偏振片正对着一束椭圆偏振光，当其透振方向沿x轴时，测得最大透射光强  $I_1$ ；当其透振方向沿y轴时，测得最小透射光强  $I_2$ 。求其透振方向与x轴的夹角为  $\theta$  时的透射光强。

**解：**  $E_x = \sqrt{I_1} \cos \omega t$

$$E_y = \sqrt{I_2} \cos \left( \omega t \pm \frac{\pi}{2} \right)$$



$$E_\theta = E_x \cos \theta + E_y \sin \theta$$

$$= \sqrt{I_1} \cos \theta \cos \omega t + \sqrt{I_2} \sin \theta \cos \left( \omega t \pm \frac{\pi}{2} \right)$$

$$I_\theta = I_1 \cos^2 \theta + I_2 \sin^2 \theta$$

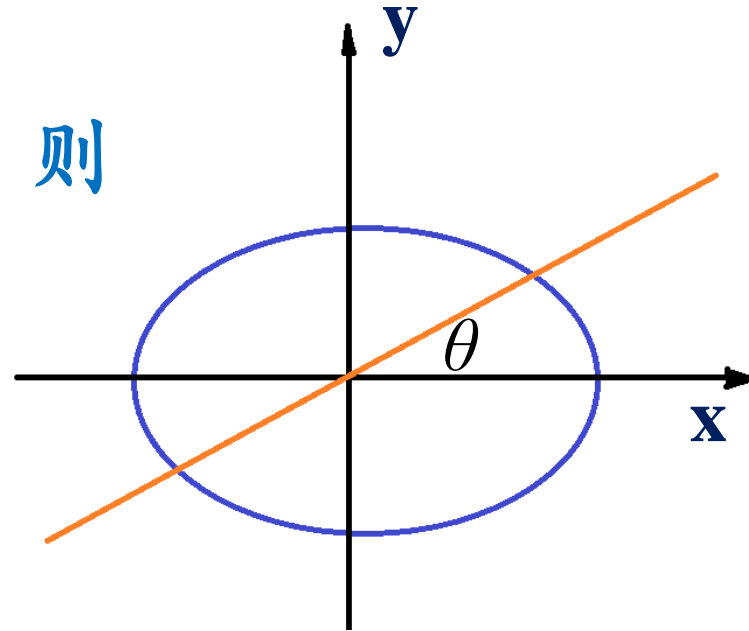
**例24.2** 一偏振片正对着一束自然光与椭圆偏振光的混合光，当其透振方向沿x轴时，测得最大透射光强  $1.5I_0$ ；当其透振方向沿y轴时，测得最小透射光强  $I_0$ 。求其透振方向与x轴的夹角为  $\theta$  时的透射光强。

**解：** 设自然光的光强为  $I_1$ ，则

$$1.5I_0 = \frac{1}{2} I_1 + A_x^2,$$

$$A_x^2 = 1.5I_0 - \frac{1}{2} I_1$$

$$I_0 = \frac{1}{2} I_1 + A_y^2, \quad A_y^2 = I_0 - \frac{1}{2} I_1$$

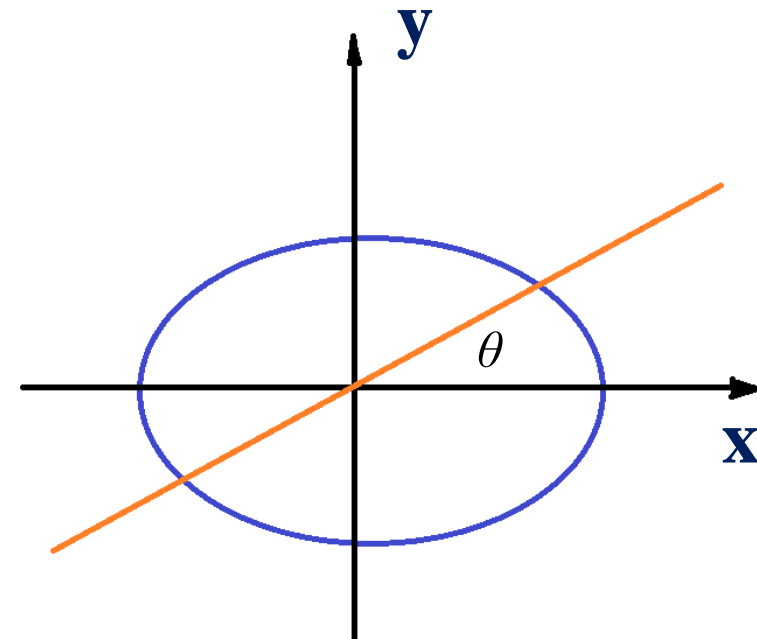




$$I_{\theta} = \frac{1}{2} I_1 + A_x^2 \cos^2 \theta + A_y^2 \sin^2 \theta$$

$$= \frac{1}{2} I_1 + \left( 1.5 I_0 - \frac{1}{2} I_1 \right) \cos^2 \theta + \left( I_0 - \frac{1}{2} I_1 \right) \sin^2 \theta$$

$$= I_0 \left( 1 + 0.5 \cos^2 \theta \right)$$





**24a结束**