光的偏振

偏振光的分类

偏振器件

偏振光的分类

- 沿z轴传播的单色波，光矢量只有x,y分量，

$$\vec{E}(t,\vec{r})=\begin{pmatrix}A_1\cos(\omega t-kz)\\A_2\cos(\omega t-kz+\Delta\phi)\end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}E_x/A_1\\E_y/A_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\alpha\\\cos\alpha\cos\Delta\phi-\sin\alpha\sin\Delta\phi\end{pmatrix}$$

解出$\cos\alpha$和$\sin\alpha$，求平方和，得方程

$$\frac{E_x^2}{A_1^2}+\frac{E_y^2}{A_2^2}-2\frac{E_xE_y}{A_1A_2}\cos\Delta\phi=\sin^2\Delta\phi$$

- 有三种情况

❶线偏振光：矢端在直线上振荡，

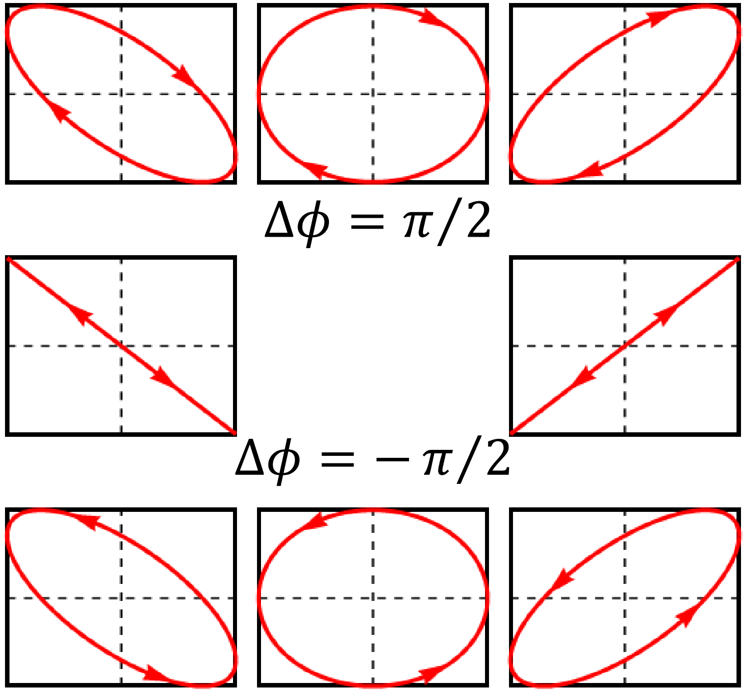
$$\sin\Delta\phi=0\Leftrightarrow\Delta\phi=0,\pm\pi$$

❷左旋椭圆偏振光、左旋圆偏振光：矢端逆时针旋转（迎着光线看），

$$\sin\Delta\phi<0\Leftrightarrow-\pi<\Delta\phi<0$$

❸右旋椭圆偏振光、右旋圆偏振光：矢端顺时针旋转，

$$\sin\Delta\phi>0\Leftrightarrow0<\Delta\phi<\pi$$



$\Delta\phi=3\pi/4$ 右旋

$\Delta\phi=\pi/4$ 右旋

$\Delta\phi=\pi/2$

$\Delta\phi=\pi$

$\Delta\phi=0$

$\Delta\phi=-\pi/2$

$\Delta\phi=-3\pi/4$ 左旋

$\Delta\phi=-\pi/4$ 左旋

左旋、右旋的判别：
固定空间坐标$z=0$

$$\vec{E}(t)=\begin{pmatrix}\cos(\omega t)\\\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)\end{pmatrix}$$

①$\omega t=0$时，$\vec{E}(t)=(1,0)$
② $\omega t=\frac{\pi}{2}$时，$\vec{E}(t)=(0,-1)$
③ $\omega t=\pi$时，$\vec{E}(t)=(-1,0)$
可见是顺时针旋转，右旋

偏振态的琼斯矢量

- 沿z-轴传播的平面单色波的光矢量

$$\vec{E}(t,\vec{r}) = \begin{pmatrix} A_1\cos(\omega t - kz + \phi_1) \\ A_2\cos(\omega t - kz + \phi_2) \end{pmatrix}$$

- 复波函数

$$\tilde{\vec{E}}(t,\vec{r}) = \begin{pmatrix} A_1\exp\{-i(\omega t - kz + \phi_1)\} \\ A_2\exp\{-i(\omega t - kz + \phi_2)\} \end{pmatrix}$$

- 复振幅

$$\tilde{\vec{E}}_0(\vec{r}) = \begin{pmatrix} A_1\exp\{i(kz - \phi_1)\} \\ A_2\exp\{i(kz - \phi_2)\} \end{pmatrix}$$

★★★任何偏振光均可分解为：

❶相互垂直的线偏振光之和（∵是2维矢量的完备基）

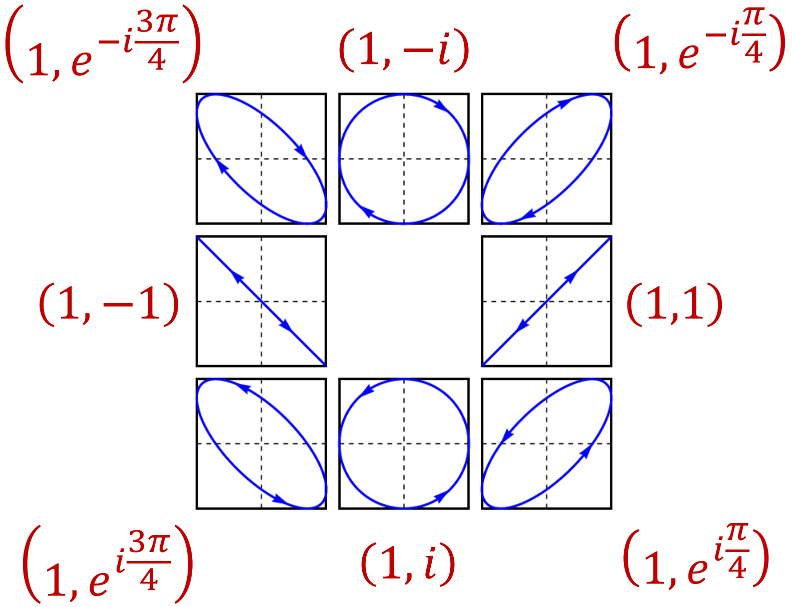
❷左旋圆偏振光和右旋圆偏振光之和（是完备基）

- 在固定点，

$$\tilde{\vec{E}}_0 \propto \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2\exp\{-i\Delta\phi\} \end{pmatrix}$$

$$\Delta\phi \overset{\text{def}}{=} \phi_2 - \phi_1$$

称为琼斯矢量



自然光和部分偏振光

- 自然光

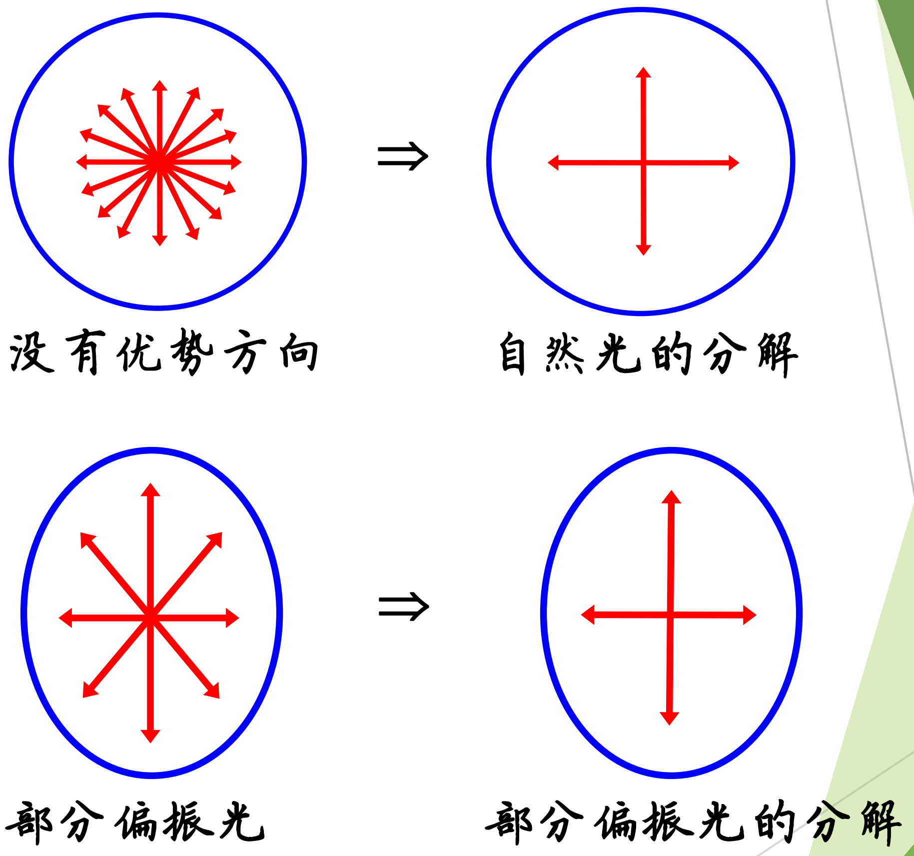
普通光源发光时，原子每次发出一个波列，持续时间约10^{-8}秒；各原子独立、随机地发光，光矢量的大小、振动方向和初位相是随机数。

大量的（平均说来）振幅相同、振动方向任意、彼此没有固定相位关系的光振动的组合叫作自然光。

- 部分偏振光

彼此无固定相位关系、振动方向任意、不同方向上振幅不同的大量光振动的组合，称部分偏振光。

它介于自然光与线偏振光之间。



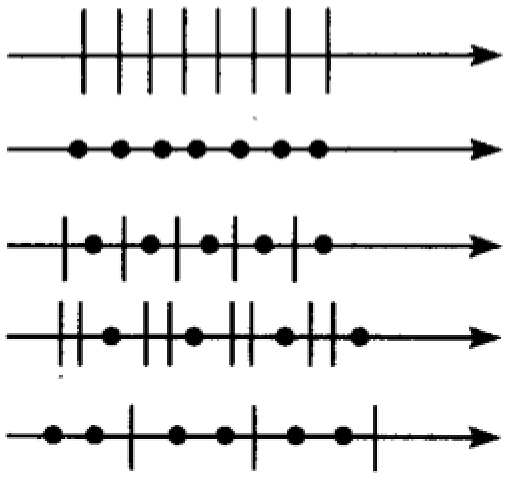
偏振度

- 各方向最大振幅和最小振幅对应的光强记为$I_{\max}$和$I_{\min}$
- 偏振度

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

$$0 \le P \le 1$$

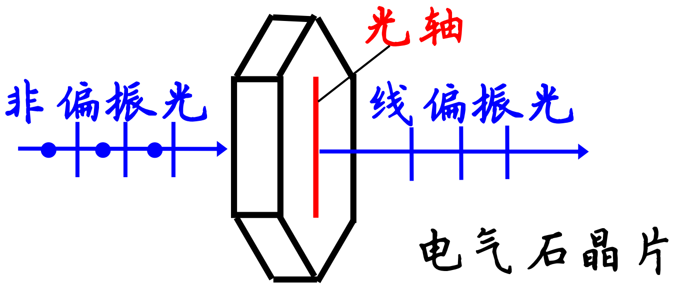
- 自然光$P = 0$
- 线偏振光$P = 1$

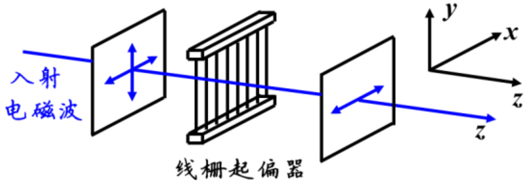


偏振状态的图示

起偏

- 从自然光获得偏振光叫“起偏”，相应的光学器件叫起偏器
- 起偏的原理：利用某种形式的不对称性，如物质的双折射和二向色性、反射和折射、散射
- 偏振片：由自然光获得线偏振光的平面片状器件





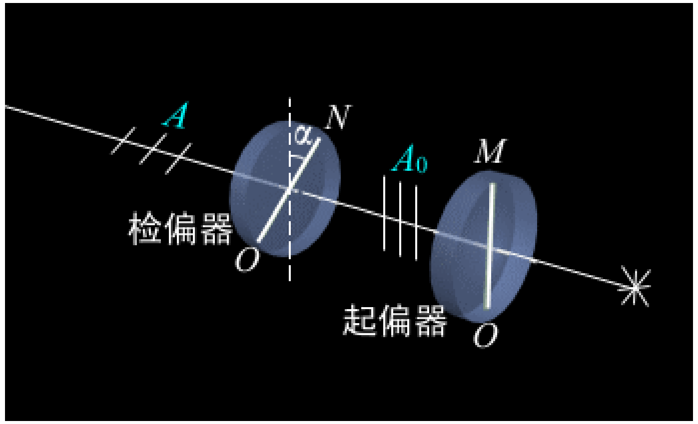
Edwin Herbert Land

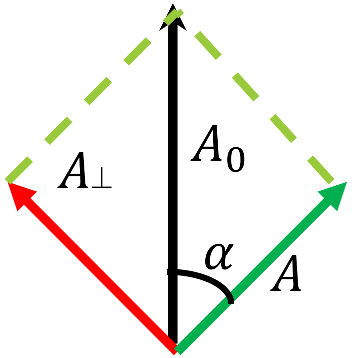
美国物理学家、发明家，宝丽来公司创始人、即显摄影（拍立得）和立体电影发明者

- 人造偏振片

将聚乙烯醇薄膜在碘溶液中浸泡后，加热并拉伸4—5倍，形成导电长链；透振方向垂直于拉伸的方向。

马吕斯定律





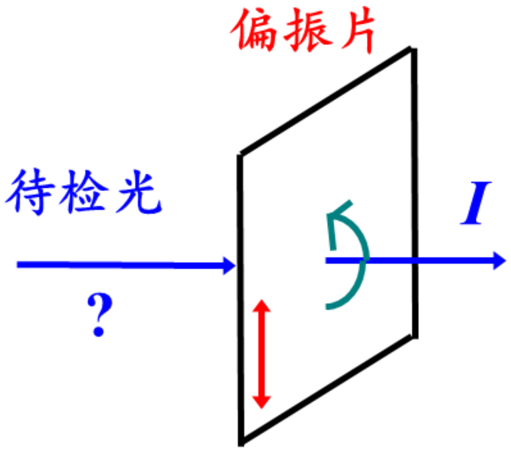
- 马吕斯定律

$$A = A_0 \cos\alpha$$
$$I = I_0 \cos^2\alpha$$

- 消光现象

$\alpha = 90°$时，$I = 0$

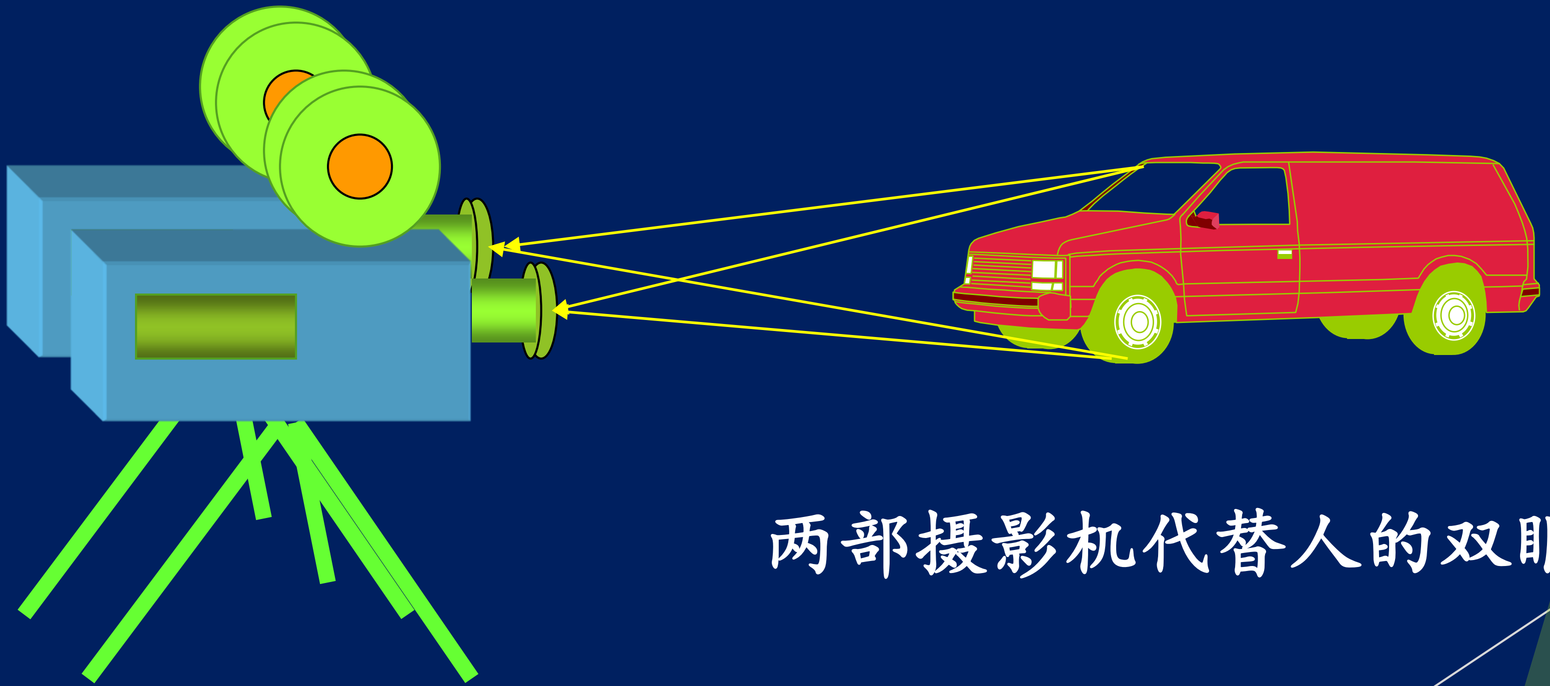
Etienne Louis Malus
1775-1812



旋转偏振片时，
自然光：光强不变
线偏振光：光强改变，有消光
部分偏振光：光强改变，无消光

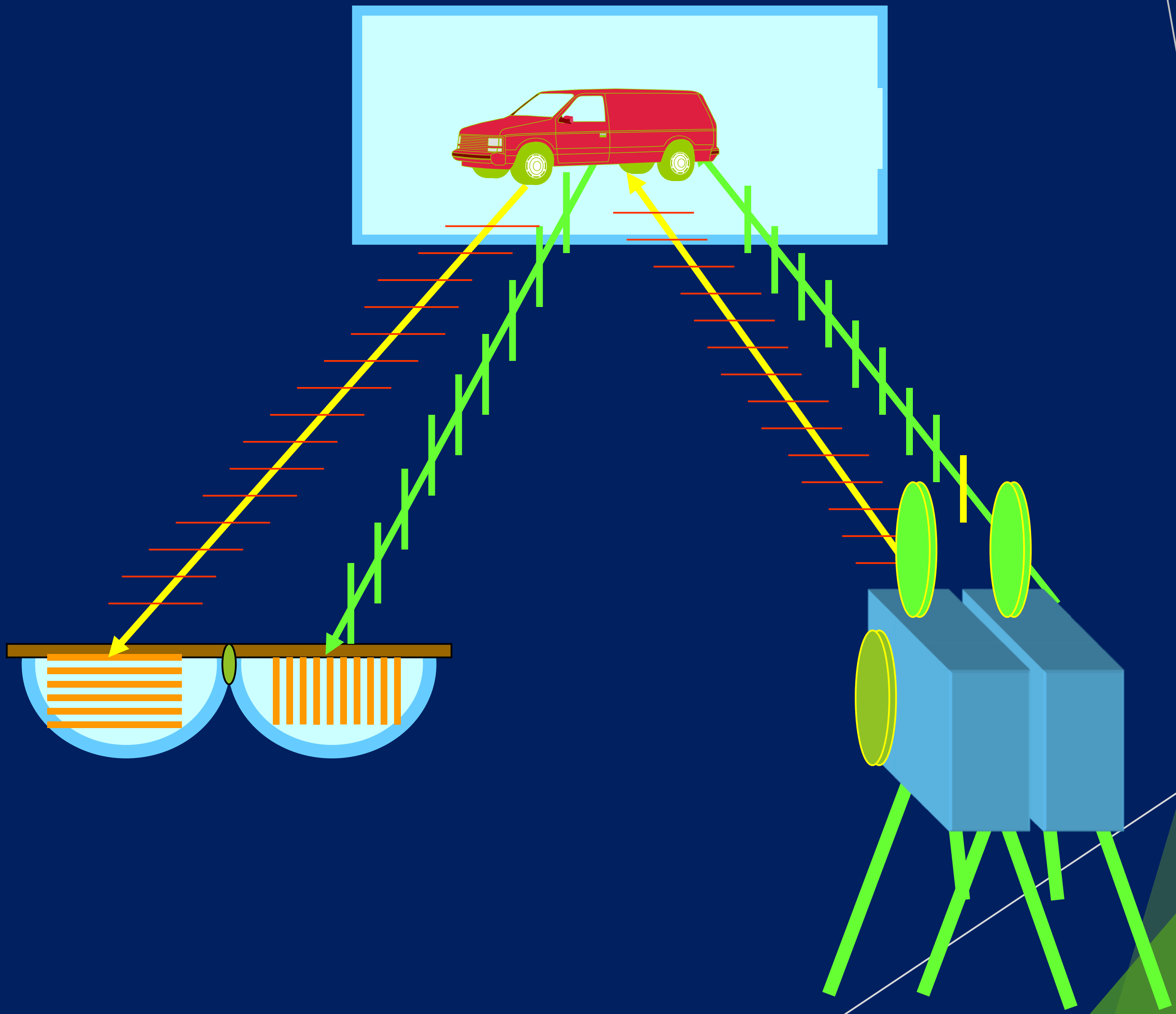
无法分辨自然光和圆偏振光、部分偏振光和椭圆偏振光。

拍摄立体电影



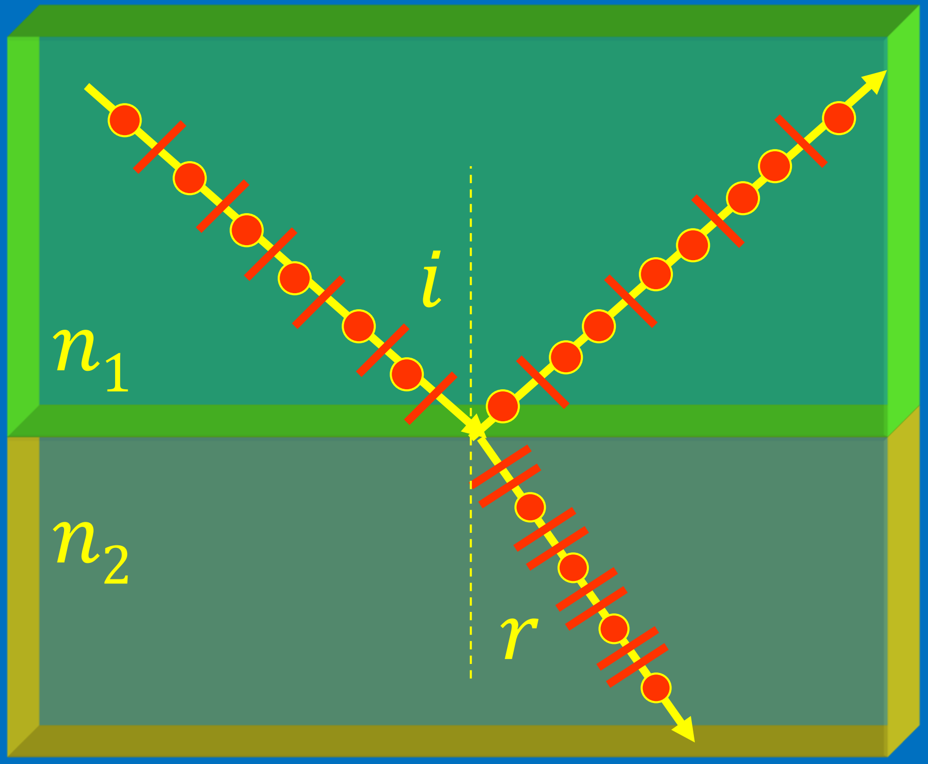
两部摄影机代替人的双眼

放立体电影



• 17:27:58

反射和折射时光的偏振



- 反射光中垂直入射面的分量比例大；
- 折射光中平行入射面的分量比例大。
- 反射光折射光偏振程度随入射角变化。

布儒斯特定律*

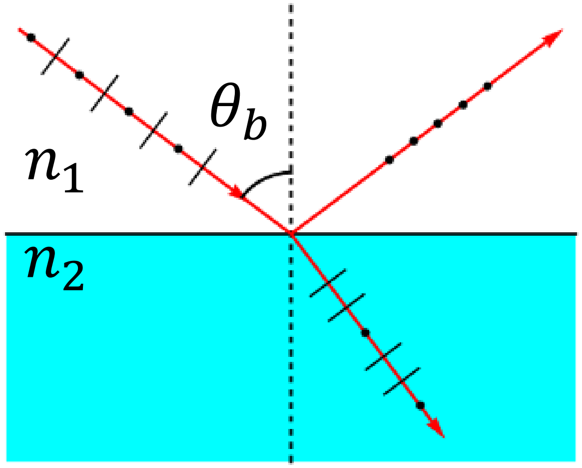
满足

$$\tan i_0 = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

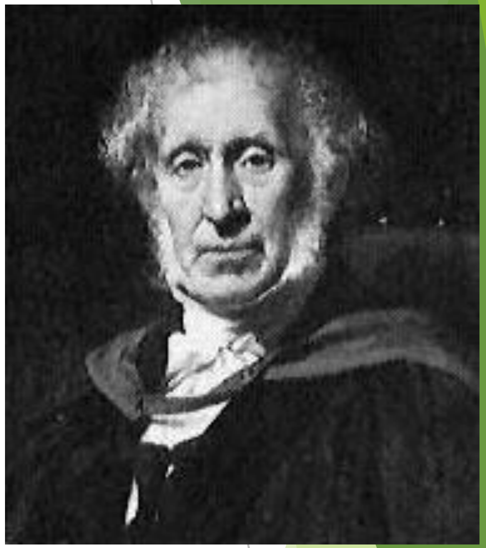
时，反射光为线偏振光。

（1811年，实验总结；可由电动力学推出）

此时反射光与折射光垂直



布儒斯特角显微镜



David Brewster

1781-1868

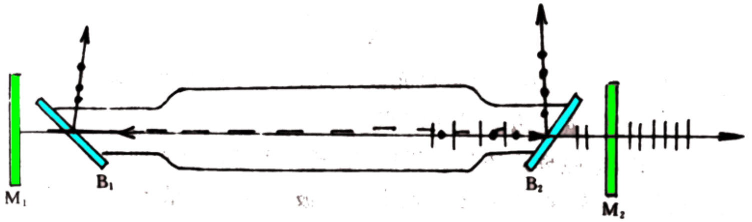
• 17:27:58

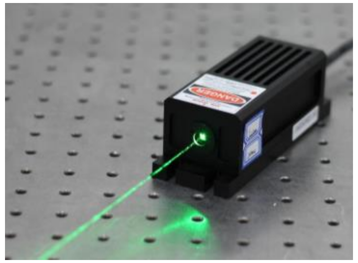
一些应用*

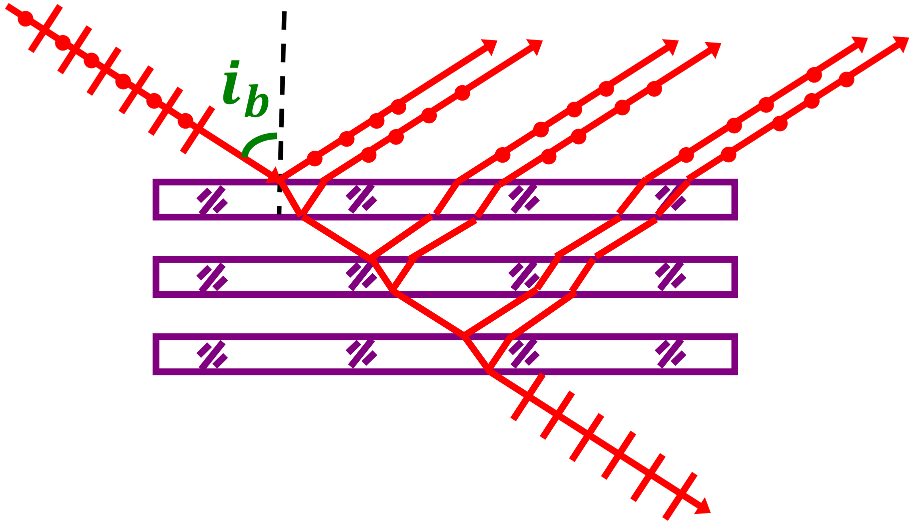
- 测量不透明介质的折射率：测出Brewster角，

$$n = n_{空气} \tan\theta_b$$

- 拍摄玻璃窗内的物体时，去掉反射光的干扰：侧拍，加偏振镜头。
- 玻璃片堆
- 产生线偏振的激光：

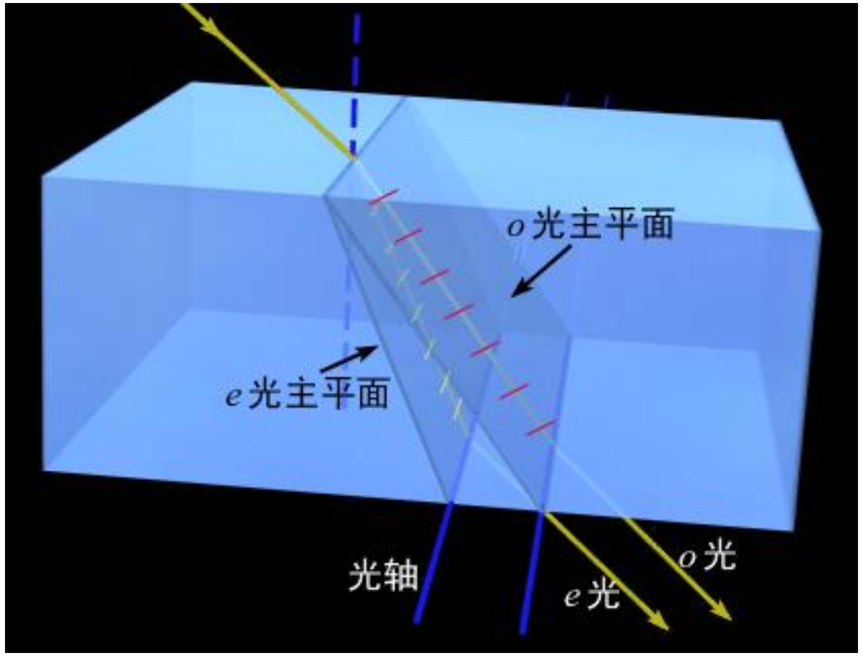






玻璃片堆可使透射光接近线偏振光

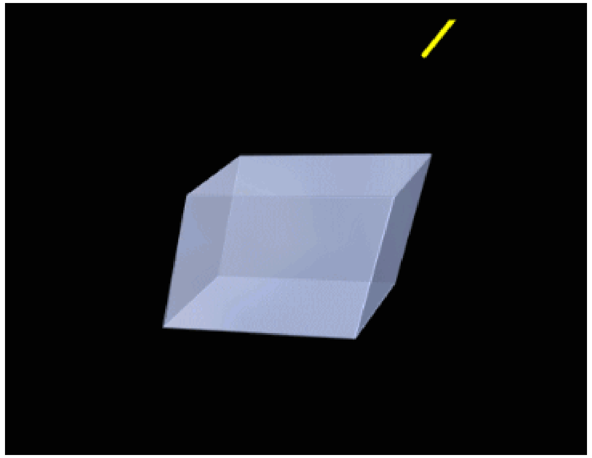
双折射现象




方解石

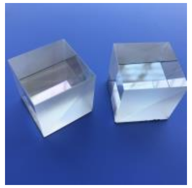

石英


红宝石



- 方解石、石英、红宝石等晶体是单轴晶体，自然光入射会发生双折射
- 光轴方向和垂直于光轴方向，光的传播速度不同
- 晶体中某条光线与晶体光轴构成的平面，称为该光线的主平面
- 寻常光（o光）振动⊥其主平面；
- 非寻常光（e光）振动在其主平面内

渥拉斯顿Wollaston棱镜（偏光分束镜）



◆ 光从棱镜1进入棱镜2时：

o光（点）变e光

光密→光疏

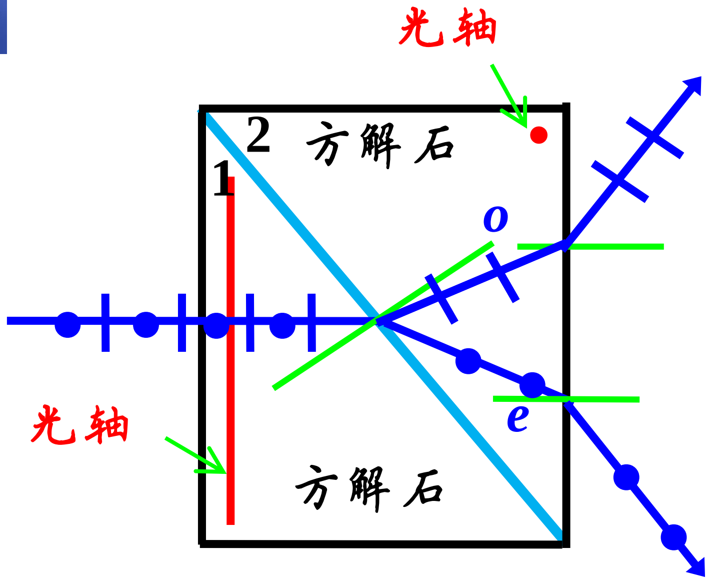
折射角＞入射角

e光（道）变o光

光疏→光密

折射角＜入射角

二者分开；



◆ 进入空气后，均是由光密→光疏，

∴可得到进一步分开的2束线偏振光。

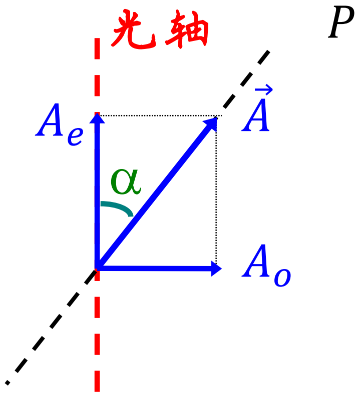
◆ 在量子信息实验中可用来检测光子偏振状态（不会像偏振片那样，垂直于透振方向的光子测不到）

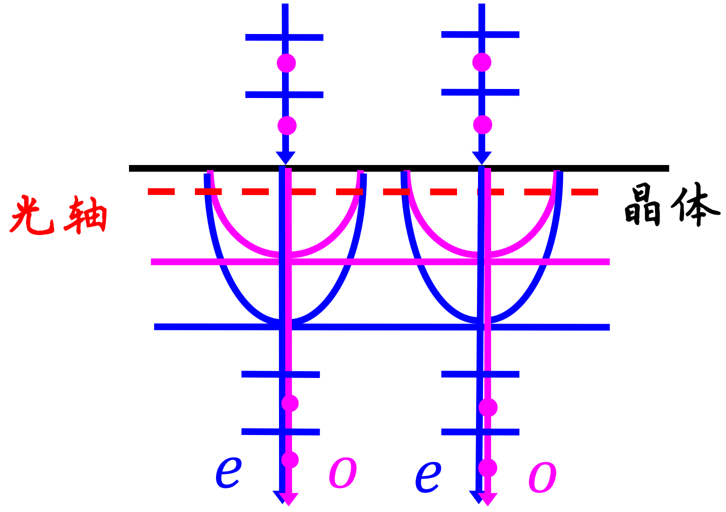
$$n_o(1.6584) > n(1.55) > n_e(1.4864)$$

波晶片 - 相位延迟片

波晶片：从单轴晶体上切下的平板，且光轴与表面平行。

用于操控光束的相位，或改变光子的极化状态



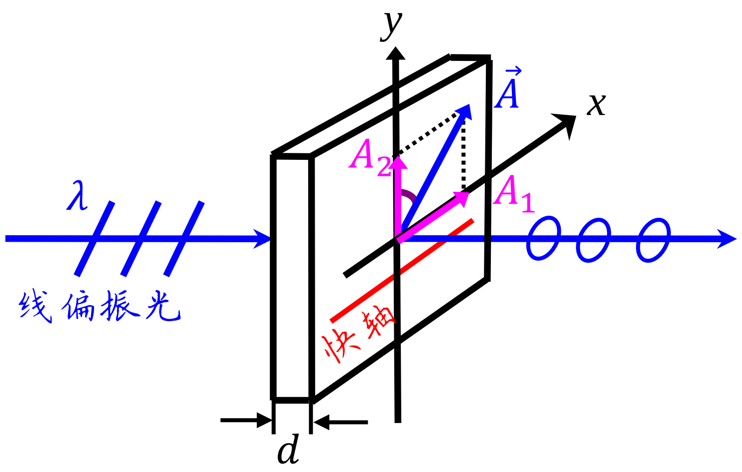


- 自然光入射后，分解为两束偏振光：
- 平行于光轴方向的o光，垂直于光轴方向e光,两者光速不同；
- 光速快的方向称为快轴，光速慢的方向称为慢轴
- 方解石等负晶体，快轴垂直于光轴

波晶片的琼斯矩阵

- 以快、慢轴为x、y轴
- 波晶片左侧的复振幅

$$\tilde{\vec{E}}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 e^{-i\Delta\phi} \end{pmatrix}$$



- 波晶片右侧的光矢量

$$\vec{E}(t,\vec{r}) = \begin{pmatrix} A_1 \cos\left(\omega t - \frac{\omega}{v_1} d\right) \\ A_2 \cos\left(\omega t - \frac{\omega}{v_2} d + \Delta\phi\right) \end{pmatrix}$$

- 波晶片右侧的复振幅

$$\tilde{\vec{E}}_{\text{out}} = \begin{pmatrix} A_1 e^{i\frac{\omega}{v_1}d} \\ A_2 e^{i\left(\frac{\omega}{v_2}d - \Delta\phi\right)} \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} A_1 e^{i\frac{\omega}{v_1}d} \\ A_2 e^{i\left(\frac{\omega}{v_2}d - \frac{\omega}{v_1}d - \Delta\phi\right)} \end{pmatrix}$$

- ¼波片

$$\frac{\omega}{v_2} d - \frac{\omega}{v_1} d = \frac{\pi}{2}, \qquad \tilde{\vec{E}}_{\text{out}} \propto \begin{pmatrix} \tilde{E}_1 \\ i\tilde{E}_2 \end{pmatrix}$$

- ½波片

$$\frac{\omega}{v_2} d - \frac{\omega}{v_1} d = \pi, \qquad \tilde{\vec{E}}_{\text{out}} \propto \begin{pmatrix} \tilde{E}_1 \\ -\tilde{E}_2 \end{pmatrix}$$

- ¼波片的琼斯矩阵（快轴沿x轴）

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{E}_{1,\text{out}} \\ \tilde{E}_{2,\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{E}_{1,\text{in}} \\ \tilde{E}_{2,\text{in}} \end{pmatrix}$$

- ¼波片的琼斯矩阵，快轴与x轴夹角为θ，

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}^{-1}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos^2\theta + i\sin^2\theta & (1-i)\sin\theta\cos\theta \\ (1-i)\sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta + i\cos^2\theta \end{pmatrix}$$

- ½波片的琼斯矩阵（快轴沿x轴）

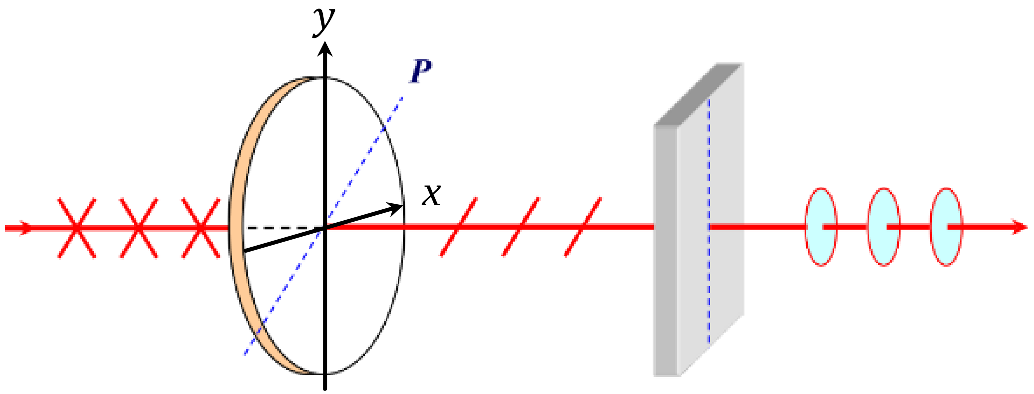
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{E}_{1,\text{out}} \\ \tilde{E}_{2,\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{E}_{1,\text{in}} \\ \tilde{E}_{2,\text{in}} \end{pmatrix}$$

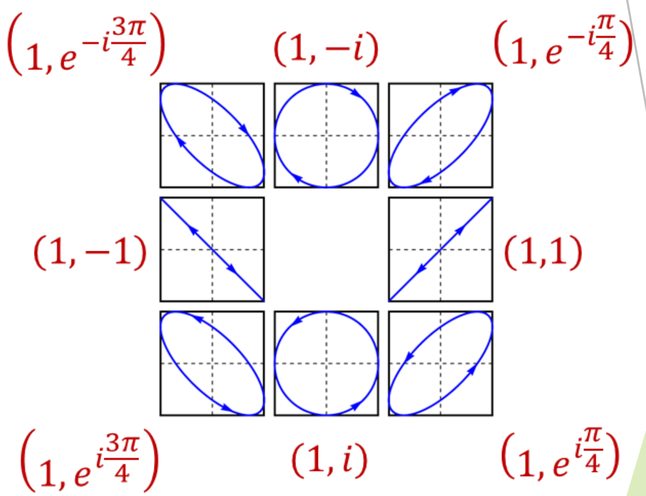
- 偏振片的琼斯矩阵（透振方向为x−轴）

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

¼波片用于起偏



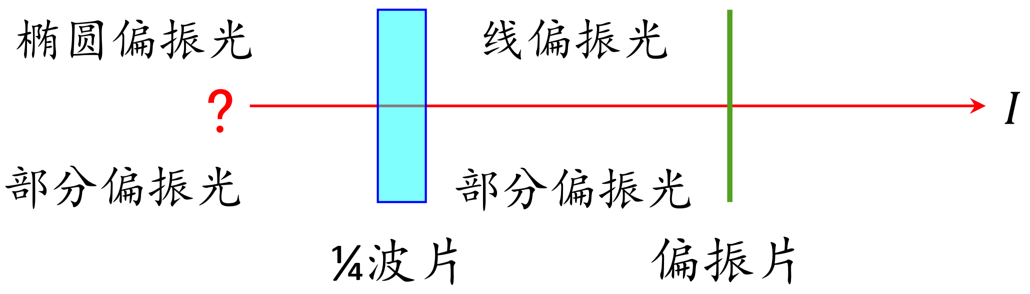
圆偏振光起偏器

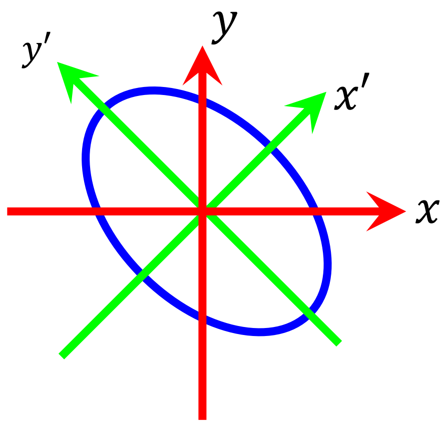


- 设偏振片把自然光过滤成偏振光，与x轴夹角为45°，琼斯矢量是
$$\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}$$
- ¼波片的快轴沿y轴，琼斯矩阵为
$$\begin{pmatrix}i & 0\\0 & 1\end{pmatrix}$$
- 出射光的琼斯矢量为
$$\begin{pmatrix}i & 0\\0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}i\\1\end{pmatrix}=i\begin{pmatrix}1\\-i\end{pmatrix}$$
- 由右图知，出射光是右旋圆偏振光

17:28:01

¼波片用于检偏





通过坐标旋转，得到了标准椭圆方程

$$\boxed{\frac{{E'_x}^2}{{E'_{x0}}^2}+\frac{{E'_y}^2}{{E'_{y0}}^2}=1}$$

① 使入射光通过偏振片，旋转偏振片找到光强最小的方向

② 在偏振片前放置¼波片，快轴取光强最小方向

③ 如果入射光是椭圆偏振光，通过¼波片后

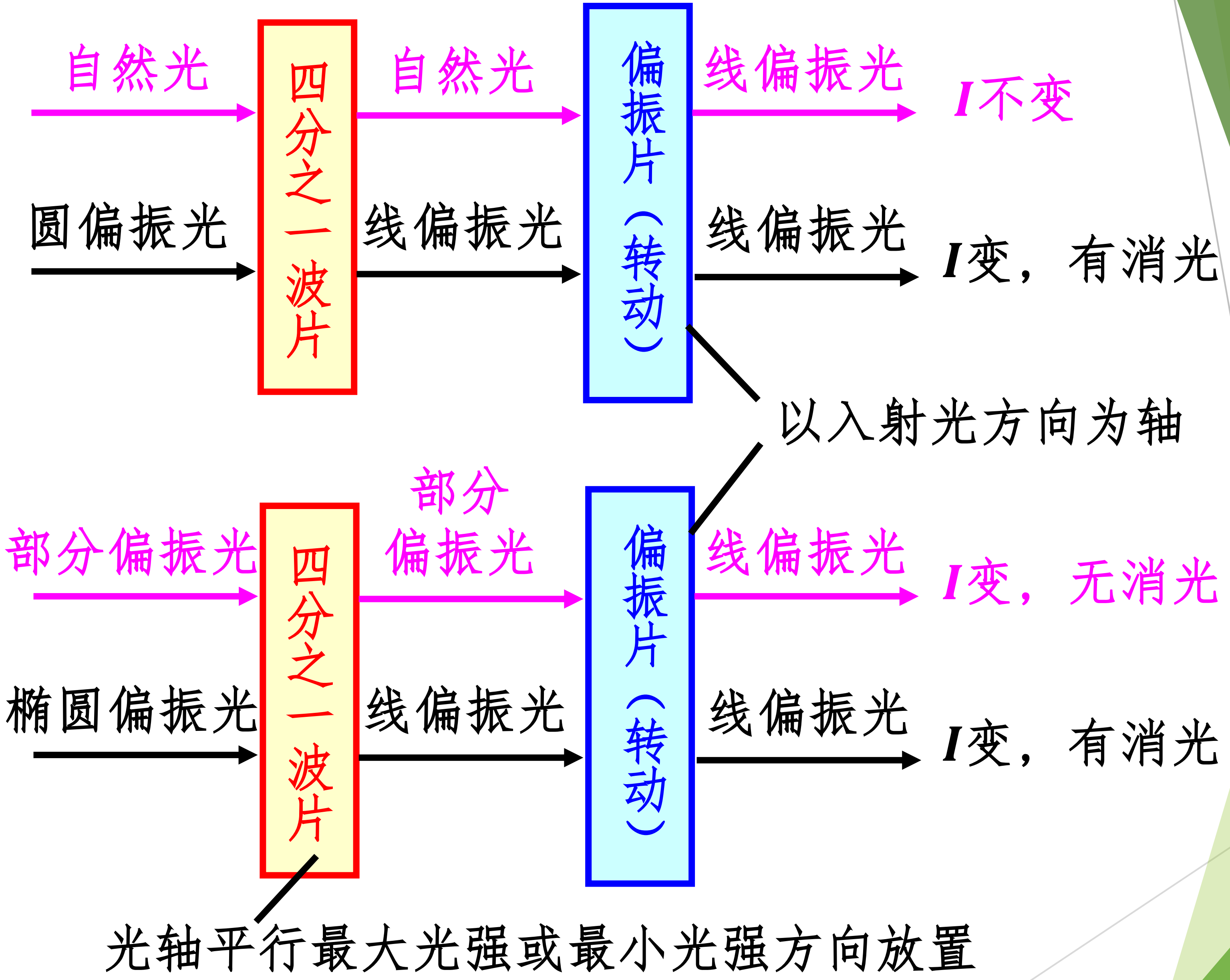
$$\begin{pmatrix} A_1 \\ \mp A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}\begin{pmatrix} A_1 \\ \pm iA_2 \end{pmatrix}$$

成为线偏振光。再旋转偏振片可看到消光现象。

④ 如果入射光是部分偏振光，通过¼波片后仍是部分偏振光。再旋转偏振片，光强有强弱变化，但无消光现象。

琼斯矢量是

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 e^{\pm i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ \pm iA_2 \end{pmatrix}$$


自然光
四分之一波片
自然光
偏振片（转动）
线偏振光
I不变
圆偏振光
线偏振光
线偏振光
I变，有消光
以入射光方向为轴
部分偏振光
部分偏振光
线偏振光
I变，无消光
椭圆偏振光
线偏振光
线偏振光
I变，有消光
光轴平行最大光强或最小光强方向放置

• 17:28:01