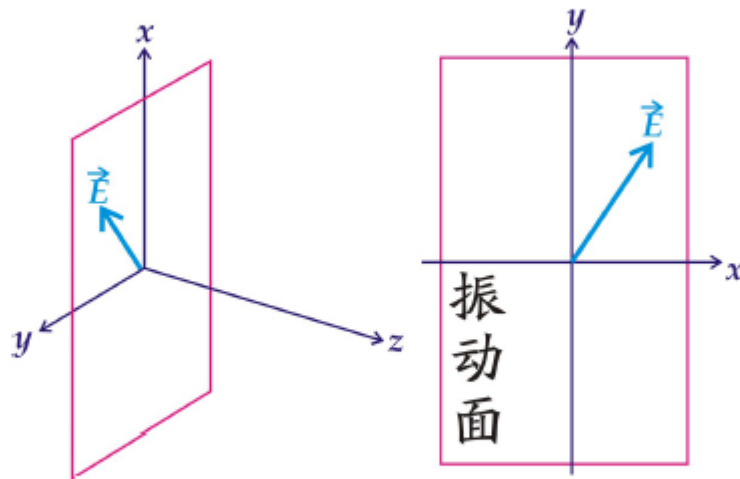


# 1.5、光的电磁性

## 横波性

- 光波是特定波段的电磁波，光矢量的振动方向与光波传播方向垂直，因而是横波。



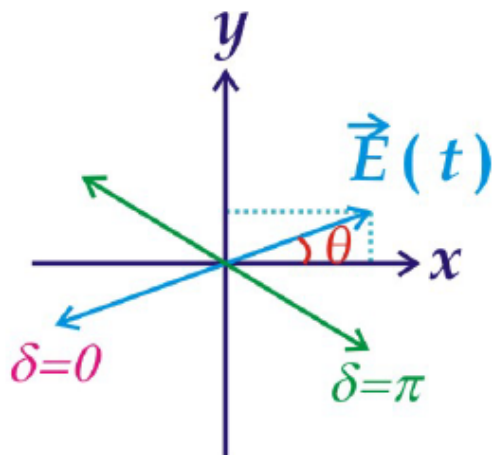
- 横波具有偏振特性。偏振：振动方向相对于传播方向的不对称性

- 光的五种偏振态



- 根据振动面内光矢量振动方向相对光传播方向是否有对称性可以将光波分为非偏振光和偏振光。
- 具有不对称性的偏振光又可分为完全偏振光和部分偏振光。

- **完全偏振光**：包括线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光
- 线偏振光：传播方向上各点光矢量在确定平面内，则xy平面内光矢量端点轨迹为直线，称为线偏振光。
- 线偏振光的解析表示

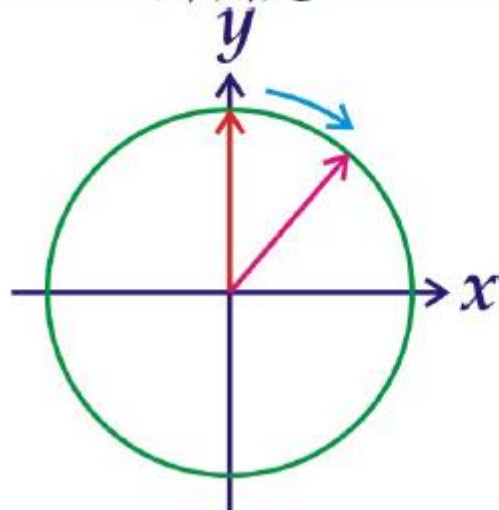


在观测时间内， $\theta$ 不变。

$$\vec{E}(t) = \vec{E} \cos \omega t \implies \begin{cases} E_x(t) = A_x \cos \omega t \\ E_y(t) = A_y \cos(\omega t + \delta) \end{cases}$$

若 $\delta = 0$ ，线偏振于位于一、三象限；若 $\delta = \pm\pi$ ，线偏振于二、四象限。

圆偏光



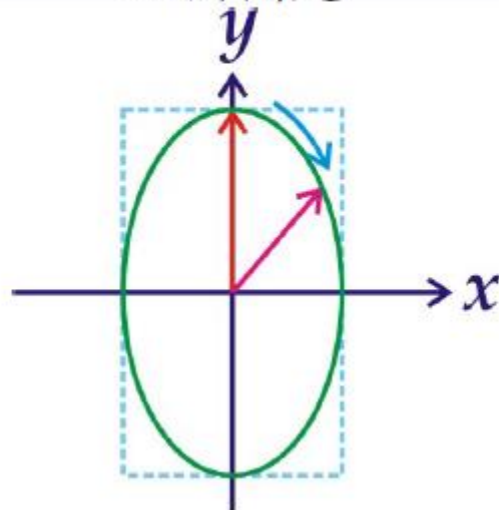
$$\begin{cases} E_x = A \cos \omega t \\ E_y = A \cos(\omega t \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

等振幅，相位差

$$\delta = +(-)\frac{\pi}{2}$$

右(左)旋

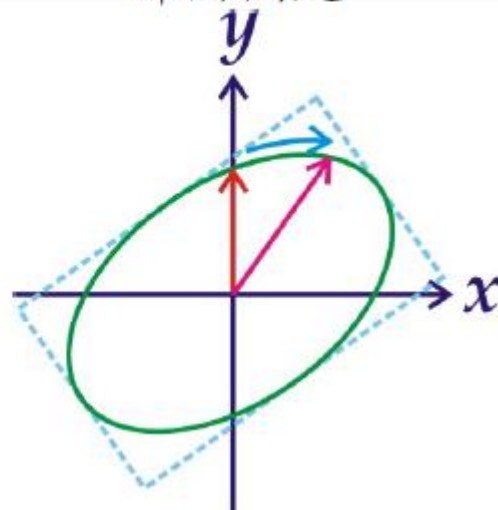
正椭偏光



与圆偏光区别在于振幅不等。

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

斜椭偏光

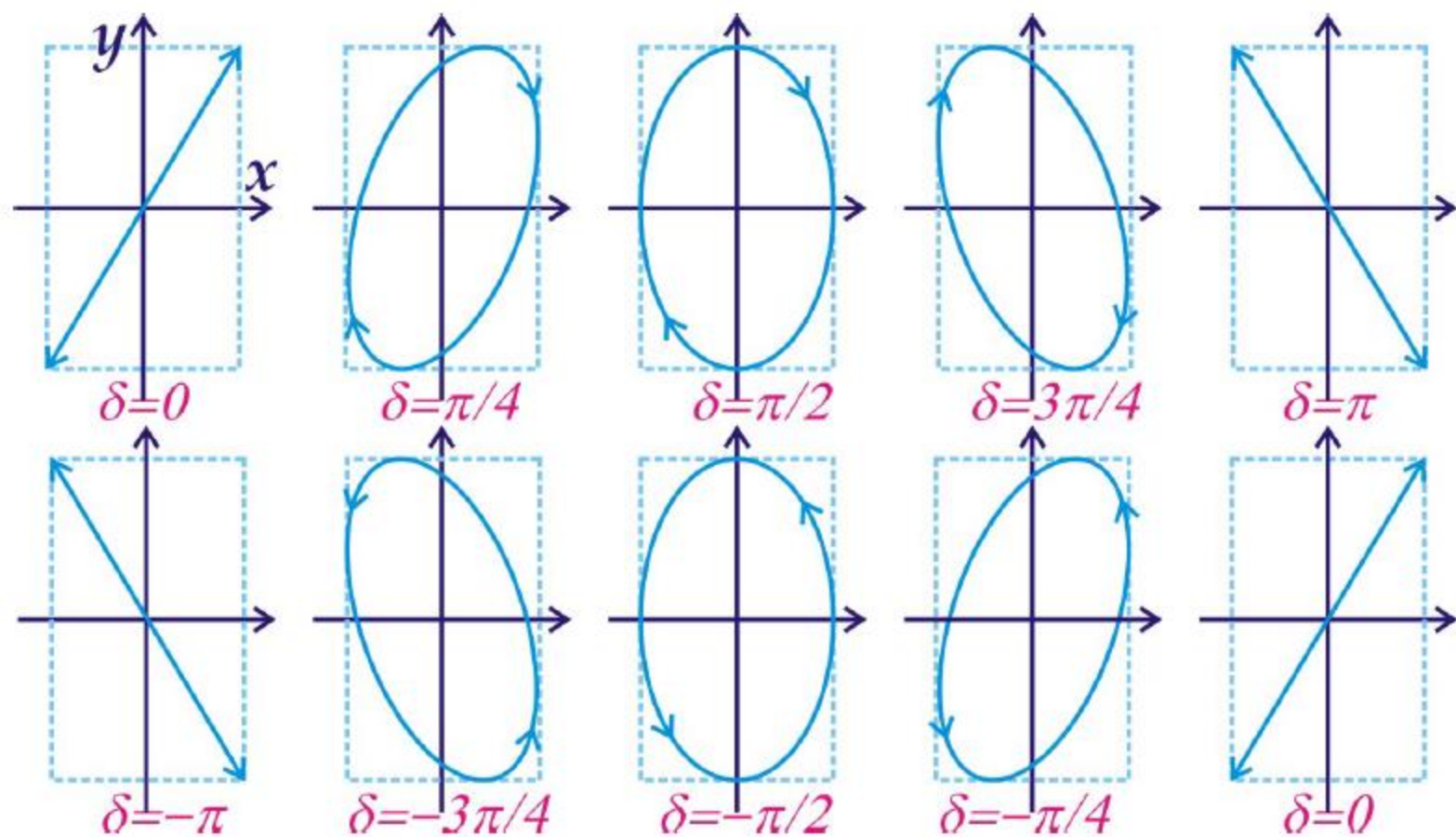


与正椭偏光区别在于  $\delta \neq \pm \frac{\pi}{2}$

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta) \end{cases}$$

$$\delta \neq 0, \pm \frac{\pi}{2}, \pi$$

可见，线偏、圆偏、正椭偏、斜椭偏可用统一的参数方程给出。  
究竟是什么偏振态，主要取决于 $\delta$ 。



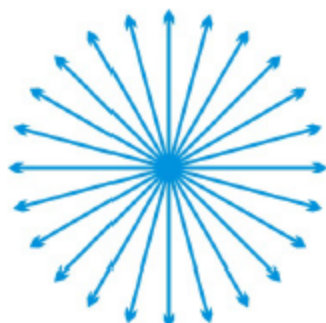


- 普通光源发出的光波都不是单一的线偏振光，而是许多光波的总和：它们具有一切可能的振动方向，各个振动方向上振幅在观察时间内平均值相等，初相位完全随机，这种光就是非偏振光(自然光)。

- 非偏振光(自然光)

可视作两个振幅相同、振动互相垂直，而相位关系完全不确定(一直在不停变化中)的光矢量的合成。

由于相位关系不确定，不能合成一个稳定的规则变化的完全偏振光。



自然光

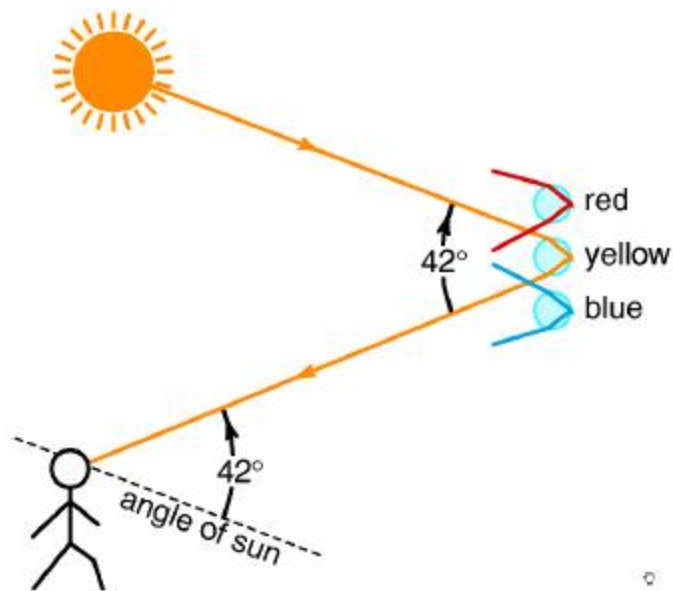


部分偏振光

- **部分偏振光**

由于外界作用，自然光某个方向振动比其他方向占优势，就变成部分偏振光。

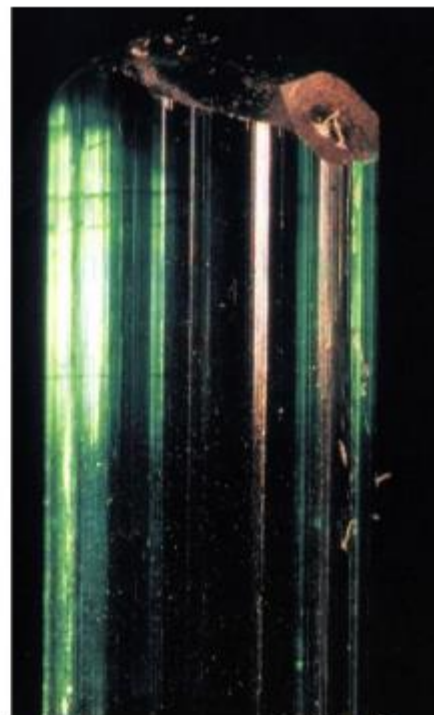
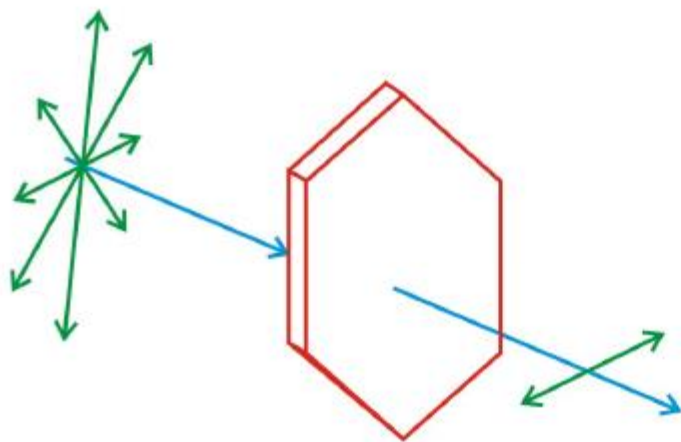
- 自然光经散射，一般将变为部分偏振光，雨后初晴出现的虹和霓也是部分偏振光。



# 偏振光的产生

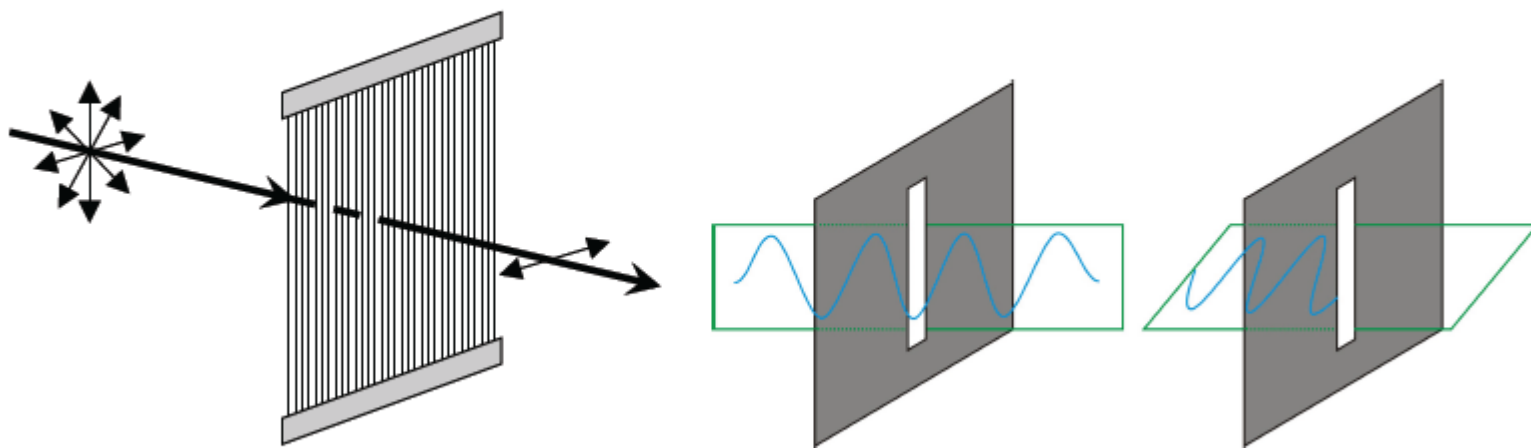
## 1、二向色性

有些各向异性晶体对不同方向的电磁振动具有选择吸收的性质，这种性质叫做二向色性(即有一个透振方向,振动方向与之垂直的光被吸收)。天然晶体中电气石晶体具有最强的二向色性。





- 除了采用天然二向色性晶体外，还可用人工的方法，如密排线栅



金质线栅,  $d \sim 5 \times 10^{-4} \text{ mm}$

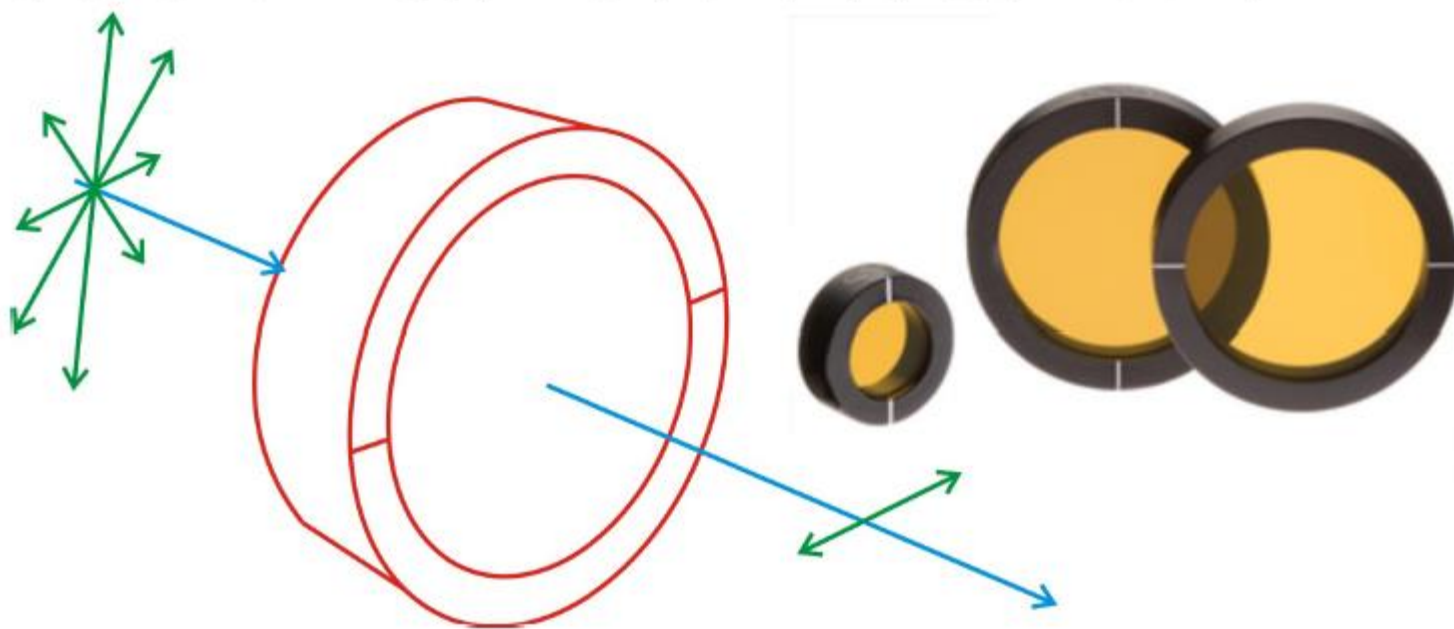
聚乙烯醇薄膜浸碘

拉直的分子链导电

Edwin Herbert Land, 1909~1991



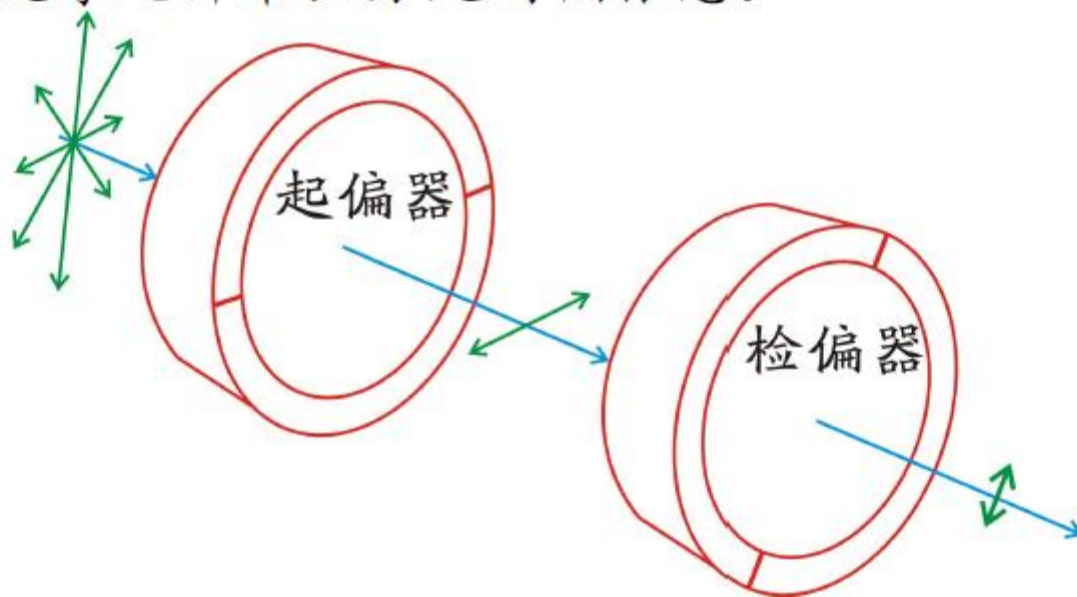
- 偏振片有一个特定的透振方向，只让平行于该方向的振动通过，而与其正交的方向的振动被强烈吸收。



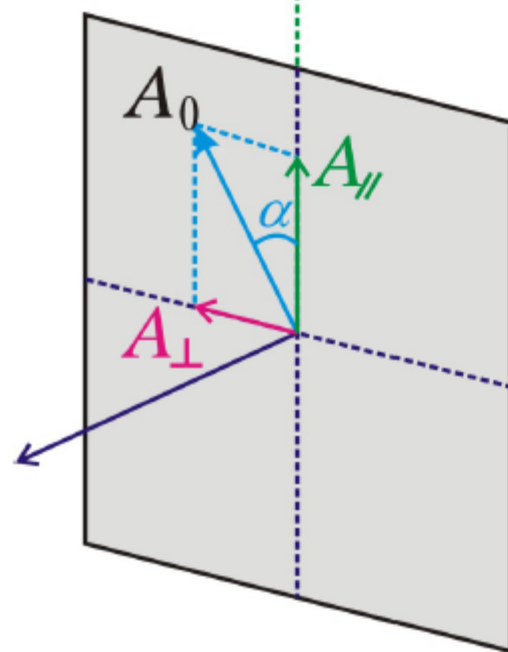
- 偏振片的用途

- **起偏器**:任意偏振态的光束, 经过偏振片后皆变为线偏振光。
- **检偏器**:检验光的偏振态。

人眼只能区分光的波长(颜色)和强度(亮度), 必须借助光学元件来区分光的偏振态。



- 马吕斯定律



透射光强

$$I_P = A_{//}^2 = (A_0 \cos \alpha)^2$$

即

$$I_P(\alpha) = I_0 \cos^2 \alpha$$

当一束线偏振光入射到偏振片，旋转偏振片时透射光强将在 $\alpha = 0, \pi$ 时为 $I_0$ 最大，在 $\alpha = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ 时为0最小。

- 只有线偏振光入射偏振片，旋转偏振片会出现消光现象，因此偏振片可以用做检偏器。

- 自然光通过偏振片

自然光有均匀分布的各种取向的光矢量，对其中每种确定取向的光矢量，光强均按 $\cos^2 \theta$ 比率通过。平均看来，光强透过率

$$\langle \cos^2 \theta \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta = \frac{1}{2}$$

即透射光强

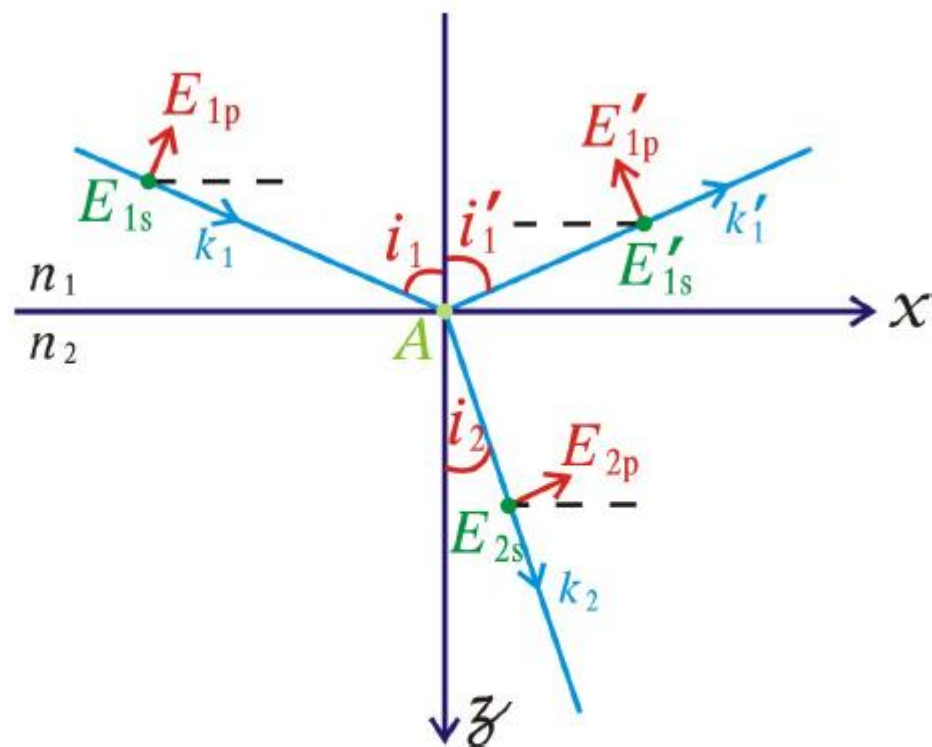
$$I_P(\alpha) = \frac{1}{2} I_0$$

与自然光偏振结构的轴对称性是一致的。



## 2、反射折射

菲涅尔反射折射公式



利用

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\mu_0 \mu_r}} E \implies H \propto nE$$

- 振幅反射率与振幅透射率

$$\left\{ \begin{array}{l} r_p = \frac{E'_{1p}}{E_{1p}} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)} \\ t_p = \frac{E_{2p}}{E_{1p}} = \frac{2n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \\ r_s = \frac{E'_{1s}}{E_{1s}} = \frac{\sin(i_2 - i_1)}{\sin(i_2 + i_1)} \\ t_s = \frac{E_{2s}}{E_{1s}} = \frac{2 \cos i_1 \sin i_2}{\sin(i_2 + i_1)} \end{array} \right.$$

- 光强反射率与光强透射率

$$R_p = |r_p|^2, \quad R_s = |r_s|^2, \quad T_p = \frac{n_2}{n_1} |t_p|^2, \quad T_s = \frac{n_2}{n_1} |t_s|^2$$

- 四个菲涅耳公式中，只有 $r_p$ 可能为0。

当 $\tan(i_1 + i_2) \rightarrow \infty$ 即 $i_1 + i_2 = \frac{\pi}{2}$ 时 $r_p = 0$

- 满足这一条件的入射角称为布儒斯特角(Brewster angle)，记作 $i_B$ 。

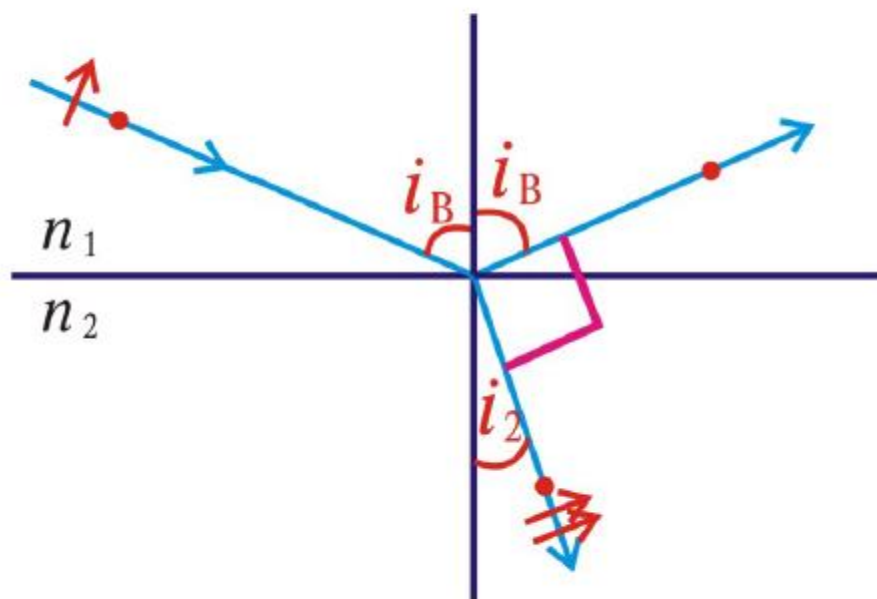
$$n_1 \sin i_B = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - i_B\right) = n_2 \cos i_B \implies i_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

因此 $i_B$ 总是比全反射临界角 $i_c$ 小。

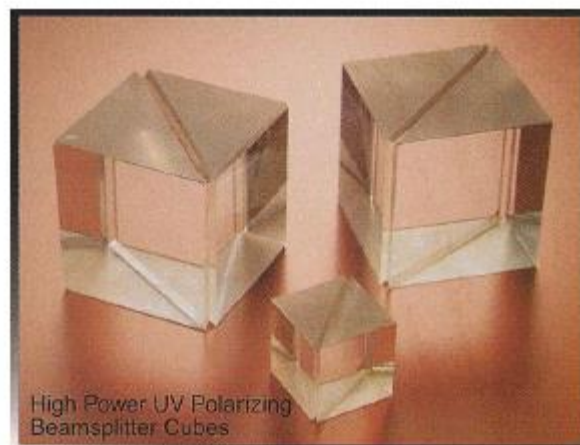
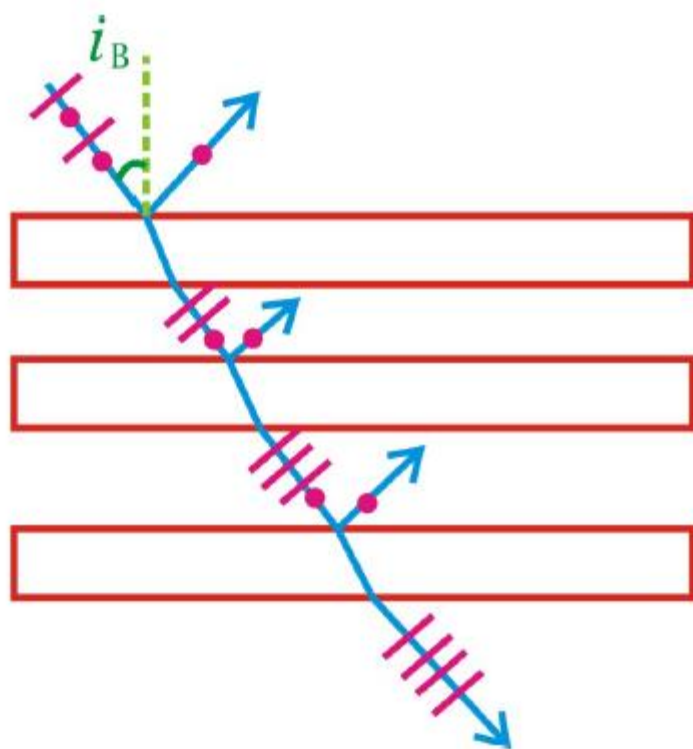
- 当以布儒斯特角入射时， $p$ 光的反射率为0，反射光只有 $s$ 光，是完全偏振光。因此 $i_B$ 也称作全偏振角。

注意：此处未涉及入射光偏振态。

- 以布儒斯特角入射时，反射光线与折射光线恰好正交。



- 单次反射起偏有严重的缺点  
光束的高强度与高偏振度二者不可兼得
- 折射起偏：玻片堆起偏





### 3、光的双折射

#### 双折射现象

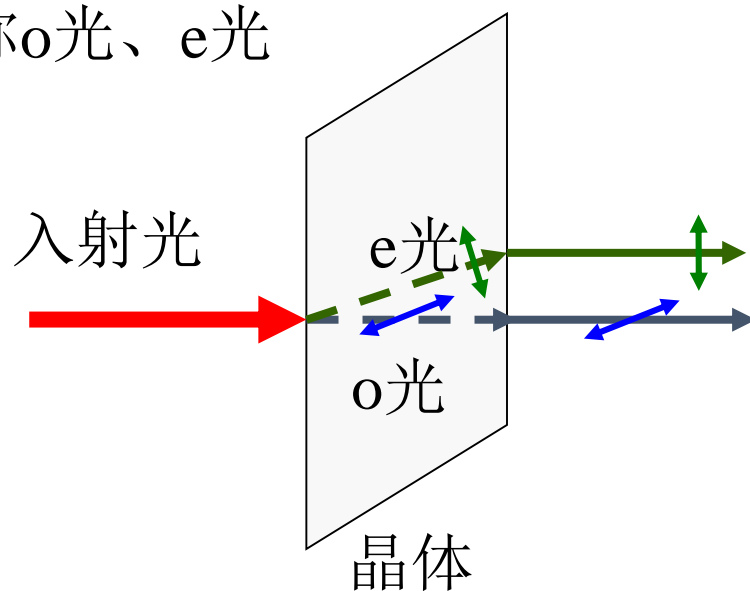
一束入射到介质中的光经折射后变为两束光，称为双折射。

折射后的两束光都是线偏光。

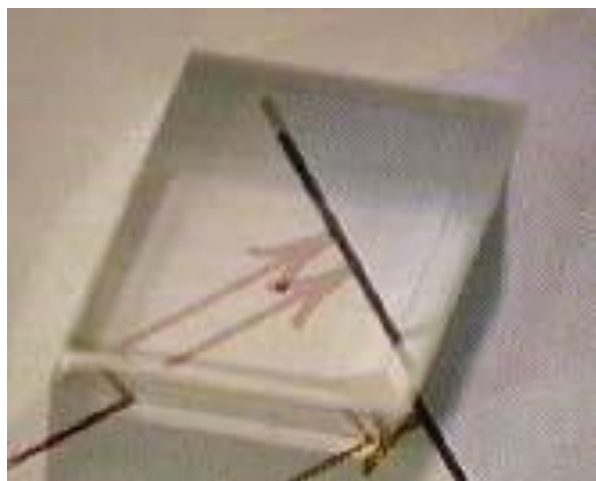
一束遵循折射定律，称为寻常光（o光）。

一束不遵循折射定律，称为非常光（e光）。

从晶体中射出后，不再称o光、e光



# 方解石双折射光的偏振态



红色箭头经过  
方解石晶体的  
两个像



经过线偏振器  
后o光的像



将线偏振器旋  
转 $90^\circ$ 后，e光  
的像

# 双折射晶体

- 能够产生双折射的晶体。它们都是具有各向异性结构的。

方解石晶体，即 $\text{CaCO}_3$ ，碳酸钙的三角晶系，是一种典型的双折射晶体（单轴）。常含杂质，无色的称冰洲石晶体

- 石英（水晶）、红宝石、冰等也是双折射晶体（单轴）。
- 云母、蓝宝石、橄榄石、硫黄等是另一类双折射晶体（双轴）。
- 晶体的光轴：光沿此方向入射时无双折射。

# 方解石晶体



9x12cm

1克拉 = 200 毫克



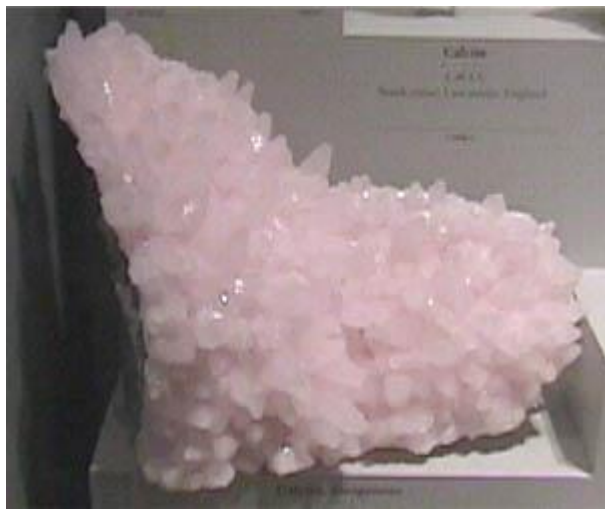
150.6 carats



3.9 carat



1865 carats



含锰方解石 15-18 cm.



砷铜铅矿方解石 12 cm.



12cm



12-15 cm

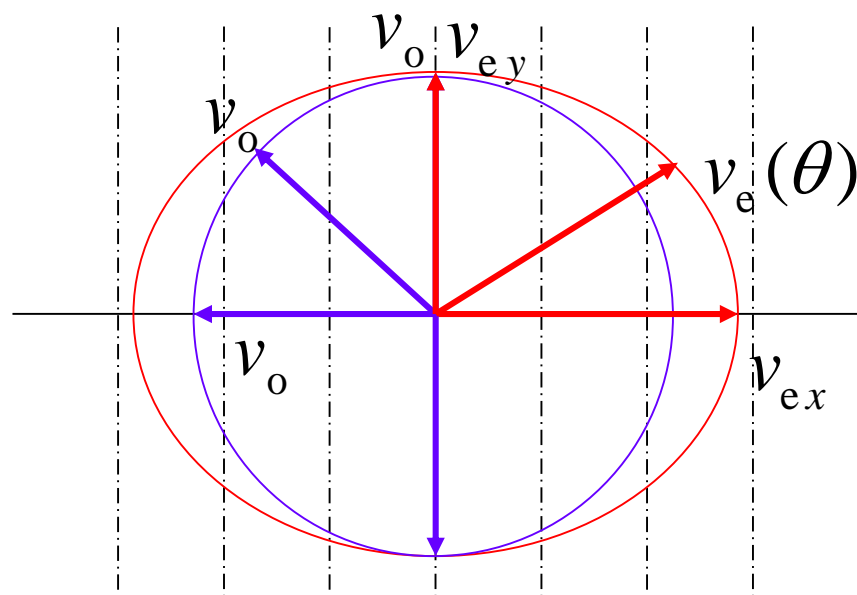


# 惠更斯对双折射现象的解释

- 1、晶体中任一点发出的次波应该有两个，相应有两个波面；
- 2、寻常光次波面是球面，非常光波面不是球面，假设为旋转椭球面，非常光在晶体中各个方向的光速不同。
- 3、在光轴方向，球面和椭球面相切，表示在光轴方向两种光速度相同，记为 $V_o$ ，在垂直光轴方向，o光和e光光速差别最大，把垂直光轴方向上e光光速记为 $V_e$ 。

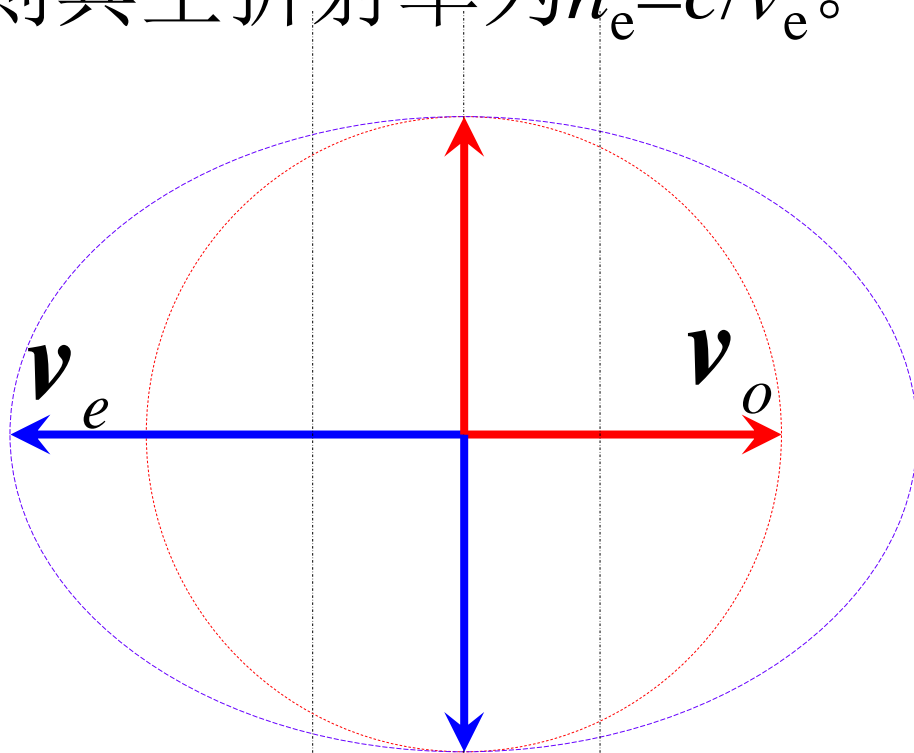
# 晶体中光波波面的特点

- 除了两个特殊的方向，e光的传播方向与其波面不垂直。这是因为其波面为椭球面。
- o光的波面是球面，故其传播方向处处与其波面垂直。



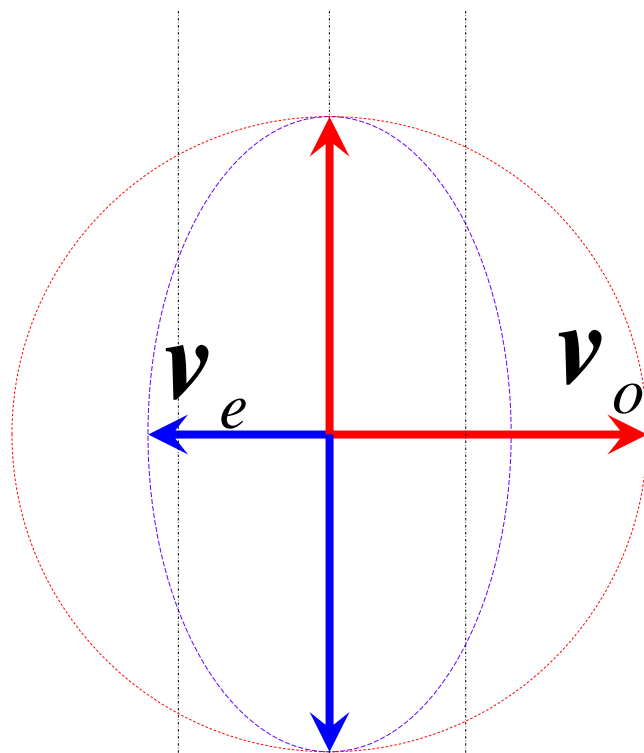
由于e光在不同方向传播速度不同，折射率也不同。定义e光的主折射率如下：

e光沿与光轴垂直方向传播时的速度为 $v_e$ ，则其主折射率为 $n_e = c/v_e$ 。



$$v_e > v_o$$
$$n_e < n_o$$

负晶体

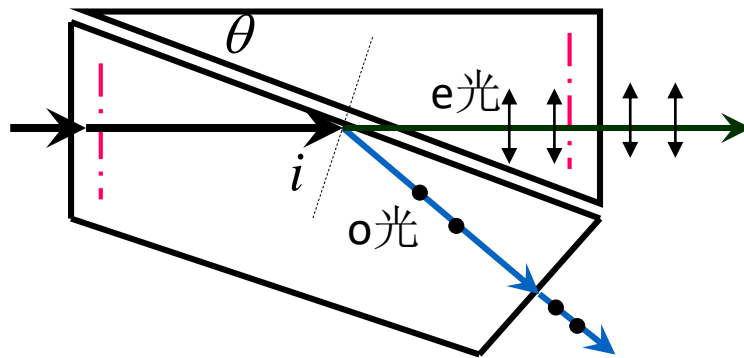


正晶体

$$v_e < v_o$$
$$n_e > n_o$$

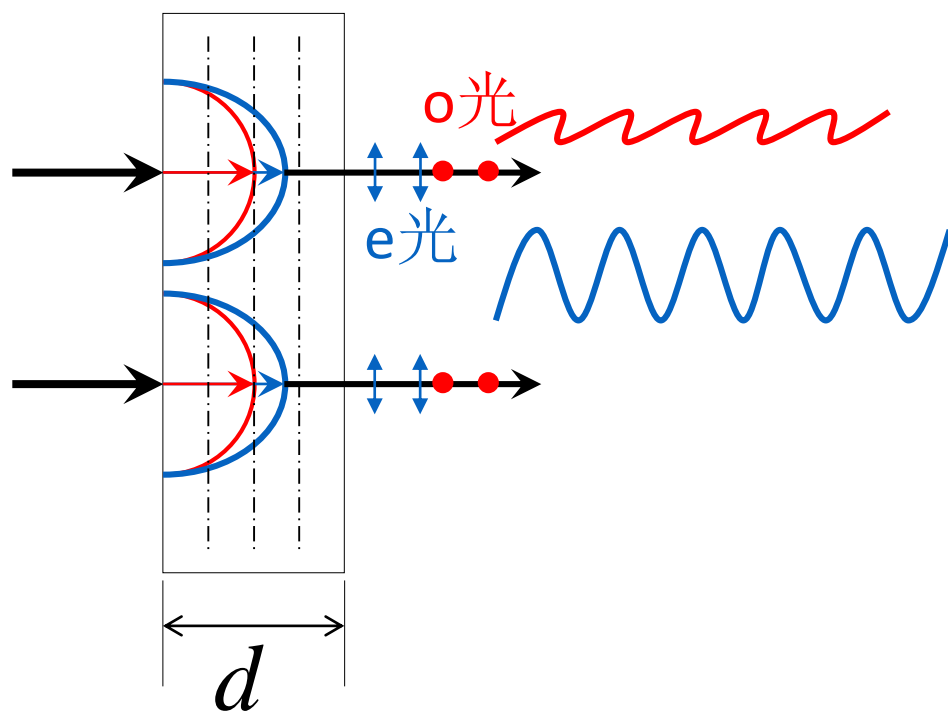
# Glan—Thompson晶体棱镜

- 由两块方解石的直角三棱镜组成
- 两棱镜的光轴相互平行
- 两棱镜的斜面可以用胶粘合
- 也可直接接触（中间有空气层），透紫外
- o光全反射，e光直进射出



# 波晶片

- 晶体的光轴与入射表面平行
- 平行光正入射



由于传播速度不同  
o光的相位比e光的相位滞后或超前



- 各光在波晶片中的光程

$$L_o = n_o d$$

$$L_e = n_e d$$

从波片出射时的光程差  $\Delta L = L_e - L_o = (n_e - n_o)d$

相位差  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d$  e光相对于o光的相位延迟

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4} + \frac{1}{2}m\lambda \quad \Delta\varphi = m\pi + \frac{\pi}{2} \quad \frac{1}{4}\text{波片} \quad \frac{\lambda}{4}\text{片} \quad m\text{取整数}$$

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} + m\lambda \quad \Delta\varphi = 2m\pi + \pi \quad \frac{1}{2}\text{波片} \quad \frac{\lambda}{2}\text{片}$$

$$\Delta L = m\lambda \quad \Delta\varphi = 2m\pi \quad \text{全波片}$$

快轴：传播速度快的光的**振动方向**（轴）。

负晶体的e轴，正晶体的o轴。

慢轴：传播速度慢的光的**振动方向**（轴）。

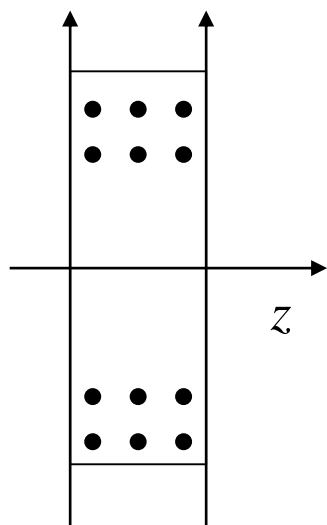
负晶体的o轴，正晶体的e轴。

# 1. 自然光经过波晶片

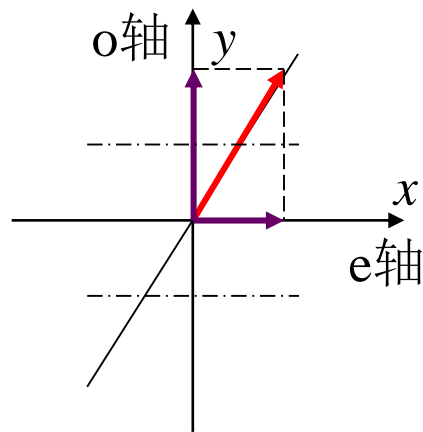
- 自然光可正交分解
- 每一个分量都含有相位随机的多列波
- 在晶体中分为相互正交的o光、e光
- 经过波片后，每一个分量仍然是相位随机的多列波
- 所以，正交分量合成后，仍是自然光
- 不考虑波片的吸收，光强不变。

# 平面偏振光经波晶片

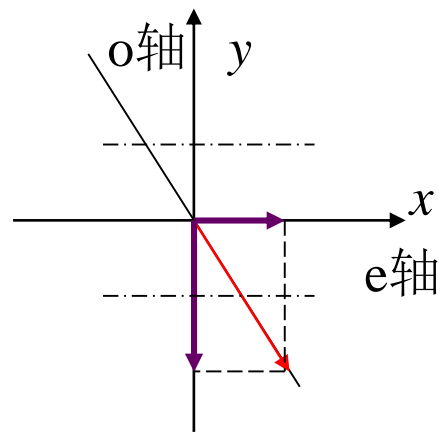
- 在波片中分为正交的e光、o光， $\delta_0=0, \pi$
- 出射后，产生额外相位差 $\Delta\varphi$

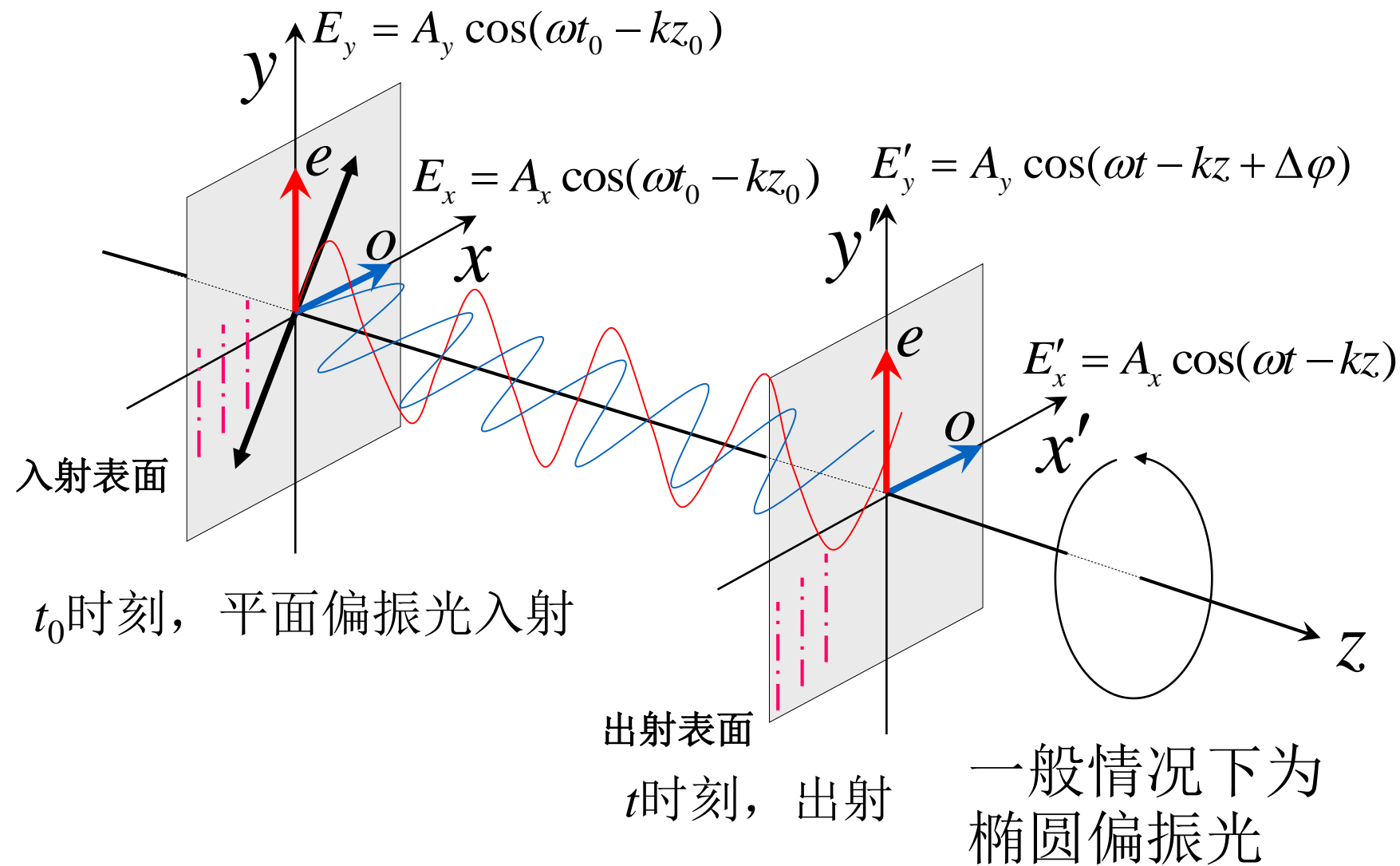


$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + 0) \end{cases}$$



$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \pi) \end{cases}$$





# 经过1/4波片

- 产生 $\pi/2$ 的额外相位差

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + 0) \end{cases} \quad y \text{ 为快轴} \quad \begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{右旋椭圆} \\ \text{偏振光} \end{array}$$

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \pi) \end{cases} \quad y \text{ 为快轴} \quad \begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{左旋椭圆} \\ \text{偏振光} \end{array}$$

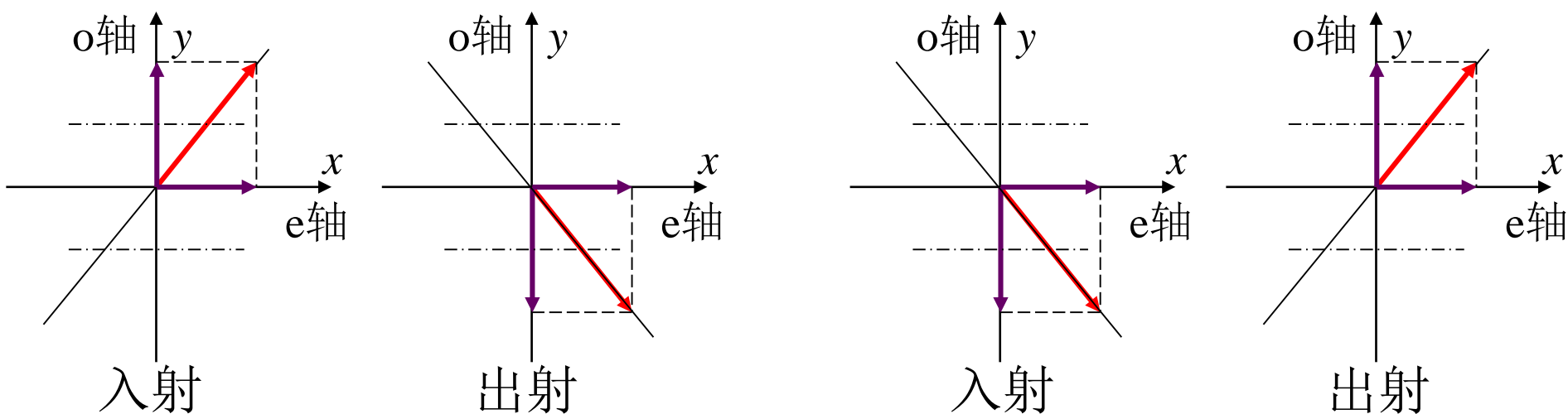
# 也可以获得圆偏振光

- 如果入射光的电矢量与光轴间的夹角为 $45^\circ$ 
$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + 0) \end{cases} \quad \begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \pi) \end{cases}$$
- 则经过波片后
$$\begin{cases} E_x = A_0 \cos \omega t \\ E_y = A_0 \cos(\omega t \pm \pi / 2) \end{cases}$$
- 是左旋或右旋的圆偏振光



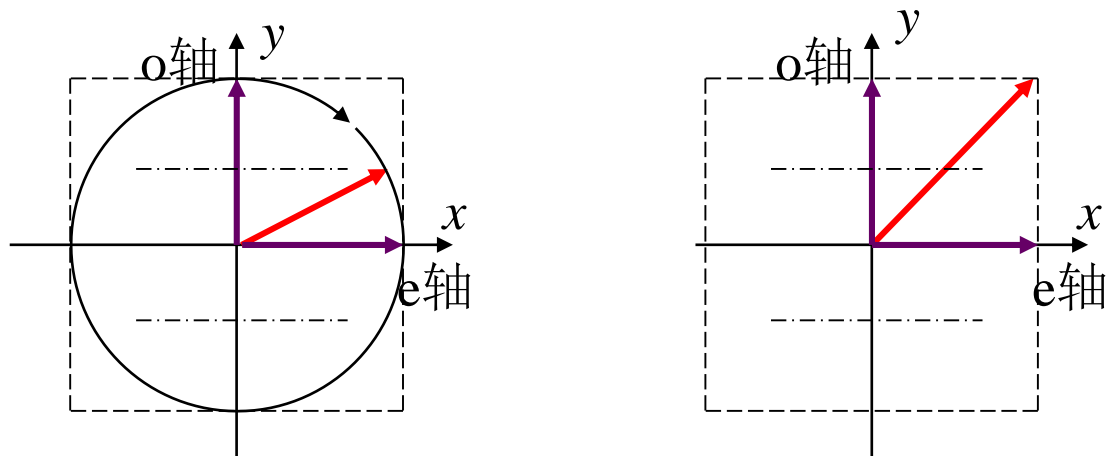
# 经过1/2波片

- 产生 $\pi$ 的额外相位差
- 出射光间的相位差是 $\pi$ ，或者0，还是平面偏振光
- 由于反相，电矢量的振动方向翻转。



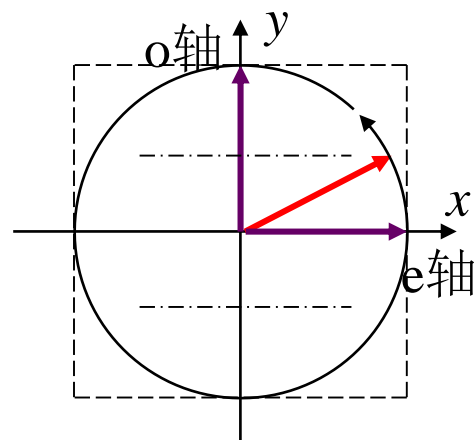
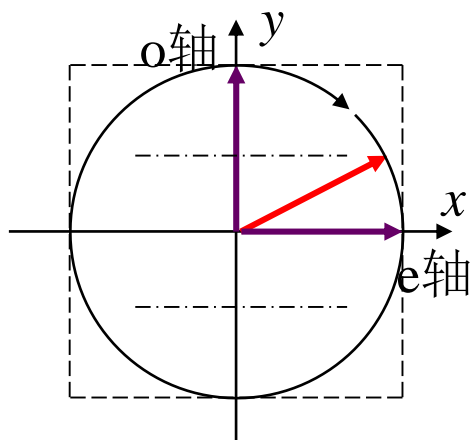
# 圆偏振光经过1/4波片

- 入射光的两正交分量间相位差是 $\pm\pi/2$
- 经过1/4波片，产生 $\pm\pi/2$ 的额外相位差
- 出射光，正交分量间相位差是0,  $\pi$
- 变为平面偏振光，电矢量与光轴成 $45^\circ$ 角



# 圆偏振光经过1/2波片

- 经过1/2波片，产生 $\pm\pi$ 的额外相位差
- 还是圆偏振光，但是由于反相，旋转方向相反

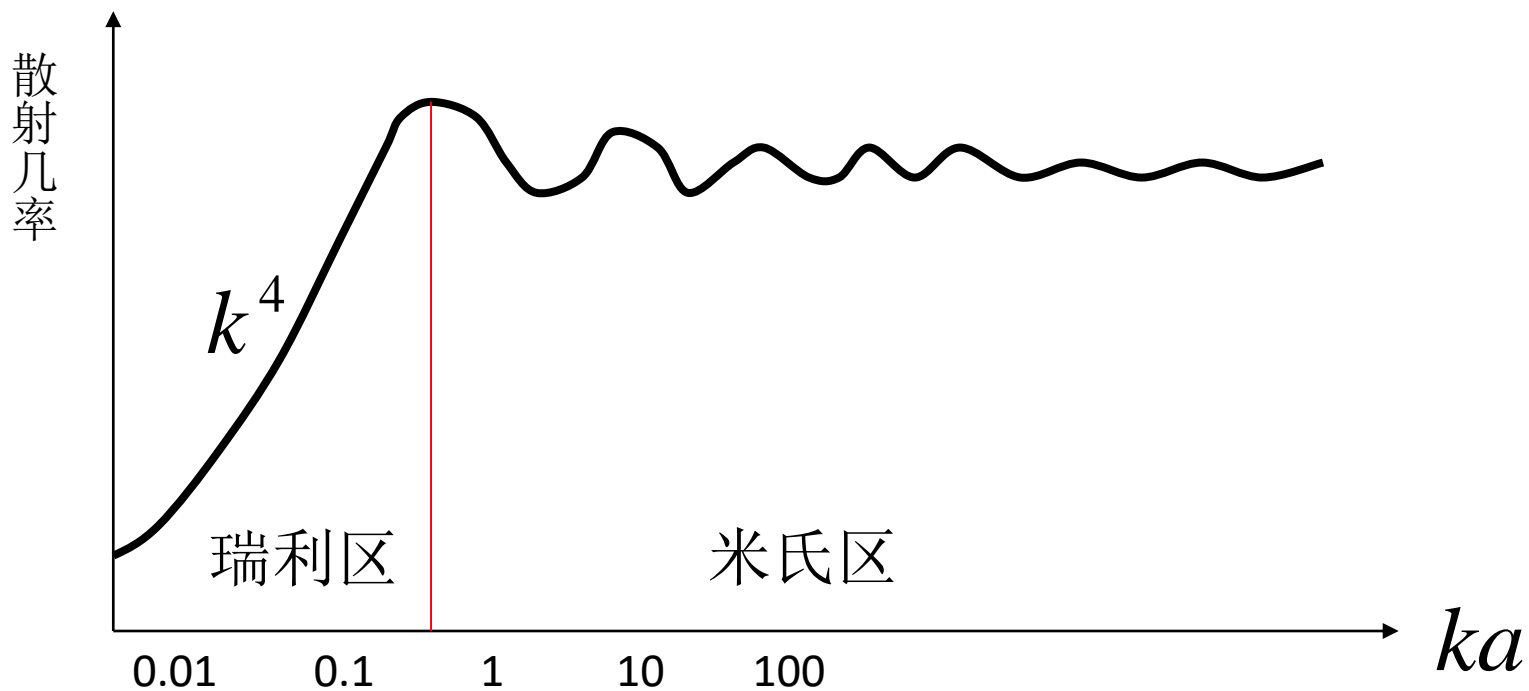


# 光的散射

- 光在不均匀媒质中产生散射。
- 介质中的带电粒子都对入射的光波进行散射
- 如果粒子均匀分布，则所有散射波叠加的结果，只剩下沿入射方向的光波。
- 所以，对于均匀分布的介质，不必计入散射。

# 散射的分类

- 瑞利散射：当散射体的尺寸小于波长时，散射光强 $\propto (1/\lambda)^4$
- 米—德拜散射：散射体颗粒度远大于波长时，散射光强对波长的依赖性不强。



$$a < 0.3 \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} a = ka < 0.3$$

Rayleigh Scatter

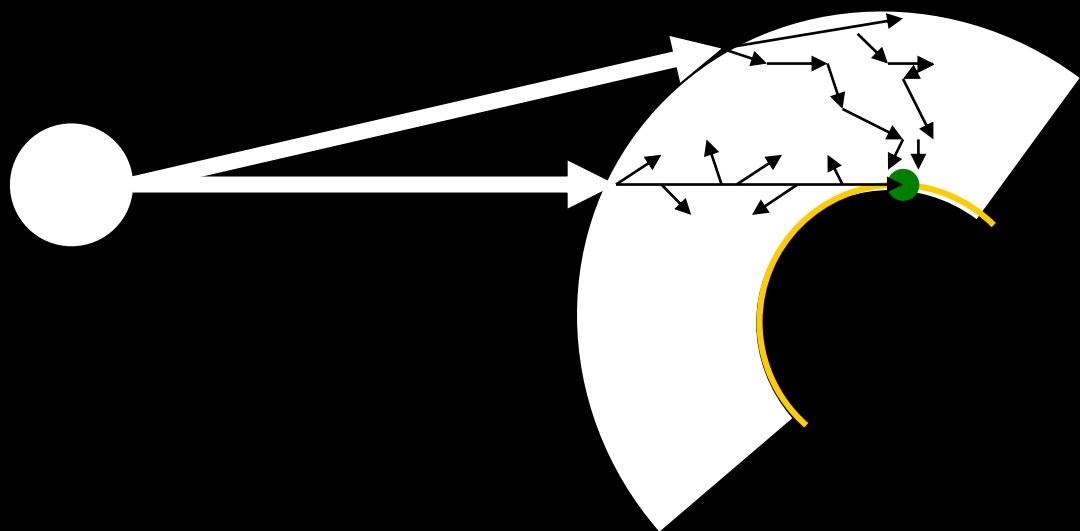
$$ka > 0.3$$

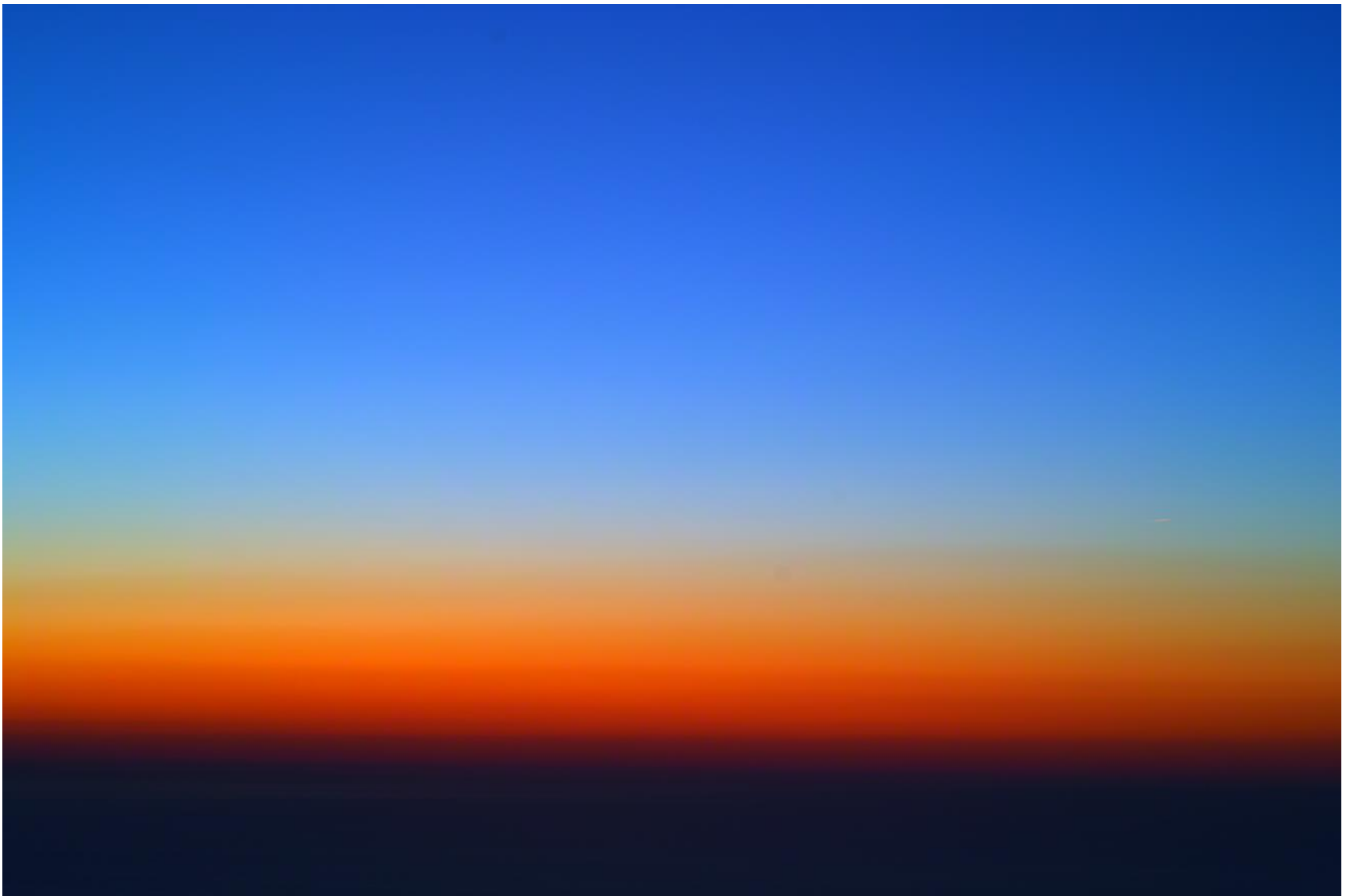
Mie-Debye Scatter



# 天空的颜色

- 直视太阳，进入眼睛的主要是被大气散射之后透射过来的光
- 巡视天空，进入眼睛的是阳光经大气散射之后的光





日落，透射光与散射光

# 瑞利散射形成的蓝天



白云是由于米·德拜散射

14. 四个偏振片依次前后排列。每个偏振片的透振方向，均相对于前一偏振片沿顺时针方向转过  $30^\circ$  角。不考虑吸收、反射等光能损失，则透过此偏振片系统的光强是入射光强的多少倍？

15. 有一空气-玻璃界面，光从空气一侧入射时，布儒斯特角是  $58^\circ$ ，求光从玻璃一侧入射时的布儒斯特角。