

# 大学基础物理学

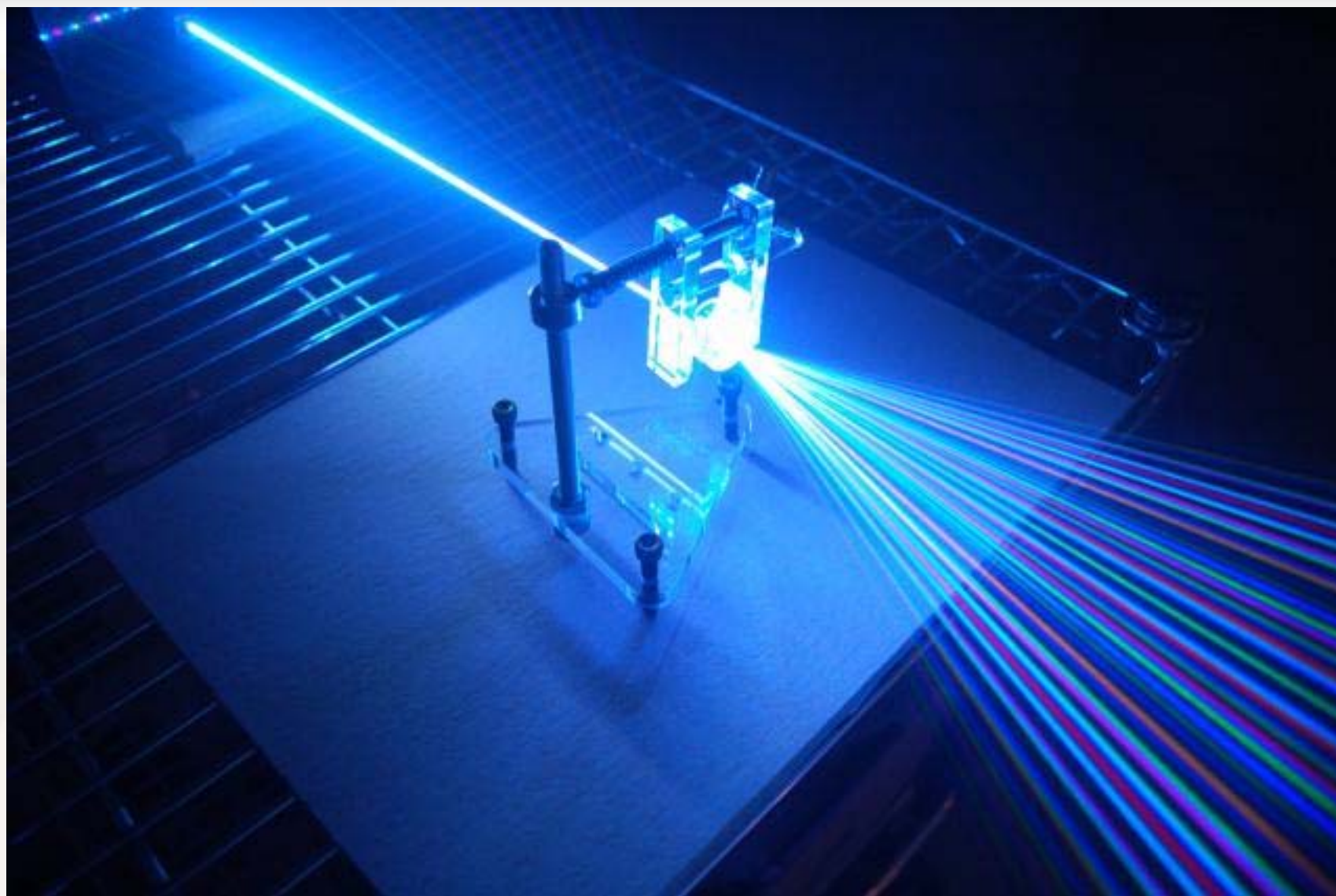
University Fundamental Physics

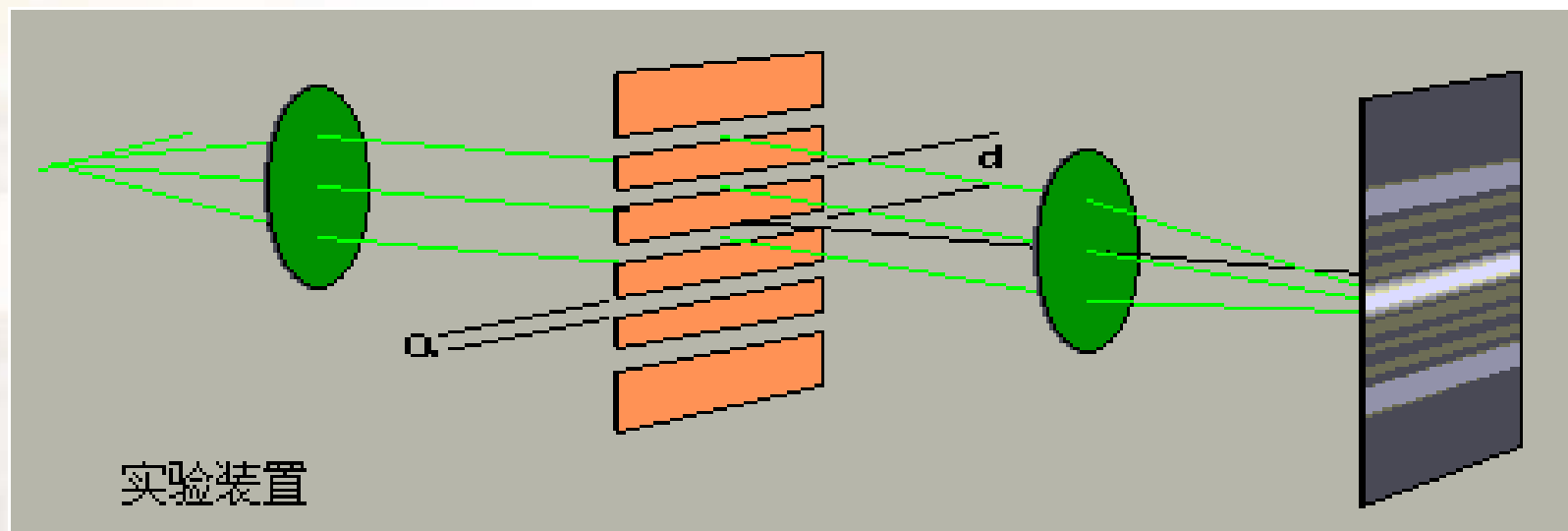
电子工程系@华东师范大学

李波

2019年





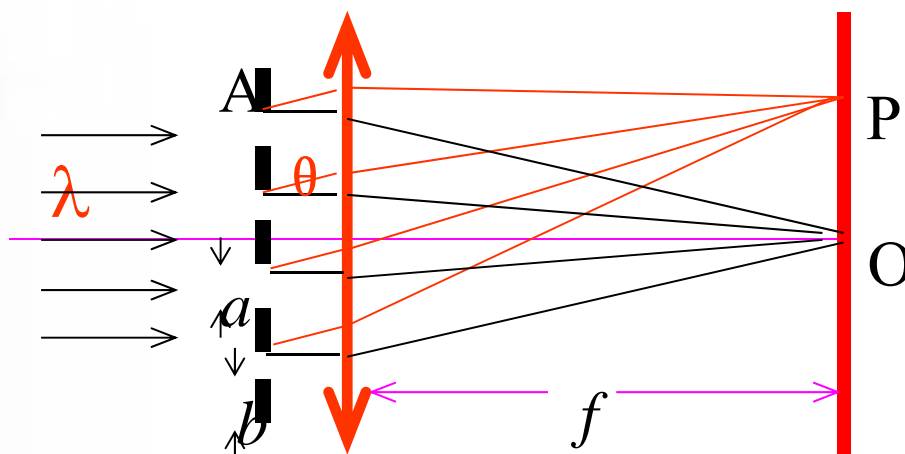


## 单缝衍射+多缝干涉

$$d = a+b \quad \text{—— 光栅常数}$$

# 光栅方程

## • 垂直入射时的光栅方程



相邻狭缝对应点在衍射角  $\theta$  方向上的光程差满足：

$$(a+b)\sin \theta = d\sin \theta = \pm k\lambda$$

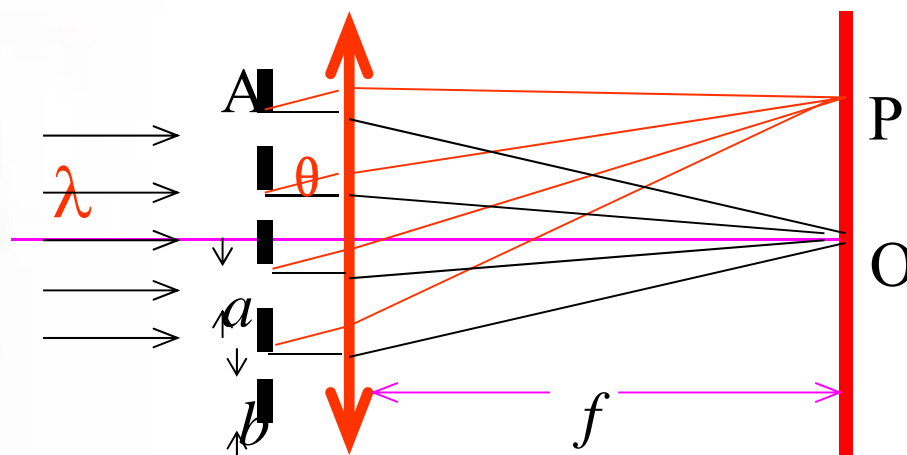
$$k=0, 1, 2, 3 \cdots$$



## 1、主极大明条纹中心位置：

$$(a+b)\sin \theta = d\sin \theta = \pm k\lambda \quad k=0, 1, 2, 3 \cdots$$

- 明纹位置由  $\pm k\lambda/d$  确定，与光栅的缝数无关，缝数增大只是使条纹亮度增大与条纹变窄；
- 光栅常数越小，条纹间隔越大；
- 由于  $|\sin \theta| \leq 1$ ， $k$  的取值有一定的范围，故只能看到有限级的衍射条纹。



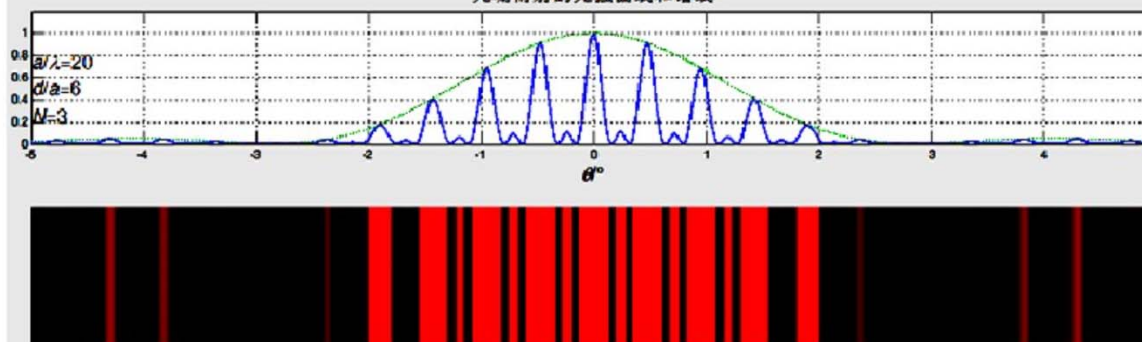
$$(a+b)\sin \theta = d\sin \theta = \pm k\lambda$$

$$Nd\sin \Delta\theta = k\lambda \quad \text{明? 暗?} \quad 2\Delta\theta = 2\lambda / (Nd)$$

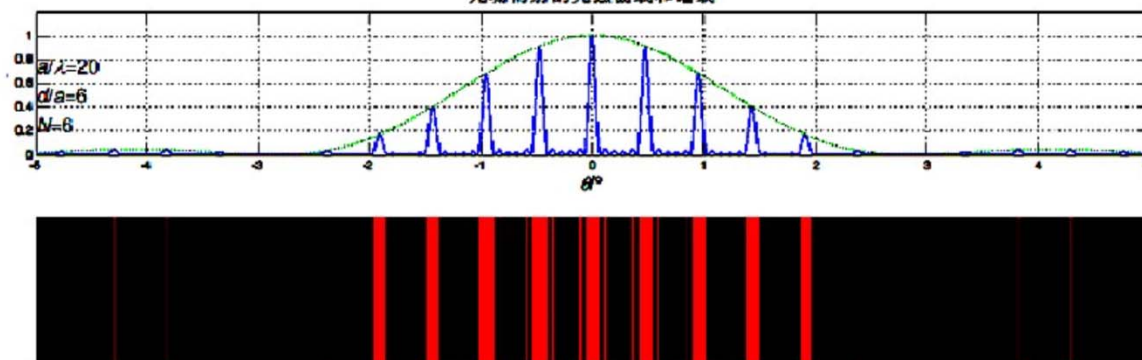
$$\theta_1 = \sin \theta_1 = \lambda/d \quad \theta_1 / \Delta\theta = N/2$$

中央明纹宽度比它和第一级明纹距离小很多，条纹很细，**N**越大，条纹越细

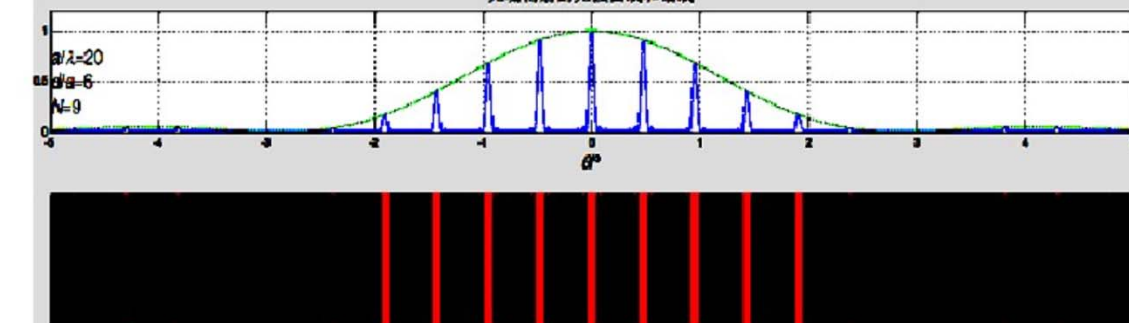
光栅衍射的光强曲线和谱线

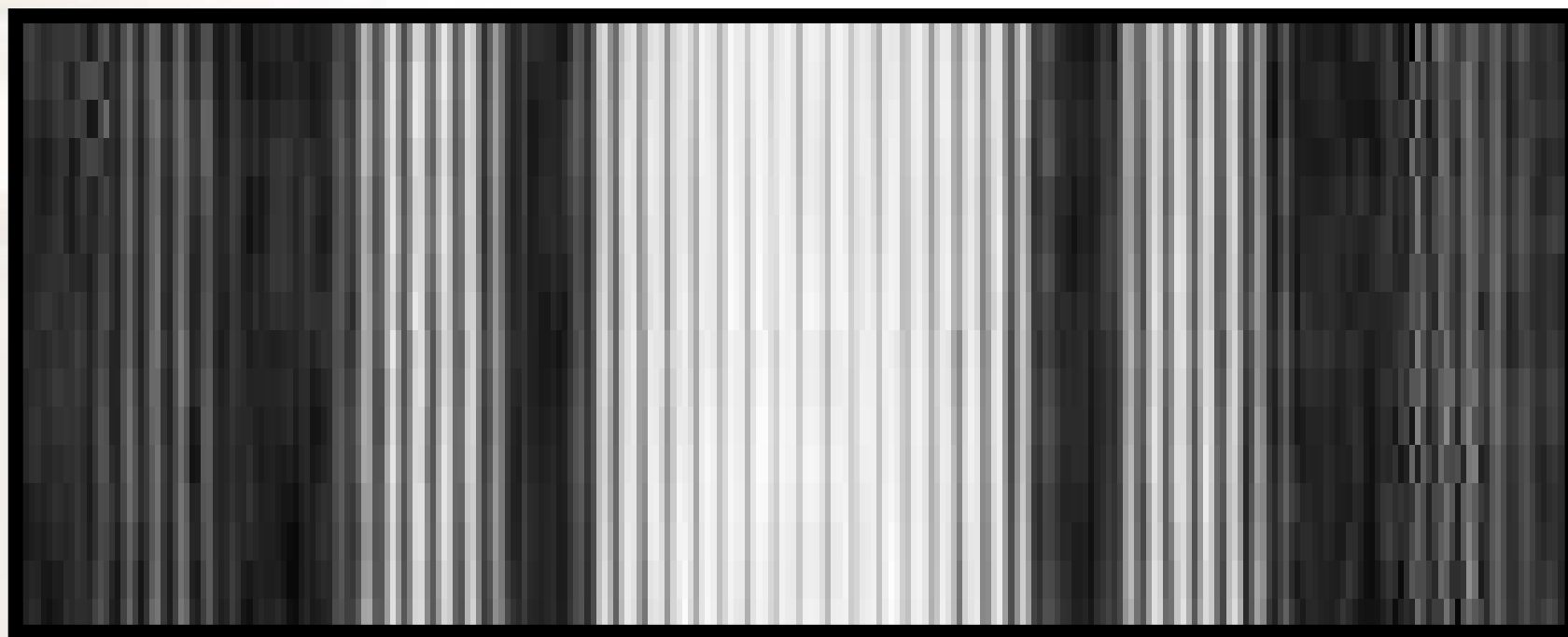


光栅衍射的光强曲线和谱线

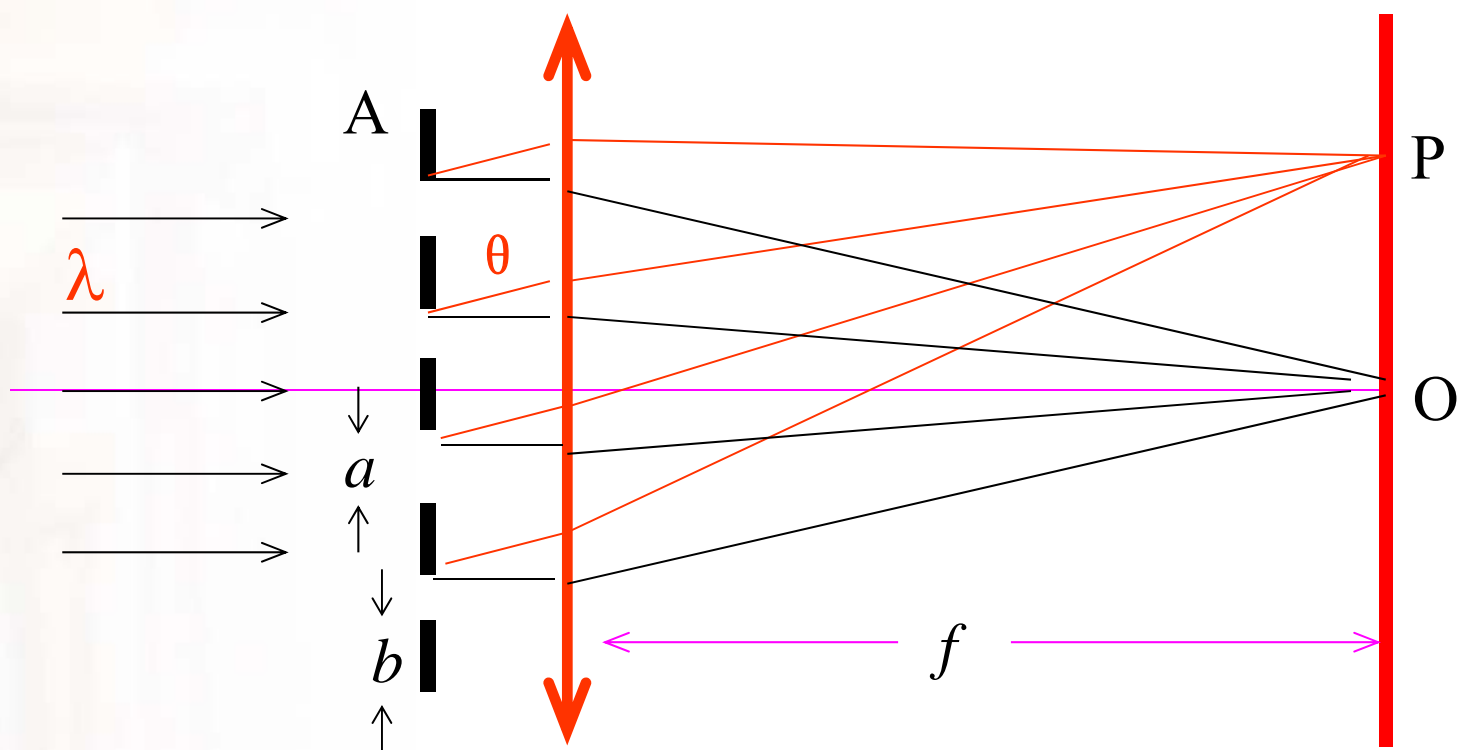


光栅衍射的光强曲线和谱线









## 光栅的缺极

缺极时衍射角同时满足：

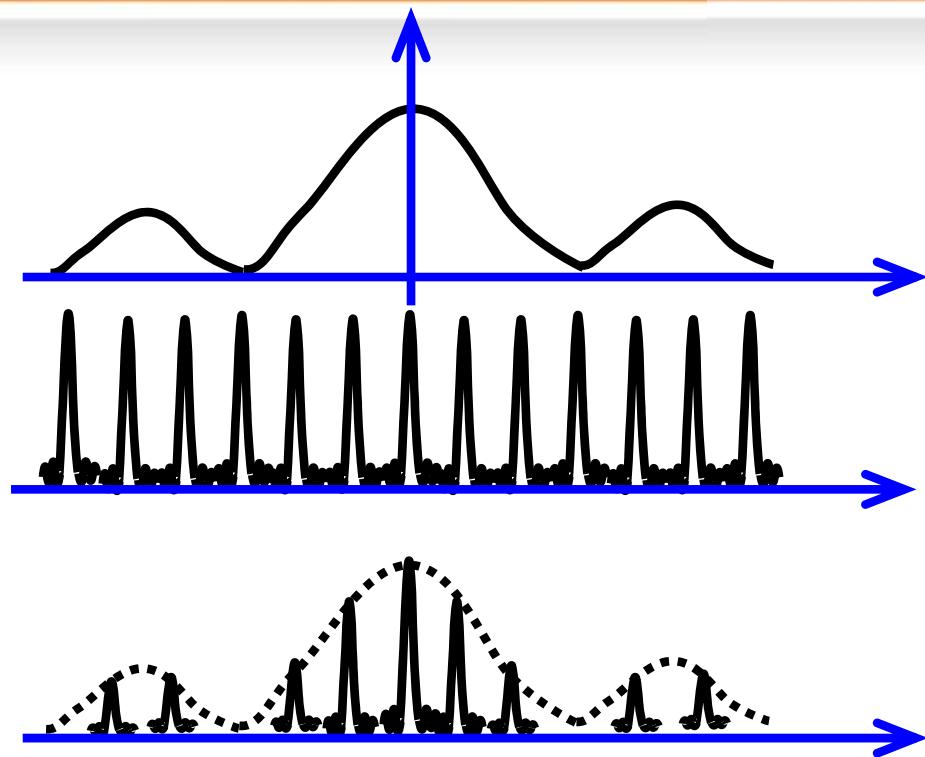
$$a \cdot \sin \theta = \pm k' \lambda$$

$$k' = 0, 1, 2, 3 \dots$$

$$d \sin \theta = \pm k \lambda$$

$$k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

在 $\theta$ 衍射方向上各缝间的干涉是加强的，但由于各单缝本身在这一方向上的衍射强度为零，其结果仍是零，因而该方向的明纹不出现。这种满足光栅明纹条件而实际上明纹不出现的现象，称为**光栅的缺级**。

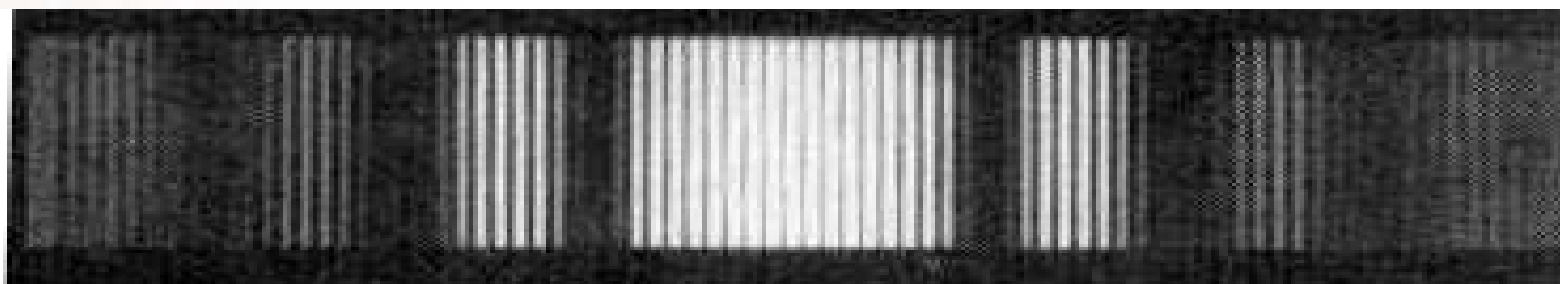
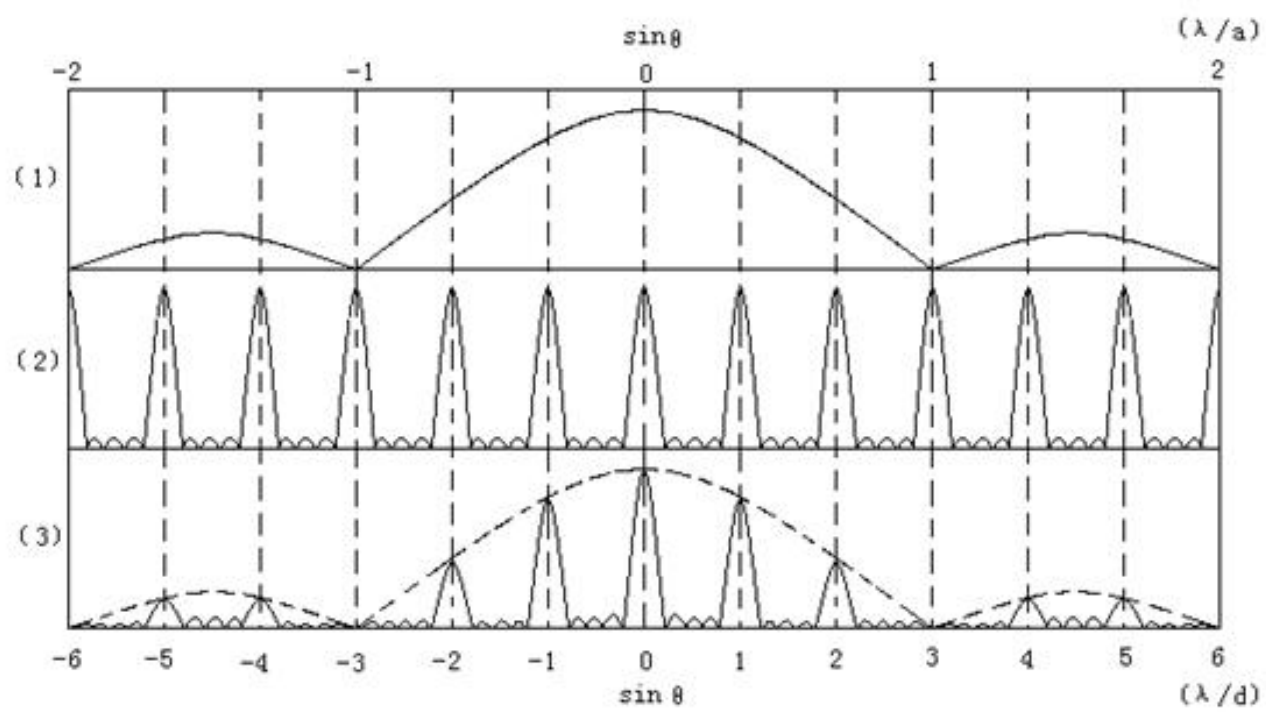


即

$$k = d / a \cdot k'$$

$k$  就是所缺的级次

例如  $d = 4a$ ，则缺 $\pm 4$ 级， $\pm 8$ 级...





$$d \sin \theta = \pm k \lambda$$
$$k=0, 1, 2, 3 \cdots$$

$$a \cdot \sin \theta = \pm k' \lambda$$
$$k'=0, 1, 2, 3 \cdots$$

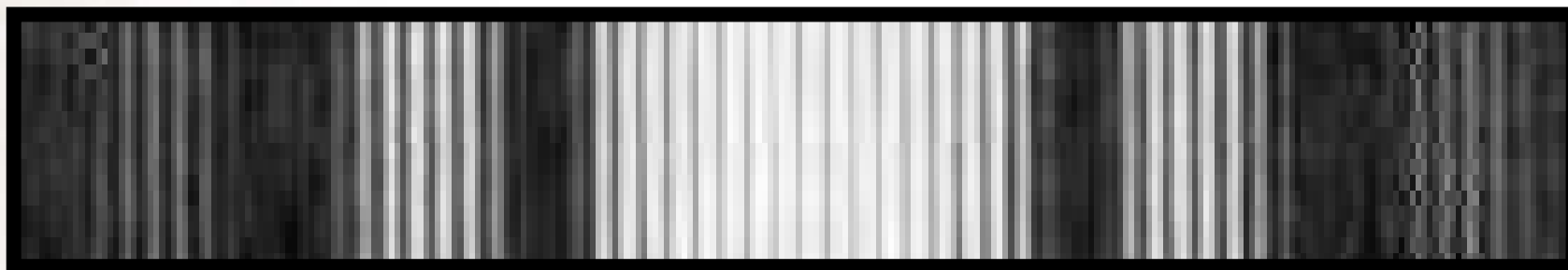
- 明纹位置由 $\pm k \lambda / d$ 确定，与光栅的缝数无关，缝数增大只是使条纹**亮度增大**与**条纹变窄**；
- 光栅常数越小，条纹**间隔越大**；
- 由于 $|\sin \theta| \leq 1$ ， $k$ 的取值有一定的范围，故只能看到有限级的衍射条纹。
- 光栅的**缺级**

## 单缝衍射和多缝衍射干涉的对比 ( $d=10a$ )

单缝



多缝



缺级

19个明条纹

缺级

$\frac{d}{a}$

决定衍射中央明纹范围内的干涉条纹数。

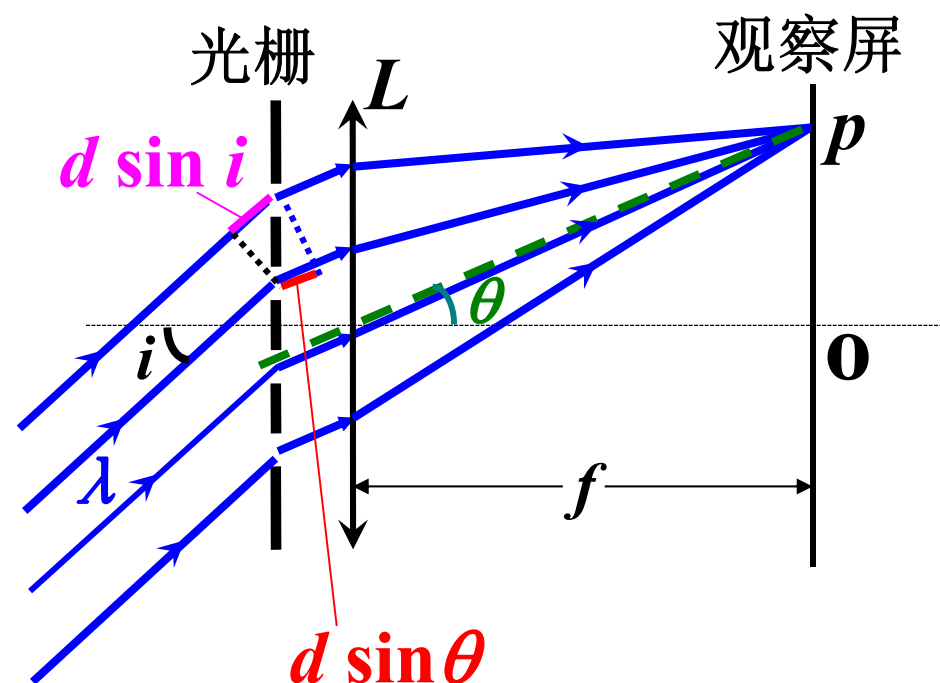
## 斜入射的光栅方程

$$(a+b)(\sin \theta \pm \sin i) = d(\sin \theta \pm \sin i) = \pm k\lambda$$

$$k=0, 1, 2, 3 \dots$$

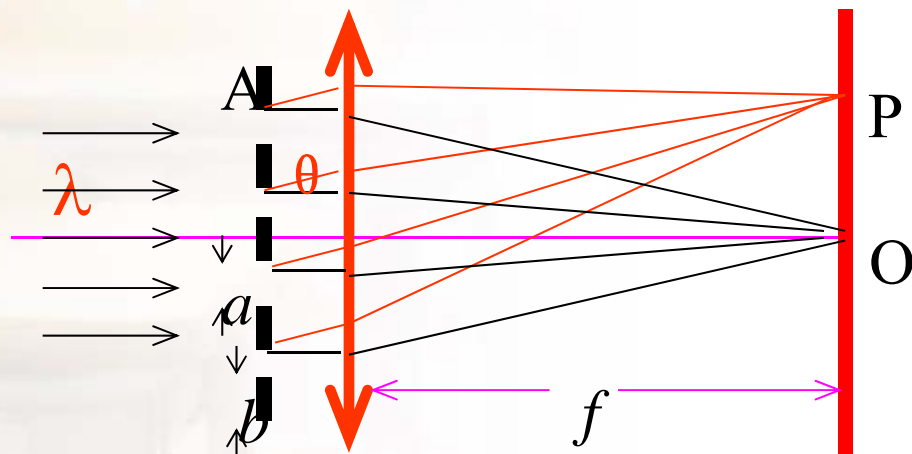
### — 斜入射的光栅方程

衍射光与入射光在光栅法线同侧取正号；  
衍射光与入射光在光栅法线异侧取负号。



斜入射可以获得更高级次的条纹（分辨率高）

## •垂直入射时的光栅方程

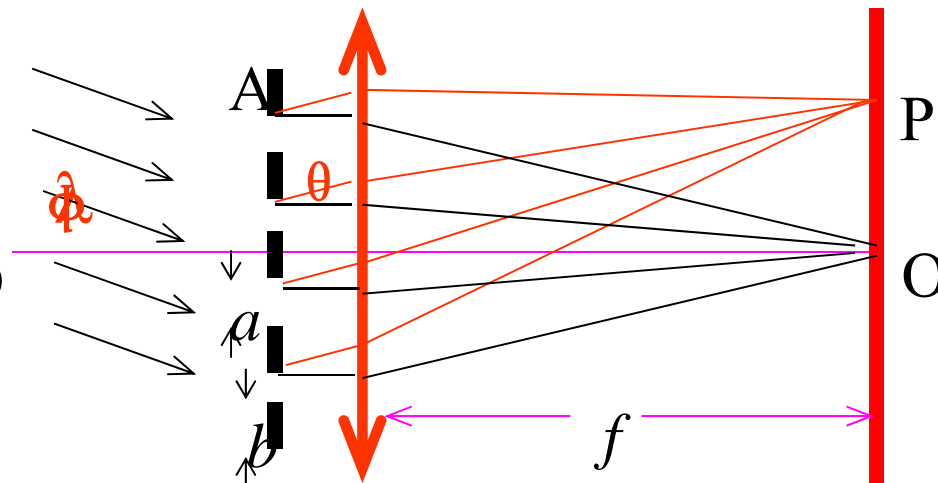


相邻狭缝对应点在衍射角  $\theta$  方向上的光程差满足：

$$(a+b)\sin\theta = d\sin\theta = \pm k\lambda$$

$$k=0, 1, 2, 3 \dots$$

## •斜入射时的光栅方程



$$(a+b)(\sin\theta \pm \sin\phi) =$$

$$d(\sin\theta \pm \sin\phi) = \pm k\lambda$$

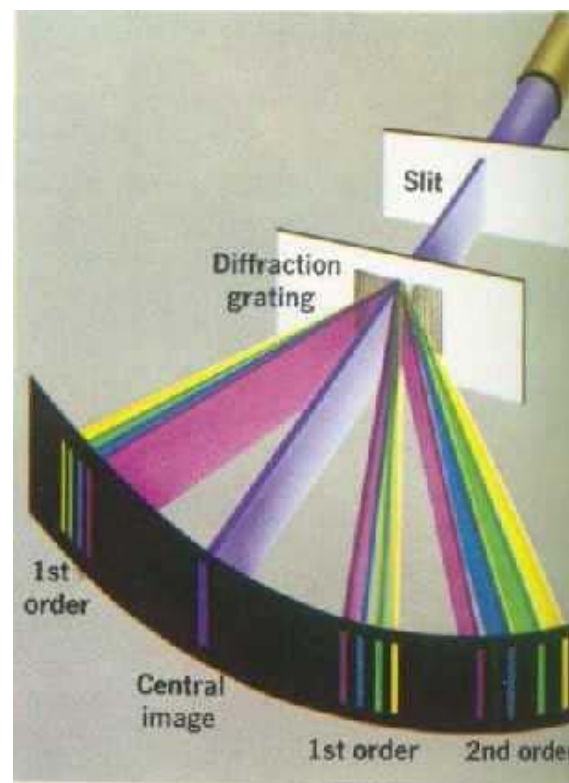
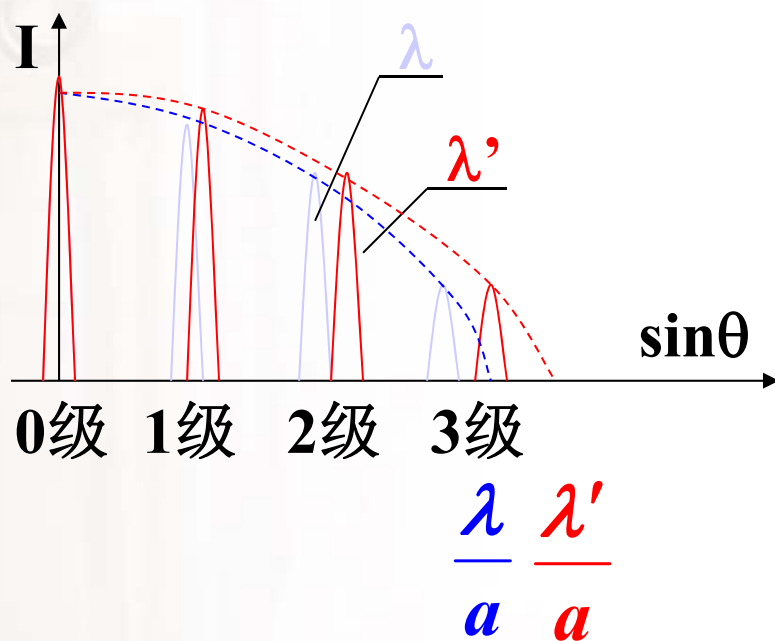
$$k=0, 1, 2, 3 \dots$$

衍射光与入射光在光栅法线同侧取正号；  
衍射光与入射光在光栅法线异侧取负号。

# 光栅光谱

正入射:  $d \sin \theta = \pm k \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$

$k$  一定时,  $\lambda \uparrow \rightarrow \theta \uparrow$ , 不同颜色光的主极大位置也不同, 形成同一级光谱。







## \* 光栅的分辨本领 (resolving power of grating)

因为谱线本身是有宽度的， 如何说明谱线是否重叠，  
为此引入分辨本领。

设入射波长为 $\lambda$  和 $\lambda + \delta\lambda$  时，两谱线刚能分辨。

定义： 光栅的色分辨本领

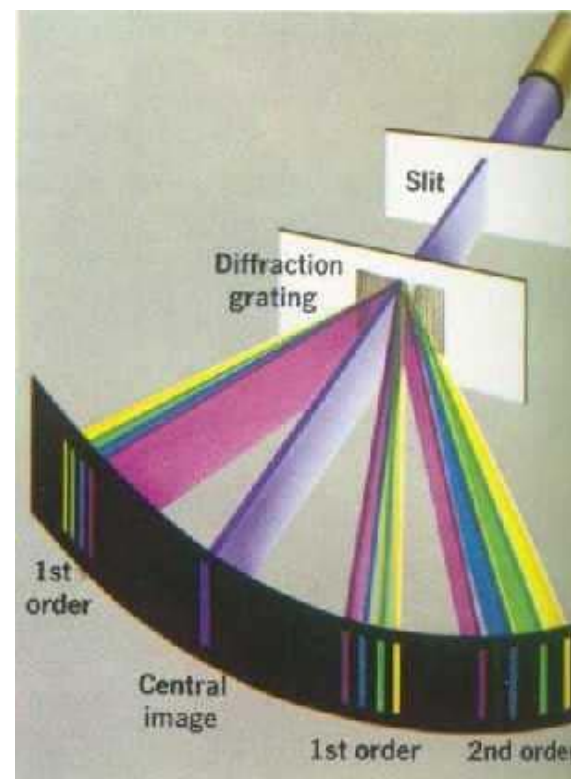
$$R \equiv \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

下面分析  $R$  和哪些因素有关。

## 利用瑞利判据

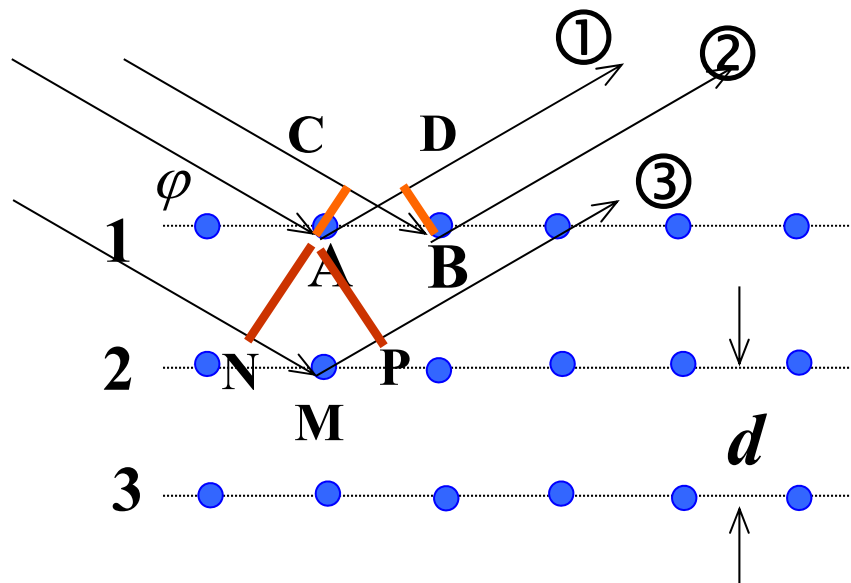
$$R \equiv \frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN$$

光栅的分辨本领  
与级次和总缝数  
成正比



## 布喇格公式

同一晶面上相邻原子散射的光波的光程差等于零  $AD-BC=0$ ，它们相干加强。若要在该方向上不同晶面上原子散射光相干加强，则必须满足：



$$\delta = NM + MP = k\lambda \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

$$2d \cdot \sin \varphi = \pm k\lambda$$

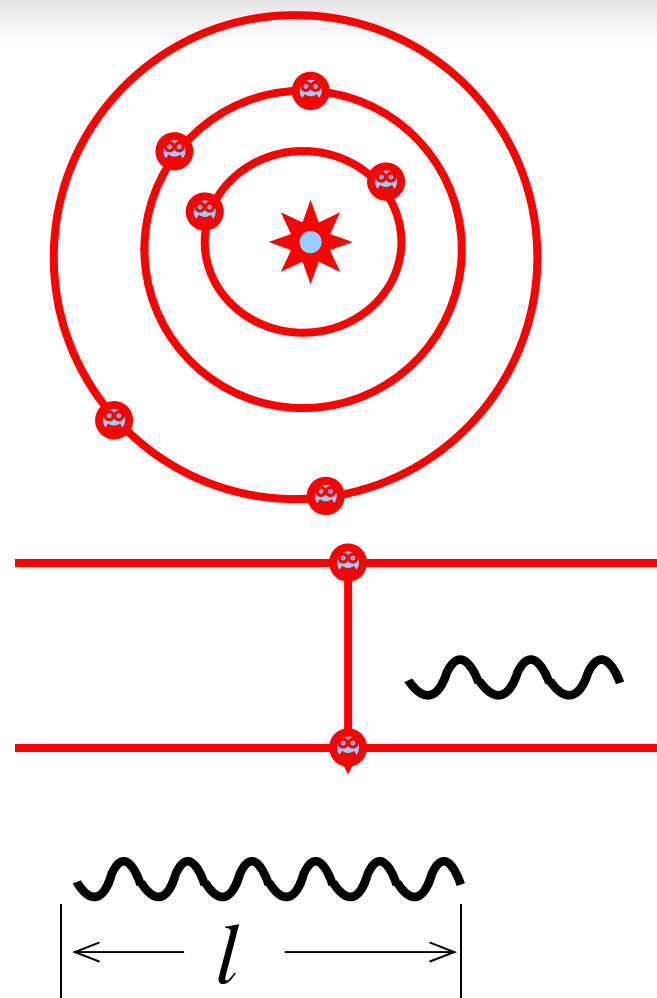
该式称为布喇格公式。

## § 5.1 自然光和偏振光

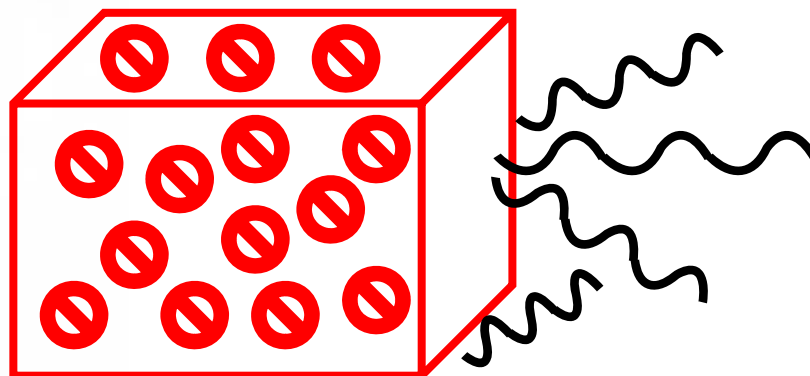
### 一、自然光（非偏振光）

光源上一个原子一次发出的是一个线偏振光波列，持续时间约 $10^{-8}$ 秒。

特点：同一原子发光具有瞬时性和间歇性、偶然性和随机性，而不同原子发光具有独立性。



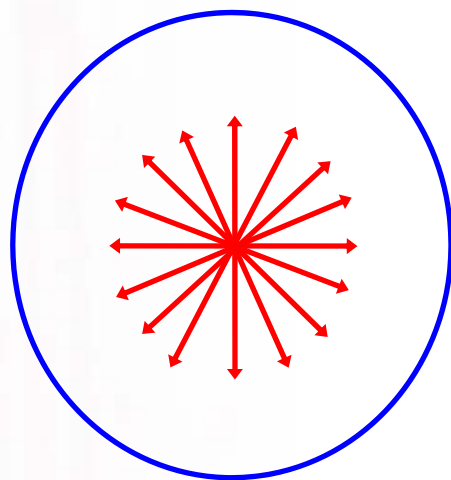
光波列：长度有限，频率一定，振动方向一定



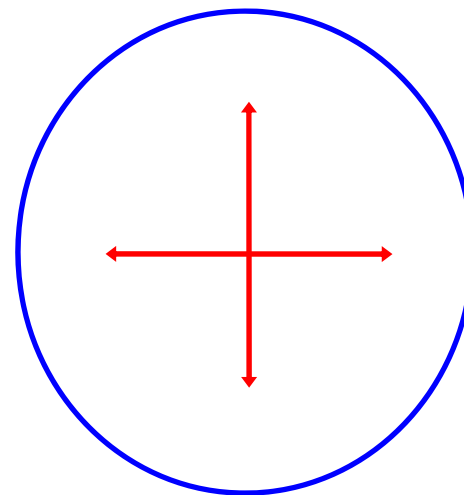
各原子是独立地、随机地发光的。光矢量的大小、方向、初位相等也是随机的。

平均说来这种大量的振幅相同、振动方向任意、彼此没有固定相位关系的光振动的组合叫自然光。

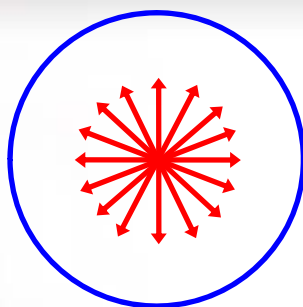
光是横波



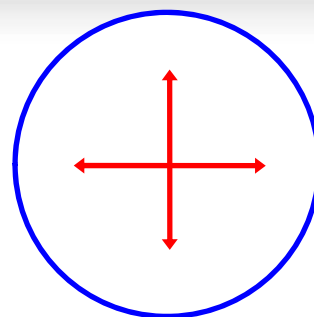
没有优势方向



自然光的分解



没有优势方向



自然光的分解

$E_x$  和  $E_y$  无固定关系:

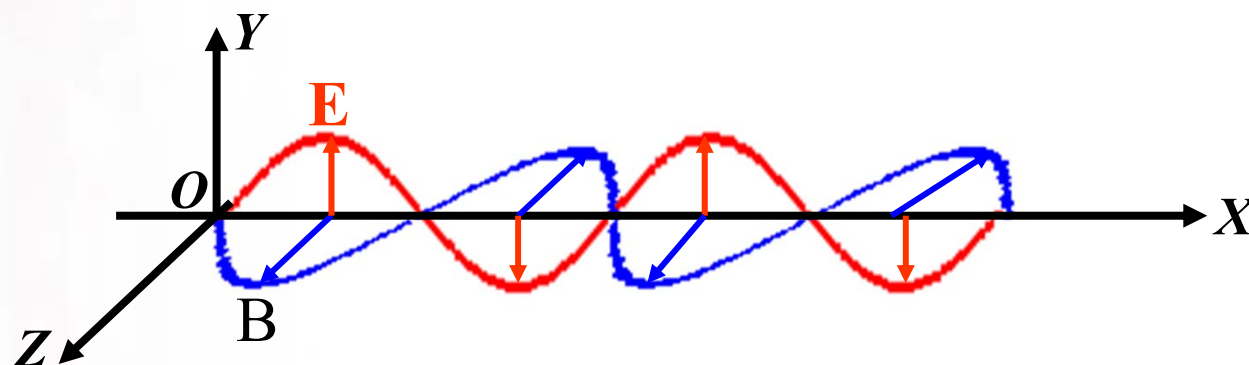
它们是彼此独立的振动,  $\overline{E}_x = \overline{E}_y$

与  $x, y$  方向选择无关

总光强  $I = I_x + I_y = 2I_x = 2I_y$

——非相干叠加

光是一种电磁波，是一种横波



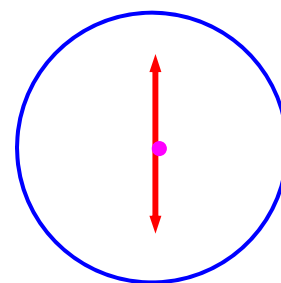
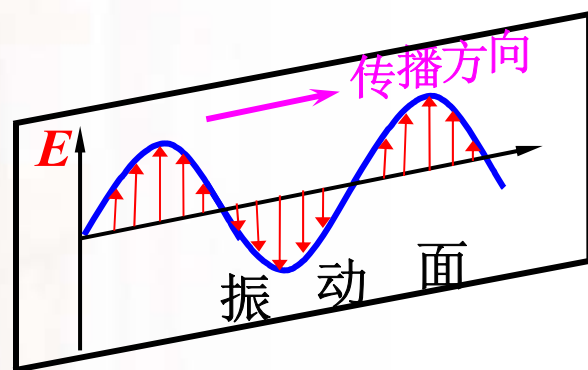
$$B = \frac{E}{C}$$

电磁波中起光作用的主要是电场矢量E: 光矢量



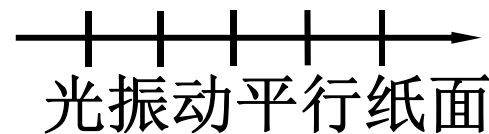
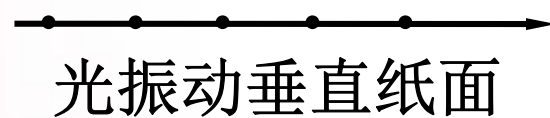
## 二. 完全偏振光

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



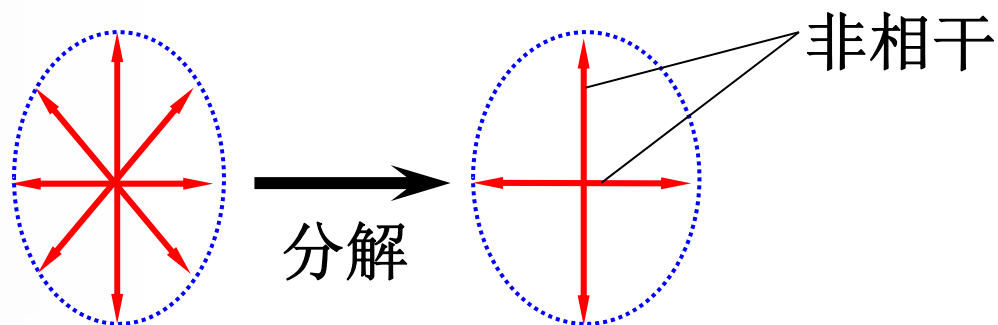
面对光的传播方向看

表示法:

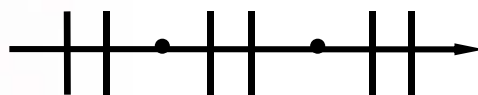


## 部分偏振光

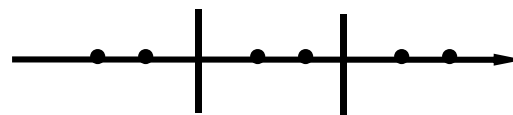
自然光和完全偏振光的混合，就构成了部分偏振光。最常讨论的部分偏振光可看成是自然光和线偏振光的混合，它可以分解如下：



表示法：



平行纸面的  
光振动较强



垂直纸面的  
光振动较强



描写部分偏振光的偏振程度的物理量是偏振度：  
(degree of polarization)

偏振度：

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

$I_t$  一部分偏振光的总强度

$I_p$  一部分偏振光中包含的完全偏振光的强度

$I_n$  一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  $0 < P < 1$

## 光的偏振状态的获得

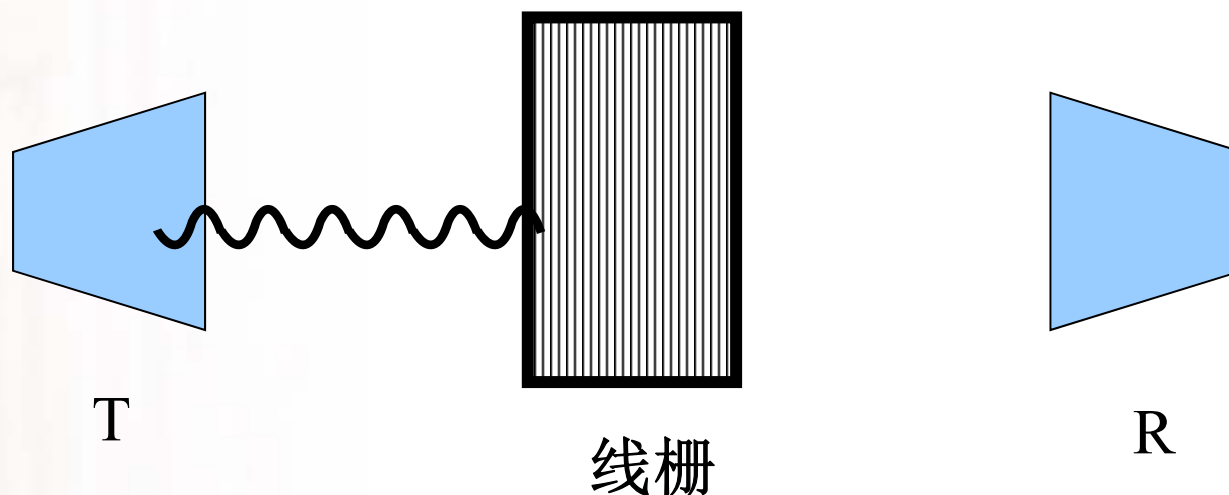
- 由介质吸收引起的光的偏振
- 由反射引起的光的偏振
- 由双折射引起的光的偏振
- 由散射引起的光的偏振

- 由介质吸收引起的光的偏振

起偏 —— 从自然光获得偏振光

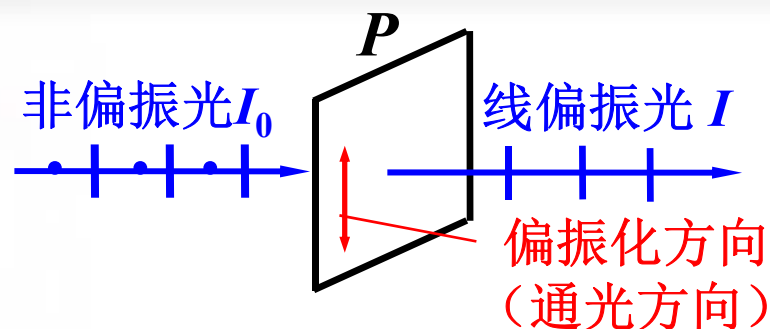
▲ 起偏的原理：利用某种光学的不对称性

▲ 偏振片（**Polaroid**）（获得线偏振光）



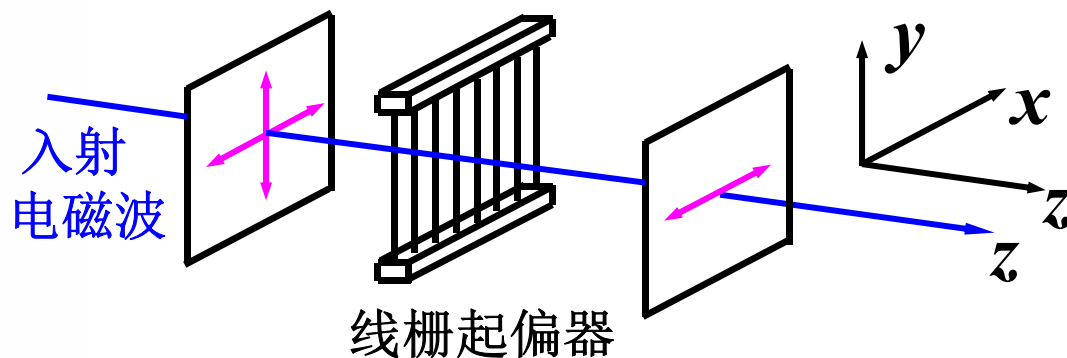
微波吸收实验

# ▲ 线偏振光的起偏：

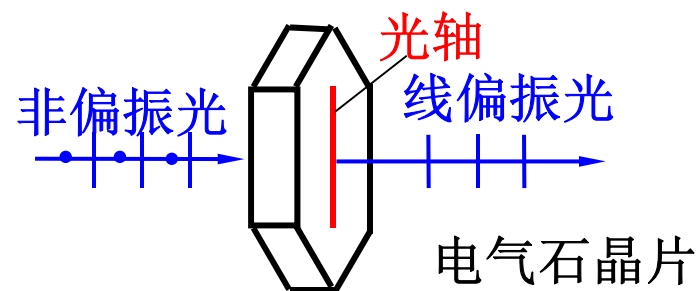


$$I = \frac{1}{2} I_0$$

- 分子型：  
(聚乙烯醇)



- 微晶型：  
(硫酸碘奎宁)



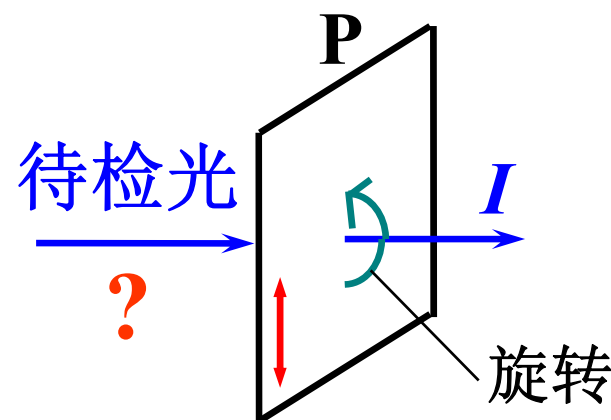
## 线偏振光的检偏

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

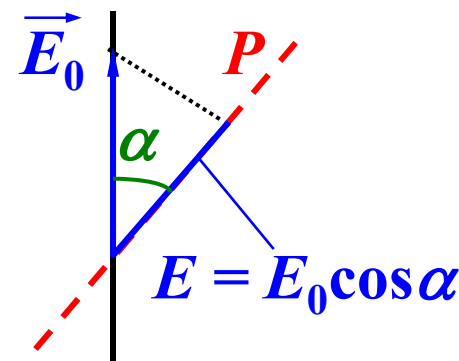
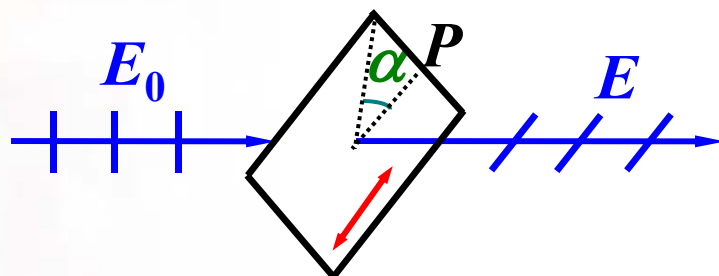
光混合而成的部分偏振光



思考

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

## 马吕斯定律 (Malus law)



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

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

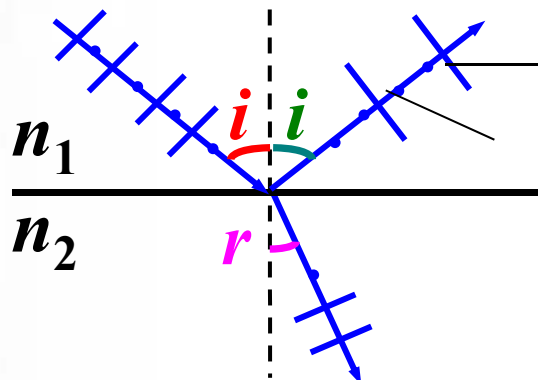
$$\alpha = 0, \quad I = I_{\max} = I_0,$$

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



- 由反射引起的光的偏振

- 一. 反射时光的偏振



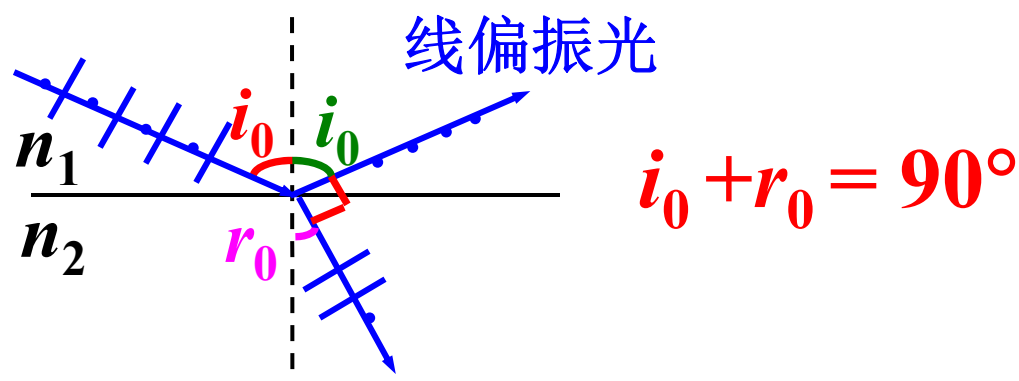
自然光反射和折射后成为部分偏振光

**反射光**垂直入射面的分量比例大，

**折射光**平行入射面的分量比例大，

入射角 $i$ 变  $\rightarrow$  反射、折射光的偏振度也变。

$i = i_0$  时，反射光只有垂直线偏振分量：



$i_0$  — 布儒斯特角 (**Brewster angle**) 或 起偏角

由  $n_1 \sin i_0 = n_2 \sin r_0 = n_2 \cos i_0$

有  $\boxed{\operatorname{tg} i_0 = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}}$  — 布儒斯特定律 (1812年)  
(**Brewster Law**)

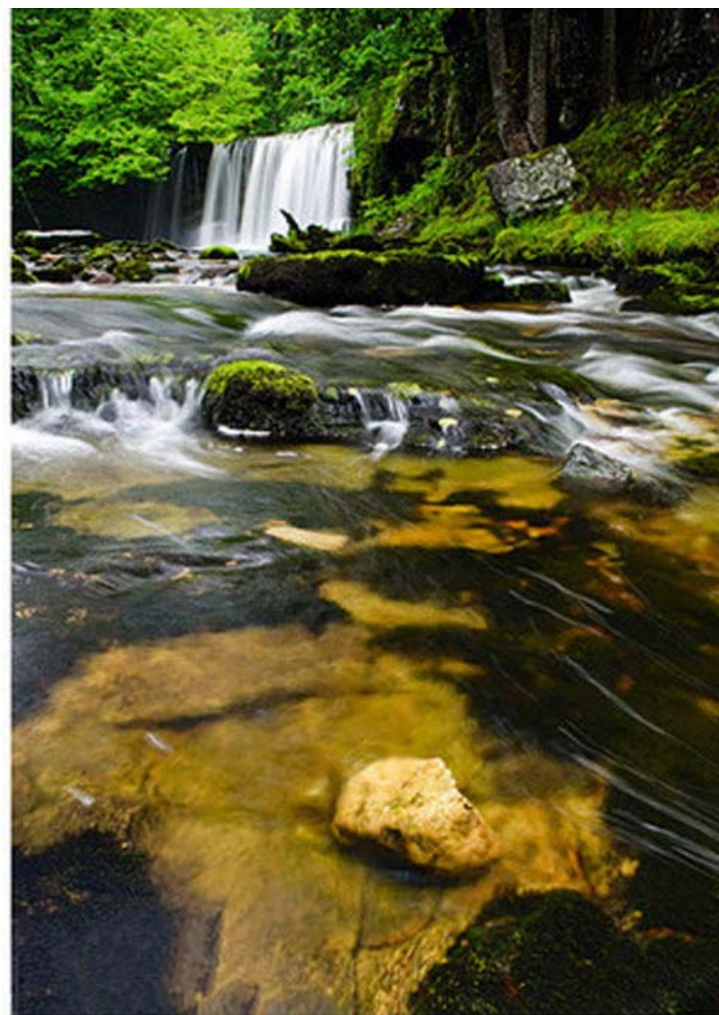
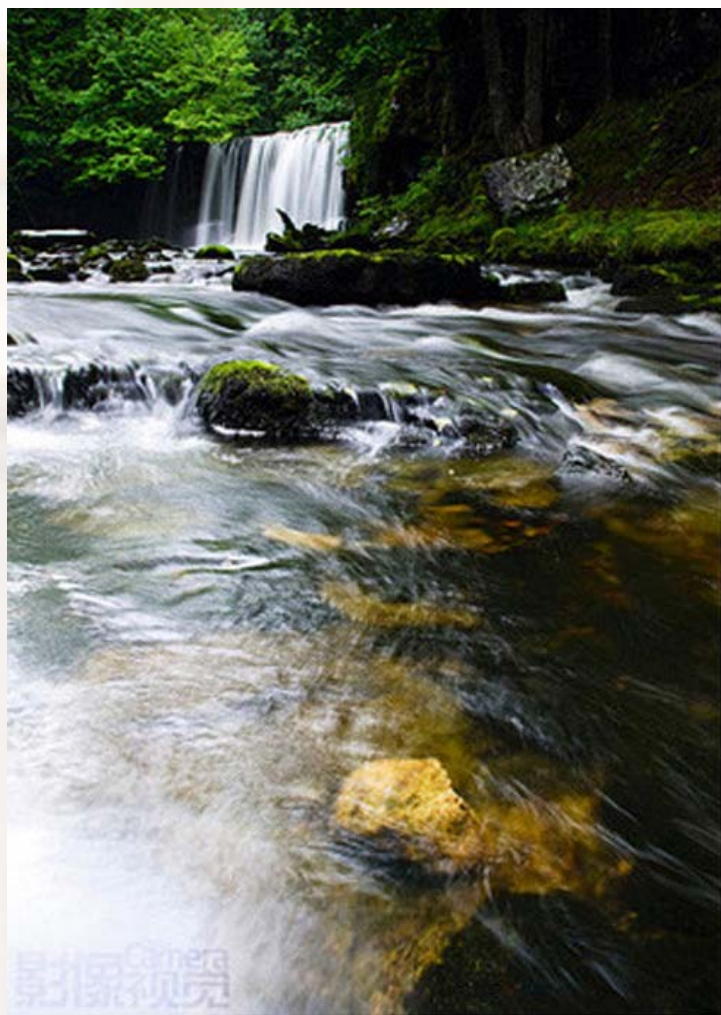


若  $n_1 = 1.00$  (空气)  $n_2 = 1.50$  (玻璃) ,

$$\left. \begin{array}{l} \text{则: 空气} \rightarrow \text{玻璃} \quad i_0 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1.50}{1.00} = 56^\circ 18' \\ \text{玻璃} \rightarrow \text{空气} \quad i'_0 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1.00}{1.50} = 33^\circ 42' \end{array} \right\} \text{互余}$$









有反射光干扰  
的橱窗



加偏振片消除了反  
射光的干扰





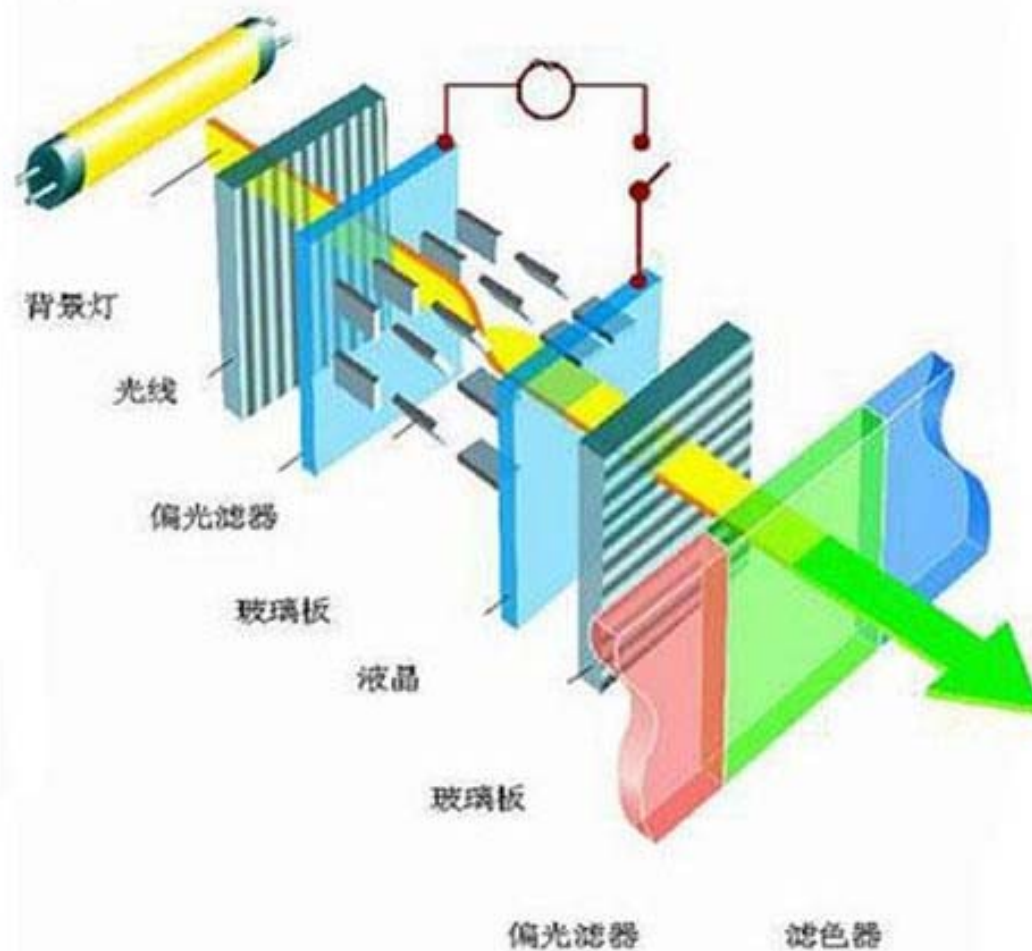
***LCD***

***LED***

***e-ink***



背景灯发出的光线穿过/不穿过液晶体,然后由滤光器处理彩色像素。

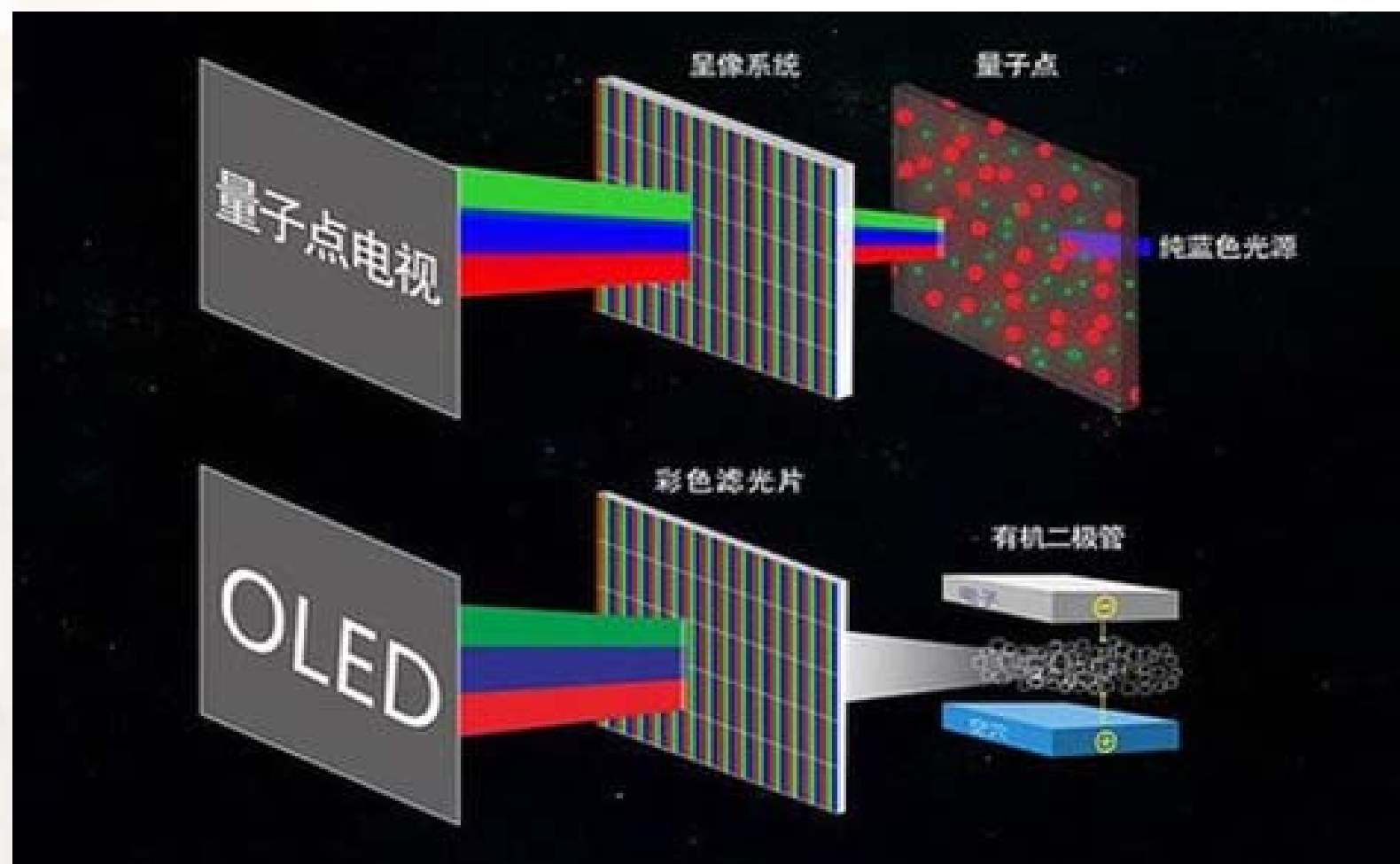






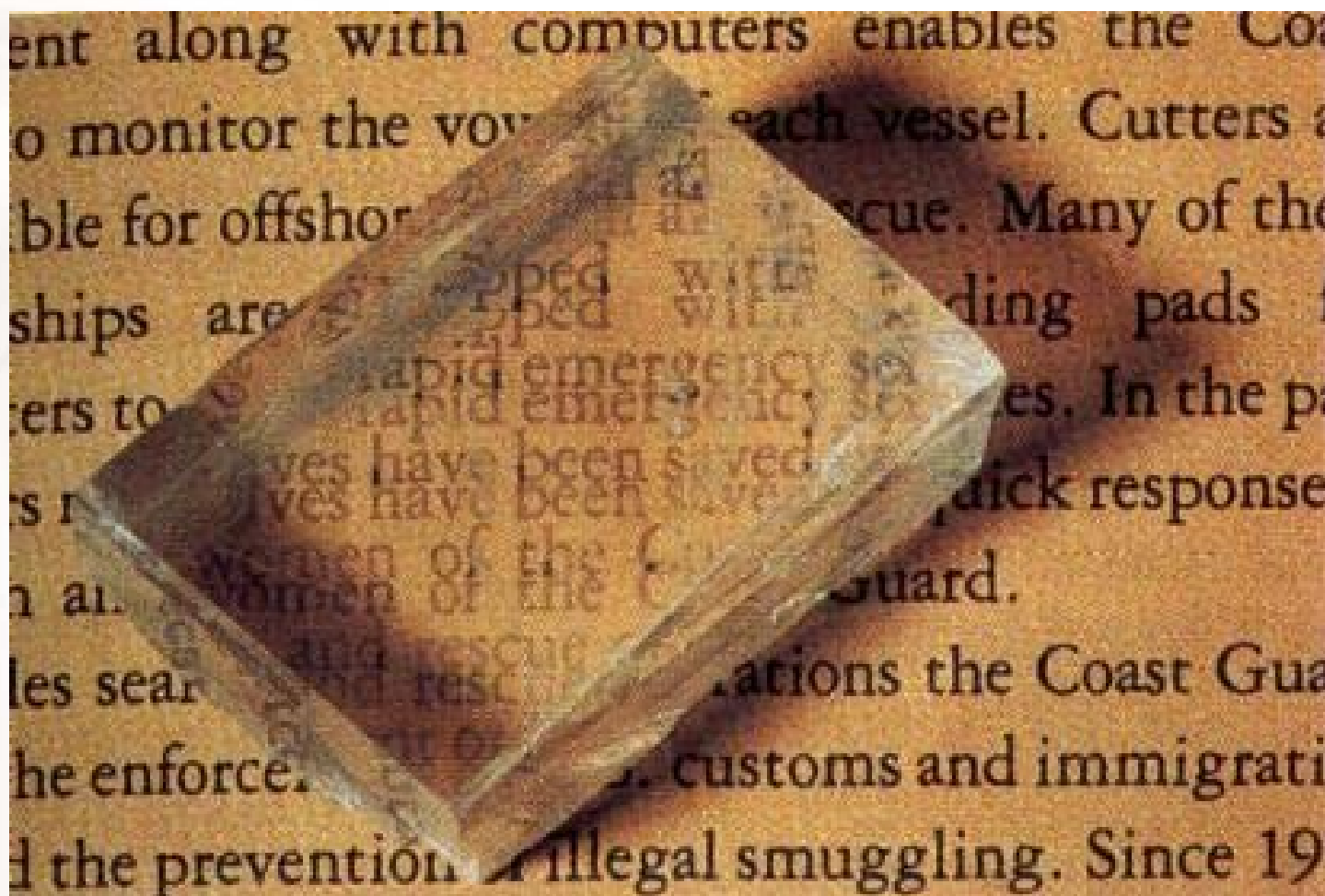






- 由双折射引起的光的偏振

- 一. 双折射 (**birefringence**)





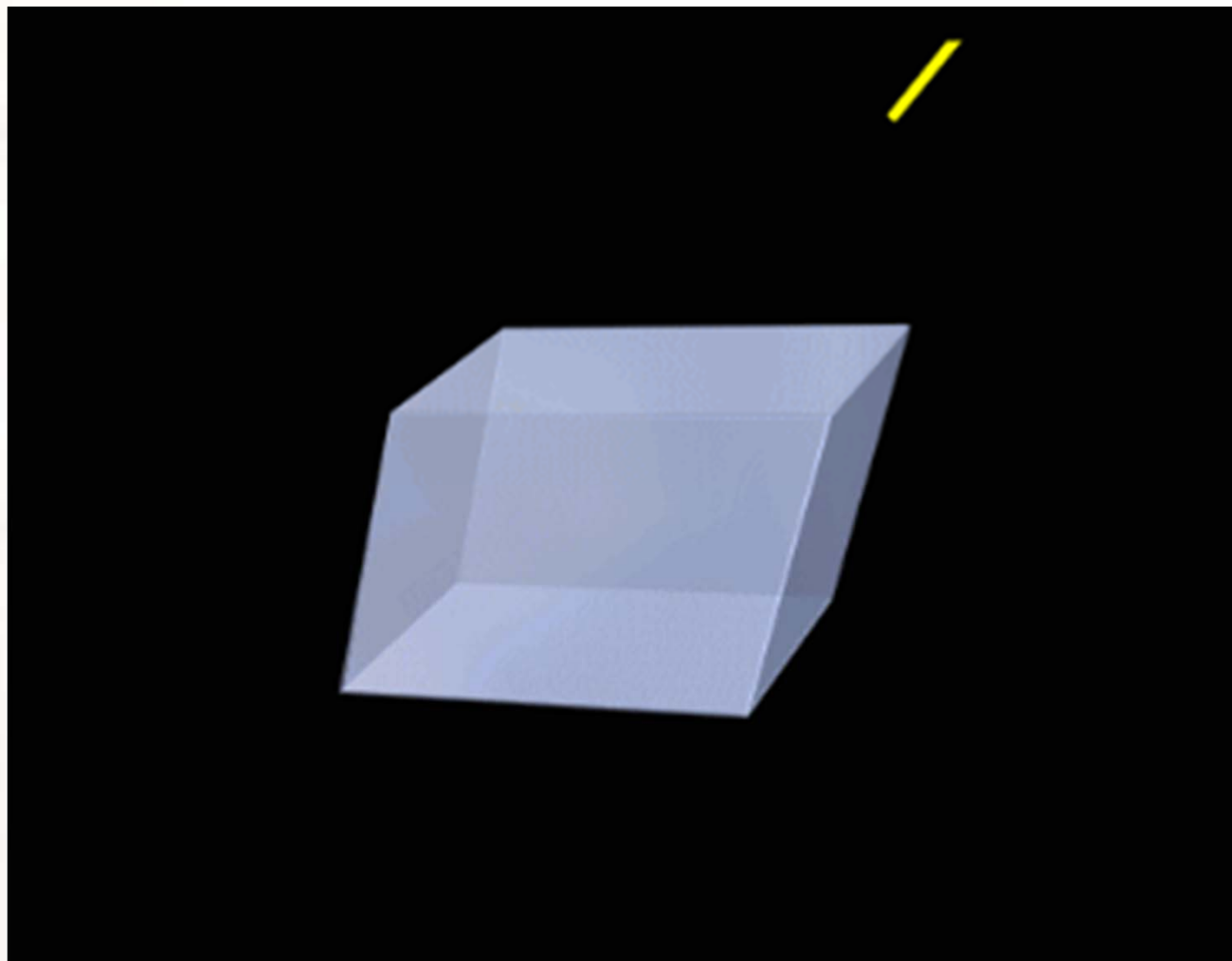


## 为什么会有双折射现象？

-----各向异性物质

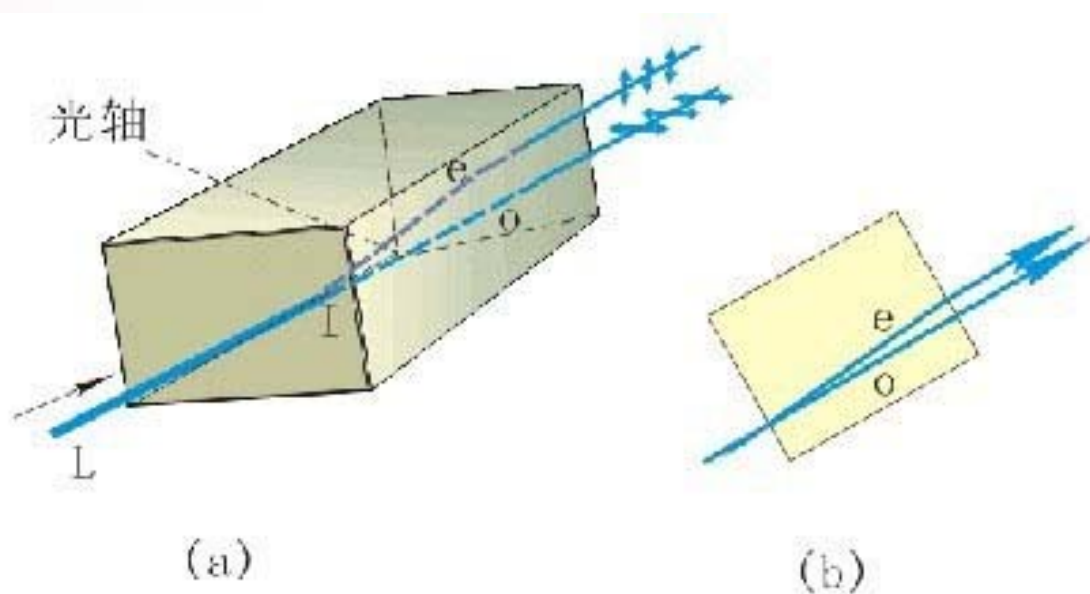
光波入射非均质体，其传播速度和折射率值随振动方向不同而改变，其折射率值不止一个；

除特殊方向以外，都要发生双折射，分解成振动方向互相垂直、传播速度不同、折射率不等的两种偏振光，此现象即为双折射。



# 双折射的两束光振动方向相互垂直

-----偏振光







## 晶体的光轴 (optical axis of crystal)

**O**光在晶体中各个方向的折射率相同，传播速度在各个方向也相同

**e**光在晶体中各个方向的折射率不同，传播速度随方向的不同而改变。

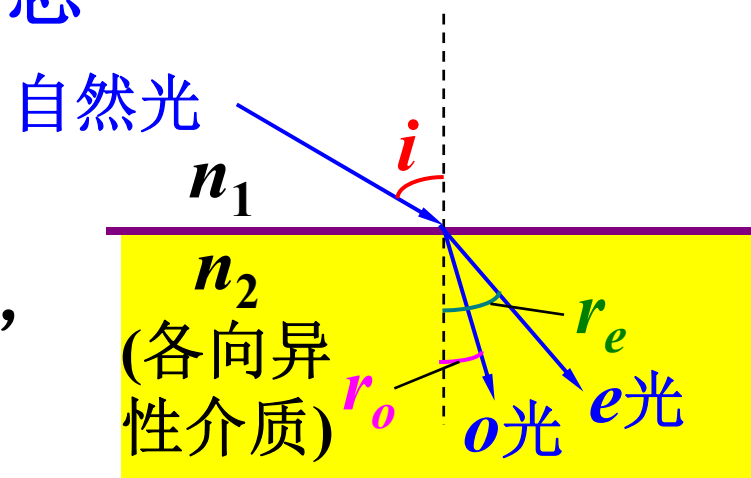
当光在晶体内沿某个特殊方向传播时**不发**生双折射，该**方向**称为晶体的**光轴**。

- 由双折射引起的光的偏振

## 双折射 (birefringence) 的概念

### 1. 双折射:

一束光入射到各向异性介质时，折射光分成两束的现象。



### 2. 寻常 (o) 光和非寻常 (e) 光

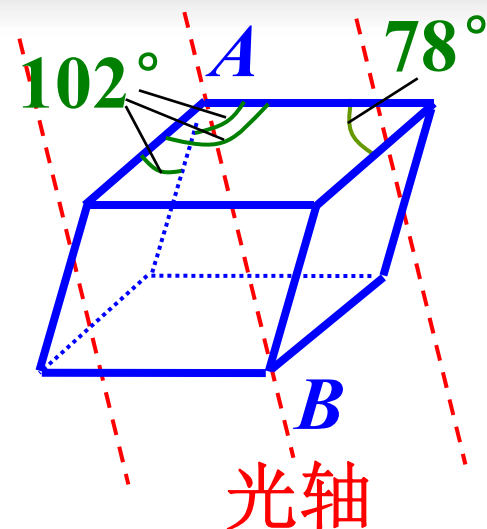
**o光** : 遵从折射定律  $n_1 \sin i = n_2 \sin r_o$

**e光** : 一般不遵从折射定律  $\frac{\sin i}{\sin r_e} \neq \text{const.}$

**e光折射线也不一定在入射面内。**

例如，方解石晶体（冰洲石）

与三个棱边成等角的方向  
就是光轴。

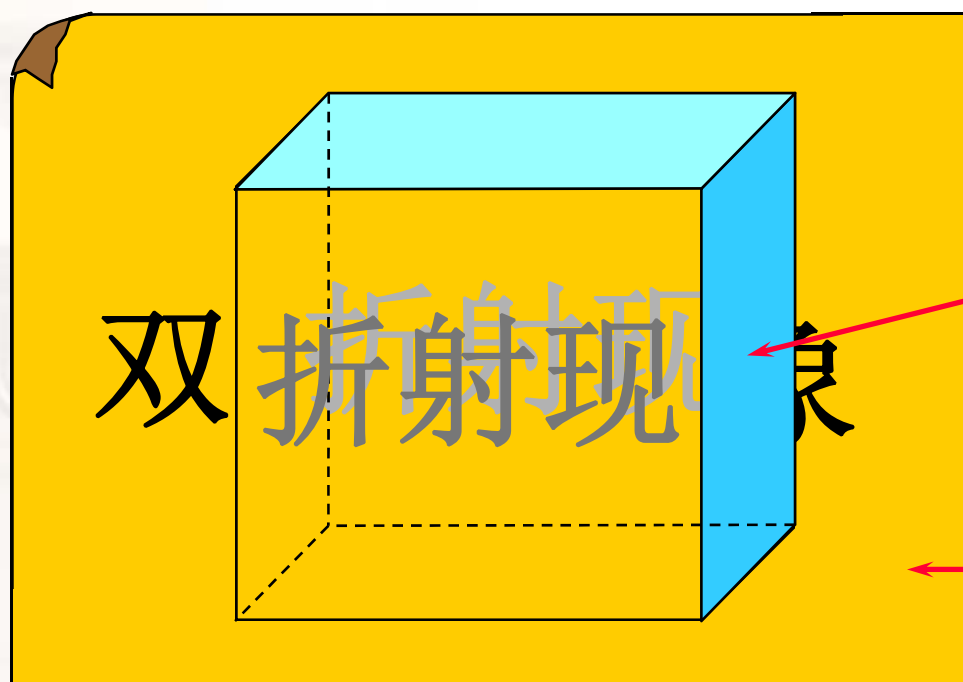


光轴是一个特殊的方向，

凡平行于此方向的直线均为光轴。

单轴晶体：只有一个光轴的晶体，如方解石。

双轴晶体：有两个光轴的晶体，如云母。

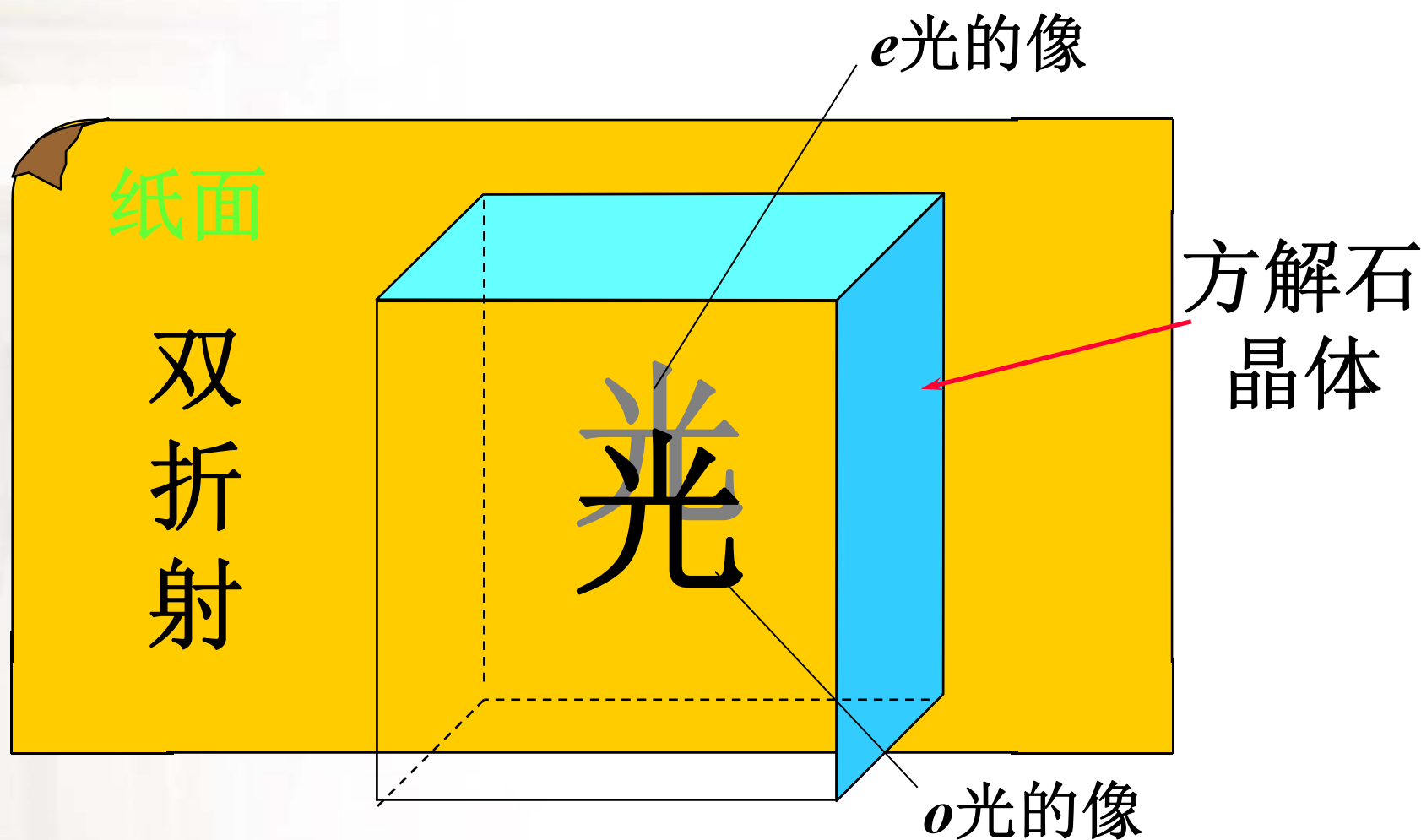


方解石晶体

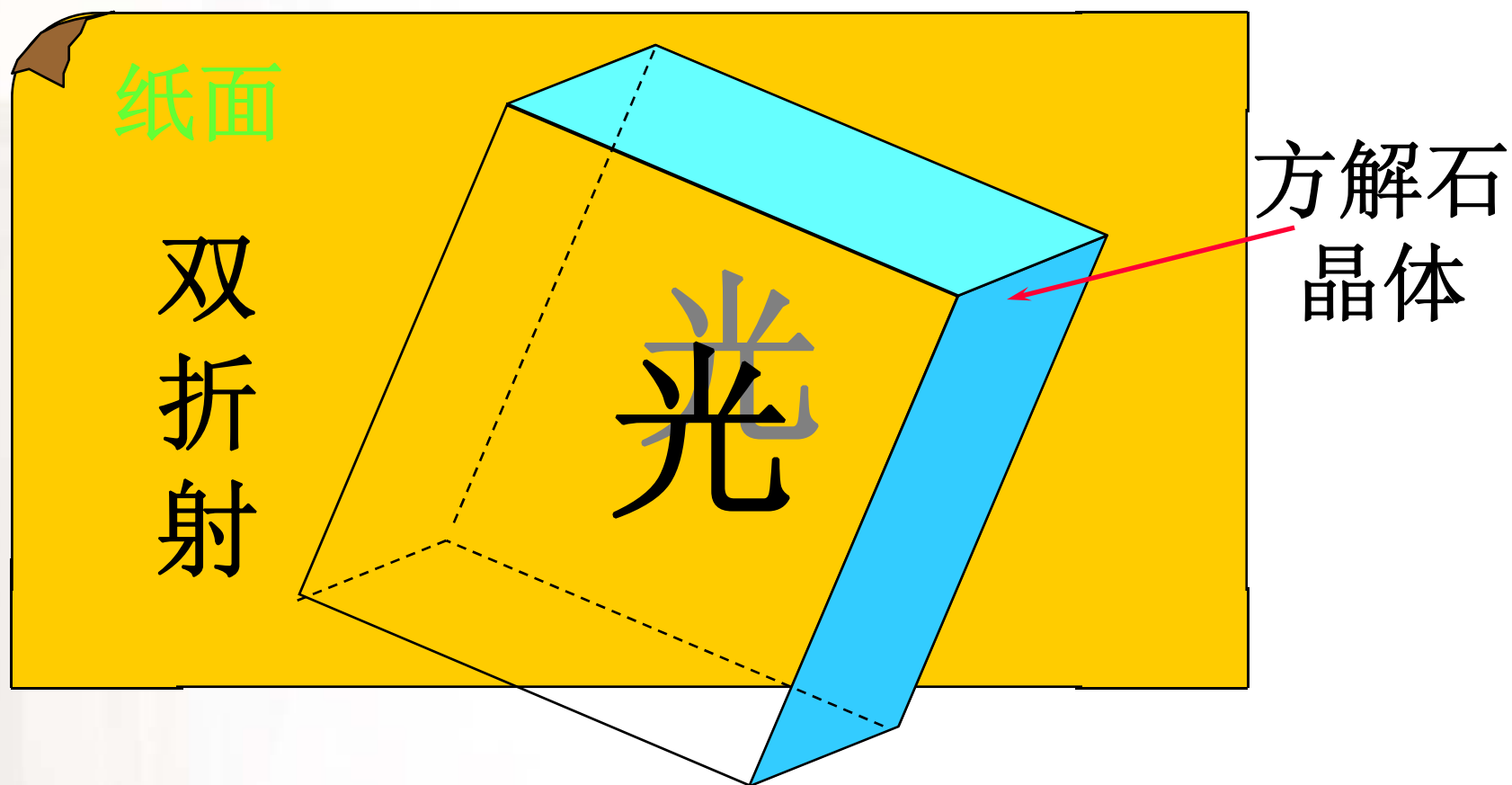
$\text{CaCO}_3$

纸面

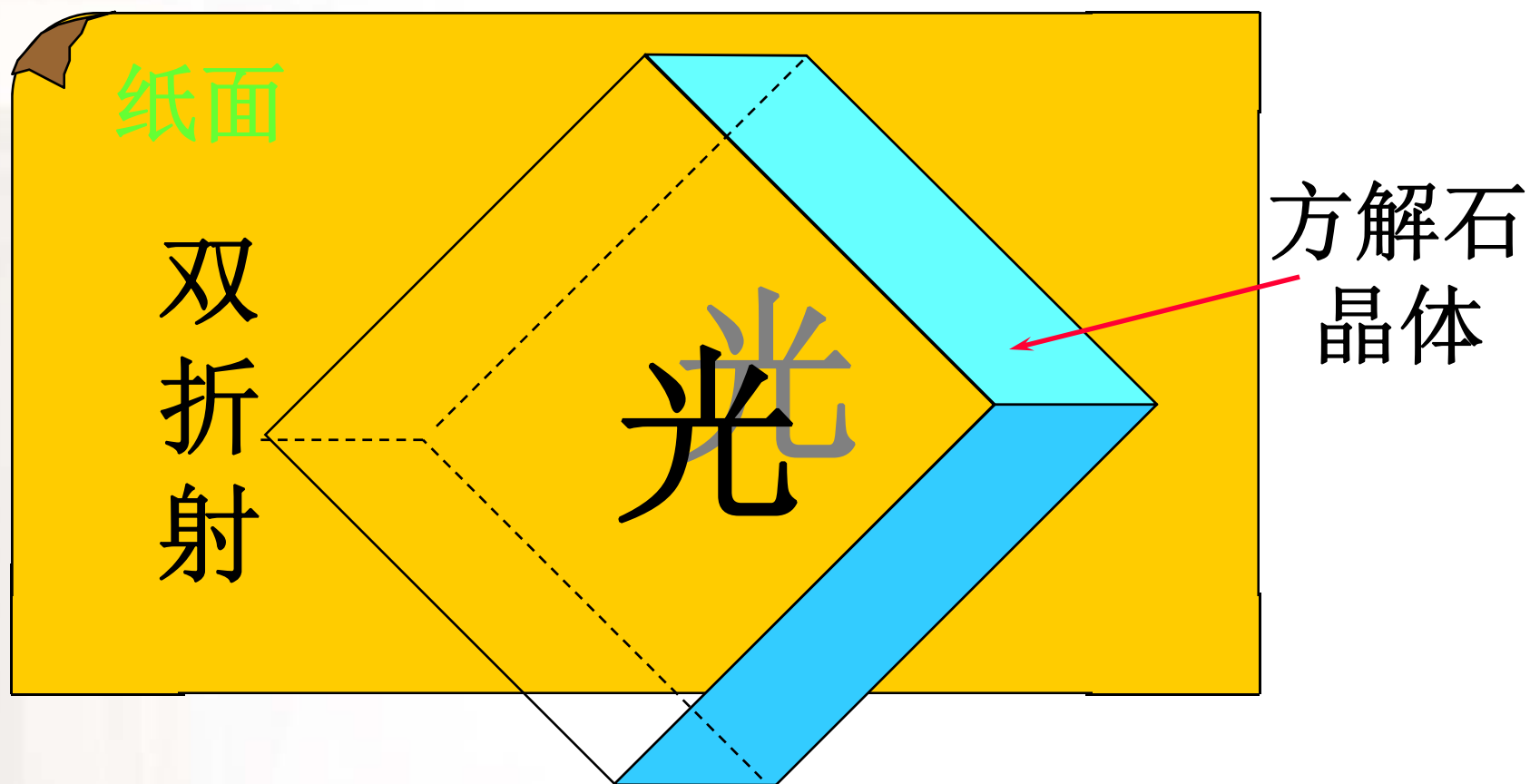
当方解石晶体旋转时， $o$  光的像不动， $e$  光的像围绕  $o$  光的像旋转。



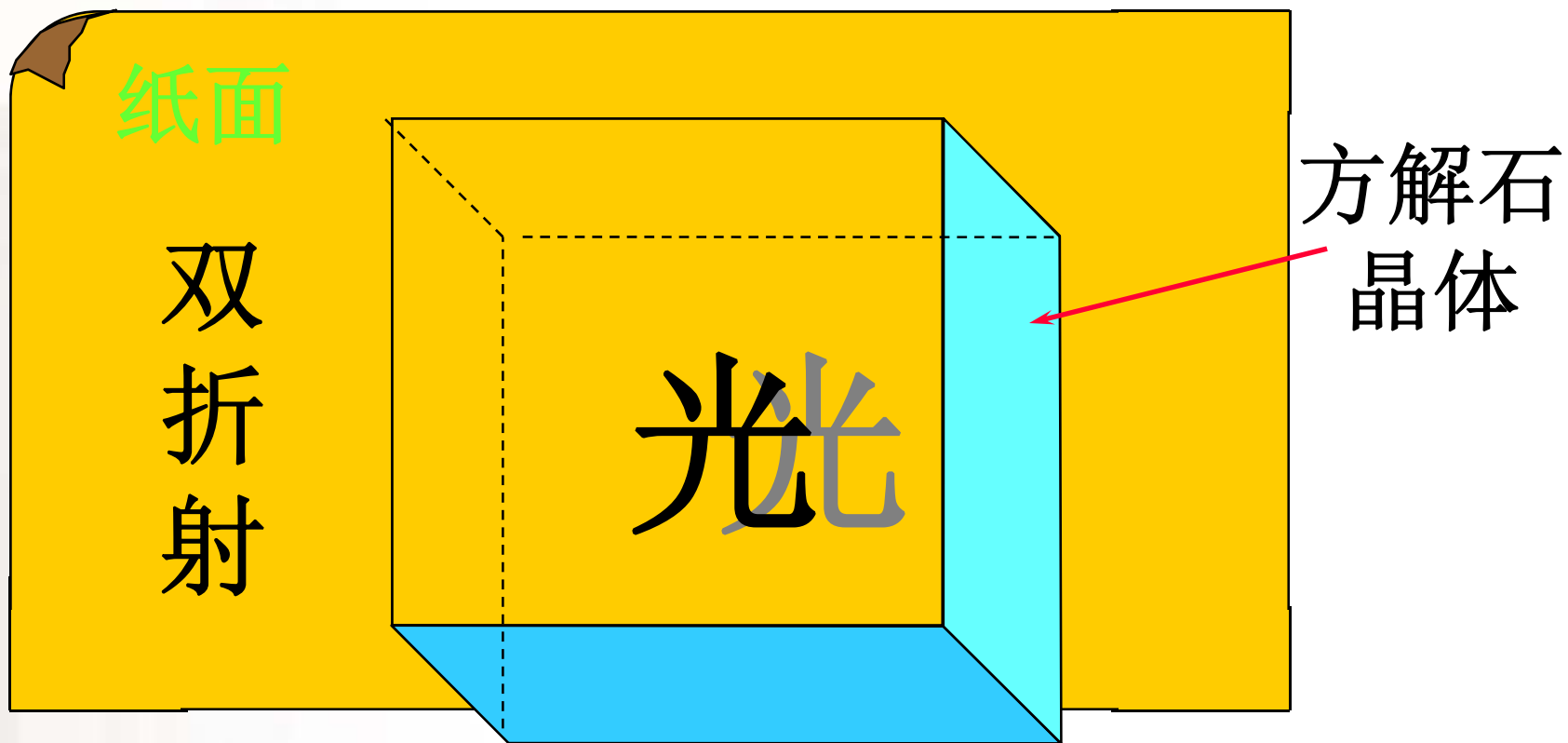
继续旋转方解石晶体：



继续旋转方解石晶体：

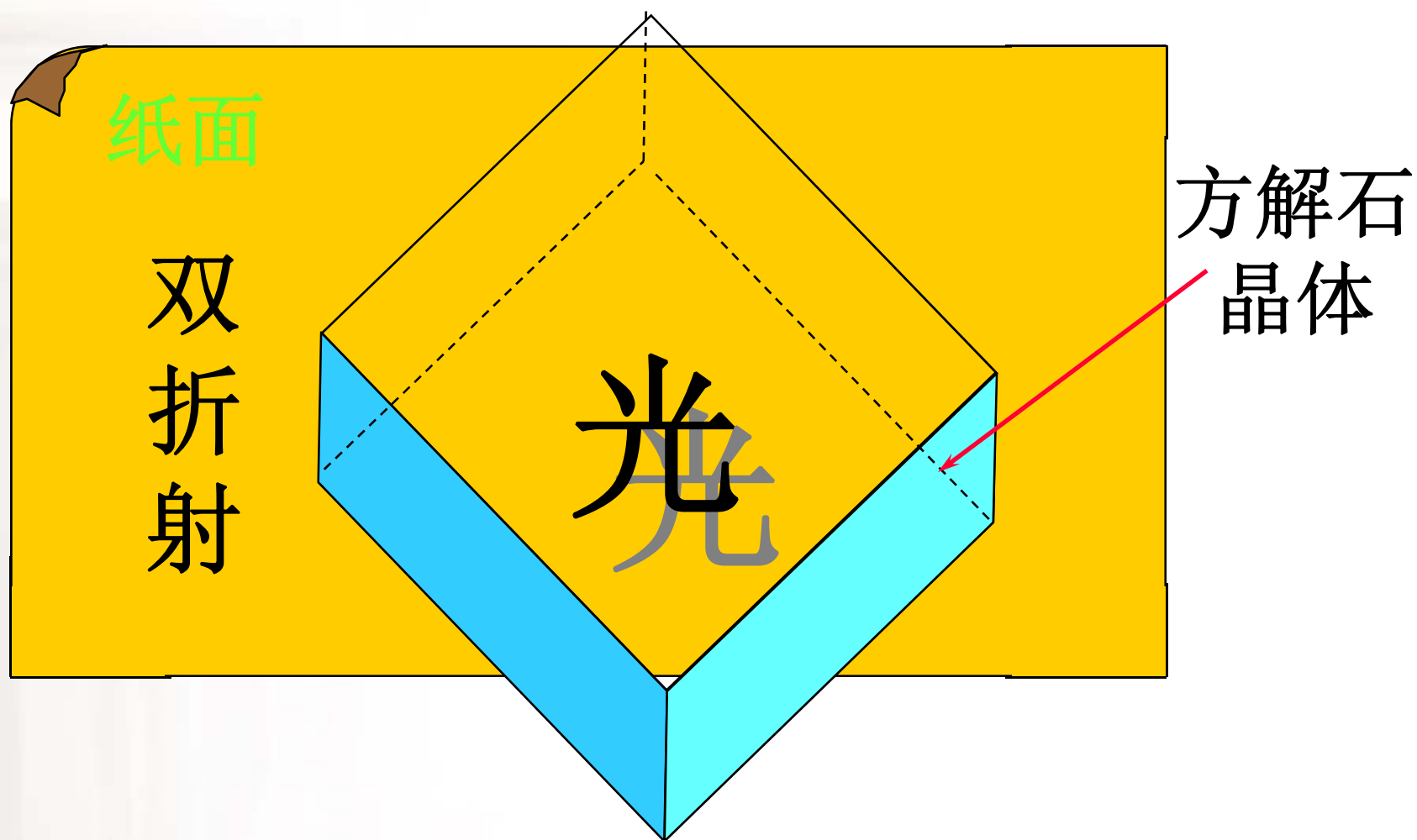


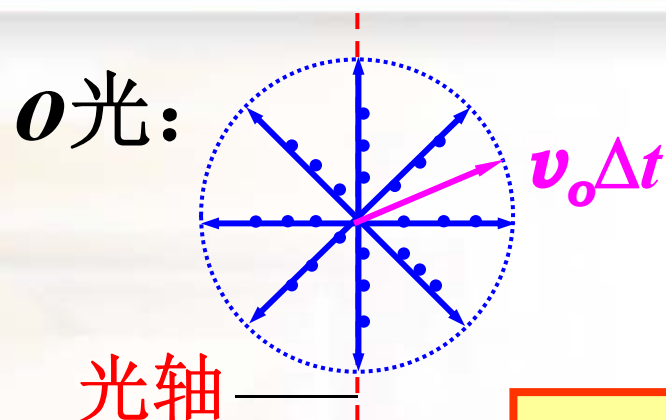
继续旋转方解石晶体：





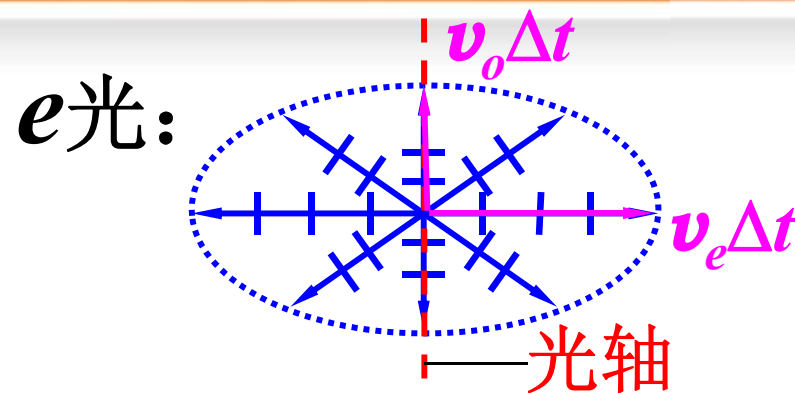
继续旋转方解石晶体：





$$n_o = \frac{c}{v_o}$$

$n_o, n_e$  称为  
晶体的主折射率

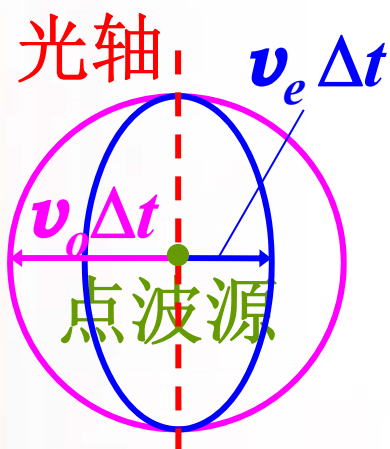


$$v_o \rightarrow n_o$$

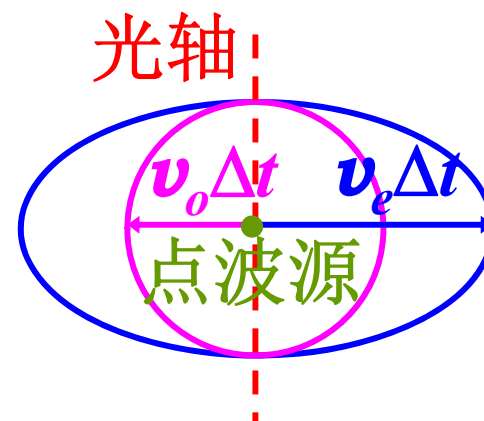
$$v_e \rightarrow n_e = \frac{c}{v_e}$$

正晶体:  $n_e > n_o (v_e < v_o)$     负晶体:  $n_e < n_o (v_e > v_o)$

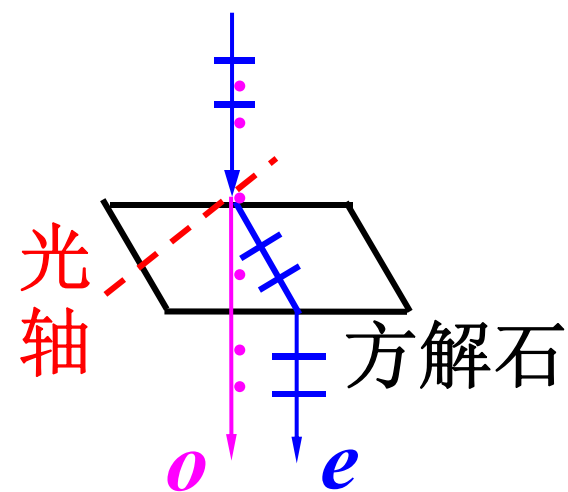
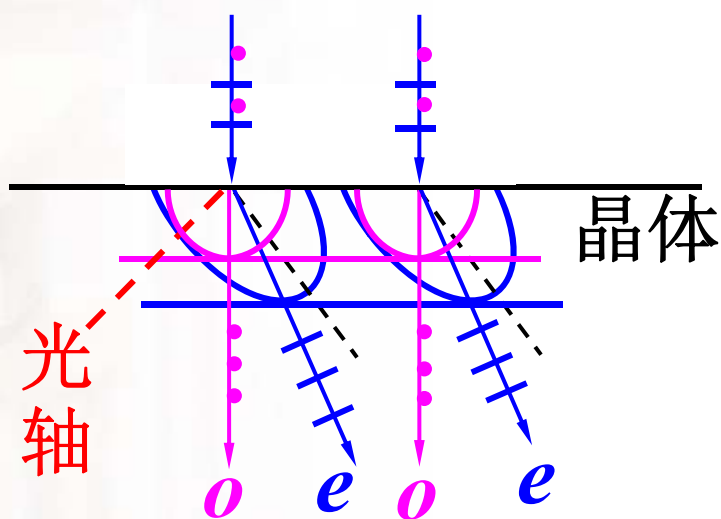
如: 石英  
、冰



如: 方解石  
、红宝石

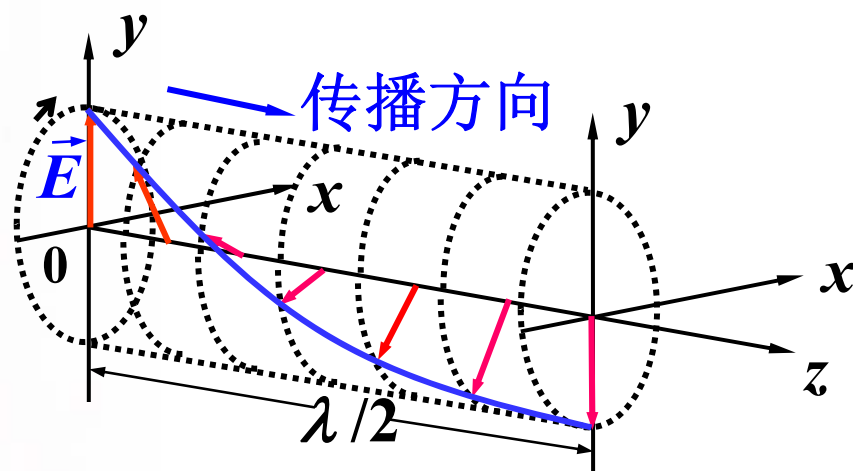
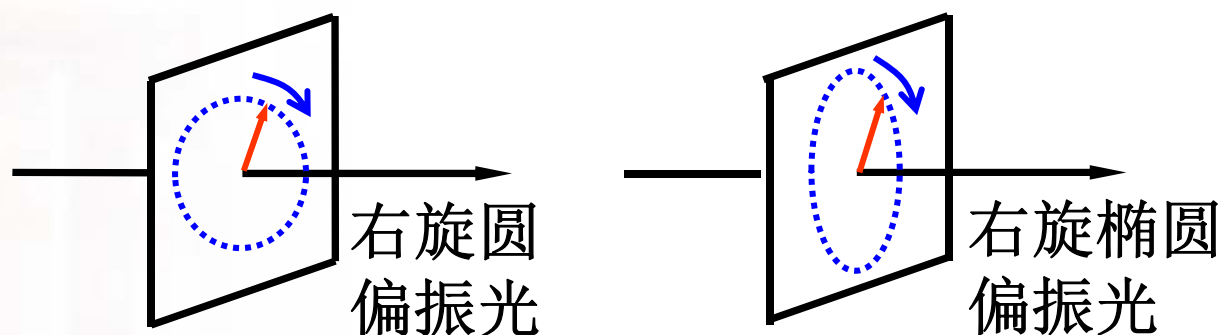


## 光轴与晶体表面斜交，自然光垂直入射



这正是前面演示的情形。

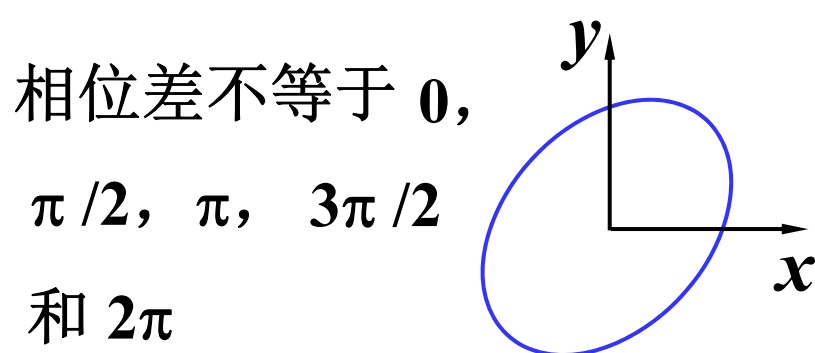
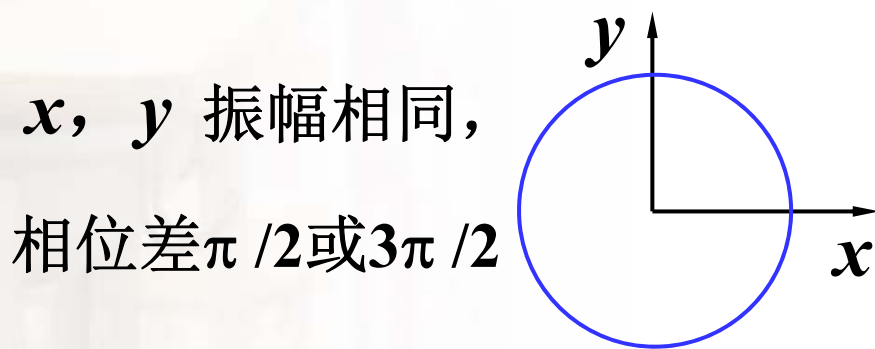
# 圆偏振光 (circularly polarized light) 和 椭圆偏振光 (elliptically polarized light)



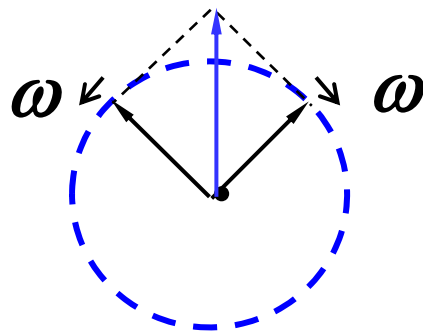
某时刻右旋圆偏振光  $\vec{E}$  随  $z$  的变化

线、圆和椭圆偏振光均称为完全偏振光。

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。



反之，线偏振光则可以看到是两束频率相同、相位相同、振幅相同、传播方向亦相同的左、右旋圆偏振光的合成。



谢谢！

