第 十一 章 （波动）光 学

1、光矢量：$\vec{E}$ 矢量

2、单色光和复色光

单色光 — 具有单一频率（波长）的光波

复色光 — 含多种频率（波长）的光

3、光的干涉：　条件
- 振动方向相同
- 频率相同
- 有恒定的位相差

4、获得相干光的两类方法：
1）分波阵面法
2）分振幅法

光在真 空 中 的 速 度：c ，波长：λ ，频率：ν

$$c = \lambda \nu$$

光在透明介质中的速度：u ，波长：λ_n ，频率：ν

$$u = \lambda_n \nu$$

透明介质的折射率 n ：

$$\boxed{n = \frac{c}{u}} = \frac{\lambda}{\lambda_n}$$

透明介质中的波长 λ_n：

$$\boxed{\lambda_n = \frac{\lambda}{n}}$$

真空中的波长

介质的折射率

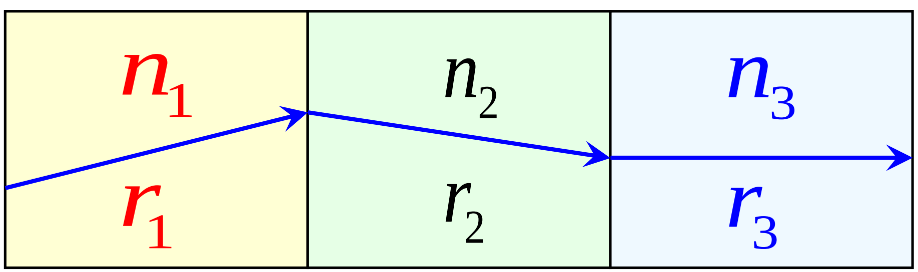
一、光的干涉　　（二）、光程与光程差

1、光程： 光通过某一介质的光程等于光在相同时间里在真空中所传播的几何路程

$$\boxed{L = nr}$$

物理意义： 光在介质中经过的路程折算到同一时间内在真空中经过的相应路程。

光连续通过几种透明介质的光程:



$$\boxed{L = \sum_i n_i r_i}$$

2、光程差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda}\varDelta$$

λ ：真空中的波长

两束相干光
光程(之)差

$$\boxed{\varDelta = L_2 - L_1 = \left(\sum_i n_i r_i\right)_2 - \left(\sum_j n_j r_j\right)_1}$$

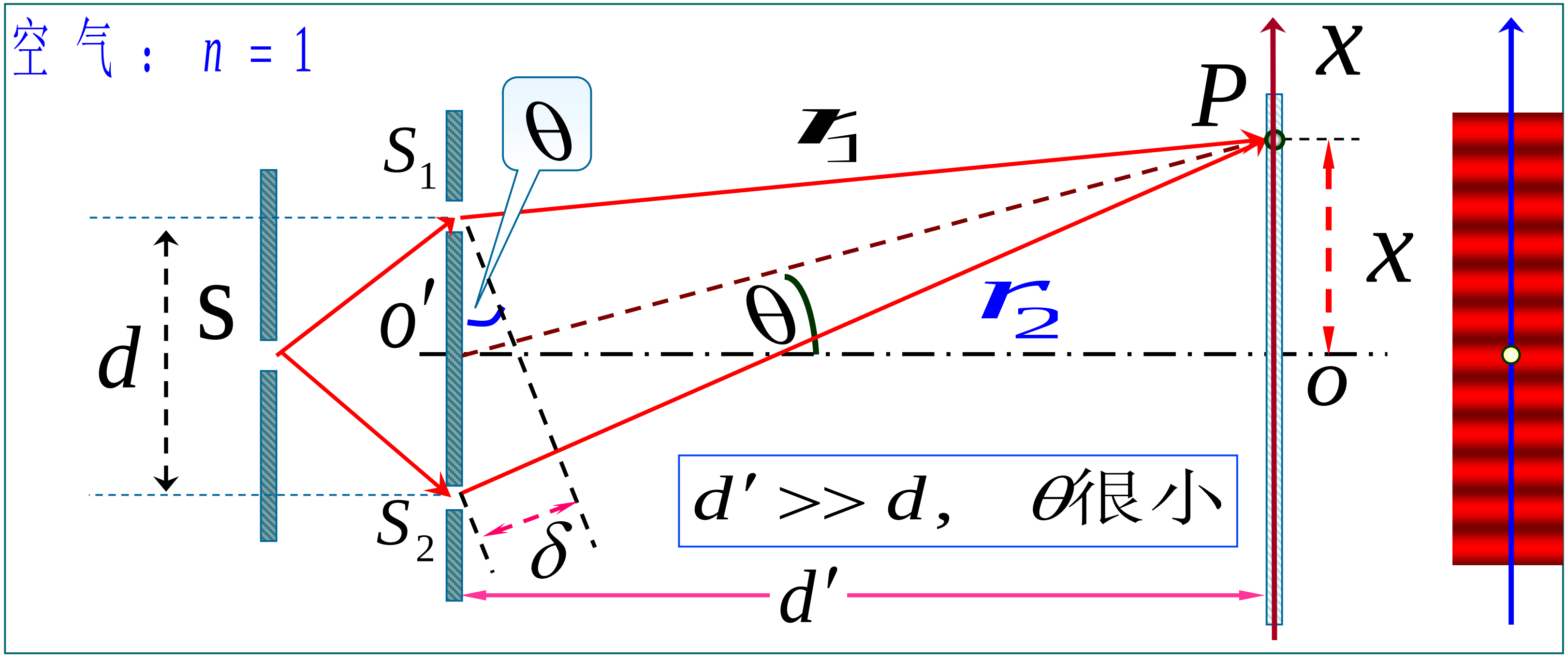
3、光的干涉加强与减弱的条件

- 1)干涉加强(明纹中心)：　$\Delta\varphi = \pm 2k\pi, \quad k = 0,1,2,\cdots$

$$\boxed{\varDelta = \pm 2k\frac{\lambda}{2}, \quad k = 0,1,2,\cdots}$$

- 2)干涉减弱(暗纹中心)：　$\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi, \quad k = 0,1,2,\cdots$

$$\boxed{\varDelta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}, \quad k = 0,1,2,\cdots}$$



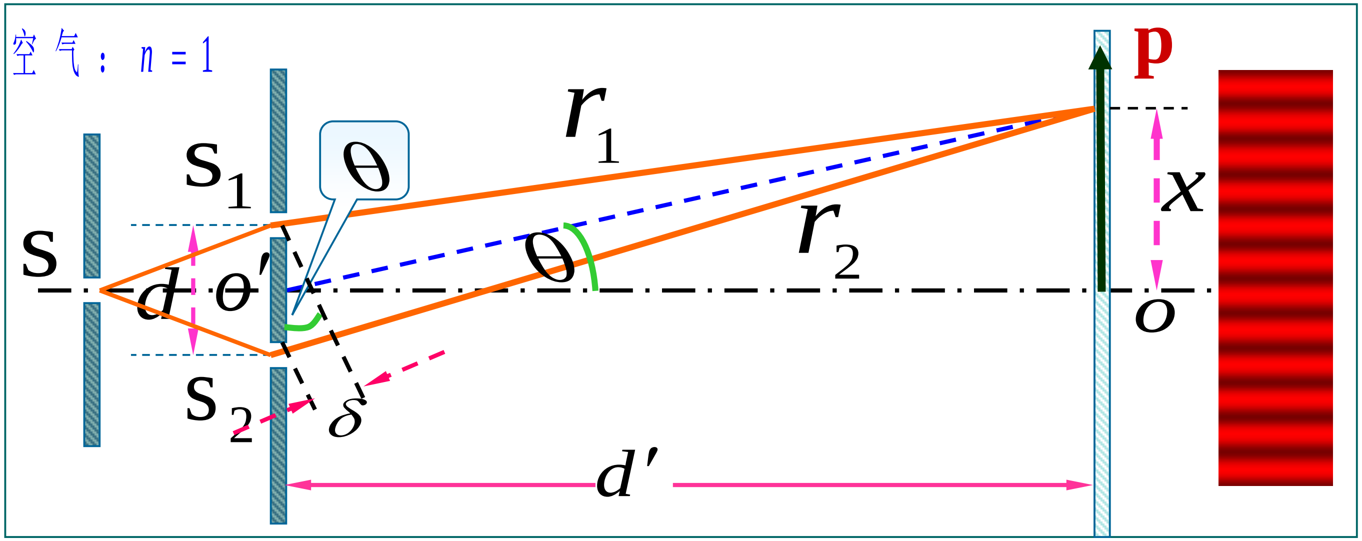
设：$\overline{SS_1} = \overline{SS_2}$

波程差： $\delta = (\overline{SS_2} + r_2) - (\overline{SS_1} + r_1) = r_2 - r_1$

$$\delta = r_2 - r_1 \approx d \sin\theta$$

θ很小　$$\approx d \tan\theta = d\frac{x}{d'}$$

$$\boxed{\delta = r_2 - r_1 \approx d\frac{x}{d'}}$$



$$\delta = d\,\frac{x}{d'}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

1、干涉加强(明纹)：

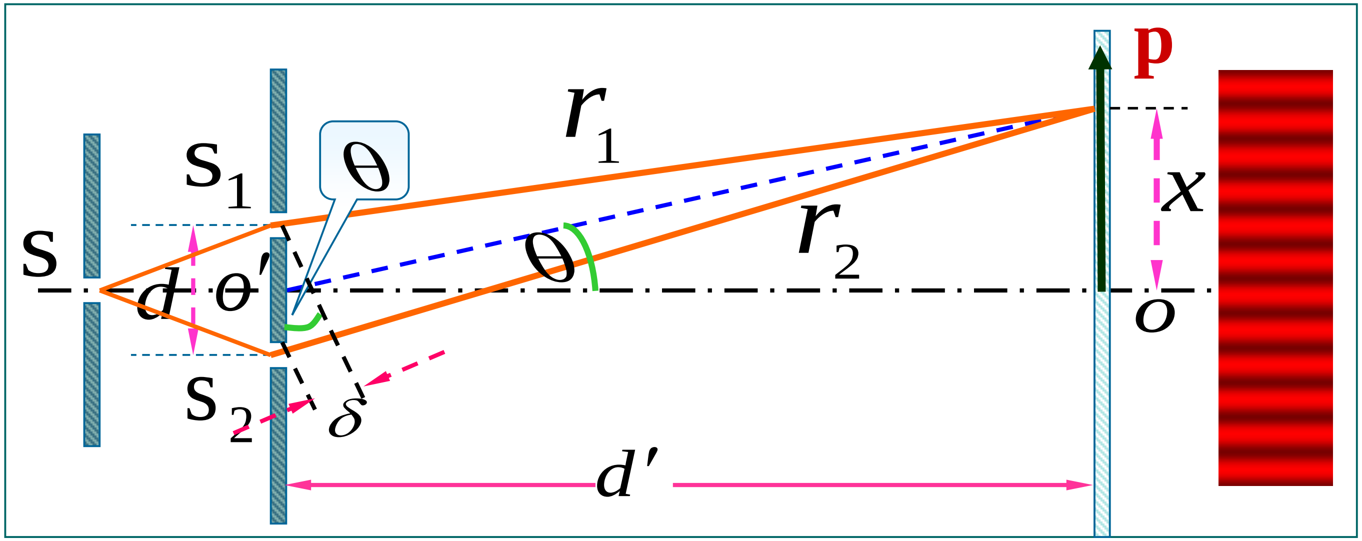
$$\Delta\varphi = \pm 2k\pi,\ \ k = 0,1,2,\cdots$$

$$\delta = \pm 2k\frac{\lambda}{2},\ \ k = 0,1,2,\cdots$$

明条纹中心的位置:

$$x = \pm 2k\cdot\frac{d'\lambda}{2d},\ \ k = 0,1,2,\cdots$$

k 称为:
条纹的级数



$$\delta = d\frac{x}{d'}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

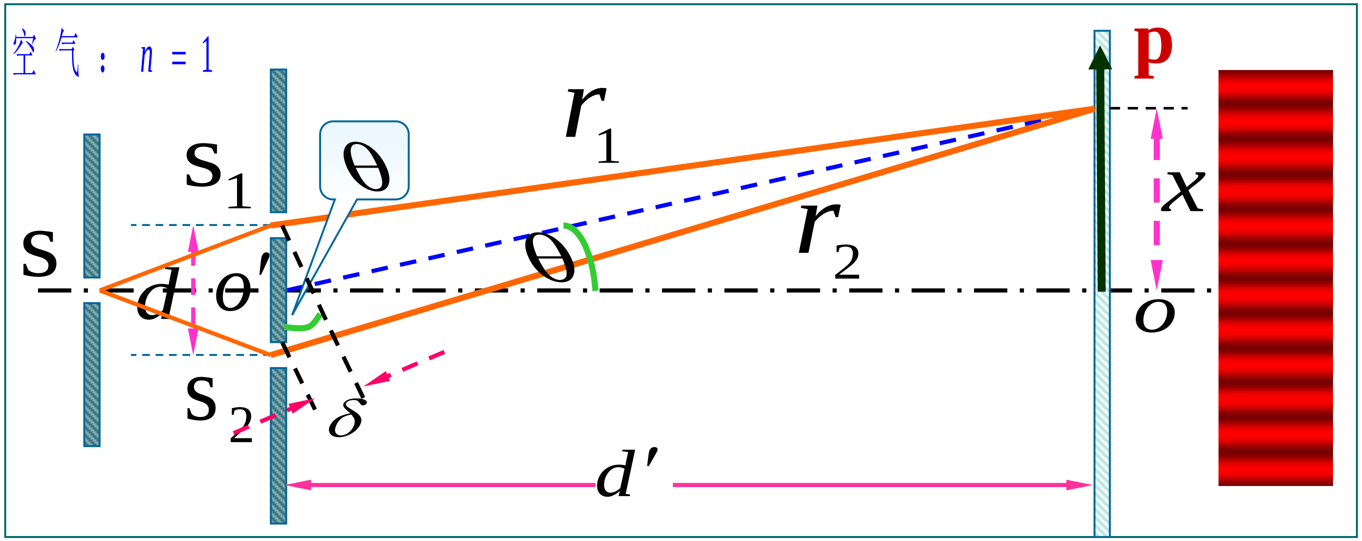
1、干涉加强(明纹)：

明条纹中心的位置:

$$x = \pm 2k \cdot \frac{d'\lambda}{2d}, \quad k = 0, 1, 2, \cdots$$

k 称为:
条纹的级数

$k=0$，对应 $\delta=0$，称为零级明纹（或中央明纹）



$$\delta = d\frac{x}{d'}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

2、干涉减弱(暗纹)：

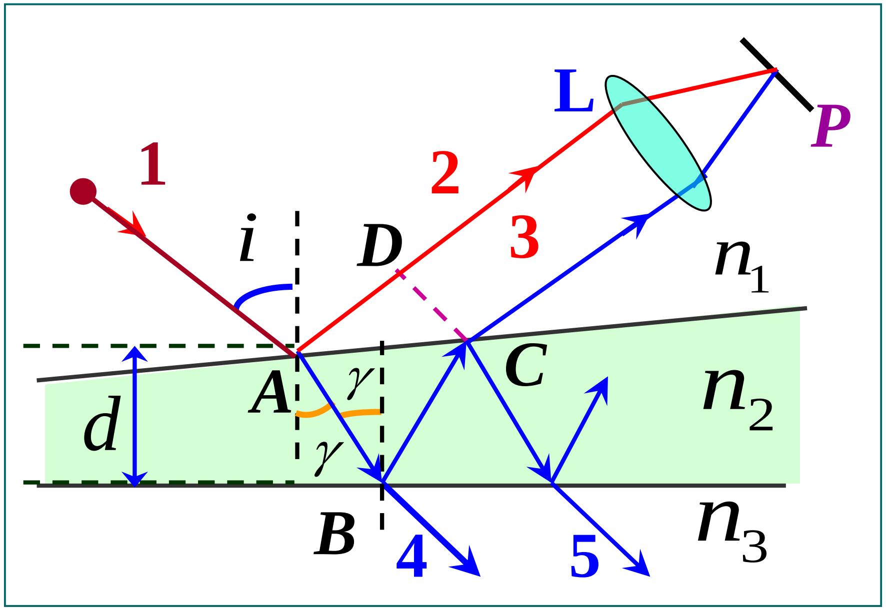
$$\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi,\ k = 0,1,2,\cdots$$

$$\delta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2},\ k = 0,1,2,\cdots$$

暗条纹中心的位置:

$$x = \pm(2k-1)\cdot\frac{d'\lambda}{2d},\ k = 1, 2,\cdots$$

k 为暗条纹的级数



1、反射光的光程差

$$\Delta_r = 2n_2 d\cos\gamma + \Delta_0$$

$$= 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \Delta_0$$

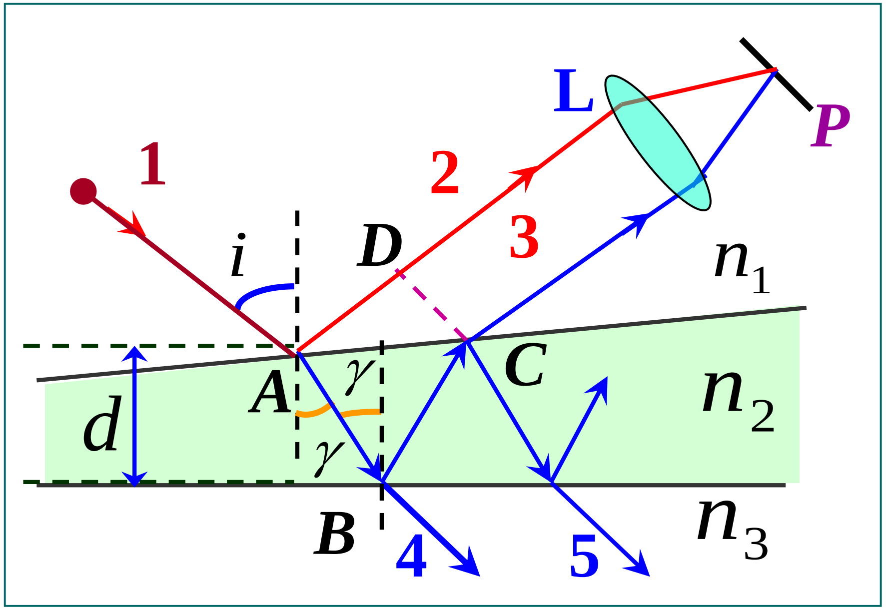
$$\Delta_0 = \begin{cases} 1)\ \dfrac{\lambda}{2}, & \begin{pmatrix} n_1 > n_2 < n_3, \\ n_1 < n_2 > n_3 \end{pmatrix} \\ 2)\ 0, & \begin{pmatrix} n_1 > n_2 > n_3, \\ n_1 < n_2 < n_3 \end{pmatrix} \end{cases}$$

1) 干涉加强(明纹中心)：

$$\Delta_r = 2k\frac{\lambda}{2},\ k = 0,1,2,\cdots$$

2) 干涉减弱(暗纹中心)：

$$\Delta_r = (2k+1)\frac{\lambda}{2},\ k = 0,1,2,\cdots$$



1、反射光的光程差

$$\Delta_r = 2n_2 d\cos\gamma + \Delta_0$$
$$= 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \Delta_0$$

$$\Delta_0 = \begin{cases} 1)\ \dfrac{\lambda}{2}, & \begin{pmatrix} n_1 > n_2 < n_3, \\ n_1 < n_2 > n_3 \end{pmatrix} \\ 2)\ 0, & \begin{pmatrix} n_1 > n_2 > n_3, \\ n_1 < n_2 < n_3 \end{pmatrix} \end{cases}$$

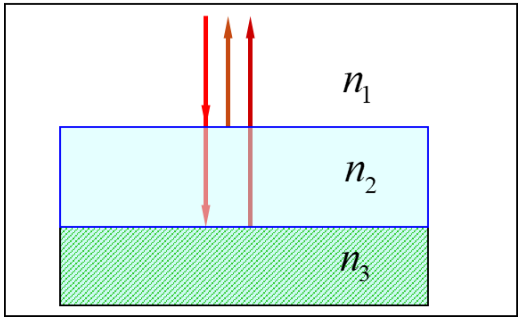
等厚干涉： 当入射角确定，条纹级次(光程差)取决于薄膜厚度；
特点： 薄膜上厚度相同的点在同一条(同一级)干涉条纹上。

注意：透射光和反射光干涉具有互补性，符合能量守恒定律.
如反射光干涉加强，透射光即为干涉减弱；
如反射光干涉减弱，透射光即为干涉加强；

透射光干涉情况，可以利用反射光干涉来讨论

◆ 当光线垂直入射时:

$$i=\gamma=0^\circ$$



➤ 反射光的光程差

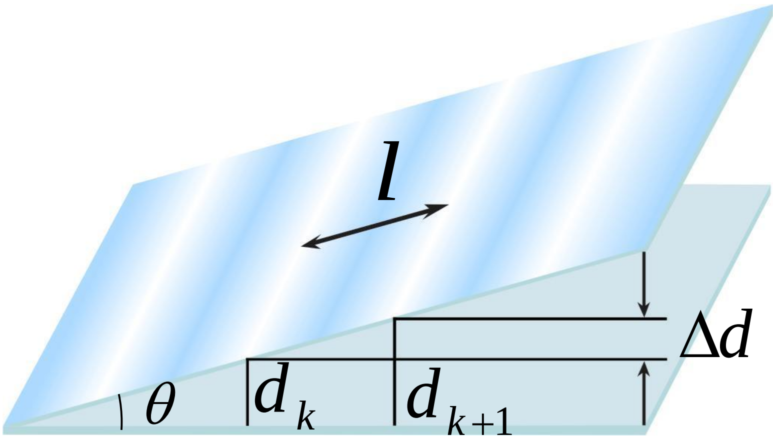
$$\Delta_r=2n_2d\cos\gamma+\delta_0=2d\sqrt{n_2^2-n_1^2\sin^2 i}+\Delta_0$$

$$\Delta_0=\begin{cases}1)\dfrac{\lambda}{2}, & \left(\begin{array}{l}n_1>n_2<n_3,\\ n_1<n_2>n_3\end{array}\right)\\ 2)0, & \left(\begin{array}{l}n_1>n_2>n_3,\\ n_1<n_2<n_3\end{array}\right)\end{cases}$$

$$\boxed{\Delta_r=2n_2d+\Delta_0}=\begin{cases}\text{明纹：}\quad 2k\dfrac{\lambda}{2},\ k=0,1,2,\cdots,\\ \text{暗纹：}\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2},\ k=0,1,2,\cdots,\end{cases}$$

（等厚干涉）

2、劈尖膜



以$n_1 = n_3$、垂直入射，
观察反射光为例

$n_1 < n_2 > n_3$ 或 $n_1 > n_2 < n_3$，　$\Delta_0 = \dfrac{\lambda}{2}$

明纹：　$\Delta_r = 2n_2 d_k + \dfrac{\lambda}{2} = 2k\dfrac{\lambda}{2} = k\lambda,\quad k = 1, 2, \cdots$

暗纹：　$\Delta_r = 2n_2 d_k + \dfrac{\lambda}{2} = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2},\quad k = 0, 1, \cdots$

相邻条纹间距 l 与所对应的膜厚度差Δd 之间的关系：

$$\Delta d = d_{k+1} - d_k = \frac{\lambda}{2n_2},\qquad \Delta d = \boxed{l\sin\theta = \frac{\lambda}{2n_2}}$$

相邻条纹间距l
与劈尖顶角θ
之间的关系

3、牛顿环　（以$n_1= n_3$、垂直入射，观察反射光为例）

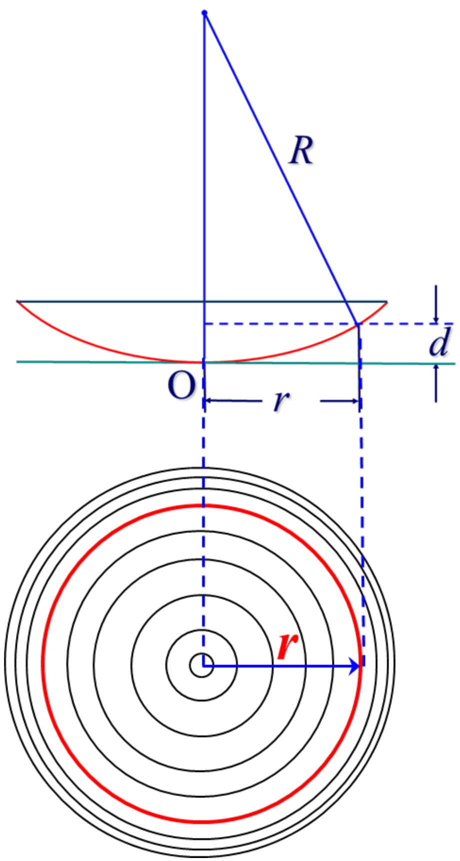
$n_1 < n_2 > n_3$ 或 $n_1 > n_2 < n_3$， $\Delta_0 = \dfrac{\lambda}{2}$

明纹： $\Delta_r = 2n_2 d_k + \dfrac{\lambda}{2} = 2k\dfrac{\lambda}{2} = k\lambda,\quad k = 1, 2, \cdots$

暗纹： $\Delta_r = 2n_2 d_k + \dfrac{\lambda}{2} = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2},\quad k = 0, 1, \cdots$

$$r^2 = R^2 - (R-d)^2 = 2Rd - d^2$$

$$\because \quad R >> d \rightarrow 2Rd >> d^2 \qquad \Rightarrow d = \frac{r^2}{2R}$$



明环： $r_k = \sqrt{\dfrac{(2k-1)R\lambda}{2n_2}},\qquad (k = 1, 2, \cdots)$

暗环： $r_k = \sqrt{\dfrac{kR\lambda}{n_2}},\qquad (k = 0, 1, 2, \cdots)$

二、光的衍射

（一）、惠更斯-菲涅耳原理

波阵面(波前)上的每一点都可视为发射次波(子波)的波源，在其后的任一时刻，这些次波(子波)的包络面就是该时刻的波阵面（波前）。

从同一波前上的各点发出的各个次波(子波)是相干波，经传播在媒质中某点相遇时的叠加是相干叠加。

光的衍射的实质：多光束干涉

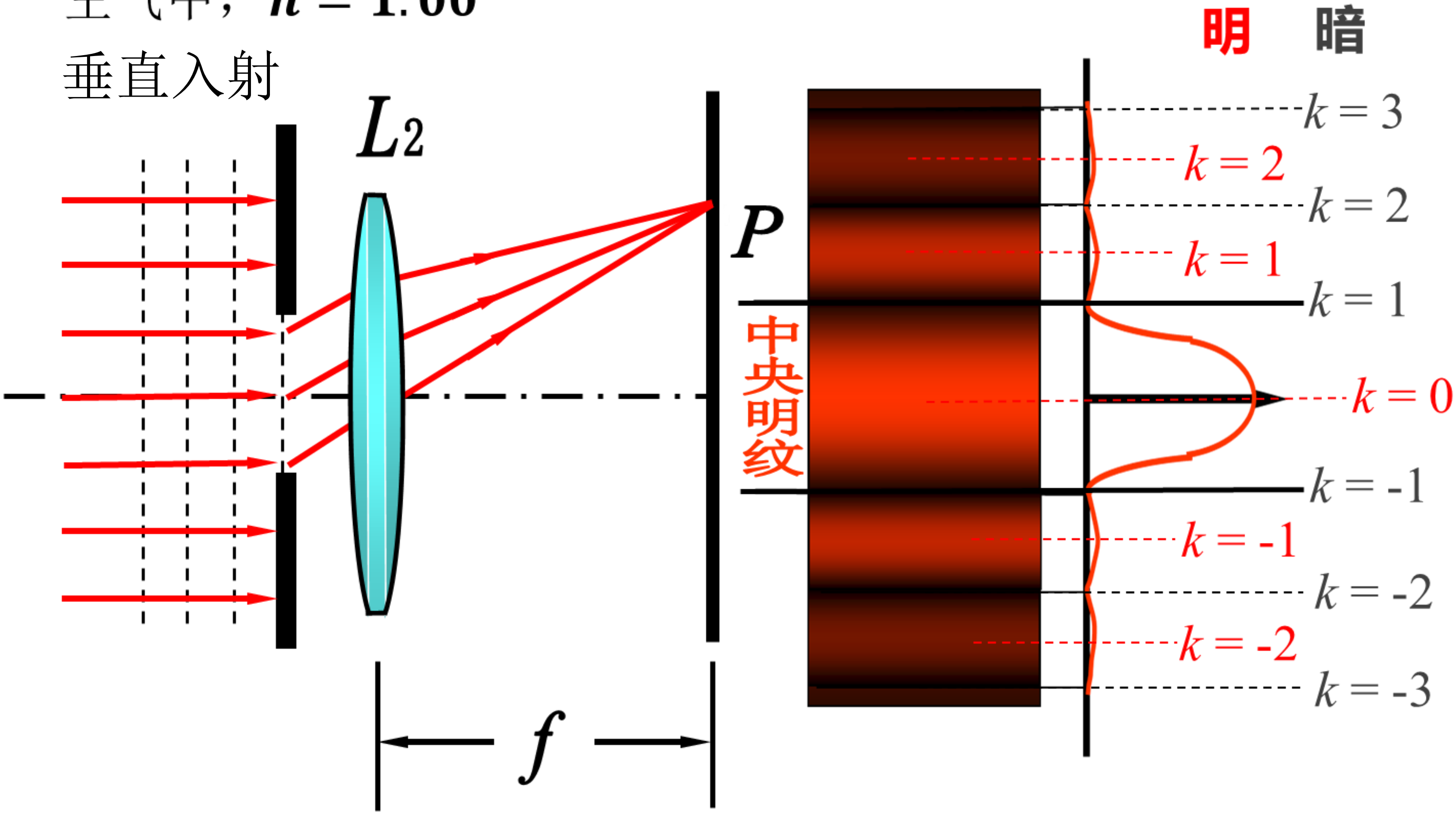
（二）、两类衍射（按光源-障碍物-观察屏相对距离区分）

菲涅尔衍射、　夫琅禾费衍射

(三)、单缝的夫琅禾费衍射(重点)

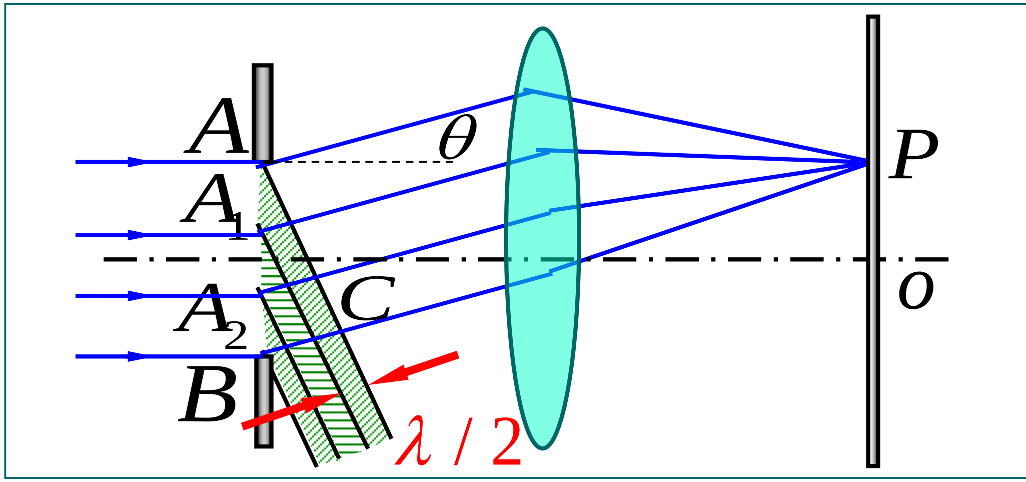
空气中，$n = 1.00$

垂直入射



(三)、单缝的夫琅禾费衍射（重点）

菲涅尔半波带法



$$\frac{BC}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{b\sin\theta}{\frac{\lambda}{2}} = N$$

（ N 个半波带）

1、中央明纹中心　$b\sin\theta = 0, \quad \theta = 0$

2、暗纹中心（干涉减弱）　$b\sin\theta = \pm 2k\dfrac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \cdots$

3、明纹中心　$b\sin\theta = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \cdots$

（三）、单缝的夫琅禾费衍射（重点）

一般，θ很小， $\tan\theta \approx \sin\theta \approx \theta$

1）、暗纹中心位置 $\begin{cases} b\sin\theta = \pm 2k\dfrac{\lambda}{2} = \pm k\lambda \\ \tan\theta = \dfrac{x}{f} \end{cases} \Rightarrow x_k = \pm k\dfrac{f\lambda}{b}, \quad k = 1, 2, 3, \cdots$

2）、明纹中心位置 $\begin{cases} b\sin\theta = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \\ \tan\theta = \dfrac{x}{f} \end{cases} \Rightarrow x_k = \pm(2k+1)\dfrac{f\lambda}{2b}, \quad k = 1, 2, 3, \cdots$

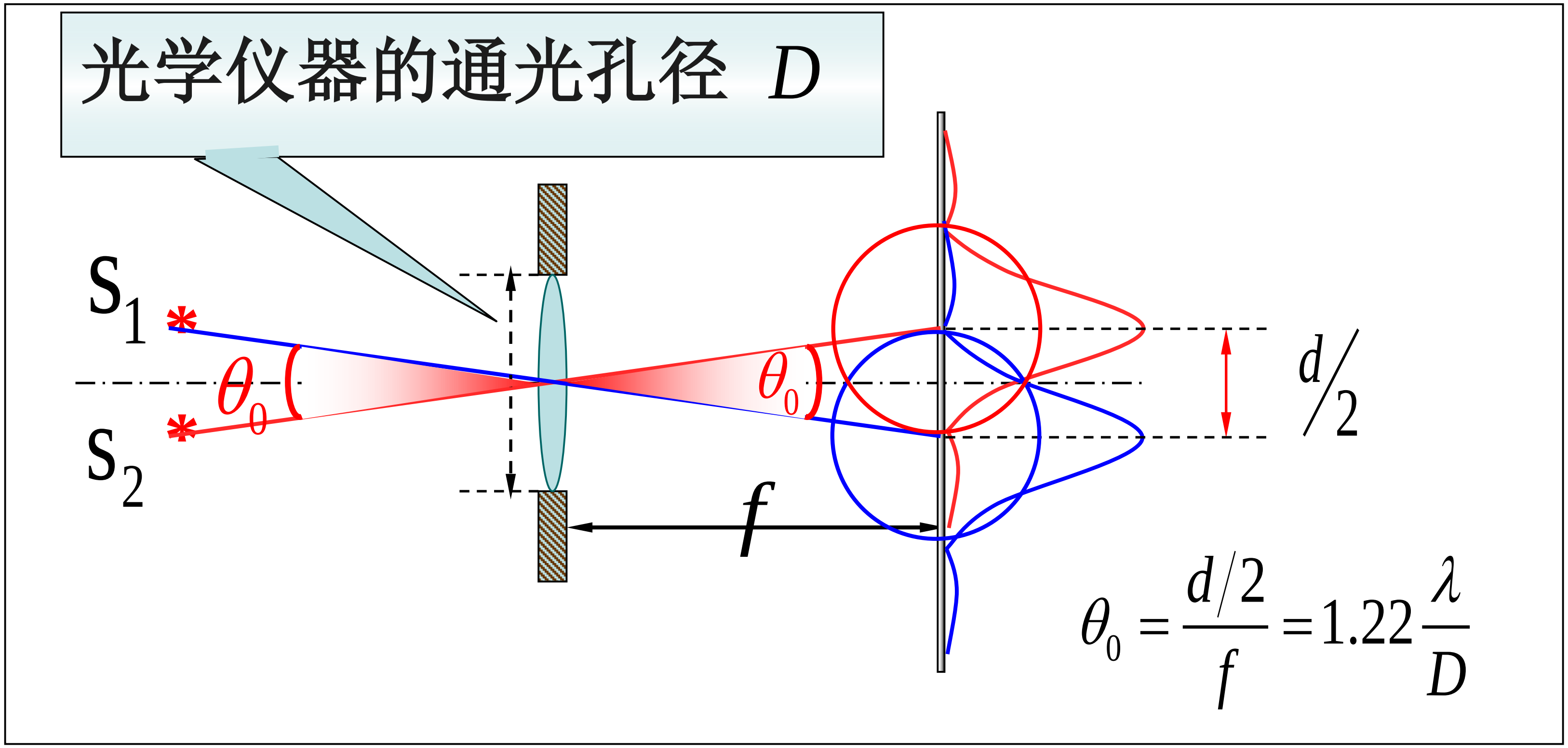
3）、明纹宽度： （1）、中央明纹宽度：（屏上，两侧1级暗纹之间距离）

$$1级暗纹：x_1 = \frac{f\lambda}{b} \Rightarrow \Delta x_0 = 2x_1 = 2\frac{f\lambda}{b}$$

（2）、k级明纹宽度：（屏上，同一侧，k、k+1级暗纹之间距离）

$$k，k+1级暗纹：x_k = k\frac{f\lambda}{b},\ x_{k+1} = (k+1)\frac{f\lambda}{b} \Rightarrow \Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{f\lambda}{b}$$

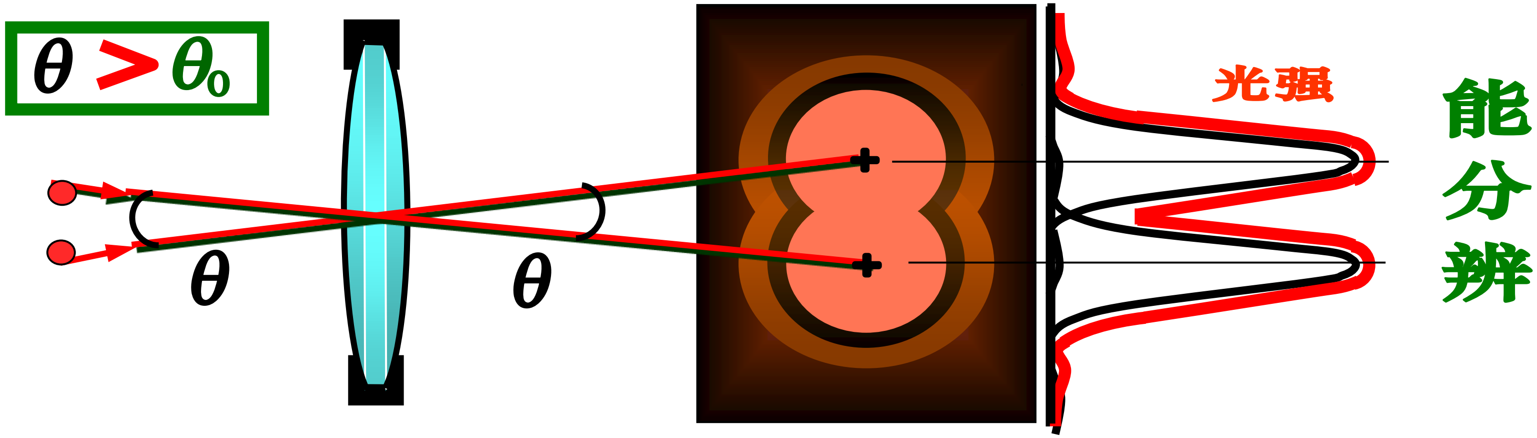
（四）圆孔衍射　　光学仪器的分辨本领

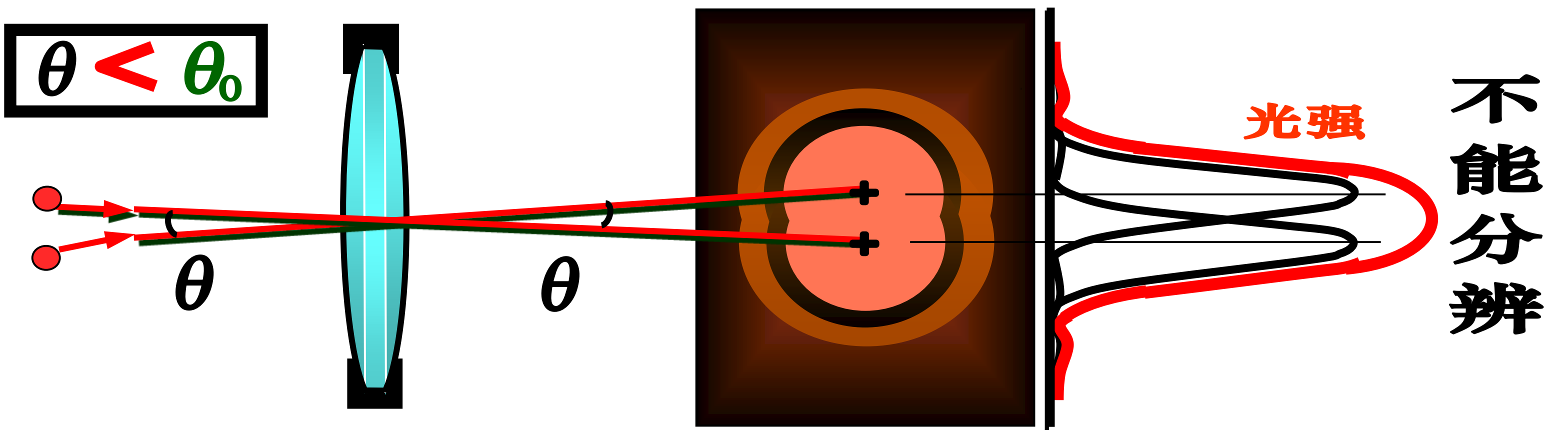


最小分辨角：$\theta_0 = 1.22\dfrac{\lambda}{D}$

光学仪器分辨率 $= \dfrac{1}{\theta_0} = \dfrac{D}{1.22\lambda}$

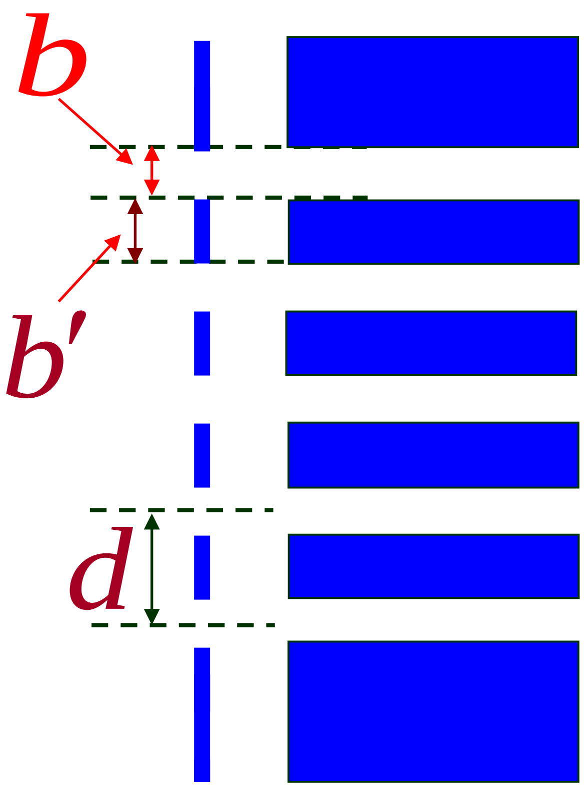
（四）圆孔衍射　光学仪器的分辨本领





（五）、光栅衍射（重点）

光 栅： 许多等宽度、等距离的狭缝排列起来形成的光学元件。



b —— 缝宽（透光部分宽度）

b' ——不透光部分宽度

相邻两缝间距为：

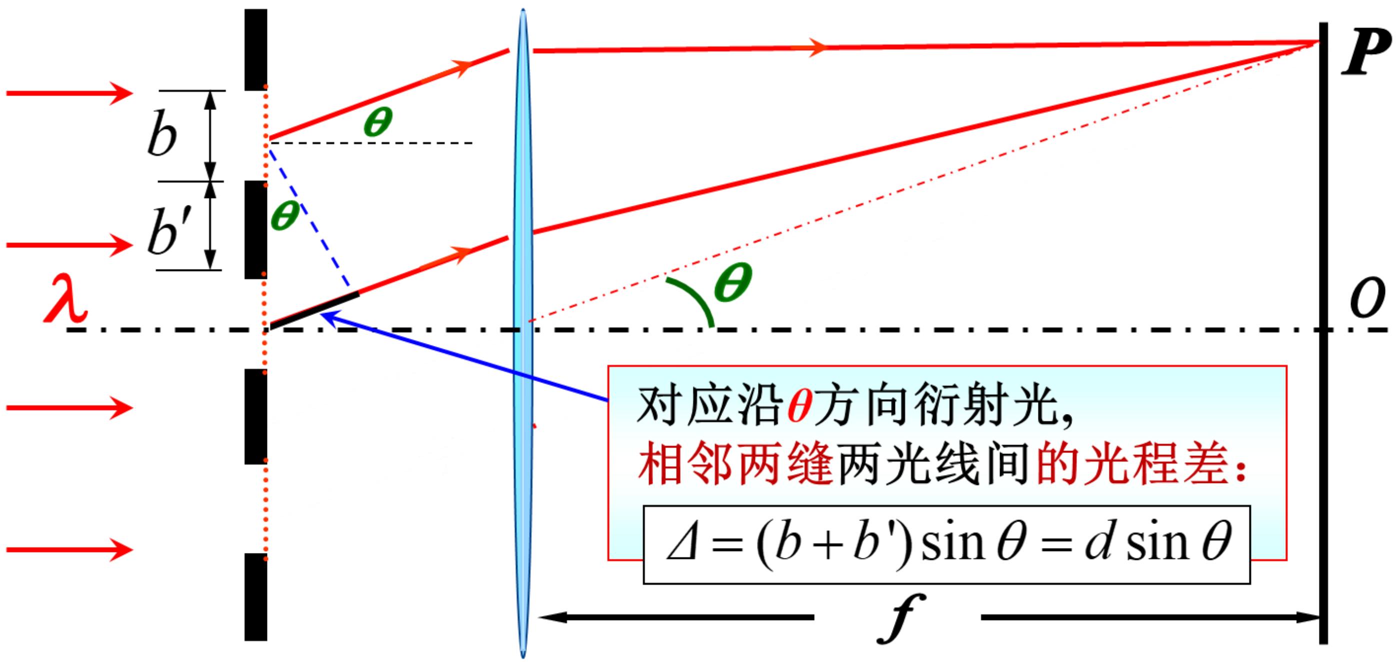
光栅常数： $\boxed{d = b + b'}$

（五）、光栅衍射（重点）

1、主极大条纹

1）、光栅方程(主极大，垂直入射)

$n = 1.0$



光栅方程（主极大）（垂直入射，相邻双缝干涉加强）

明纹中心：$d\sin\theta = (b+b')\sin\theta = \pm 2k\dfrac{\lambda}{2} = \pm k\lambda,\ (k = 0, 1, 2, \cdots)$

（五）、光栅衍射（重点）

1、主极大条纹

2）、光栅方程（主极大，斜入射情况，相邻双缝干涉加强）

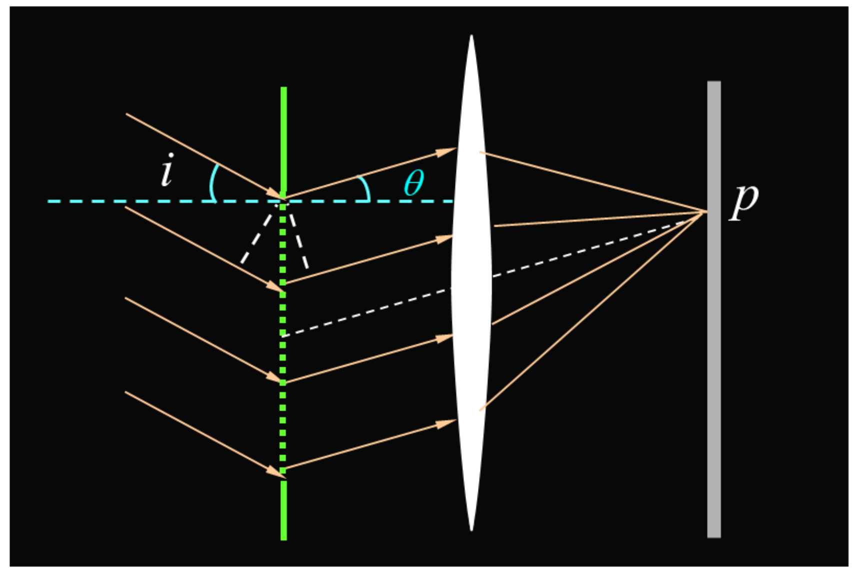
斜入射，入射角i，

主极大条件：

（相邻两缝干涉加强）

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

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



条纹最高级数：

$$-\frac{\pi}{2}<\theta<\frac{\pi}{2},$$

$$-1<\sin\theta<1$$

$$\frac{d}{\lambda}(\sin i-1)<k<\frac{d}{\lambda}(\sin i+1)$$

（五）、光栅衍射（重点）

2、缺级

各级主极大的光强受到单缝衍射的调制，若P点的位置（由θ 决定）同时满足：

$$\begin{cases}(b+b')\sin\theta = \pm k\lambda, & (k=0,1,2,\cdots) \\ b\sin\theta = \pm k'\lambda, & (k'=1,2,\cdots)\end{cases}$$

则位于P点的第k级主极大的光强为零，

该级主极大实际观察不到，称为缺级。

缺级级数：

$$\boxed{k=\frac{b+b'}{b}k', \quad (k'=1,2,\cdots)}$$

（五）、光栅衍射（重点）

2、缺级

缺级级数： $\boxed{k=\frac{b+b'}{b}k',\quad (k'=1,2,\cdots)}$

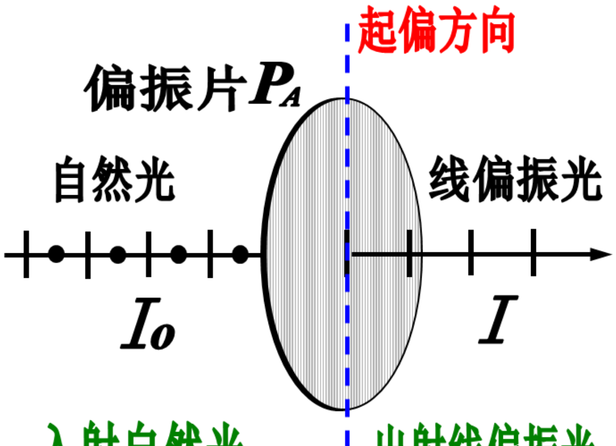
1)、n级缺级，n的倍数级数都看不见，即：

$$k=\pm n,\pm 2n,\pm 3n,\cdots \quad \text{缺级}$$

2)、n级缺级，有：

$$\frac{d}{b}=\frac{b+b'}{b}=\frac{n}{1},\text{或}\ \frac{n}{2},\text{或}\ \frac{n}{3},\cdots,\text{或}\ \frac{n}{n-1}$$

三、光的偏振　　马吕斯定律

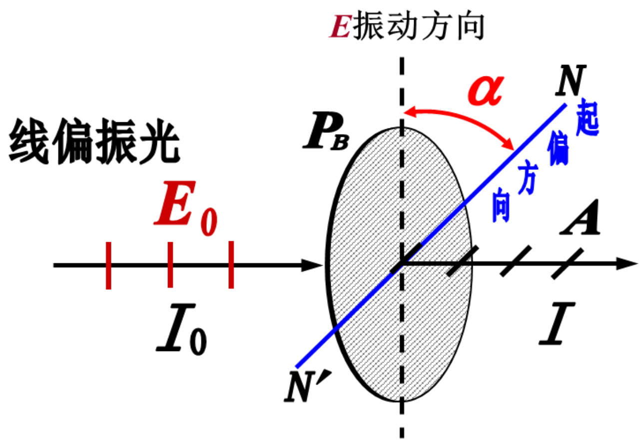


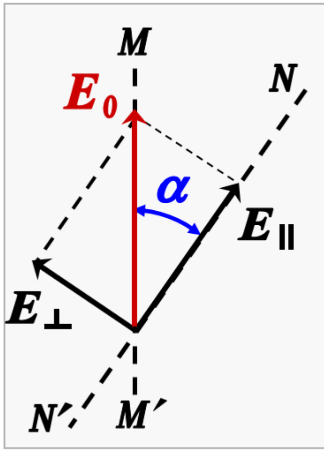
入射自然光光强

出射线偏振光光强

I_0　　　$I = I_0/2$

马吕斯定律





马吕斯定律： $I = I_0 \cos^2\alpha$