大学物理

- 期中随堂测验（开卷）

- **范围：** 电磁学、振动与波动（ 5分）
- **时间：** 下周五（11月8日）第8节（45分钟）
- **注意：** 提前备好答题纸（作业纸或A4纸均可）

主讲
华 中 科 技 大 学
刘超飞

● 光波的描述：

描述光波的光矢量 —— 电场强度矢量 $\vec{E}$

$$\Rightarrow E = E_0 \cos(\omega t + \phi - \frac{2\pi r}{\lambda})$$

光强 —— 平均能流密度：

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T S\mathrm{d}t = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}E_0^2 = \frac{1}{2}u\varepsilon E_0^2$$ $\propto$振幅的平方

光程

定义：光波在介质中所经历的几何路程 d 与介质折射率 n 之积 nd 称为光程，即 $L=nd$。

$$\Delta\phi' = 2\pi\frac{d}{\lambda} = 2\pi\frac{nd}{\lambda_0}$$

● 光波的相干条件：两光波的位相差稳定

$$\Delta\phi=[(\omega_2-\omega_1)t+(\phi_{20}-\phi_{10})-2\pi(\frac{r_2}{\lambda_2}-\frac{r_1}{\lambda_1})] \text{ =常量}$$

- *a*. 两列波的频率相等：$\omega_1=\omega_2$
- *b*. $\phi_{20}-\phi_{10}=$ 常量，两列波的初相位差恒定。
- *c*. 两列波有相互平行的电振动分量，

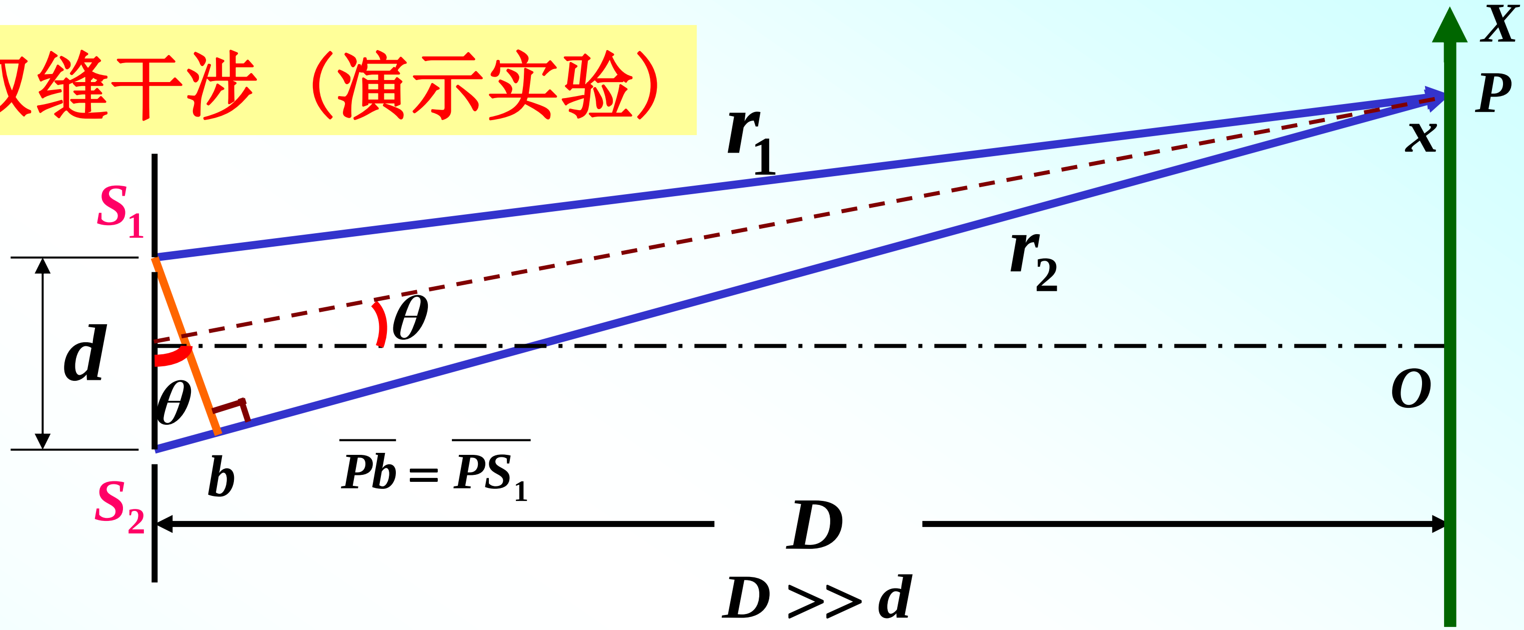
光程差：$\delta=L_2-L_1=(n_2d_2-n_1d_1)$

位相差：$\Delta\phi=2\pi(\frac{r_2}{\lambda_2}-\frac{r_1}{\lambda_1})=2\pi(\frac{n_2r_2}{\lambda_0}-\frac{n_1r_1}{\lambda_0})=\frac{2\pi}{\lambda_0}\delta$

获得相干光的方法（由普通光源获得）：

1. **分波阵面的方法**—— **杨氏干涉**
2. **分振幅的方法** —— **等倾干涉、等厚干涉**
3. **分振动面的方法**—— **偏振光干涉**

杨氏双缝干涉（演示实验）



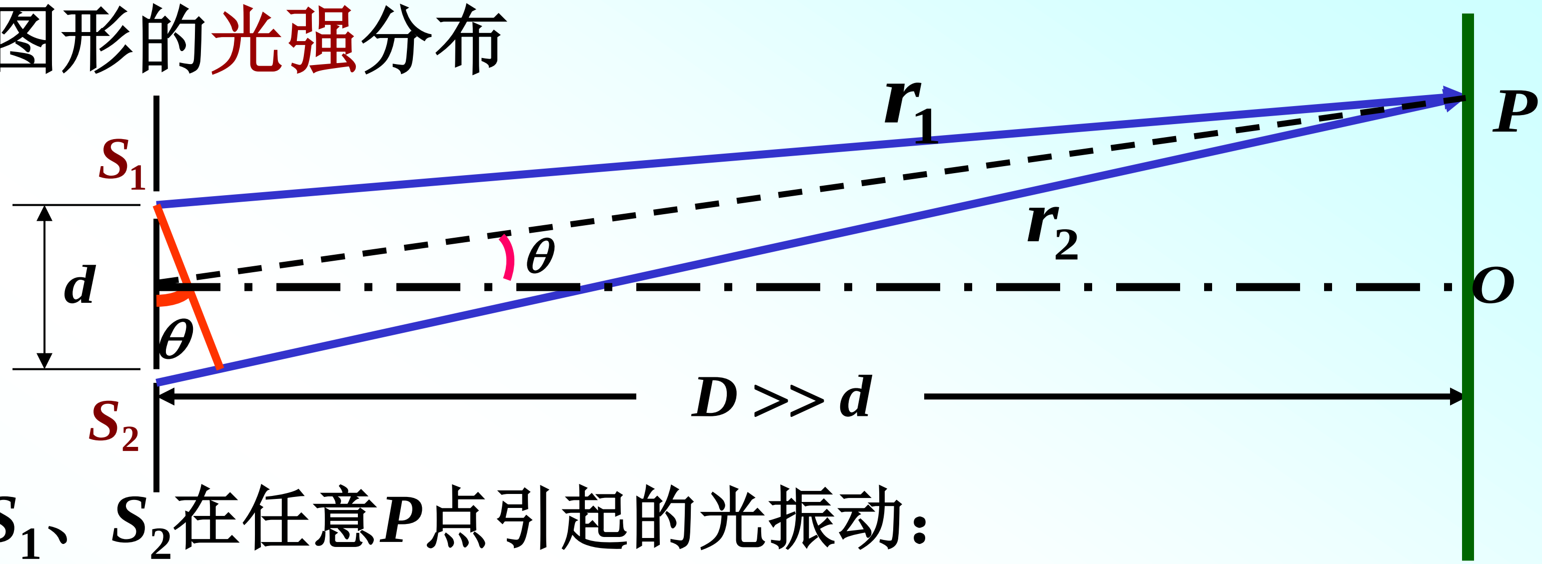
● 出现明暗条纹的条件:

$$\Delta r = d\sin\theta \begin{cases} = \pm k\lambda & \text{干涉极大，出现明纹} \\ = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{干涉极小，出现暗纹} \end{cases} \quad (k=0,1,2\cdots)$$

● 明暗条纹的位置:

$$\sin\theta = \frac{x}{D} \Rightarrow \begin{cases} \boxed{x=\pm k\dfrac{D}{d}\lambda} & \text{——明条纹} \\ \boxed{x=\pm(2k+1)\dfrac{D}{d}\dfrac{\lambda}{2}} & \text{——暗条纹} \end{cases} \quad (k=0,1,2\cdots)$$

（3）干涉图形的光强分布

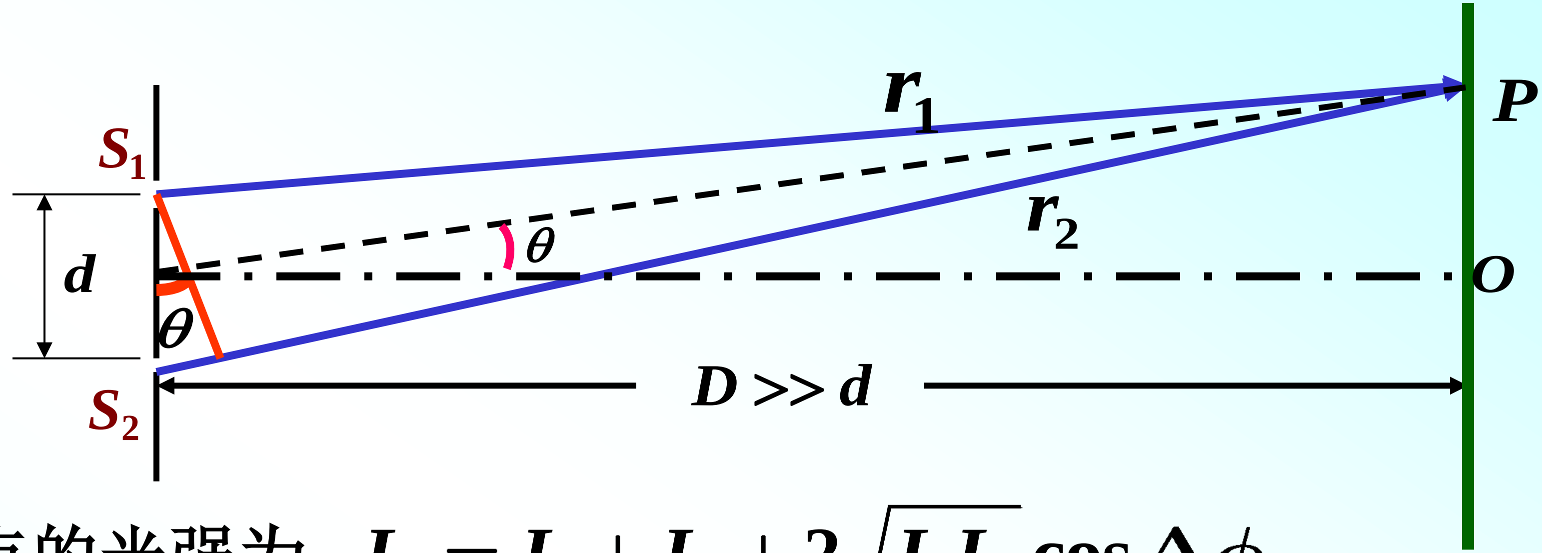


假定S_1、S_2在任意P点引起的光振动：

$$\begin{cases} E_1 = E_{10}\cos(\omega t + \phi_1) \\ E_2 = E_{20}\cos(\omega t + \phi_2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{则合振动为：} E = E_\theta \cos(\omega t + \phi) \\ \quad \text{其振幅为：} E_\theta^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\Delta\phi \\ \text{光强正比于振幅的平方：} I \propto E_0^2 \end{cases}$$

$\Rightarrow$干涉图形的光强为：$I_\theta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\phi$



任意P点的光强为：$I_\theta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\phi$

如果两光强相等 $I_1 = I_2 = I_0$

$$\Rightarrow I_\theta = 2I_0 + 2I_0\cos\Delta\phi = 4I_0\cos^2\frac{\Delta\phi}{2}$$

$$\left.\begin{array}{l}\Delta\phi = \dfrac{r_2 - r_1}{\lambda}\cdot 2\pi \\ r_2 - r_1 = d\sin\theta\end{array}\right\} \Rightarrow \Delta\phi = \frac{d\sin\theta}{\lambda}\cdot 2\pi$$

$$\Rightarrow \boxed{I_\theta = 4I_0\cos^2\left(\frac{\pi d\sin\theta}{\lambda}\right)}$$ 干涉光强的角分布

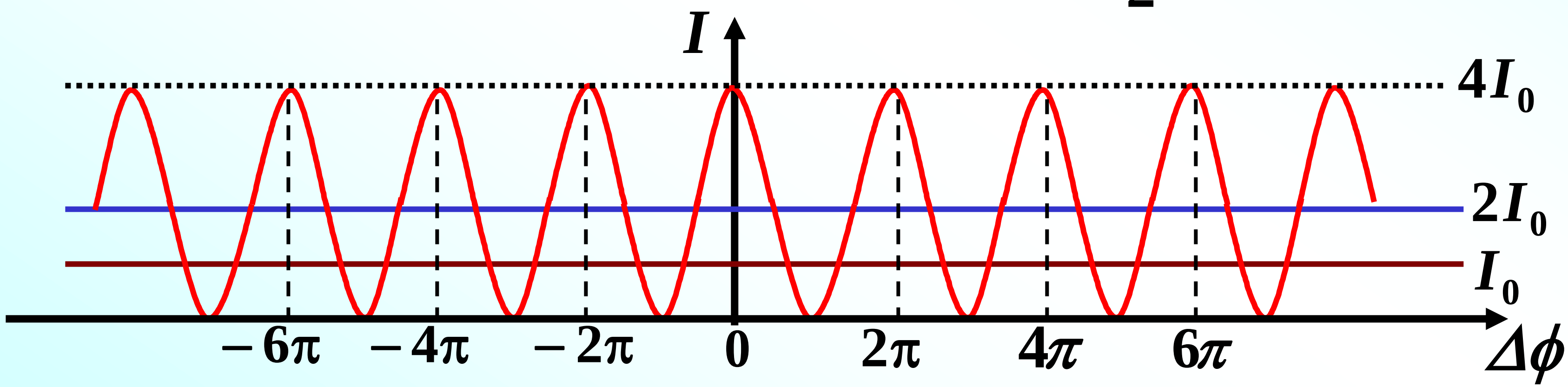
$\sin\theta \approx \frac{x}{D}$ ⟹ 还可求得光强的坐标分布：I_x

$$\begin{cases} \boxed{I_\theta = 4I_0 \cos^2\left(\dfrac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right)} & \text{光强 } I_\theta \text{ 随 } \theta \text{ 角的分布} \\ \Delta\phi = \dfrac{d \sin\theta}{\lambda} \cdot 2\pi & \end{cases}$$

$\Rightarrow$可得到明暗条纹处（干涉极大和极小）的光强大小

明纹 $\Delta\phi = \pm 2k\pi \rightarrow d\sin\theta = \pm k\lambda \rightarrow I_\theta = 4I_0$

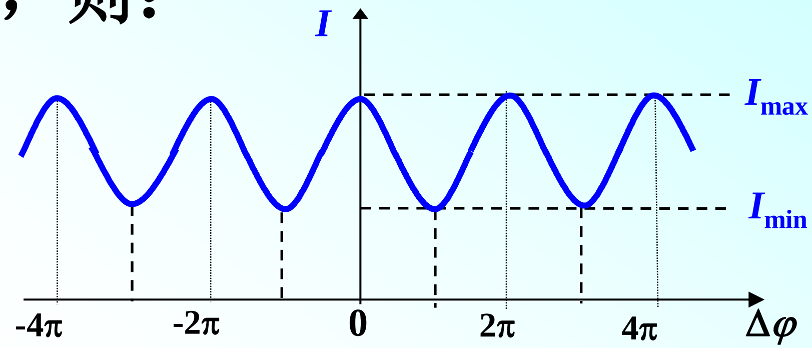
暗纹 $\Delta\phi = \pm(2k+1)\pi \rightarrow d\sin\theta = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \rightarrow I_\theta = 0$



注：如果*P*点两振动的振幅不等，则：

$$I_\theta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\phi$$

$$\begin{cases} I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \end{cases}$$



红光入射的杨氏双缝干涉照片

例：已知杨氏实验中：λ=0.55μm，d=3.3mm，D=3m。

求：（1）条纹间距Δx。（2）置厚度l=0.01mm的平行平面玻璃于S_2之前，计算条纹位移的距离及方向。

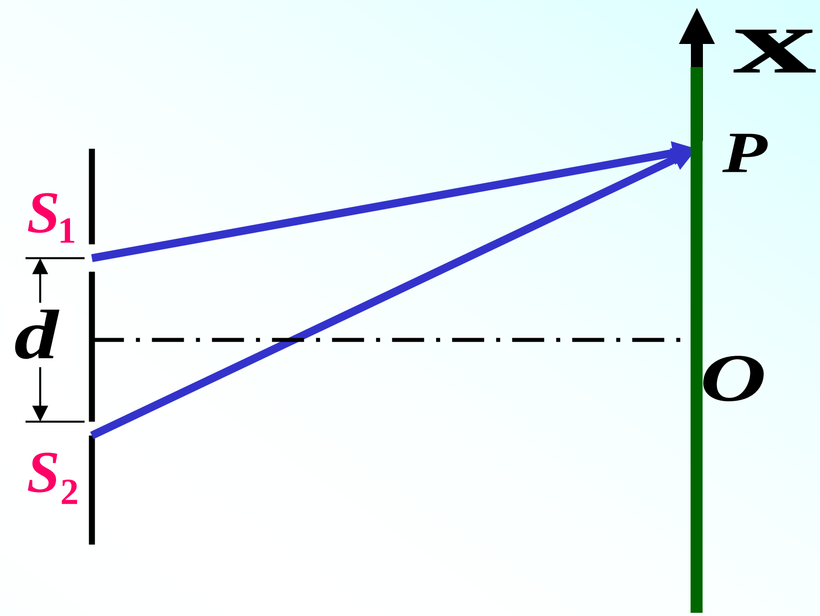
解：（1）

明纹位置为：$\boxed{x_k = \pm k\frac{D}{d}\lambda}$

条纹间距：$\Delta x = x_{k+1} - x_k$

$$\Rightarrow \Delta x = \frac{D}{d}\lambda$$

$$= 0.5\times 10^{-3}\, m$$

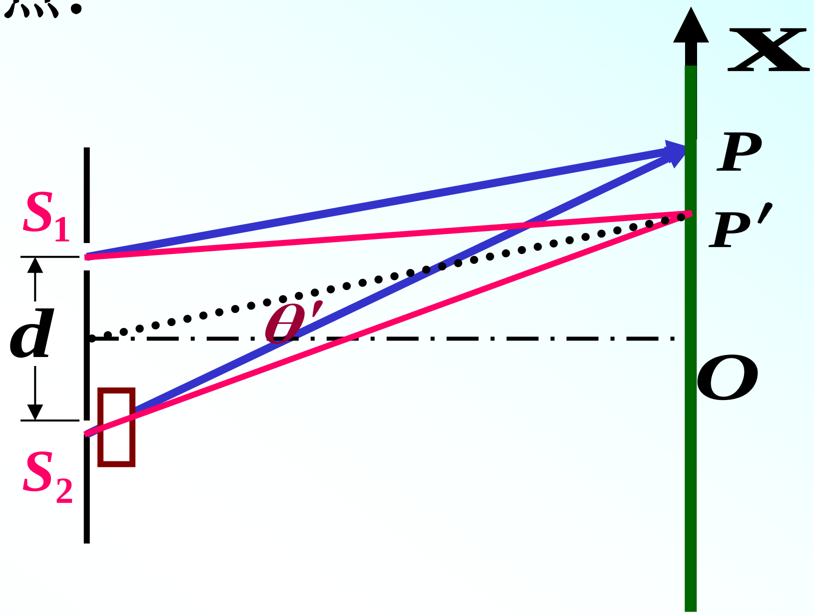


例： 已知杨氏实验中：λ=0.55μm，d=3.3mm，D=3m。

求：（1）条纹间距Δx。（2）置厚度l=0.01mm的平行平面玻璃于S_2之前，计算条纹位移的距离及方向。

解：（2）设未放玻璃前k级明纹位于P点：

$$x_p = k\frac{D}{d}\lambda$$



加玻璃后：
- 增加了光程差：$l(n-1)$
- k级明纹移到了P'点，位置为 x'
- P点对应的偏角为 θ'

$$\begin{cases} \Rightarrow d\sin\theta' + l(n-1) = k\lambda \\ x_{p'} = D\mathrm{tg}\theta' = D\sin\theta' \end{cases}$$

$$\Rightarrow x_{p'} = \frac{D}{d}[k\lambda - (n-1)l]$$

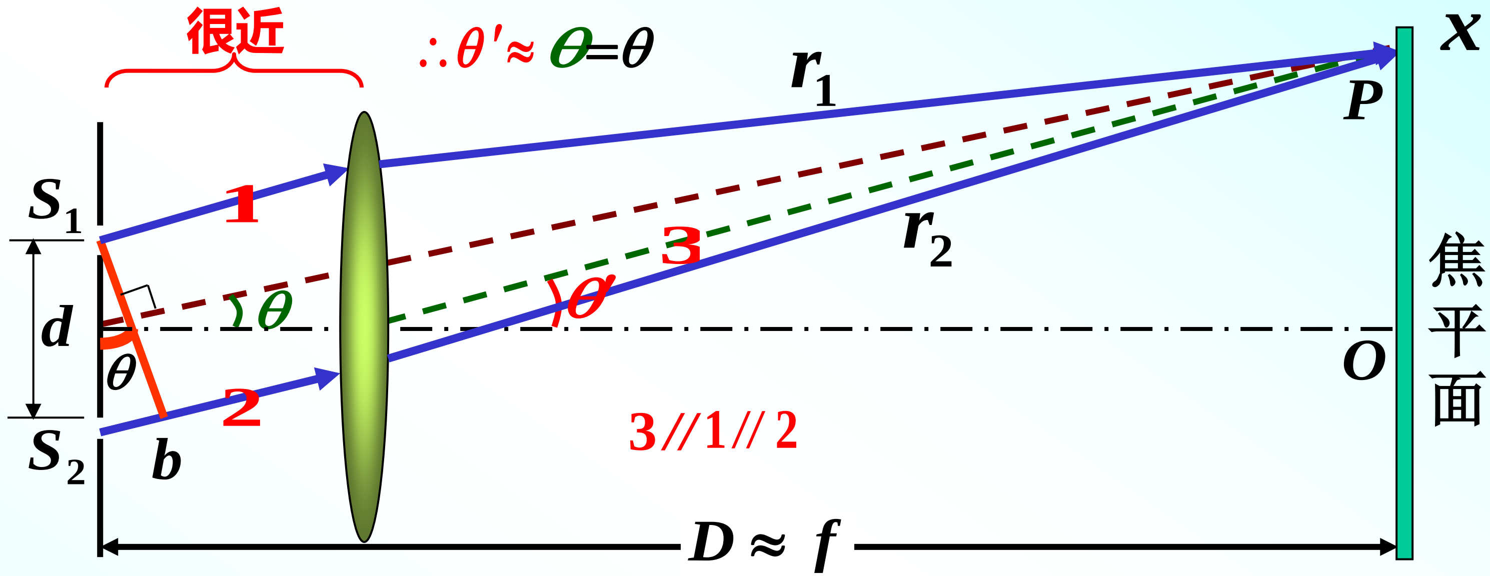
$$\therefore \Delta x = x_{p'} - x_p = \frac{D}{d}(1-n)l$$

$n > 1 \Rightarrow \Delta x < 0$ 向下移动

注：若测得Δx，则可求出n。

另：可从零级明纹（中央明纹）考虑。

（4）杨氏实验的另一装置

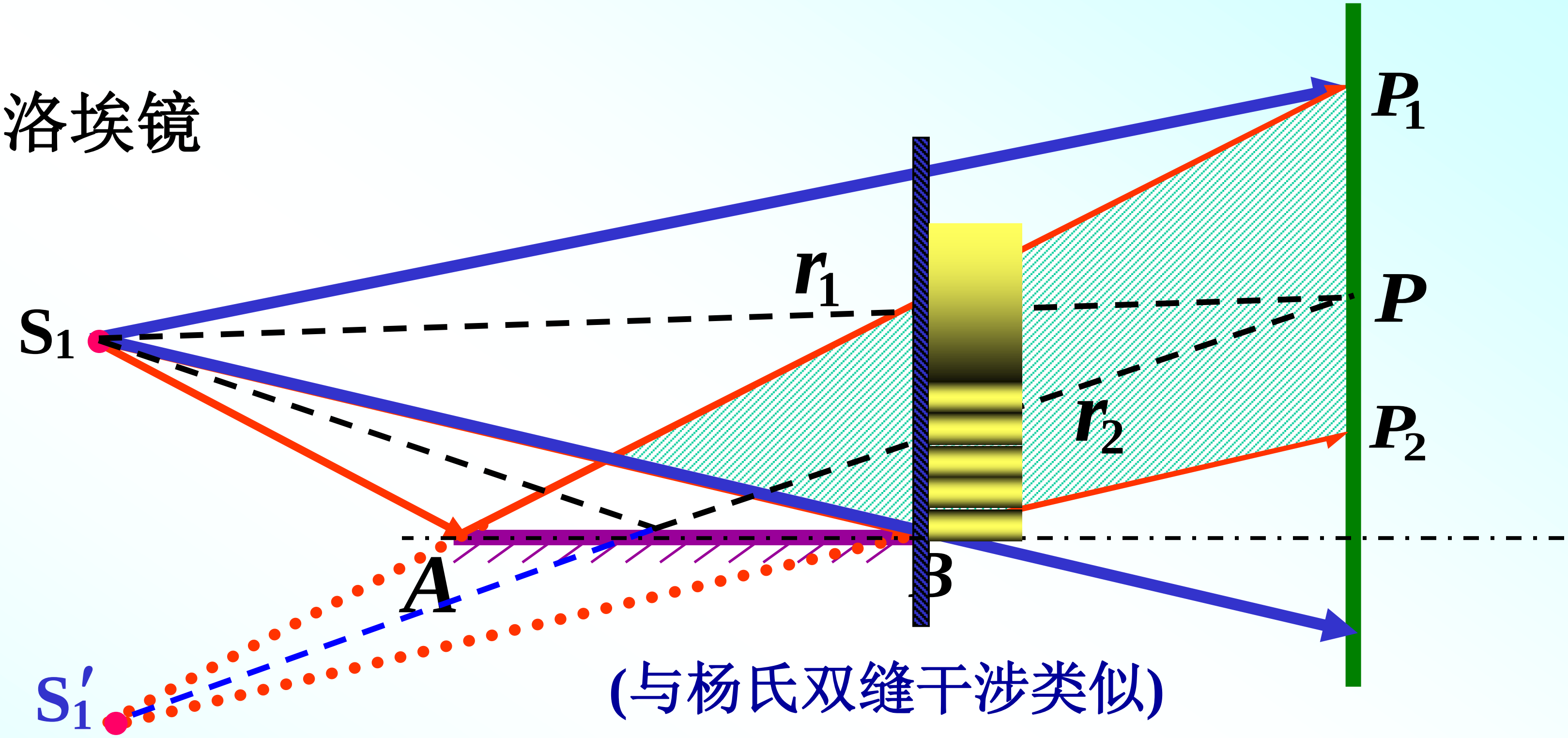


从垂直于平行光的任一平面算起，各平行光线到会聚点的光程相等，即透镜不附加光程差，所以

*P*点的明暗条件与不加透镜完全相同，即

$$\text{仍有:}\ \Delta r = S_2 b = d\sin\theta = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{——明纹} \\ \pm(2k+1)\lambda/2 & \text{——暗纹} \end{cases} \quad (k=0,1,2\cdots)$$

2. 洛埃镜



(与杨氏双缝干涉类似)

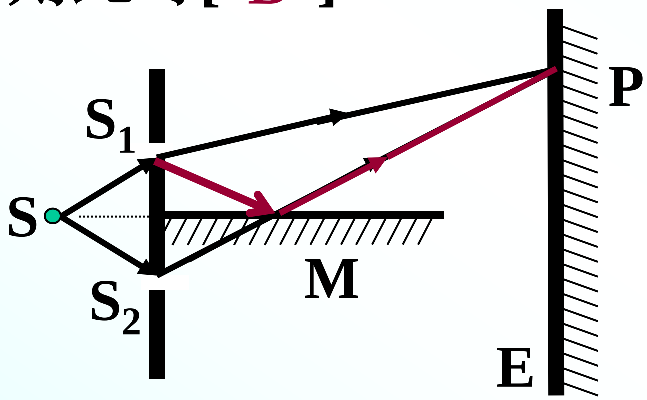
明暗条纹的位置：

真空中：

$$r_2 - r_1 + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & \text{明纹} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases} \quad (k=0,1,2\cdots)$$

将屏移到 *B*处，*B*处为暗纹证实了半波损失的存在。

例: 在双缝干涉实验中，屏E上的P点为明纹。若将缝S_2盖住，并在S_1、S_2连线的垂直平分面处放一反射镜M，如图所示。则此时[B]



(A) P点处仍为明纹

(B) P点处为暗纹

(C) 无法确定P点处是明纹还是暗纹

(D) 无干涉条纹

$\delta = k\lambda + \lambda/2$ 放镜子后有半波损失

例: 用白光光源进行双缝干涉实验，若用一个纯红色的滤光片盖住一条缝，用一个纯蓝色的滤光片盖住另一条缝。则 [D]

(A) 干涉条纹的宽度将发生变化

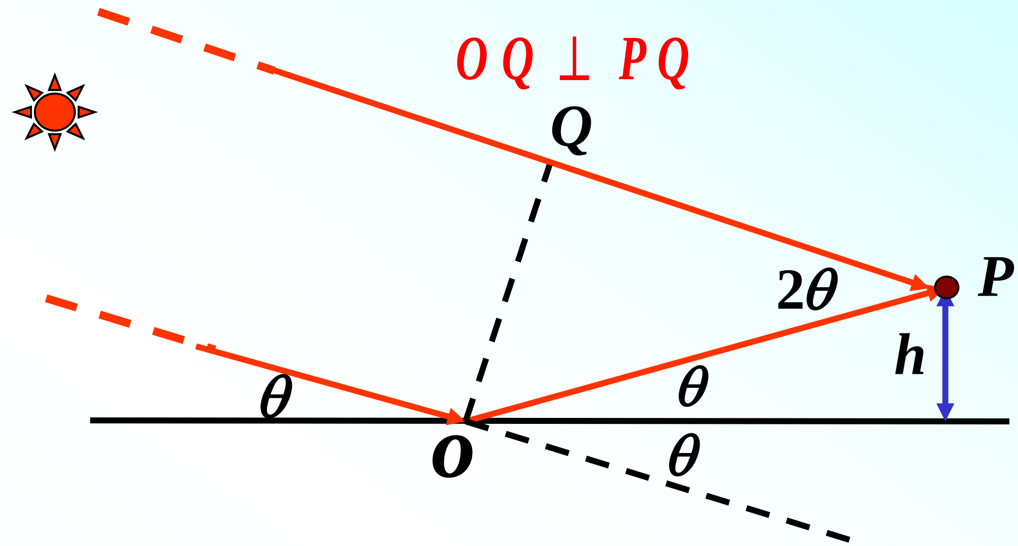
(B) 产生红光和蓝光两套干涉条纹

(C) 干涉条纹的亮度将发生变化

(D) 不产生干涉条纹

例： 将一微波探测器放于湖边，探测器的位置在水面上方0.5m处，当一颗辐射 21cm 波长的射电星从地平线上缓慢升起时,探测器接收到的射电波强度将依次出现极大、极小，问当此探测器收到第一个极大时，该射电星处于水平面上方什么角度？

解：



直射与反射光的光程差为：

$$\begin{cases} \delta = OP - QP + \lambda/2 \\ OP = \dfrac{h}{\sin\theta} \\ QP = OP\cos 2\theta \end{cases}$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{h}{\sin\theta}(1-\cos 2\theta) + \frac{\lambda}{2}$$

$$= \frac{h}{\sin\theta}\cdot 2\sin^2\theta + \frac{1}{2}\lambda$$

$$= 2h\sin\theta + \frac{1}{2}\lambda$$

第一个极大：$k=1 \Rightarrow \delta = \lambda$

$$\Rightarrow 2h\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \theta = 6^0 2'$$

4. 时间、空间相干性

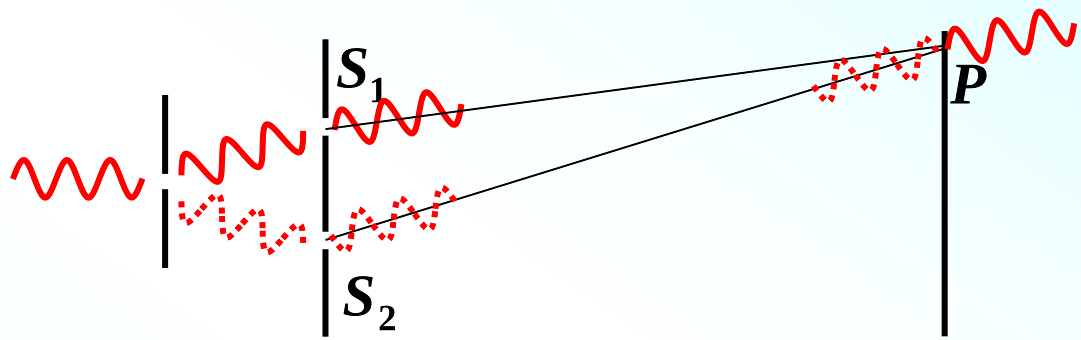
1）时间相干性

原子发光是间歇性的，每个波列持续的时间约 $\Delta t = 10^{-8}\,s$

相干长度

普通光源的相干长度：

0·1→10cm

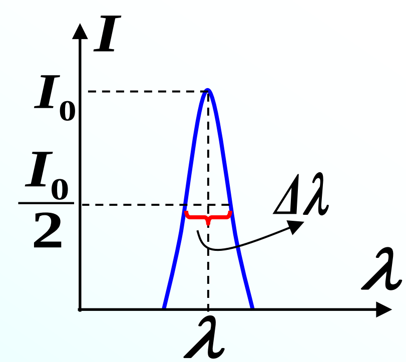


恰好能相干的情形

激光的相干长度：

可达数百公里

$$\left.\begin{array}{l} L = c\Delta t \\ \Delta t \sim \dfrac{1}{\Delta \nu} \end{array}\right\} \Rightarrow \uparrow L = \frac{c}{\Delta \nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \downarrow$$



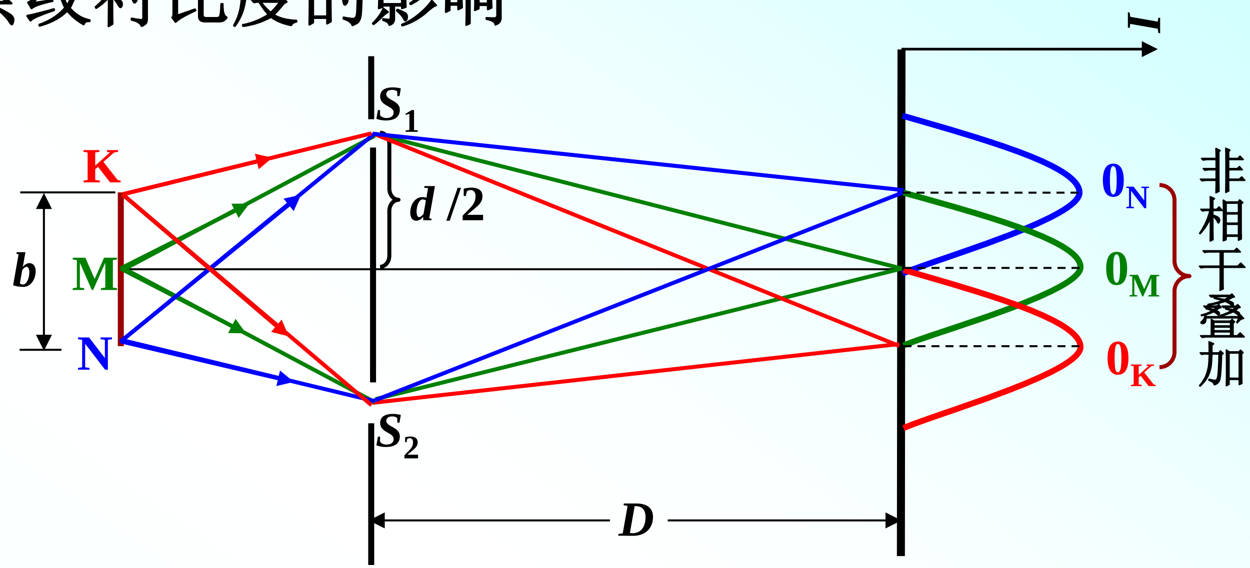
单色性越好，
相干长度越长

2) 空间相干性

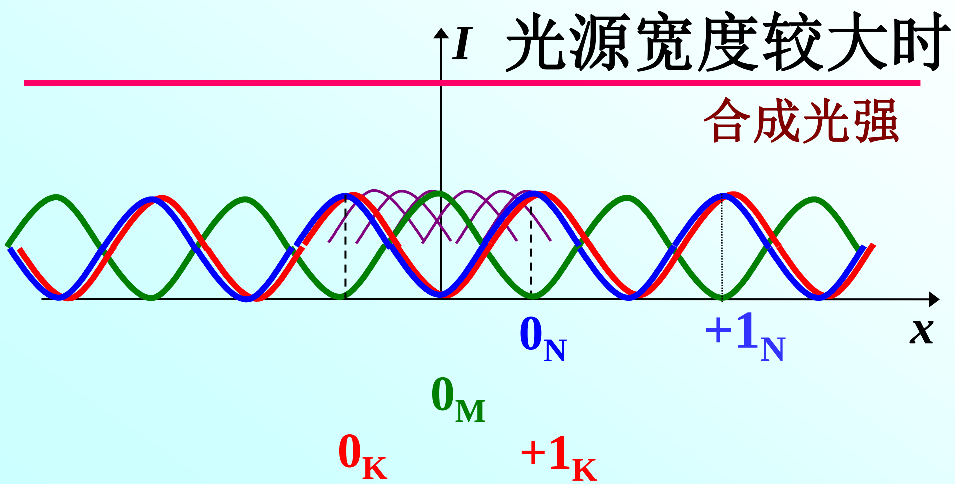
光源宽度对干涉条纹衬比度的影响

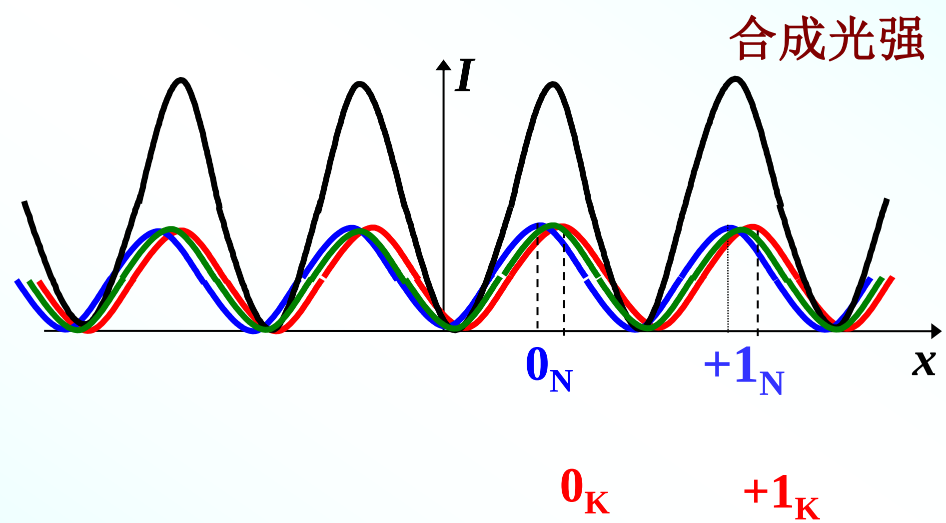
设光源宽度为b

当0_N与K的第一级极大重合时，干涉条纹消失，总光强均匀分布。



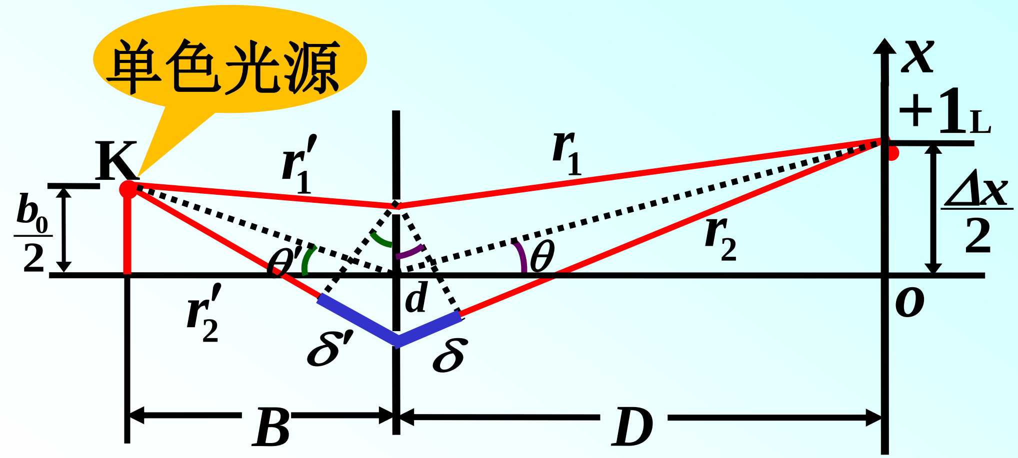
干涉条纹刚好消失对应的光源宽度b_0，称为光源的极限宽度。





光源宽度较小时

计算光源的极限宽度。



$$\delta_{\text{上沿}} = (r_2 + r_2') - (r_1 + r_1')$$
$$= (r_2 - r_1) + (r_2' - r_1')$$

设$B>>d$和b_0

即：光源宽度带来的附加光程为：

$$r_2' - r_1' \approx d \cdot \sin\theta' = d \cdot \frac{b_0/2}{B}$$

光源为极限宽度情况下，即上沿与下沿的附加光程差正好为一个波长，干涉相消，有：

$$r_2' - r_1' = \lambda/2$$

$$\Rightarrow b_0 = \frac{B}{d}\lambda$$ ——光源的极限宽度

所以，$b < b_0$才能观察到干涉条纹。

注：若 b 和 B一定，

则要得到干涉条纹，必须有：

$$d < d_0 = \frac{B}{b}\lambda$$ ——相干间隔

d_0越大，光场的空间相干性越好

从普通光源获得相干光的方法：

1. **分波阵面的方法**—— **杨氏双缝干涉**

洛埃镜分波阵面干涉

菲涅耳双面镜分波阵面干涉

菲涅耳双棱镜分波阵面干涉

2. **分振幅的方法** —— **等倾干涉、等厚干涉**

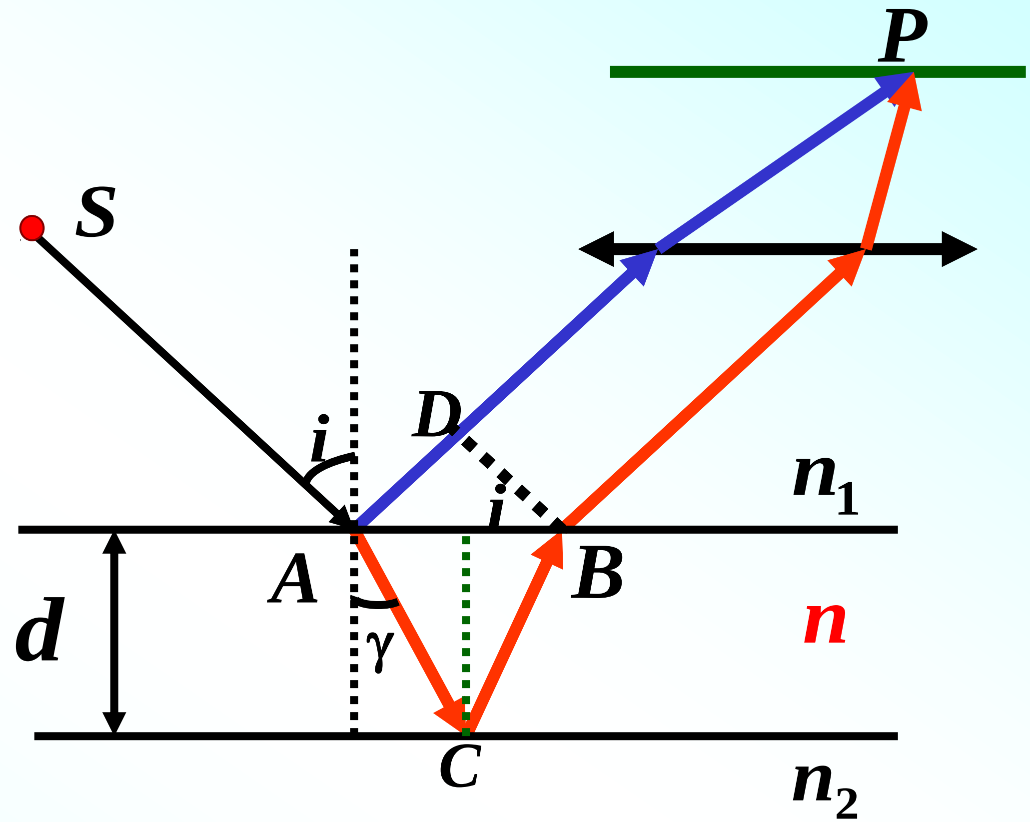
3. **分振动面的方法**—— **偏振光干涉**

四、分振幅干涉（薄膜干涉）

1.等倾干涉 ——厚度均匀的薄膜所得到的干涉

设薄膜厚度为d，折射率为n

并且：$n_1 < n < n_2$



$$\left\{\begin{aligned} &\delta = n(AC+BC) - n_1 AD \\ &AC = BC = \frac{d}{\cos\gamma} \\ &AD = AB\sin i \\ &AB = 2d\,\mathrm{tg}\gamma \\ &\boxed{n_1\sin i = n\sin\gamma} \end{aligned}\right.$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{2nd}{\cos\gamma} - 2n_1 d\cdot\mathrm{tg}\gamma\cdot\sin i = 2nd\cos\gamma$$

$$= 2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i}$$

光程差为：$\delta = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i}$

$$明暗纹条件：\delta = \begin{cases} k\lambda & (k=1,2,\cdots) \quad \cdots 明纹 \\ (2k+1)\lambda/2 & (k=0,1,2\cdots)\cdots 暗纹 \end{cases}$$

注意：(1) “明纹”条件中，$k \neq 0$，因为 Δr 不可能为零。

(2) 明暗条件中没有 ± 号：$\delta > 0$

(3) 明暗条件还可用折射角表示：$\delta = 2nd\cos\gamma$

(4) 明暗条件中是否考虑半波损失，要看 n_1, n, n_2 的关系。

n_1

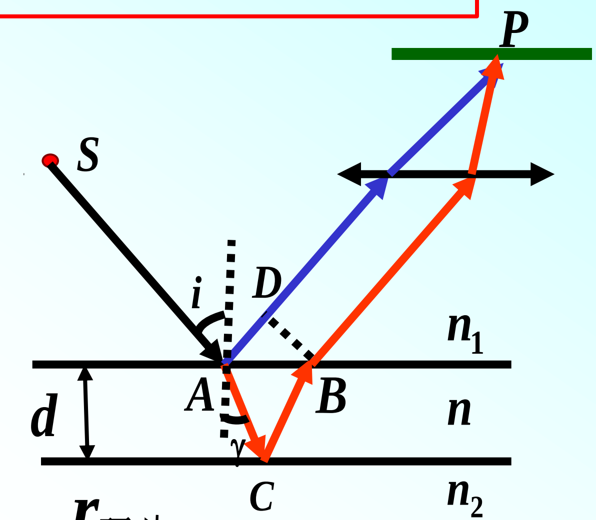
n

n_2

$\left.\begin{array}{l} n_1 > n > n_2 \\ n_1 < n < n_2 \end{array}\right\}$ 不考虑！ $\left.\begin{array}{l} n_1 > n < n_2 \\ n_1 < n > n_2 \end{array}\right\}$ 要加 $\frac{\lambda}{2}$！

$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} \boxed{+\frac{\lambda}{2}} = \begin{cases} k\lambda & (k=1,2,\cdots) \quad \cdots 明纹 \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k=0,1,2\cdots)\cdots 暗纹 \end{cases}$$

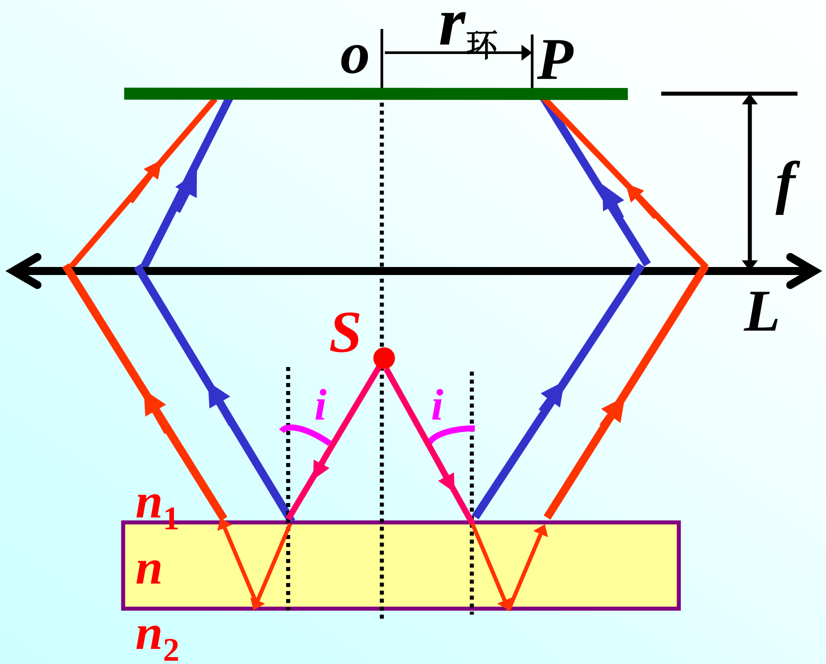
$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda & (k=1,2,\cdots) \quad \cdots\text{明纹} \\ (2k+1)\lambda/2 & (k=0,1,2\cdots)\cdots\text{暗纹} \end{cases}$$

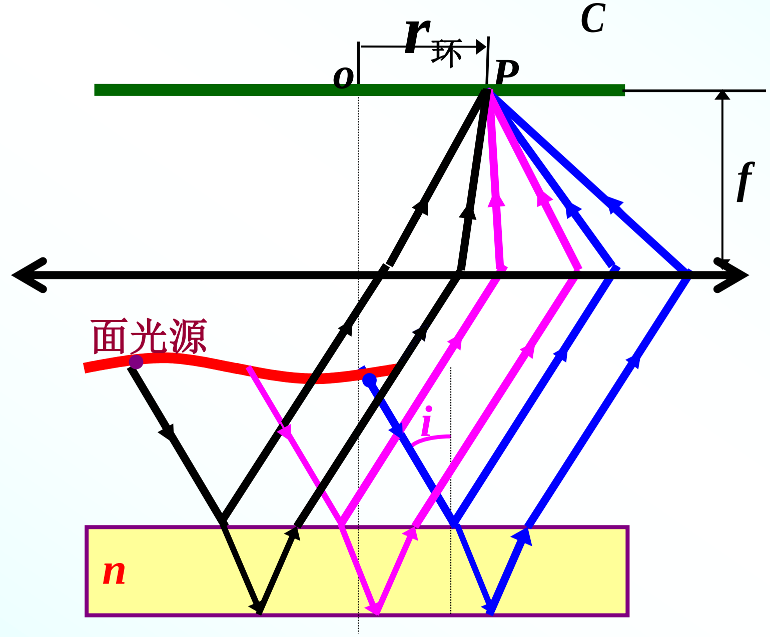


干涉条纹特征：

(1) 倾角 i 相同的光线对应同一条干涉圆环条纹

——等倾干涉





干涉条纹特征：

(2) 不同倾角i 构成的等倾条纹是一系列同心圆环

(3) 愈往中心，条纹级次愈高

$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} = k\lambda$$

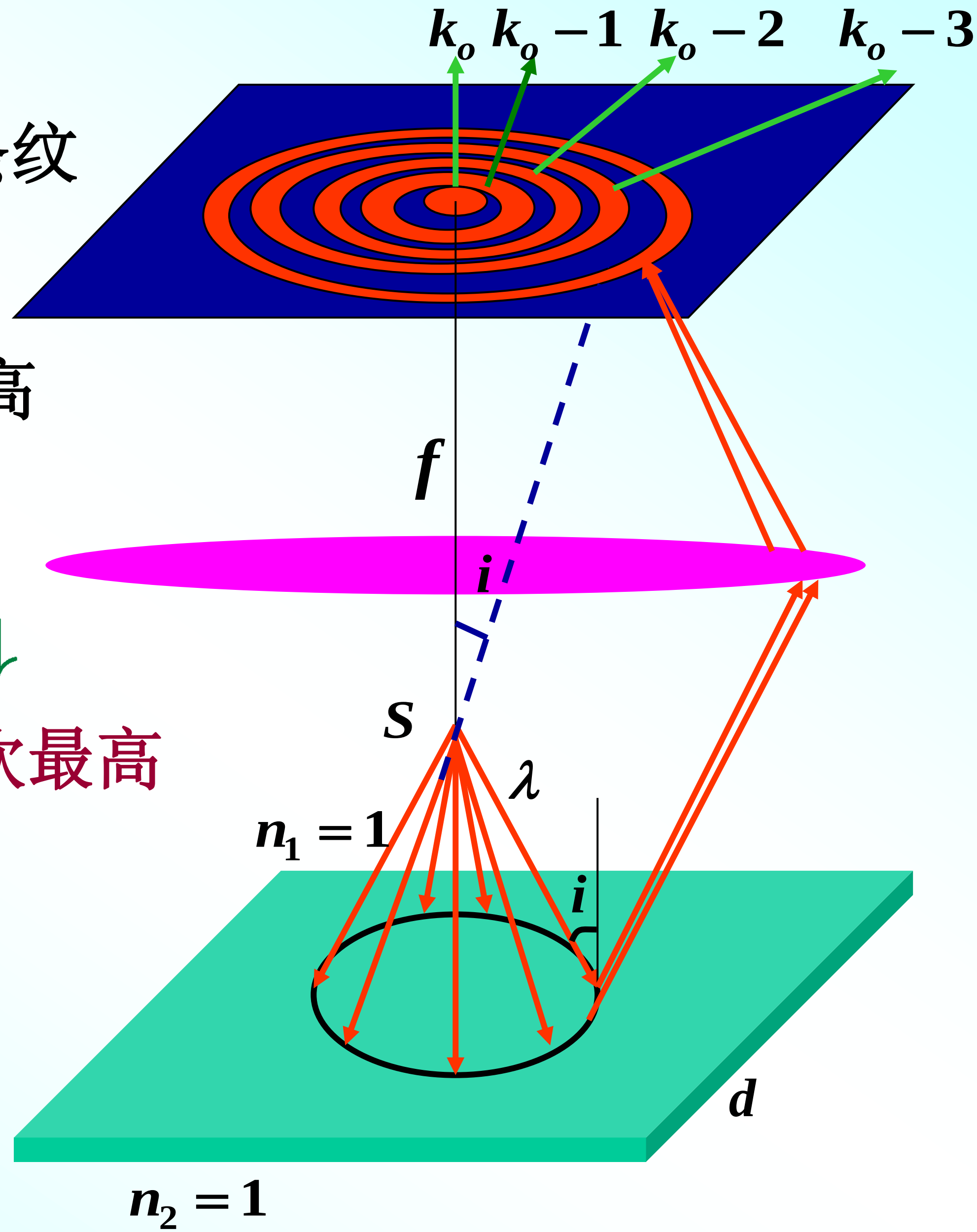
d 一定时，$k \uparrow \rightarrow i \downarrow \rightarrow r_k \downarrow$

即：中心O点处的干涉级次最高

若改变d:

$d\uparrow$ 中心向外冒条纹

$d\downarrow$ 中心向内吞条纹



$$\delta=2d\sqrt{n^2-n_1^2\sin^2 i}=\begin{cases} k\lambda & (k=1,2,\cdots)\ \cdots\text{明纹} \\ (2k+1)\lambda/2 & (k=0,1,2\cdots)\cdots\text{暗纹} \end{cases}$$

干涉条纹特征：

(4) 条纹间隔分布：

$$\begin{cases} 2nd\cdot\cos\gamma_k=k\lambda \\ 2nd\cdot\cos\gamma_{k+1}=(k+1)\lambda \\ n_1\sin i=n\sin\gamma \end{cases}$$

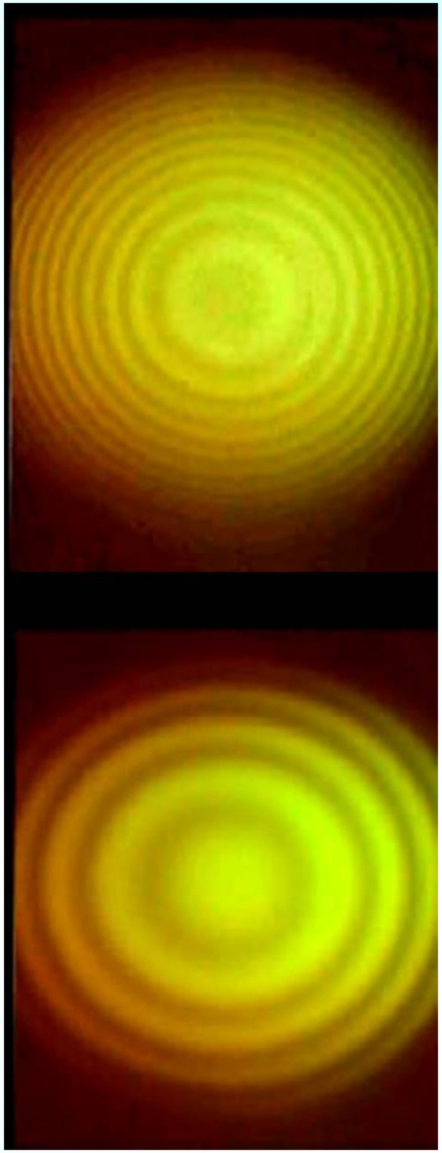
$$\Rightarrow\Delta\gamma_k=\frac{\lambda}{2nd\sin\gamma_k}=\frac{\lambda}{2n_1 d\sin i_k}$$

$r_k\uparrow\ \rightarrow i\uparrow\ \rightarrow\Delta\gamma_k\downarrow$ 内疏外密

(5) 白光入射

k,d 一定 $\lambda\uparrow\ \rightarrow i\downarrow\ \rightarrow r_k\downarrow$

——彩色干涉条纹



作业：13 —T1-T5

作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写姓名以及学号(或学号末两位)。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周二交上周的作业。迟交不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。