大学物理(下)

华 中 科 技 大 学
张智
zzhang@hust.edu.cn

第五篇
光学
(Optics)

第13章 波动光学
Wave Optics

第1节　光波

第2节　光波的叠加 光程

第3节　分波阵面干涉

第4节　分振幅干涉

第5节　光波的衍射

第6节　光波的偏振

第7节　双折射

第8节　偏振光的干涉

第9节　旋光效应

光程差 $\delta=(n_2L_2-n_1L_1)$

光程差与位相差：

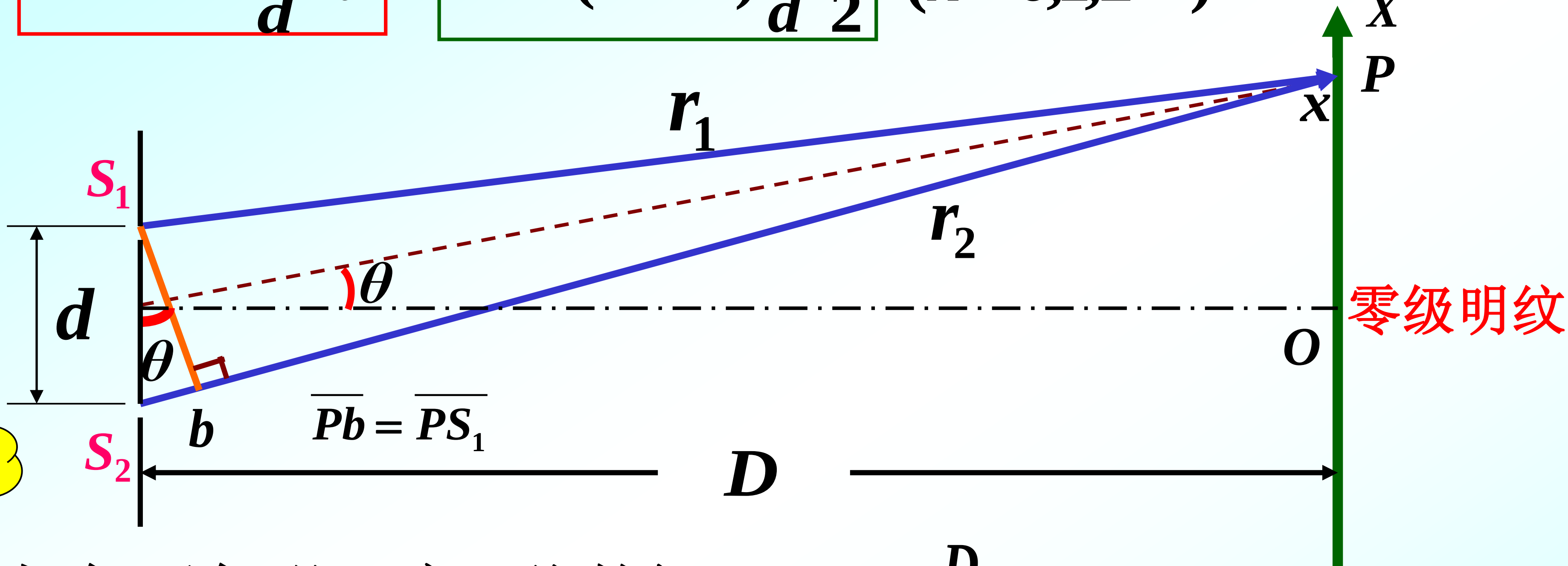
$$\Delta\varphi=2\pi\left(\frac{L_2}{\lambda_2}-\frac{L_1}{\lambda_1}\right)=\frac{2\pi}{\lambda_0}\left(n_2L_2-n_1L_1\right)=\frac{2\pi}{\lambda_0}\delta$$

对于相干叠加

$$\boxed{\Delta\varphi=-\frac{2\pi}{\lambda}\left(r_2-r_1\right)+\left(\varphi_{20}-\varphi_{10}\right)}$$

$$\boxed{I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi}$$

$$x = \pm k \frac{D}{d}\lambda \qquad x = \pm(2k+1)\frac{D}{d}\frac{\lambda}{2} \quad (k = 0,1,2\cdots)$$



讨论

1）相邻两条明（暗）纹的间距：$\Delta x = \dfrac{D}{d}\lambda$

干涉图样是等间距明暗相间的直条纹。

2）D、λ 一定，$\Delta x \propto \dfrac{1}{d}$　$d\downarrow$，$\Delta x\uparrow$ 条纹越清晰，

反之 $\Delta x\downarrow$。d大到一定程度，条纹全部集中到屏中心。

3）$\lambda = \dfrac{\Delta x d}{D}$　由此，可测出各种光波的波长。

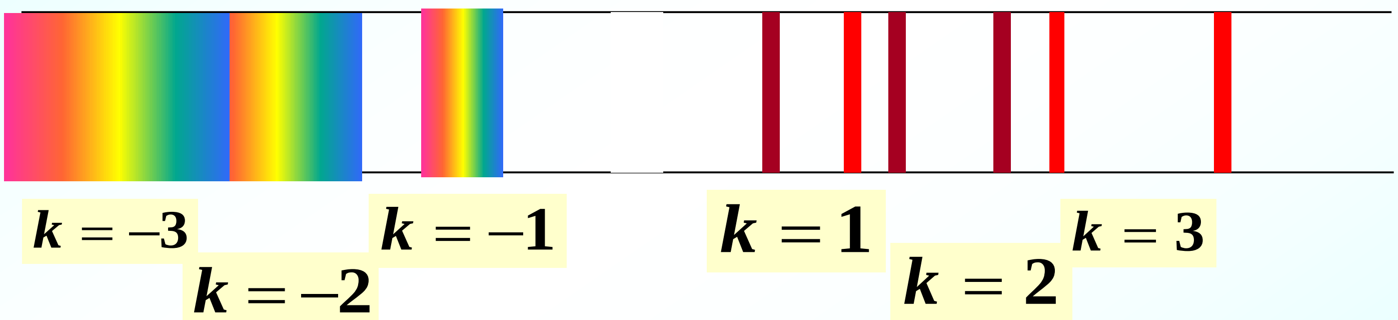
$$x_k = \pm k \frac{D}{d}\lambda \qquad x_k = \pm(2k+1)\frac{D}{d}\frac{\lambda}{2} \qquad (k=0,1,2\cdots)$$

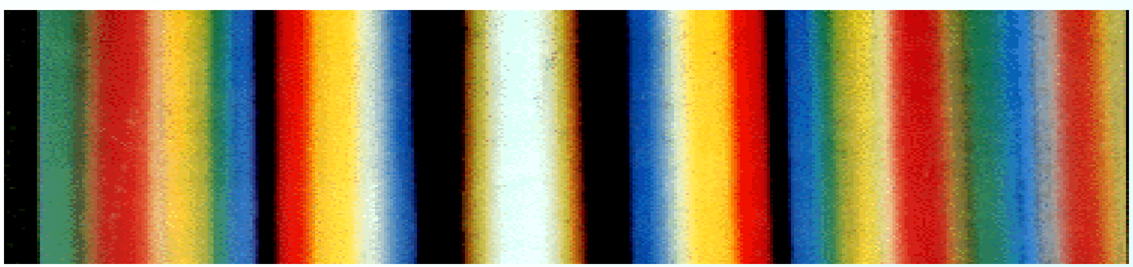
4）D、d 一定， $x_k \propto \lambda$，同一级上 $\lambda\uparrow, x_k\uparrow$（中央极大除外）

若白光入射，每一级都是彩色条纹分布 ——色散

杨氏干涉条纹是等间距的直条纹。

若用复色光源，则干涉条纹是彩色的(色散)。





白光入射的杨氏双缝干涉照片

$$x_k = \pm k \frac{D}{d}\lambda$$ 明纹

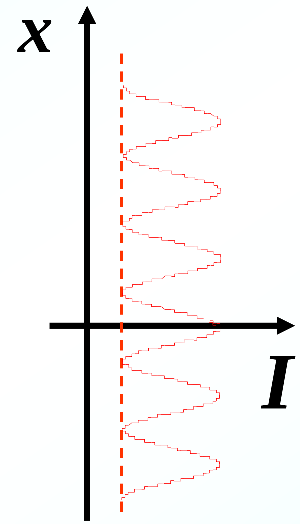
$$x_k = \pm(2k+1)\frac{D}{d}\frac{\lambda}{2}$$ 暗纹

5) 把一条缝加宽，条纹如何变化？

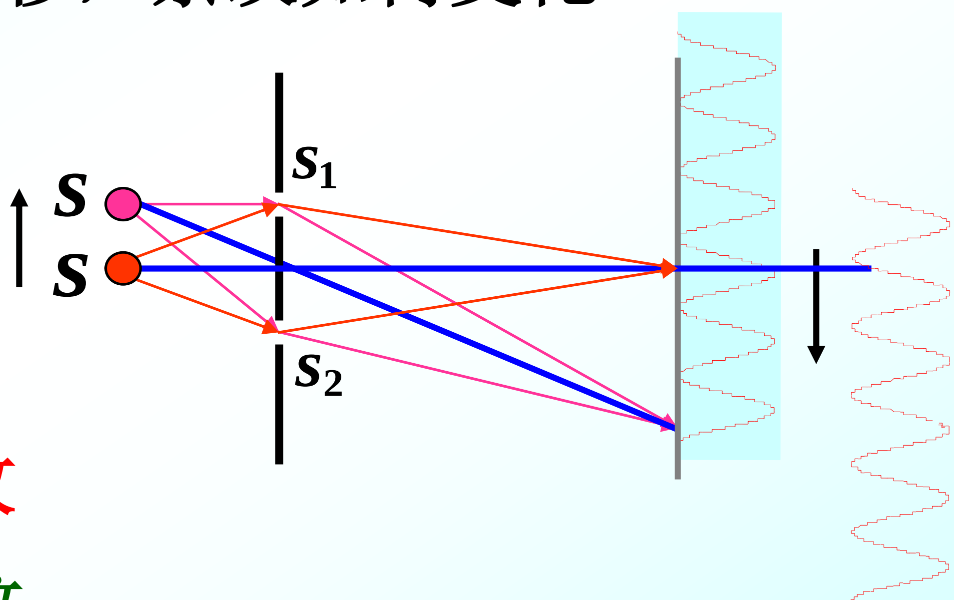
若 d不变，则条纹位置不变。

$E_{10} \neq E_{20}$ { 则暗纹强度不为0，明纹强度也变大

条纹反差小（有衬底）。



6) 若把S向上移，条纹如何变化？



$$x_k = \pm k \frac{D}{d} \lambda$$ 明纹

$$x_k = \pm (2k+1) \frac{D}{d} \frac{\lambda}{2}$$ 暗纹

$\Delta r = 0 \quad (k=0)$ 中央明纹向下移动

例： 已知杨氏实验中：$\lambda=0.55\mu$m，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。

$$x_k=\pm k\frac{D}{d}\lambda$$

解：（1）根据公式： $\Delta x=\frac{D}{d}\lambda$

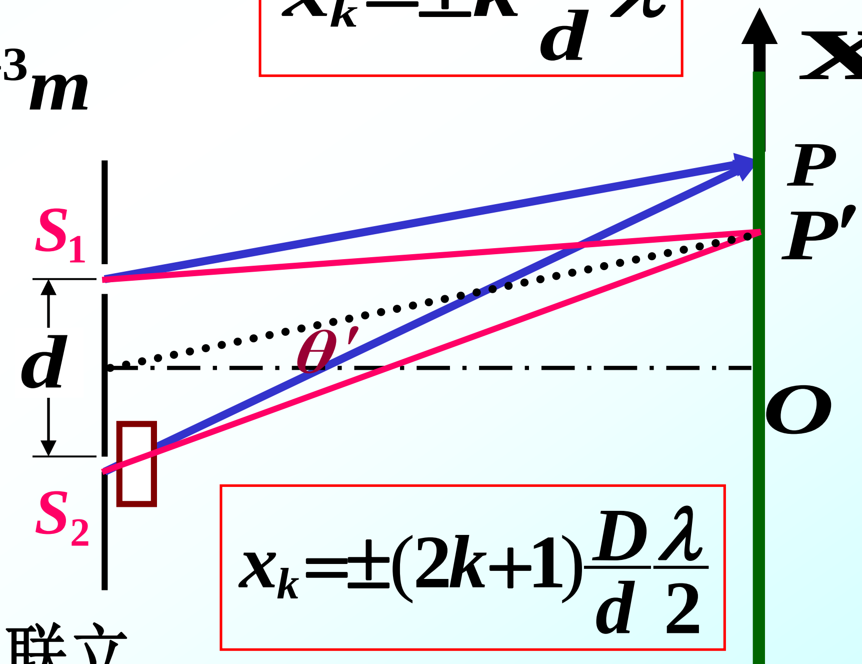
代入数据可得：$\Delta x=0.5\times10^{-3}m$

（2）设未放玻璃前P为k级极大：

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

加玻璃后增加了光程差：

$$l(n-1)$$



$$x_k=\pm(2k+1)\frac{D}{d}\frac{\lambda}{2}$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta r'&=r_2'-r_1'=d\sin\theta'+(n-1)l=k\lambda\\ x_{p'}&=D\,tg\,\theta'=D\sin\theta'\end{aligned}\right\}\text{联立}$$

求得： $x_{p'}=\frac{D}{d}[k\lambda-(n-1)l]$ 则：$\Delta x=x_{p'}-x_p=\frac{D}{d}(1-n)l<0$

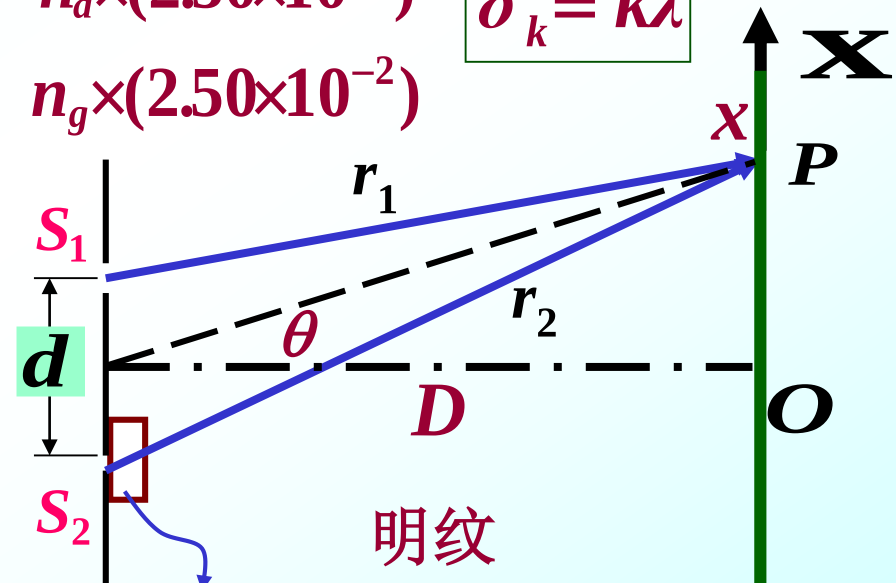
注：若测得Δx，则可求出n。 另：可从零级明纹（中央明纹）考虑。

例： 在杨氏实验装置中，S_1、S_2两光源之一的前面放一厚l=2.50cm的玻璃容器，先是充满空气，后是排出空气，再充满试验气体，结果发现光屏幕上有21条亮纹通过屏上某点而移动了，入射的波长为λ=656.2816nm，空气的折射率n_a=1.000276，求试验气体的折射率n_g.

解：

容器中 $\begin{cases} \text{充满空气时光程为} & n_a\times(2.50\times10^{-2}) \\ \text{充满试验气体时光程为} & n_g\times(2.50\times10^{-2}) \end{cases}$

$\boxed{\delta_k = k\lambda}$



设$n_g > n_a$, 则据题意光程的改变为,

$$(n_g - n_a)\times2.5\times10^{-2} = 21\lambda$$

故 $n_g = 1.000827$

若$n_g < n_a$, 则据题意光程的改变为,

$$(n_g - n_a)\times2.5\times10^{-2} = -21\lambda$$

$n_g < 0$, 无意义。

$n = c/u$

$$\delta_k = [n_g l + n_a(r_2 - l)] - n_a r_1 = k\lambda$$

$$(n_g - n_a)\,l + n_a(r_2 - r_1) = k\lambda$$

$$r_2 - r_1 = d\sin\theta = d\cdot x/D$$

$$\boxed{x_k = k\frac{D}{n_a d}\lambda - \frac{D}{n_a d}(n_g - n_a)l}$$

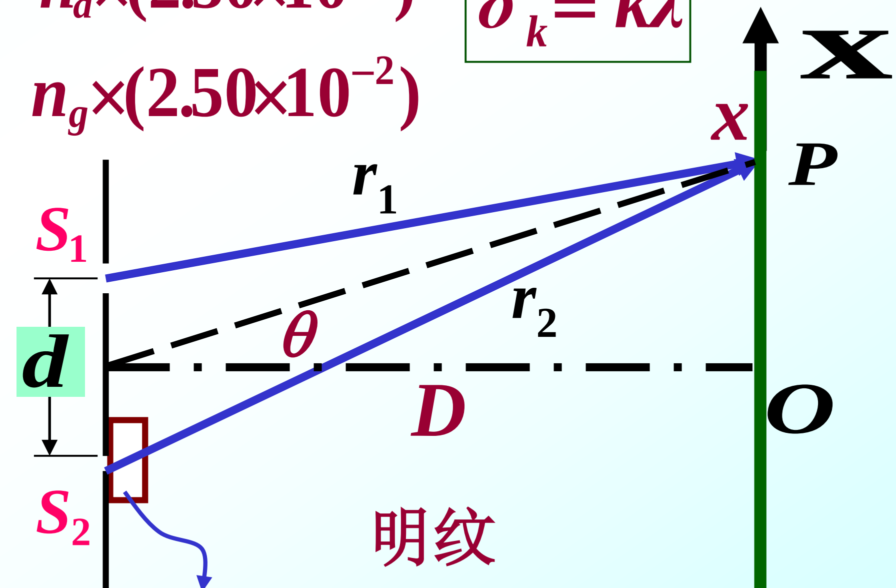
$n_a(r_2-r_1)=k'\lambda$ $(n_g-n_a)l+n_a(r_2-r_1)=k\lambda$ $k=k'\pm 21$

$(n_g-n_a)\,l=\pm 21\lambda$ $(n_g-n_a)\,l=21\lambda$

解：

容器中 { 充满空气时光程为 $n_a\times(2.50\times10^{-2})$
充满试验气体时光程为 $n_g\times(2.50\times10^{-2})$

$\boxed{\delta_k=k\lambda}$



设$n_g>n_a$，则据题意光程的改变为，

$$(n_g-n_a)\times2.5\times10^{-2}=21\lambda$$

故 $n_g=1.000827$

若$n_g<n_a$，则据题意光程的改变为，

$$(n_g-n_a)\times2.5\times10^{-2}=-21\lambda$$

$n_g<0$，无意义。

$n=c/u$

$$\delta_k=[n_gl+n_a(r_2-l)]-n_ar_1=k\lambda$$

$$(n_g-n_a)\,l+n_a(r_2-r_1)=k\lambda$$

$$r_2-r_1=d\sin\theta=d\cdot x/D$$

$$\boxed{x_k=k\frac{D}{n_ad}\lambda-\frac{D}{n_ad}(n_g-n_a)l}$$

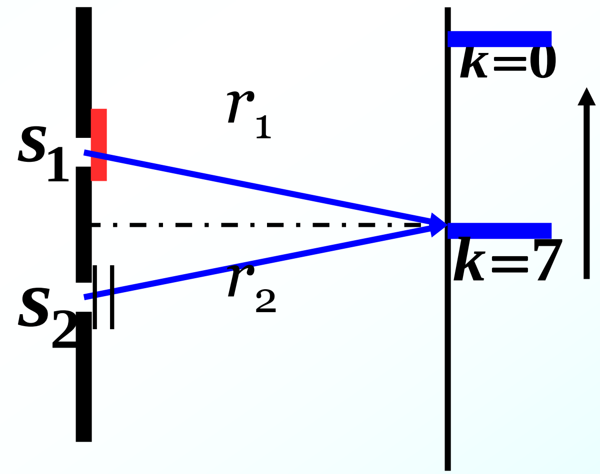
例. 双缝一缝前若放一云母片，原中央明纹处被第7级明纹占据。已知：$n_{云}$=1.58，光的波长为λ=550nm。
求：云母片厚度 l =?

解：插入云母片条纹为何会移动？

光程差改变了！

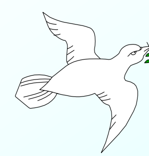
0级明纹移到哪里去了？

上面去了。



条纹级数增高一级则光程差增大几个λ？

一个λ

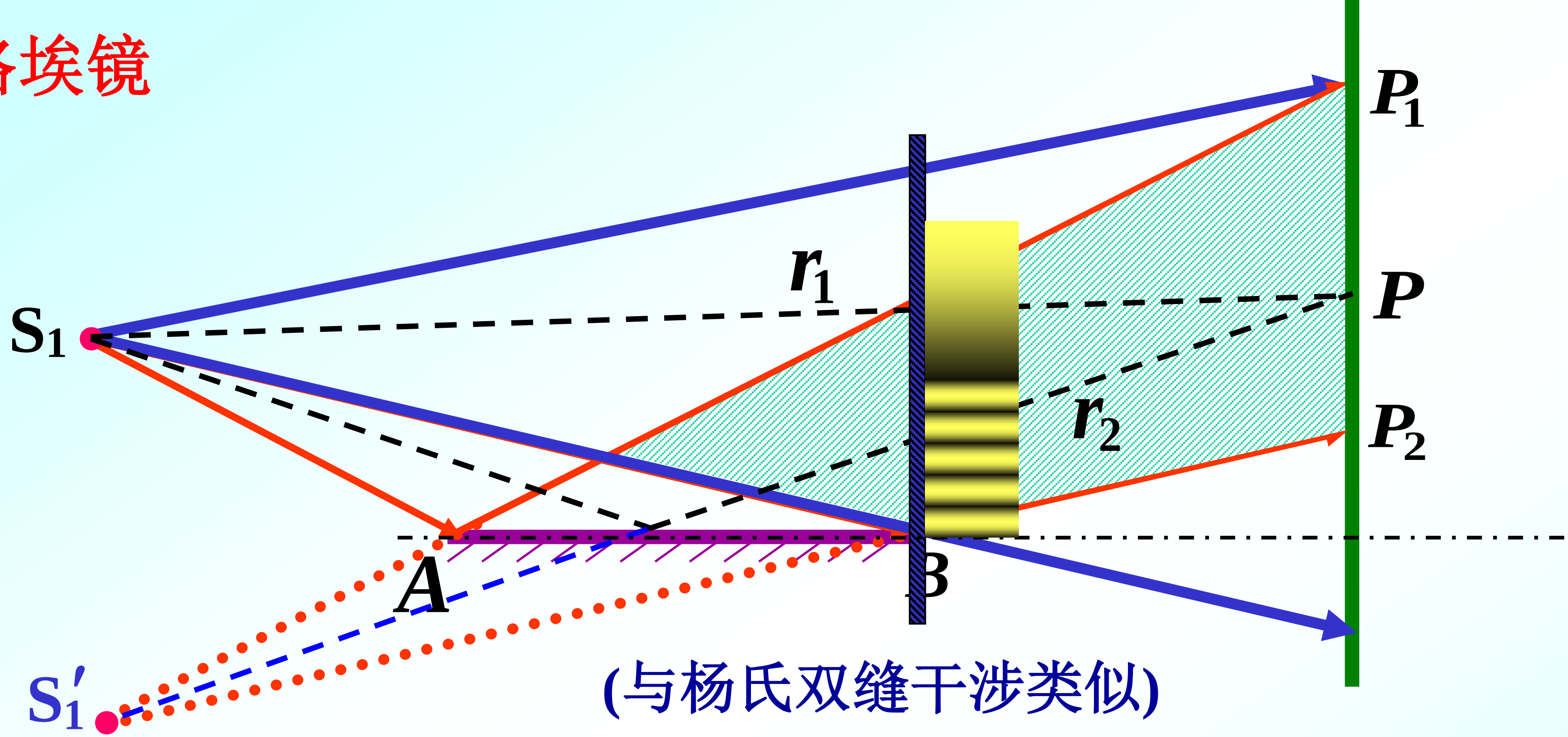


$\boxed{\delta = \pm k\lambda,\quad \text{明纹}}$

$\boxed{\text{光程差改变} \;= nl - l \;= 7\lambda}$

$$l = \frac{7\lambda}{n-1} = \frac{7\times550\times10^{-9}}{1.58-1} = 6.6\ \mu\text{m}$$

2. 洛埃镜

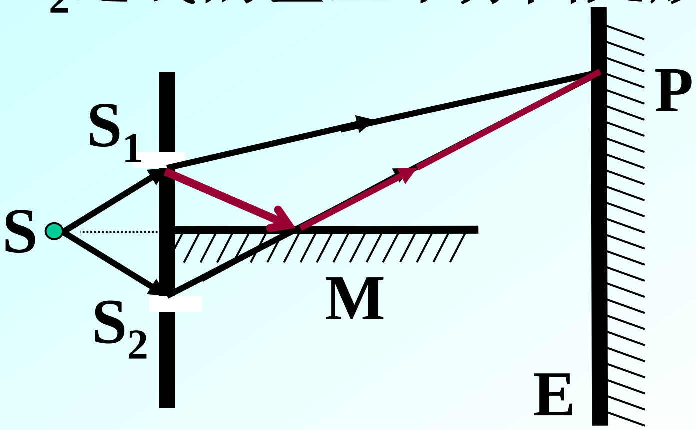


明暗条纹的位置：

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

将屏移到 B处，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：$\delta = OP - QP \boxed{+\lambda/2} > 0$

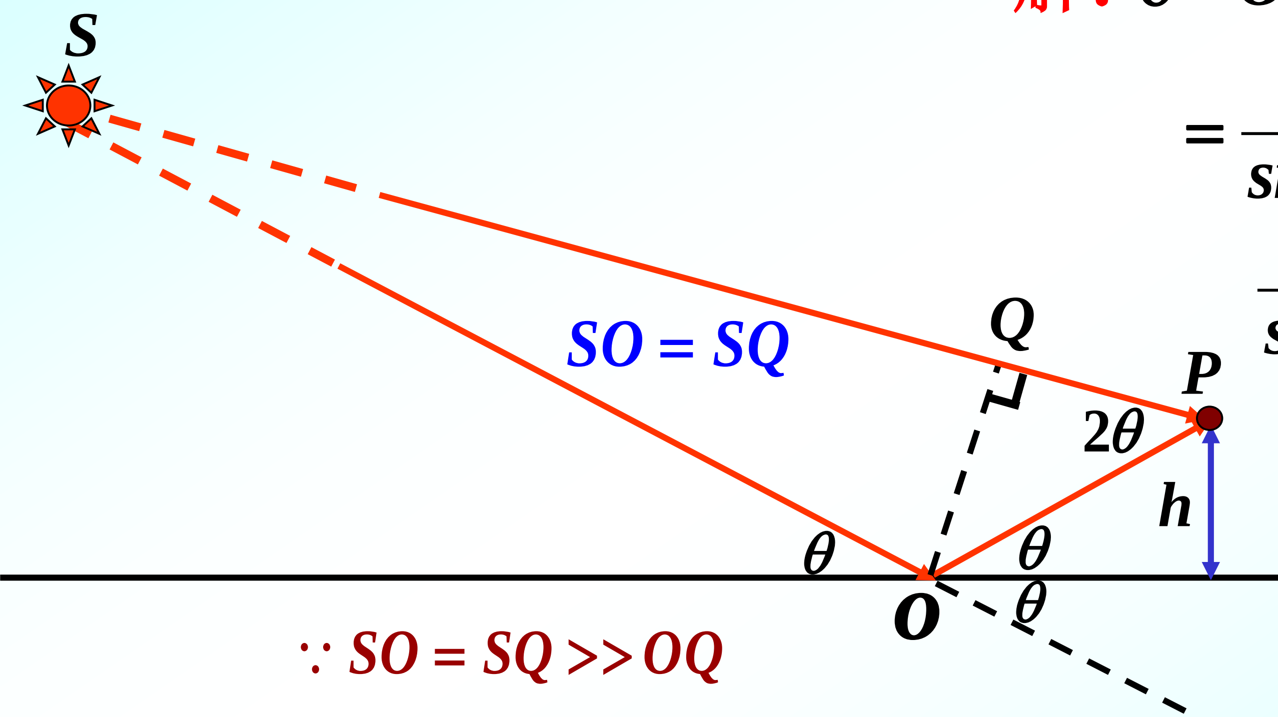
$$= \frac{h}{\sin\theta} - \frac{h}{\sin\theta}\cos 2\theta + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

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

$$\frac{h}{\sin\theta}\cdot 2\sin^2\theta = (k-\frac{1}{2})\lambda$$

$$k=1 \quad \therefore 2h\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$\theta = \sin^{-1} 0\cdot1050 = 6^{0}2'$$

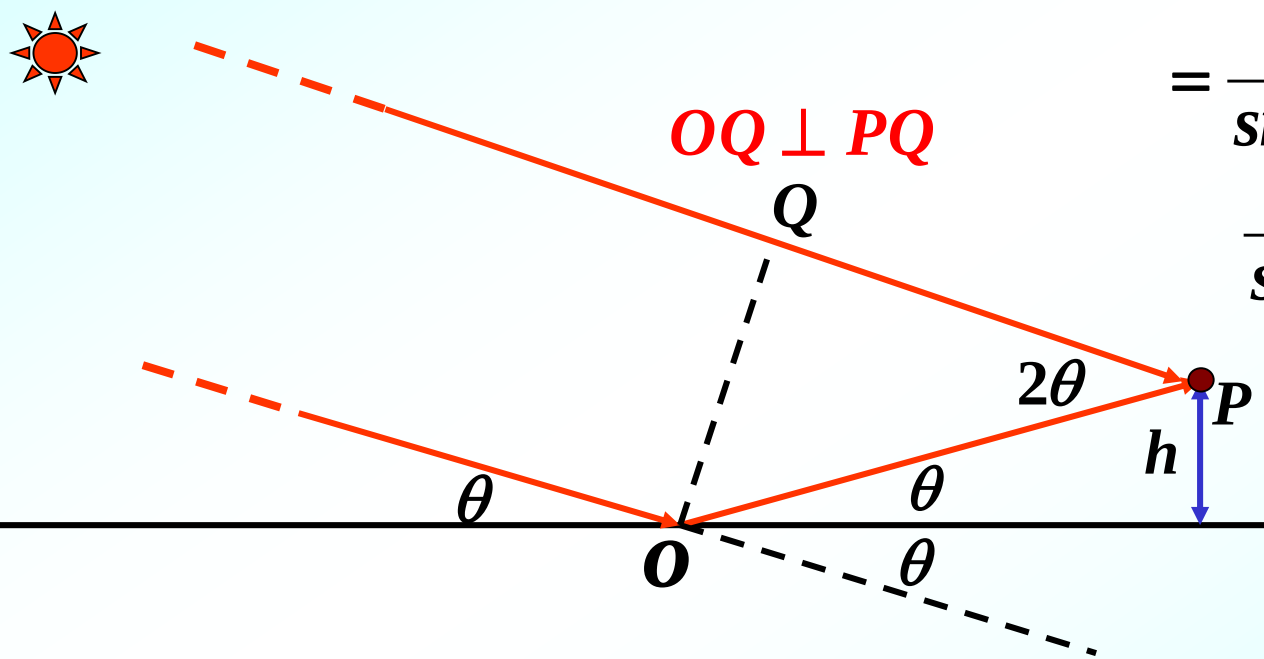


$\because SO = SQ >> OQ$

$\therefore OQ \perp QP$

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： $\delta = OP - QP \boxed{+\lambda/2} > 0$



$$= \frac{h}{\sin\theta} - \frac{h}{\sin\theta}\cos 2\theta + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

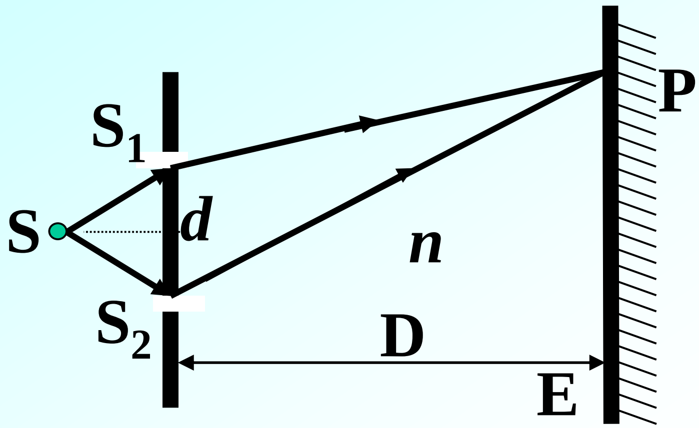
$$\frac{h}{\sin\theta}(1-\cos 2\theta) + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$\frac{h}{\sin\theta}\cdot 2\sin^2\theta = (k-\frac{1}{2})\lambda$$

$$k=1 \qquad \therefore 2h\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$$

$$\theta = \sin^{-1} 0\cdot 1050 = 6^0 2'$$

◆杨氏双缝干涉实验中的典型问题。考虑以下情形中干涉条纹的变化，即条纹的位置、间距等的变化。



(1) S上下移动

(2)双缝屏上下移动

(3) 改变双缝间距d

(4)改变D

(5)改变n

(6)改变波长λ(复色光入射)

(7)用玻璃片等盖住一条缝

(8)双缝屏后面加透镜

(9)求条纹间距

(10)求条纹的位置

$$\boxed{d\sin\theta = \pm k\lambda}$$

$$\boxed{d\sin\theta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}}$$

$$\boxed{x_k = \pm k\frac{D}{d}\lambda}$$

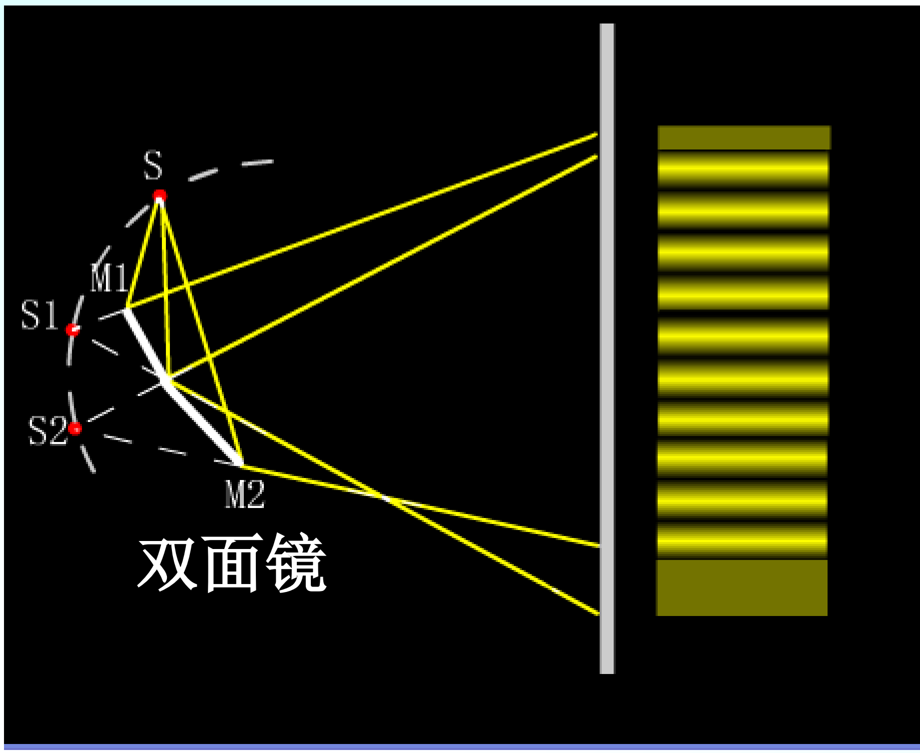
$$\boxed{\Delta x = \frac{D}{d}\lambda} \qquad \boxed{x_k = \pm(2k+1)\frac{D}{d}\frac{\lambda}{2}}$$

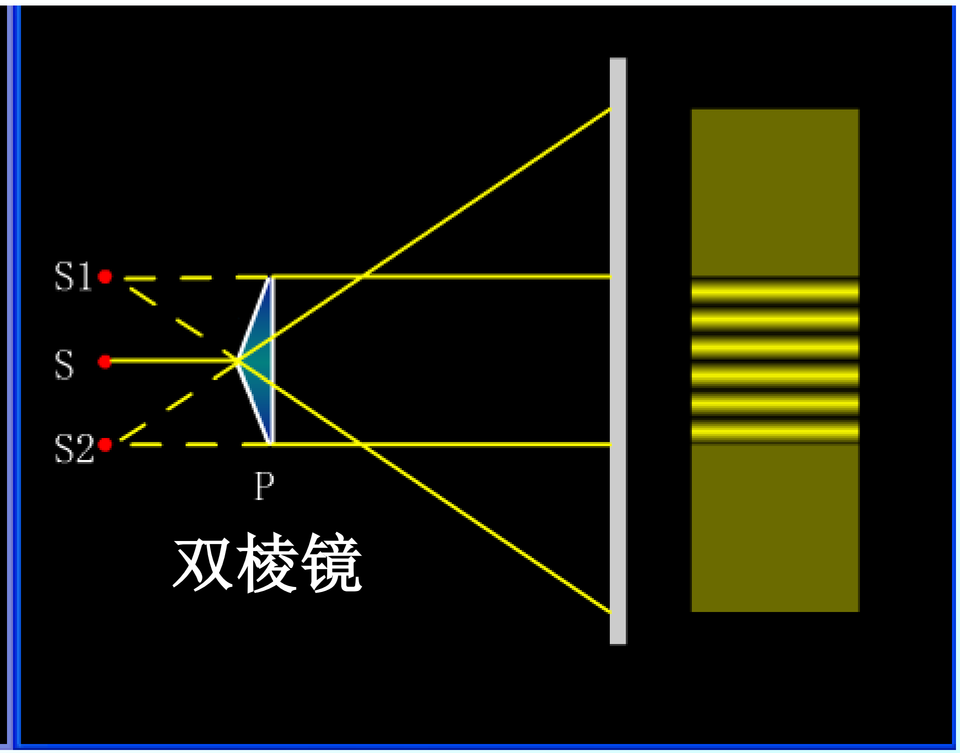
$$(k = 0,1,2\cdots)$$

3. 菲涅耳双面镜分波振面干涉（自学）

菲涅耳双棱镜分波振面干涉（自学）

(杨氏双缝干涉)

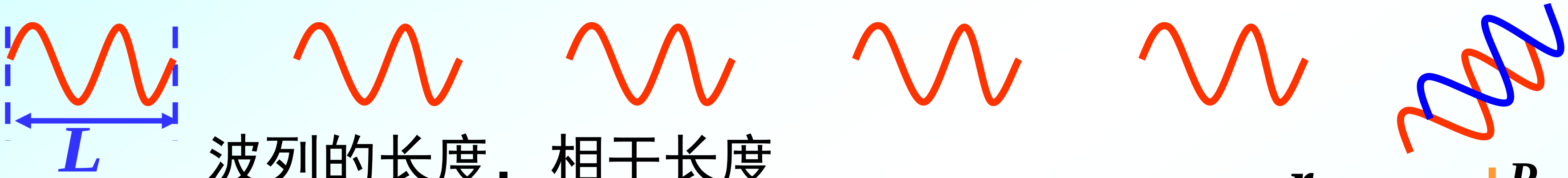




4. 时间相干性

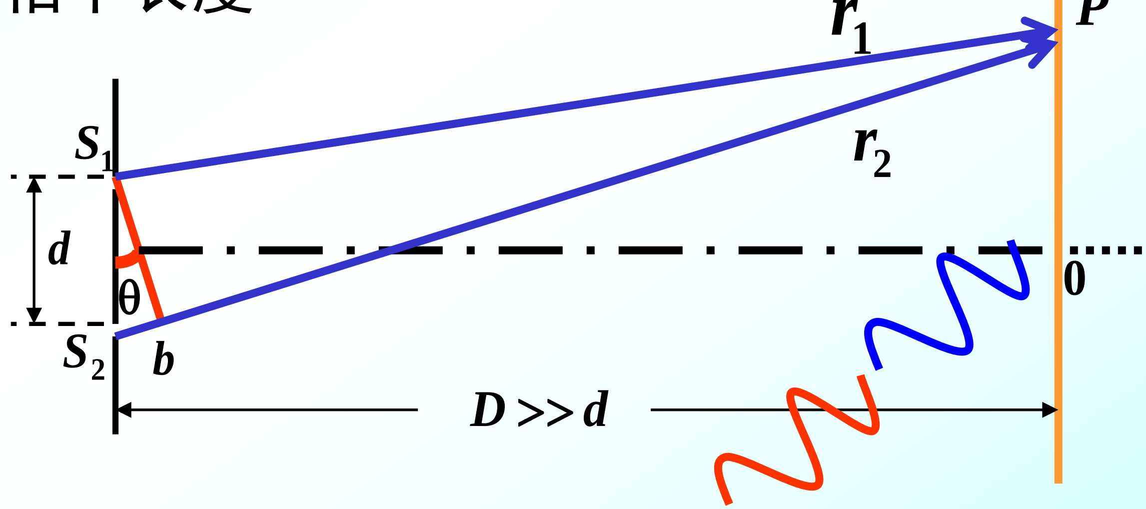
原子发光是间歇性的,每个波列持续的时间是

$$\Delta t = 10^{-8}\ \text{s}$$



波列的长度，相干长度

$$\delta \begin{cases} < L & \text{发生干涉} \\ = L & \text{非相干叠加} \\ > L & \text{不发生干涉} \end{cases}$$



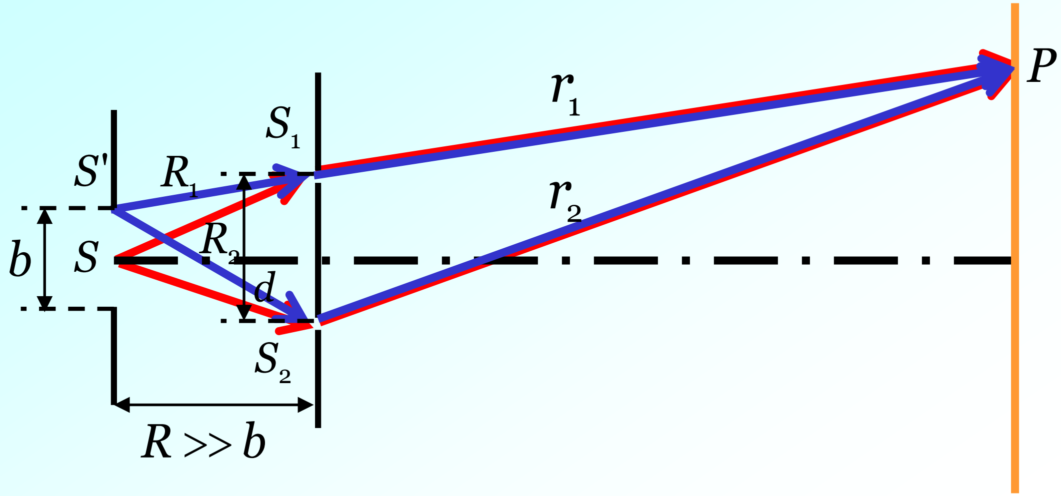
时间相干性：两路光程差过大，或光波经历两光路所用时间差过大，而导致的不相干现象。

单色性越好，即频带越窄，波列就越长，相干性越好。

普通光源的相干长度：　$0.1 \to 10\ \text{cm}$

激光的相干长度：　$10^5\ \text{m}$　　理论证明：$\uparrow L = \dfrac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \downarrow$

5. 空间相干性



$$\delta_b = R_2 - R_1 \approx \frac{R_2^2 - R_1^2}{2R}$$

$$= \frac{R^2 + (d/2 + b/2)^2}{2R} - \frac{R^2 + (d/2 - b/2)^2}{2R}$$

$$= \frac{bd}{2R}$$

中心S发出的光到达双缝的光程相等

边缘S'发出的光到达双缝的光程不相等

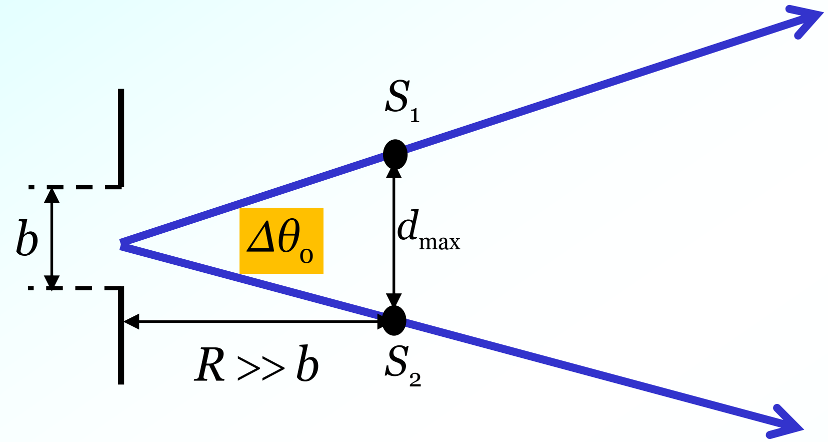
◆ 显然，对于观察屏上任意一点P，光源的中心所发的光与边缘所发的光都会产生附加光程差δ_b。

若：$\delta_b = \dfrac{\lambda}{2}$ S与S'各自发出的光经干涉后明暗正好相反，条纹消失，衬比度为零。

d一定时，光源的极限宽度： $b_0 = \dfrac{R}{d}\lambda$

b一定时，相干范围的横向线度： $d_{max} = \dfrac{R}{b}\lambda$

$$d_{\max} = \frac{R}{b}\lambda$$



空间相干性： 对于宽度为b的光源，只有在波前的一定范围内提取出的两个次波源才是相干的。

◆ 光的空间相干性可通过相干孔径角来表征：

孔径角 $$\Delta\theta_o \approx \frac{d_{\max}}{R} = \frac{\lambda}{b}$$

□ 相干次波源的最大间距对光源中心的张角。

■ 光源的线宽度越小，孔径角越大，空间相干性越好。

点光源：b→o，空间相干性好！

6. 把双缝干涉实验装置放在折射率为 n 的媒质中，双缝到观察屏的距离为 D，两缝之间的距离为 d ($d << D$)，入射光在真空中的波长为 λ，则屏上干涉条纹中相邻明纹的间距为________。