第五篇 光学

第13章 波动光学-2

尹 航

华中科技大学 物理学院

回 顾

光

- **光是电磁波** **光矢量** **电场E** 光强 $I \propto E_0^2$
- 产生于原子跃迁辐射
  - 自发辐射 非相干光源
  - 受激辐射 相干光源
- 光的独立性和叠加原理 ⟷ 波的独立性和叠加原理
- 光的干涉
  - 分波阵面干涉
  - 分振幅干涉
- 条纹衬比度： 干涉条纹明暗程度的差异
- **光程：** $L = \Sigma (n_i d_i)$ 光在介质中几何路程折算成真空中

本节内容

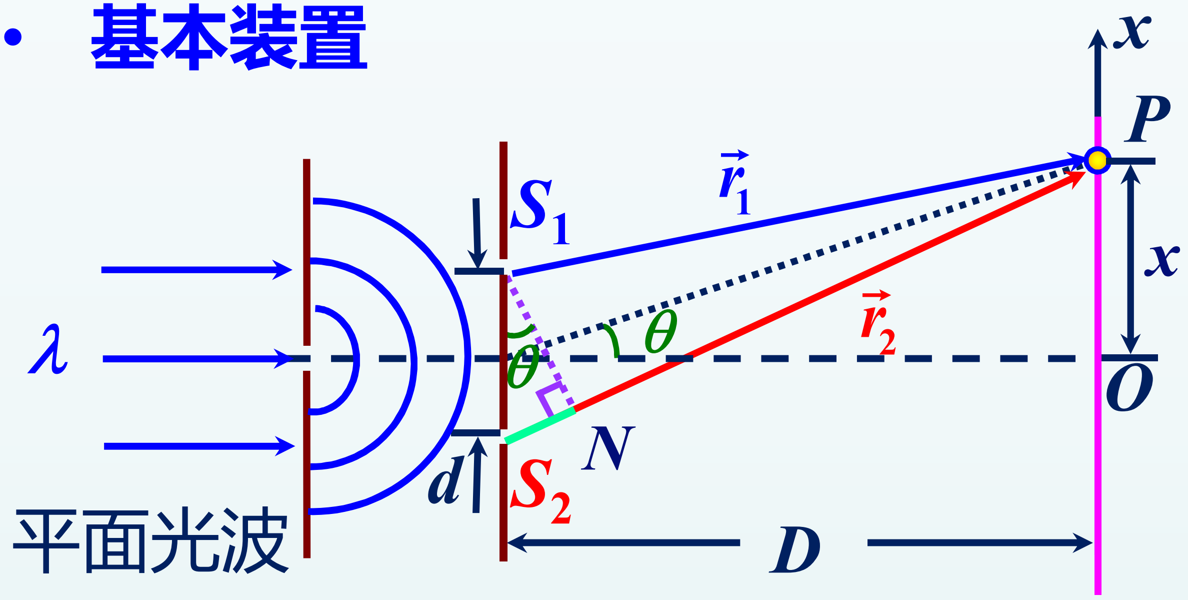
1 分波阵面干涉

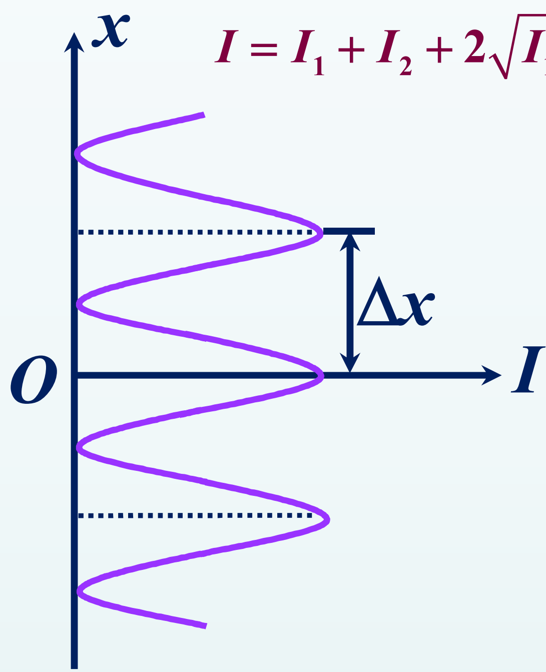
2 分振幅干涉

分波阵面干涉

□ 杨氏双缝干涉

- **基本装置**





$d >> \lambda$, $D >> d$ ($d \sim 10^{-4}$ m, $D \sim$ m)

光程差: $\delta = r_2 - r_1 \approx \overline{S_2N} = d\sin\theta$

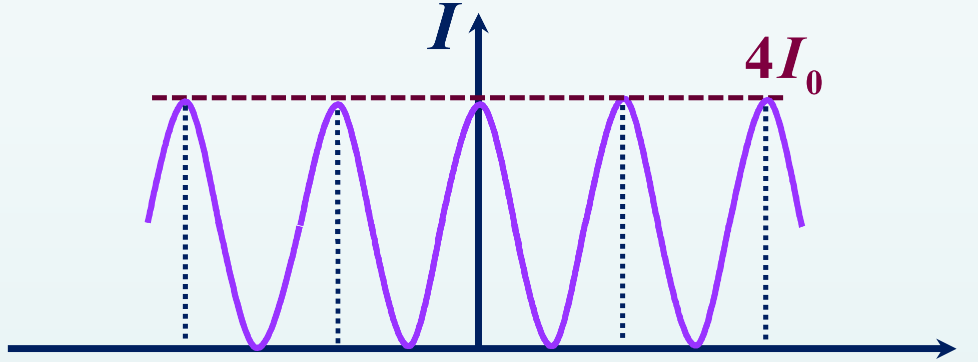
屏上强弱中心位置 $\delta \approx d\tan\theta = d\cdot\dfrac{x}{D}\begin{cases} = \pm k\lambda = \pm 2k\dfrac{\lambda}{2} & \text{明 纹} \\ = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗 纹} \end{cases}$

分波阵面干涉

- **光强分布**

$$\delta \approx d\tan\theta = d\cdot\frac{x}{D}\begin{cases} = \pm k\lambda & \text{明 纹} \quad x = \pm k\dfrac{D}{d}\lambda \\ = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗 纹} \quad x = \pm(2k+1)\dfrac{D}{2d}\lambda \end{cases}$$

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



$\Delta\varphi$	-4π	-2π	0	2π	4π
k	-2	-1	0	1	2
$\sin\theta$	$-2\dfrac{\lambda}{d}$	$-\dfrac{\lambda}{d}$	0	$\dfrac{\lambda}{d}$	$2\dfrac{\lambda}{d}$

光 强：$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi$

相位差：$\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}\delta = \dfrac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta$

若$I_1 = I_2$，则 $I = 4I_0\cos^2\dfrac{\Delta\varphi}{2}$

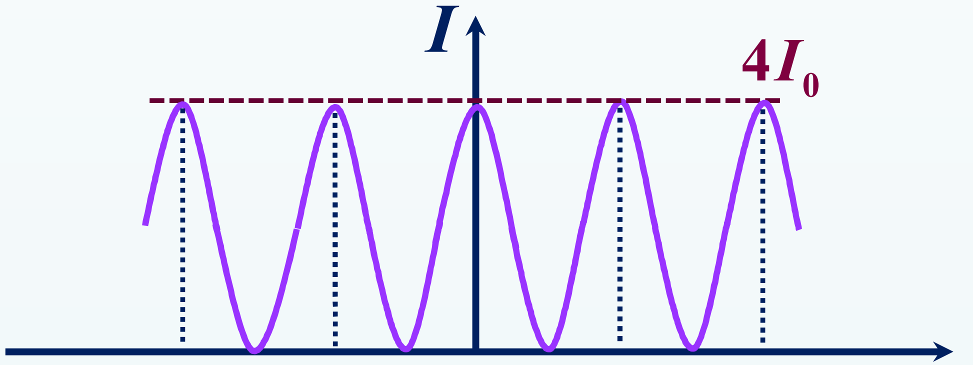
明纹级次 $\boxed{k = \dfrac{d\sin\theta}{\lambda}}$

分波阵面干涉

- **双缝干涉条纹的特点**

① 一系列平行的明暗相间的条纹；

② 中间级次低，两边级次高；



$\Delta\varphi$	-4π	-2π	0	2π	4π
k	-2	-1	0	1	2
$\sin\theta$	$-2\frac{\lambda}{d}$	$-\frac{\lambda}{d}$	0	$\frac{\lambda}{d}$	$2\frac{\lambda}{d}$

级次 $k=\dfrac{d\sin\theta}{\lambda}=\dfrac{r_2-r_1}{\lambda}$

明纹： $\pm k$， $k=0,1,2\ldots$

暗纹： $\pm(2k+1)/2$　$k=0,1,2\ldots$　或者$\pm(2k-1)/2$　$k=1,2\ldots$

③ θ不太大时条纹等间距　$x_{明}=\pm k\dfrac{D}{d}\lambda \longrightarrow \boxed{\Delta x\uparrow=\dfrac{D}{d\downarrow}\lambda}$　可测波长

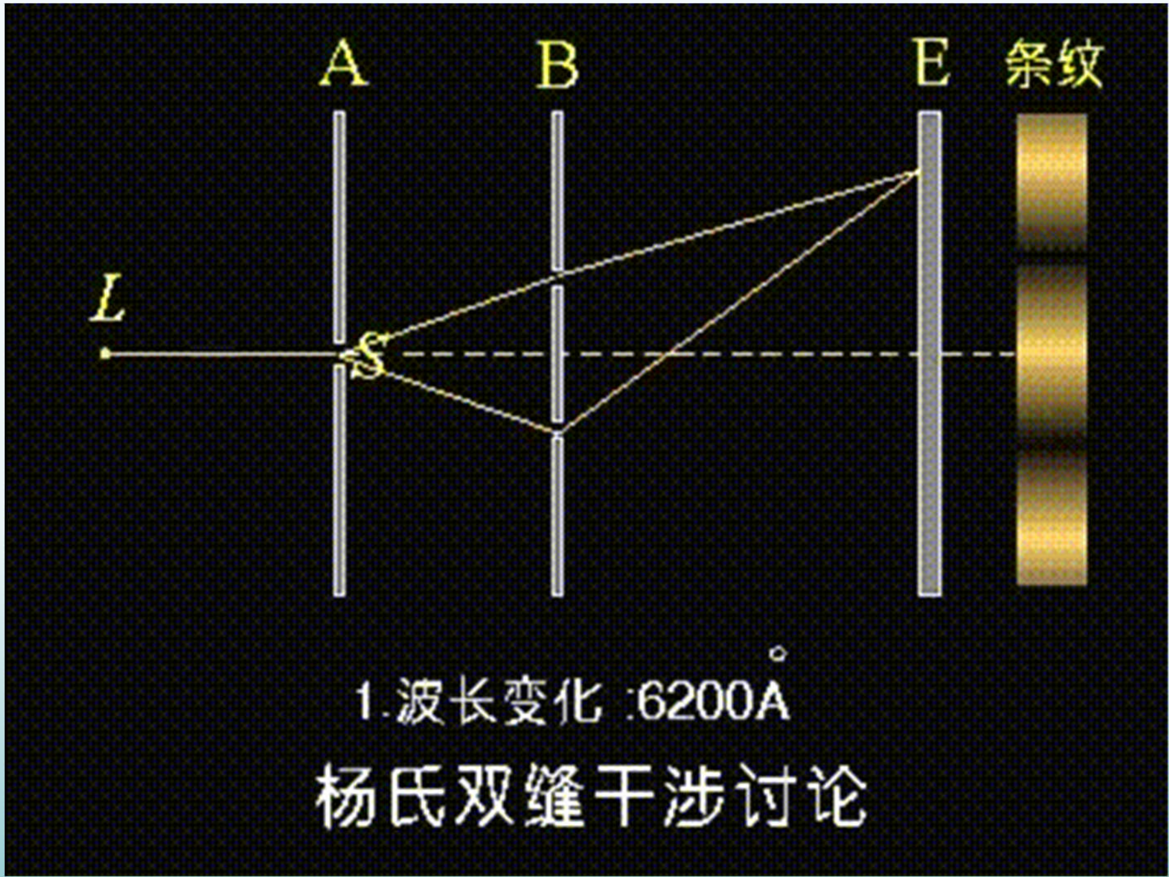
$\sin\theta\approx\tan\theta$

双缝间距越小，条纹越清晰可辨

分波阵面干涉

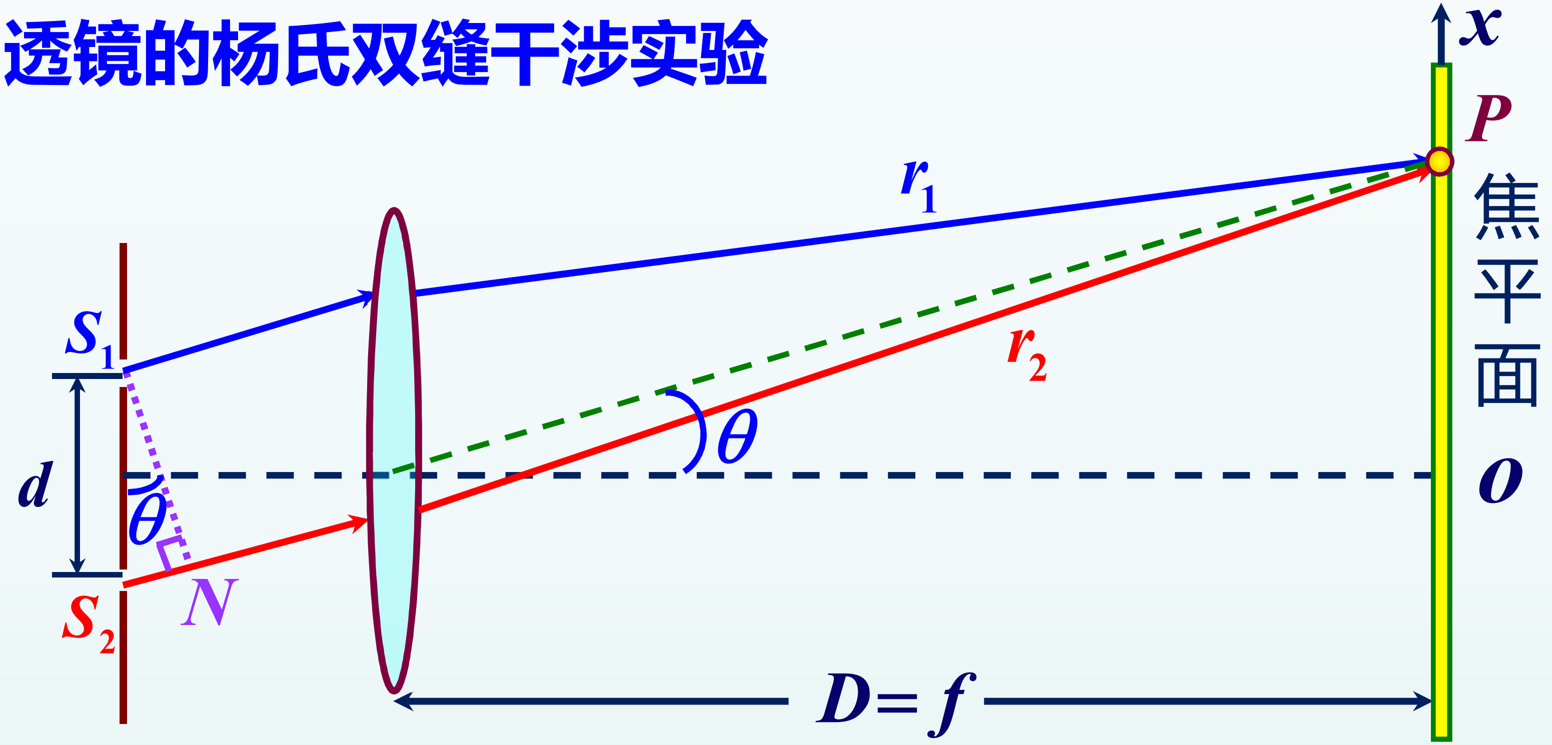
- **双缝干涉条纹的特点**

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



分波阵面干涉

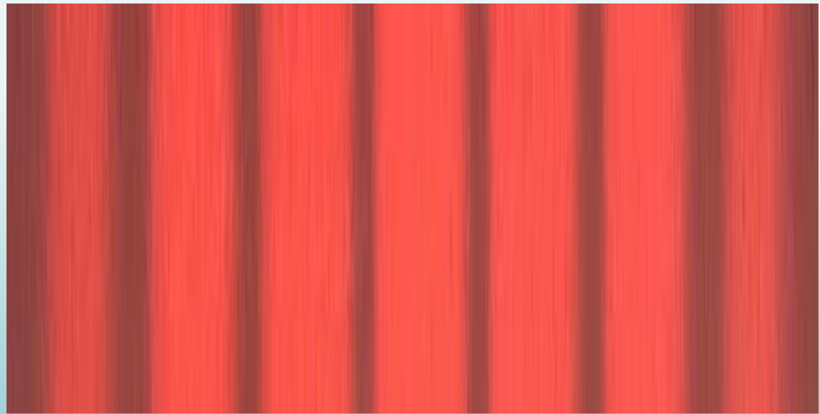
- **使用透镜的杨氏双缝干涉实验**



光程差及明暗条件：

$$\delta = \overline{S_2N} = d\sin\theta = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{明 纹} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗 纹} \end{cases}$$

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

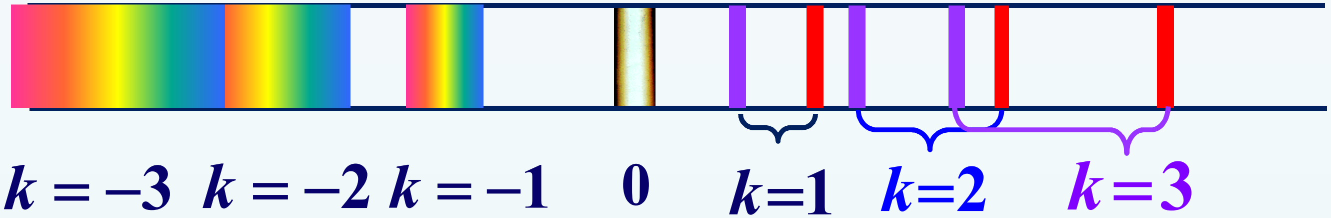


红光入射的杨氏双缝干涉

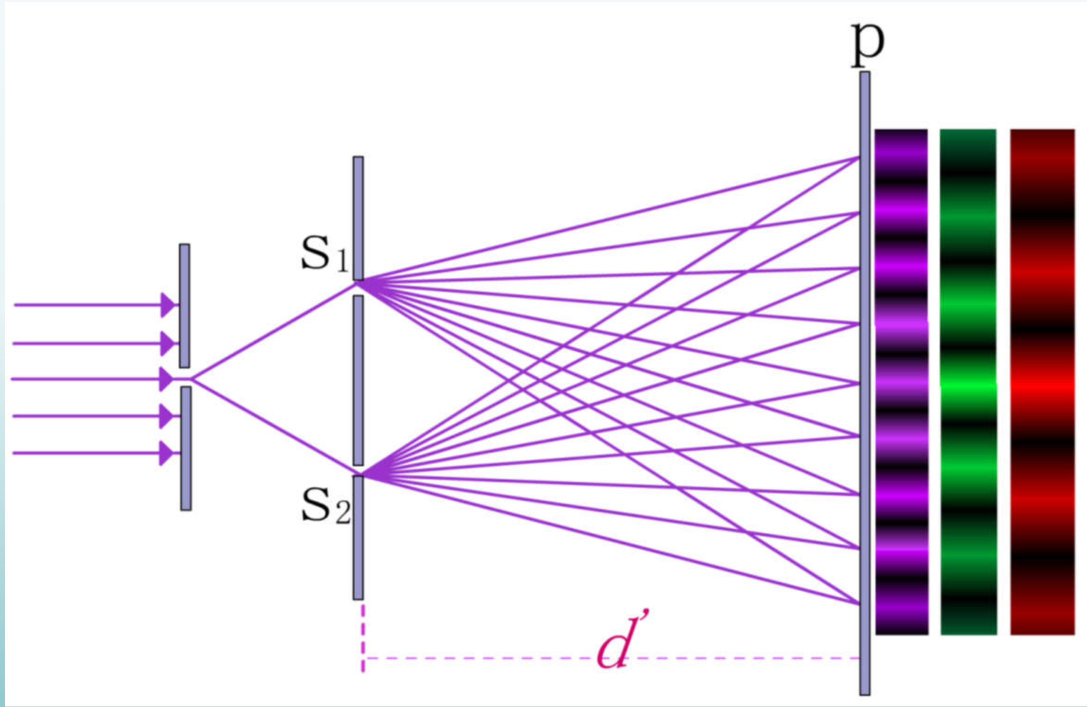
分波阵面干涉

- **白光入射**

赤橙黄绿青蓝紫……（非单一频率，非单一波长） 明纹 $x=\pm k\frac{D}{d}\lambda$



$x_k \propto \lambda$

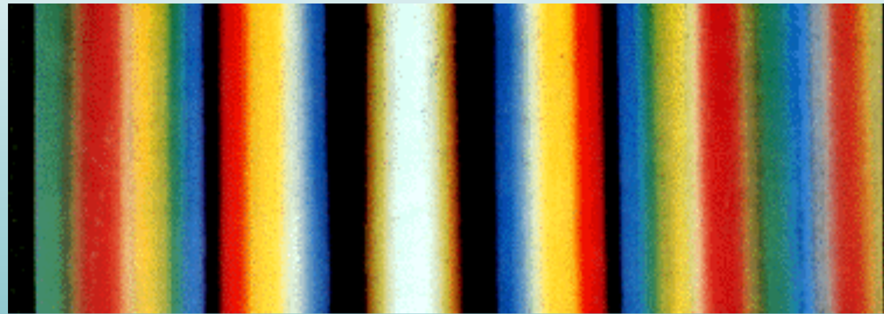


在同一级上 $\lambda\uparrow$ $x_k\uparrow$

(中央主极大除外)

重级现象

各级条纹之间存在重复覆盖



分波阵面干涉

- **重级现象**　　明纹 $x=\pm k\dfrac{D}{d}\lambda$

在屏幕上 x 处发生重级时：$x=k_1\lambda_1\dfrac{D}{d}=k_2\lambda_2\dfrac{D}{d}$

干涉级次越高，重叠越容易发生

单色光不会出现重级现象

- **光干涉现象分析套路**

① 明确两相干光源；

② 正确计算相干光线的光程差；

③ 由干涉条件 $\delta=\begin{cases}\pm k\lambda & \text{明纹}\\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗纹}\end{cases}$

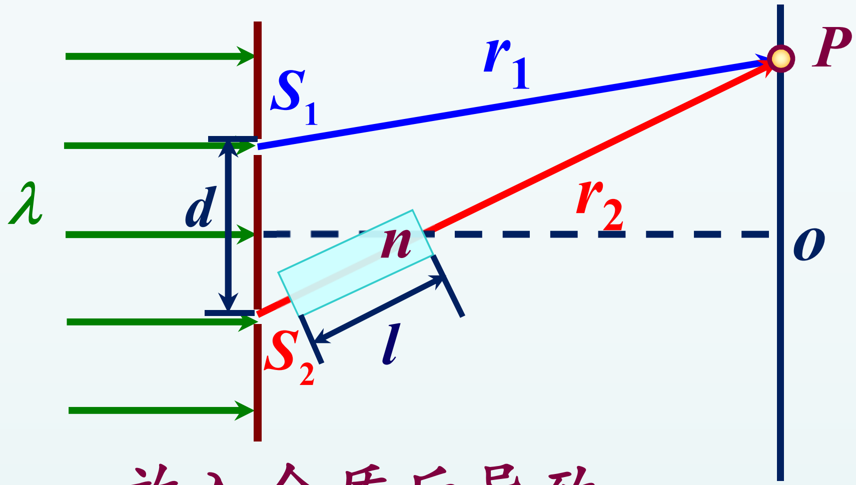
确定条纹性质：

形状、位置、级次

分布、条纹移动等。

分波阵面干涉

例. 如图所示的双缝干涉，有一长为l，折射率为n的介质置于S_2P的直线上的任意位置。求放入介质前后屏上同一点干涉级次的变化；条纹间距的变化；条纹的移动方向



解： 放入介质前的P点

$$\delta = r_2 - r_1$$

放入介质后的P点

$$\delta' = \left[(r_2 - l) + nl\right] - r_1 = (r_2 - r_1) + \boxed{(n-1)l}$$

放入介质后导致的光程差的改变 → 条纹的移动

(1) 屏上同一点干涉级次的变化

假设放入介质前，P点处于明纹中心

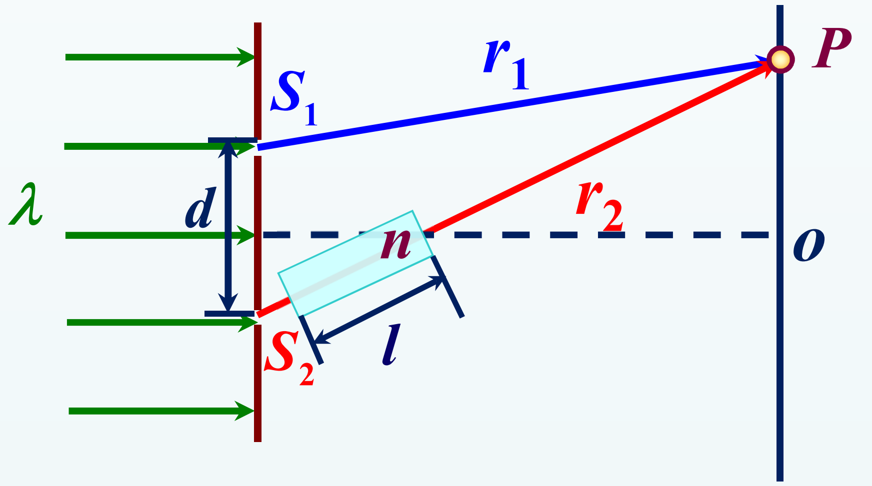
原P点：$\delta = r_2 - r_1 = k\lambda$

光程差每改变λ，条纹移一级

分波阵面干涉

解：放入介质后的P点

$$\delta' = \left[(r_2 - l) + nl\right] - r_1 = (r_2 - r_1) + \boxed{(n-1)l}$$



(1) 屏上同一点干涉级次的变化

假设放入介质前，P点处于明纹中心

原P点：$\delta = r_2 - r_1 = k\lambda$　　光程差每改变λ，条纹移一级

放入介质后

现P点：$\delta' = (r_2 - r_1) + (n-1)l = k'\lambda \longrightarrow (n-1)l = \Delta k\lambda \longrightarrow \Delta k = \dfrac{(n-1)l}{\lambda}$

可测透明介质长度或折射率

(2) 条纹间距的变化

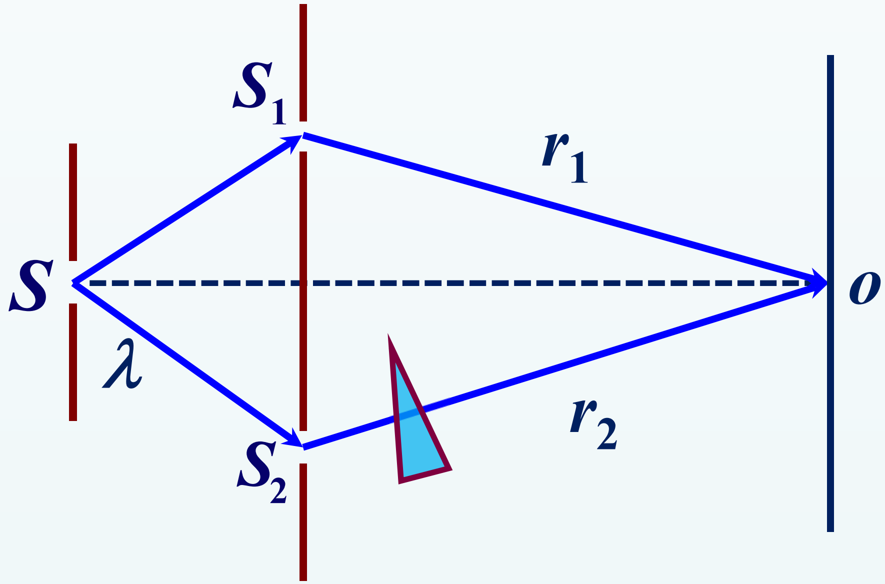
$$\Delta x = \frac{D}{d}\lambda$$ 不变

(3) 条纹的移动方向　$k' > k$　条纹向下平移

分波阵面干涉

例. 判断条纹的变化：

当劈尖缓慢向上移动时，屏上条纹间距的变化及条纹移动情况。



解：条纹间距：

$$\Delta x = \frac{D}{d}\lambda$$ 不变

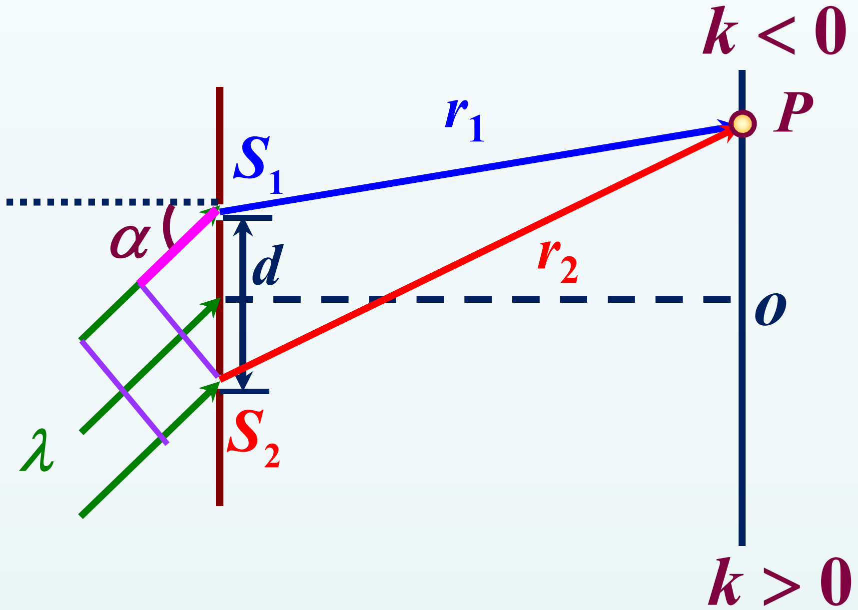
条纹移动情况 以0 级条纹为参考！

劈尖缓慢上移 $\longrightarrow$ 光程差 $\delta = r_2 - r_1$ 不断增大 $\xrightarrow{\delta = k\lambda}$ 级数增大

条纹向下平移

分波阵面干涉

例. 平行光斜入射问题：求双缝光在O点和任意P点干涉时的相位差。



解：任意P光程差。

$$\delta_P = d\sin\alpha + r_1 - r_2$$

任意P点，相干光的相位差。

$$\Delta\varphi_P = \frac{2\pi}{\lambda}\delta_P$$

O点光程差：$\delta_O = d\sin\alpha \longrightarrow \Delta\varphi_O = \dfrac{2\pi}{\lambda}\delta_O$

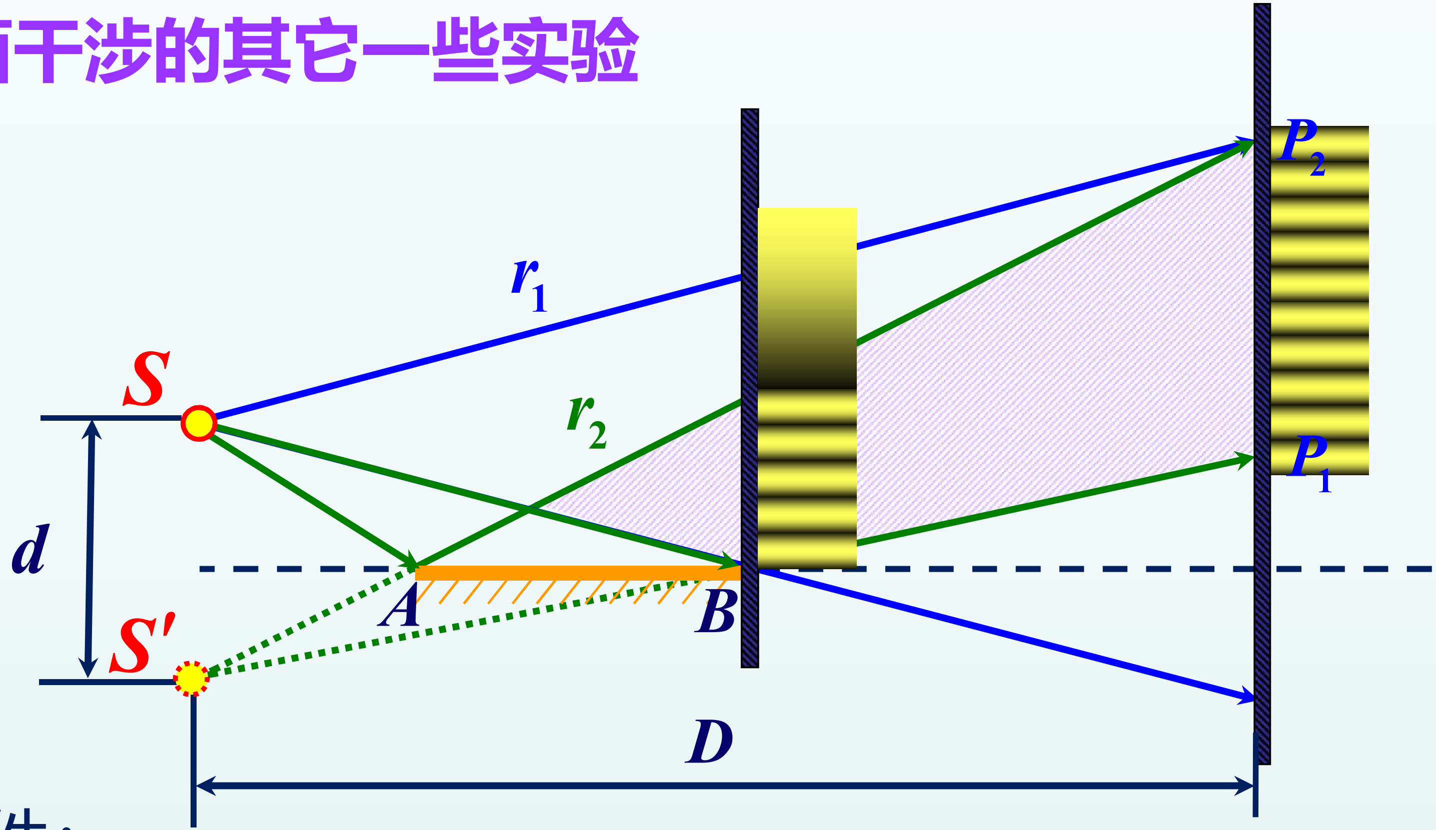
平行光由垂直入射改为题目中斜入射，$\alpha\uparrow \longrightarrow \delta_O\uparrow \xrightarrow{\delta_O = k\lambda} k\uparrow$

屏上条纹间距的变化及条纹移动？　　条纹向上移动

分波阵面干涉

□ 分波阵面干涉的其它一些实验

- **洛埃镜**



明暗条件：

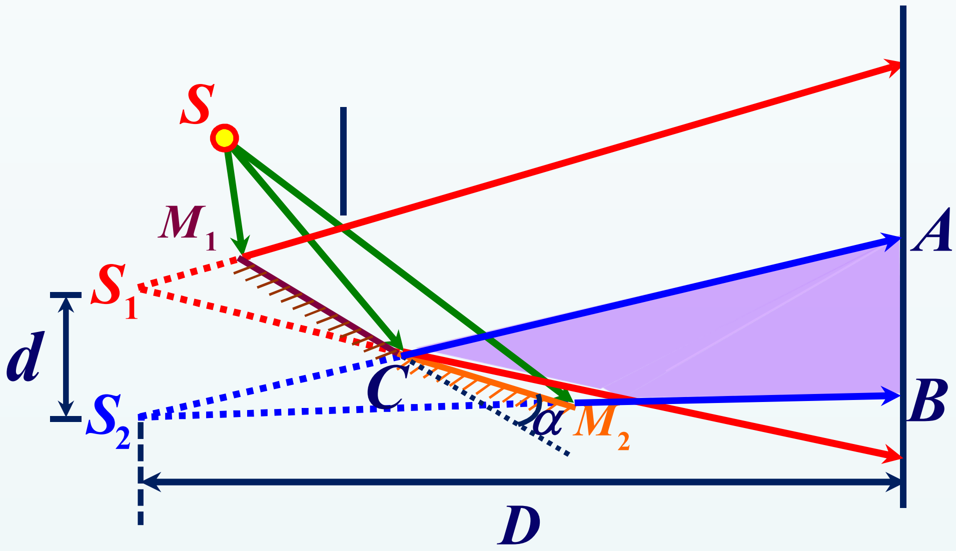
$$\delta = r_2 - r_1 \boxed{+\frac{\lambda}{2}} = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{明纹} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases}$$

半波损失

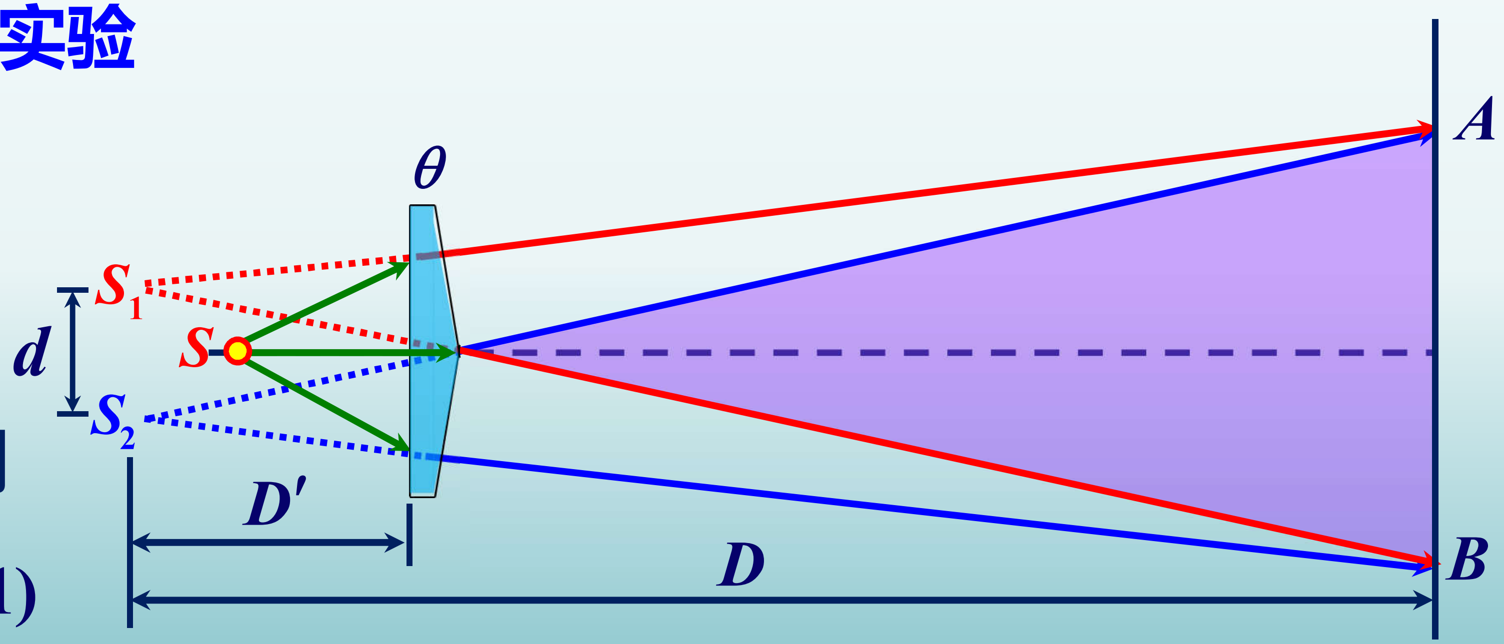
证实了半波损失现象。

分波阵面干涉

- **菲涅耳双面镜实验**



- **菲涅耳双棱镜实验**



几何光学证明

$$d = 2\theta D'(n-1)$$

分波阵面干涉

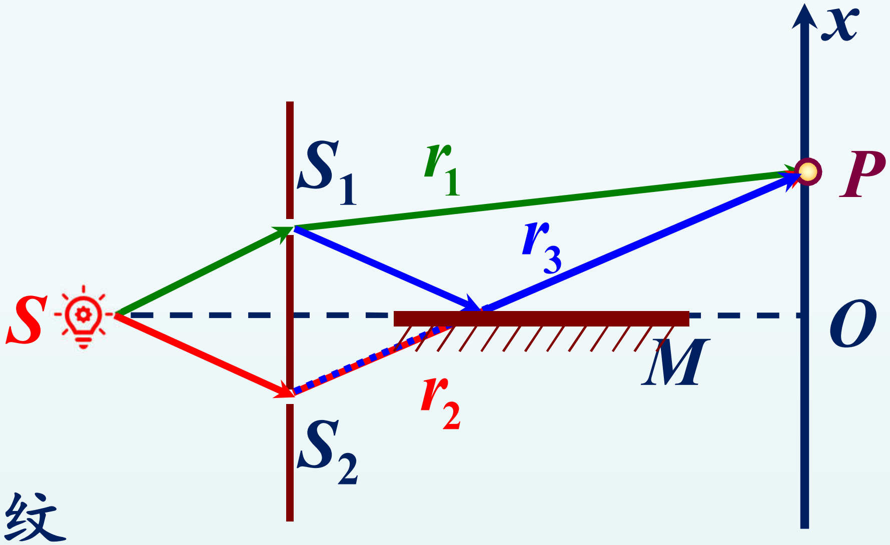
例. 在双缝干涉实验中，屏幕上的P点处是明条纹。若将缝S_2盖住，并在S_1、S_2连线的垂直平分面处放一反射镜M，则此时：

A、P点处仍为明条纹

B、P点处为暗条纹

C、无干涉条纹

D、不能确定P点是明纹还是暗纹



解析：光程差 $\delta_{21} = r_2 - r_1 \xrightarrow{\text{明纹}} \delta_{21} = k\lambda$

光程差 $\delta_{31} = r_3 - r_1 + \dfrac{\lambda}{2}$

$r_3 = r_2$

$\delta_{31} = \delta_{21} + \dfrac{\lambda}{2}$

$\delta_{31} = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}$ 暗纹

分波阵面干涉

例. 在双缝干涉实验中，两条缝的宽度原来是相等的，若其中一缝的宽度略微变窄，则：

A、干涉条纹的间距变宽

B、干涉条纹的间距变窄

C、干涉条纹的间距不变，但原极小的强度不再为零

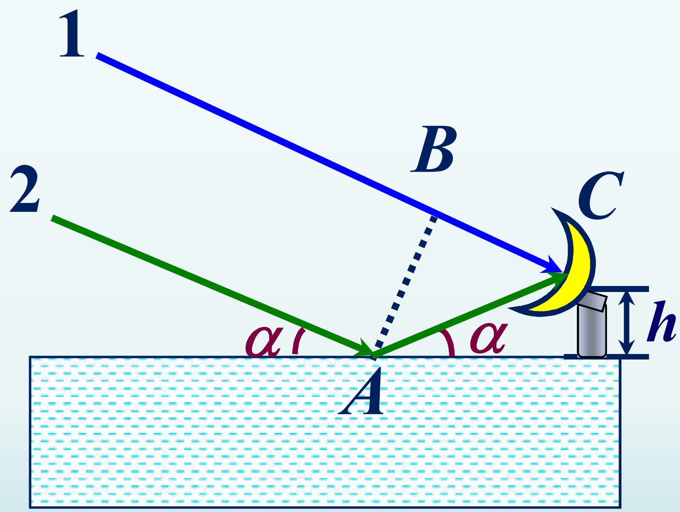
D、不再发生干涉现象

解析：条纹间距 $\Delta x=\dfrac{D}{d}\lambda$ 不变

缝宽变窄 ⟶ 光强减弱 ⟶ 光矢量振幅不同的相干光干涉

分波阵面干涉

例. 如图，离湖面 $h=0.5\ \mathrm{m}$处有一电磁波接收器位于C，当一射电星从地平面渐渐升起时，接收器断续地检测到一系列极大值。已知射电星所发射的电磁波的波长为20.0 cm，求第一次测到极大值时，射电星的方位与湖面所成角度。



解：计算光程差

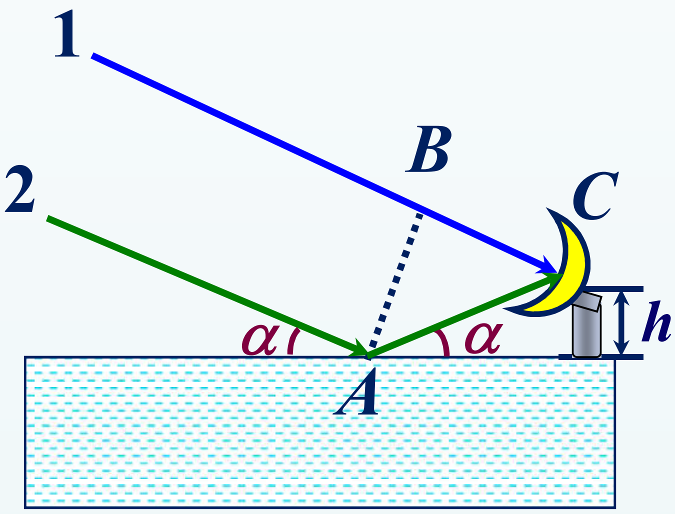
$$\delta = AC - BC \boxed{+\frac{\lambda}{2}} \rightarrow \text{半波损失}$$

$$= AC(1-\cos 2\alpha)+\frac{\lambda}{2}$$

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

极大时， $\delta = k\lambda$

分波阵面干涉



解：$\delta = \dfrac{h}{\sin\alpha}(1-\cos 2\alpha) + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda$

$\sin\alpha = \dfrac{(2k-1)\lambda}{4h}$

第一次测得，取 $k=1$

$\alpha_1 = \sin^{-1}\dfrac{20.0\times10^{-2}\ \text{m}}{4\times0.5\ \ \text{m}} = 5.74°$

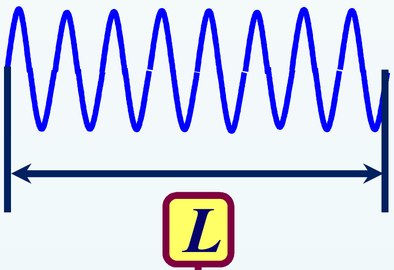
注意：

考虑半波损失时，附加波程差取 $\pm\dfrac{\lambda}{2}$ 均可，

符号不同，k 取值不同，对问题实质无影响。

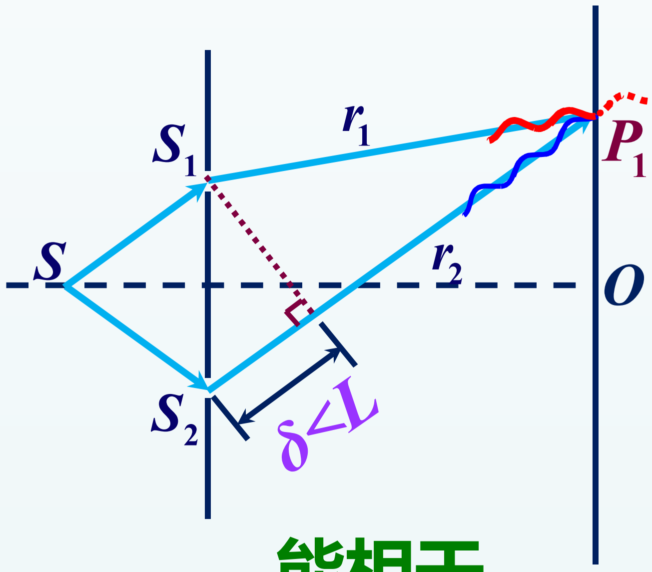
分波阵面干涉

□ 时间相干性

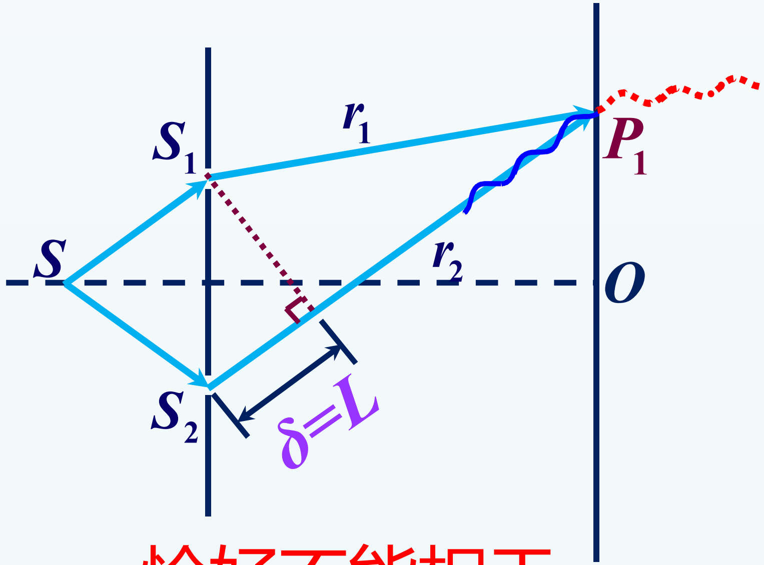


相干长度

相干时间 $\tau_0 = \dfrac{L}{c}$



能相干



恰好不能相干

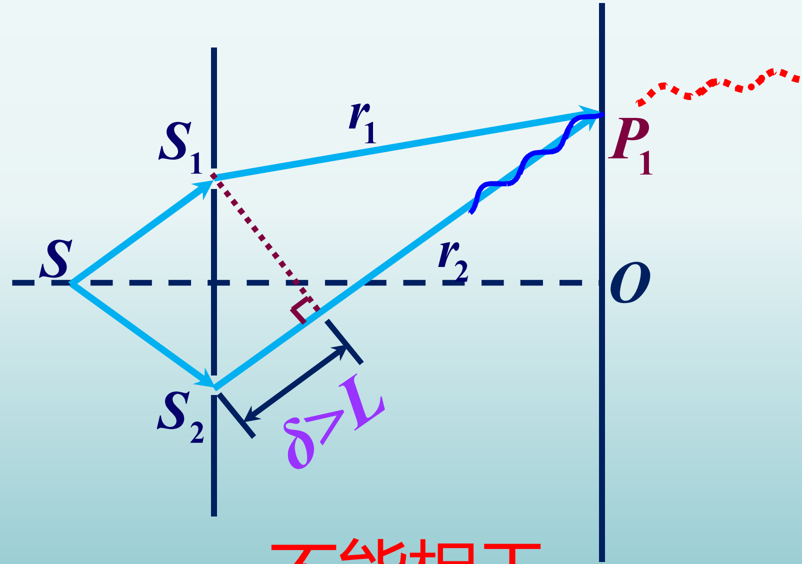
两光路的光程差过大

↓

光波经历两光路所用时间相差过大

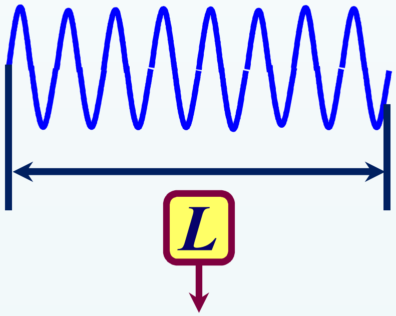
↓

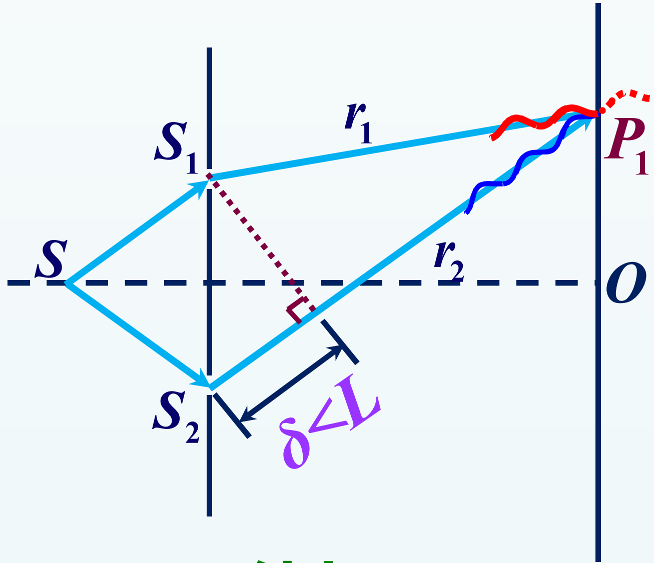
不能相干

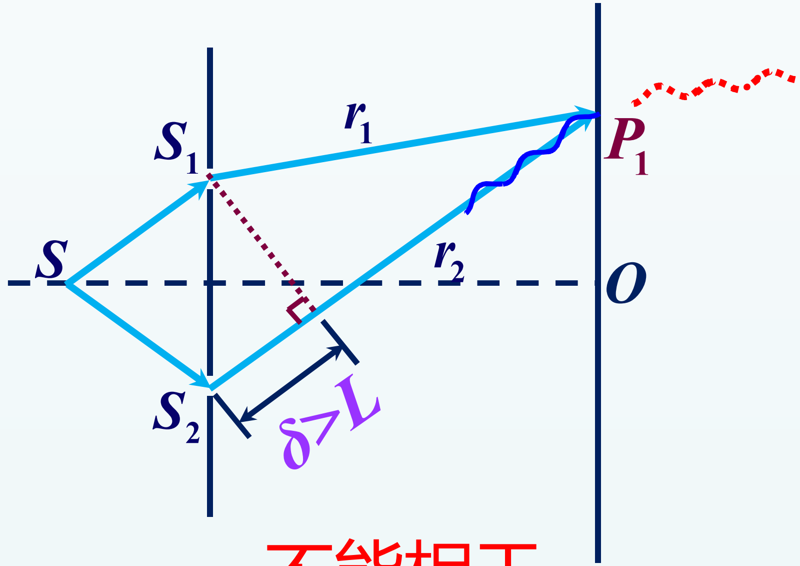


不能相干

分波阵面干涉







可以证明： $L = \dfrac{\lambda^2}{\boxed{\Delta\lambda}}$ $\Delta\lambda\downarrow$ $L\uparrow$ 光波**单色性**越好，相干长度越长

反映光波的线宽 量化

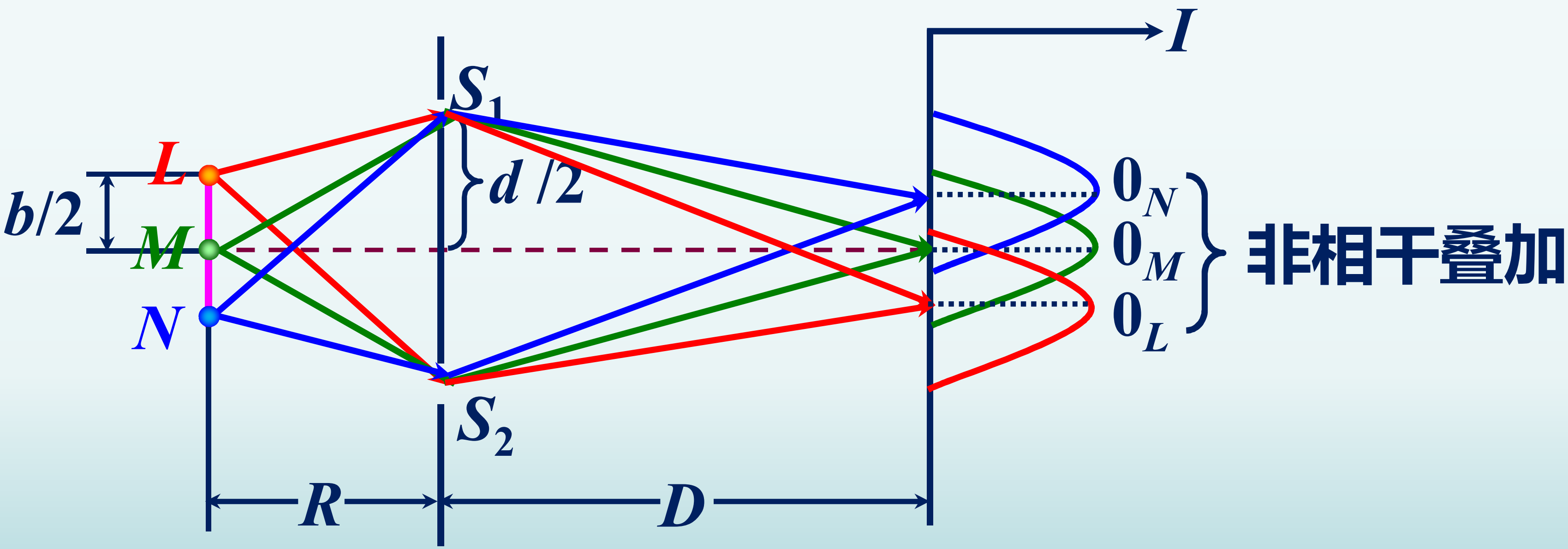
普通光源： $\Delta\lambda$： $10^{-3}-10^{-1}$ nm ⟶ 相干长度： 0.1~10 cm

激光光源： $\Delta\lambda$： $10^{-9}-10^{-6}$ nm ⟶ 相干长度： 可达上百公里

分波阵面干涉

□ 空间相干性 — 光源宽度对干涉条纹衬比度的影响

光源上L、M、N等各点产生的干涉条纹的位置是否相同？ **No**



作业：13T3 ~T6

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. 每周四交上周的作业。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。