第十二章 光学

*§12-1 几何光学简介

§12-2 相干光

§12-3 双缝干涉

§12-4 光程与光程差

§12-5 薄膜干涉

§12-6 迈克耳孙干涉仪

§12-7 光的衍射现象 惠更斯–菲涅耳原理

§12-8 单缝的夫琅禾费衍射

§12-9 圆孔的夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领

§ 12-10 光栅衍射

* § 12-11 X射线的衍射

§ 12-12 光的偏振状态

§ 12-13 起偏和检偏　马吕斯定律

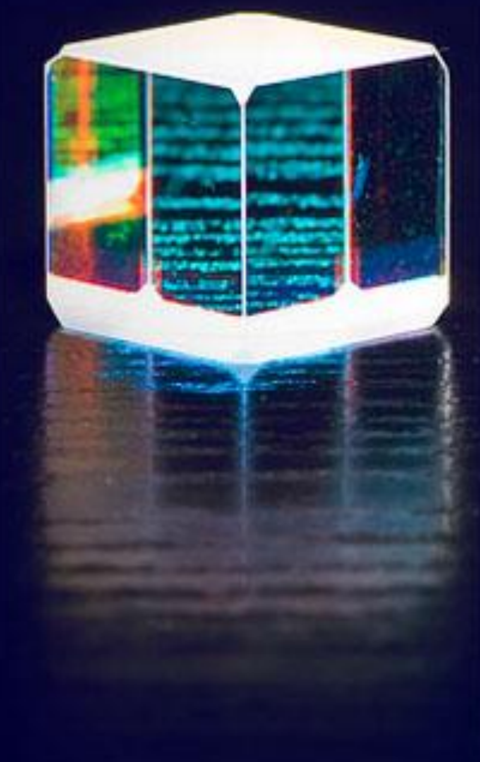
§ 12-14 反射和折射时光的偏振

* § 12-15 光的双折射

* § 12-16 偏振光的干涉 人为双折射

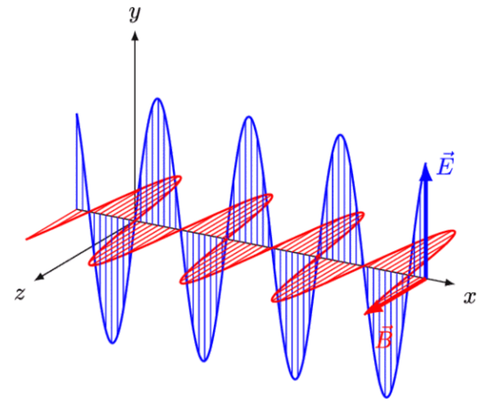
* § 12-17 旋光性

* § 12-18 现代光学简介



§ 12-2 相干光

光源 单色光 相干光



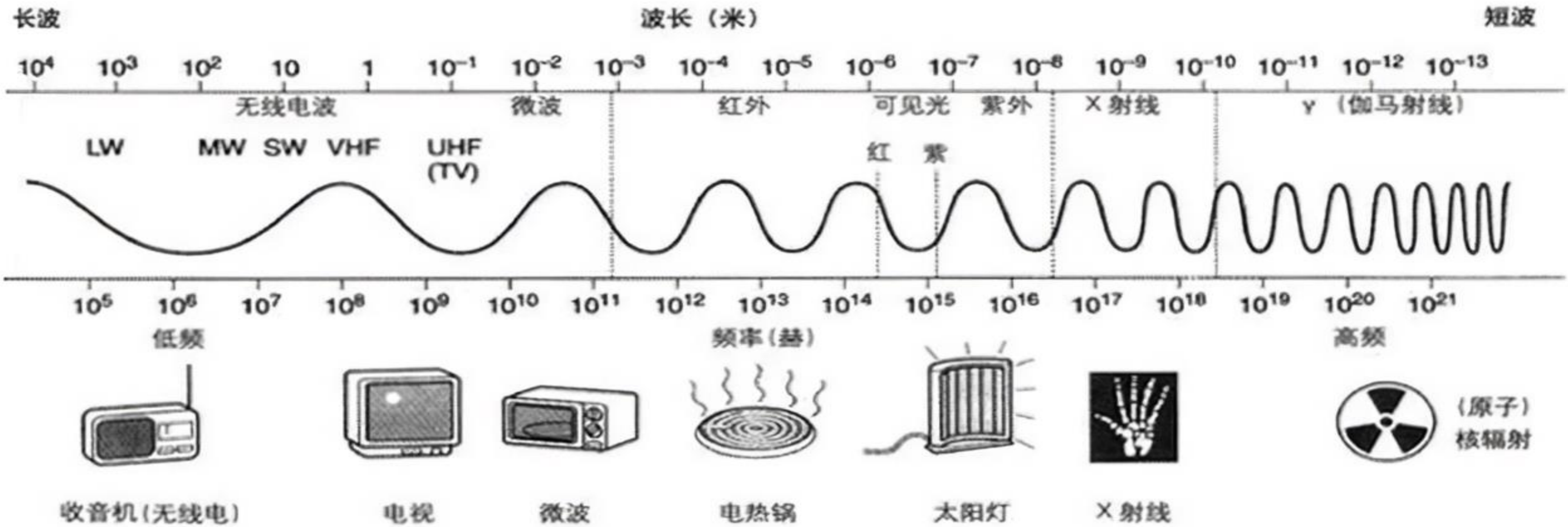
1. 光源　**发射光波的物体称为光源。**

光是一种电磁波

平面电磁波方程
$$\begin{cases} E = E_0 \cos\omega(t - \dfrac{r}{u}) \\ H = H_0 \cos\omega(t - \dfrac{r}{u}) \end{cases}$$

光矢量用$\vec{E}$矢量表示光矢量，它在引起人眼视觉和底片感光上起主要作用。

真空中的光速
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$



4000Å
紫

7600Å
红

可见光的范围

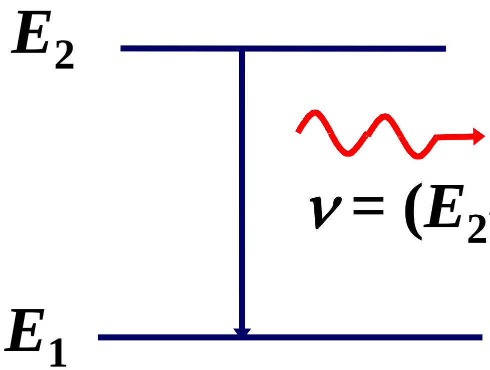
7.5×10^{14} Hz

4.3×10^{14} Hz

光源的发光特性

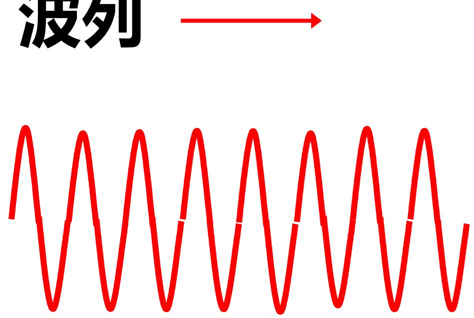
光源的最基本发光单元是分子、原子。

能级跃迁辐射



$\nu = (E_2 - E_1)/h$

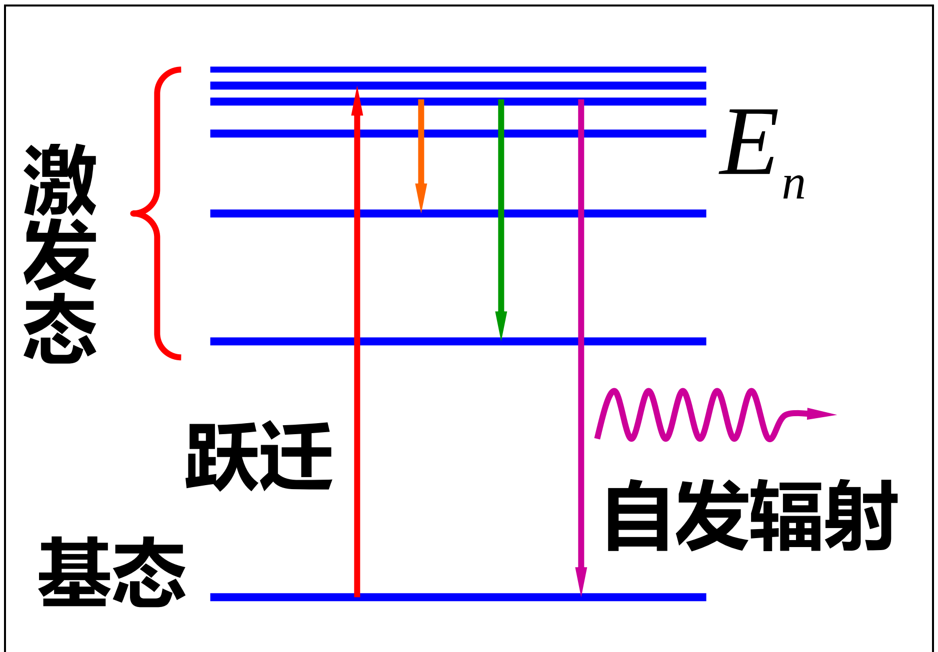
波列



波列长 $L = \Delta t\, c$

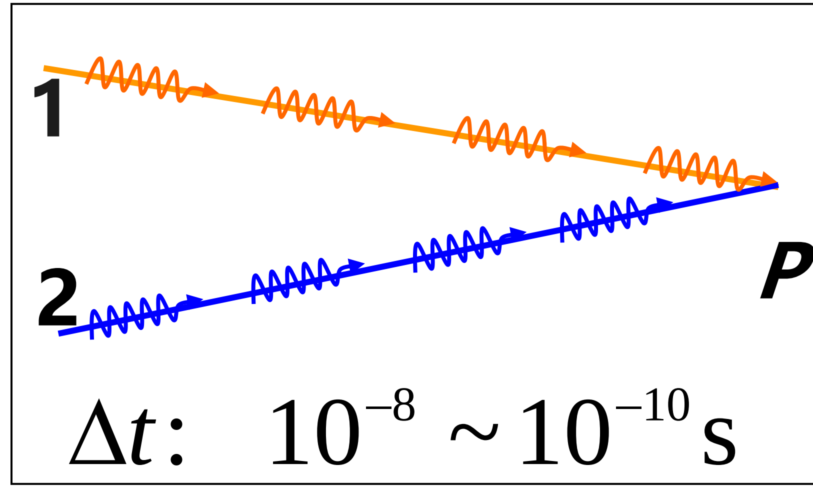
Δt **是波列持续时间。**

普通光源的发光机制



原子能级及发光跃迁

$$\Delta E = h\nu$$



普通光源发光特点：原子发光是断续的，每次发光形成一长度有限的波列，各原子各次发光相互独立，各波列互不相干。

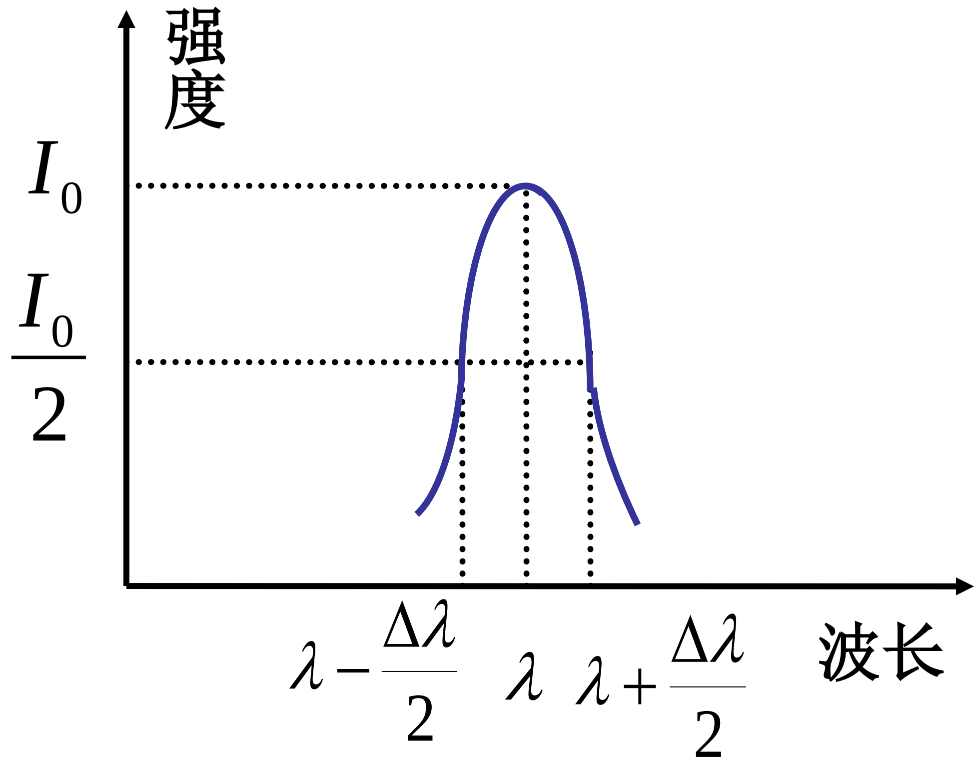
2. 单色光

单色光：具有单一频率的光波称为单色光。

复色光：不同频率单色光的混合光称为复色光。

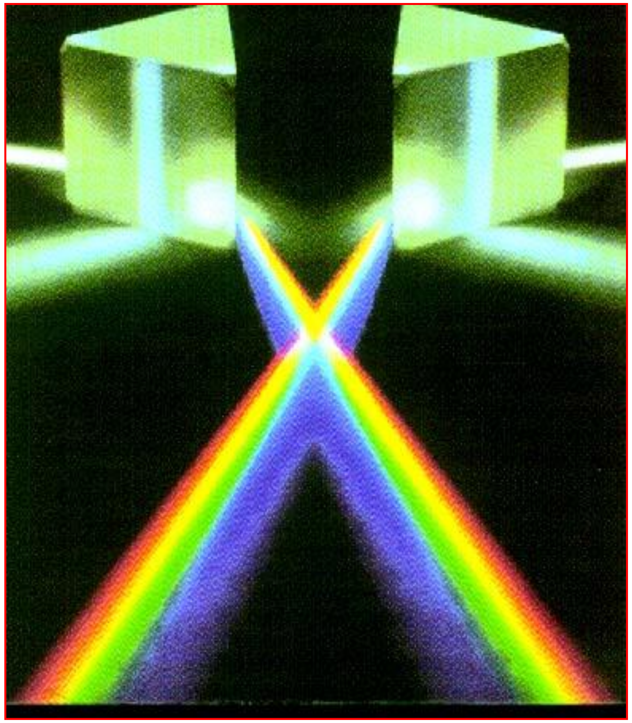
光谱曲线

谱线宽度 $\Delta\lambda$



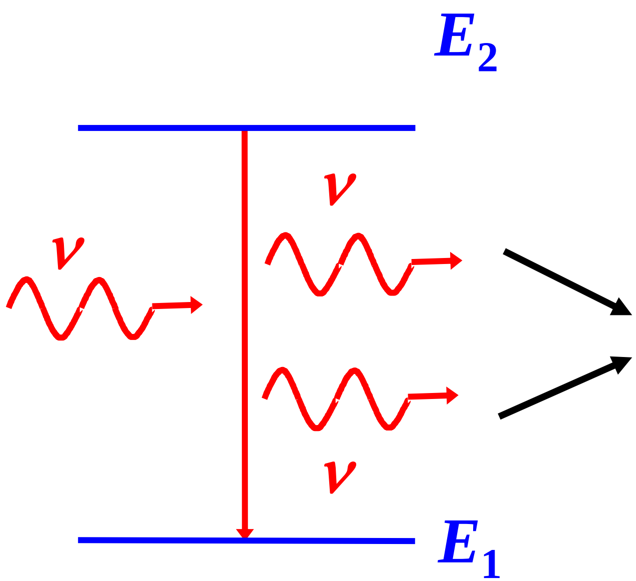
谱线及其宽度

复色光



激光光源－－受激辐射

$\nu = (E_2 - E_1)/h$

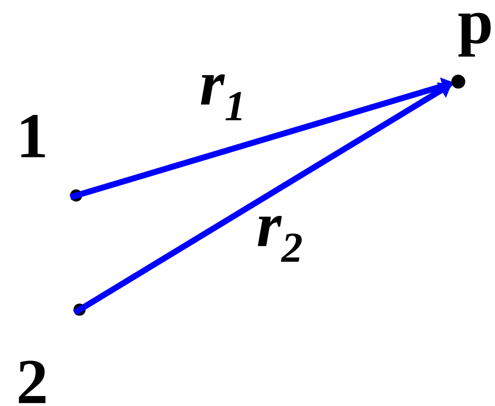


完全一样(频率、位相、振动方向,传播方向)

3. 相干光

光波中的电振动矢量 $\vec{E}$ 称为光矢量。

两列光波的叠加



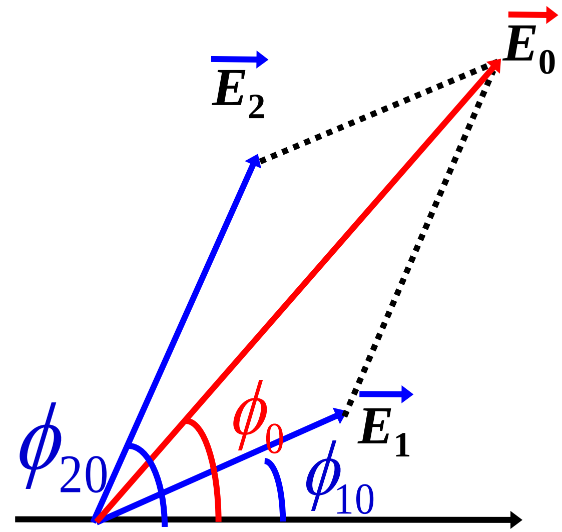
$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

P: $$E_1 = E_{10}\cos(\omega t + \phi_{10})$$

$$E_2 = E_{20}\cos(\omega t + \phi_{20})$$

$$E = E_1 + E_2 = E_0\cos(\omega t + \phi_0)$$

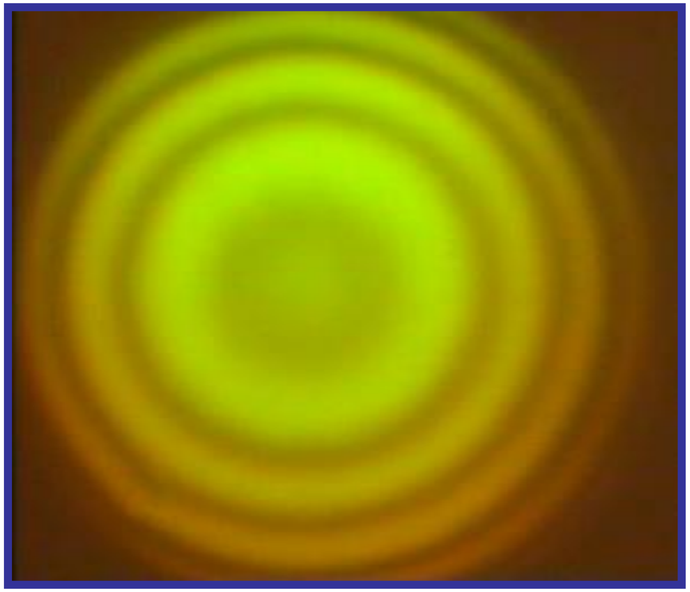
$$E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\Delta\phi$$



其中： $\Delta\phi = \phi_{20} - \phi_{10}$

平均光强

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\ \overline{\cos\Delta\phi}$$



干涉图

非相干光源 $\overline{\cos\Delta\phi} = 0$

非相干叠加 $I = I_1 + I_2$

完全相干光源 $\overline{\cos\Delta\phi} = \cos\Delta\phi$

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

- **相长干涉（明）**

$$\Delta\phi = \pm 2k\pi, \quad \cos\Delta\phi = 1$$

$$I = I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\mathrm{k} = 0,1,2,3\cdots)$$

- **相消干涉（暗）**

$$\Delta\phi = \pm(2k+1)\pi, \qquad \cos\Delta\phi = -1$$

$$I = I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\mathrm{k} = 0,1,2,3\cdots)$$

相干条件：

频率相同;

振动方向相同;

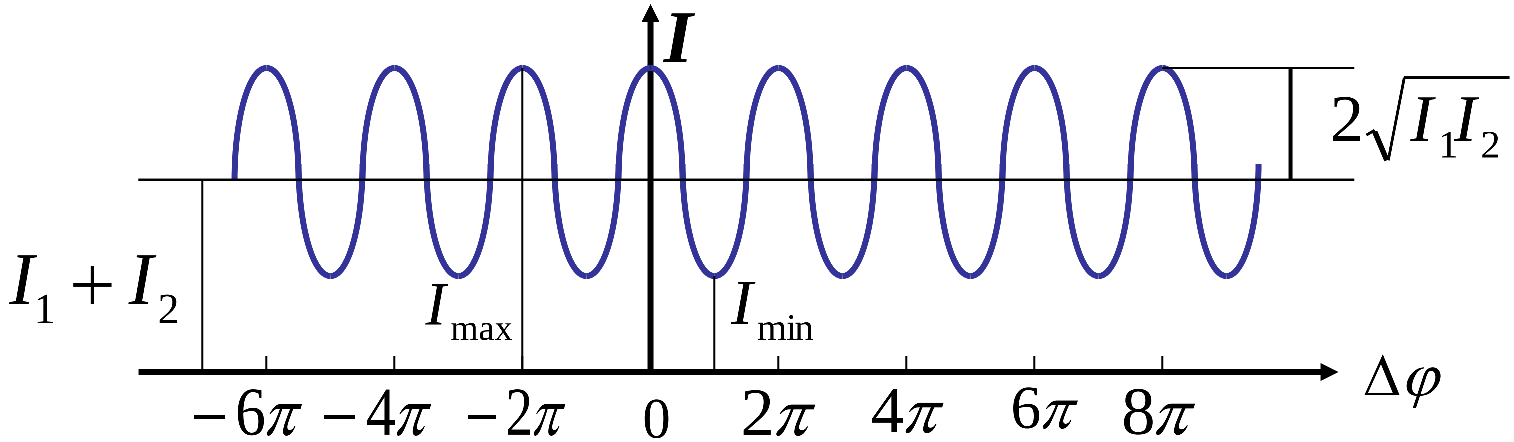
相位差恒定。

干涉判据：

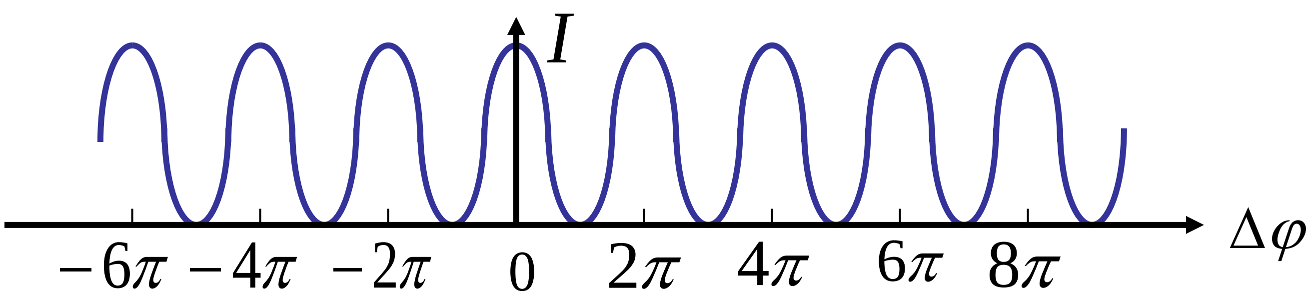
$$\Delta\phi=\begin{cases}\pm 2k\pi, k=0,1,2,\cdots(\text{干涉加强})\\ \pm(2k+1)\pi,\ \ k=0,1,2,\cdots(\text{干涉减弱})\end{cases}$$

干涉现象的光强分布

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

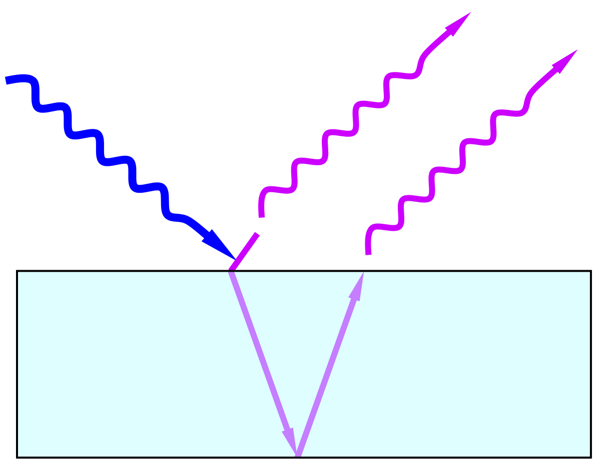


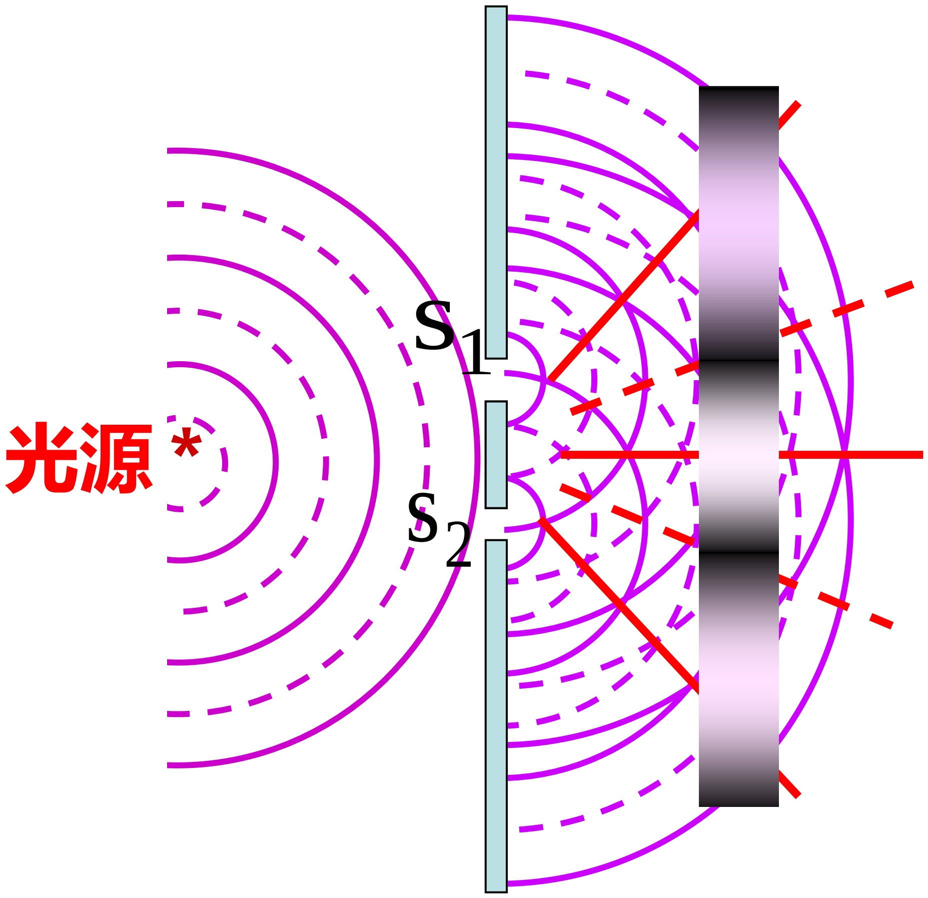
$$当 I_1 = I_2 \Rightarrow I = 4I_1 \cos\Delta\phi / 2$$



四. 相干光的产生

振幅分割法	波阵面分割法

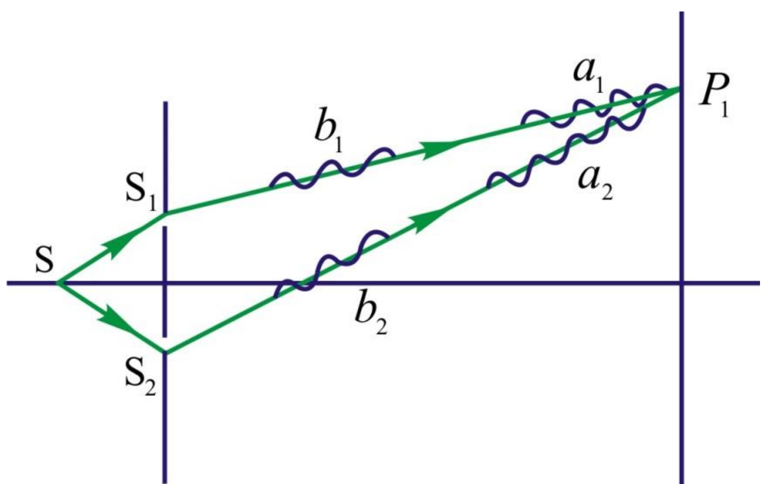


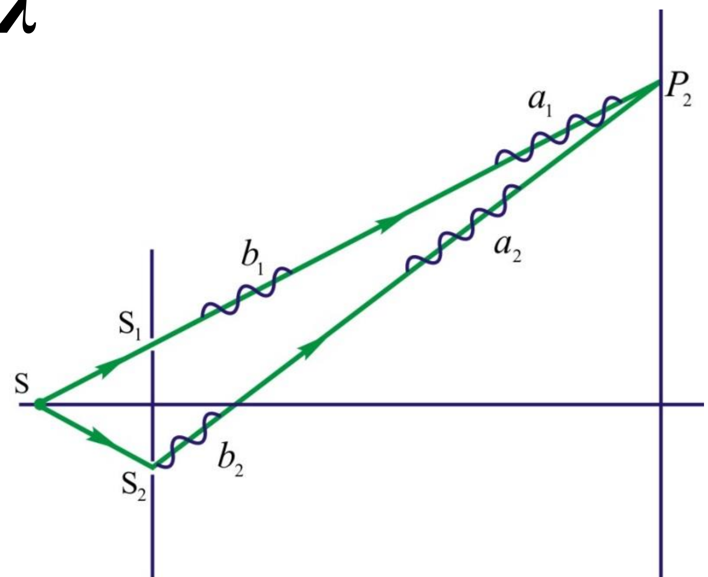


*五、光源的相干长度

根据普通光源发光的特点，在干涉装置中分出来的两束光会聚时，波程差不能大于原子光波列的长度——相干长度。

相干长度： $L = \delta_{\max} = \dfrac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$ $\delta > L$ 则无干涉



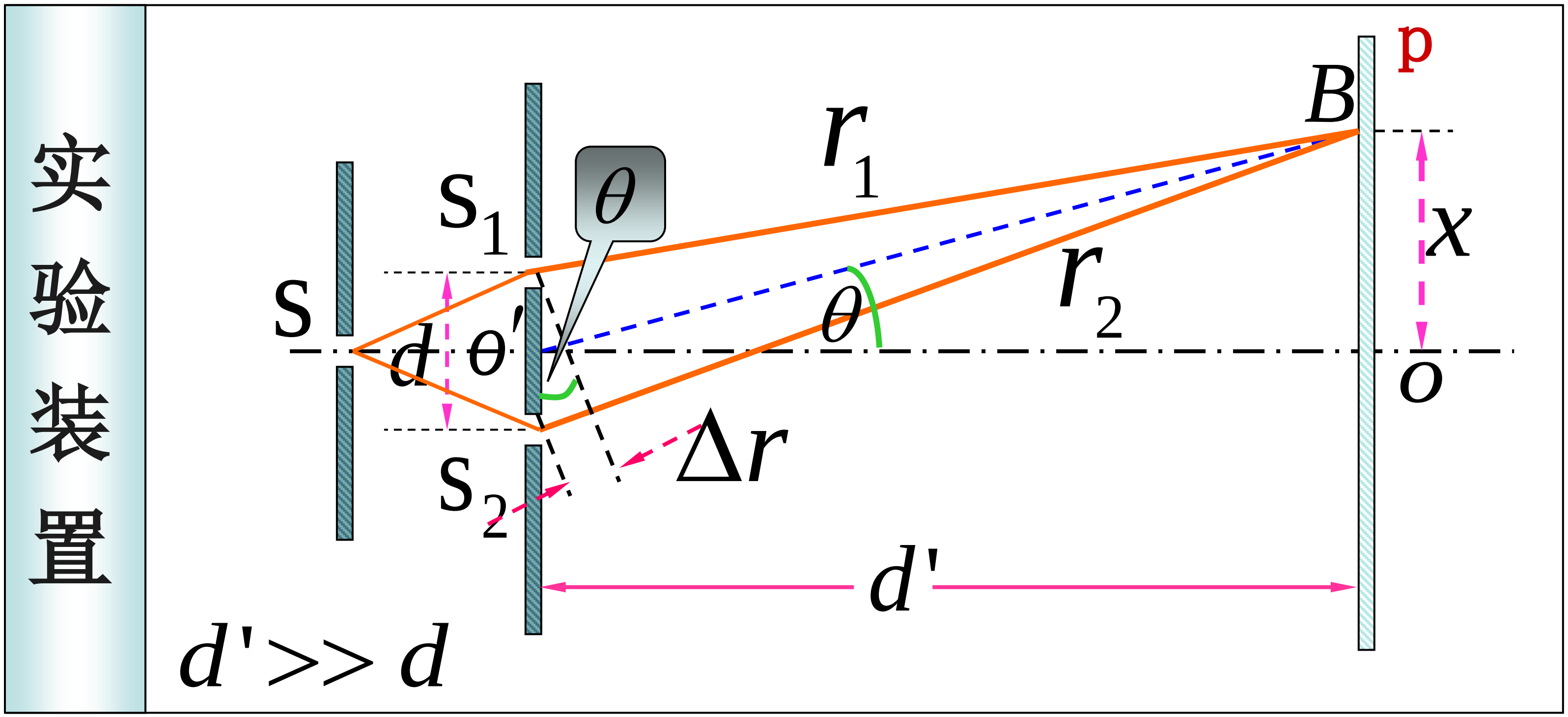


光源单色性越好，相干长度越长，其相干性越好。

如激光光源，相干长度约为几十到几百米，相干性极好。

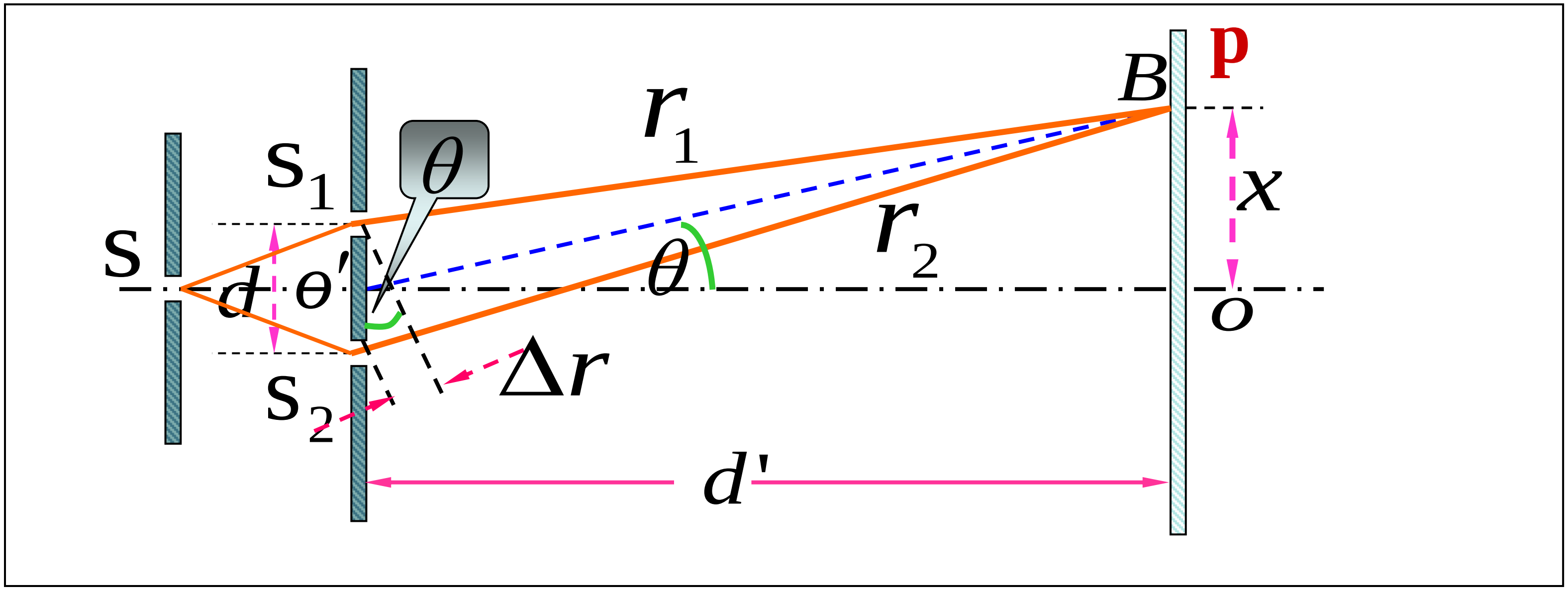
双缝干涉

一、杨氏双缝干涉实验



$$\sin\theta \approx \tan\theta = x/d'$$

波程差 $$\Delta r = r_2 - r_1 \approx d\sin\theta \approx d\frac{x}{d'}$$



$$\Delta r = d\,\frac{x}{d'} = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{加强} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{减弱} \end{cases} \qquad k = 0,1,2,\cdots$$

$$x = \begin{cases} \pm k\dfrac{d'}{d}\lambda & \text{明纹} \\ \pm\dfrac{d'}{d}(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases} \qquad k = 0,1,2,\cdots$$

二、明暗条纹的位置

$$x=\begin{cases}\pm k\dfrac{d'}{d}\lambda & \text{明纹}\\ \pm\dfrac{d'}{d}(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗纹}\end{cases}\qquad k=0,1,2,\cdots$$

白光照射时，出现彩色条纹

讨论

条纹间距 $\Delta x=\dfrac{d'\lambda}{d}\quad(\Delta k=1)$

1）d、d'一定时，若 λ 变化，则 Δx 将怎样变化？

2）λ、d'一定时，条纹间距Δx与 d 的关系如何？

$$\Delta x=\frac{d'\lambda}{d}\qquad\qquad \Delta x=\frac{d'\lambda}{d}$$

三、双缝干涉光强分布

$$E=\sqrt{E_{10}^2+E_{20}^2+2E_{10}E_{20}\cos(\varphi_2-\varphi_1)}$$

合光强 $I=I_1+I_2+\boxed{2\sqrt{I_1I_2}\cos(\varphi_2-\varphi_1)}$

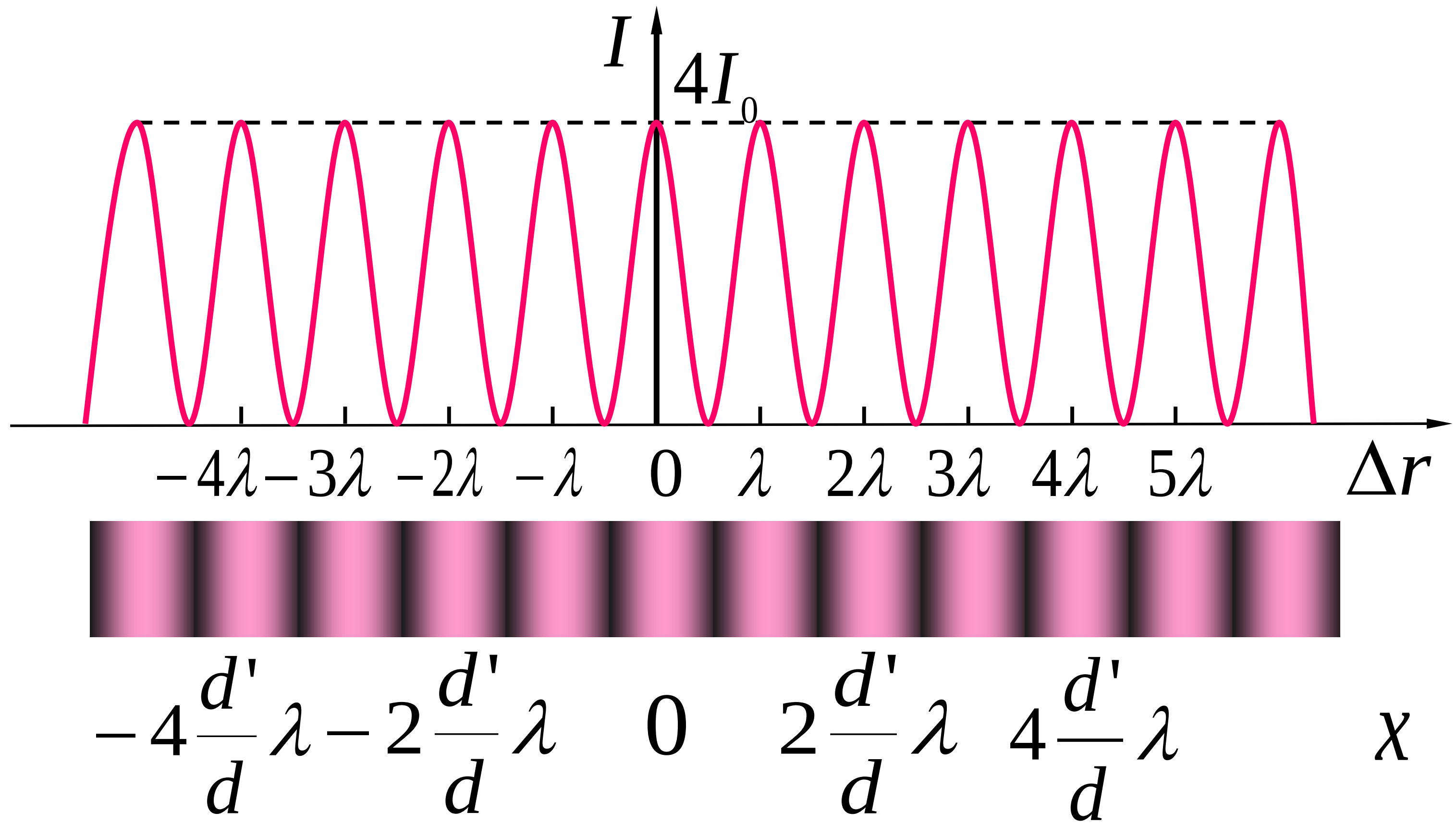
干涉项

其中 $\varphi_2-\varphi_1=2\pi\dfrac{\Delta r}{\lambda}$ 若 $I_1=I_2=I_0$

则 $I=4I_0\cos^2(\pi\dfrac{\Delta r}{\lambda})=\begin{cases}4I_0, & \Delta r=\pm k\lambda \\ 0, & \Delta r=\pm(2k+1)\lambda/2\end{cases}$

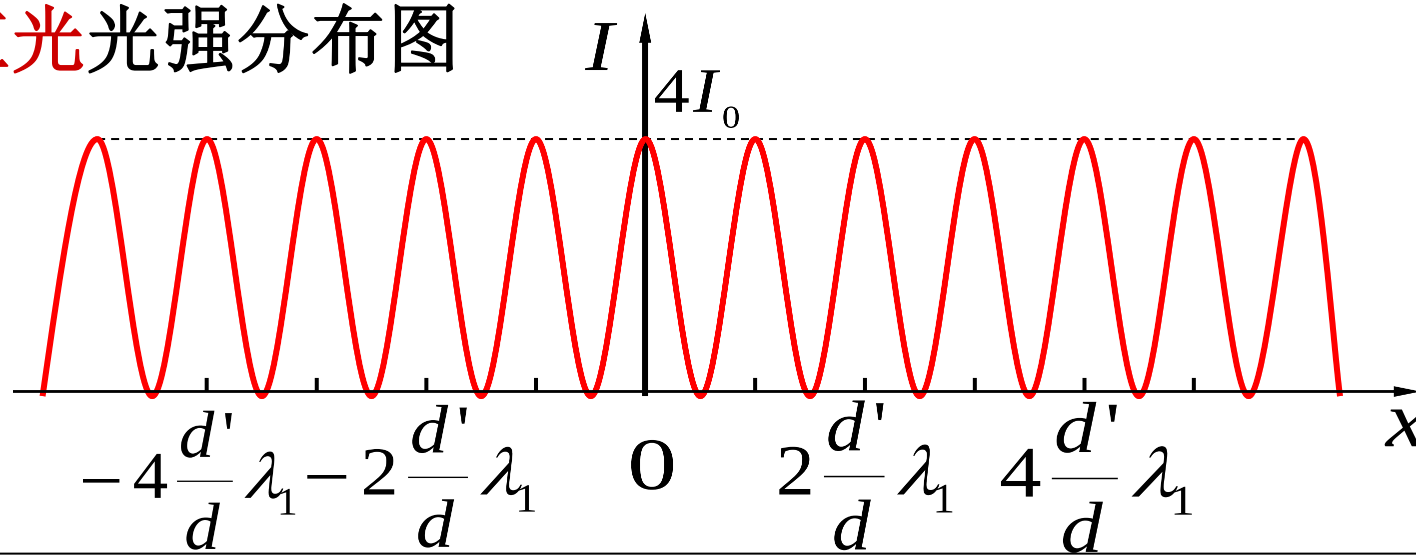
$$I = 4I_0 \cos^2\left(\pi \frac{\Delta r}{\lambda}\right) = \begin{cases} 4I_0, & \Delta r = \pm k\lambda \\ 0, & \Delta r = \pm(2k+1)\lambda/2 \end{cases}$$

光强分布图

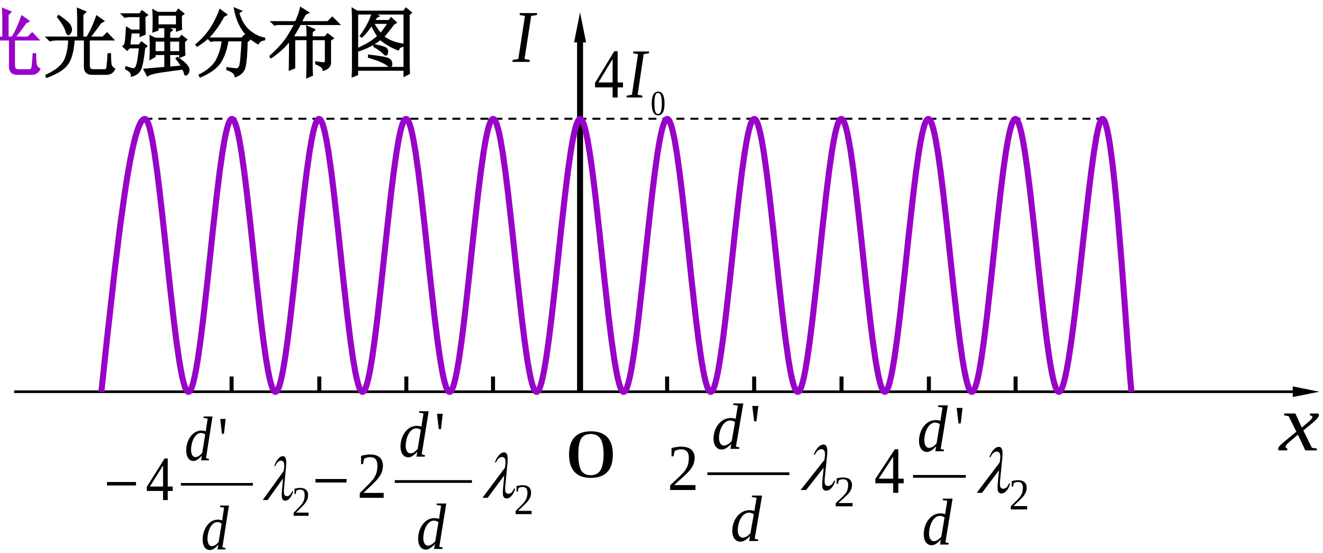


波长不同条纹间距不同

红光光强分布图



紫光光强分布图



条纹特点

(1) 一系列平行的明暗相间的条纹;

(2) θ 不太大时条纹等间距;

(3) $\Delta x \propto \lambda$ 。

杨氏双缝实验第一次测定了波长这个重要的物理量。

双缝干涉条纹

例： 以单色光照射到相距为0.2mm的双缝上，双缝与屏幕的垂直距离为1m。

(1) 从第一级明 纹 到同侧 的第四级明 纹的距离为7.5mm，求单色光的波长;

(2) 若入射光的波长为600nm，求相邻两明纹间的距离。

解 （1） $x_k = \pm \frac{d'}{d} k\lambda, \quad k = 0, \quad 1, \quad 2, \cdots$

$$\Delta x_{14} = x_4 - x_1 = \frac{d'}{d}(k_4 - k_1)\lambda$$

$\lambda = \frac{d}{d'} \frac{\Delta x_{14}}{(k_4 - k_1)} = 500\text{nm}$ （2） $\Delta x = \frac{d'}{d}\lambda = 3.0\,\text{mm}$

例12-6 在杨氏双缝实验中，屏与双缝间的距离 D =1m，用钠光灯作单色光源（λ =598.3 nm），问：（1）d =2 mm 和 d =10 mm两种情况下，相邻明纹间距各为多大?（2）如肉眼仅能分辨两条纹的间距为0.15 mm，现用肉眼观察干涉条纹，问双缝的最大间距是多少?

解: （1）相邻两明纹间的距离为

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

d =2 mm时，$\Delta x = \dfrac{1\times 589.3\times 10^{-9}}{2\times 10^{-3}} = 0.295(\mathrm{mm})$

d =10 mm时，$\Delta x = \dfrac{1\times 589.3\times 10^{-9}}{10\times 10^{-3}} = 0.059(\mathrm{mm})$

（2）如Δx =0.15 mm，则

$$d=\frac{D\lambda}{\Delta x}=\frac{1\times 589.3\times 10^{-9}}{0.15\times 10^{-3}}\approx 4(\mathrm{mm})$$

在这样的条件下，双缝间距必须小于4 mm才能看到干涉条纹。

例12-7 在杨氏实验装置中，采用加有蓝绿色滤光片的白色光源，波长范围$\Delta\lambda$ =100 nm，平均波长为490 nm。试估算从第几级开始，条纹将变得无法分辨？

解： 设该蓝绿光的波长范围为$\lambda_1 \to \lambda_2$，则有

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda = 100\,\mathrm{nm} \qquad \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2) = 490\,\mathrm{nm}$$

相应于λ_1和λ_2，杨氏干涉条纹中k级明纹的位置分别为

$$x_1 = k\frac{D}{d}\lambda_1 \qquad x_2 = k\frac{D}{d}\lambda_2$$

λ_1的 k+1级明条纹与λ_2的 k级明条纹重叠时，条纹无法分辨

$$(k+1)\frac{D}{d}\lambda_1 = k\frac{D}{d}\lambda_2 \quad k = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = 4.4$$

返回 退出

二. k 级条纹所占的宽度为

$$x_2 - x_1 = k\frac{D}{d}\lambda_2 - k\frac{D}{d}\lambda_1 = k\frac{D}{d}\Delta\lambda$$

当此宽度大于或等于相应于λ_1的条纹间距时，干涉条纹变得模糊不清，即

$$k\frac{D}{d}\Delta\lambda \geq \frac{D}{d}\lambda_1$$

$$\Rightarrow \quad k \geq \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} = 4.4$$

从第五级开始，干涉条纹变得无法分辨。

条纹变化

λ 一定： $\Delta x \propto d'$ $\Delta x \propto \dfrac{1}{d}$ 双缝间距越小，条纹越宽

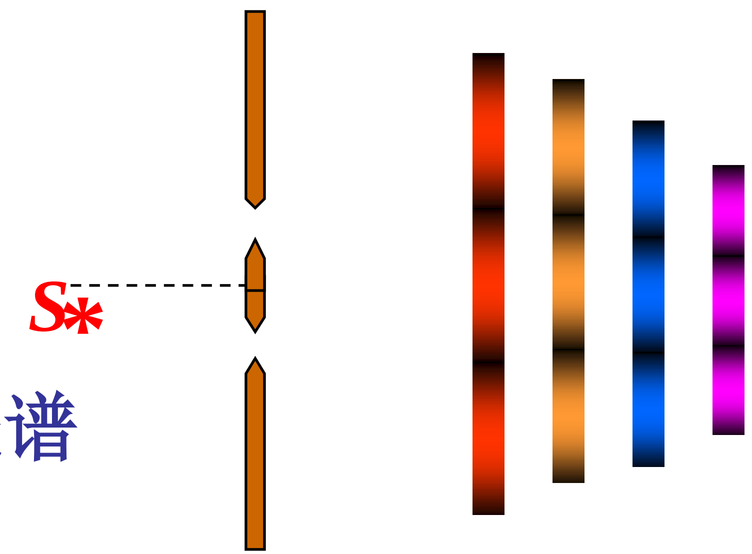
d、d' 一定： $\Delta x \propto \lambda$ $\Delta x_{红} > \Delta x_{紫}$

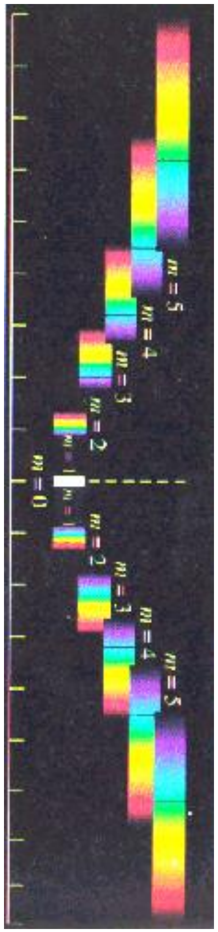
白光照射双缝:

零级明纹：白色

其余明纹：彩色光谱

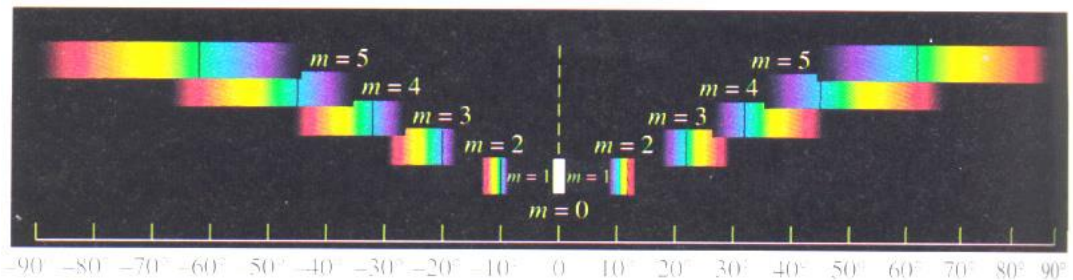
高级次重叠。

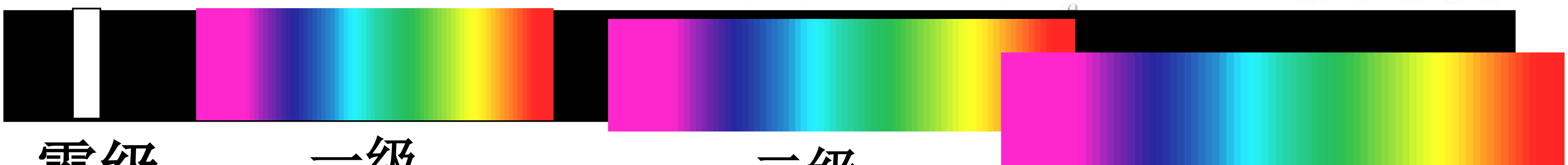




练习 用白光光源进行双缝干涉实验，求清晰可辩光谱的级次。

λ：$4000 \sim 7600\ \overset{o}{A}$





零级　一级　二级　三级

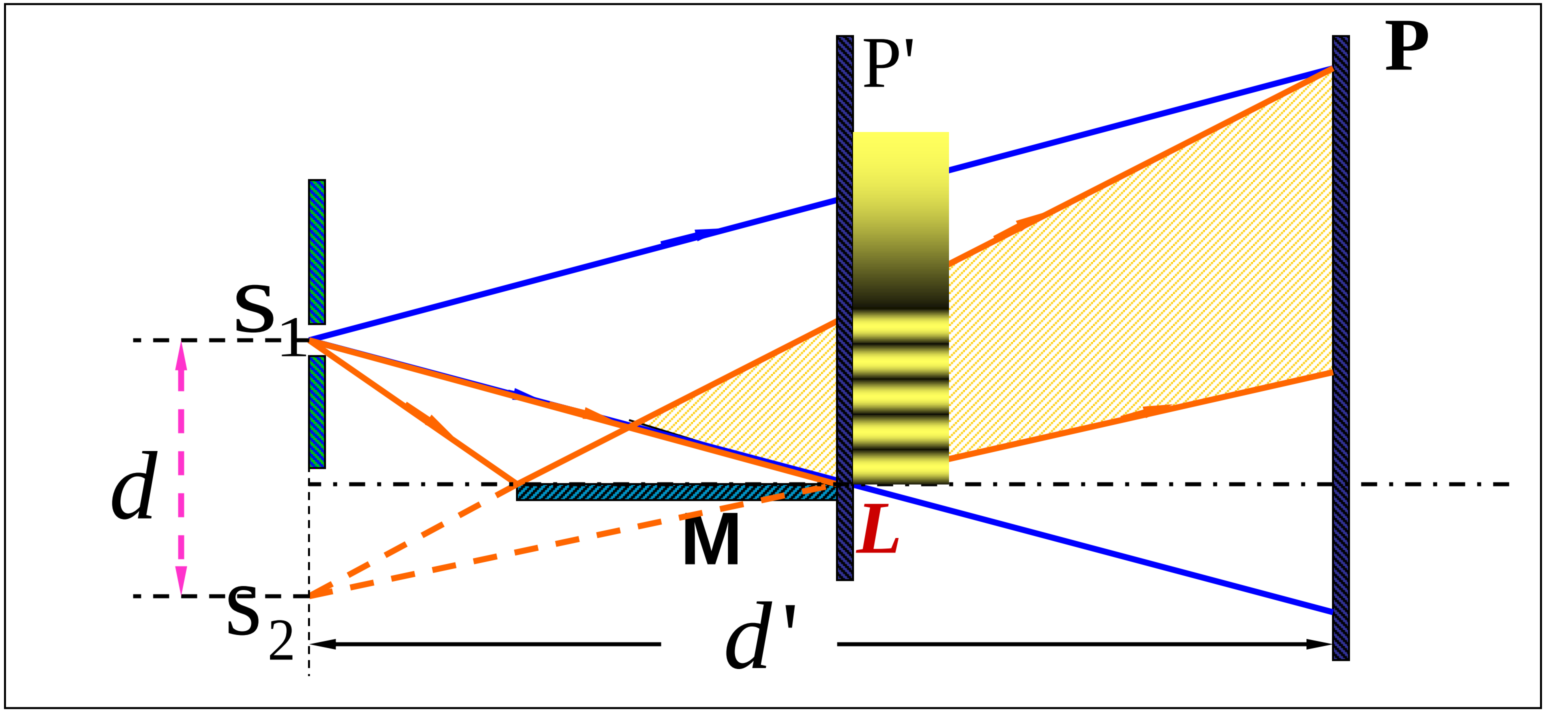
最先重叠： 某级红光和高一级紫光Δ相同

$$\Delta = k\lambda_{红} = (k+1)\lambda_{紫}$$

$$k = \frac{\lambda_{紫}}{\lambda_{红} - \lambda_{紫}} = \frac{4000}{7600 - 4000} \approx 1{\cdot}1$$

未重叠的清晰光谱只有一级。

四、劳埃德镜



半波损失：光从光速较大(光疏)的介质射向光速较小(光密)的介质时反射光的相位较之入射光的相位跃变了π，相当于反射光与入射光之间附加了半个波长的波程差，称为半波损失。

光程与光程差

一 光程

光在真空中的速度 $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$

光在介质中的速度 $u = 1/\sqrt{\varepsilon \mu}$

$$\boxed{\frac{u}{c} = \frac{1}{n}}$$

$$u = \lambda' \nu \qquad c = \lambda \nu$$

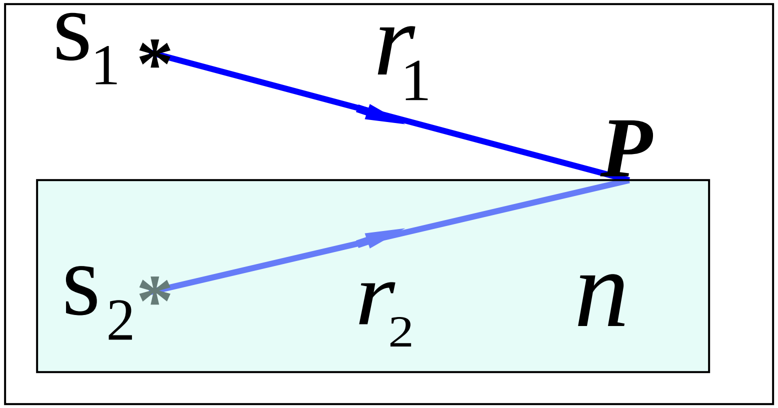
介质中的波长 $\boxed{\lambda' = \dfrac{\lambda}{n}}$

真空中的波长

介质的折射率

$$\frac{x}{\lambda'}\lambda = nx$$

光程(nx **)：** 将光在介质中通过的路程折算到同一时间内在真空中所通过的相应路程。



$$\begin{cases} E_1 = E_{10}\cos 2\pi\left(\dfrac{t}{T}-\dfrac{r_1}{\lambda}\right) \\ E_2 = E_{20}\cos 2\pi\left(\dfrac{t}{T}-\dfrac{r_2}{\lambda'}\right) \end{cases}$$

- **波程差** $\Delta r = r_2 - r_1$

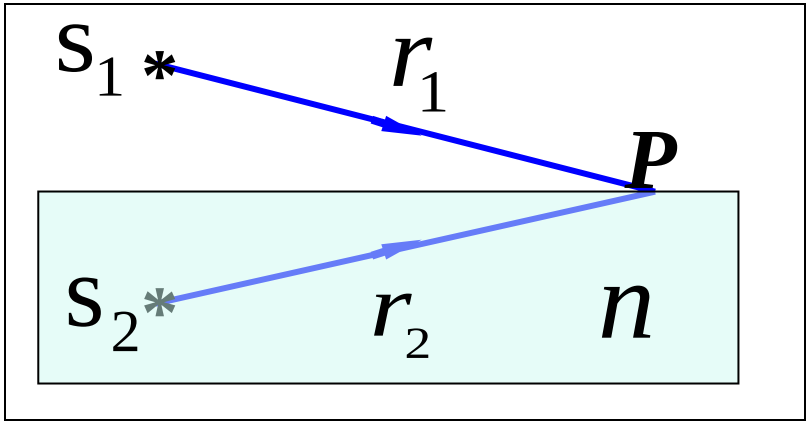
- **相位差** $\Delta\varphi = 2\pi\left(\dfrac{t}{T}-\dfrac{r_2}{\lambda'}\right) - 2\pi\left(\dfrac{t}{T}-\dfrac{r_1}{\lambda}\right)$

介质中的波长 $\boxed{\lambda' = \dfrac{\lambda}{n}}$

$$= -2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda'}-\frac{r_1}{\lambda}\right) = -2\pi\left(\frac{nr_2 - r_1}{\lambda}\right)$$

二　光程差（两光程之差）

光程差 $\Delta = nr_2 - r_1$



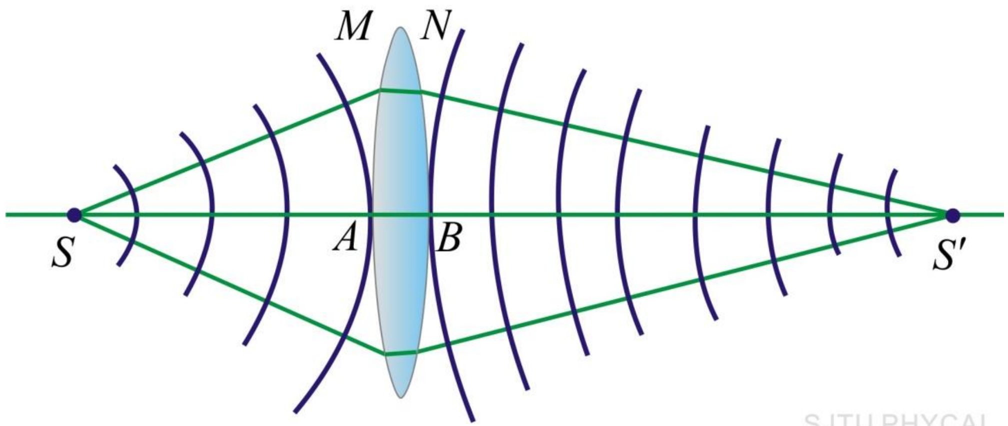
相位差　$\Delta\varphi = 2\pi\dfrac{\Delta}{\lambda}$

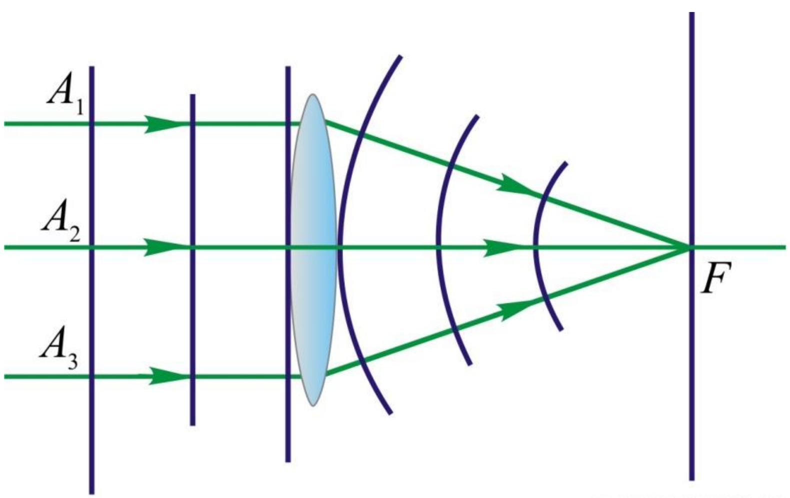
➢ 干涉加强 $\begin{cases} \Delta = \pm k\lambda, \quad k = 0,1,2,\cdots \\ \Delta\varphi = \pm 2k\pi\ , k = 0,1,2,\cdots \end{cases}$

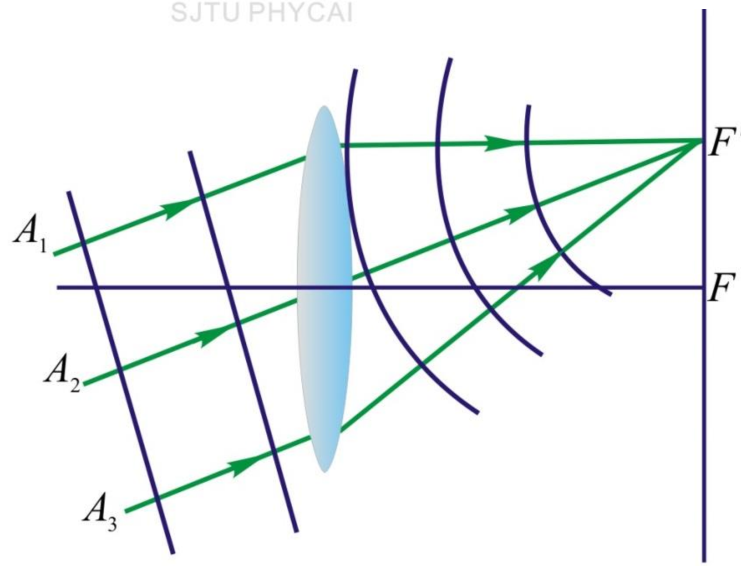
➢ 干涉减弱 $\begin{cases} \Delta = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, \quad k = 0,1,2,\cdots \\ \Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi\ , k = 0,1,2,\cdots \end{cases}$

三　透镜不引起附加的光程差

光路中插入薄透镜不会产生附加的光程差。







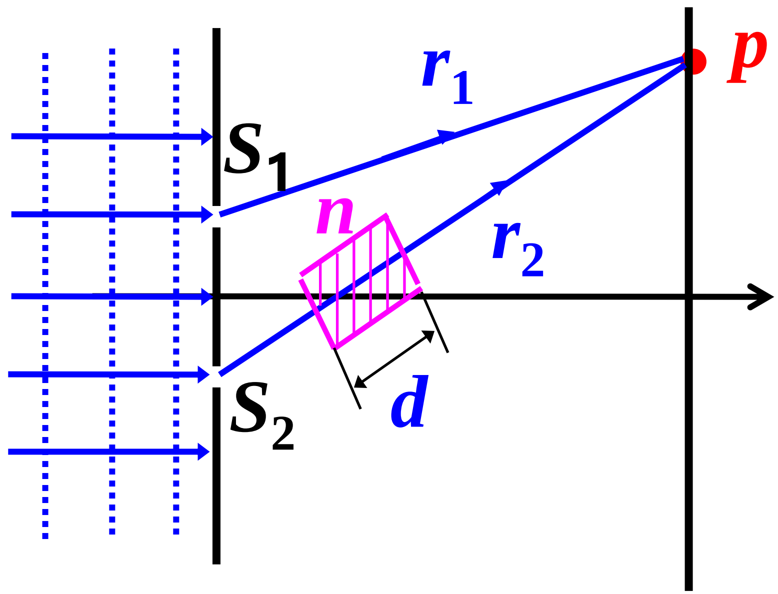
例：如图，在S_2P 间插入折射率为n、厚度为d 的媒质。求：光由S_1、S_2 到 P 的相位差$\Delta\phi$ 。

解：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\{L_2 - L_1\}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda}\{[(r_2 - d) + nd] - r_1\}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda}[(r_2 - r_1) + (n-1)d]$$

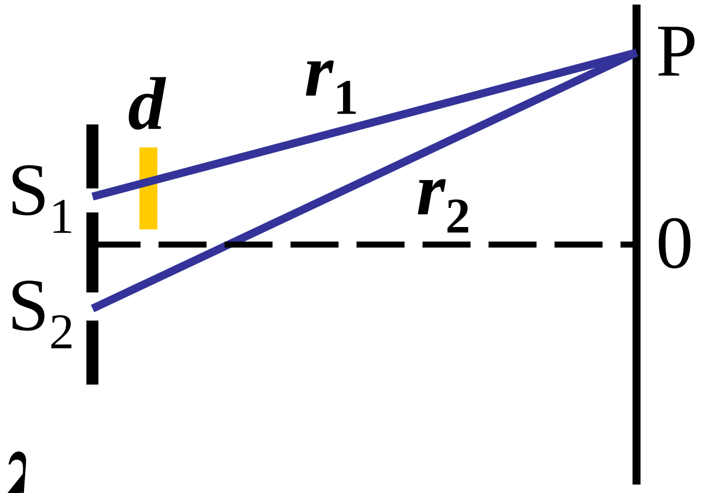


思考： 用薄云母片（n=1.58）覆盖在杨氏双缝的一条缝上，干涉条纹如何移动？如果这时屏上的零级明纹移到原来的第七级明纹处, 已知入射光波长为550 nm，问云母片的厚度为多少？

整套条纹向上移动

插入云母后，P点处光程差

$$r_2 - (r_1 - d + nd) = 0$$



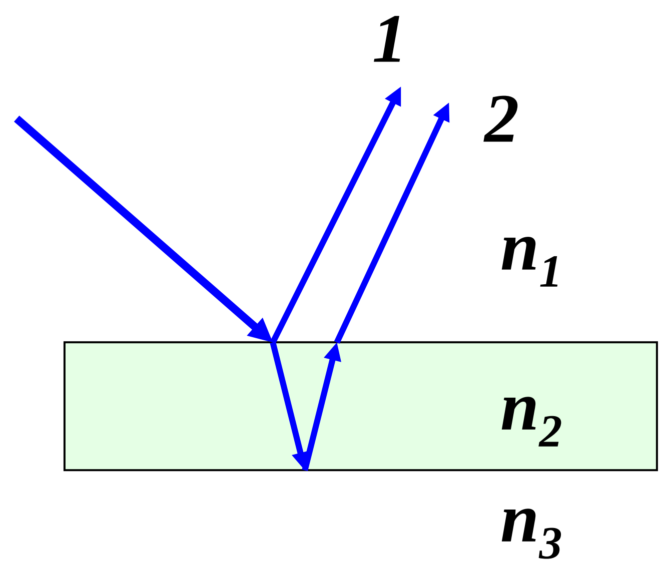
P 点处原来光程差 $r_2 - r_1 = 7\lambda$

$$\Rightarrow d = \frac{7\lambda}{n-1} = 6.6\times10^{-6}\text{m}$$

三　反射光的相位突变和附加光程差

反射光有π 相位突变，称半波损失，它相当于一个附加光程差：

$$\delta = \lambda/2$$



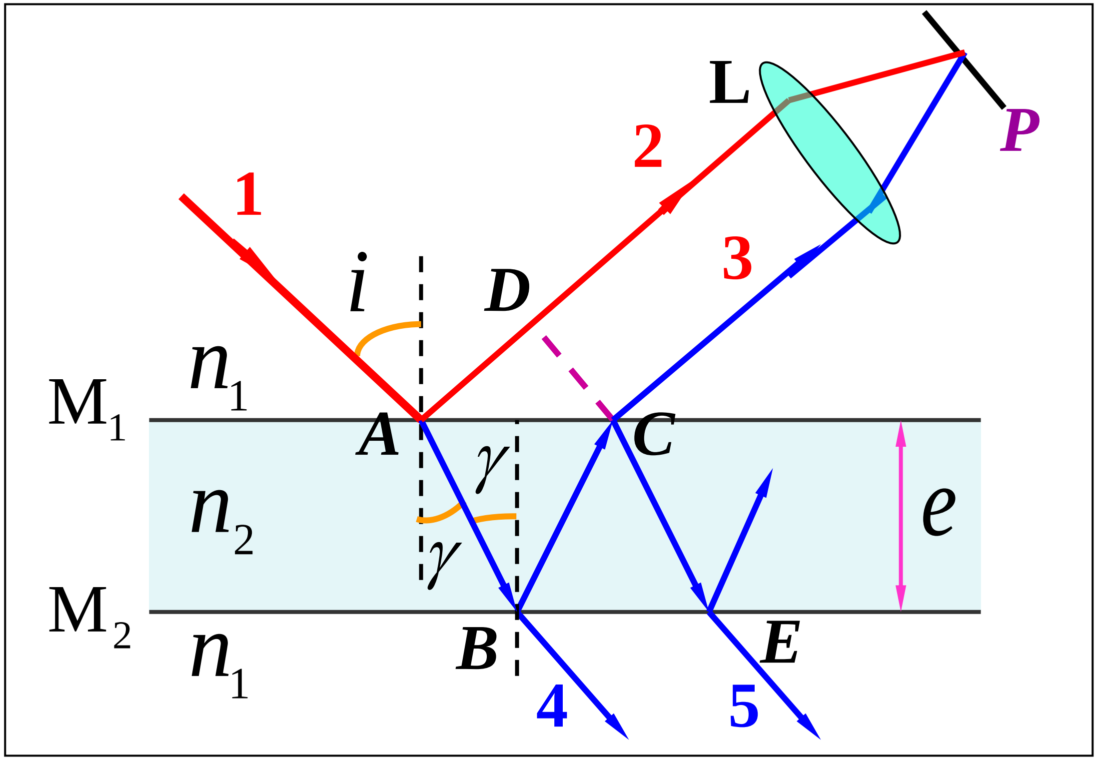
例：发生附加光程差的条件

$n_1 < n_2$ 且 $n_2 > n_3$

或 $n_1 > n_2$ 且 $n_2 < n_3$

三　薄膜干涉

光波经薄膜两表面反射后相互叠加所形成的干涉现象，称为薄膜干涉。



$$n_2 > n_1 \qquad CD \perp AD$$

$$\Delta_{32} = n_2(AB + BC) - n_1 AD \boxed{+\frac{\lambda}{2}} \qquad \frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}$$

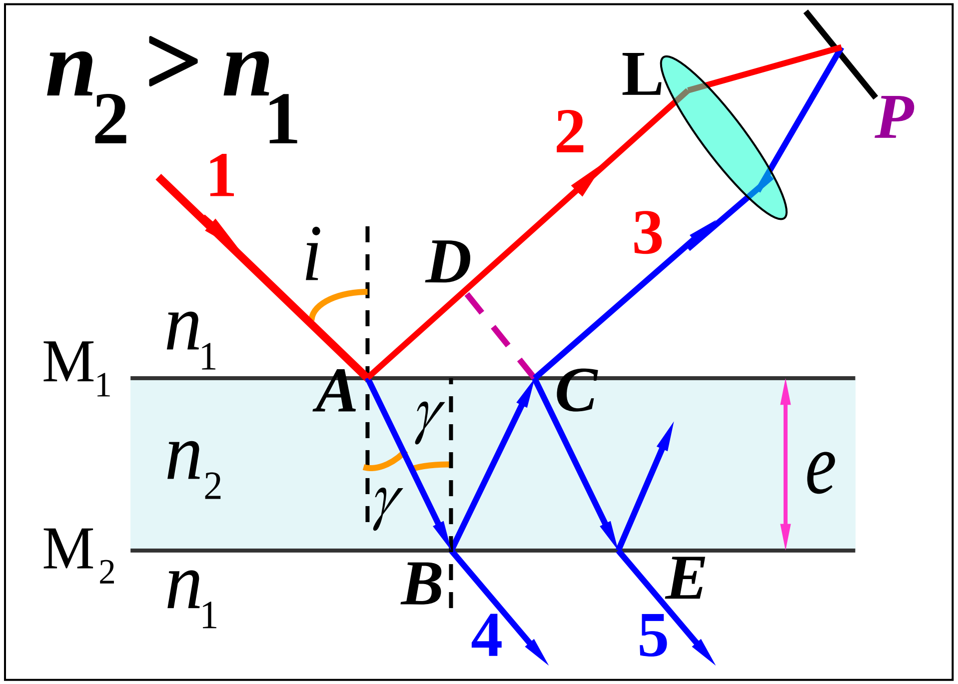
$$AB = BC = e/\cos\gamma \qquad AD = AC\sin i = 2e\cdot\tan\gamma\cdot\sin i$$

返回　退出

$$\Delta_{32}=\frac{2e}{\cos\gamma}n_2(1-\sin^2\gamma)+\frac{\lambda}{2}=2n_2e\cos\gamma+\frac{\lambda}{2}$$

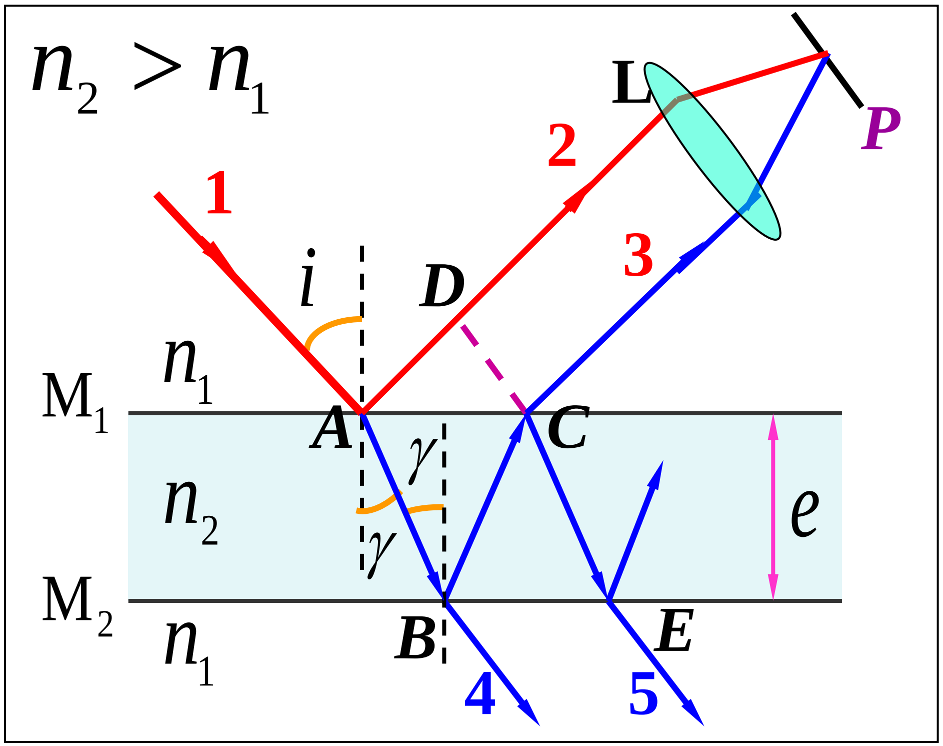
➢ 反射光的光程差 $\Delta_r=2e\sqrt{n_2^2-n_1^2\sin^2 i}+\frac{\lambda}{2}$

$$\Delta_r=\begin{cases} k\lambda & (k=1,2,\cdots) \quad \text{加 强} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & (k=0,1,2,\cdots) \quad \text{减 弱} \end{cases}$$



$$\varDelta_{\text{反}} = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \boxed{\lambda/2}$$

根据具体情况而定



➢ 透射光的光程差

$$\varDelta_{\mathrm{t}} = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$$

注意：透射光和反射光干涉具有互补性，符合能量守恒定律.