第11章 波动光学
Wave Optics

第1节 光波

第2节 光的叠加 光程

第3节 分波阵面干涉 (重点1)

第4节 分振幅干涉 (重点2)

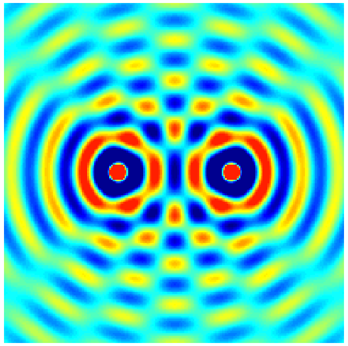
第5节 光波的衍射 (重点3)

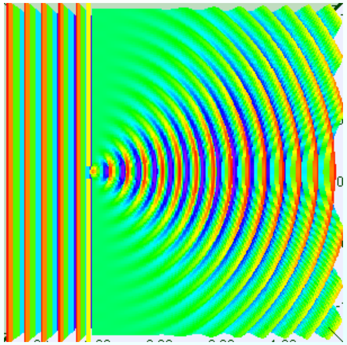
第6节 光波的偏振 (重点4)

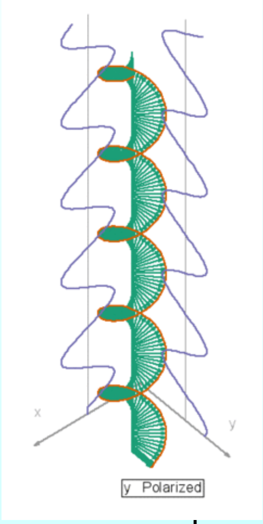
第7节 双折射

第8节 偏振光的干涉 （了解）

第9节 旋光效应 （了解）







第11章波动光学

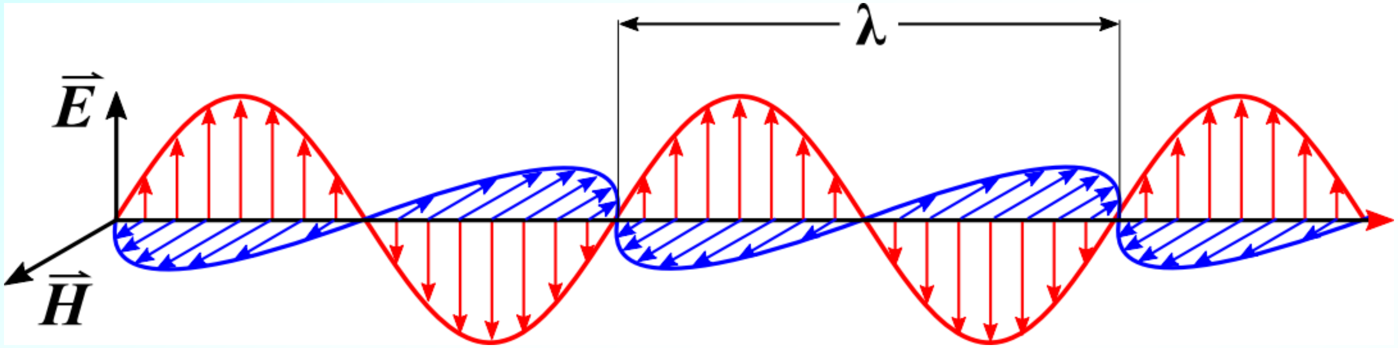
第一部分光的干涉

Interference Of Light

第1节 光波 Light Waves

一、光的电磁理论

光是电磁波



振动矢量是位相相同的电场强度 $\vec{E}$ 和磁场强度 $\vec{H}$

在引起人眼视觉和底片感光及光电器件上起主要作用的是电场 $\vec{E}$ 强度。 → 光矢量

- 真空中的光速

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

- 介质中的光速

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n}$$

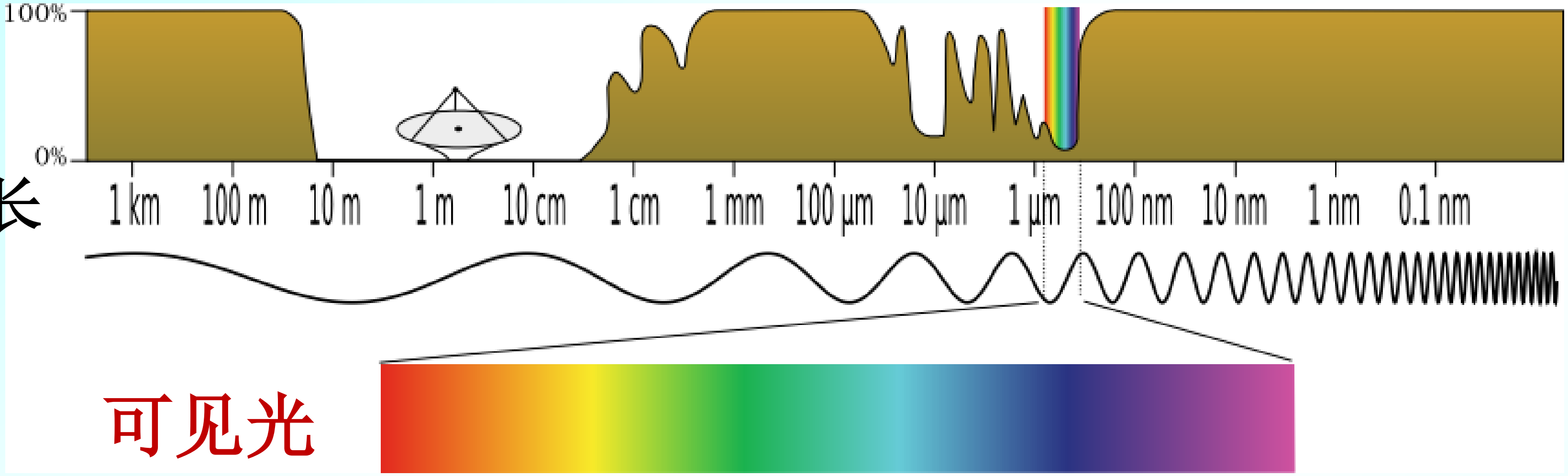
$$\boxed{n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}$$

折射率

电磁波在空气中的透射谱

无线电波　　红外　　紫外，X射线,γ 射线等

波长



可见光

1nm

$=10^{-9}$m

1THz

$=10^{12}$Hz

颜色	中心波长/nm	中心频率/THz
红	660 nm	450 THz
橙	610 nm	490 THz
黄	570 nm	530 THz
绿	550 nm	50 THz
青	480 nm	630 THz
蓝	460 nm	650 THz
紫	430 nm	700 THz

可见光

波长范围：

400 ~ 760 nm

频率范围：

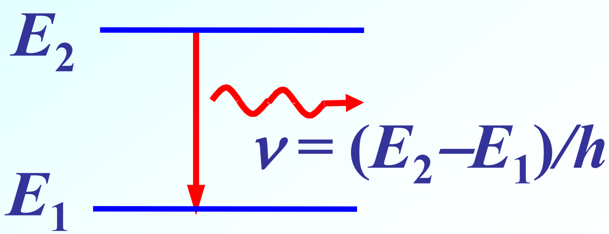
750 ~390 THz

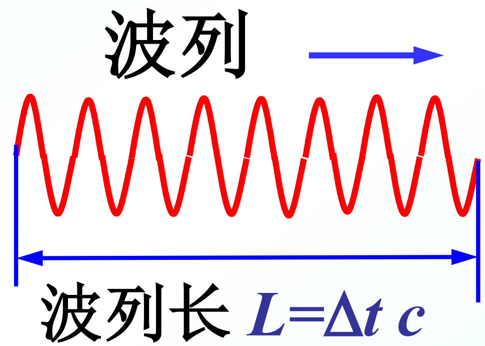
二、光源

1. 光源及其发光机理

最基本发光单元是分子、原子外层电子跃迁产生.

能级跃迁辐射

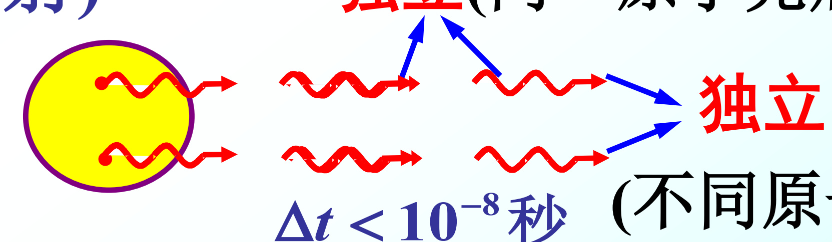




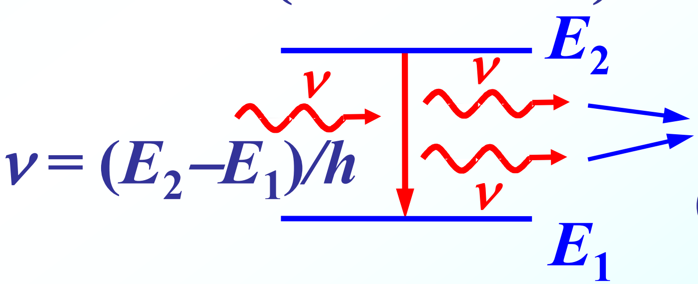
普通光源(自发辐射)

发光的间隙性

发光的随机性



激光光源(受激辐射)



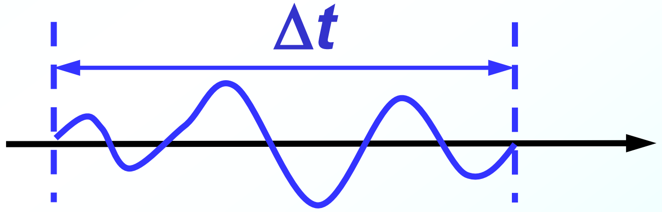
完全一样

(频率, 位相, 振动方向, 传播方向)

2. 单色光、光谱

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} \qquad \Delta\omega\cdot\Delta t = 2\pi \qquad \Delta\nu\cdot\Delta t = 1$$

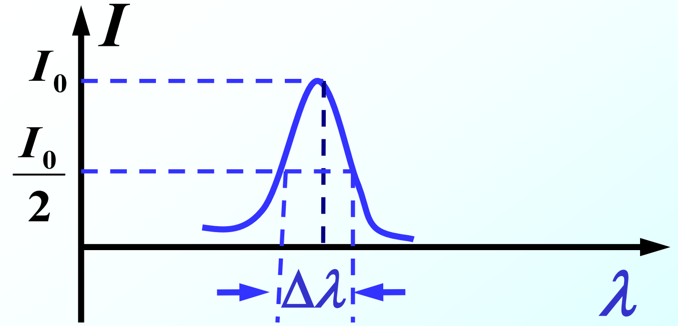
单色光 $\Delta t \to \infty, \quad \Delta\nu \to 0$



普通光源(自发辐射)

$\Delta t < 10^{-8}$秒，

$\Delta\nu_{普}/\nu_0 > 2\times10^{-7}$



激光光源(受激辐射)

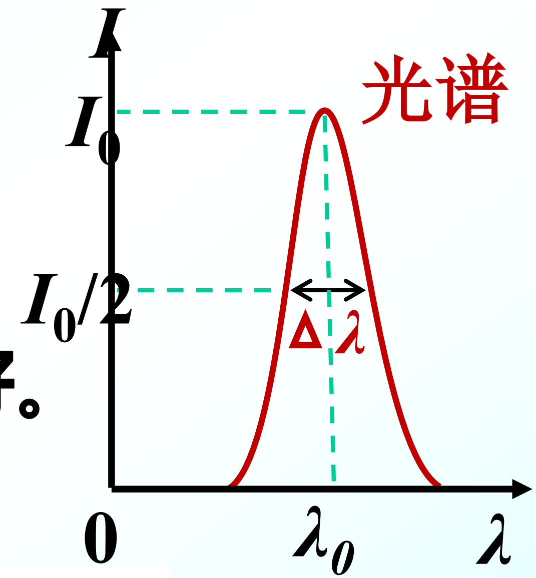
$\Delta\nu_{laser}/\nu_0 \sim 10^{-7} \sim 10^{-12}$

复色光： 普通光源发出光是由大量分子或原子所发出的，它包含各种不同波长成分。

光谱： 使光源发出的光通过分光器件而使不同频率光彼此分开从而形成光谱。

单色光：具有单一频率的光 → 无限长的波列

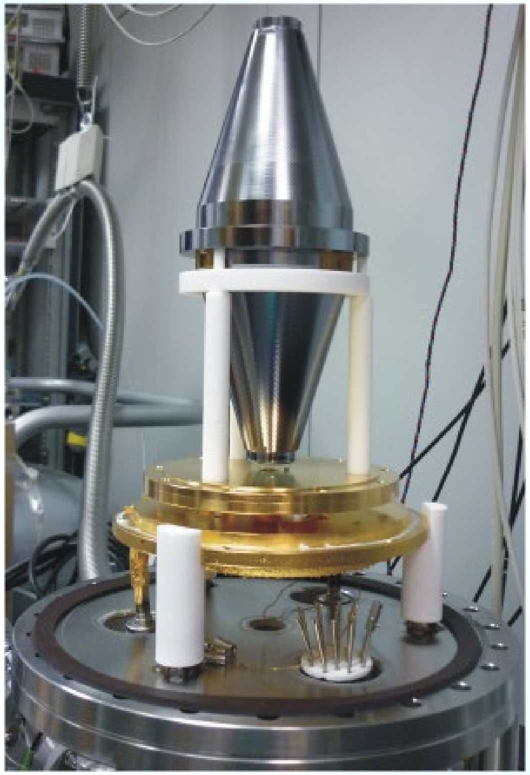
实际的单色光是不存在的，因为任何光波都有一定的频率（波长）范围。

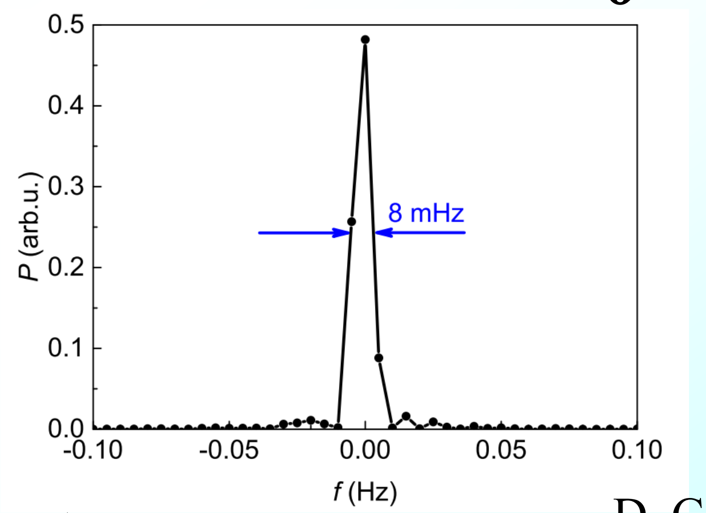


可证明：$\Delta\omega\cdot\Delta t=2\pi\ \Rightarrow\Delta\nu\cdot\Delta t=1$

线宽 $\Delta\nu(\Delta\lambda)$ **越窄，称光的单色性越好。**

科普





$\Delta\nu=$ **8 mHz**

D. G. Matei *et al.*, PRL 118, 263202 (2017)

$@\ \nu\approx$ **200THz** / λ=**1.5μm**

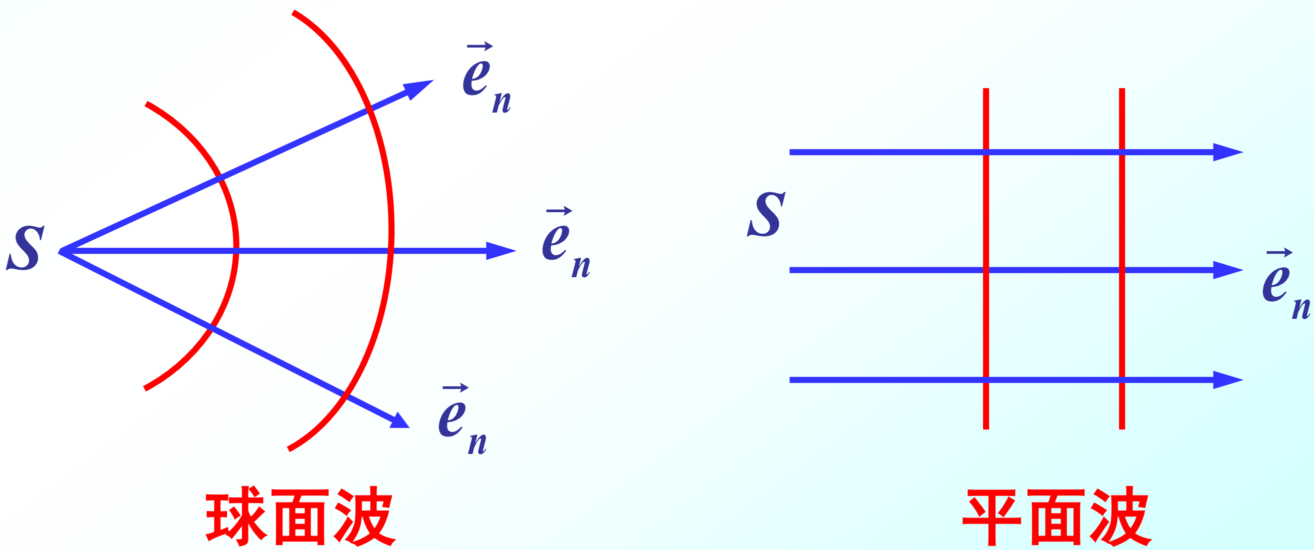
三、光波的描述

可见光、电磁波（横波）

其电矢量为：$\vec{E}=\vec{E}_0\cos(\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi_0)$ 光强：$I=E_0^2$

$\vec{k}=\dfrac{2\pi}{\lambda}\vec{e}_n$，$\vec{e}_n$为传播方向单位矢量

波阵面：$\vec{k}\cdot\vec{r}=\text{constant}$



第2节 光波的叠加 光程

Superposition Principle of Light Waves Optical Path

一、光波的叠加和干涉

线性介质与非线性介质：服从叠加原理的介质称为线性介质；否则为非线性介质。

普通光源的光波叠加：光波的强度简单叠加。

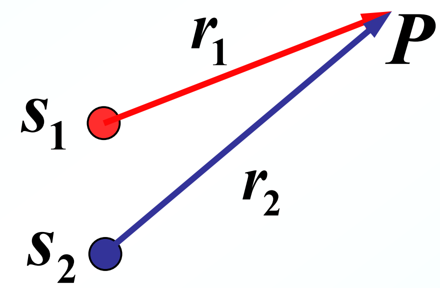
光波的干涉：光波的相干叠加而引起光强重新分布，形成明暗相间的条纹。

要产生光的干涉现象，相遇的光波必须满足什么条件呢？

二、非相干叠加　相干叠加和相干条件

$$E_1 = E_{10}\cos(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda} + \varphi_{10})$$

$$E_2 = E_{20}\cos(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda} + \varphi_{20})$$



P 点合光振动为两同方向同频率电场谐振动合成

$$E = E_1 + E_2 \Rightarrow E^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\Delta\varphi$$

其中 $\Delta\varphi = \varphi_{20} - \varphi_{10} - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$

平均光强

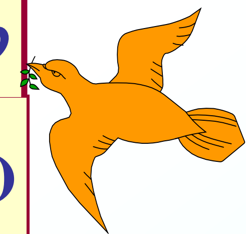
$$I = \overline{E^2} = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau (E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\Delta\varphi)\mathrm{d}t$$

$$= I_1 + I_2 + \underline{2\sqrt{I_1 I_2}\cdot\overline{\cos\Delta\varphi}}$$

干涉项

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

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



1. 非相干叠加

$\because \quad \overline{\cos\Delta\varphi} = 0$

$I = I_1 + I_2$

2. 相干叠加

$\because \quad \overline{\cos\Delta\varphi} = \cos\Delta\varphi \Rightarrow I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos\Delta\varphi$

若两光波的强度相等，即I_1=I_2。 $I = 4I_1 \cos^2\dfrac{\Delta\varphi}{2}$

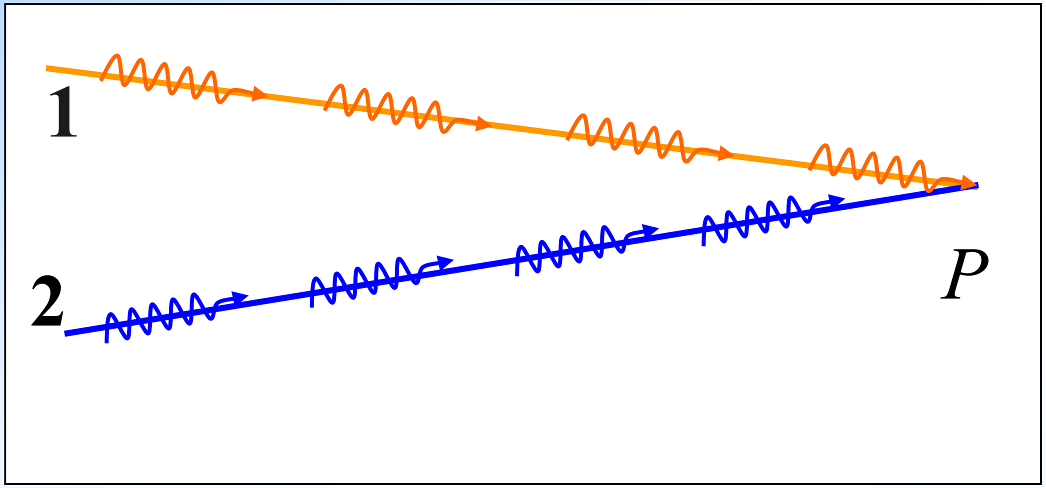
干涉极大(明纹中心)和干涉极小(暗纹中心)条件

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \pm 2k\pi & I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{明纹} \\ \pm(2k+1)\pi & I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

衬比度 $V = \dfrac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \dfrac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \begin{cases} 1 & (I_1 = I_2 \neq 0) \\ 0 & (I_1 = 0 \text{或} I_2 = 0) \\ <1 & (I_1 \neq I_2, \text{且} \neq 0) \end{cases}$

两束光波的强度越接近，衬比度就越大，干涉条纹就越清晰。

3. 相干条件及相干光的获取



普通光源发光特点： 原子发光是断续的，每次发光形成一个短短的波列， 各原子各次发光相互独立，各波列互不相干.

（1）相干条件
- 各光波的频率相等
- 各光振动存在相互平行的振动分量
- 各光振动之间的位相差保持恒定

（2）获得相干光的方法

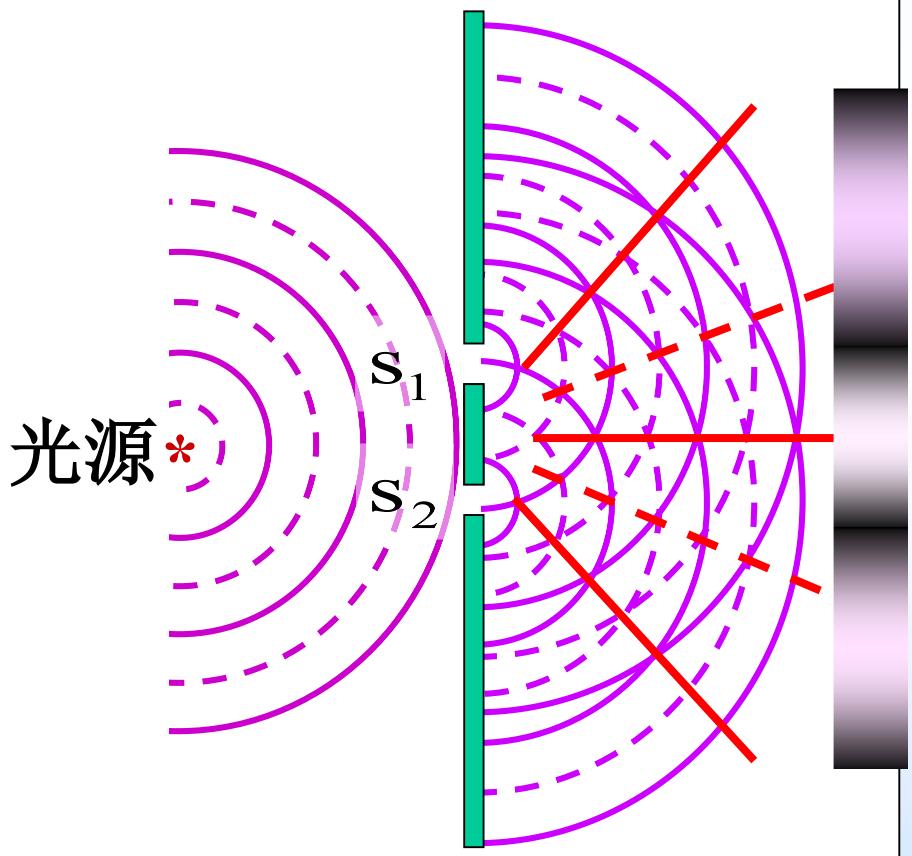
原则： 将同一波列的光分成两束，经不同路径后相遇，产生干涉。

1^{o} 分波阵面法
- 杨氏实验
- 菲涅耳双镜(了解)
  - 双面镜
  - 双棱镜
- 劳埃德镜

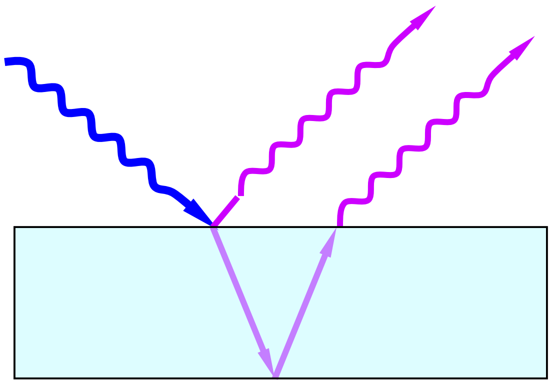
2^{o} 分振幅法　薄膜干涉
- 等倾干涉
- 等厚干涉

2 相干光的产生

分波阵面法



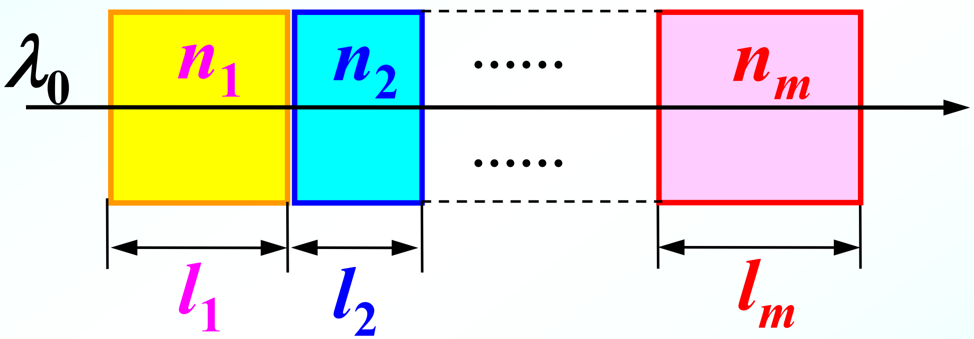
分振幅法



三、光程

1. 光程

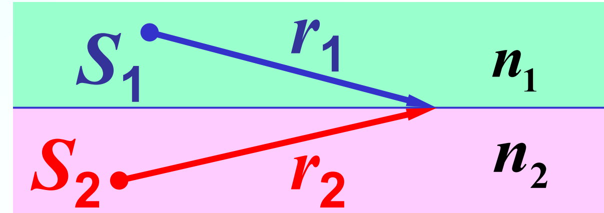
光程定义： 光波在介质中所经历的几何路程 l 与介质折射率n之积 nl 。或在光波在介质中所经历的相同时间内，相当于光波在真空中传播的距离 。



分区均匀介质: $\Delta = \sum_{i=1}^{k} n_i l_i$ ， $t = \dfrac{\Delta}{c} = \dfrac{1}{c}\sum_{i=1}^{k} n_i l_i$

连续介质: $\Delta = \int_{(l)} n \mathrm{d}l$

2. 光程差



光程差: 两光程之差 $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$

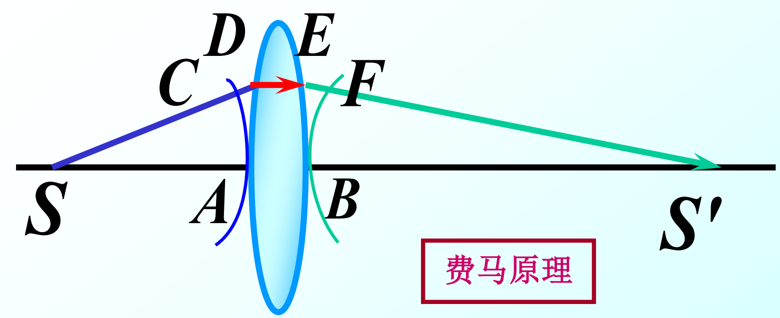
光程差与位相差(同频率光源):

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_{n_2}} - \frac{r_1}{\lambda_{n_1}}\right) = 2\pi\left(\frac{n_2 r_2}{\lambda} - \frac{n_1 r_1}{\lambda}\right) = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$$

注意

1° 空气的 $n \approx 1$

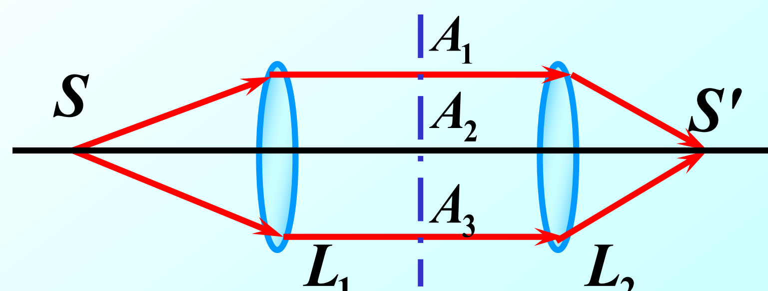
2° 成象的等光程性(费马原理)



$SC = SA \qquad S'B = S'F$

$CD + n \cdot DE + EF = n \cdot AB$

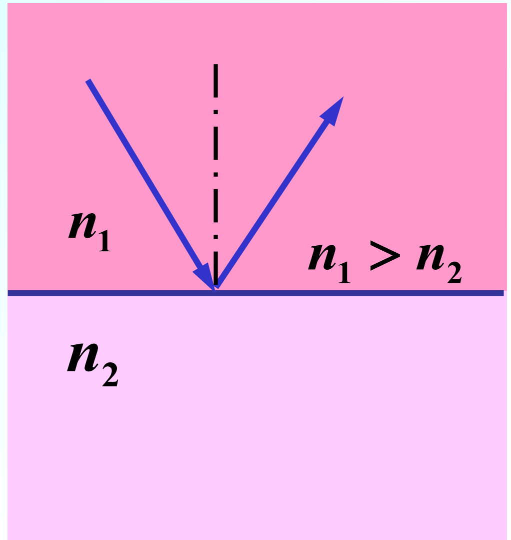
$SCDEFS'$ 与 $SABS'$ 等光程



透镜或透镜组在光路中不会带来附加的光程差。

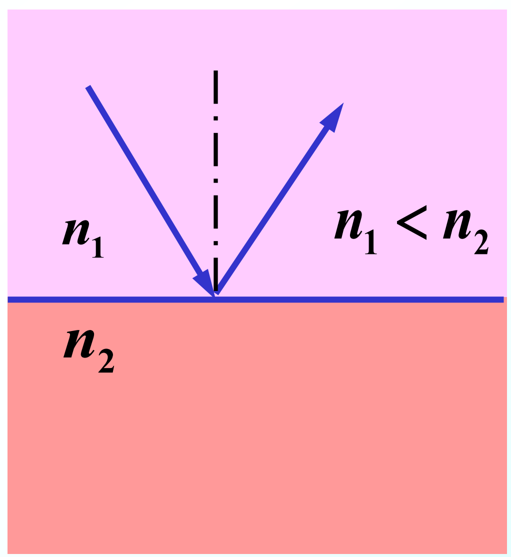
3. 半波损失

光密到光疏



没有半波损失

光疏到光密

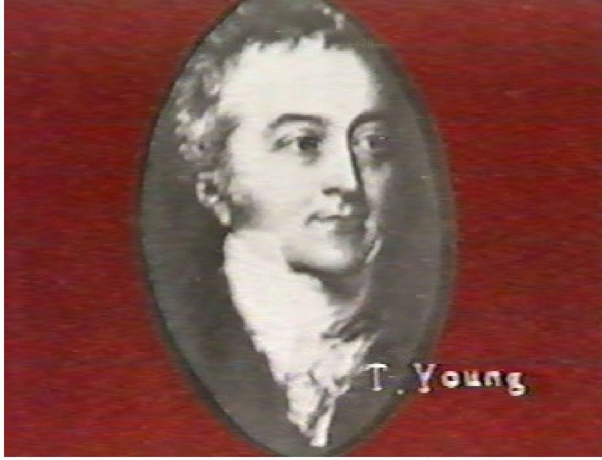


有半波损失

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

第3节 分波阵面干涉

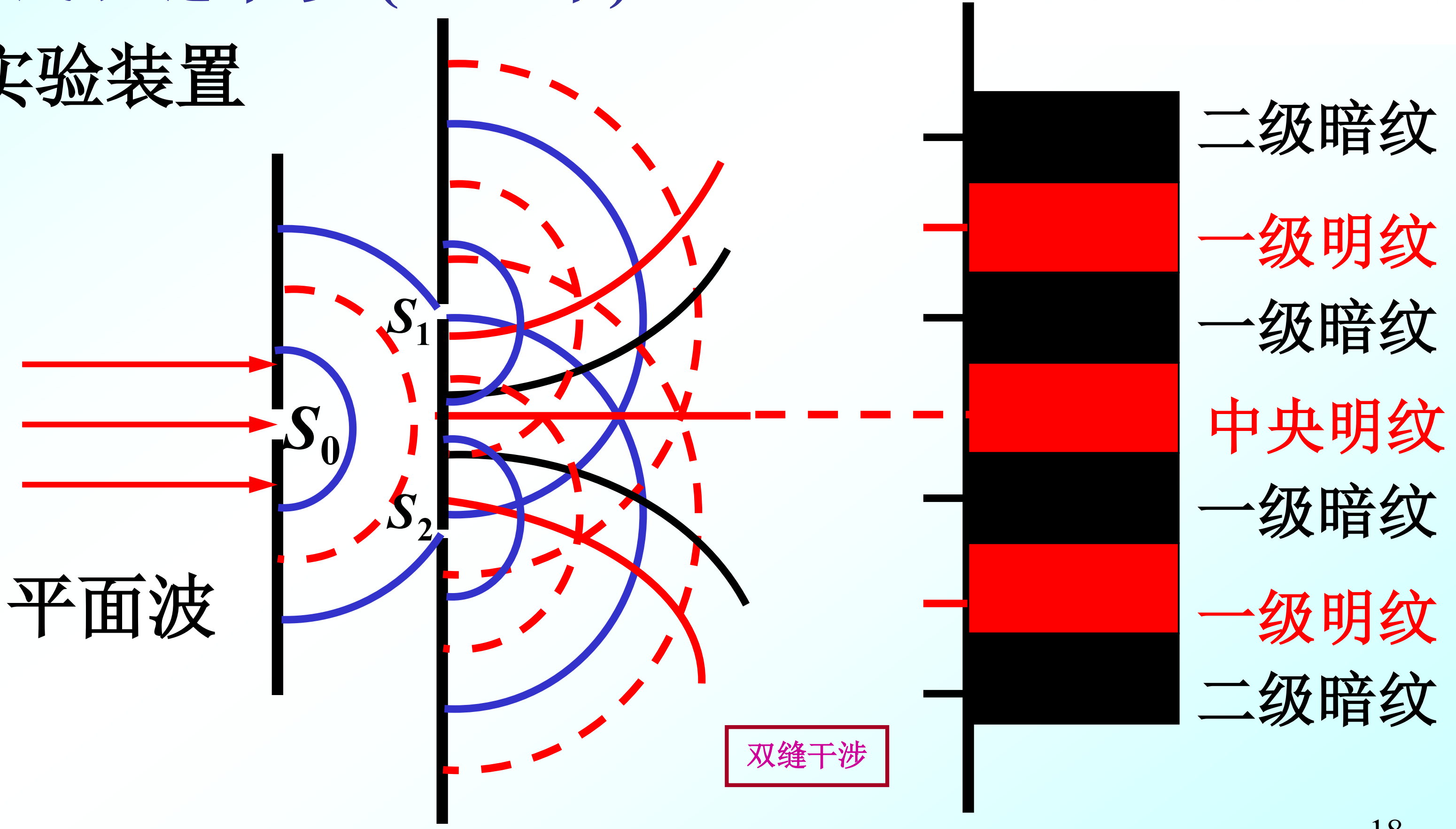
Interference by Dividing Wavefront



一、分波阵面干涉

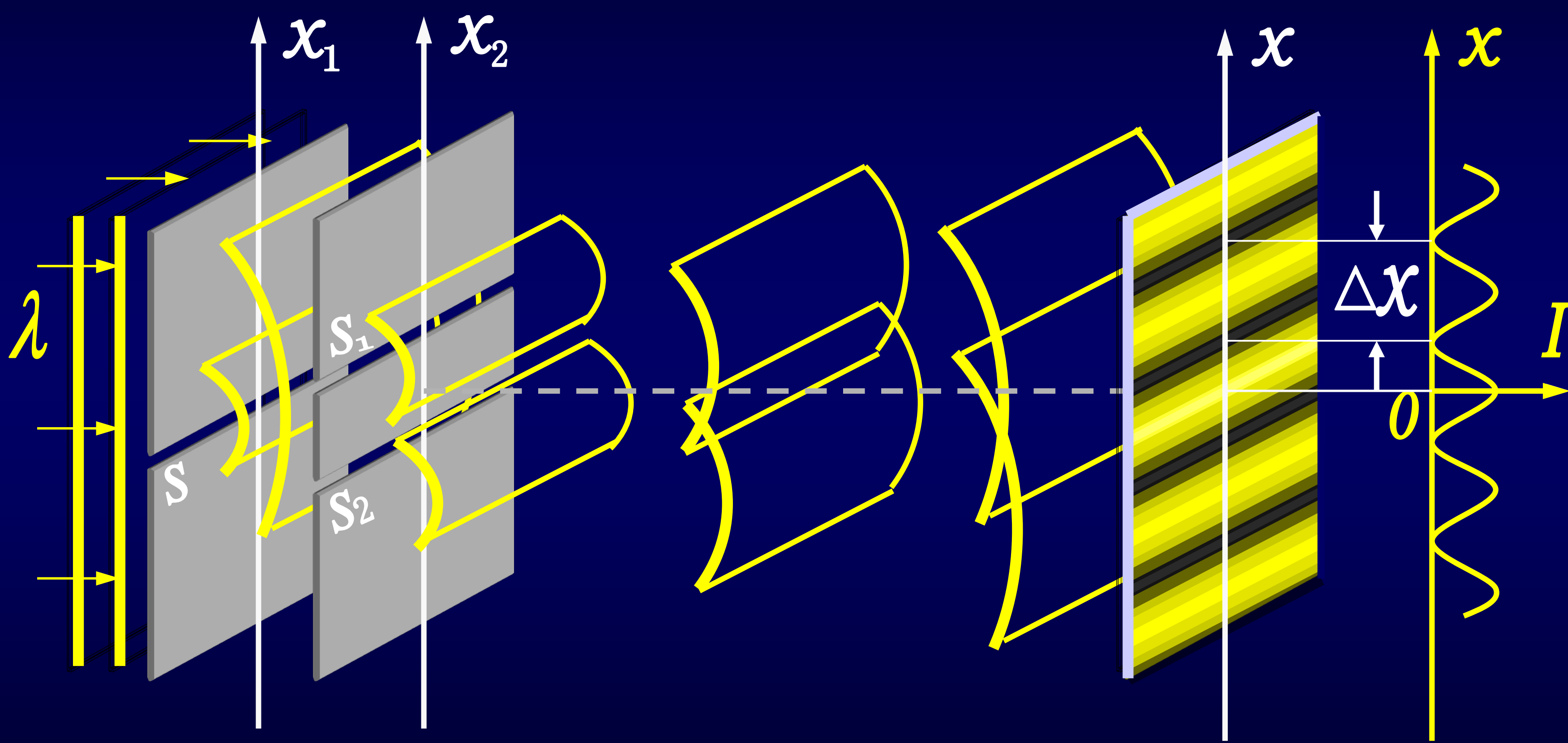
1. 杨氏双缝干涉 (1801年)

(1) 实验装置



分波阵面干涉例

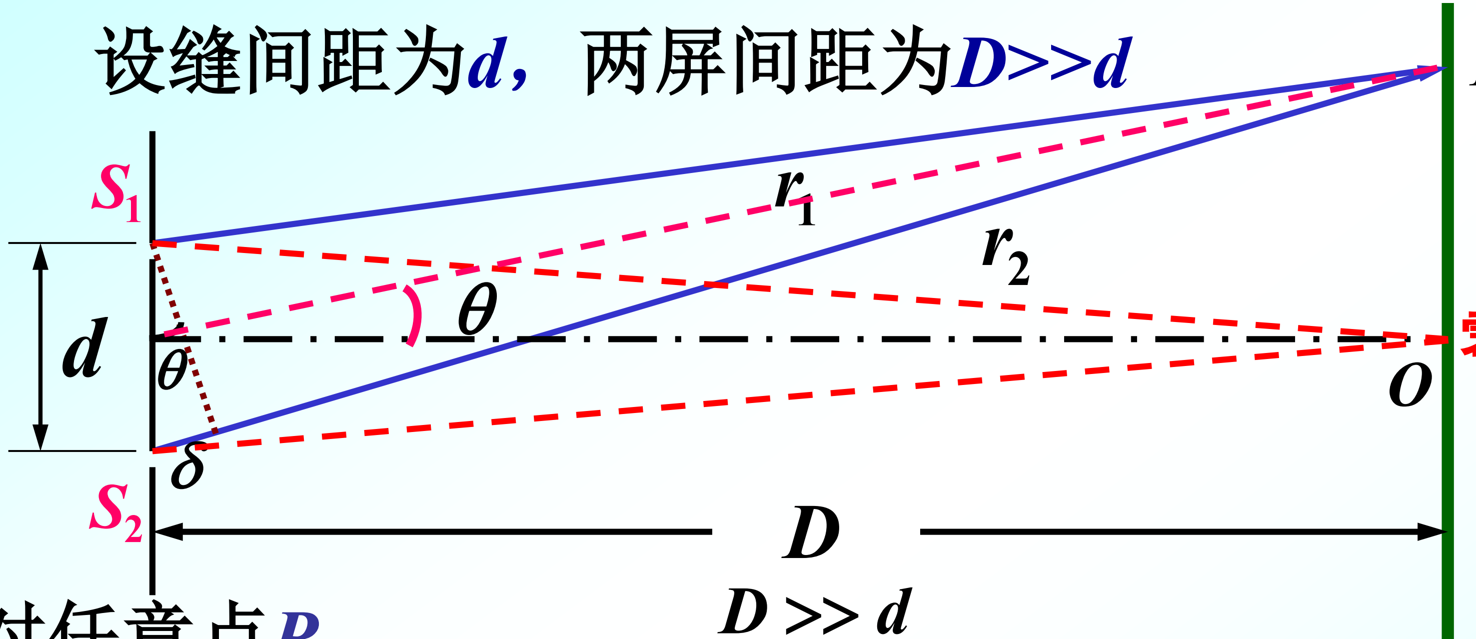
杨氏双缝干涉实验



两列相干柱面波的干涉

（2）出现明暗条纹的位置（真空中）

设缝间距为d，两屏间距为$D>>d$



对任意点P

位相差为：$\Delta\varphi = \frac{r_2 - r_1}{\lambda} 2\pi = \begin{cases} \pm 2k\pi & \text{明纹} \\ \pm(2k+1)\pi & \text{暗纹} \end{cases}$ $(k=0, 1, 2\ldots)$

即：$\delta = r_2 - r_1 \approx d\sin\theta = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{干涉极大} \\ \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{干涉极小} \end{cases}$

注 意

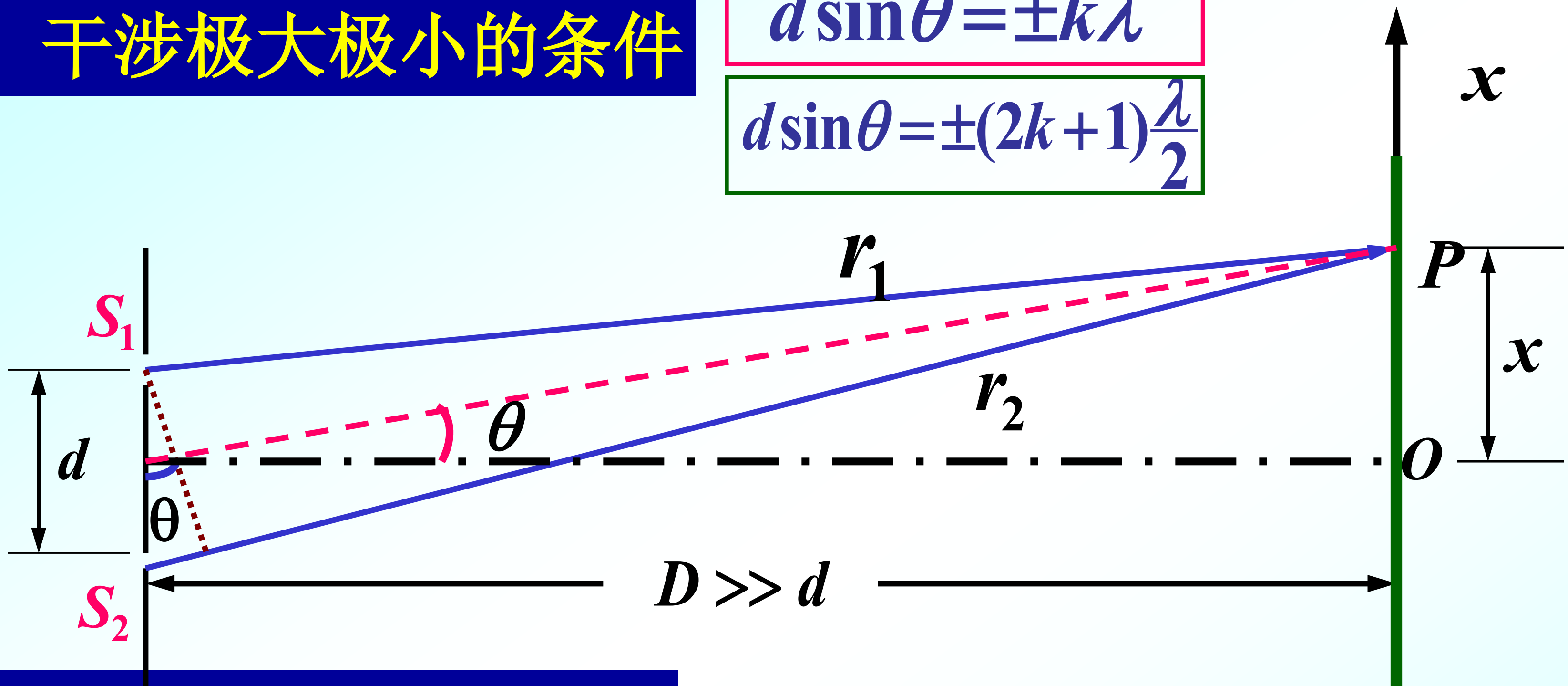
1° O点处$\delta = 0\ (k=0)$ 是中央明纹(零级明纹)；

2° 若P点的光程差$\delta \neq k\frac{\lambda}{2}$,则 P 点为明暗条纹的过渡区.

干涉极大极小的条件

$$d\sin\theta = \pm k\lambda$$

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



干涉极大极小的位置

P 点的坐标(距O点很近)：

$$x = D\tan\theta \approx D\sin\theta \qquad \therefore\ \sin\theta \approx \frac{x}{D}$$

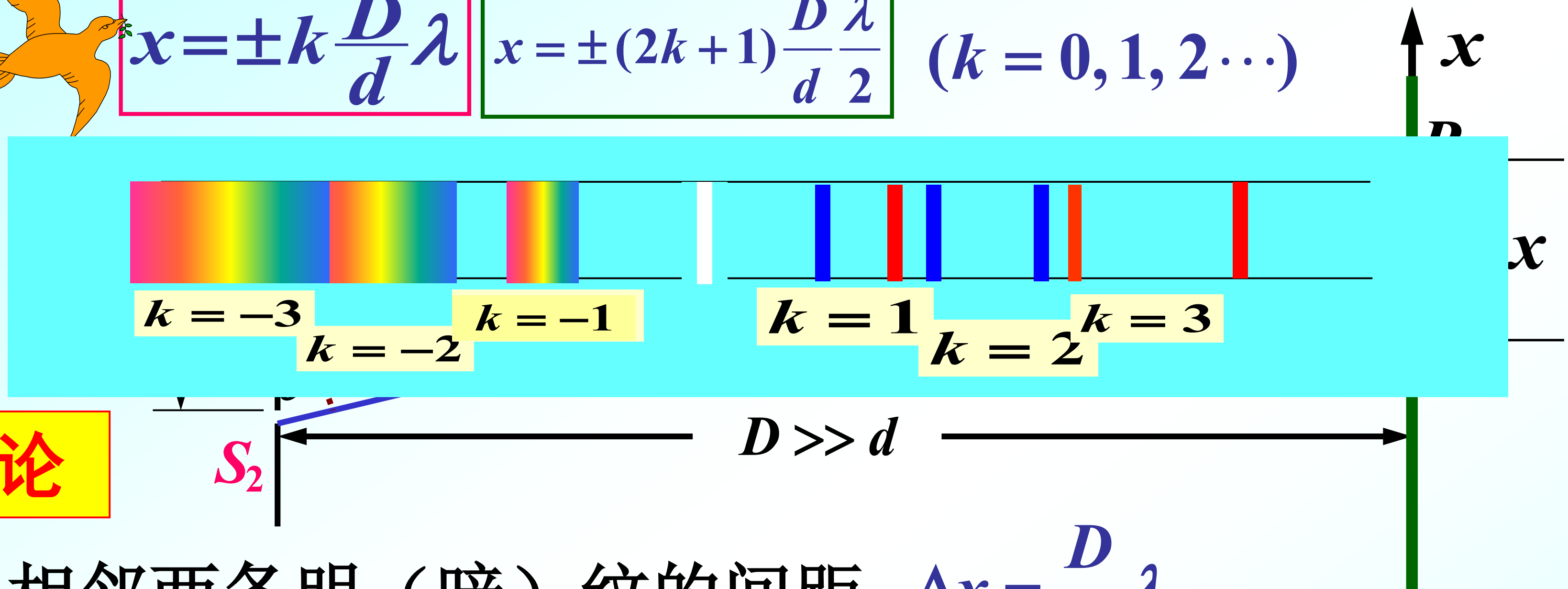
代入　得：

$$\boxed{x = \pm k\frac{D}{d}\lambda}$$ ——明条纹

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

$$\boxed{x = \pm(2k+1)\frac{D}{d}\frac{\lambda}{2}}$$ ——暗条纹

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



讨论

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

干涉图样是等间距明暗相间条纹。

影响双缝干涉条纹的因素

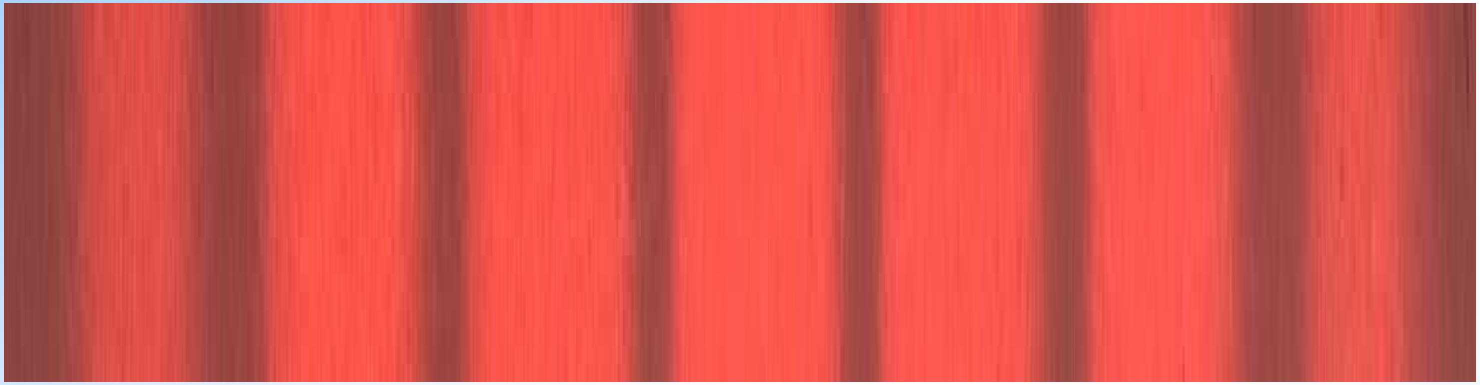
2° D、λ一定 $\Delta x \propto \frac{1}{d}$，$d\downarrow$，$\Delta x\uparrow$ 条纹越清晰，

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

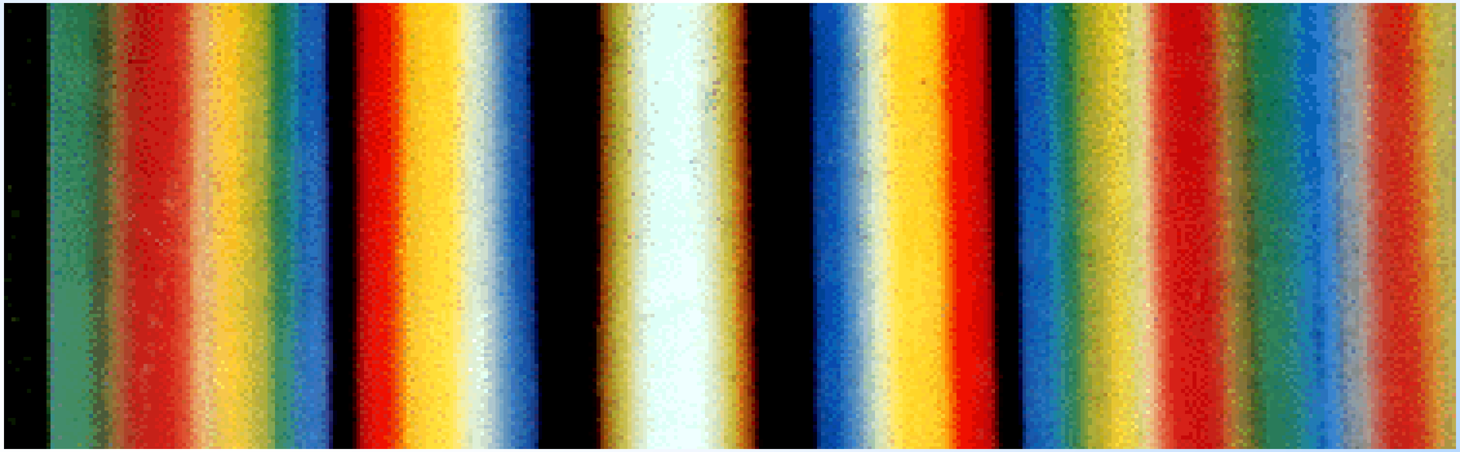
3° D、d 一定，$x_k \propto \lambda$，同一级上$\lambda\uparrow$，$x_k\uparrow$(中央极大除外)

若白光入射，每一级都是彩色条纹分布 —色散

4° $\lambda = \frac{\Delta x d}{D}$ 由此，可测出各种光波的波长.



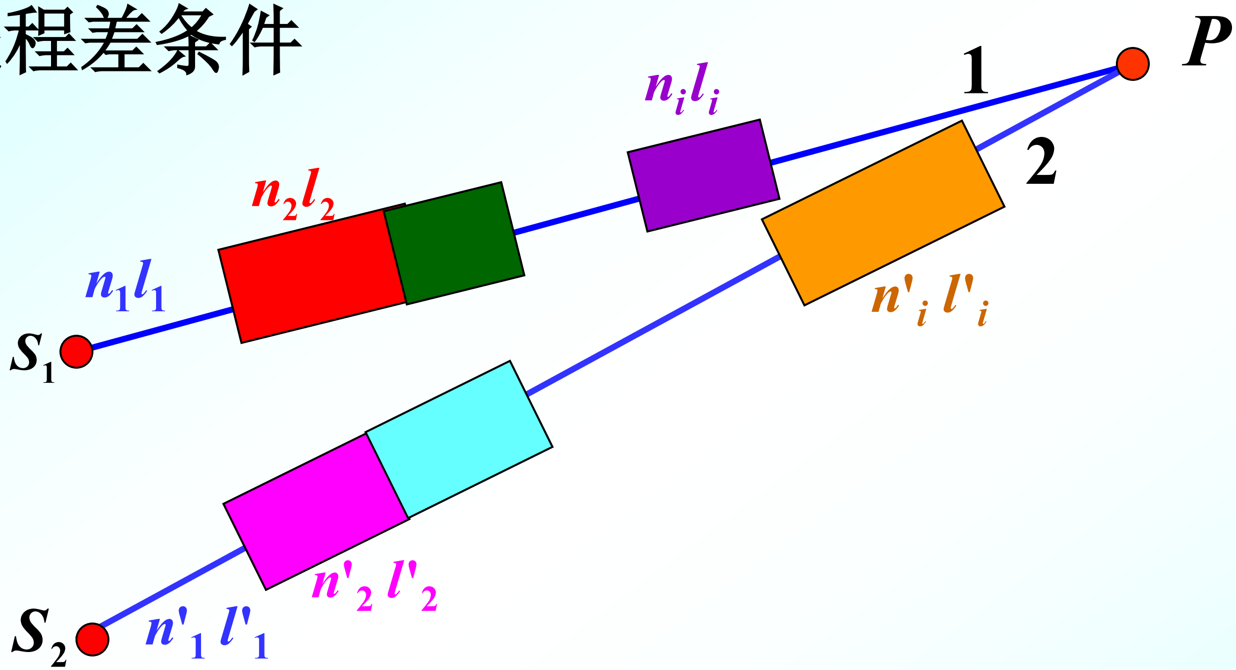
红光入射的杨氏双缝干涉照片



白光入射的杨氏双缝干涉照片

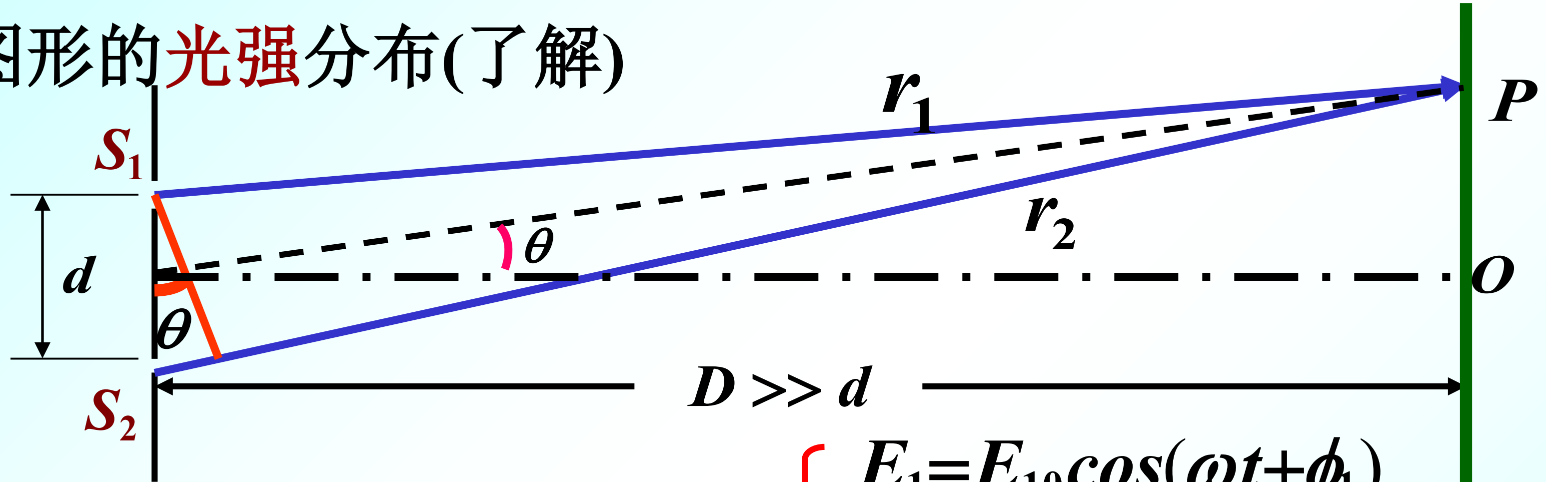
（3）有介质时明暗条纹的位置

光程差条件



$$\left(\sum n'_i\, l'_i\right)_2 - \left(\sum n_i l_i\right)_1 = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{max} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{min} \end{cases} \quad (k=0,\ 1,\ 2\ldots)$$

（3）干涉图形的光强分布(了解)



假定S_1、S_2在P点引起的光振动：
$$\begin{cases} E_1 = E_{10}\cos(\omega t + \phi_1) \\ E_2 = E_{20}\cos(\omega t + \phi_2) \end{cases}$$

合振动为： $E = E_\theta \cos(\omega t + \varphi)$

合振幅为： $E_\theta^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\Delta\phi$

相应的光强为： $I_\theta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\phi$ $\quad \because I \propto E_0^2$

一般地： $I_1 = I_2 = I_0$

$$\begin{cases} r_2 - r_1 = d\sin\theta \\ \Delta\phi = \dfrac{d\sin\theta}{\lambda}\cdot 2\pi \end{cases}$$

$\sin\theta \approx \dfrac{x}{D}$

$\therefore I_\theta = 4I_0\cos^2\dfrac{\Delta\phi}{2}$

$I_x \leftarrow$ $\boxed{I_\theta = 4I_0\cos^2\left(\dfrac{\pi d\sin\theta}{\lambda}\right)}$

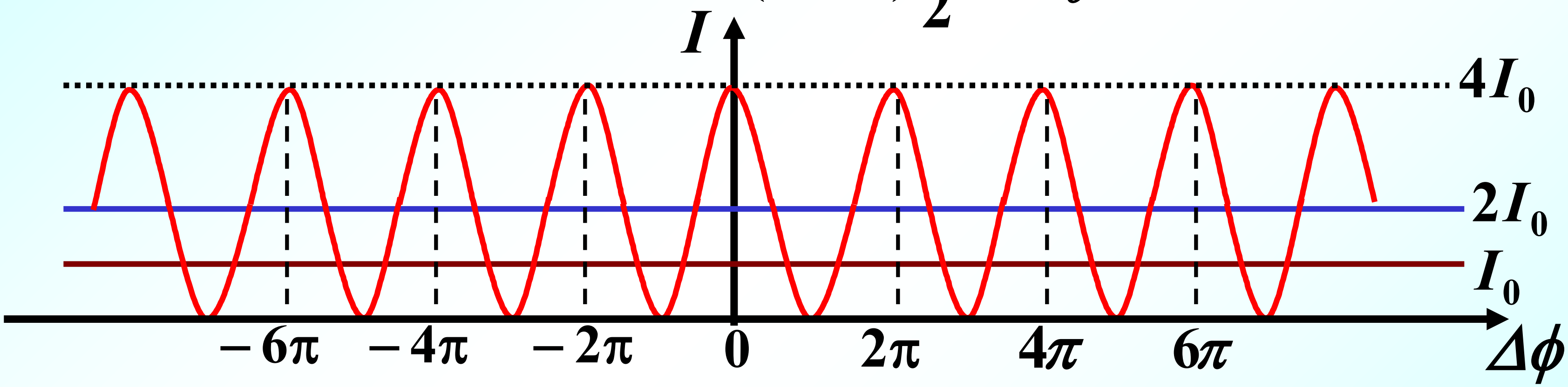
亦可由此求导得明、暗纹的坐标。

$$\boxed{I_\theta = 4I_0\cos^2\left(\frac{\pi d\sin\theta}{\lambda}\right)} \quad \Delta\phi = \frac{d\sin\theta}{\lambda}\cdot 2\pi$$

可看出P点的光强 I_θ 如何随θ角变化（即：随位相变化）

$\Delta\phi = \pm 2k\pi \longrightarrow d\sin\theta = \pm k\lambda \quad I_\theta = 4I_0$ ——干涉极大

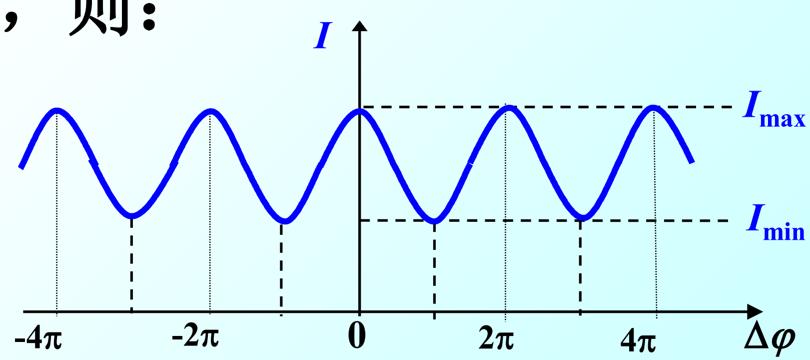
$\Delta\phi = \pm(2k+1)\pi \longrightarrow d\sin\theta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad I_\theta = 0$ ——干涉极小



注：如果P点两振动的振幅不等，则：

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

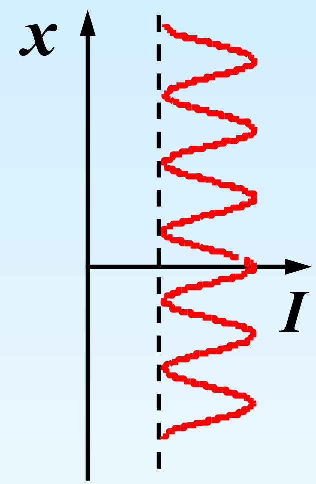
$$\begin{cases} I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \\ I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \end{cases}$$



讨论

1° 实际上 $4I_0$ 就是各级明纹的强度；

2° 在狭缝很窄时(保证两缝处$E_{10}=E_{20}$)；



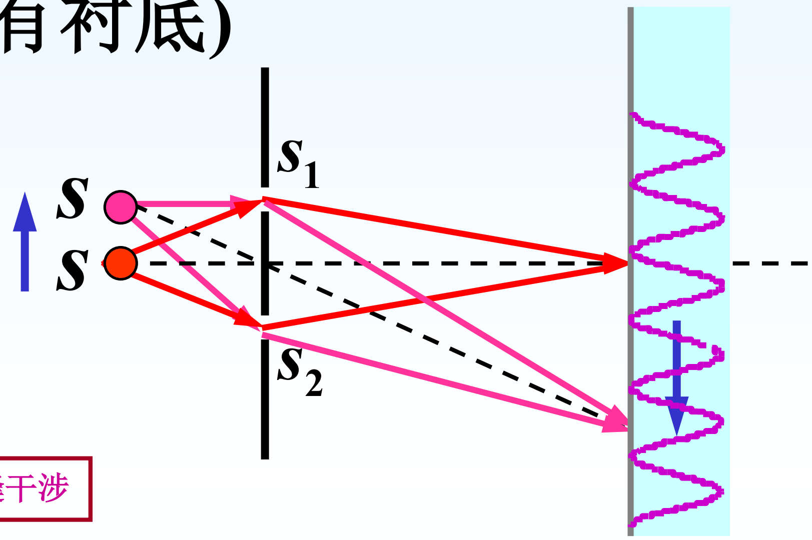
3° 把一条缝加宽，条纹如何变化？

若 d 不变, 则条纹位置不变。

$$E_{10} \neq E_{20} \begin{cases} \text{则暗纹强度不为0} \\ \text{明纹强度也变大} \end{cases}$$

条纹反差小(衬比度小或有衬底)

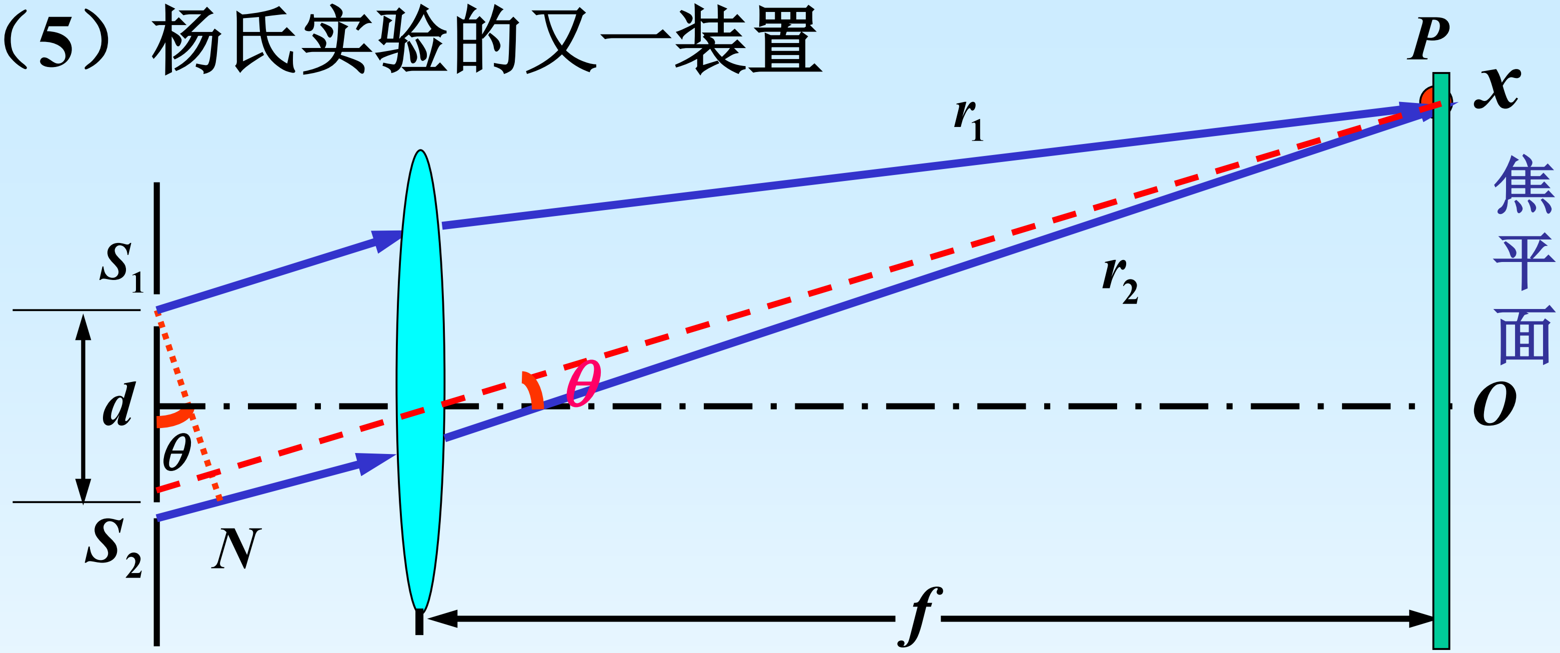
$$\text{衬比度 } V=\frac{I_{max}-I_{min}}{I_{max}+I_{min}}=\frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1+I_2}$$



4° 若把 S 向上移，条纹如何变化？

双缝干涉

（5）杨氏实验的又一装置



费马原理

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）。

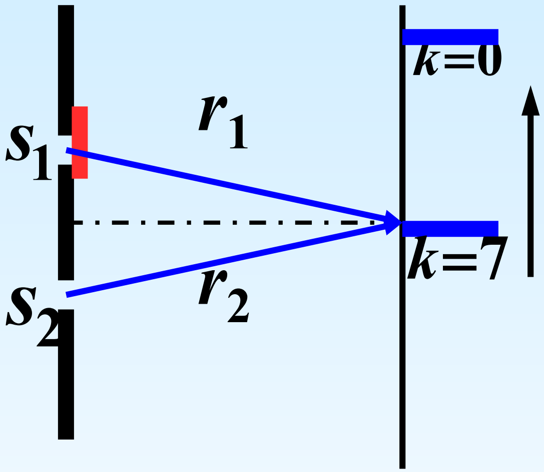
仍有 $\delta = S_2N = d\sin\theta \approx \dfrac{xd}{f} = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{明条纹} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗条纹} \end{cases}$

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

例1 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：$n_{云母}=1.58,\ \lambda=550\ \text{nm}$

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？

移到上面去了

条纹级数增高一级则光程差增大几个λ？

一个λ

$$\boxed{\text{光程差改变} = n_{云母}l - l = 7\lambda}$$

$$l = \frac{7\lambda}{n_{云母}-1} = \frac{7\times 550\times 10^{-9}}{1.58-1}\ \text{m} \approx 6.64\times 10^{-6}\ \text{m} = 6.64\ \mu\text{m}$$