

# 第十五章 波动光学

## Wave Optics

### 光的干涉

分波振面干涉——双缝干涉  
分振幅干涉——等倾干涉、等厚干涉

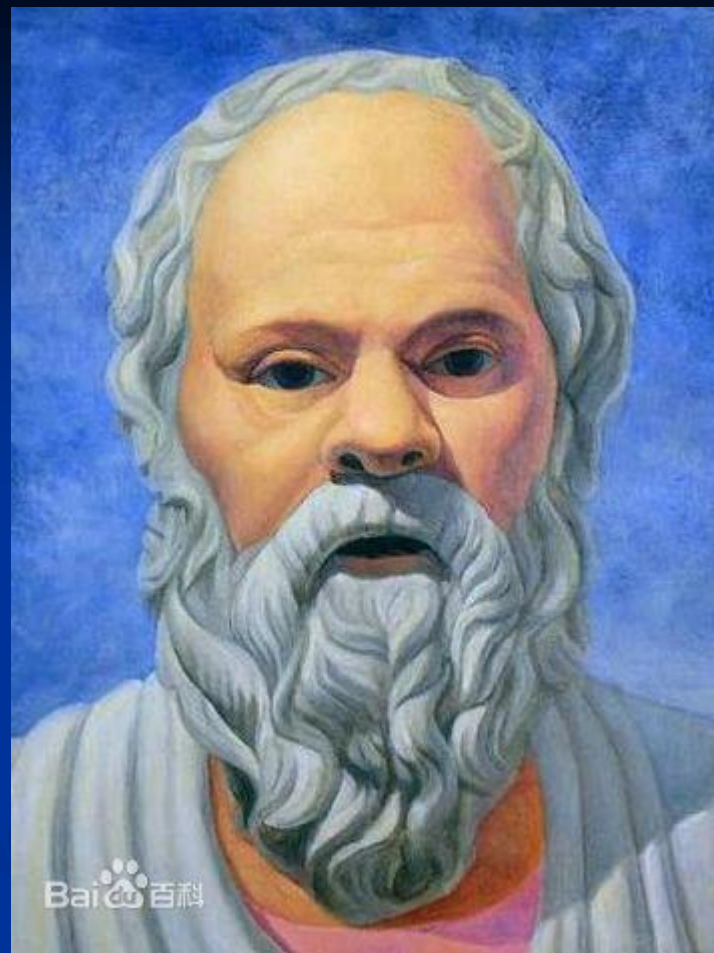
### 光的衍射

单缝衍射、圆孔衍射、光栅衍射

### 光的偏振

偏振类型、马吕斯定律  
反射与折射光的偏振——  
布儒斯特定律  
双折射

每个人身上都有太阳，  
主要是如何让它发光



苏格拉底

# 波动光学 第一讲

15.1 光源 光的相干性

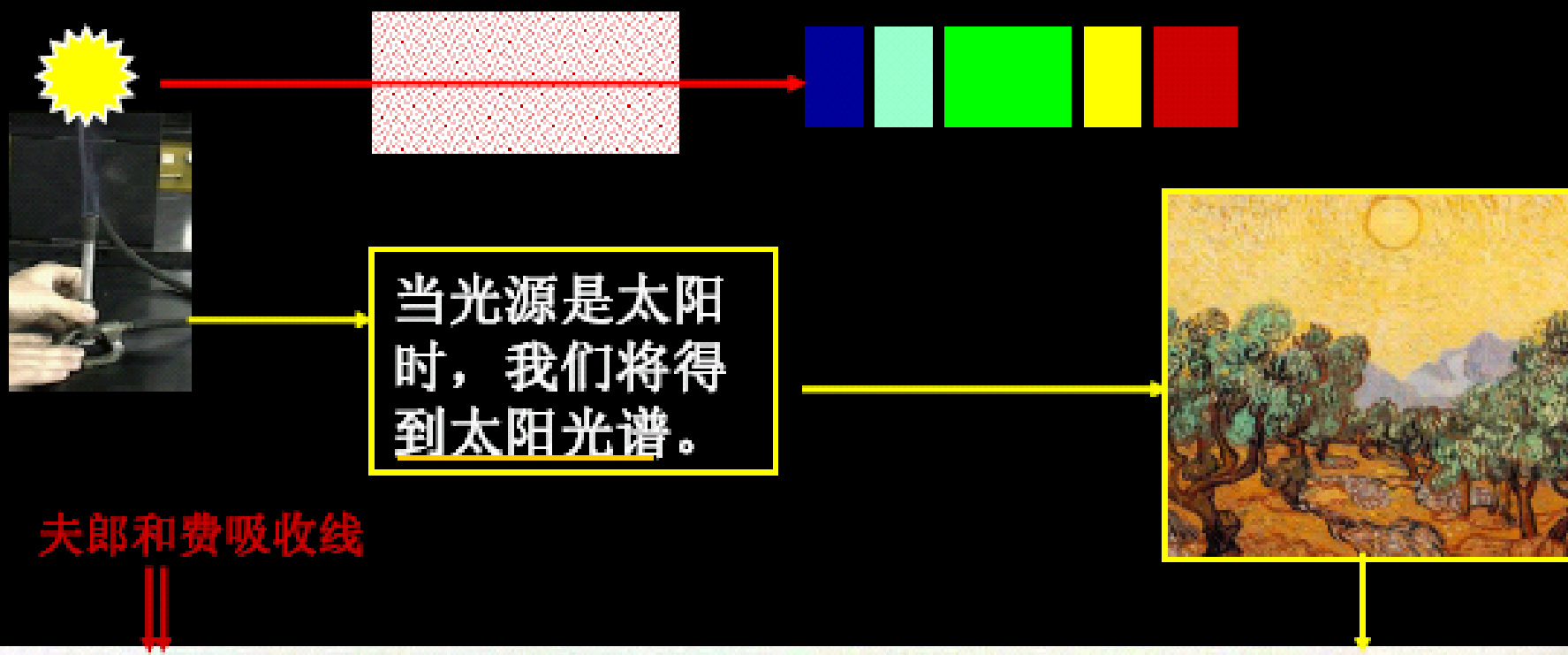
15.2 分波振面干涉

15.3 光程和光程差

# 引言

## 光是什么？ ——光与色

1859年, 基尔霍夫 (Gustav Kirchhoff) 和本生 (Robert Bunsen) 研究了各种火焰光谱和火花光谱并发现对应于各种元素的特征光谱。



# 光的应用



光纤通讯



信息存贮



光信息处理





处理前



处理后



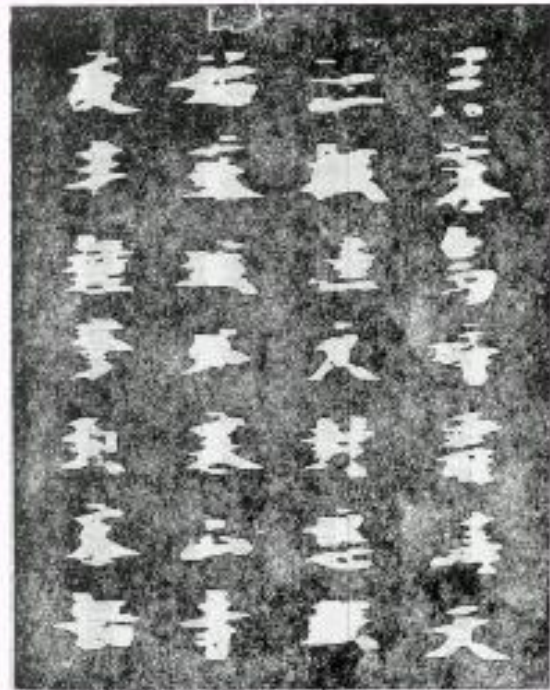
美图前



美图后

化腐朽为神奇—图像的柔光处理

# 卷积运算（滤波法） 对图像清晰化处理



处理前



处理后



# 15.1 光源 光的相干性

一、光的电磁理论

二、光源

三、光波的叠加

四、获得相干光的方法



# 一、光的电磁理论 (§ 14. 8)

## 麦克斯韦电磁场理论

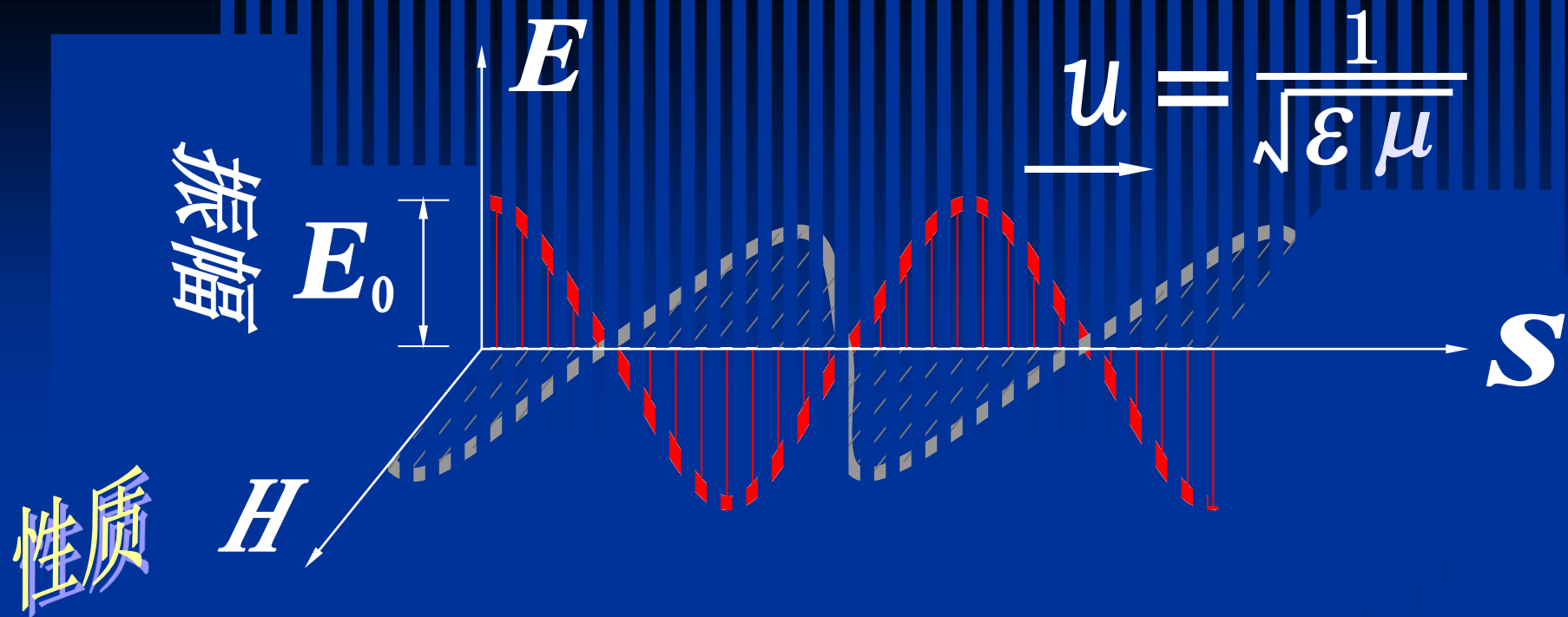


由近及远地传播形成**电磁波**

平面简谐电磁波

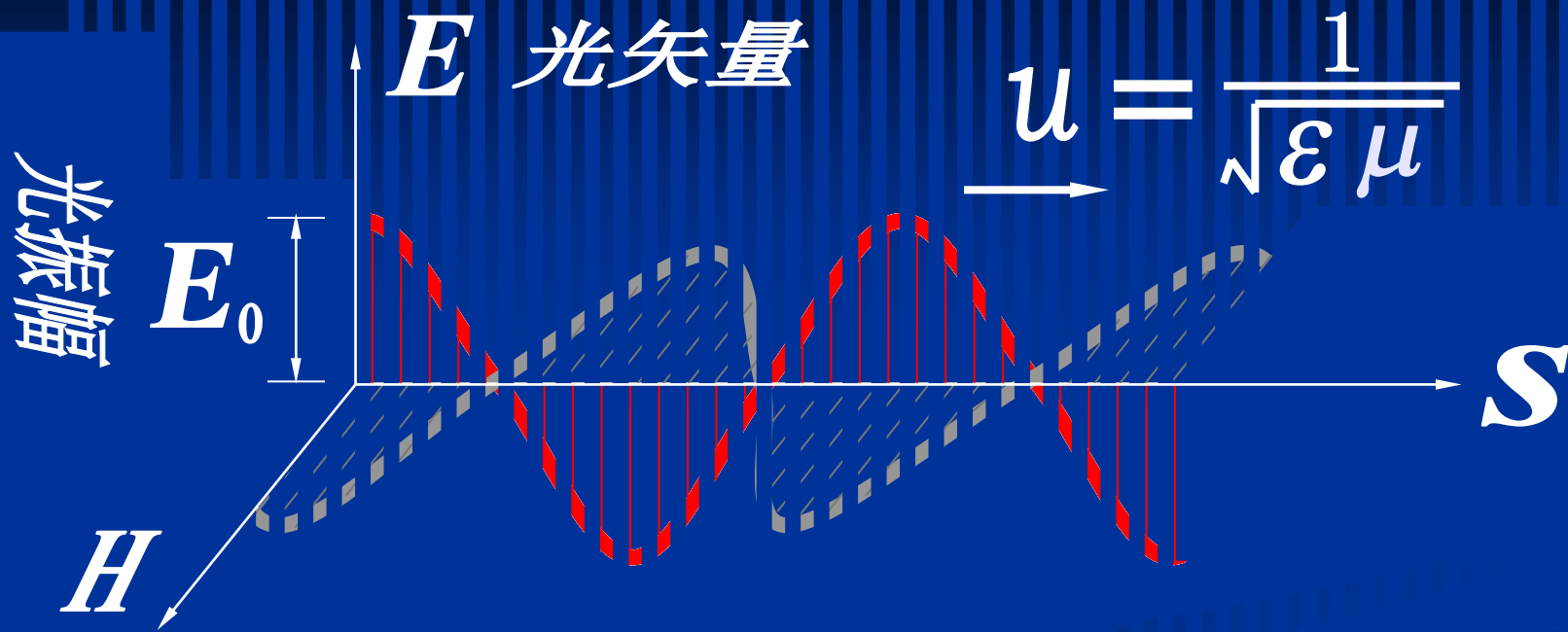
$$E(r, t) = E_0 \cos \omega \left( t - \frac{r}{u} \right)$$

$$H(r, t) = H_0 \cos \omega \left( t - \frac{r}{u} \right)$$



- 1、任一给定点上的 $E$ 和 $H$ 同时存在，同频率、同相位并以同一速度传播；
- 2、 $E$ 和 $H$ 相互垂直，并且都与传播方向垂直， $E$ 、 $H$ 、 $u$ 三者满足右螺旋关系， $E$ 、 $H$ 各在自己的振动面内振动，具有偏振性
- 3、在空间任一点处  $\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$

# 光波是电磁波

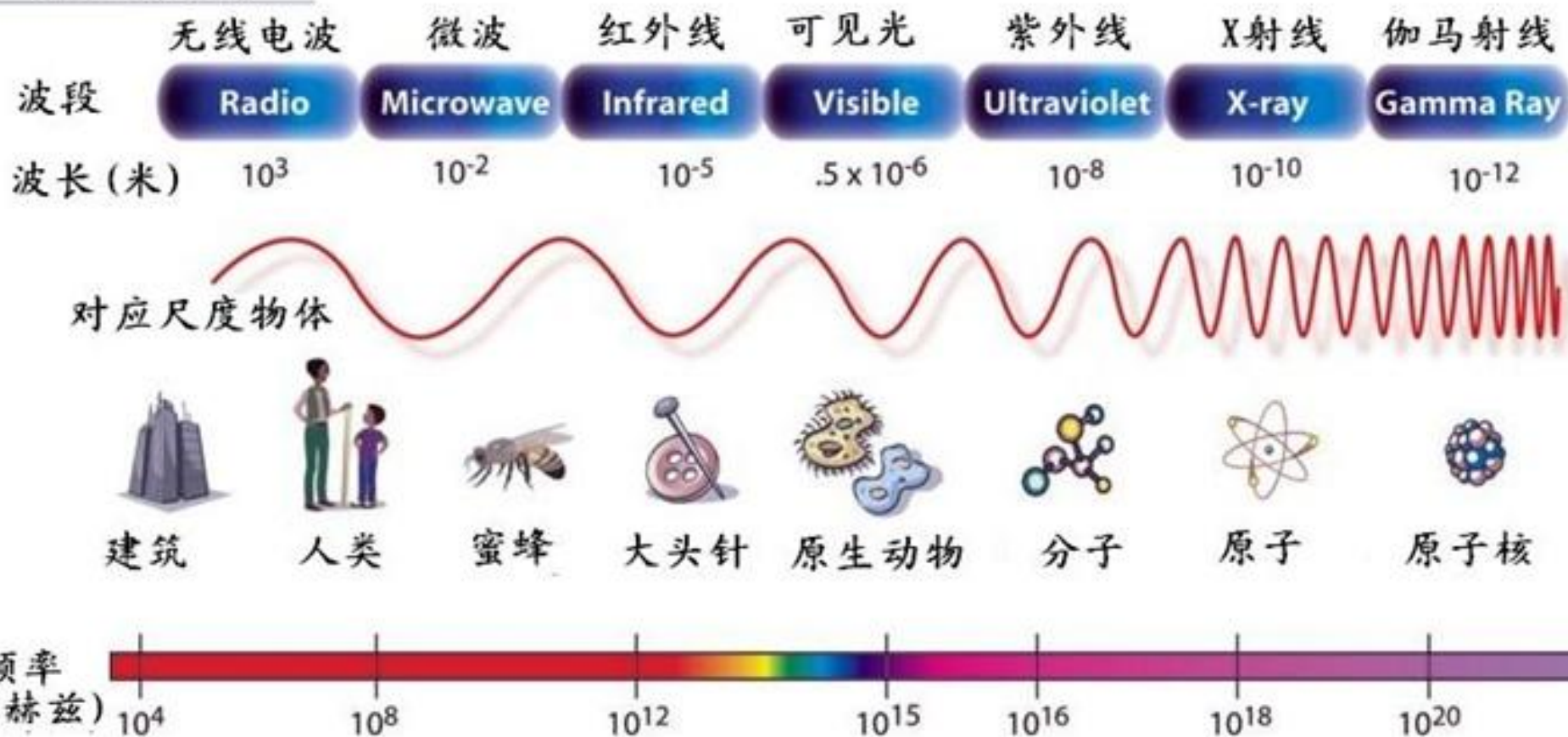


4、电磁波的传播速度决定于介质电容率和磁导率

$$u = \sqrt{\frac{1}{\epsilon \mu}} \quad \text{在真空中 } u = c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 [m \cdot s^{-1}]$$

5、电磁波的能量  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  相对光强  $I = \frac{1}{2} E_0^2$

# 电磁波谱

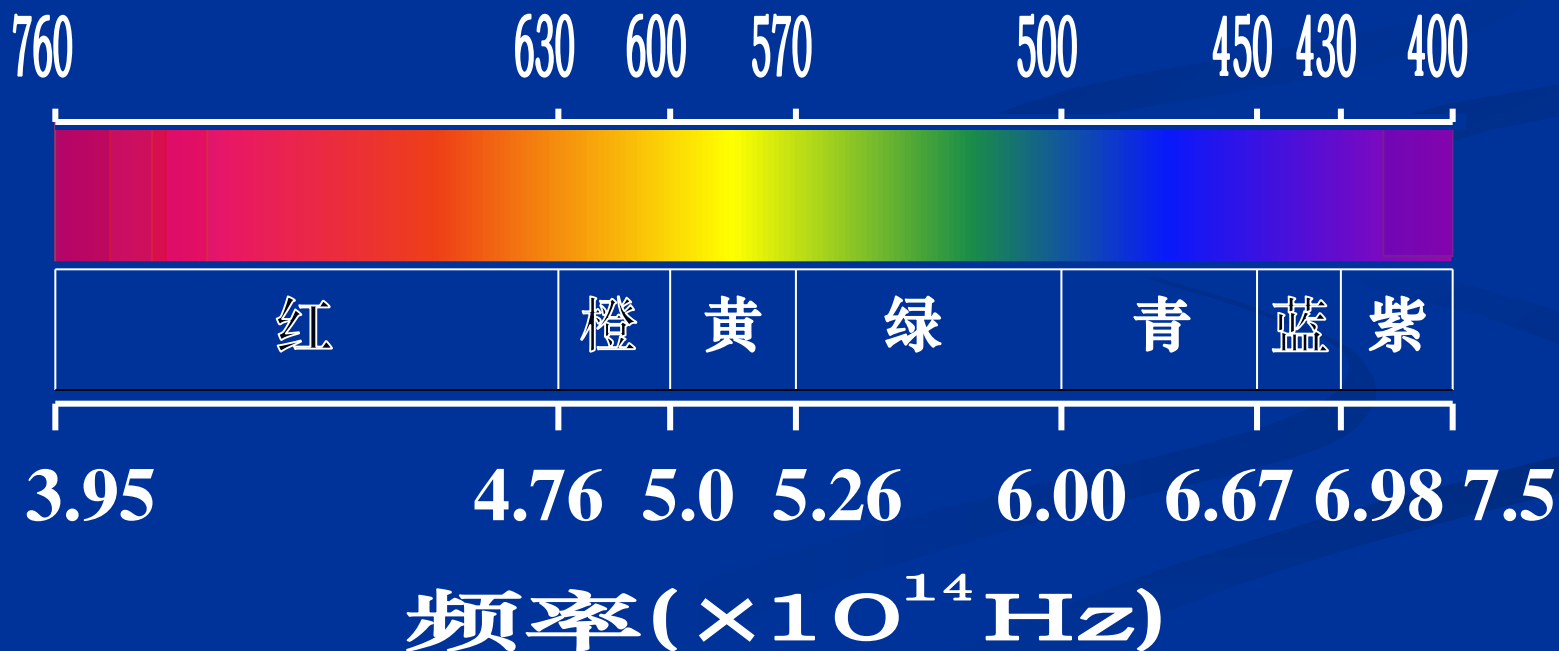


**光：**狭义—为人眼所感觉的电磁波称**可见光**  
广义—远红外~x射线。

$\lambda$ :  $0.39\ \mu\text{m} \sim 0.76\ \mu\text{m}$  ( $390\text{nm} \sim 760\text{nm}$ )

$\nu$ :  $3.95 \times 10^{14} \sim 7.7 \times 10^{14} \text{Hz}$

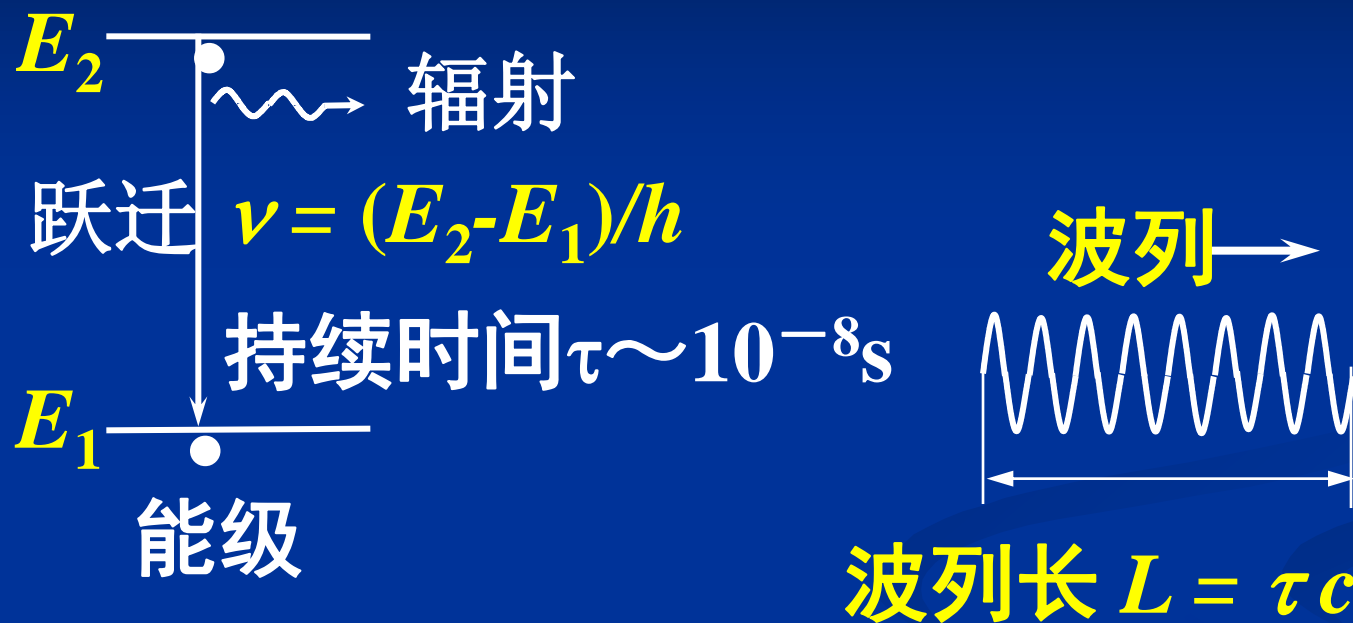
真空中波长(nm)





## 二、光源 (light source)

光源发光，是大量原子、分子的微观过程

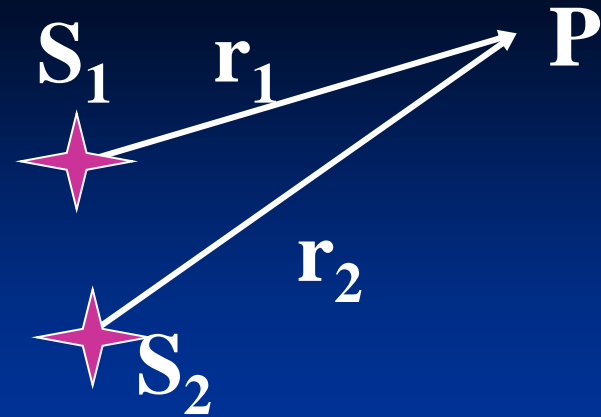


- 1、**波列**---长度有限、频率一定、振动方向一定；
2. 不同原子激发、辐射时彼此没有联系；
3. 同一原子不同时刻所发出的波列，振动方向和相位各不相同。

### 三、光波的叠加

设有两个点光源1、2  
发出同频率的单色光

在P点的光矢量大小为 $E_1$ 、 $E_2$ ,



$$E_1 = E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) \quad E_2 = E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$E = E_1 + E_2 = E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) + E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$E = E_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

$$E_0 = \sqrt{E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \overline{E_0^2} = \frac{1}{2\tau} \int_0^\tau E_0^2 dt \\ &= \frac{1}{2} [E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos(\varphi_2 - \varphi_1) dt] \end{aligned}$$

若相差不恒定:  $I = \frac{1}{2}(E_{10}^2 + E_{20}^2) = I_1 + I_2$

若两束光存在恒定的相位差, 则

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

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = \begin{cases} 2k\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \text{明纹} \\ (2k+1)\pi, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \text{暗纹} \end{cases}$$

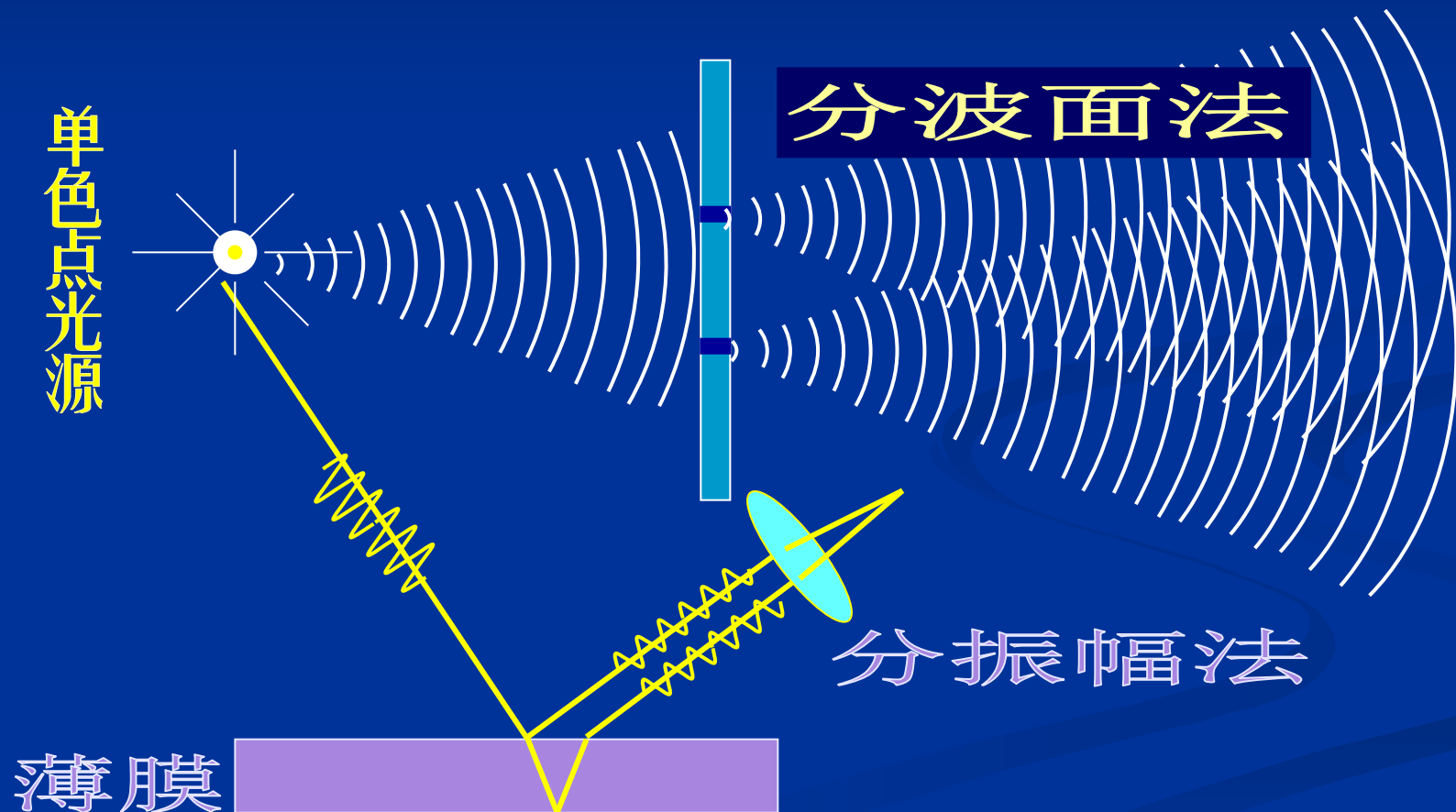
光的相干条件: **同频率、同振动方向、同相或相差恒定**

若  $I_1 = I_2$  则  $I = 4I_1 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = \begin{cases} 4I, \text{明纹} \\ 0, \text{暗纹} \end{cases}$

$$I = \frac{1}{2} [E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos(\varphi_2 - \varphi_1) dt]$$

## 四、相干光的获得

将光波的同一波阵面分割为两部分次光源，  
由次光源发出的光重又相遇叠加产生干涉；

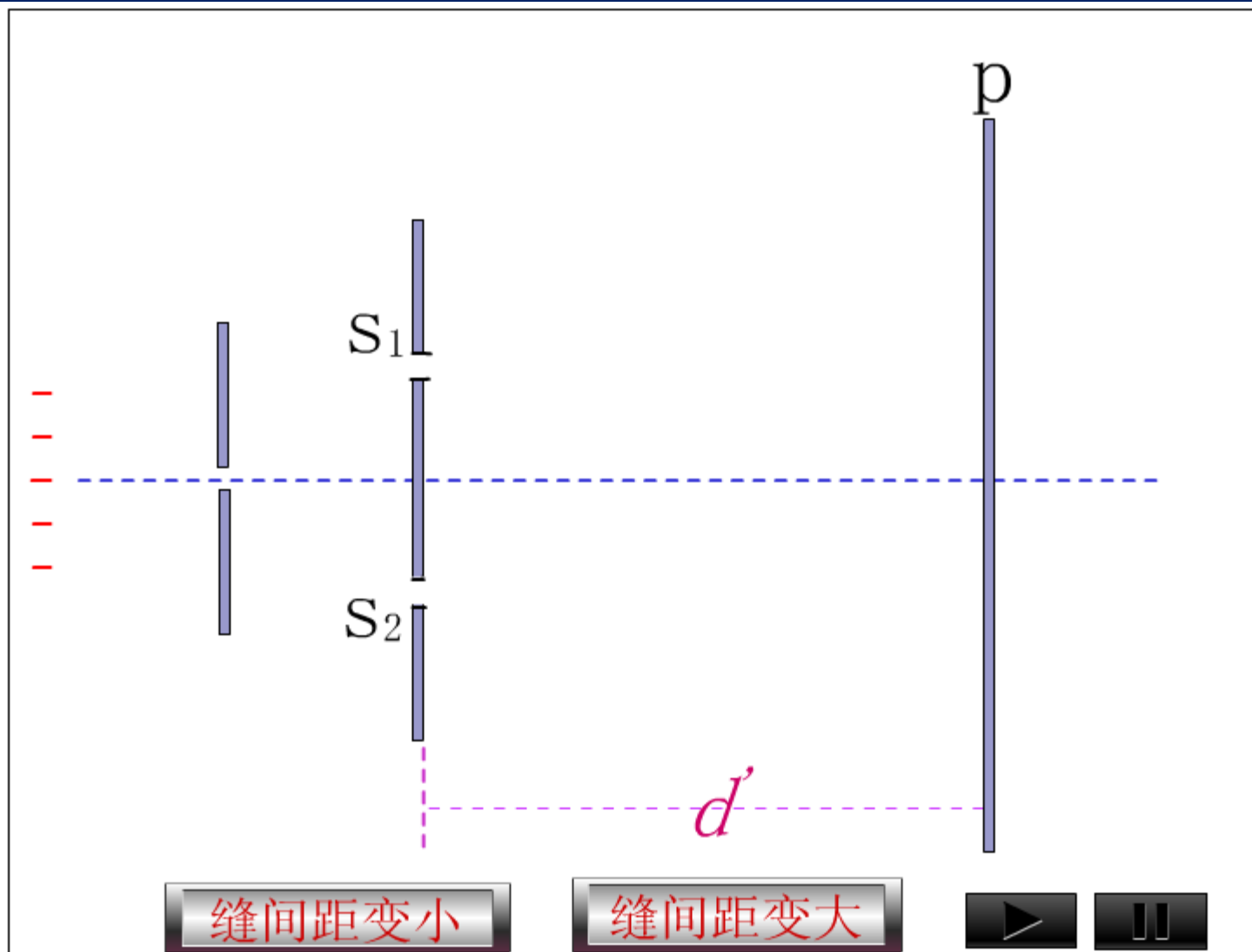


## 15.2 分波振面干涉

- 1、杨氏双缝实验
  - 1) 双缝干涉波程差
  - 2) 干涉条纹位置
  - 3) 干涉条纹特点
  - 4) 干涉条纹变化
  - 5) 干涉条纹强度
- 2、洛埃镜实验



# 1 杨氏双缝实验



# 1) 双缝干涉的波程差

两光波在P点的波程差 $\delta = r_2 - r_1$

$$r_1^2 = D^2 + (x - d/2)^2$$

$$r_2^2 = D^2 + (x + d/2)^2$$

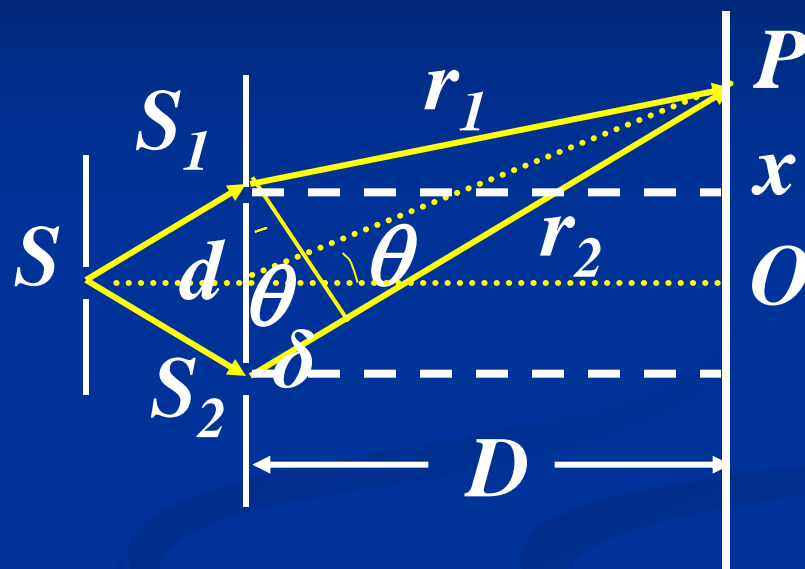
$$r_2^2 - r_1^2 = 2xd$$

$$(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2xd$$

$\delta$

$2D$

$$\delta = d \frac{x}{D}$$



另:  $\delta = d \sin \theta$

$$= d \tan \theta$$

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

## 2)干涉条纹的位置

$$\delta = d \frac{x}{D}$$

明条纹：

$$\delta = xd/D = \pm k\lambda,$$

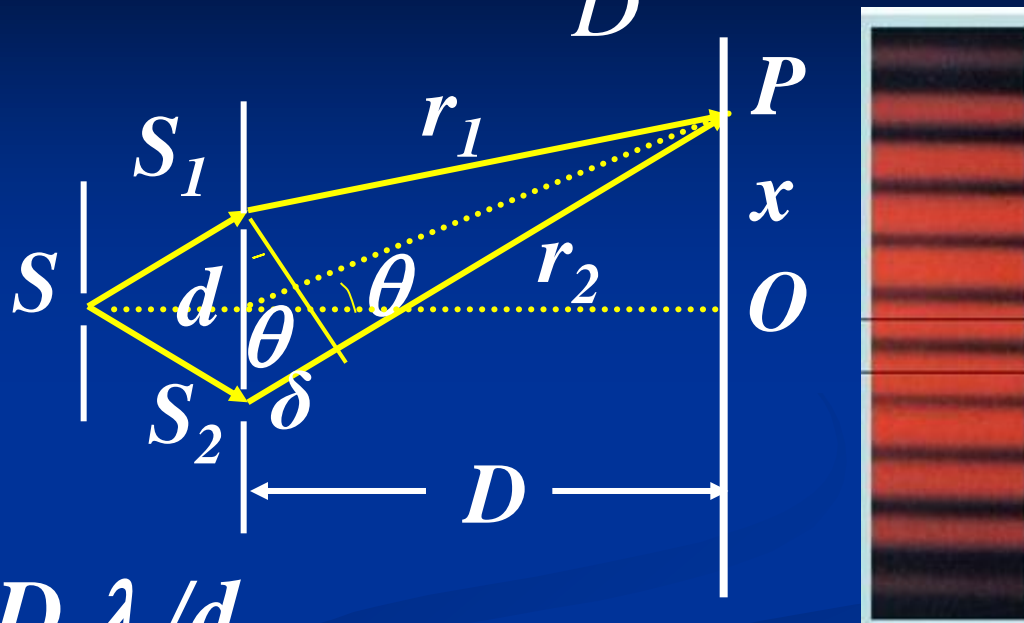
$$k=0,1,2,\dots$$

$$\text{中心位置: } x = \pm kD \lambda / d$$

暗条纹：

$$\delta = xd/D = \pm (2k-1)\lambda / 2, k=1,2,3,\dots$$

$$\text{中心位置: } x = \pm (2k-1)D \lambda / (2d)$$



条纹间距:

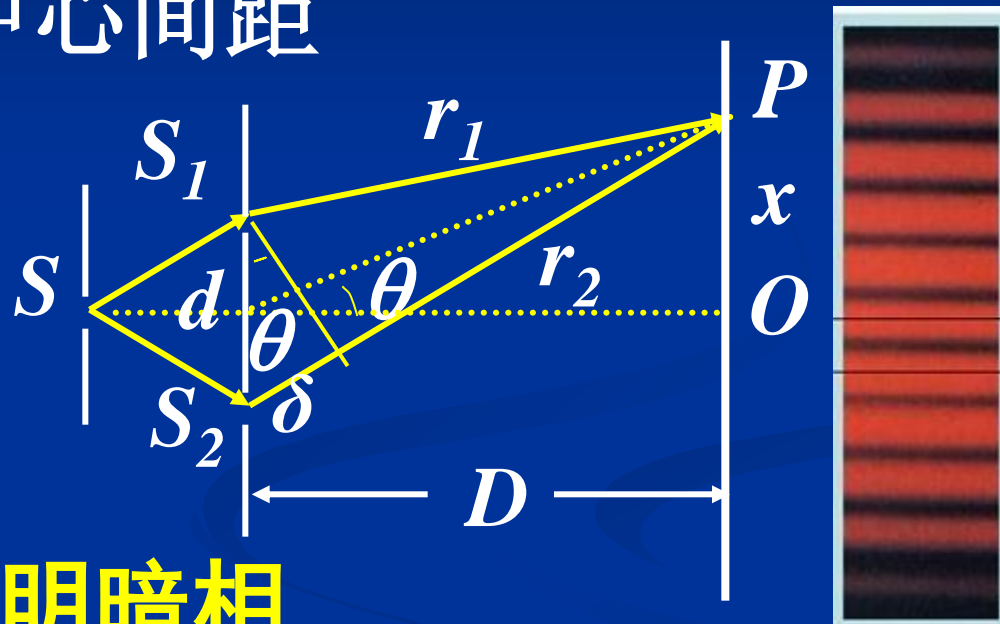
$$\delta = d \frac{x}{D}$$

相邻明纹(或暗纹)中心间距

$$\Delta x = D \lambda / d$$

### 3) 干涉条纹的特点

与双缝平行的一组**明暗相间**彼此**等间距**的直条纹，  
上下**对称**。



#### 4)讨论 $\Delta x = D\lambda/d$

##### (1) 干涉条纹的移动和变化

##### ① S位置改变: 条纹间距不变

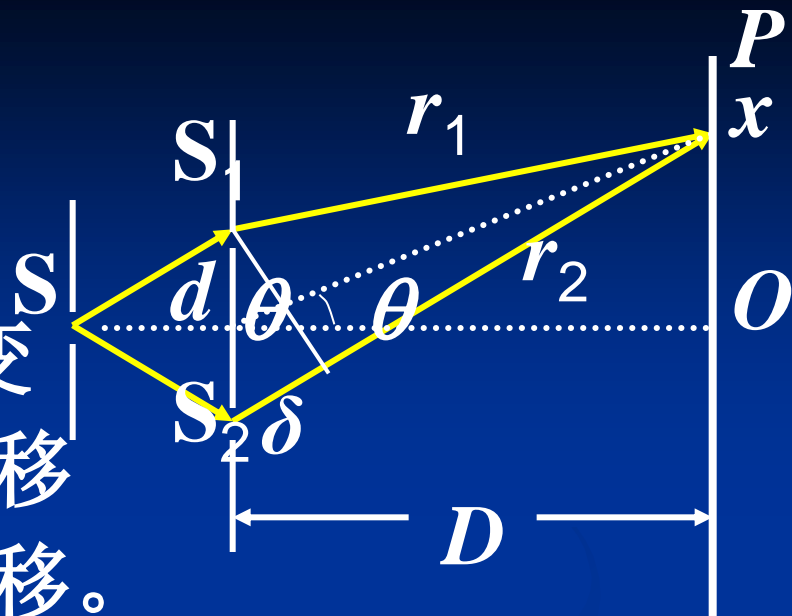
- S下移, 干涉条纹整体上移
- S上移, 干涉条纹整体下移。

##### ② 双缝间距d 改变:

- d 增大,  $\Delta x$ 减小, 条纹变密。
- d 减小,  $\Delta x$ 增大, 条纹变稀疏。

##### ③ 双缝与屏幕间距D 改变:

- D 减小,  $\Delta x$ 减小, 条纹变密。
- D 增大,  $\Delta x$ 增大, 条纹变稀疏。





#### ④入射光波长改变：

当 $\lambda$ 增大时， $\Delta x$ 增大，条纹变疏；

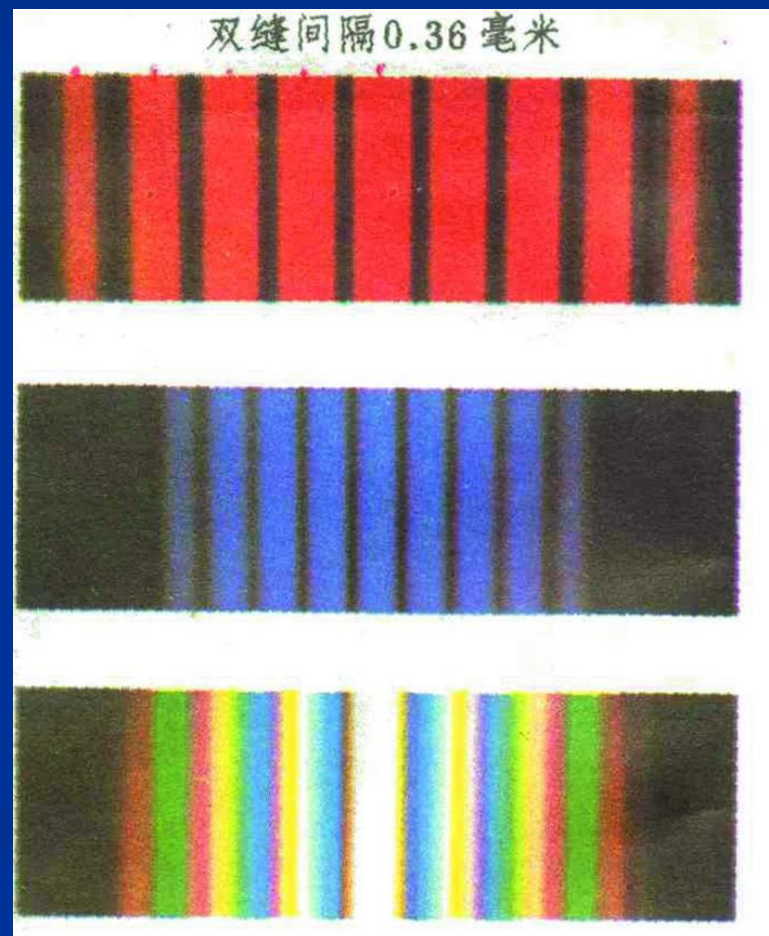
当 $\lambda$ 减小时， $\Delta x$ 减小，条纹变密。

•对于不同的光波，当

$$k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2$$

出现条纹的重叠。

- 若用复色光源，
- 则干涉条纹是彩色的。



5) 光强分布  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{xd}{D}$

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \Delta\varphi$$

当  $I_1 = I_2 = I_0$

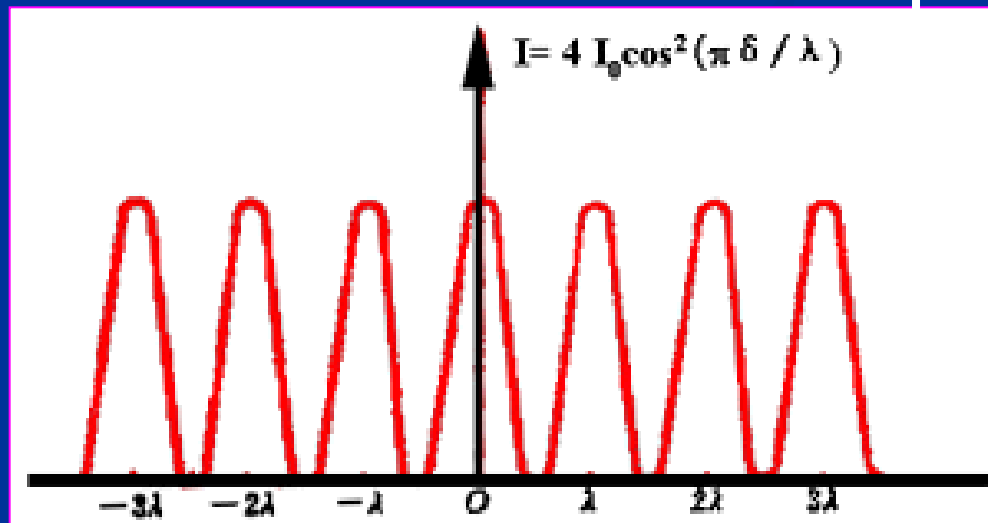
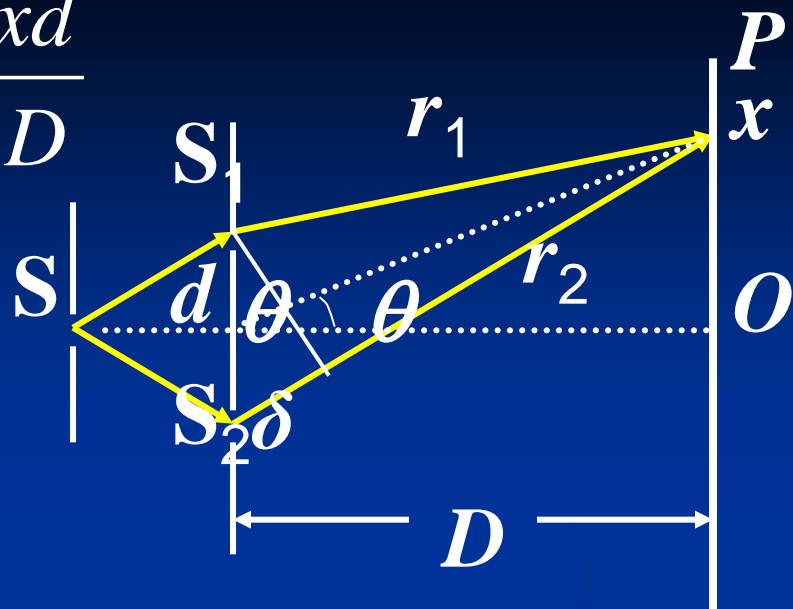
$$I = 2I_0(1 + \cos \Delta\varphi)$$

$$= 4I_0 \cos^2(\Delta\varphi/2)$$

$$= 4I_0 \cos^2(\pi\delta/\lambda)$$

$$I = I_{\max} = 4I_0 \quad \delta = \pm k\lambda$$

$$I = I_{\min} = 0 \quad \delta = \pm (2k-1)\lambda/2$$

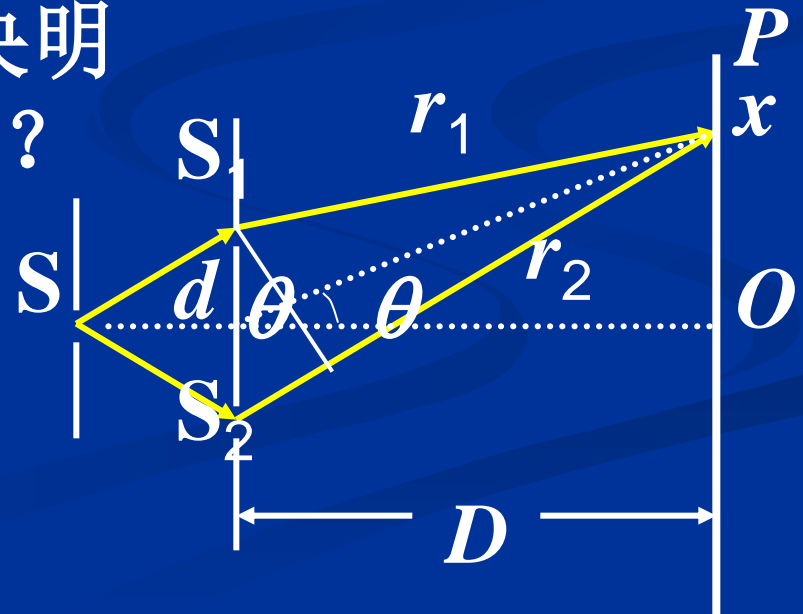


例15.1 在杨氏双缝实验装置中，光源波长  $\lambda = 6.4 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ，两狭缝间距  $d = 0.4 \text{ mm}$ ，光屏离狭缝距离  $D = 50 \text{ cm}$ ，试求：

(1) 光屏上第一明条纹中心和中央明纹中心之间的距离？

(2) 若P点离中央明条纹的中心距离  $x = 0.1 \text{ mm}$ ，问两光束在P点的相位差是多少？

(3) 求P点的光强和中央明条纹中心O点的强度之比？



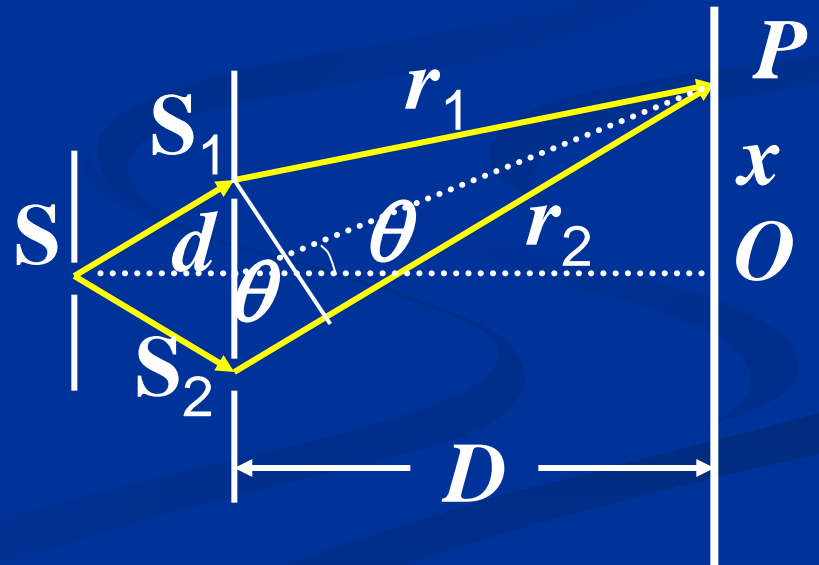
$$(1) \quad \Delta x = \frac{D}{d} \lambda = \frac{50}{0.04} \times 6.4 \times 10^{-5} = 8.0 \times 10^{-2} (cm)$$

$$(2) \quad \delta = \frac{x}{D} d = \frac{0.01}{50} \times 0.04 = 8 \times 10^{-6} (cm)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{6.4 \times 10^{-5}} \times 8 \times 10^{-6} = \frac{\pi}{4}$$

$$(3) \quad \frac{I_r}{I_0} = \frac{4I_1 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}{4I_1 \cos^2 \frac{\Delta\varphi_0}{2}}$$

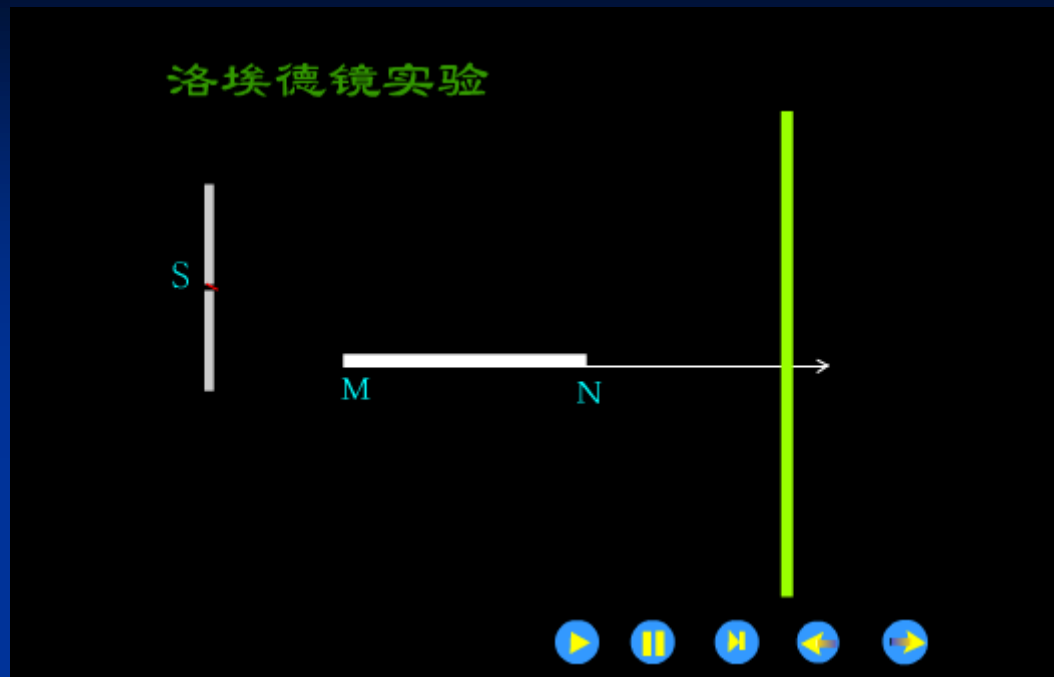
$$= \frac{\cos^2 \frac{\pi}{8}}{\cos^2 0} = 0.8356$$



## 2. 洛埃镜实验

### • 半波损失

现象：  $SN = S'N$   
N处观察到暗条纹  
反射光存在半波损失。



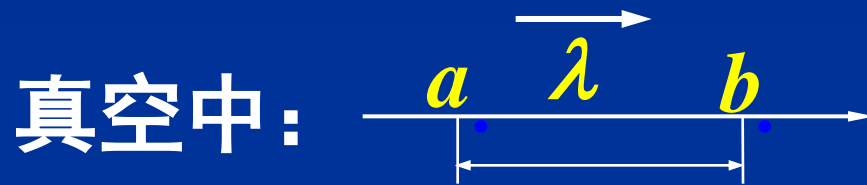
原因：光从光疏介质射向光密介质时  
反射光的相位发生了 $\pi$ 跃变  
反射光产生了 $\lambda/2$ 的附加光程差——“半波损失”



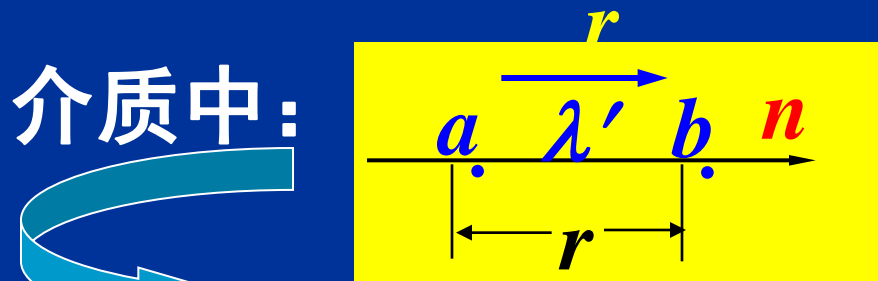
# 15.3 光程和光程差

## 一、光程

引入  $\lambda$  — 真空中波长

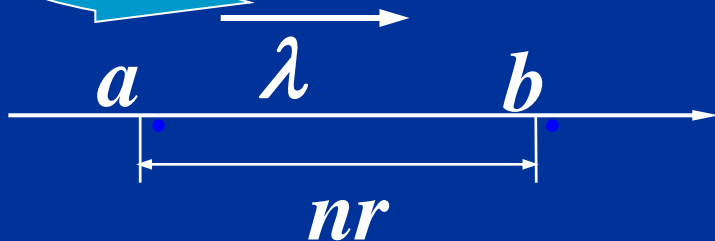


$$\Delta t = r/c \quad \Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} r$$



$\lambda'$  — 介质中波长

$$\Delta t = r/u = r/(c/n) = nr/c$$



$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda'} r$$

$$= \frac{2\pi}{(\lambda/n)} r = \frac{2\pi}{\lambda} (nr)$$

相同时间 $\Delta t$  { 光在介质中传播路程 $r$   
光在真空中传播路程 $nr$

**光程**—— $nr = \frac{c}{u} r = c\Delta t$

相同相位改变 $\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\pi(nr)/\lambda = 2\pi/\lambda'$

- 相同时间内光在介质中传播的距离折算成真空中的距离。

注意区别光程和光传播的几何路程，  
一般情况下光程大于光通过的几何路程。

## 2、光程差 $\delta$

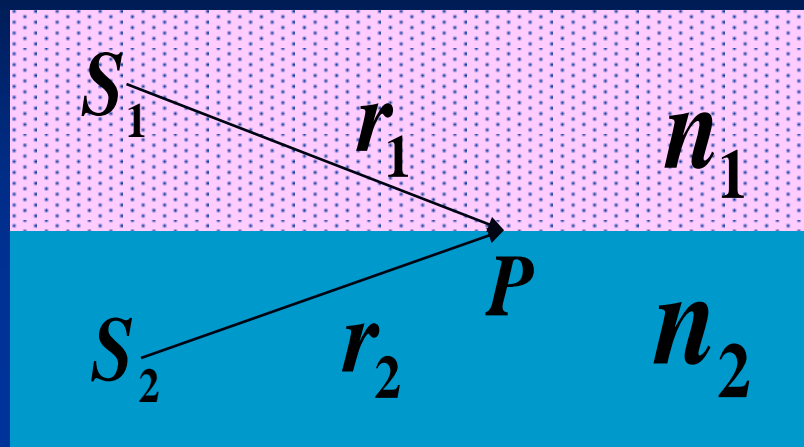
$$E_1 = E_{10} \cos 2\pi \left( \nu t - \frac{r_1}{\lambda_1} \right)$$

设 $S_1$ 、 $S_2$ 为两同相光源  
传到P点的相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi r_2}{\lambda_2} - \frac{2\pi r_1}{\lambda_1}$$

$$= \frac{2\pi r_2}{\lambda / n_2} - \frac{2\pi r_1}{\lambda / n_1} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 r_2 - n_1 r_1)$$

$$E_2 = E_{20} \cos 2\pi \left( \nu t - \frac{r_2}{\lambda_2} \right)$$



$$\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1 = \begin{cases} \pm k\lambda, k = 0, 1, 2, \dots, \text{明纹} \\ \pm (2k-1)\frac{\lambda}{2}, k = 1, 2, \dots, \text{暗纹} \end{cases}$$

$$\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1 = \begin{cases} \pm k\lambda, k = 0, 1, 2, \dots, \text{明纹} \\ \pm (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, k = 1, 2, \dots, \text{暗纹} \end{cases}$$

光程差  $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$

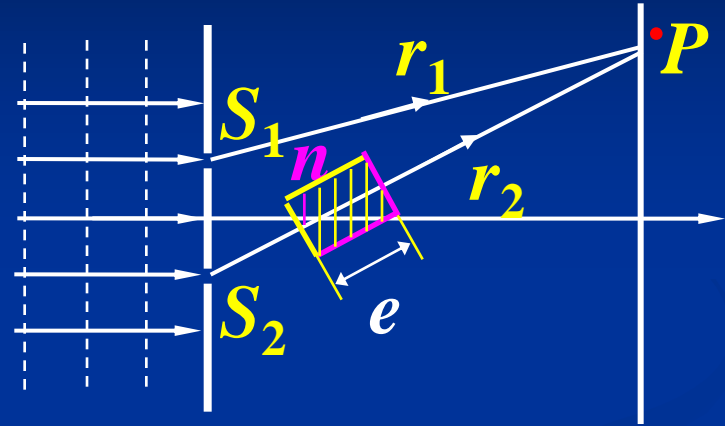
相位差用光程差表示为

$$\text{相位差} = \frac{\text{光程差}}{\lambda} \times 2\pi$$

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

$\lambda$ 为真空中的波长

**【例】** 计算图中光通过路程 $r_1$ 和 $r_2$ 在 $P$ 点的相位差。



$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} \{ [(r_2 - e) + ne] - r_1 \} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [(r_2 - r_1) + (n - 1)e]\end{aligned}$$

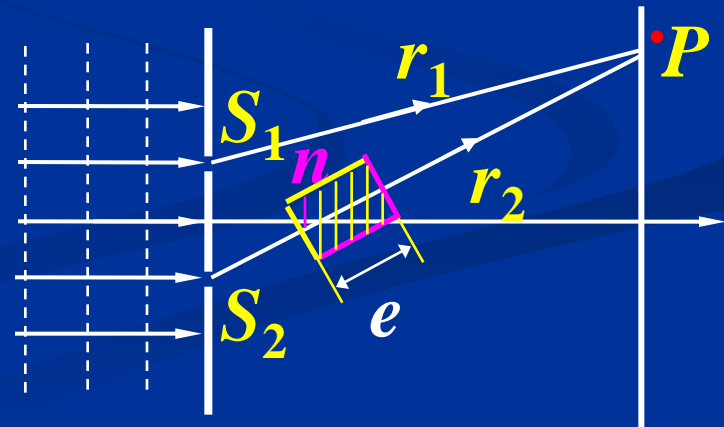
例:用很薄的云母片( $n=1.58$ )覆盖在双缝实验中的一条缝上, 这时屏幕上的零级明条纹移到原来的第七级明条纹的位置上, 若入射波长为550nm, 求此云母片的厚度。

$$\delta = r_2 - [r_1 - e + ne]$$

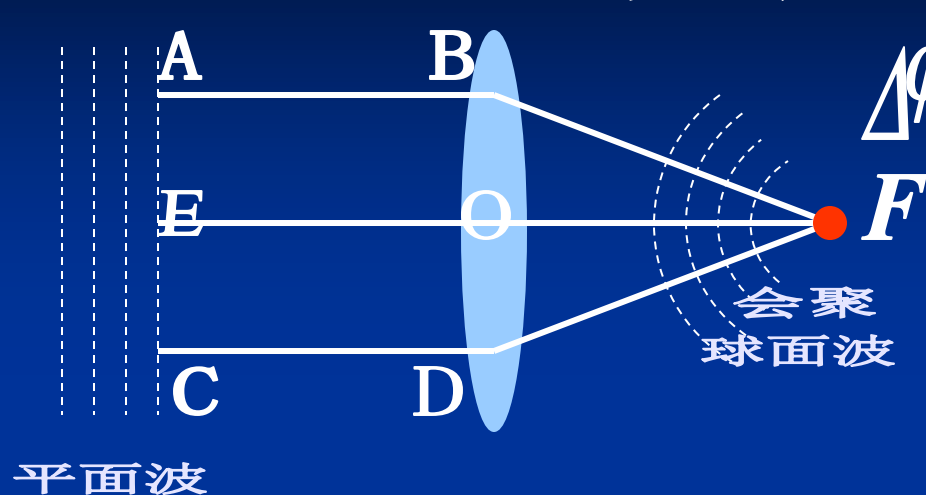
$$= r_2 - r_1 + (n - 1)e = 0$$

$$r_2 - r_1 = 7\lambda \quad (n-1)e = 7\lambda$$

$$e = \frac{7\lambda}{n-1} = 6638\text{nm}$$



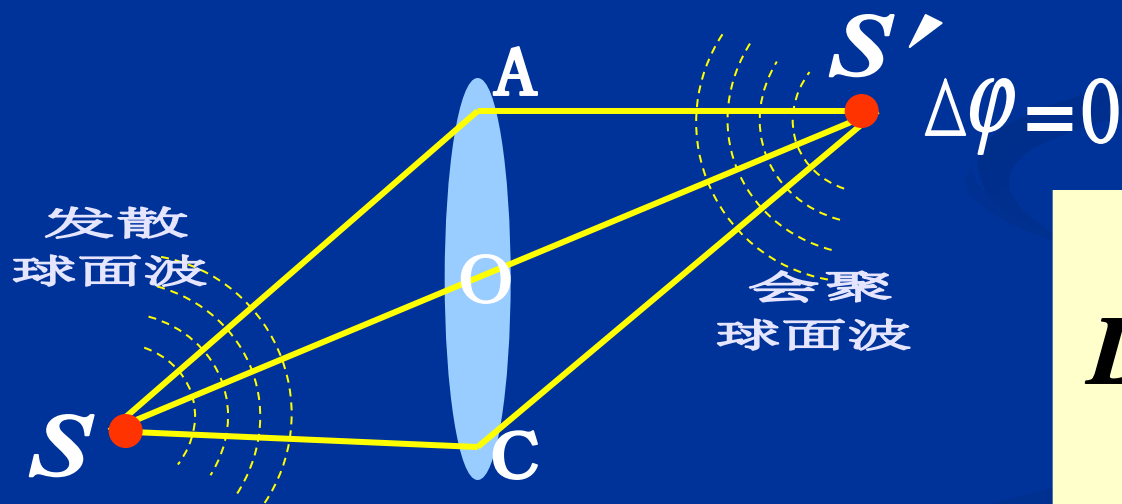
## 二、理想透镜不产生附加光程差



$$\delta = 0$$

即各路等光程

$$L_{ABF} = L_{EOF} \\ = L_{CDF}$$



$$\delta = 0$$

即各路等光程

$$L_{SAS'} = L_{SOS'} \\ = L_{SCS'}$$