

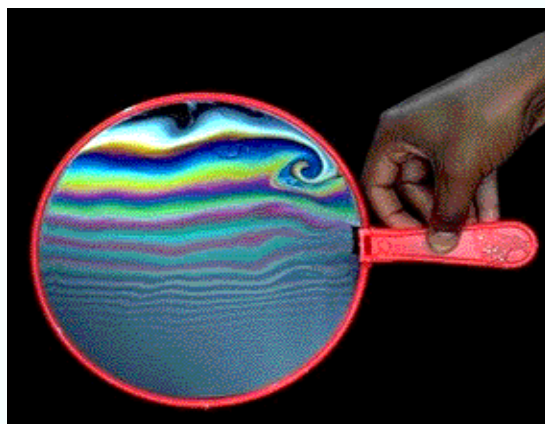
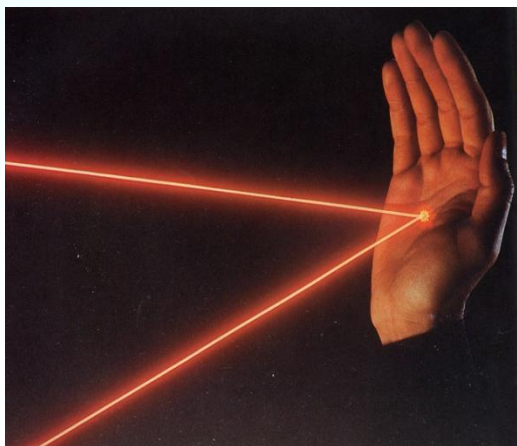
第12章 波动光学

Wave Optics

光学：研究光的本性、光的传播和光与物质相互作用等规律的学科。

光学

- 几何光学：**以光的**直线传播**为基础，研究光在透明介质中的传播规律。
- 波动光学：**以光的**波动性质**为基础，研究光的传播及规律。
- 量子光学：**以光的**粒子性**为基础，研究光与物质相互作用的规律。



光学发展史

一、几何光学时期

❖ 1621年荷兰科学家菲涅耳（W. snell, 1580~1626）从实验归纳出反射定律、折射定律，在此基础上诞生了几何光学。

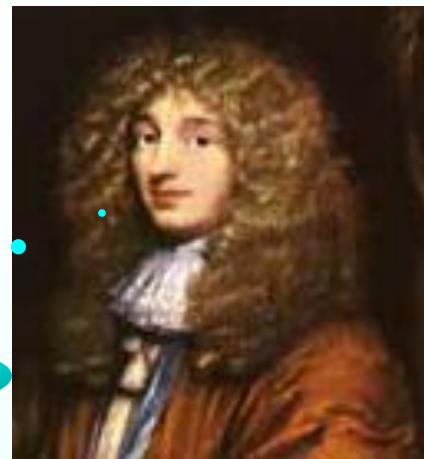
二、光的微粒说和波动说



牛顿(Newton)

光是一种粒子!

光是一种波!

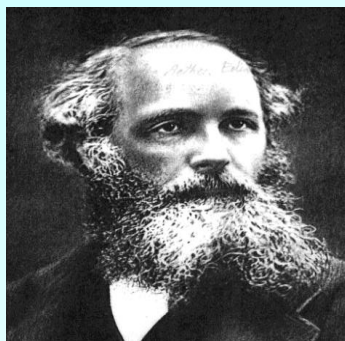


惠更斯(Huygens)

◆ 1668年英国科学家牛顿（Newton）提出光的微粒说。

◆ 1678年荷兰物理学家惠更斯（Huygens）提出光的波动说。

三、光的电磁学说



麦克斯韦
(Maxwell)

光是一种电磁波。

你的预言是对的！

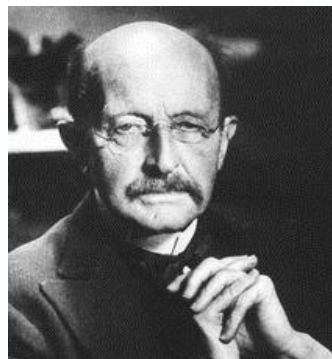


赫兹 (Hertz)

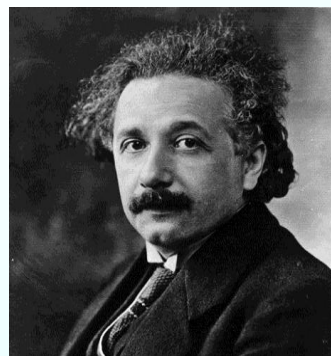
- ◆ 1860年，麦克斯韦总结出麦克斯韦方程组，得出电磁波在真空中传播的速度等于光速 c ，从而预言光是一种电磁波。
- ◆ 1888年赫兹用实验证实了麦克斯韦的预言。

四、量子光学时期

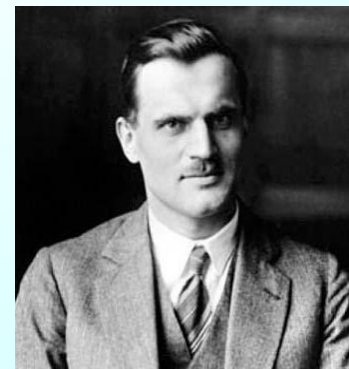
19世纪末到20世纪初：热辐射、光电效应和康普顿效应等，用经典电磁波理论都无法解释。



普朗克
(Planck)



爱因斯坦
(Einstein)



康普顿
(Compton)

黑体辐射、光电效应和康普顿效应： 光的粒子性
光的干涉、衍射、偏振： 光的波动性

光具有“波粒二相性”（Wave-particle duality）

实践是检验真理的唯一标准！

以后如何？天知，地知，我不知，你不知，让我们
耐心等待吧！

波动光学：光的干涉、衍射、偏振等。

重要的历史人物（波动光学）：

托马斯.扬(Thomas Young): 1773~1829, 英国物理学家, 医师, 主要贡献: (1) 光学----扬氏干涉实验, 向牛顿的微粒学说挑战; (2) 材料力学----扬氏模量; (3) 生理学-----眼对光的感受, 三色原理。

夫琅和费 (Toseph Von Fraunhofer): 1787~1826, 德国物理学家, 光学家, 天体分光学的创始人, 主要贡献: (1) 天体光谱观测; (2) 夫琅和费衍射实验; (3) 发明衍射光栅, 并刻出世界上第一块光栅。

菲涅尔 (Augustin Jean Fresnel): 1788~1827,

法国物理学家，数学家，发明家和工程师，主要贡献：

- (1) 菲涅尔衍射实验；
- (2) 惠更斯--菲涅尔原理；
- (3) 波动光学的主要创始人。

本章主要内容：

- **光的干涉**(Interference)；
- **光的衍射**(Diffraction of Light)；
- **光的偏振性**（横波 Polarization of Light ）。

Part One Interference of Light

第一部分 光的干涉

§ 1 The Coherence of Light

光的 相干性

§ 2 Two Beams Interference

双缝干涉

§ 3 Optic Path & Optic Path Difference

光程与光程差

§ 4 Interference by Division of Amplitude

薄膜干涉

§ 5 Michelson' Interferometer

麦克耳孙干涉仪

Part Two Diffraction of Light

第二部分 光的衍射

**§ 6 Diffraction of Light Huygens-Fresnel's
Principle 光的衍射现象 惠更斯—菲涅耳原理**

**§ 7 Diffraction from Single Slit
单缝的夫琅和费衍射**

§ 8 Diffraction Grating 光栅衍射

**§ 9 Resolving Power of Optical Instrument
光学仪器的分辨本领（自学）**

§ 10 x-ray Diffraction 射线的衍射（自学）

Part Three Polarization of Light

第三部分 光的偏振

§ 11 Nature Light & Polarized Light

自然光和偏振光

Polarization of Light Law of Malus

起偏和检偏 马吕斯定律

§ 12 Polarization by Reflection

反射和折射时光的偏振

§ 13 Double Reflection 光的双折射（自学）

§ 14 Optic Strese Analysis（自学）

教学要求

一、光的干涉

- 1、掌握相干光的条件，获得相干光的方法；
- 2、掌握光程、光程差和干涉条纹的条件；
- 3、理解半波损失的产生，掌握薄膜干涉条纹的主要规律及其应用；
- 4、了解迈克耳逊干涉仪的构造和原理。

教学要求

二、光的衍射

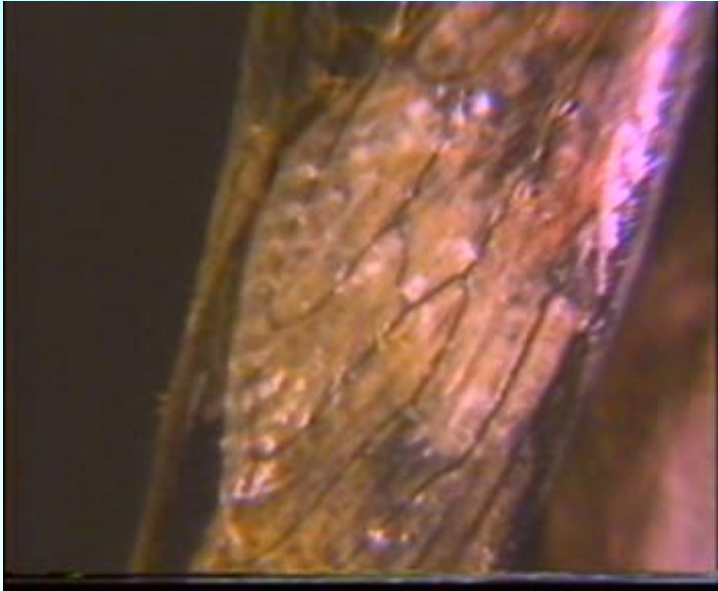
- 1、理解惠更斯 - 菲涅耳原理的涵义及它对光衍射现象的定性解释；
- 2、会用半波带法分析单缝的夫琅禾费衍射图样；
- 3、掌握光栅公式的应用；
- 4、了解衍射对光学仪器分辨率的影响；
- 5、了解X光的衍射现象，理解布喇格公式的物理意义。

教学要求

三、光的偏振

- 1、掌握自然光与偏振光的区别；
- 2、知道产生偏振光的几种方法，掌握布儒斯特定律和马吕斯定律；
- 3、了解双折射现象及所产生的偏振光。

蝉翅在阳光下



蜻蜓翅膀在阳光下



白光下的油膜



白光下的肥皂膜

杨氏双缝干涉 Interference by Double-Slits



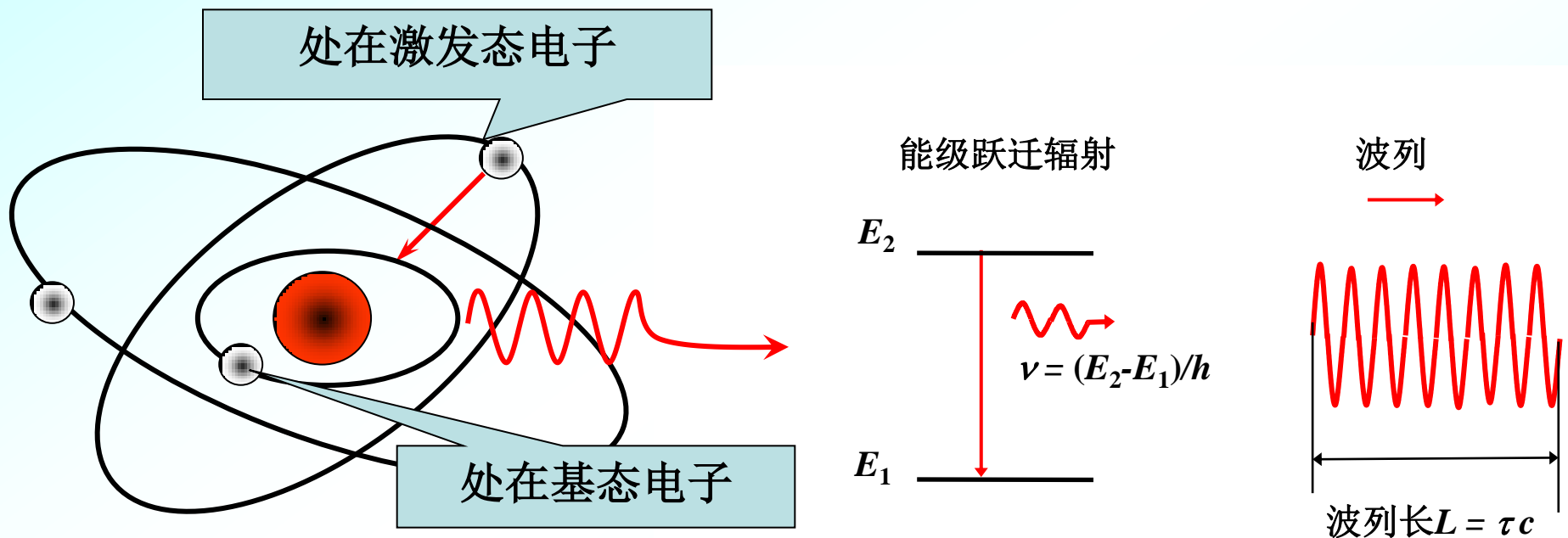
一、光源发光机理（非激光光源）

普通光源：电灯、手电筒、煤油灯等发出来的光，没有干涉现象发生，为什么？



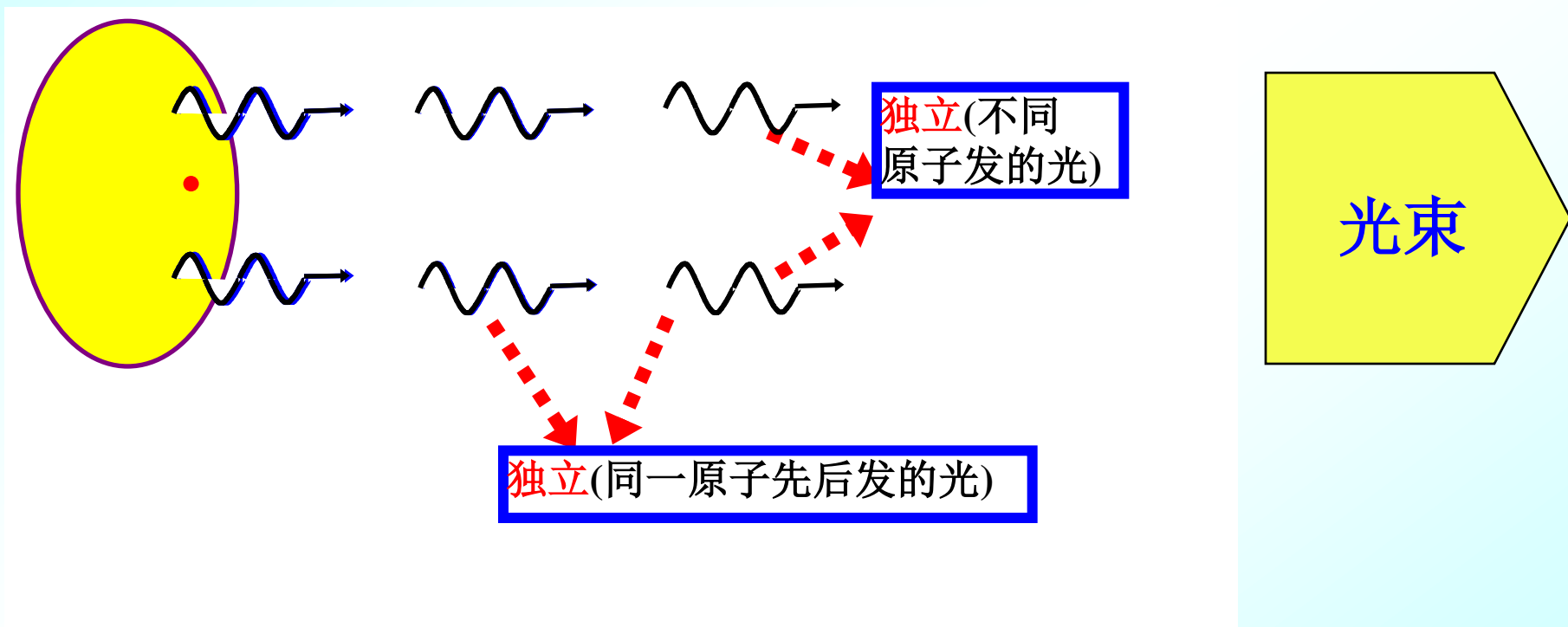
因为它们不是相干波源，发射的光波不是相干波，所以普通光相遇，没有干涉现象发生。

(1) 单个激发态原子一次发射的光波是一段频率一定、振动方向一定、有限长的光波（通常称为光波列）；



(2) 一个原子不同时间发光的频率、振动方向不同，在相位上没有固定关系；

(3) 光源所有的原子发光时间不同，不同原子发光的频率、振动方向都是随机的，在相位上更没有固定关系。



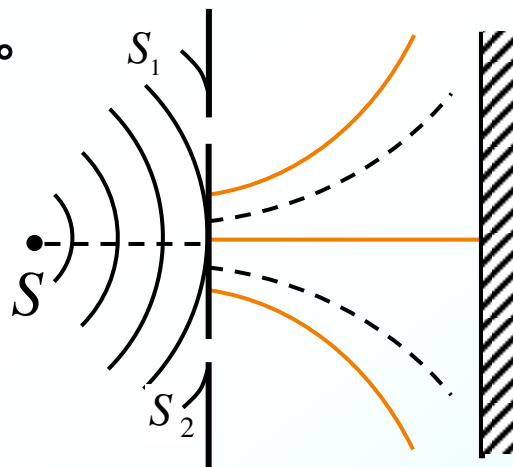
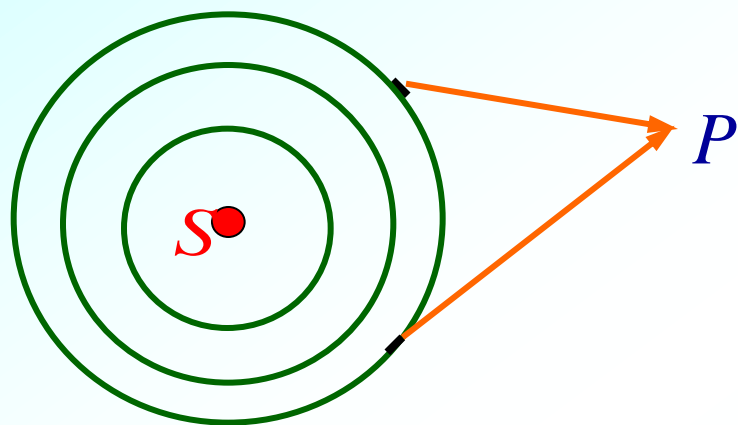
因此：这样的原子（分子）集体发射的光线，为一束包含‘多成分’的光。为非相干光源。

二、光的相干性

如何实现普通光源下光的干涉呢？

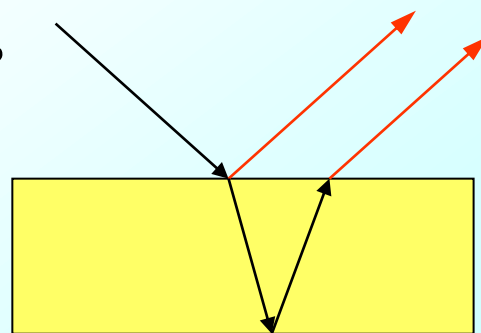
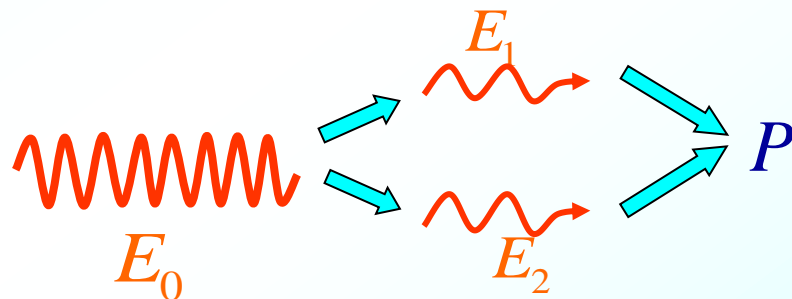
1. 相干光的获得：

- **分波阵面法：**在光源发出的某一波阵面上，取出两部分面元作为相干光源。



(杨氏实验)

- **分振幅法：**利用反射、折射把某振幅分成两部分，再使它们相遇从而产生干涉现象。



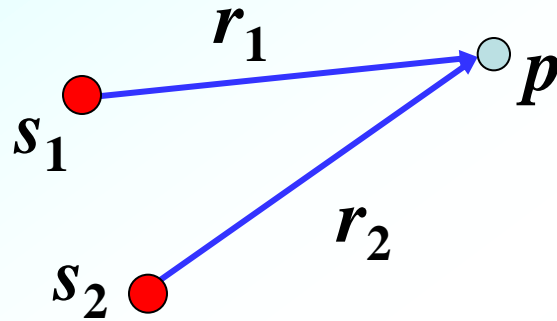
(薄膜干涉)

2. 相干叠加

P 点的光矢量的振幅为:

$$E_P = \sqrt{E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos \Delta\varphi}$$

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



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

➤干涉加强(明纹) $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)

$$I = I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \xrightarrow{I_1 = I_2} I = 4I_1$$

➤干涉减弱(暗纹) $\Delta\varphi = \pm(2k + 1)\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)

$$I = I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \xrightarrow{I_1 = I_2} I = 0$$

3. 非相干叠加

P 点光强: $I = I_1 + I_2 \longrightarrow$ 无干涉现象

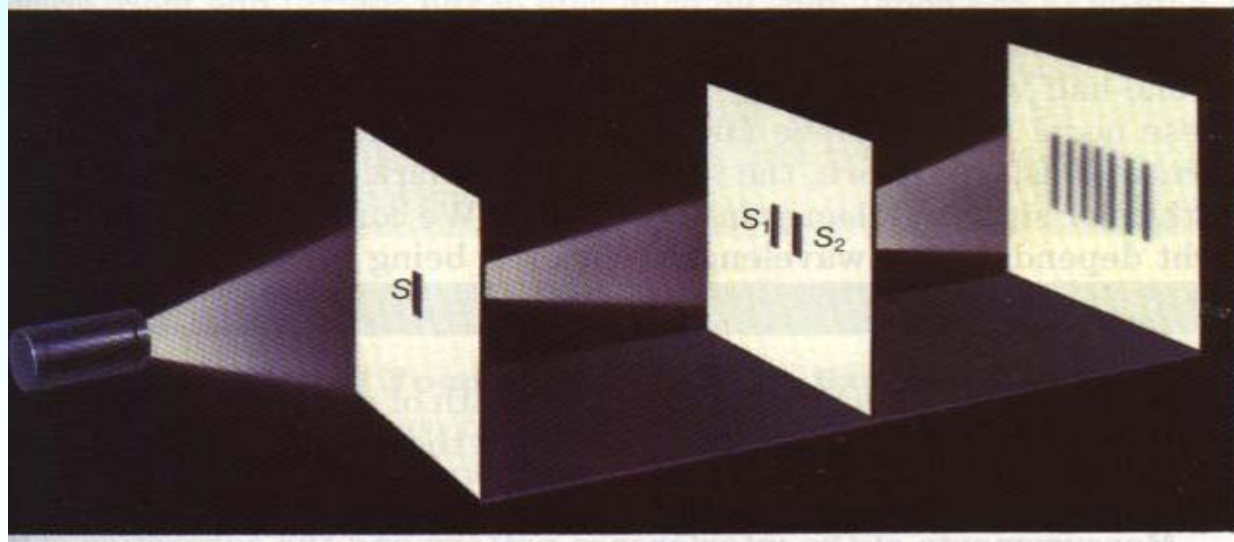
三、杨氏双缝干涉实验 (1801年) Young's Double-Slits

1. 实验现象interference pattern



Thomas Young (1773
—1829)

英国物理学家、医生和考古学家，光的波动说的奠基人之一。

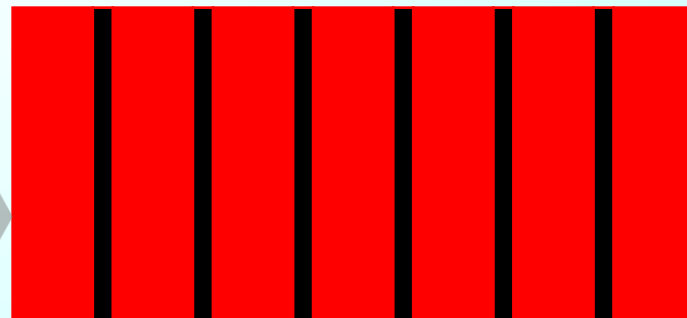


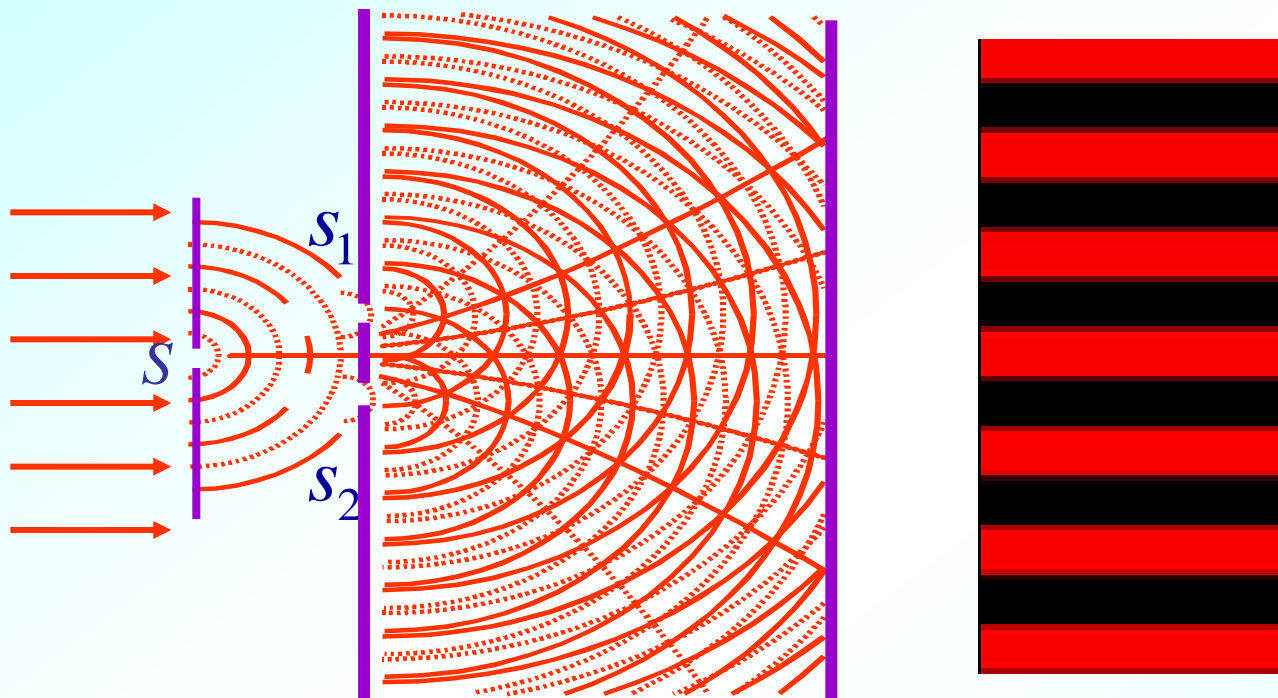
S : 点光源或线光源

S_1 和 S_2 : 点或狭缝,次级子波为相干波。

干涉图样: (S 、 S_1 and S_2 是线光源)

与缝平行的明 (bright) 暗(dark)
相间的条纹(fringes)





- (1) S 、 S_1 、 S_2 的宽度，约在 10^{-2} mm 数量级；
- (2) S_1 和 S_2 间距较小，约为 1 mm ；而且与 S 的等距离；
- (3) 光屏 M 与双缝 S_1 、 S_2 间距较大，约为 1 m 。

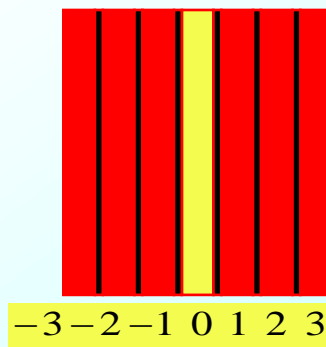
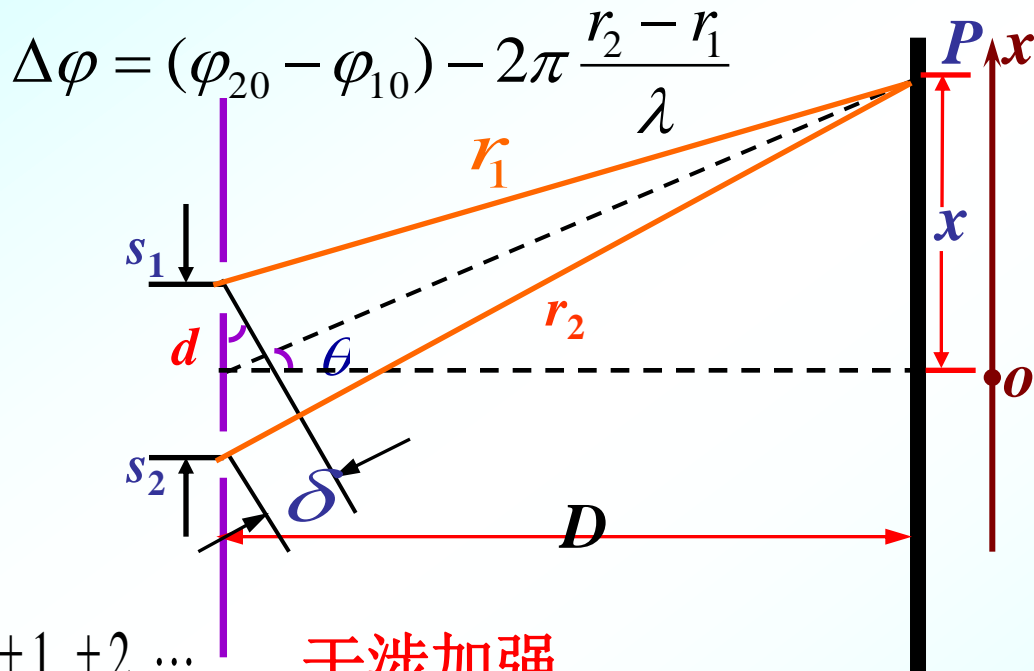
2. 双缝干涉的波程差

$$\because d \ll D, x \ll D$$

$$\therefore \delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta$$

$$\approx d \tan \theta \approx d \frac{x}{D}$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{xd}{D} = k\lambda & k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad \text{干涉加强} \\ \delta = \frac{xd}{D} = (2k-1)\frac{\lambda}{2} & k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad \text{干涉减弱} \end{cases}$$



3. 干涉条纹的位置 (Locations of the fringes)

(1) 明条纹: $x = k \frac{D\lambda}{d} \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

(2) 暗条纹: $x = (2k-1) \frac{D\lambda}{2d} \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad k: \text{条纹的级数}$

屏幕中央: $x=0 \longrightarrow$ **中央明纹 ($k=0$)**

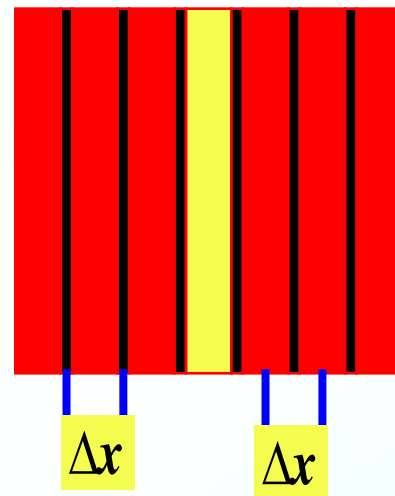
4.干涉条纹的特点

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

条纹间距：相邻明纹中心或相邻暗纹中心的距离。

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

关于中央明条纹对称的一组明暗相间彼此等间距的直条纹。



5. 讨论

- (1) Δx 正比 λ, D ; 反比 d 。
- (2) 已知 d, D 及 Δx , 可测 λ 。
- (3) 当用白光作为光源时:



在零级白色中央条纹两边对称地排列着彩色条纹。

6. 杨氏双缝干涉的应用

(1) 测量波长； (2) 测量薄膜的厚度和折射率。

例1. 杨氏双缝的间距为0.2 mm，距离屏幕为1m。

1. 若第一到同侧第四明纹距离为7.5mm，求入射光波长。

2. 若入射光的波长为600 nm，求相邻两明纹的间距。

解：
$$x = \pm k \frac{D}{d} \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\Delta x_{1,4} = x_4 - x_1 = (k_4 - k_1) \frac{D}{d} \lambda$$

$$\lambda = \frac{d}{D} \cdot \frac{\Delta x_{1,4}}{k_4 - k_1} = \frac{0.2 \times 10^{-3}}{1} \frac{7.5 \times 10^{-3}}{4 - 1} = 5 \times 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$$

$$\Delta x = \frac{D}{d} \lambda = \frac{1 \times 6 \times 10^{-7}}{0.2 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^{-3} \text{ m} = 3 \text{ mm}$$

四、光程与光程差 Optical Path and Optical path Difference

1、光程

两列相干光波在同一种介质中传播时由于传播路程的不同引起的相位差为：
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(r_1 - r_2)}{\lambda}$$

光在不同介质中传播时，如何计算相位差 $\Delta\varphi$ 呢？

频率为 ν 的单色光在真空中传播速度为 c ，波长为 λ ；

在介质 n 中，波速为 $v = c/n$ ，波长为： $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$

改变相位：
$$\frac{2\pi r}{\lambda_n} = \frac{2\pi n r}{\lambda}$$

光程：光在介质中传播的几何路程 r 与该介质折射率 n 的乘积 nr 。

物理意义：光在介质中经过的路程折算到同一时间内在真空中经过的路程。

初相相同的相干光：

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = \begin{cases} 2k\pi & \text{干涉加强} \\ (2k-1)\pi & \text{干涉减弱} \end{cases}$$

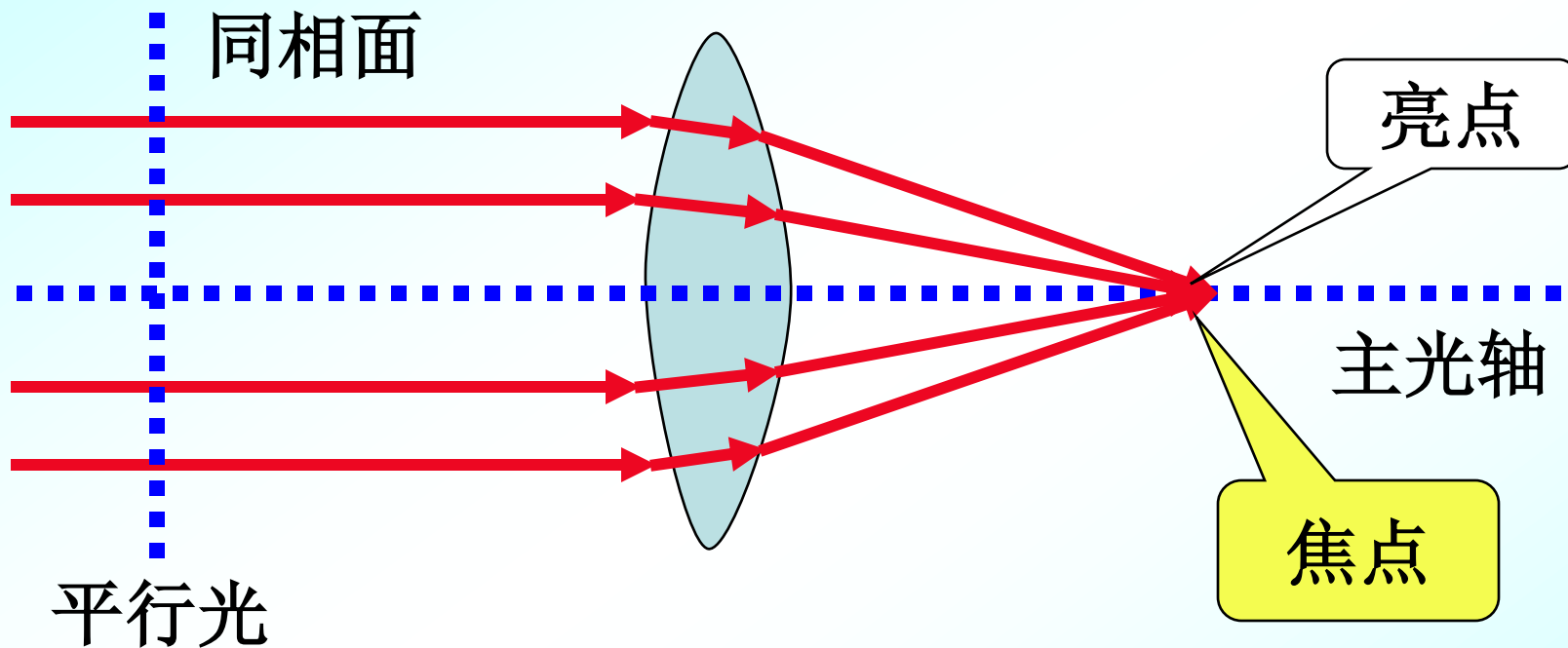
$$\rightarrow \begin{cases} \delta = k\lambda & k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad \text{干涉加强} \\ \delta = (2k-1)\frac{\lambda}{2} & k = \pm 1, \pm 2 \dots \quad \text{干涉减弱} \end{cases}$$

其中： $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$ 是光程差。 λ 是真空中波长。

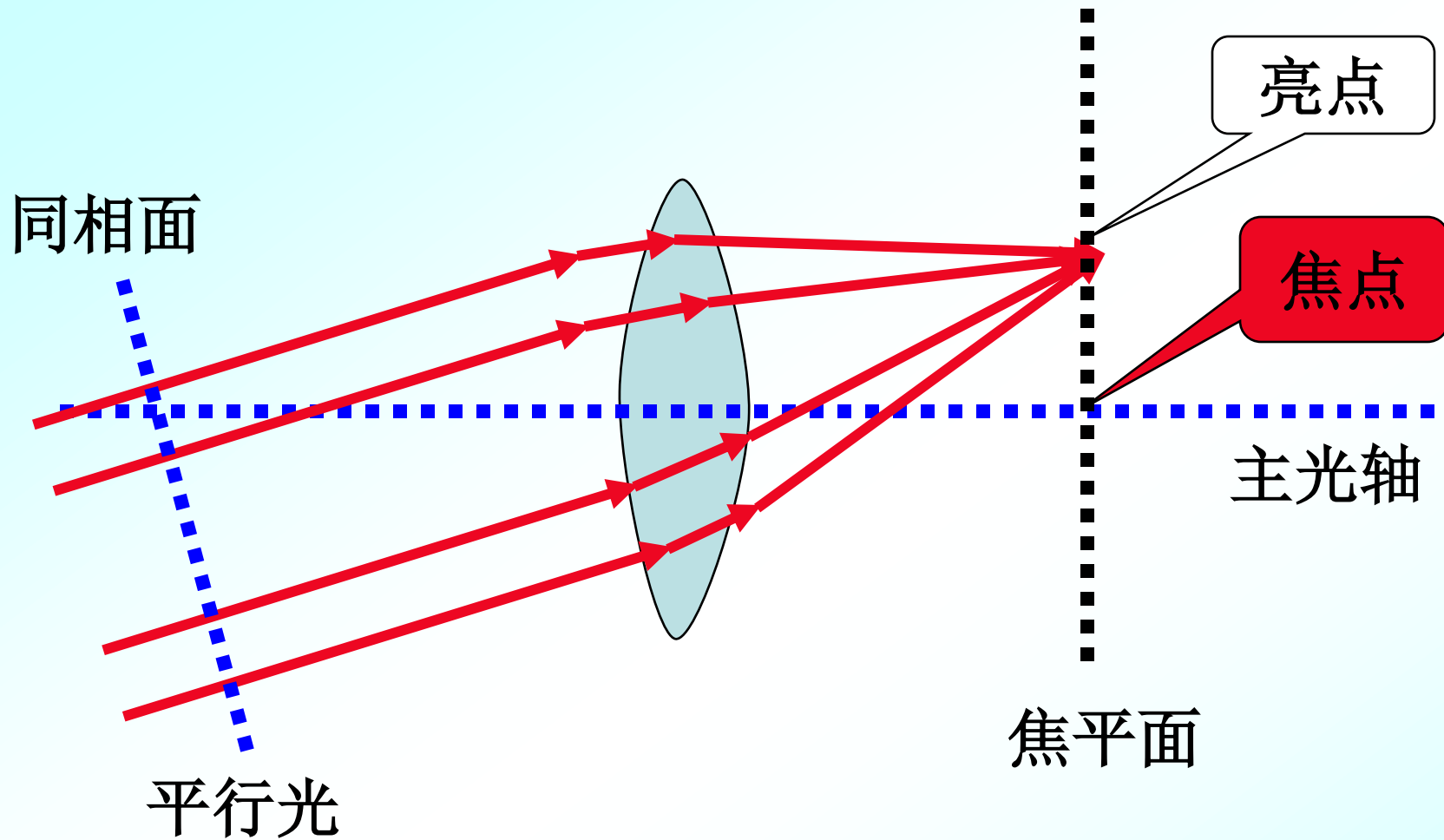
可见，当两列相干光波在不同媒质中传播时，对干涉起决定作用的不是两光波的几何路程之差，而是它们的光程差。

2.等光程差: Property of Thin Lens

理论和实验表明：使用透镜不会引起附加的光程差！



平行光线通过薄透镜，并不因为有透镜的存在而带来附加光程差。



不带来附加光程差!!!

例2、用折射率 $n = 1.58$ 的很薄的云母片覆盖在双缝实验中的一条缝上，这时屏上的第七级亮条纹移到原来的零级亮条纹的位置上。如果入射光波长为 550 nm 。

求：此云母片的厚度是多少？

解：设云母片厚度为 d 。

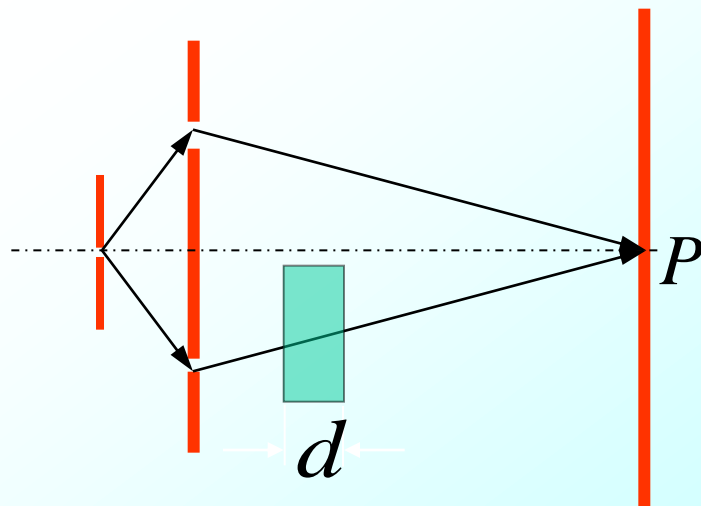
无云母片时，零级亮纹在屏上 P 点，加上云母片后，到达 P 点的两光束的光程差为

$$\delta = (n - 1)d$$

当 P 点为第七级明纹位置时

$$\delta = 7\lambda$$

$$d = \frac{7\lambda}{n - 1} = \frac{7 \times 550 \times 10^{-6}}{1.58 - 1} = 6.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$$



机械波的干涉

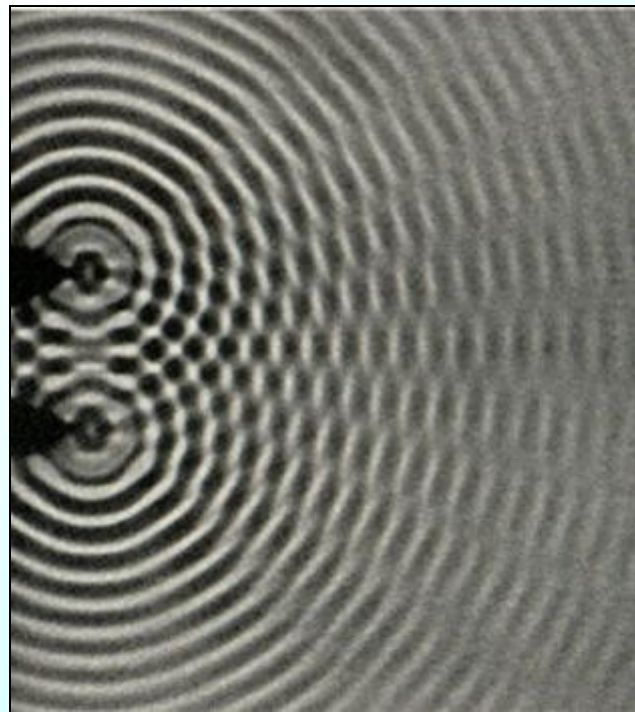
一般情况下，几列波在介质中相遇时，相遇区域内各处质点的合振动是很复杂的和不稳定的。

1、干涉现象

干涉：两列波在空间相遇（叠加），以致在空间的某些地方振动**始终**加强，而在空间的另一些地方振动**始终**减弱或完全消失的现象。

干涉条件：

- 频率相同；
- 振动方向相同。
- 相位差恒定；



波源振动表达式:

$$S_1: y_1 = A_{10} \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$S_2: y_2 = A_{20} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

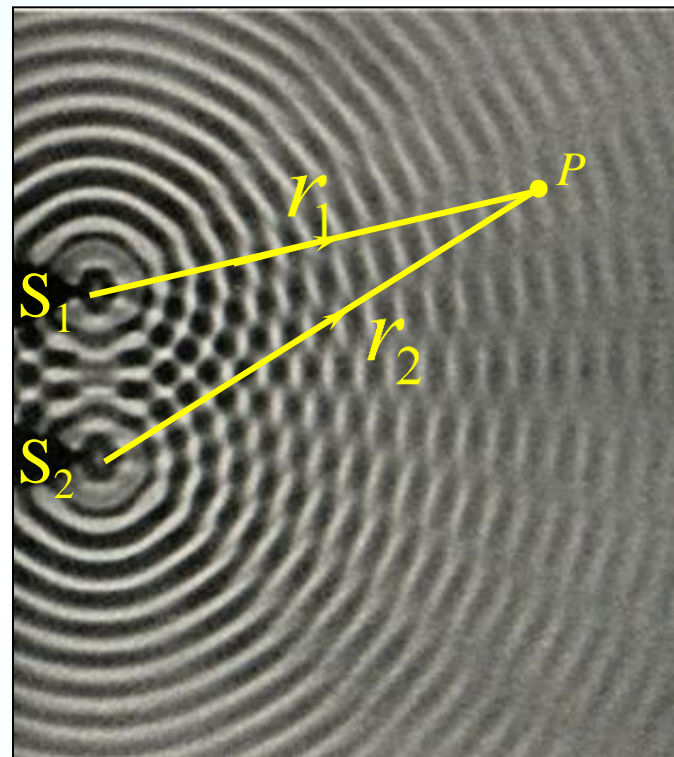
P 点振动表达式:

$$y_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda})$$

$$y_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda})$$

P 点的合振动表达式:

$$y_P = y_{1P} + y_{2P} = A \cos(\omega t + \varphi)$$



$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos[\varphi_2 - \varphi_1 - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)]}$$

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) + A_2 \sin(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda})}{A_1 \cos(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) + A_2 \sin(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda})}$$

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

- **干涉现象** 各点振幅稳定
- **相干条件** $\left\{ \begin{array}{l} \text{频率相同;} \\ \text{振动方向相同。} \\ \text{相位差恒定;} \end{array} \right.$
- **相干波** 能产生干涉现象的波。

2、干涉加强和减弱条件

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi}$$

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

干涉相长与干涉相消的条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) = 2k\pi \quad A = A_1 + A_2 \quad \text{干涉相长} \\ (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) = (2k + 1)\pi \quad A = |A_1 - A_2| \quad \text{干涉相消} \end{array} \right.$$

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

若 $\varphi_{10} = \varphi_{20}$ ，上式简化为波程差 δ

$$\delta = r_2 - r_1 = \begin{cases} k\lambda & \text{干涉相长} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{干涉相消} \end{cases}$$

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

