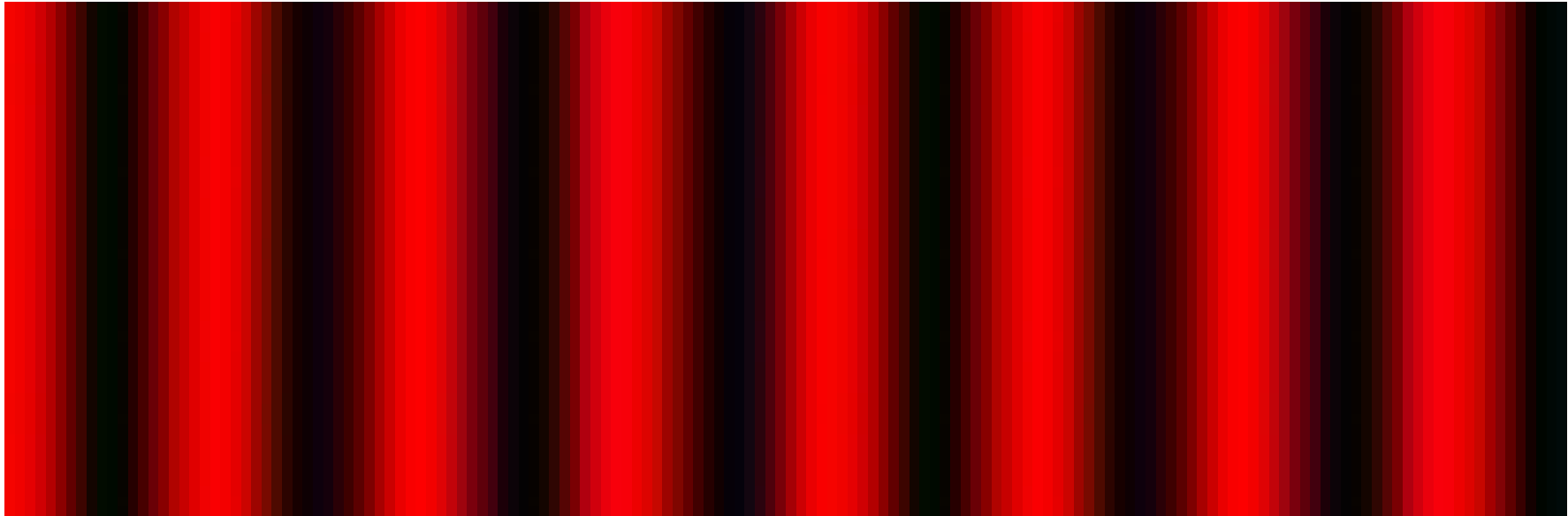


第十二章 光的干涉



§ 12—1 光波的干涉条件

一、干涉现象

1、什么是干涉现象



2、干涉现象的研究

托马斯·杨(Thomas Young) (1802) 杨氏实验



菲涅尔(A.Fresnel)

范西特 (P.H.Van cittert), 泽尼克 (F.Zenike)

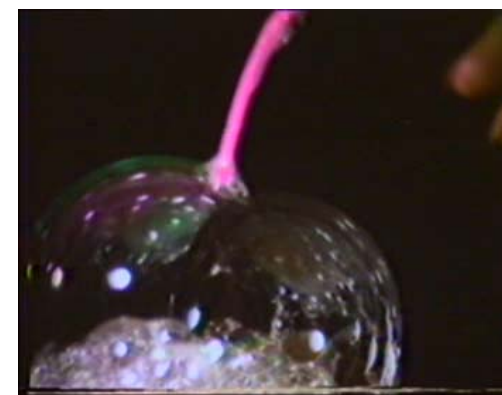
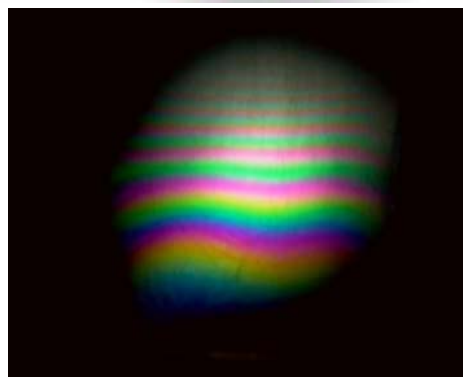
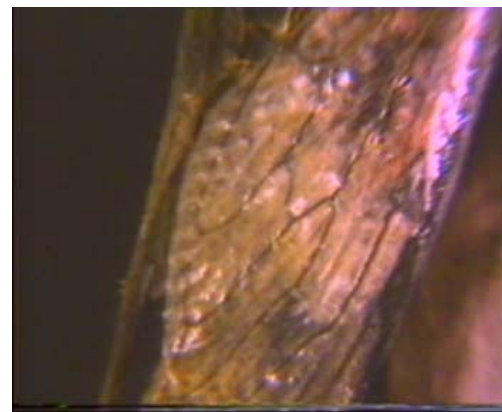
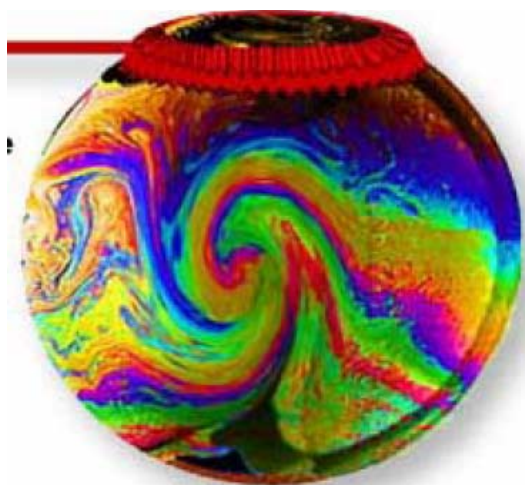
本世纪三十年代

3、干涉现象的应用



干涉现象

在两束（或多束）光相遇的区域内，各点的光强可能不同于各光波单独作用所产生的光强之和，形成稳定的明暗交替或彩色条纹的现象，称为光的干涉。





杨, T.

托马斯.杨简介

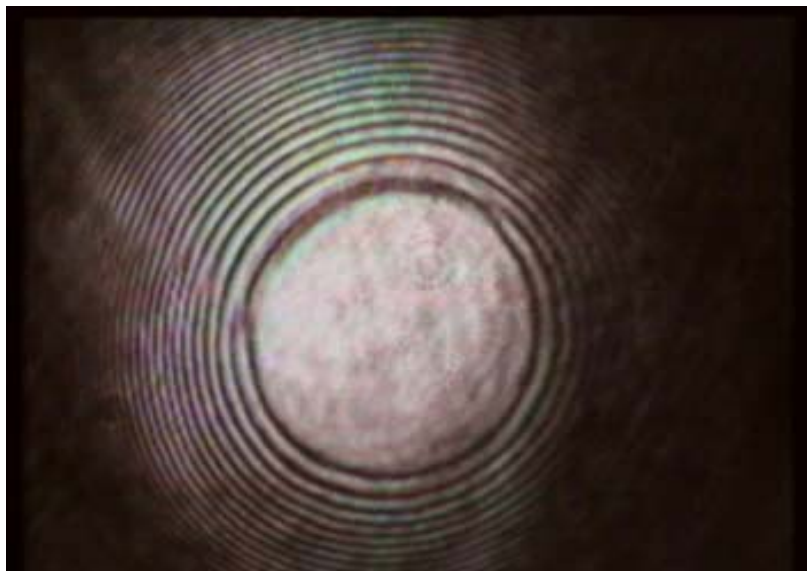
英国物理学家，考古学家，医生。光的波动说的奠基人之一。1773年6月13日生于米尔费顿，曾在伦敦大学、爱丁堡大学和格丁根大学学习，伦敦皇家学会会员，巴黎科学院院士。1829年5月10日在伦敦逝世。

杨自幼天资过人，14岁就通晓拉丁、希腊、法、意、阿拉伯等多种语言。开始时学习医学，后来酷爱物理学，特别是光学和声学，一生在物理、化学、生物、医学、天文、哲学、语言、考古等广泛的领域做了大量的工作，但在科学史上他以作为物理学家而最著名。杨在行医时就开始研究感官的知觉作用，1793年写了第一篇关于视觉的论文，发现了眼睛中晶状体的聚焦作用，1801年发现眼睛散光的原因，由此进入光学的研究领域。他怀疑光的微粒说的正确性，进行了著名的杨氏双孔及双缝干涉实验，首次引入干涉概念论证了光的波动说，又利用波动说解释了牛顿环的成因及薄膜的彩色。他第一个测定了7种颜色光的波长。1817年，他得知A. J. 菲涅尔和D. F. J. 阿拉果关于偏振光的干涉实验后，提出光是横波。

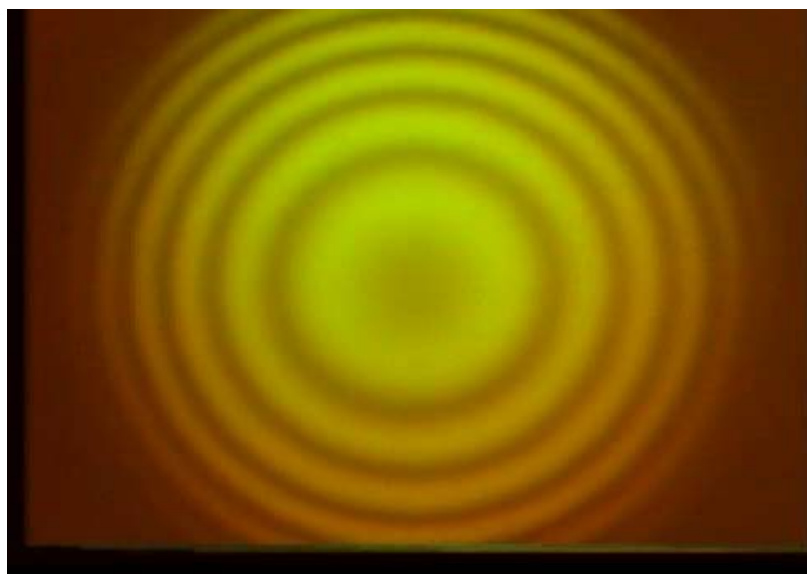
杨说：“**尽管我仰慕牛顿的大名，但我并非因此认为他是百无一失的。我遗憾地看到他也会弄错，而他的权威也许有时甚至阻碍了科学的进步。**”



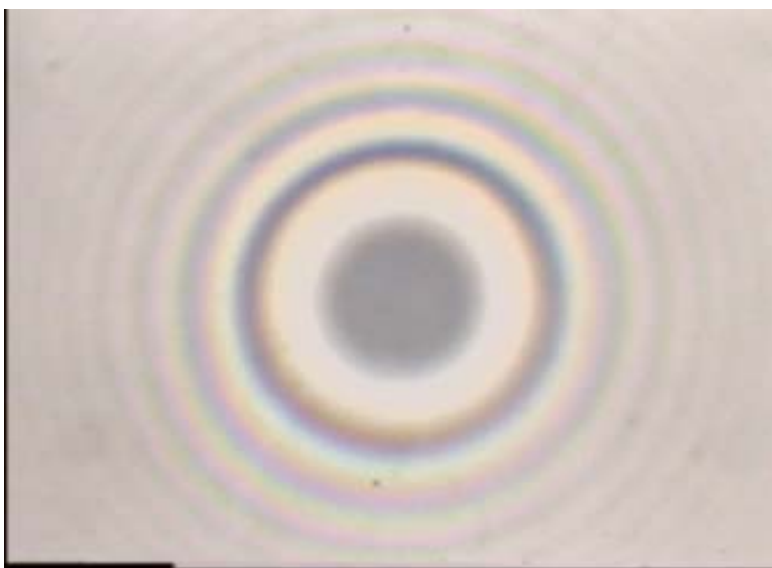
测油膜厚度



平晶间空气隙干涉条纹



等倾条纹



牛顿环(等厚条纹)

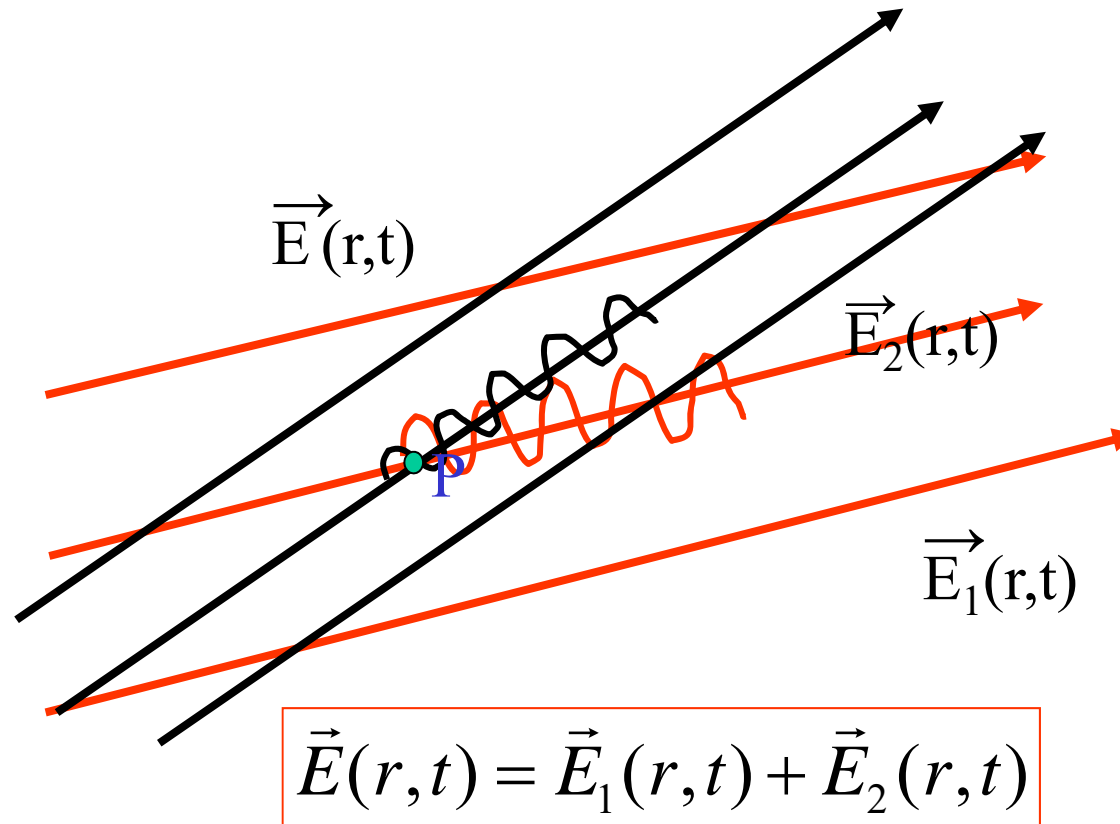
光的干涉现象产生的原因

波的独立传播原理



波的叠加原理

光波的独立传播原理



波的独立传播原理： 当两列波或多列波在同一波场中传播时，每一列波的传播方式都**不因**其他波的存在而受到影响

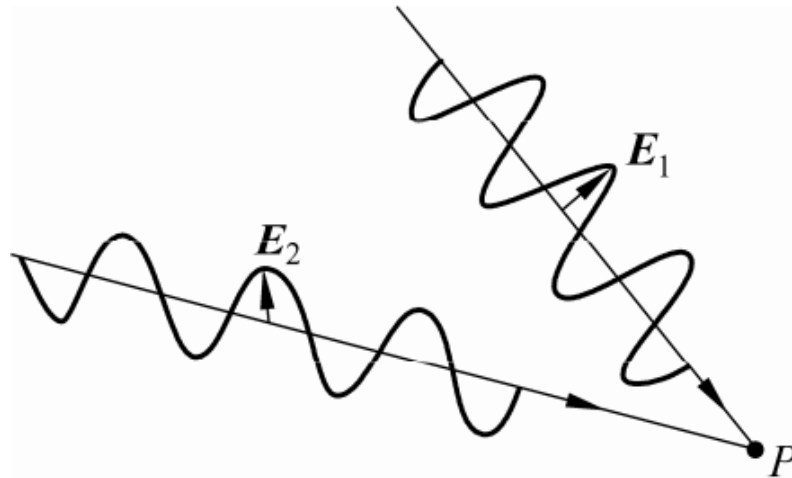
光波的叠加原理

波的叠加原理：在两列或多列波의交叠区域，波场中某点的振动等于各个波单独存在时在该点所产生的振动之和。

- 实际的光场是许多个简谐波的叠加

$$\vec{E}(r,t) = \vec{E}_1(r,t) + \vec{E}_2(r,t) + \dots \quad \text{矢量波叠加}$$

- 叠加结果为光波**振幅的矢量和**，而非强度和



二、干涉条件

两个振动 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 叠加后的光强为:

$$I = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)$$

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) dt = \langle (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \rangle$$

$$= \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_1 \rangle + \langle \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle + 2\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle$$

$$= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_{12}$$

\bar{I}_{12} 称为干涉项, 它决定了叠加光强的强弱。

\bar{I}_{12} 的存在表明, 叠加的光强 \bar{I} 不再是 \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 的简单和。
只有当 $\bar{I}_{12} \neq 0$, 且稳定时, 才能产生干涉现象。

(1) 非相干叠加: $\bar{I}_{12} \equiv 0$

$$I(r) = I_1(r) + I_2(r)$$

(2) 相干叠加 $\bar{I}_{12} \neq 0$

$$I(r) = I_1(r) + I_2(r) + \bar{I}_{12}$$

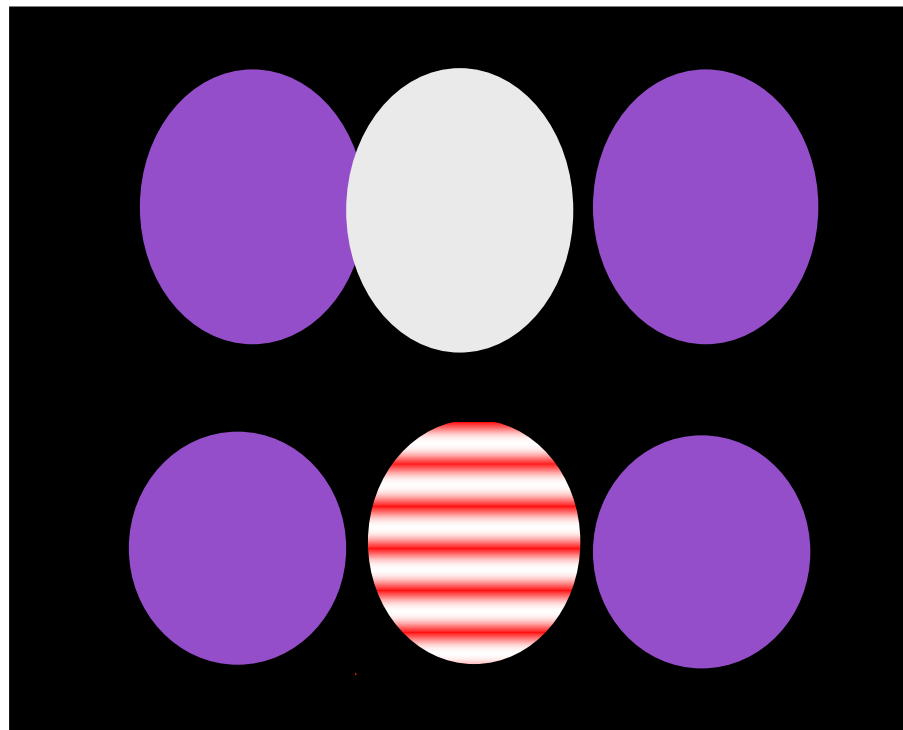
$$I(r) \neq I_1(r) + I_2(r)$$

叠加出现了干涉

关心的问题: 相干叠加条件?

干涉项 — 不为零的稳定贡献

$$\bar{I}_{12}(r) = 2I_1(r) \cdot I_2(r) \cos \delta(r)$$



设 $E_1 = A_1 \cos(\mathbf{k}_1 \bullet \mathbf{r}_1 - \omega_1 t + \delta_1),$

$E_2 = A_2 \cos(\mathbf{k}_2 \bullet \mathbf{r}_2 - \omega_2 t + \delta_2)$

则 $\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_{12}$

$= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + A_1 \bullet A_2 \langle \cos \delta \rangle$

其中 $\delta = [(\mathbf{k}_1 \bullet \mathbf{r}_1 - \mathbf{k}_2 \bullet \mathbf{r}_2) + (\delta_1 - \delta_2) - (\omega_1 - \omega_2)t]$

干涉项 I_{12} 与两个光波的振动方向(A_1, A_2)和位相 δ 有关。

$\langle \cos \delta \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos \delta d\tau = 0$ 不发生干涉现象

$= \cos \delta$ 位相差固定不变, 发生干涉现象

干涉条件（必要条件）：

(1) 频率相同， $\omega_1 - \omega_2 = 0$;

(2) 振动方向相同， $A_1 \bullet A_2 = A_1 A_2$ 振幅相差不悬殊

(3) 位相差恒定， $\delta_1 - \delta_2 = \text{常数}$

注意：干涉的光强分布只与光程差 $\mathbf{k} \bullet (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$ 有关

补充条件：叠加光波的光程差不超过波列的长度 

相干光波和相干光源 满足干涉条件的光波，叫相干光波；

其光源称为相干光源。

将一个光波分离成两个相干光波方法：

分波前法

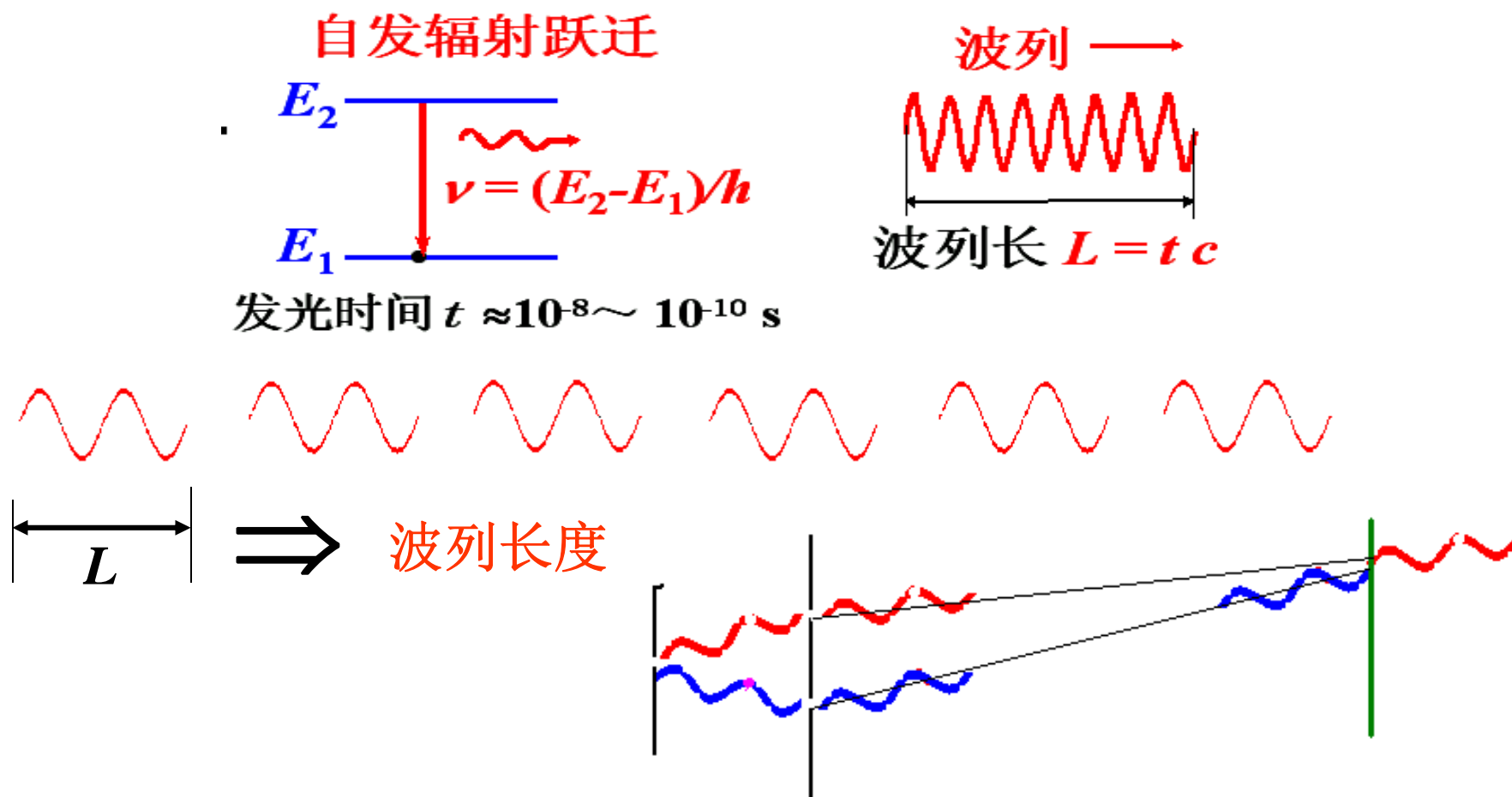


分振幅法



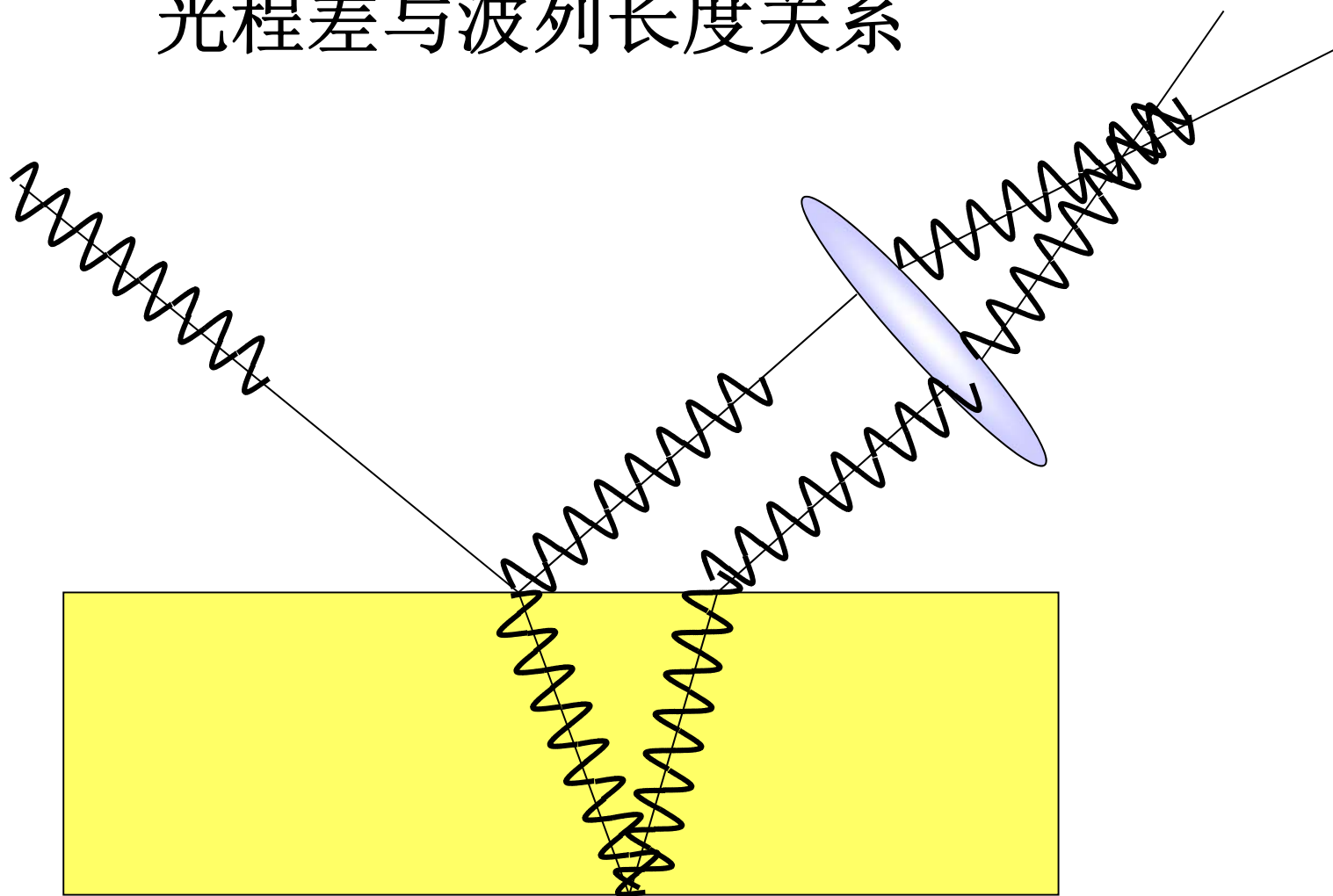
光源发光原理

普通光源



各波列位相关系不固定，不同波列相遇不能产生干涉。

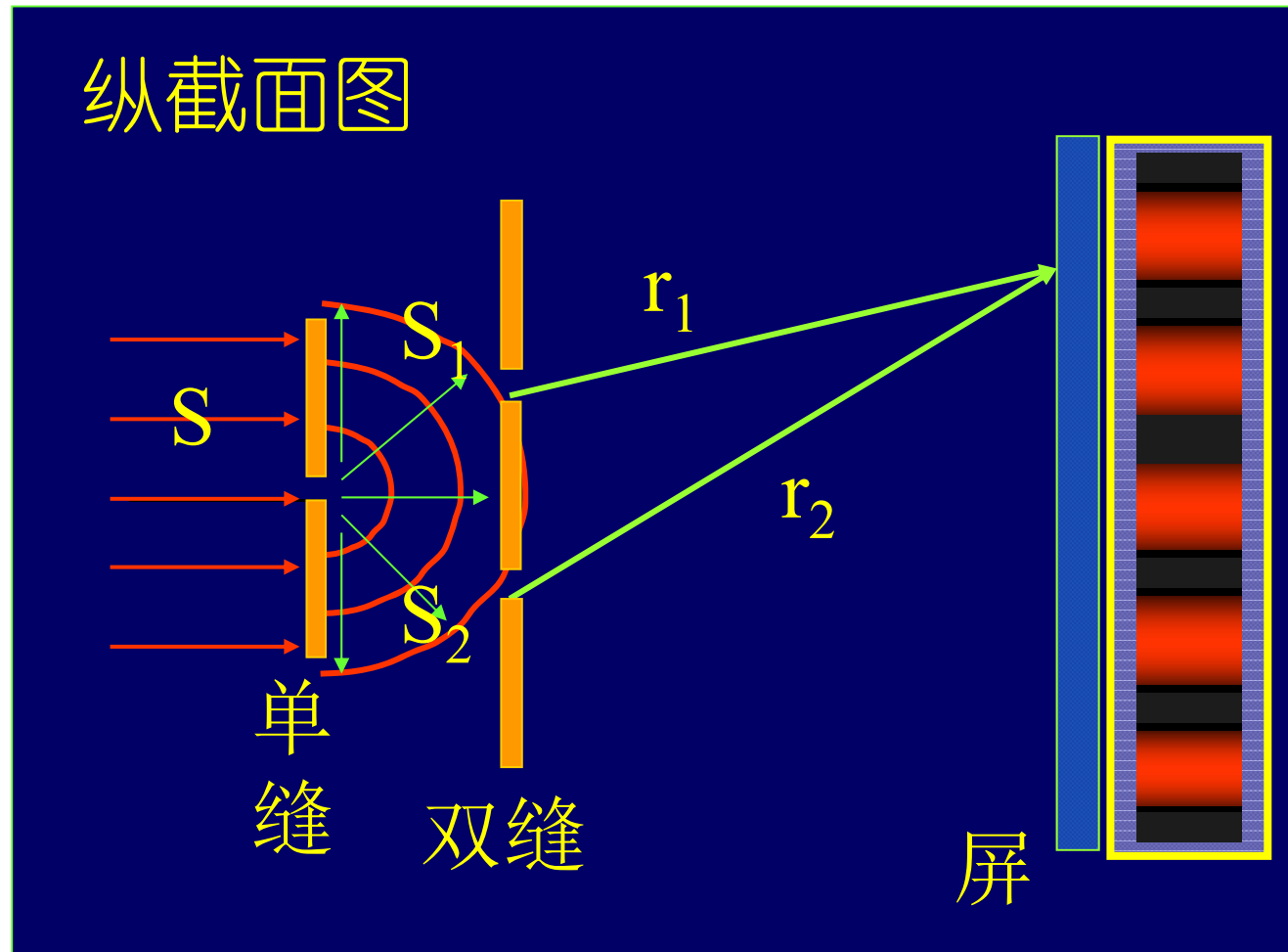
光程差与波列长度关系



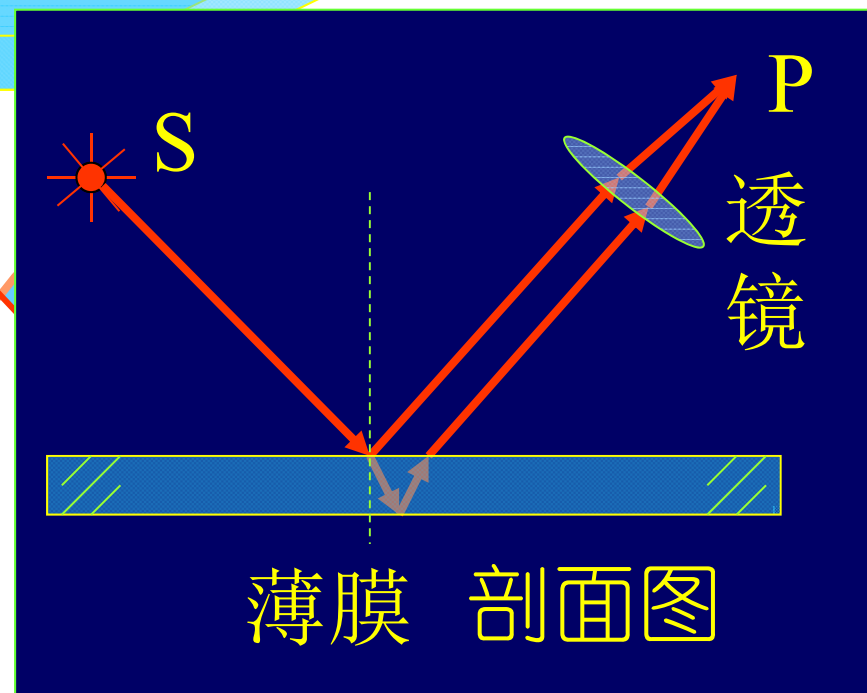
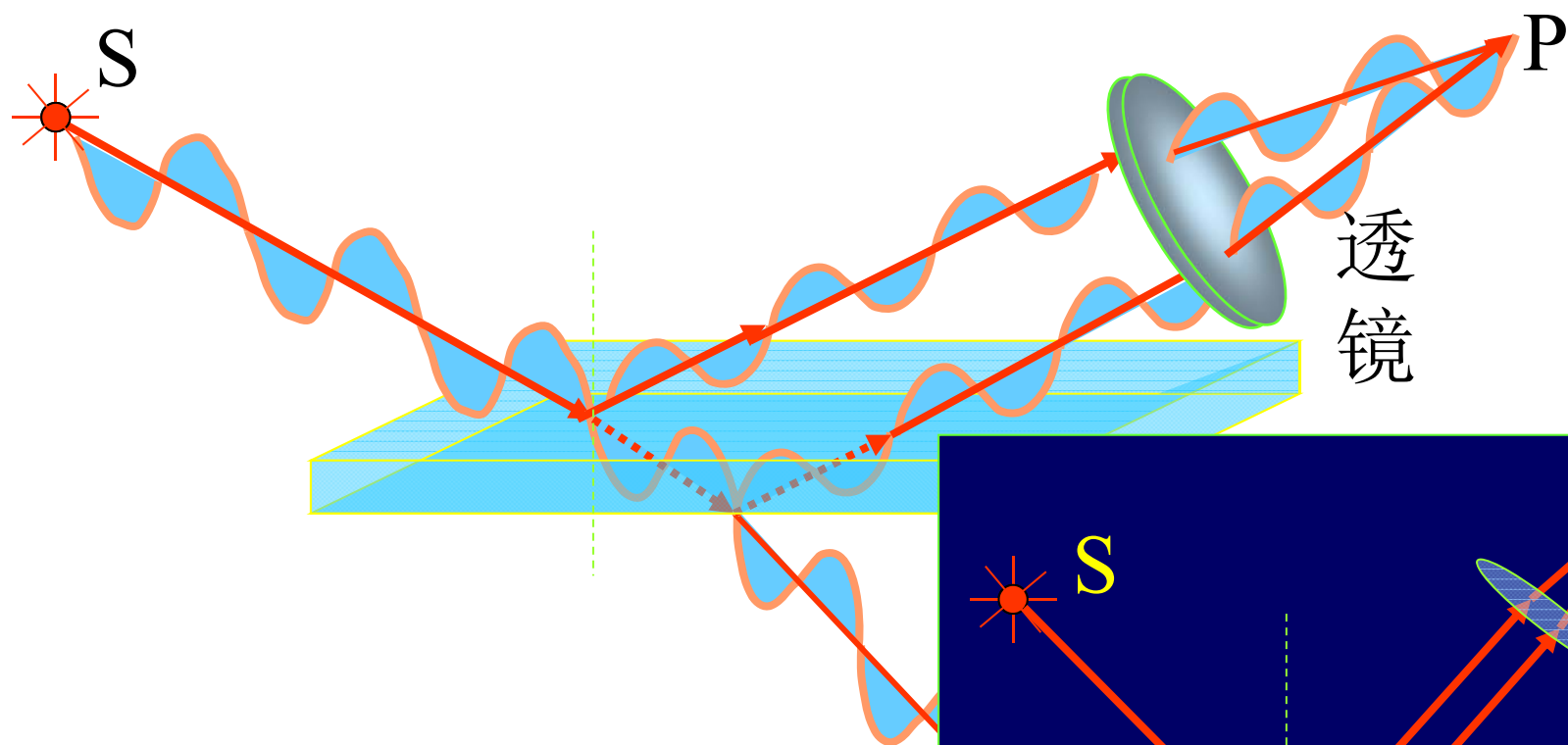
光程差 ΔL 越大，折射光越落后于反射光。 ΔL 过大，将超过列波长度 L 。这时a、b光将无法进行相干叠加。



分波前法



分振幅法

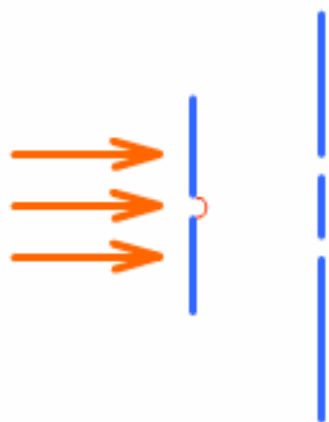


光波的干涉条件总结

- 光的干涉现象
- 干涉条件

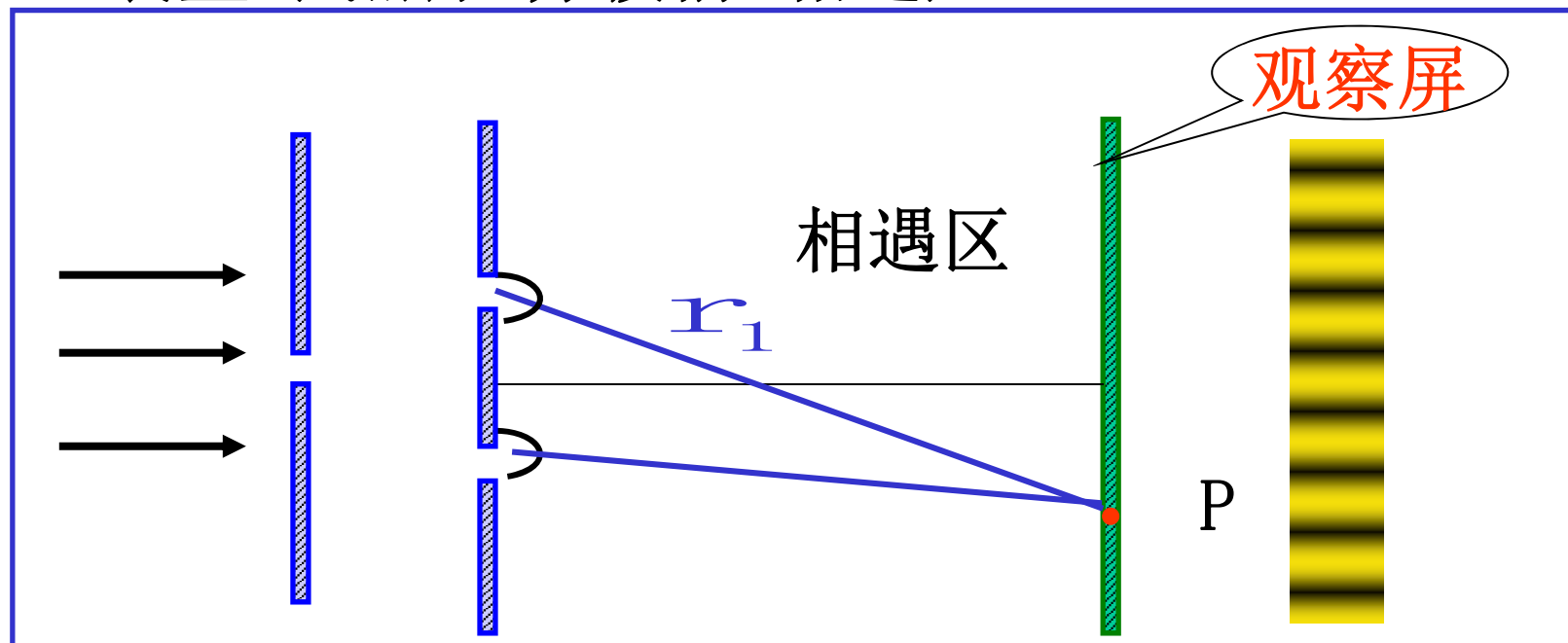
§ 12-2 杨氏干涉实验（分波前法）

杨氏双缝干涉



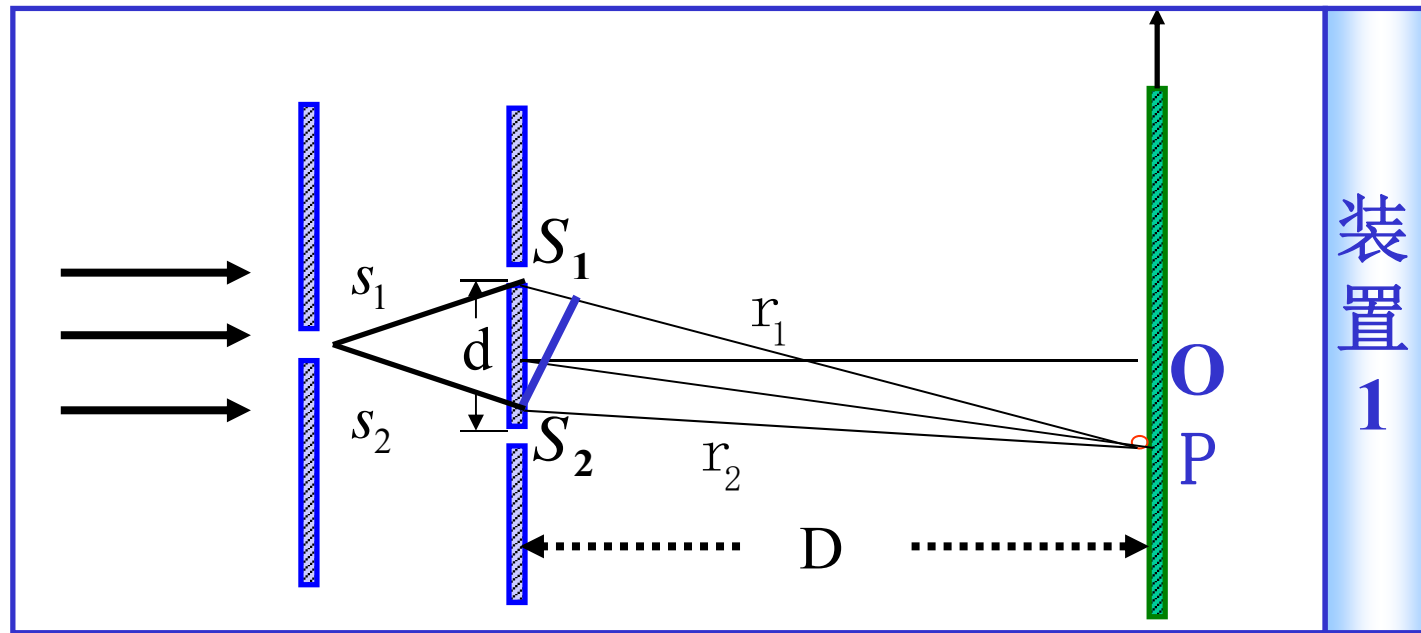
一、杨氏双缝

1. 装置 (点源 分波前 相遇)



2. 强度分布

- 步骤 {
- 确定相干光束
 - 计算光程差



$$D \gg d$$

S_1, S_2 二次级点源的初相:

$$\phi_{01} = \phi_0(t) - \frac{2\pi}{\lambda} s_1, \quad \phi_{02} = \phi_0(t) - \frac{2\pi}{\lambda} s_2$$

$$\phi_{02} - \phi_{01} = \frac{2\pi}{\lambda} (s_2 - s_1)$$

从S到P的光程差: $\Delta = (s_2 + r_2) - (s_1 + r_1)$

接收屏P点相位差: $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} [(s_2 + r_2) - (s_1 + r_1)]$

二、干涉图样的计算

1、P点的干涉条纹强度

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

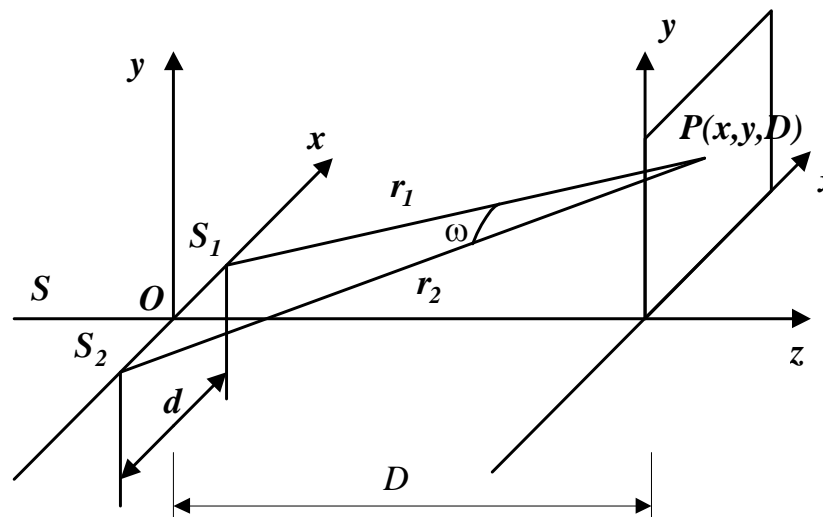
$$\text{设 } I_1 = I_2 = I_0$$

$$\text{则: } I = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

$$\delta = k(r_2 - r_1) = k\Delta$$

$$\text{则: } I = 4I_0 \cos^2 \left[k \frac{(r_2 - r_1)}{2} \right] = 4I_0 \cos^2 \left[\frac{\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} \right]$$

光强 I 的强弱取决于光程差 $\Delta = (r_2 - r_1)$



2、光程差 Δ 的计算

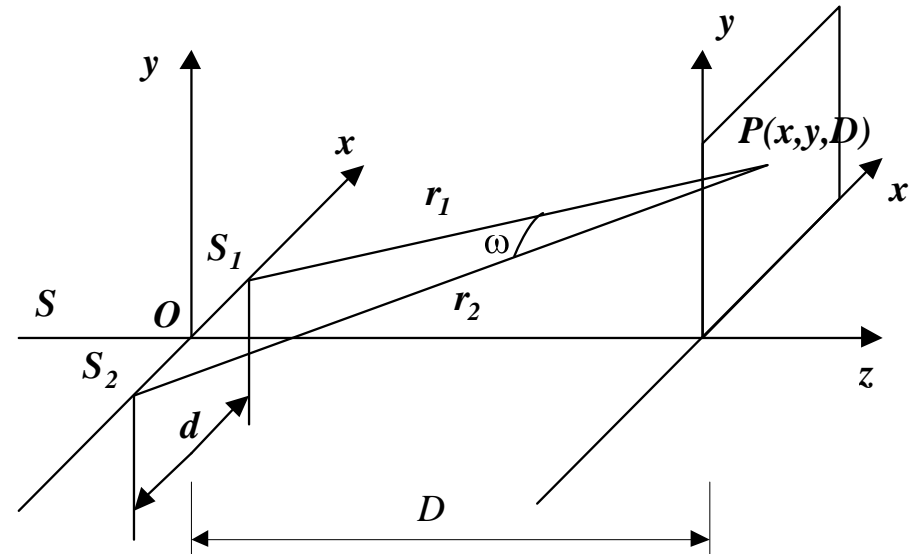
$$r_1^2 = \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2$$

$$r_2^2 = \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2$$

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

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

光程差: $\Delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_2 + r_1} \approx \frac{2xd}{2D} = \frac{d}{D}x$



则: $I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{kd}{2D}x\right) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda D}x\right)$

3、干涉条纹的意义

$$I=4I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda D} x\right)$$

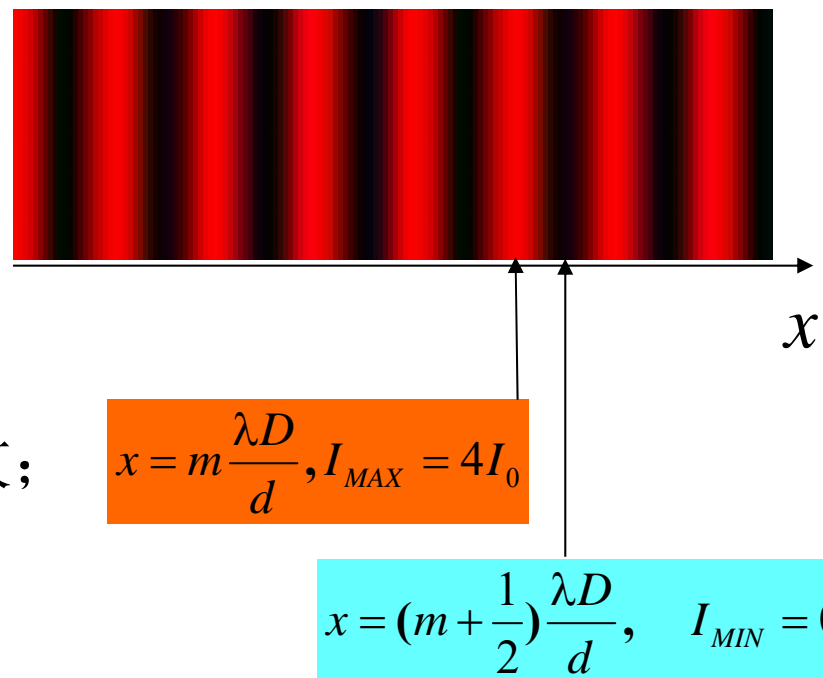
当 $x = m \frac{\lambda D}{d}$ 时

有最大值: $I_{MAX} = 4I_0$, 为亮条纹;

当 $x = (m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda D}{d}$ 时

有最小值: $I_{MIN} = 0$, 为暗条纹;

其中: $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$



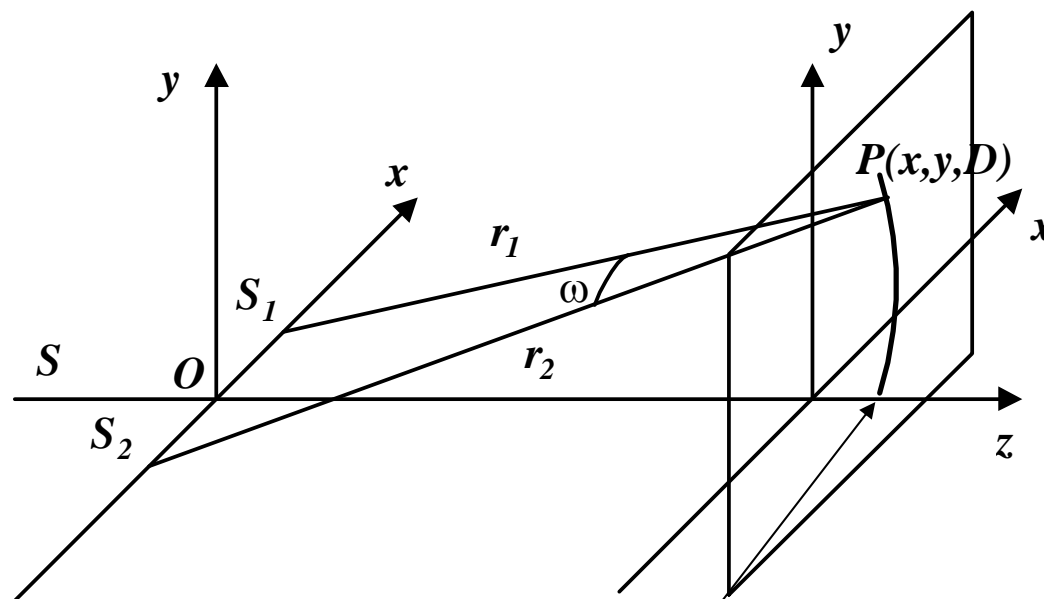
用光程差表示：

$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad \text{时}$$

$I_{MAX} = 4I_0$, 为亮条纹;

$$r_2 - r_1 = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad \text{时}$$

$I_{MIN} = 0$, 为暗条纹;



结论：

- 1、干涉条纹代表着光程差的等值线。
- 2、相邻两个干涉条纹之间其光程差变化量为一个波长 λ ，位相差变化 2π 。

在同一条纹上的任意一点到两个光源的光程差是恒定的。

4、干涉条纹的间距

条纹间距：

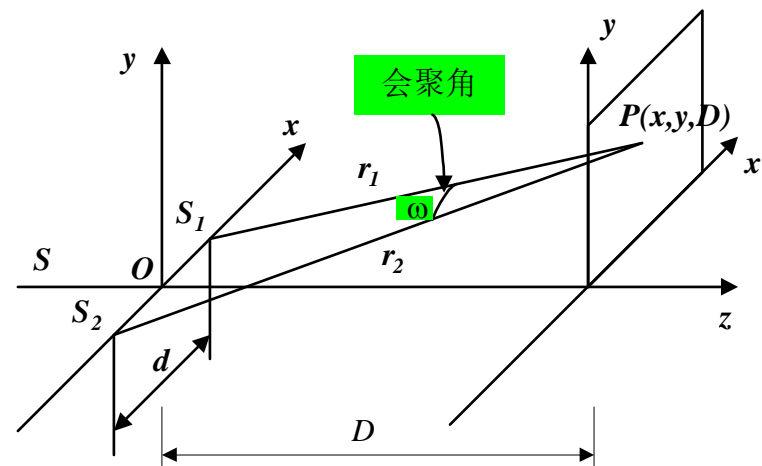
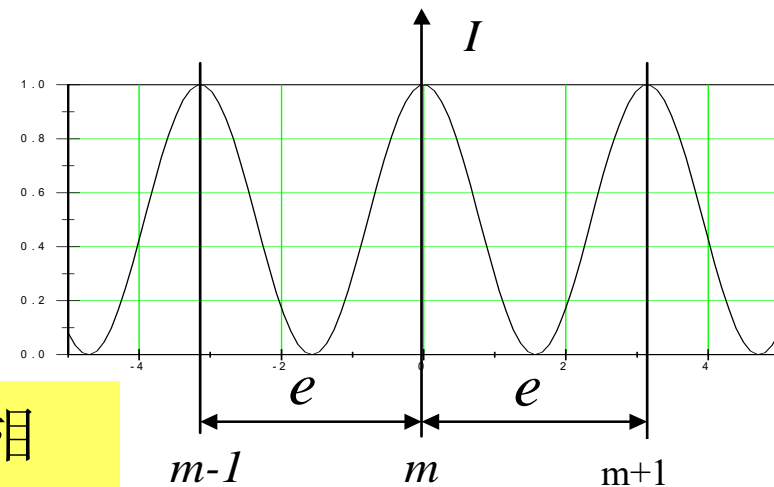
$$e = (m+1)\lambda \frac{D}{d} - m\lambda \frac{D}{d} = \lambda \frac{D}{d}$$

定义：两条相干光线的夹角为相干光束的会聚角，用 ω 表示。

在杨氏实验中： $\omega \approx d/D$

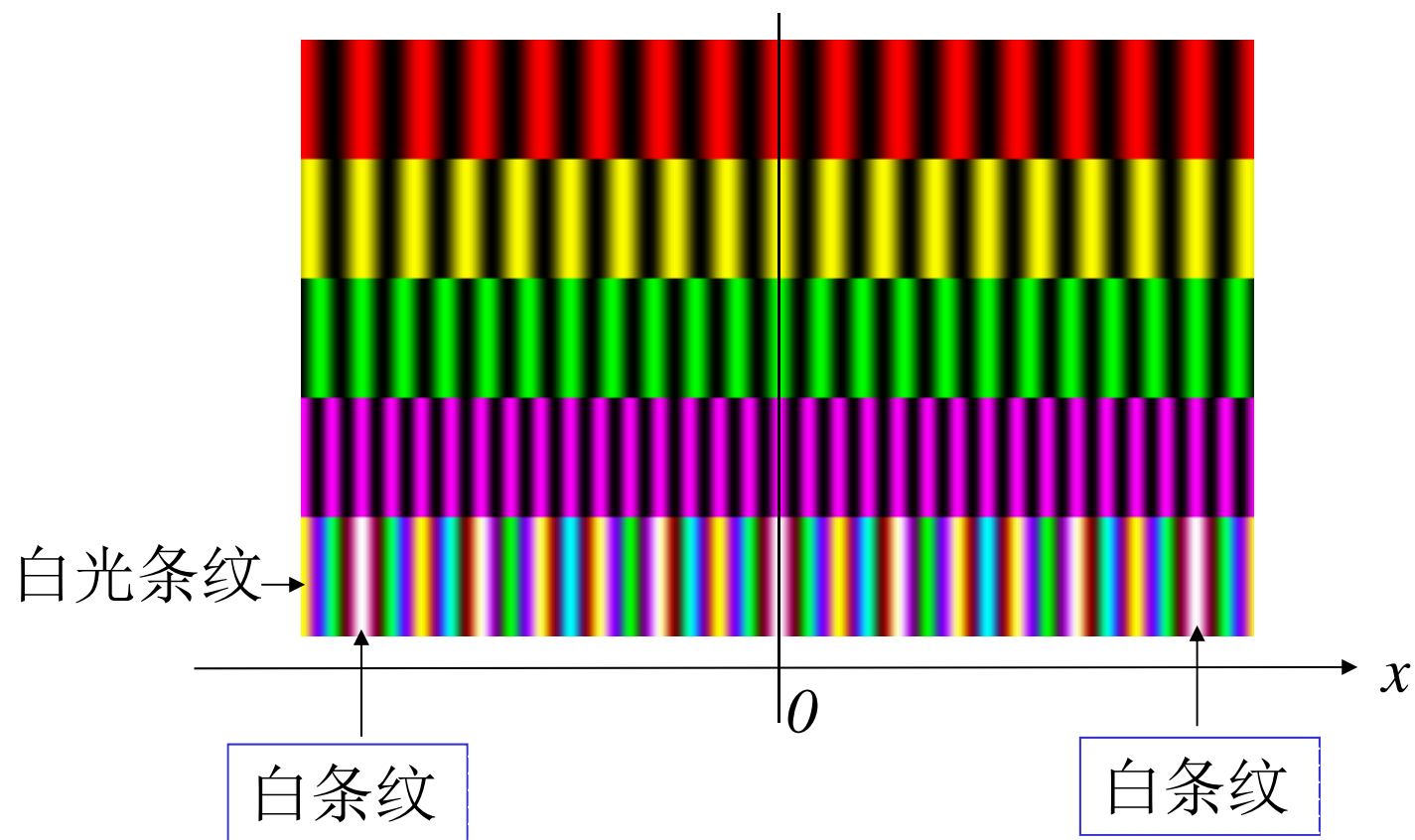
条纹的间距： $e = \lambda/\omega$

$e = \lambda/\omega$ 是一个具有普遍意义的公式，适合于任何干涉系统。



5、干涉条纹间距与波长

条纹间距 $e \propto \lambda$, $e \propto 1/\omega$ 。



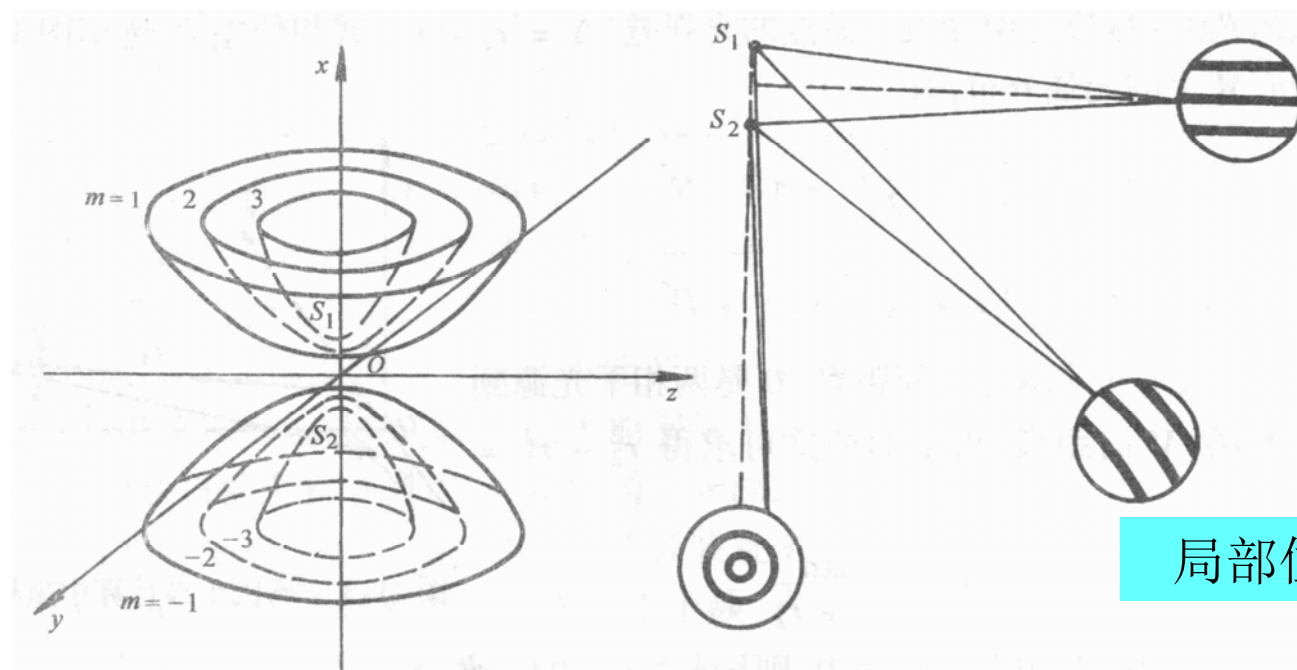
三、两个点源在空间形成的干涉场

两点源形成的干涉场是空间分布的；

干涉条纹应是空间位置对点光源等光程差的轨迹。

$$\Delta = r_2 - r_1 = \sqrt{(x + d/2)^2 + y^2 + D^2} - \sqrt{(x - d/2)^2 + y^2 + D^2}$$

对于亮条纹， $\Delta = m\lambda$ ；有：
$$\frac{x^2}{\left(m\lambda/2\right)^2} - \frac{y^2 + z^2}{\left(d/2\right)^2 + \left(m\lambda/2\right)^2} = 1$$



在三维空间中，干涉结果：
等光程差面

局部位置条纹

等光程差面与屏幕的交线

等光程差面是一组以 m 为参数的回转双曲面族

本课内容回顾

1、干涉现象和干涉条件

2、P点的干涉条纹强度： $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$

3、光程差 Δ 的计算： $\Delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_2 + r_1} \approx \frac{2xd}{2D} = \frac{d}{D}x$

4、干涉条纹的意义：光程差的等值线。

5、干涉条纹的间距： $e = \frac{\lambda}{\omega}$

6、干涉条纹间距与波长：多色光的干涉

7、两个点源在空间形成的干涉场：等光程差面

作 业

- P374页 第4、5、6、7题