第十一章 波动光学

一、光学的起源

- 春秋时代，《墨经》：光的直线传播，反射、折射等。
- 1015年，伊斯兰教黄金时代，伊拉克，Ibn Al-Haytham发表光学的开山之作。

- 宋朝，《梦溪笔谈》，沈括，凹面镜、凸面镜成像规律。

中国古代在几何光学方面长期在世界居于领先地位。

光是什么?

二、光的本性的研究

1、光的机械微粒学说（17世纪---18世纪末牛顿）

认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒：

- 解释：光的直线传播，反射、折射
- 无法解释：干涉、衍射、色散、偏振
- 错误解释：$v_{水} > v_{空气}$

对立面：惠更斯—机械波动说。解释光的直线传播，反射、折射

$$v_{水} < v_{空气}$$

分歧的焦点：光在水中的速度

2、光的波动说（19世纪初-- 19世纪后半期）

英国人托马斯·杨和法国人菲涅尔，通过干涉、衍射、偏振等实验证明了光的波动性及光的横波性。

1850年付科（Foucauld）测定

$v_{水} < v_{空气}$ 波动说确立地位

机械波动学说不能解释光在真空中传播。

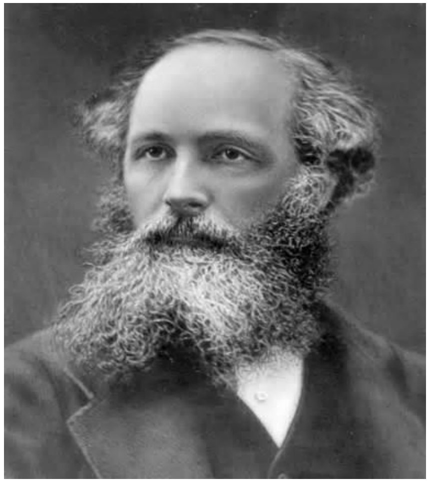
臆想出 “以太”

Augustin Frenel

3、光的电磁说（19世纪的后半期---）

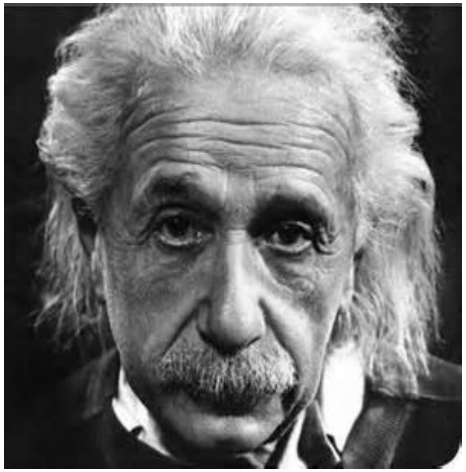
1865年，英国，Maxwell提出电磁波理论，预言电磁波存在。

1887年，赫兹用实验证实电磁波存在，电磁波的速度等于光速，认为光是电磁波。。



James C.Maxwell

4、光的量子说（20世纪初-- ）



1905年，爱因斯坦发现光电效应。

电磁波动说在解释“热辐射实验”及“光电效应”“康普顿效应”等实验遇到困难。

在1900年普朗克提出量子假说，1905年爱因斯坦提出光子学说，解释了光电效应。

光的量子说与电磁波动说相提并论，各自在不同的领域取得了成功。

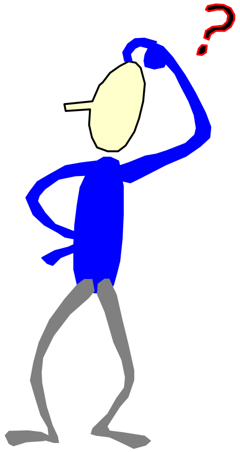
光具有波粒二象性，既有粒子性，又有波动性。

两种图象寓于同一幅画中

例如：

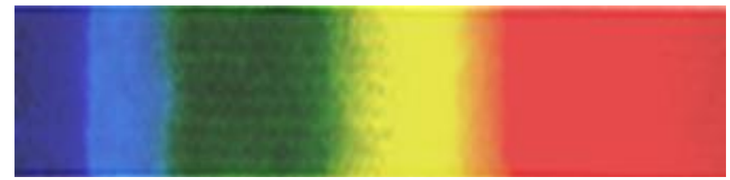
少女？

老妇？



四、光的电磁波理论

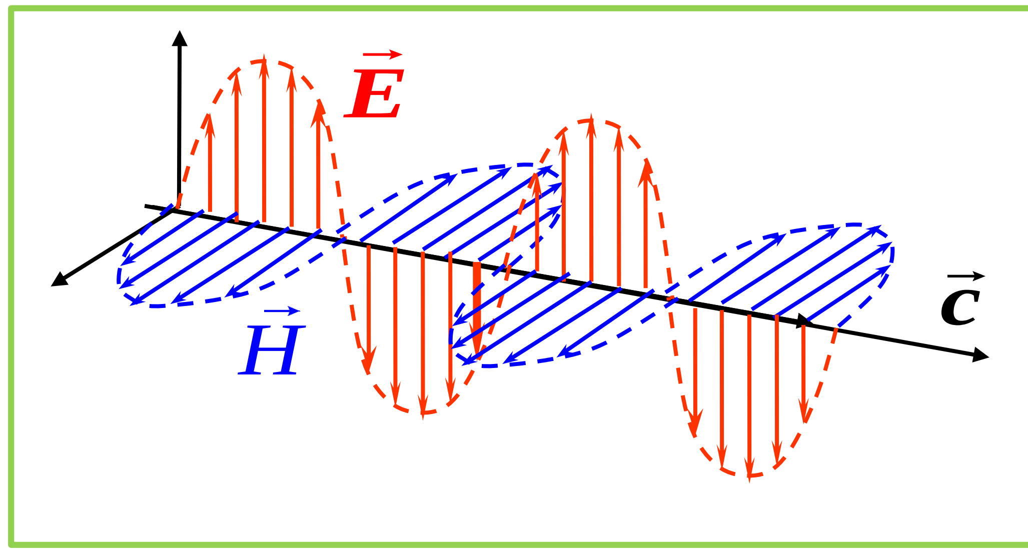
1、光是电磁波



① 可见光　波长：$400\,\mathrm{nm} \sim 760\,\mathrm{nm}$

频率：$7.5\times10^{14}\ \mathrm{Hz} \sim 3.9\times10^{14}\ \mathrm{Hz}$

② 横波



- $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 矢量的传播；

  $\vec{E}$：光矢量

- $\left(\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}\right)$ 相互垂直，满足右手螺旋；

- $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 在各自平面内振动 ——光的偏振性。

- $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 同相：$\sqrt{\mu_0}H = \sqrt{\varepsilon_0}E$

③ 光速

真空中光速： $c=\dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}=3.0\times10^8\ \mathrm{ms^{-1}}$

介质中光速: $u=\dfrac{c}{n}$, $n=\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$

n较大，光密介质；
n较小，光疏介质

④ 光波长

真空中： $\lambda_0=\dfrac{c}{T}=c\nu$

介质中: $u=u\nu==\dfrac{\lambda_0}{n}$

2. 单色光

单色光：只有单一波长（或频率）的光。

准单色光：波长范围很窄的光称为准单色光。

3. 光波的描述

理想的单平面色光场波函数：

$$\boxed{E(\vec{r},t)=A\cos(\omega t-kr+\varphi_0)}$$

光强： $I=|\vec{E}|^2=A^2$

第十一章 波动光学

11.1 光的干涉

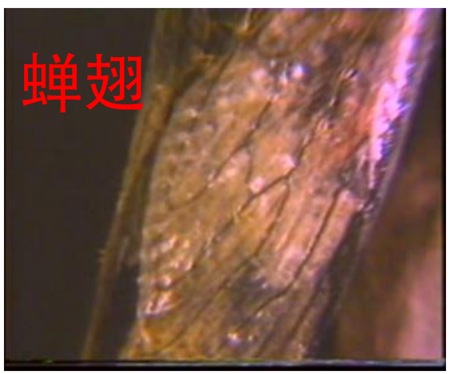
一、光的干涉

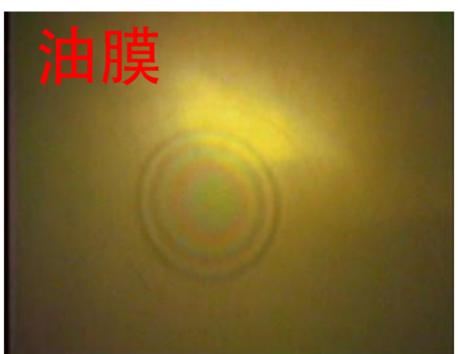
1. 光的相干条件

频率相同
振动方向相同
有恒定相位差

满足相干条件的两束光称为相干波；
满足相干条件的两光源称为相干光源。

自然界中光的干涉现象





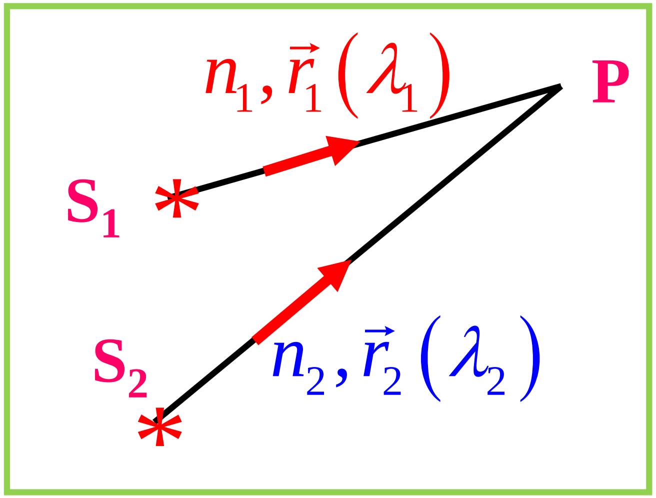
满足相干条件的两束光叠加时，在叠加区域内出现明暗相间的光强不均匀且稳定分布的现象。

2. 两束光的干涉

两相干光源在 S_1 和 S_2 的光振动：

$$E_{10}=A_{10}\cos(\omega t+\varphi_{10})$$

$$E_{20}=A_{20}\cos(\omega t+\varphi_{20})$$



在P点相遇，相干叠加！

两相干光波在空气中传播时的波函数为

$$E_1=A_1\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda_1}r_1+\varphi_{10})$$

$$E_2=A_2\cos(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda_2}r_2+\varphi_{20})$$

①在P点相遇，相干叠加：　$E=E_1+E_2=A\cos(\omega t+\varphi_0)$

②合振动相位：

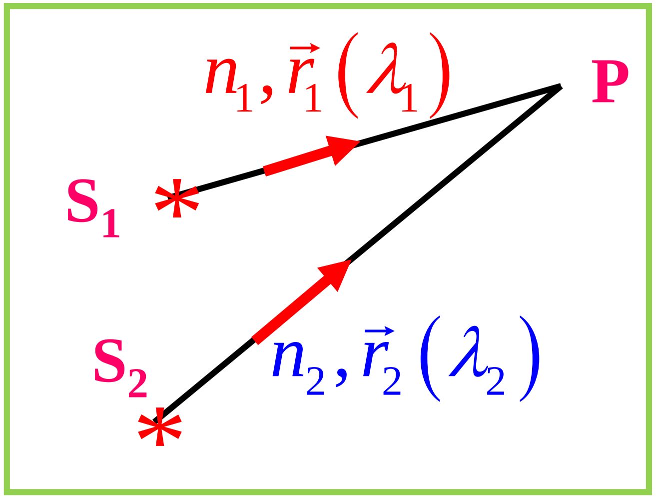
$$\tan\varphi_0=\frac{A_1\sin\left(\varphi_{10}-\frac{2\pi}{\lambda_1}r_1\right)+A_2\sin\left(\varphi_{20}-\frac{2\pi}{\lambda_2}r_2\right)}{A_1\cos\left(\varphi_{10}-\frac{2\pi}{\lambda_1}r_1\right)+A_2\cos\left(\varphi_{20}-\frac{2\pi}{\lambda_2}r_2\right)}$$

2. 两束光的干涉

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_1} r_1 + \varphi_{10})$$

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_2} r_2 + \varphi_{20})$$

$$E = E_1 + E_2 = A\cos(\omega t + \varphi_0)$$



③合振动振幅： $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi}$

P点光强为： $I = I_1 + I_2 + \boxed{2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi}$ 干涉项

④相位差： $\Delta\varphi = \varphi_{20} - \varphi_{10} - 2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_2} - \frac{r_1}{\lambda_1}\right) = \Delta\varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda}(n_2r_2 - n_1r_1)$

λ: **光在真空中的波长。** $\lambda_1 = \lambda / n_1 \quad \lambda_2 = \lambda / n_2$

⑤光程： **光所经过的介质的折射率 n 与相应的几何路程 s 乘积.**
(nr)

⑥光程差:

$$\delta = (n_2 r_2 - n_1 r_1)$$

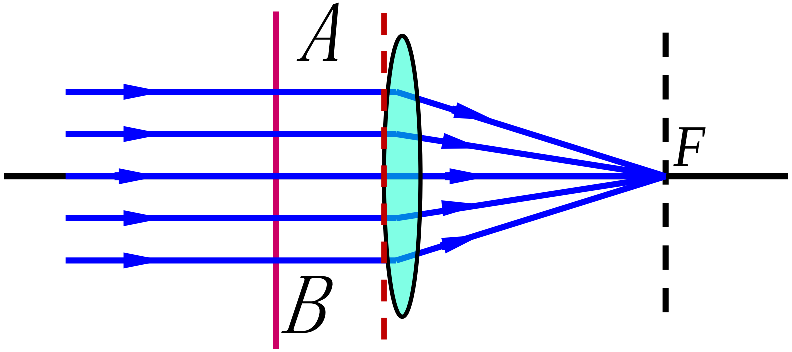
$$\Delta\varphi == \Delta\varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

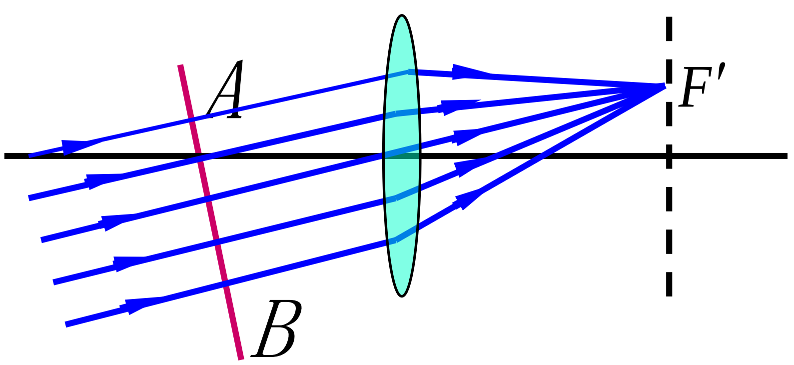
$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi}$$

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

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 r_2 - n_1 r_1)$$

讨论：薄透镜不引起附加光程差





若：$A_1 = A_2 = A_0$，$I_1 = I_2 = I_0$

$$I = 2I_0(1 + \cos\Delta\varphi) = 4I_0\cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$

$$I=4I_0\cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \qquad \Delta\varphi=\Delta\varphi_0-\frac{2\pi}{\lambda}\left(n_2r_2-n_1r_1\right)$$

⑦干涉条纹：

$$\text{当}\ \Delta\varphi=\begin{cases}\pm 2k\pi, & A=2A_0,\ I=4I_0\ \text{干涉加强，明条纹}\\ \pm(2k+1)\pi, & A=0,\ I=0\ \text{干涉减弱，暗条纹}\\ \text{其它} & \end{cases}$$

$k=0,\ 1,\ 2,\ \cdots$ ——干涉级次

屏上出现一系列明暗相间的条纹——干涉图样

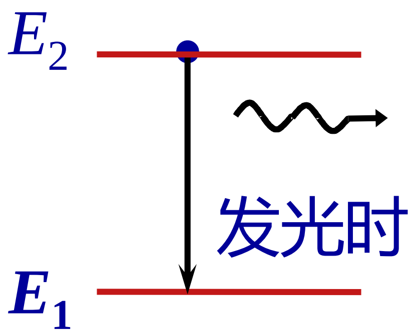
特别地，当 $\varphi_{10}=\varphi_{20}$ 时

$$\text{当}\ \delta=\begin{cases}\pm k\lambda, & A=2A_0,\ I=4I_0\ \text{干涉加强，明条纹}\\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, & A=0,\ I=0\ \text{干涉减弱，暗条纹}\\ \text{其它} & \end{cases}$$

二、普通光源发光

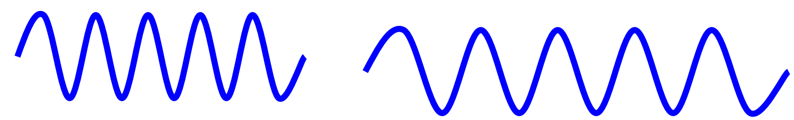
1. 发光机理 ----自发辐射

发光基本单元----原子、分子



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

发光时间 $\tau \approx 10^{-8}\mathrm{s} \sim 10^{-11}\mathrm{s}$



波列　　波列长 $L = \tau c$

2. 特点

（1）　一个原子每一次发光只能发出一个波列

频率一定,振动方向一定，初相位给定的一段光波

------波列；

（2）　原子的发光是断续的，

同一个原子不同时刻发光是随机、间歇的、完全相互。

（3）　不同原子的同一时刻发光随机、相互独立。

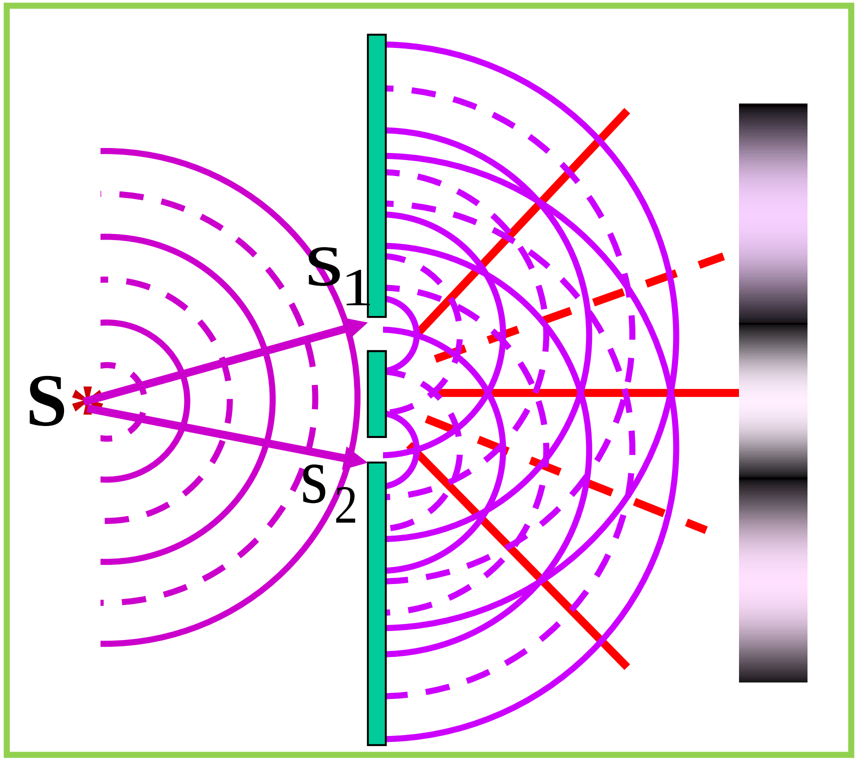
两个普通光源或同一普通光源的不同部分所发出的光是不相干的。

三、由普通光源获得相干光

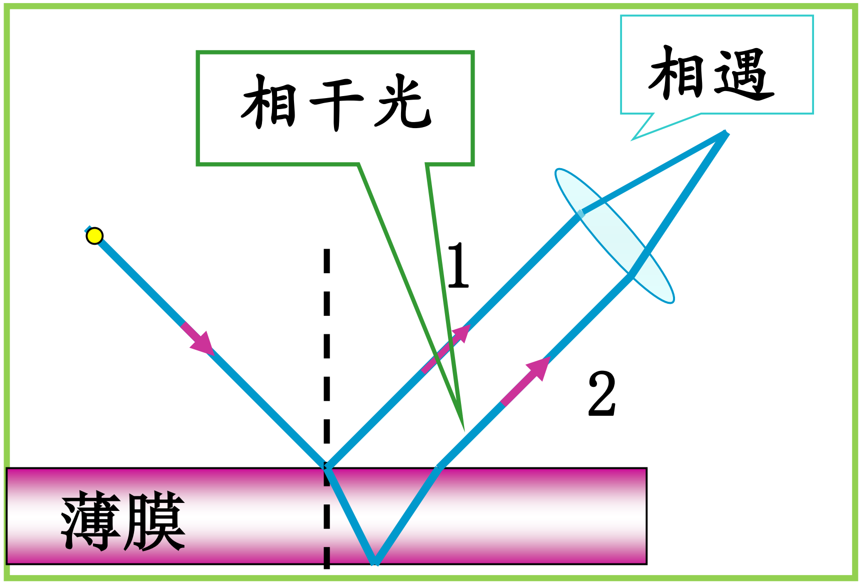
基本思想:

将同一原子同一次发的光分成两部分，再使它们相遇叠加。

(1) 分波面法:



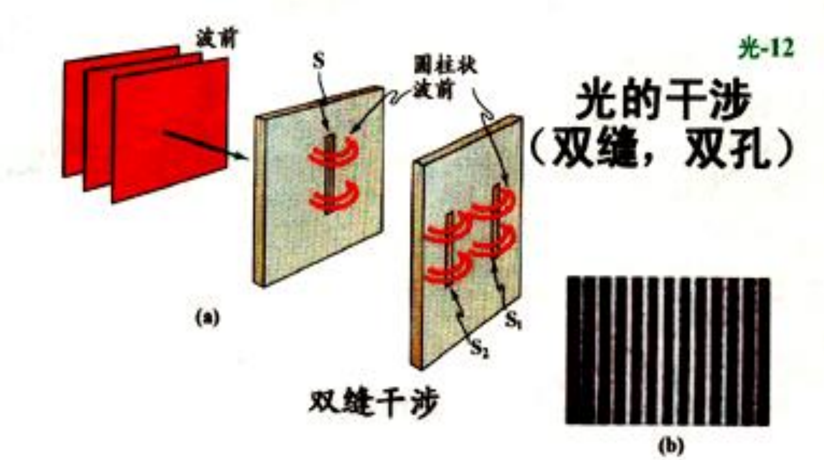
(2) 分振幅法:

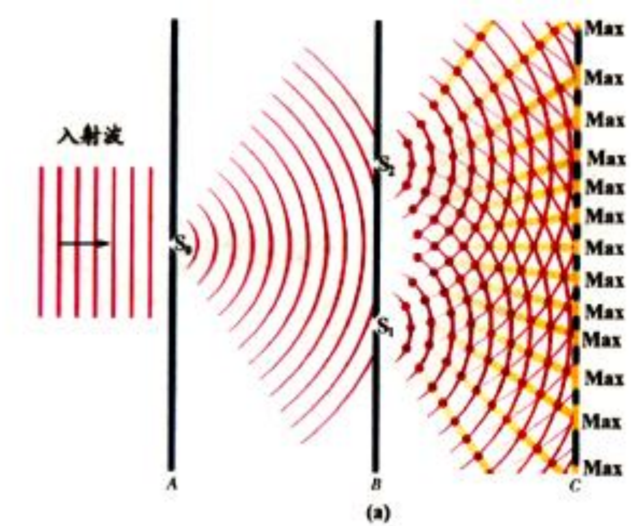


托马斯·杨在1801年首先发现光的干涉现象。

四、 杨氏双缝干涉 （分波阵面干涉）

1. 实验装置





缝宽： 10^{-4} m （S_1和S_2缝宽相同）

屏到双缝距离 D: 1--10 m

双缝间距 d: 0.1--3 mm。($d << D$)

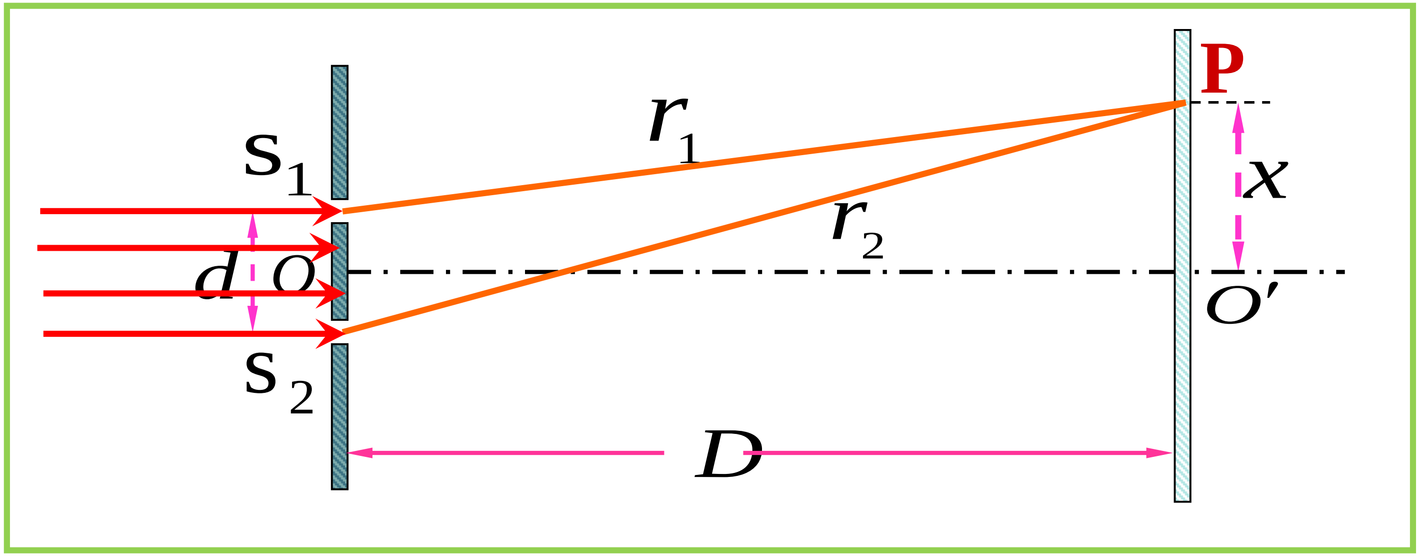
屏上横向观测范围x: 1 ~ 10 cm

($x << D$)

S_1 和 S_2 为两个相干光源：

振动方向相同, 相位相同 频率相同

2. 干涉条纹　设实验在真空（或空气）中进行，平行光正入射



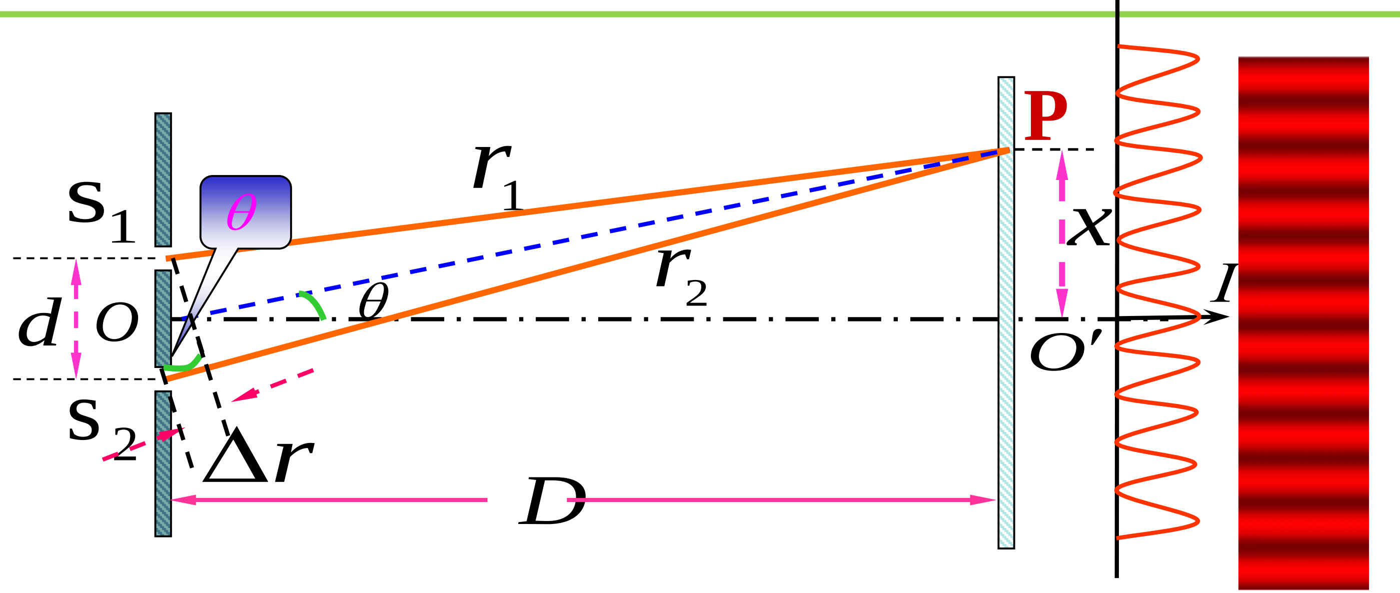
①P点光强

$$I = I_1 + I_2 + \underbrace{2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi}_{\text{干涉项}} \xrightarrow{\text{若 } I_1 = I_2 = I_0} I = 2I_0(1+\cos\Delta\varphi)$$

$$= 4I_0\cos^2\frac{\Delta\varphi}{2}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{10} - \varphi_{20} + \frac{2\pi}{\lambda}\left(n_2 r_2 - n_1 r_1\right) = \frac{2\pi}{\lambda}\left(r_2 - r_1\right) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

②光程差δ　　$\delta = r_2 - r_1$



$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2}$$

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

②光程差δ $\delta = r_2 - r_1 \approx \Delta r = d\sin\theta \approx d\,\mathrm{tg}\,\theta = d\frac{x}{D}$

$(\because D >> d)$ $(\because D >> x)$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda D}x$$

③讨论光强分布 $I = 4I_0 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = 4I_0 \cos^2 \frac{\pi d}{\lambda D}x$

$$\delta = \frac{d}{D}x = \begin{cases} \pm k\lambda, & k = 0,1,2\cdots \\ \pm(2k-1)\frac{\lambda}{2}, & k = 1,2\cdots \end{cases}$$

干涉加强，明纹

干涉减弱，暗纹

明纹中心位置: $x_k = \pm k \dfrac{\lambda D}{d}$　　$k = 0, 1, 2 \cdots$

暗纹中心位置: $x_k = \pm (2k-1) \dfrac{\lambda D}{2d}$　　$k = 1, 2 \cdots$

条纹间距:(亮-亮、暗-暗)　$\boxed{\Delta x_{明} = \Delta x_{暗} = \dfrac{\lambda D}{d} = \Delta x}$

3. 讨论条纹特点

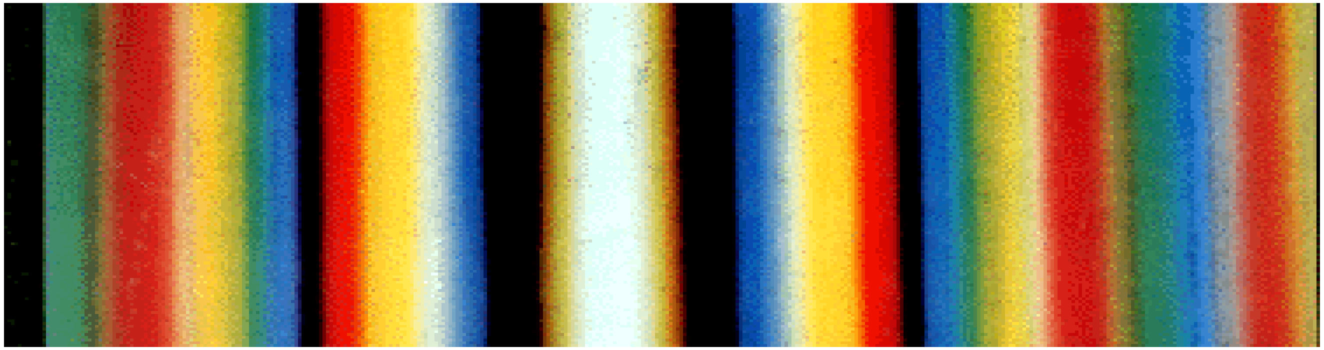
① 中央明纹位置: $\delta = r_2 - r_1 = 0$

② 明暗条纹等间距

光强极大极小交替,出现明暗相间、等亮度、等间距的条纹。

4. 讨论　① 已知D，d，Δx，可测波长λ;

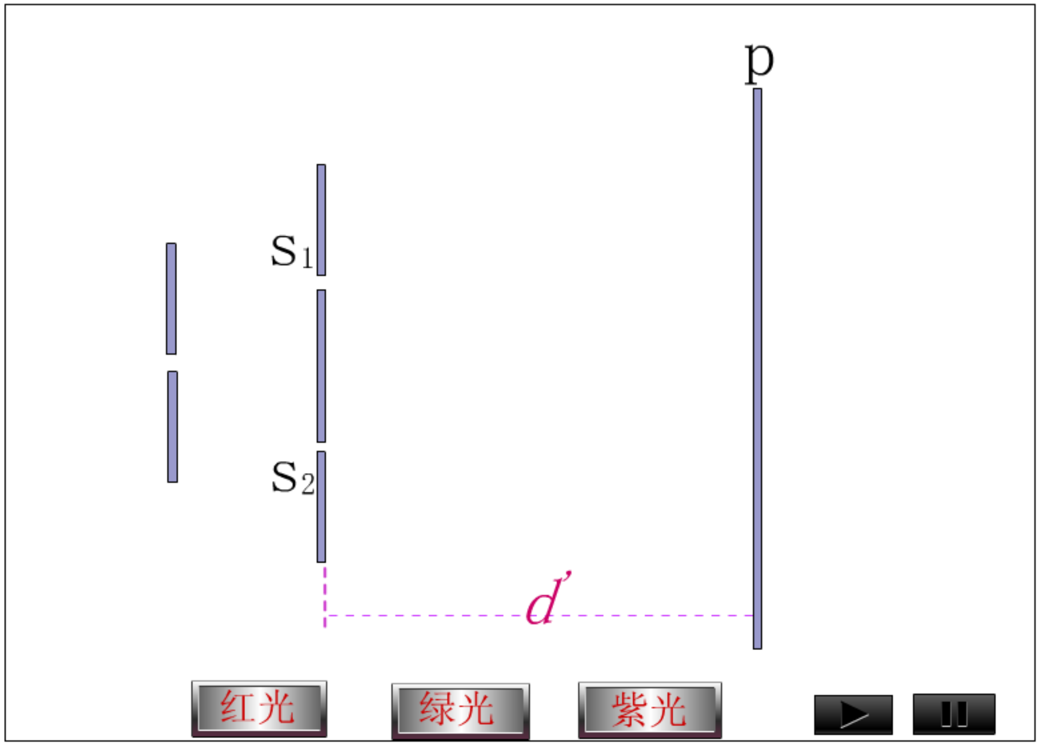
② 白光照射,中央亮条纹仍是白的，其它为彩色。

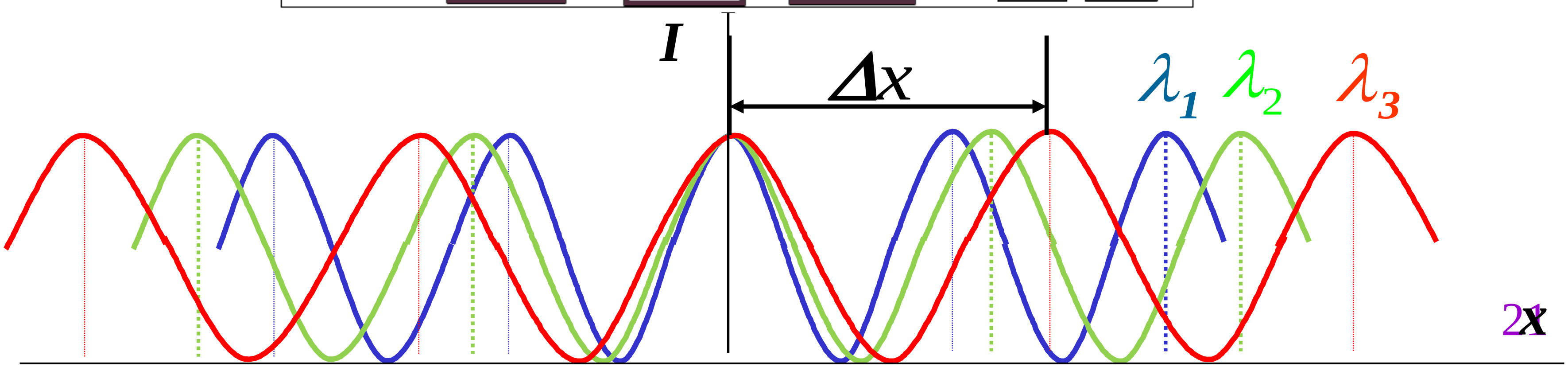


③ 几何参数D，d不变，

波长λ越长，条纹间距Δx越大。

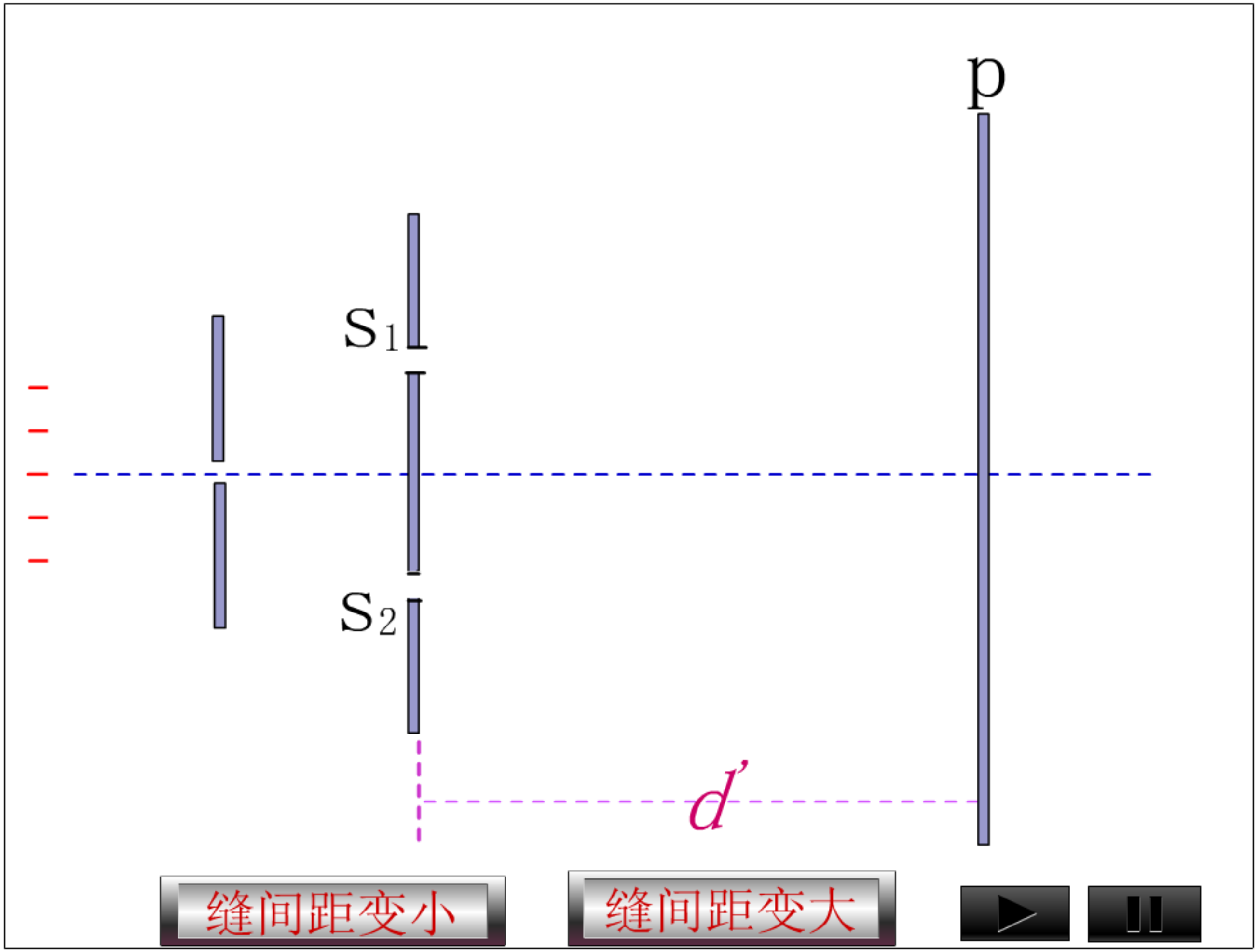
$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda D}{d}$$



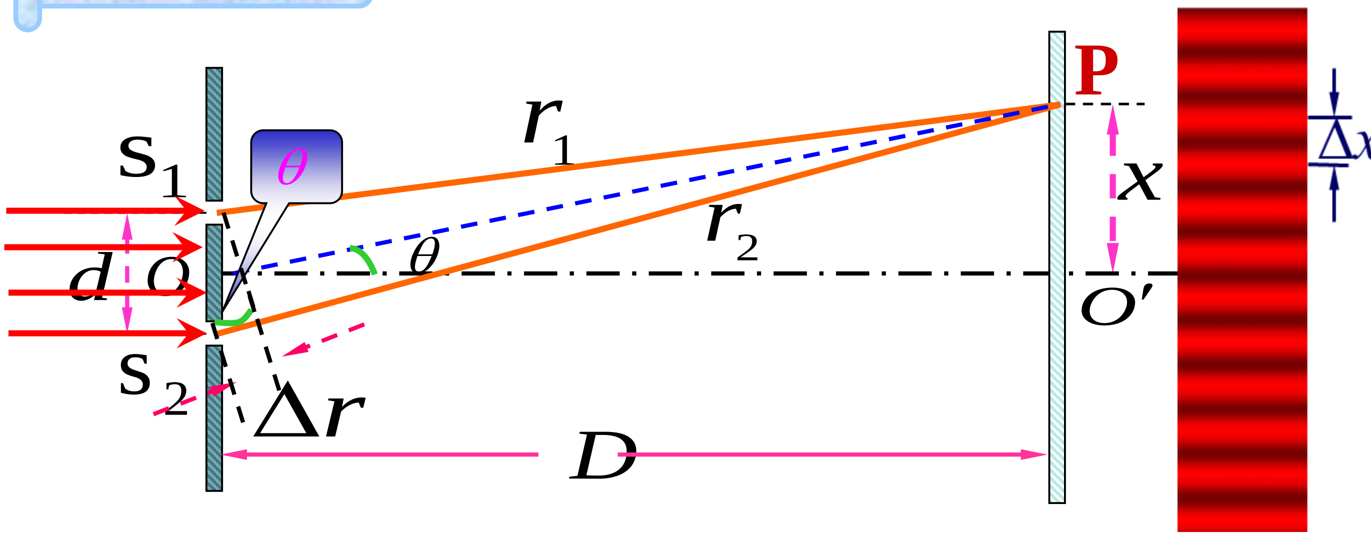


④波长λ不变，几何参数d越小（或D越大），条纹间距Δx越大，越易于分辨。

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda D}{d}$$



请思考 下述情况中，干涉条纹将如何变化？



$$\delta \approx d\sin\theta = d\frac{x}{D}$$

$$x_{k明} = \pm k\frac{\lambda D}{d}$$

$$x_{暗} = \pm(2k-1)\frac{\lambda D}{2d}$$

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

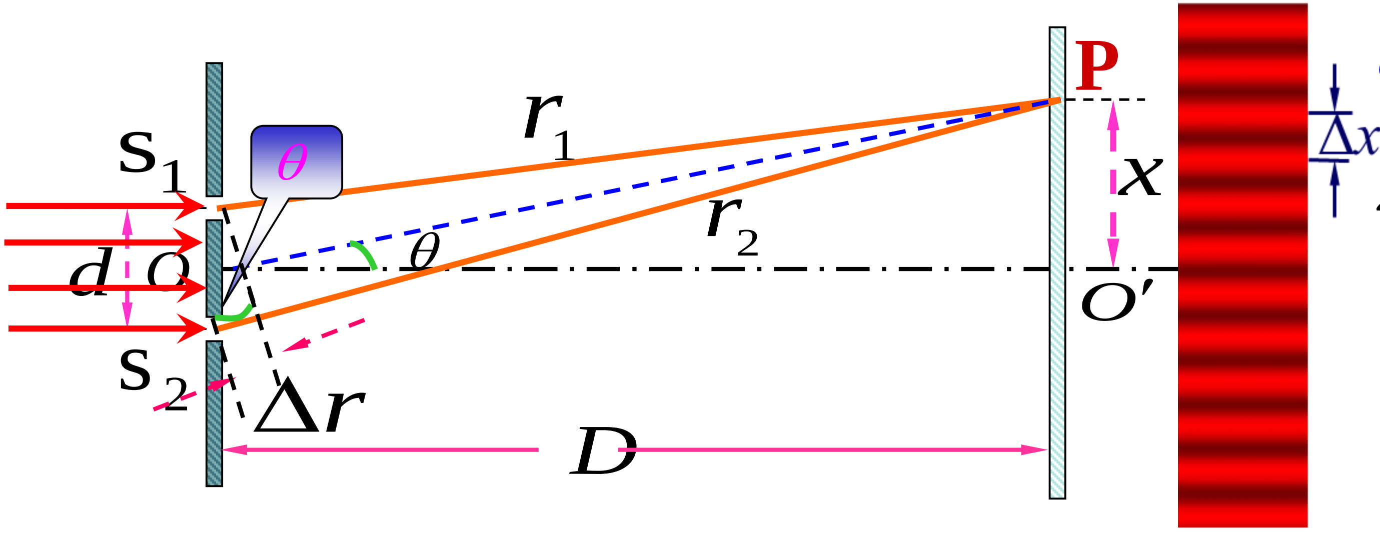
（1） 把整个装置浸入水中

$$\delta = n(r_2 - r_1) \approx nd\sin\theta = nd\frac{x}{D} = \begin{cases} \pm k\lambda, & 明纹 \\ \pm(2k-1)\dfrac{\lambda}{2}, & 暗纹 \end{cases}$$

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

（2） 在缝S_1后插入一块厚度为t，折射率为n透明薄片

$$\delta = r_2 - [r_1 + (n-1)t] = r_2 - r_1 + (n-1)t$$



$$\delta \approx d\sin\theta = d\frac{x}{D}$$

$$x_{k明} = \pm k\frac{\lambda D}{d}$$

$$x_{暗} = \pm(2k-1)\frac{\lambda D}{2d}$$

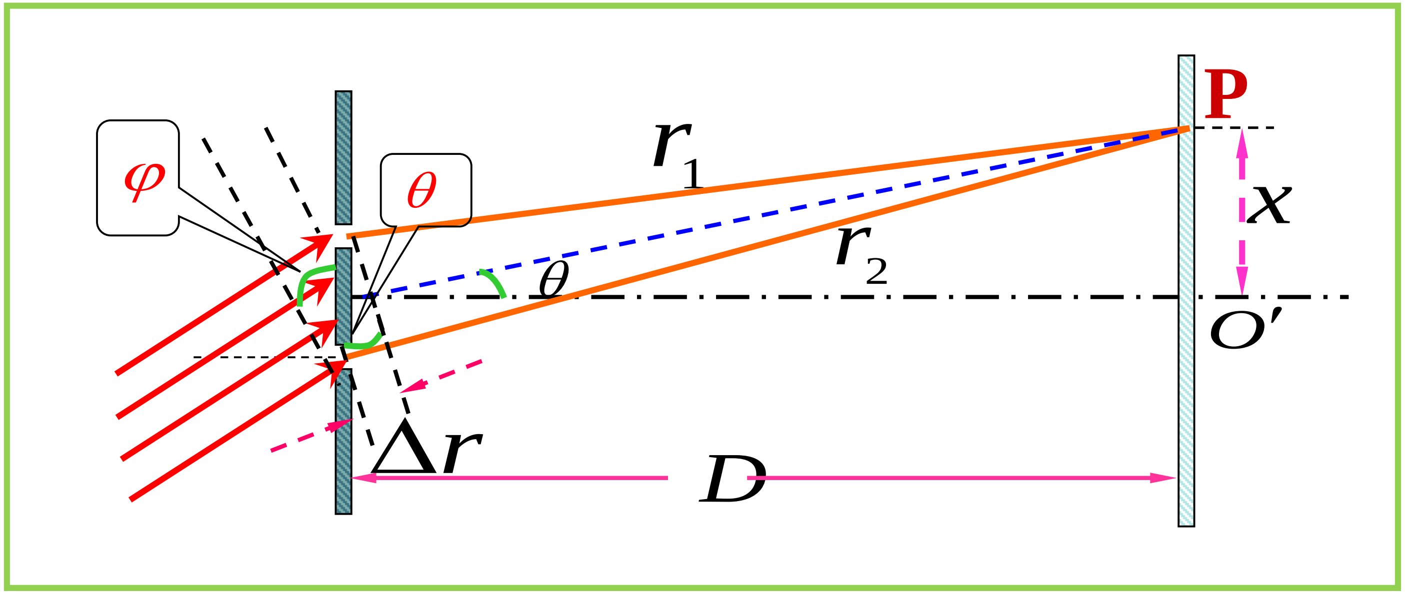
$$\Delta x = \frac{\lambda D}{d}$$

(3） 分别用红、蓝滤色片各遮住S_1和S_2

(4） S缝上下移动时，条纹如何变化?

(5） 平行光斜入射，条纹如何变化?

(5) 平行光斜入射，条纹如何变化?

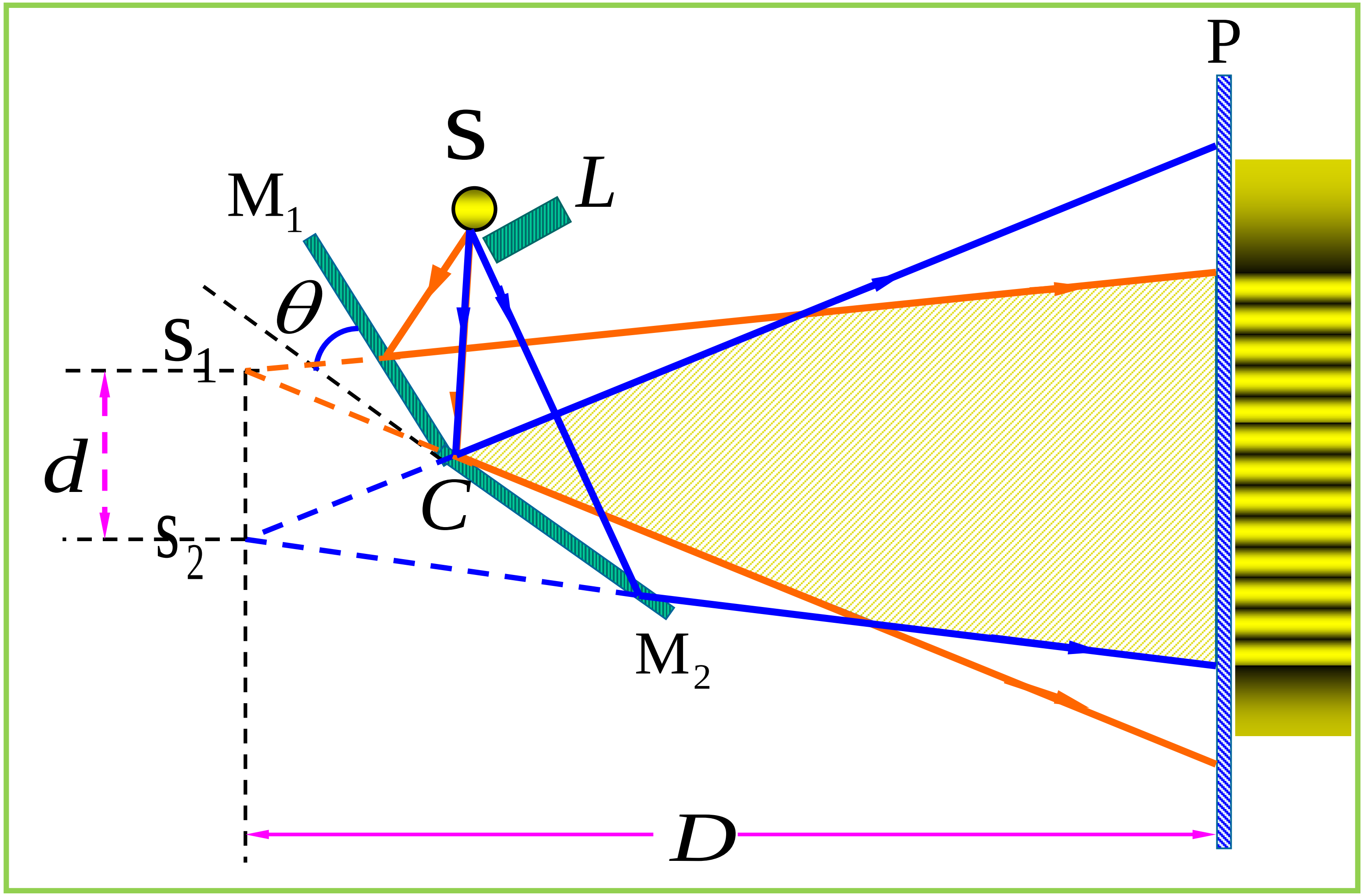


斜向上时: $\delta=(r_2-r_1)-d\sin\varphi\approx d\sin\theta-d\sin\varphi$

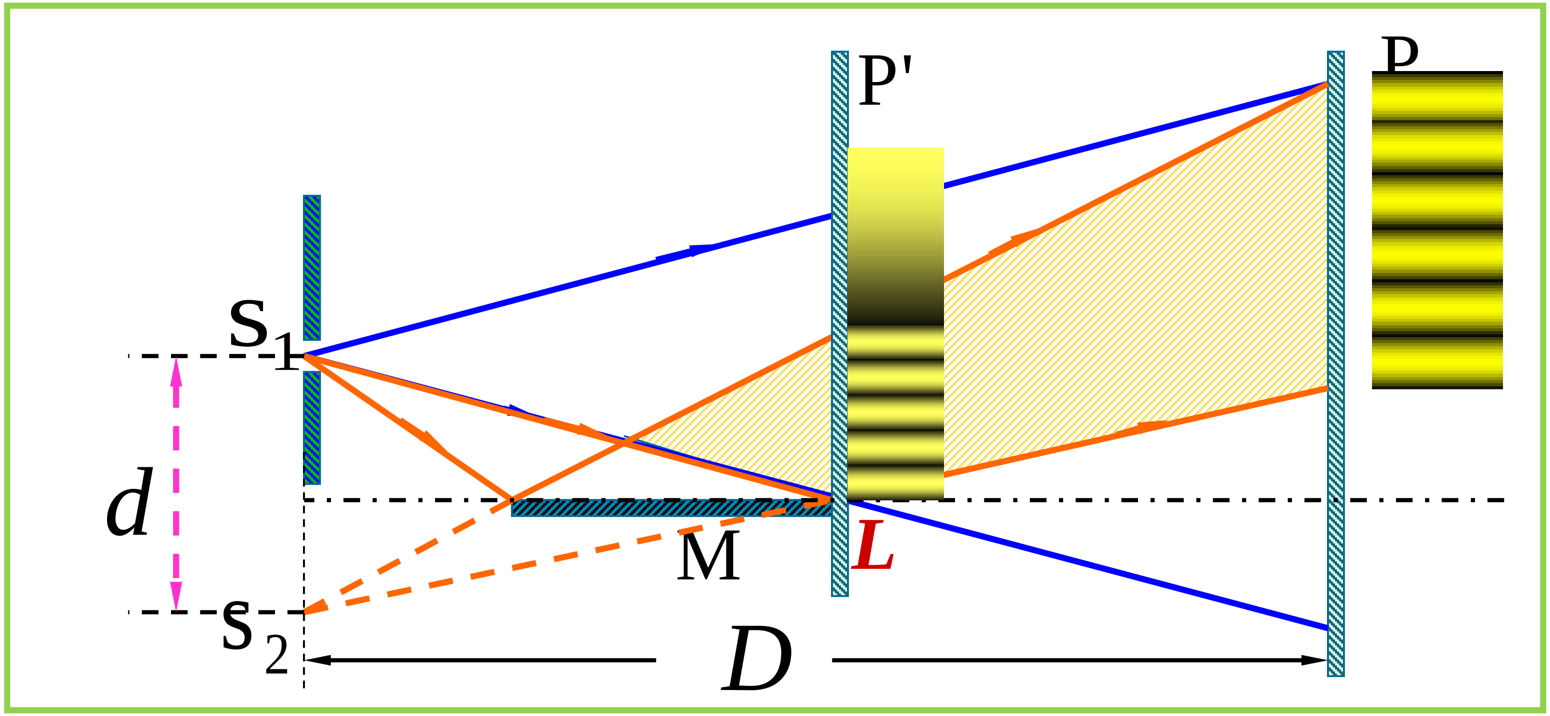
斜向下时: $\delta=(r_2-r_1)+d\sin\varphi\approx d\sin\theta+d\sin\varphi$

五、其它等效装置

1. 菲涅耳双面镜实验



2. 劳埃德镜实验



与双缝干涉对比：

① 明暗条纹位置反转。

一路光在平面镜反射时，有“半波损失”，光波相位有π的突变。

② 条纹分布区域限于屏的上半部分。

例1、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.

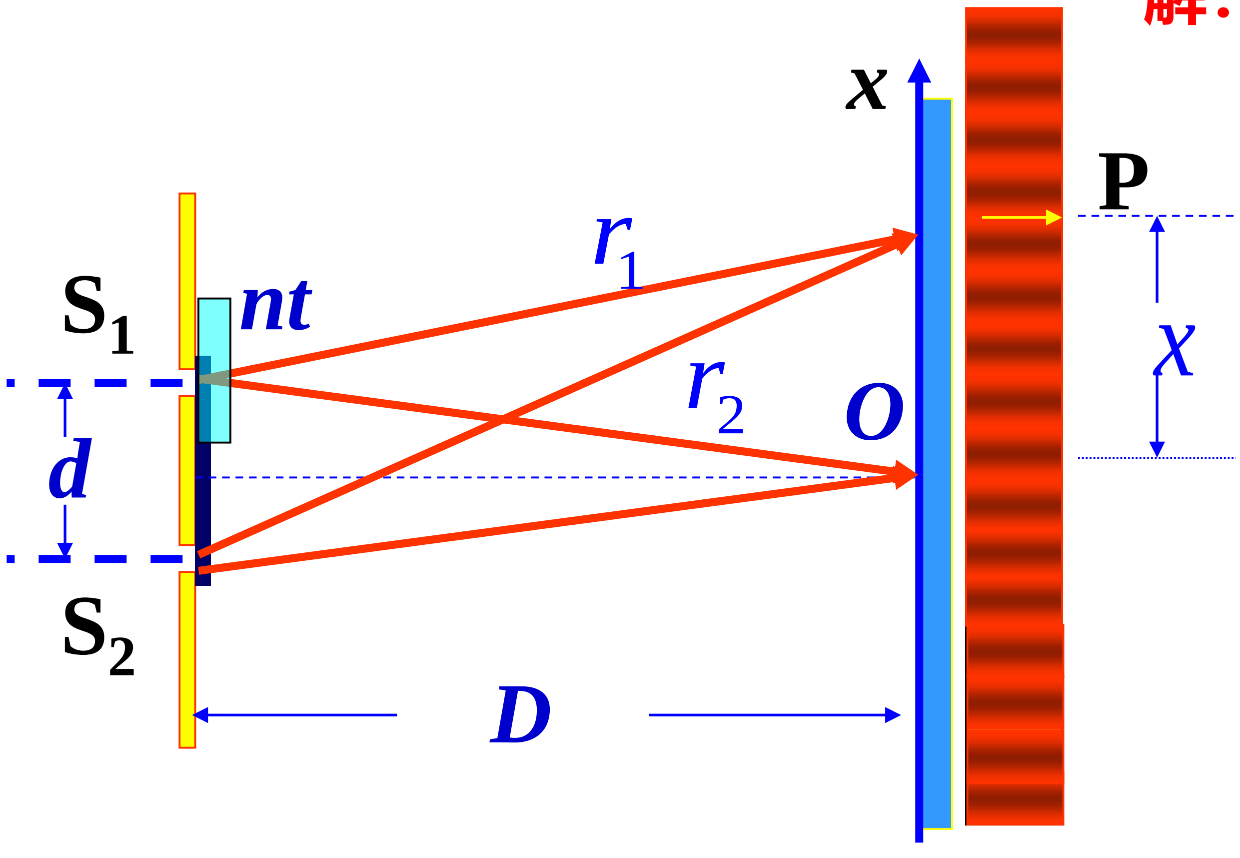
解: (1) $x_k = \pm \frac{D}{d} k\lambda, \quad k = 0, \quad 1, \quad 2, \cdots$

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

$$\lambda = \frac{d}{D}\frac{\Delta x_{14}}{\left(k_4 - k_1\right)} = 500\mathrm{nm}$$

(2) $\Delta x = \frac{D}{d}\lambda = 3.0\,\mathrm{mm}$

例2、双缝干涉中，入射光波长为λ，双缝至屏的距离为D，在一个缝后放一厚为t 折射率为n的透明薄膜，此时中央明纹处仍为一明纹，求(1)该明纹的干涉级;(2)新的零级明纹的位置。



解： **(1)**

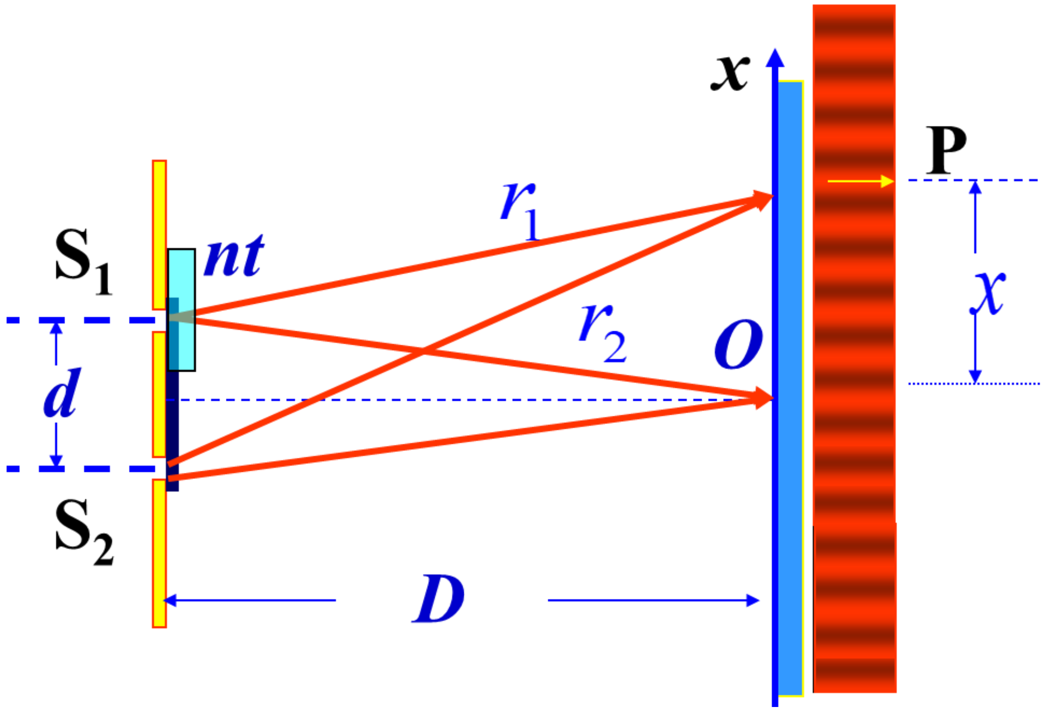
$$\delta = nt - t$$

$$= (n-1)t$$

$$= k\lambda$$

$$k = \frac{(n-1)t}{\lambda}$$

(2)新的零级明纹的位置。



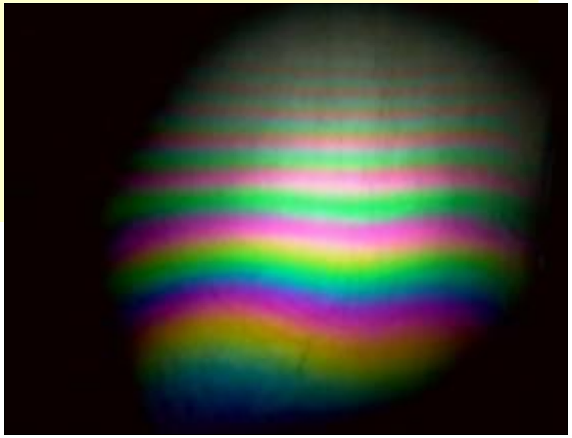
（2） $$\delta = r_2 - r_1 - nt + t = 0$$

$$r_2 - r_1 = nt - t = (n-1)t$$

$$r_2 - r_1 \approx d\sin\alpha \approx d\tan\alpha = d\frac{x}{D}$$

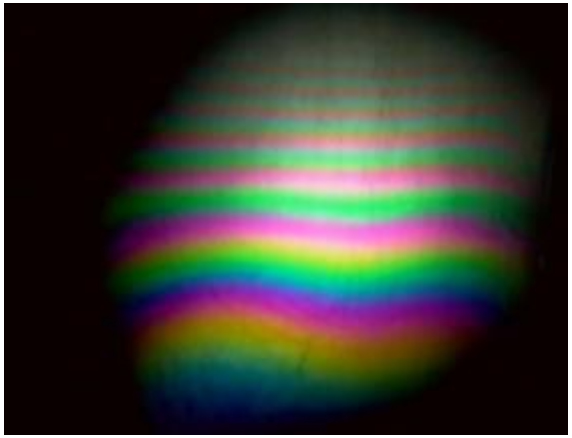
$$x = \frac{D}{d}(n-1)t$$

第十一章 波动光学



白光下的肥皂膜

白光下的油膜



白光下的肥皂膜

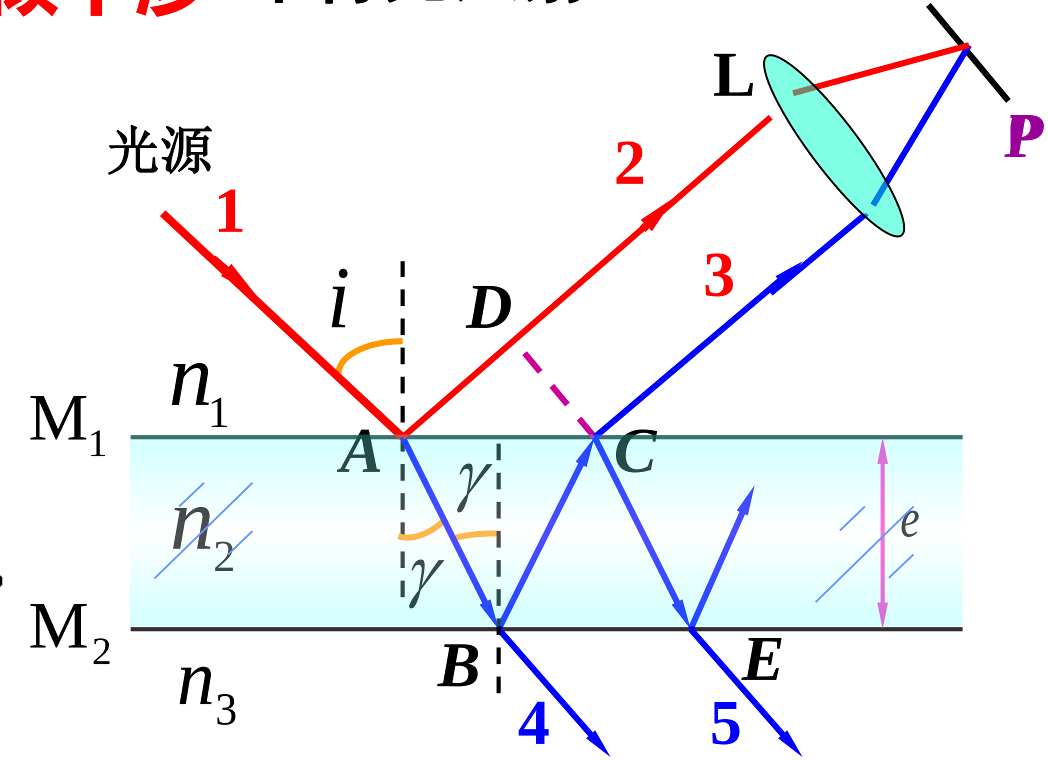
等厚干涉——同一级条纹对应膜的 同一厚度，
由厚度不均匀的薄膜产生

等倾干涉——同一级条纹对应入射光的 同一倾角，
由厚度均匀的薄膜产生

一、平行平面薄膜的等倾干涉 平行光入射

两相干光的光程差

$$\delta = n_2(\overline{AB}+\overline{BC}) - n_1\overline{AD} + \delta_0$$



$$\overline{AB}=\overline{BC}=\frac{e}{\cos\gamma}$$

$$\overline{AD}=\overline{AC}\sin i = 2e\tan\gamma\sin i$$

$$n_1 \sin i = n_2 \sin\gamma$$

$$\delta = \frac{2n_2 e}{\cos\gamma} - 2n_2 e\tan\gamma\sin\gamma + \delta_0$$

$$= 2en_2\cos\gamma + \delta_0$$

$$= 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \delta_0$$

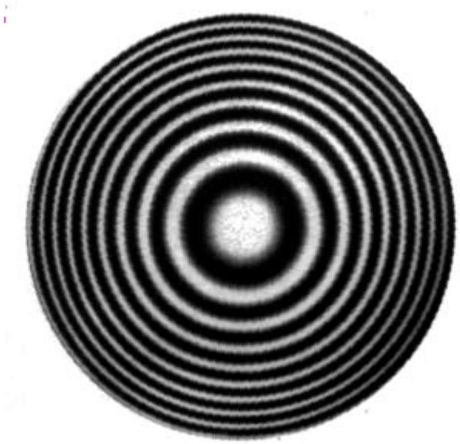
$n_1 < n_2$，$n_3 < n_2$ $\qquad \delta_0 = \lambda/2$

$n_1 < n_2 < n_3$ $\qquad \delta_0 = 0$

$n_1 > n_2 > n_3$ $\qquad \delta_0 = 0$

$n_1 > n_2$，$n_3 > n_2$ $\qquad \delta_0 = -\lambda/2$

$$\boxed{\delta = 2n_2 e\cos\gamma + \delta_0} = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \delta_0$$



1. 条纹位置

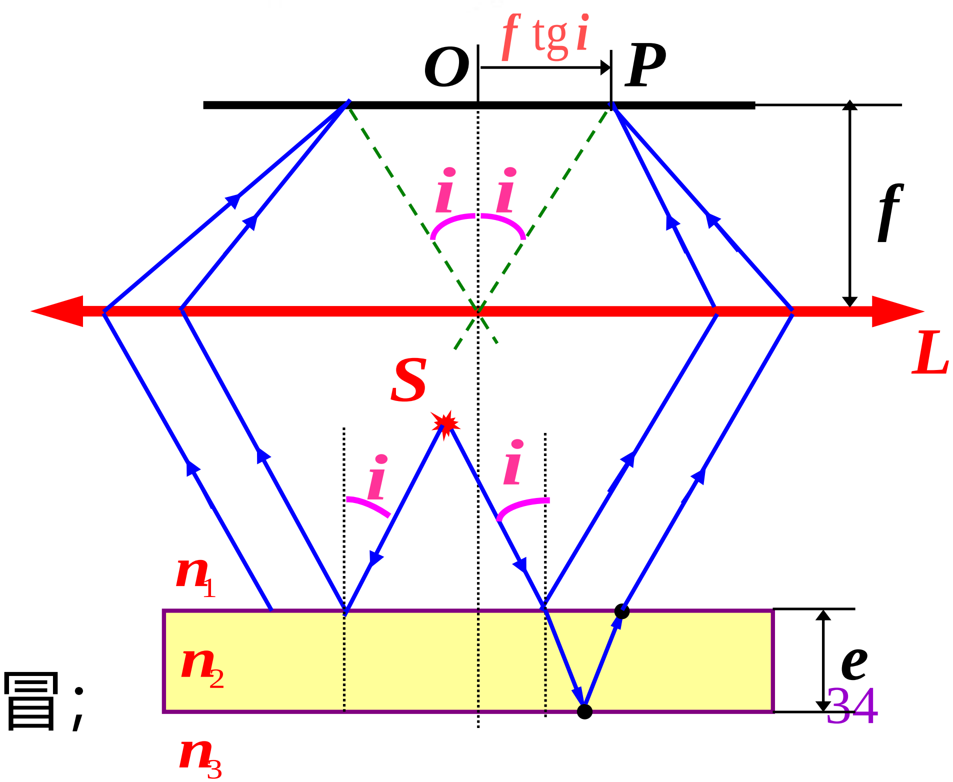
$\delta = k\lambda \;,\; k = 0,1,2,3,\cdots$ 亮纹

$\delta = (k + \frac{1}{2})\lambda$ 暗纹

相邻条纹的光程差变化 $\Delta\delta = \lambda$

2. 光程差取决于入射角

倾角i相同的光线对应同一条干涉条纹 等倾干涉



3. 干涉条纹特点

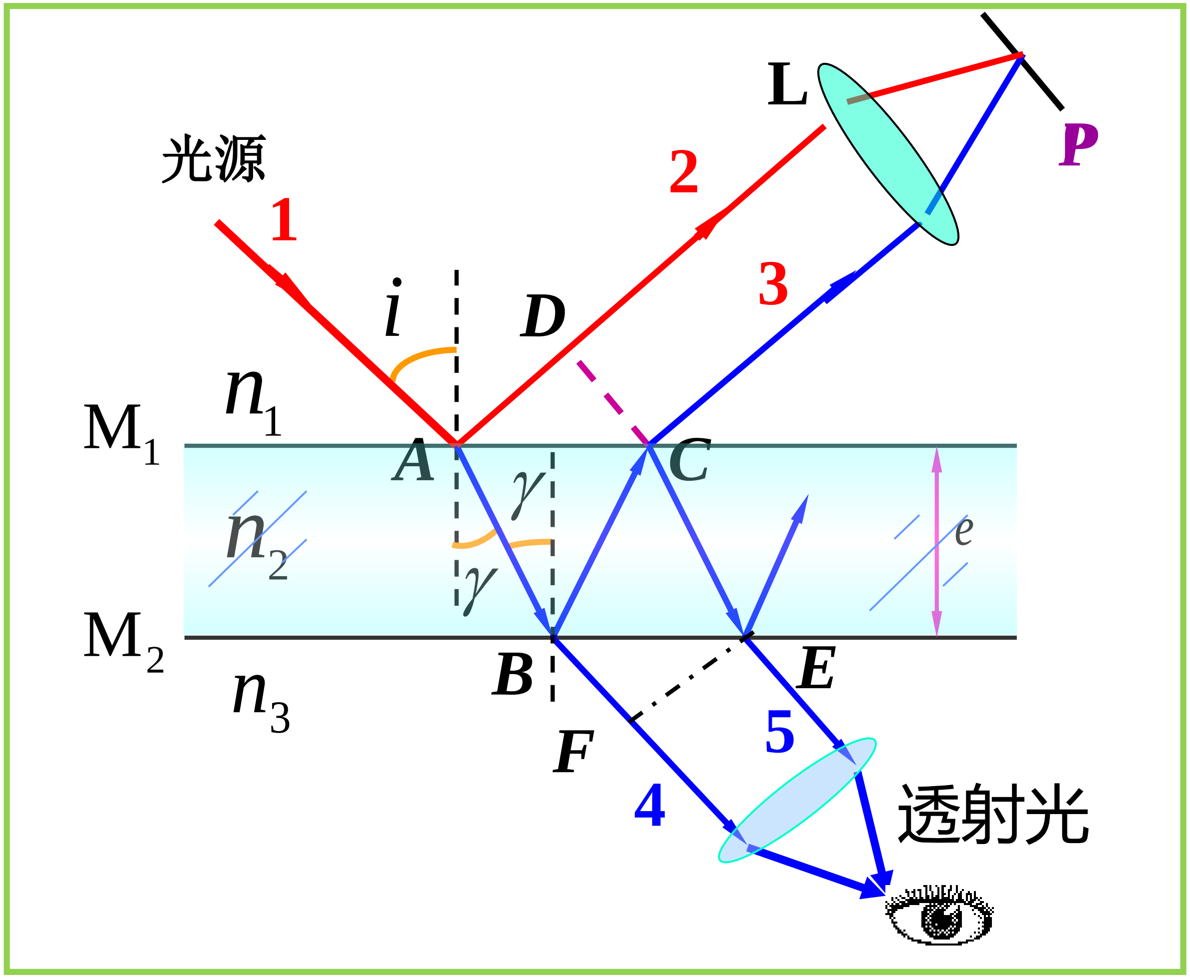
(1) 内疏外密的一系列同心圆弧；

(2) 中心级次高，边缘的级次低；

$$2n_2 e + \delta_0 = k\lambda$$

e增加，中心级次增加，条纹往外冒；

4. 两透射光的干涉



透射光与反射光的光程差为半波长

与反射光的图样互补