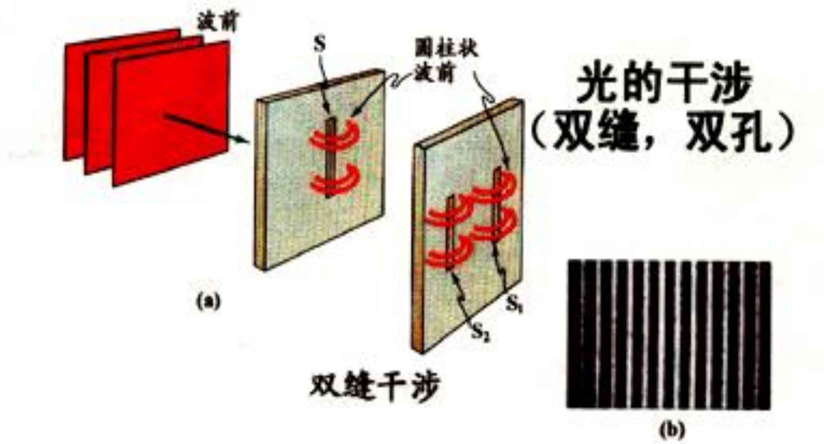
第十一章 波动光学

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



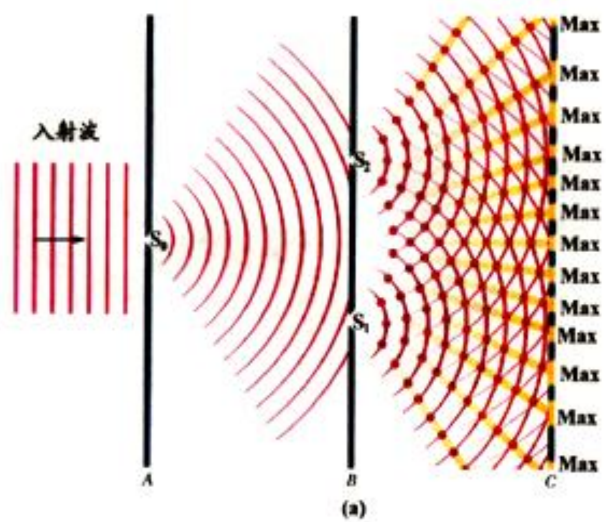
缝宽： 10^{-4} m （S_1和S_2缝宽相同）

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

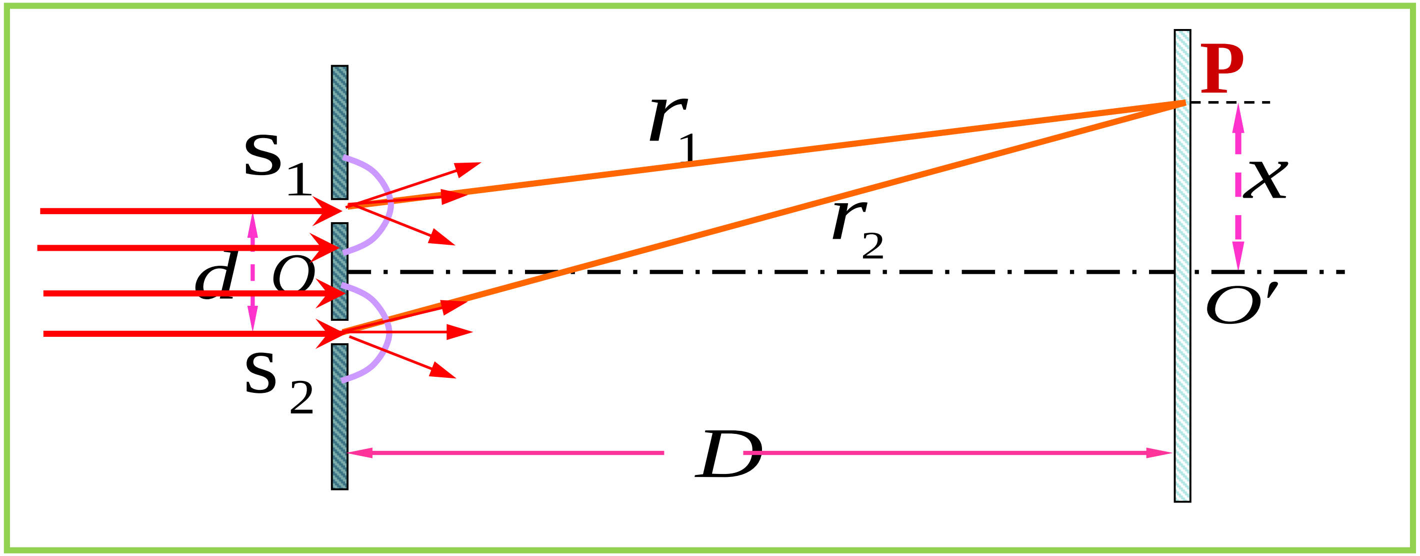
($x<<D$)



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



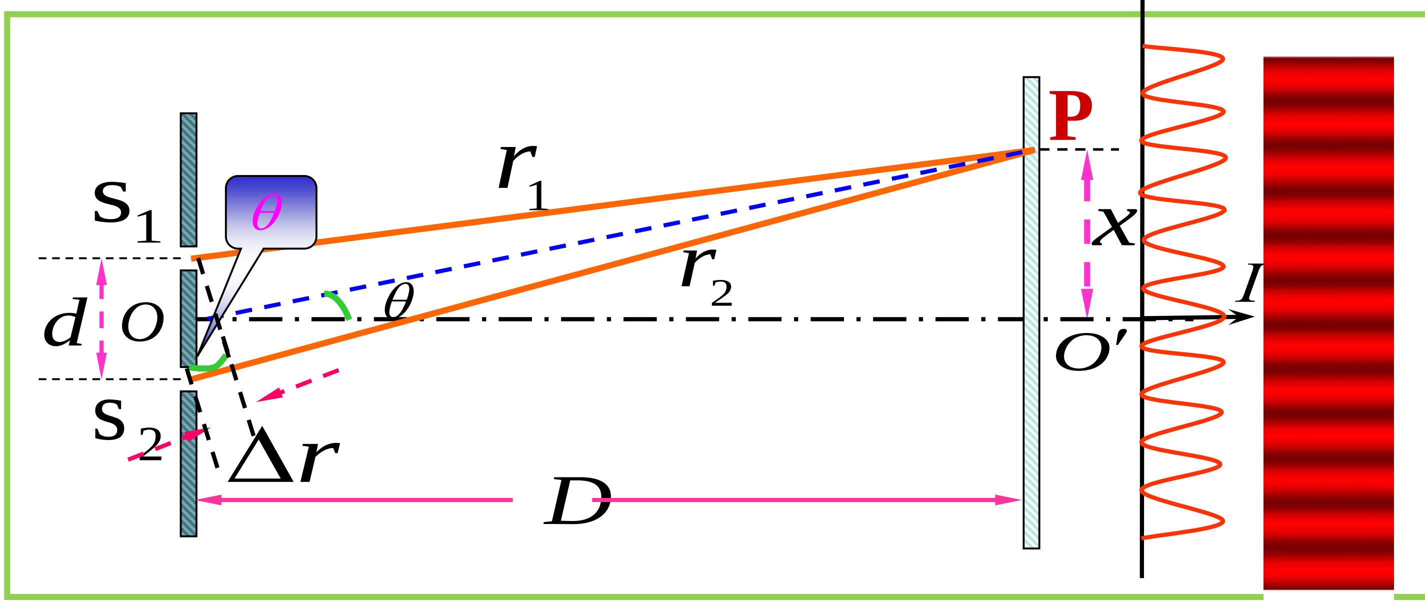
①P点光强

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

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

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

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 $\delta = r_2 - r_1 \approx \Delta r = d\sin\theta \approx d\,\mathrm{tg}\,\theta = d\,\dfrac{x}{D}$

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

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

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

$$\delta = \frac{d}{D}x = \begin{cases} \pm k\lambda, & k = 0,1,2\cdots \quad \text{干涉加强，明纹} \\ \pm(2k-1)\dfrac{\lambda}{2}, & k = 1,2\cdots \quad \text{干涉减弱，暗纹} \end{cases}$$

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

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

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

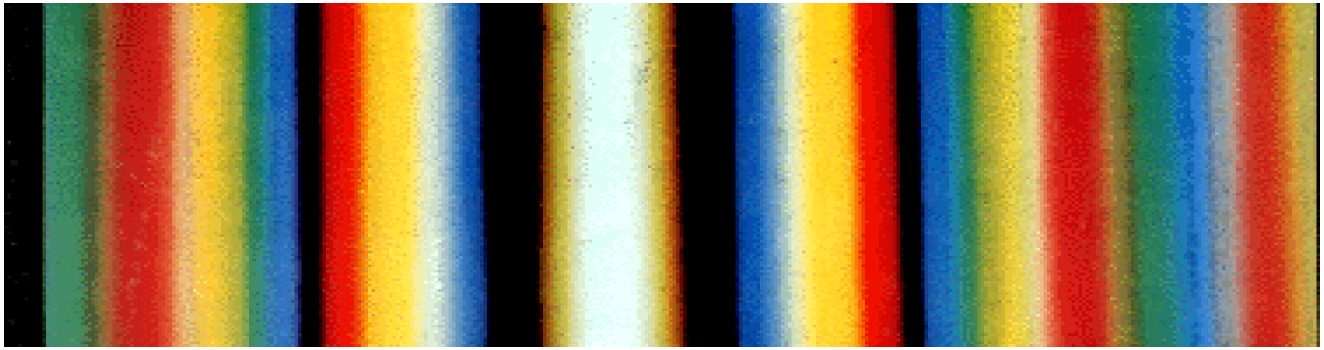
① 中央明纹位置: $\delta = r_2 - r_1 = 0$

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;

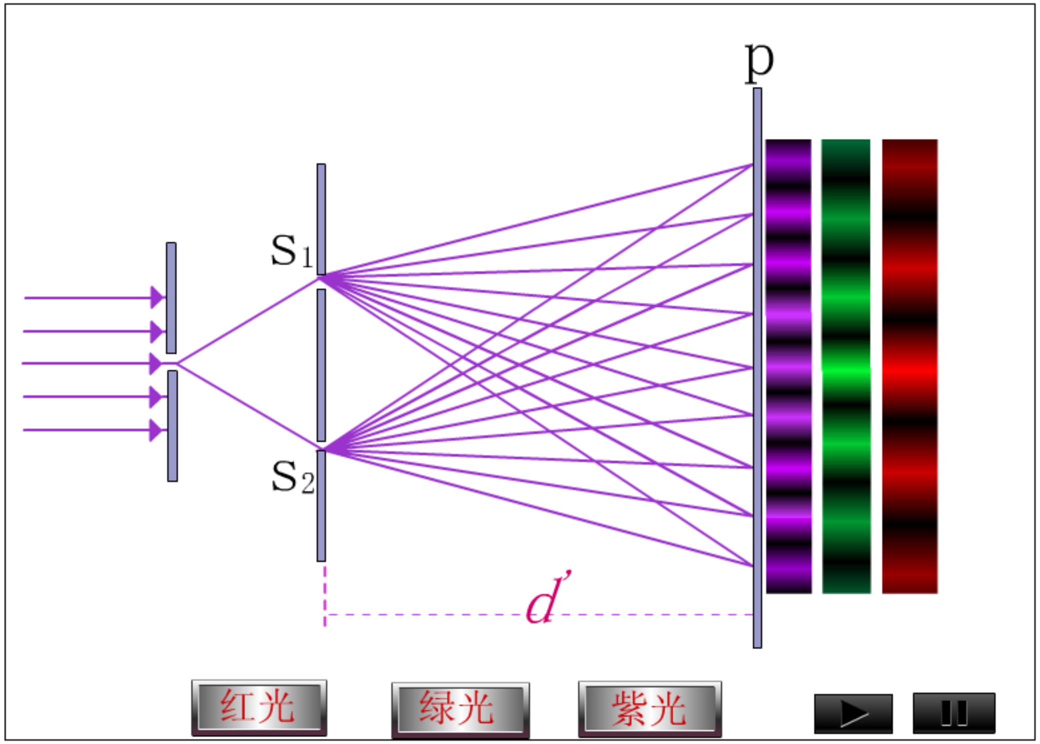
② 白光照射,中央亮条纹仍是白的,其它为彩色。

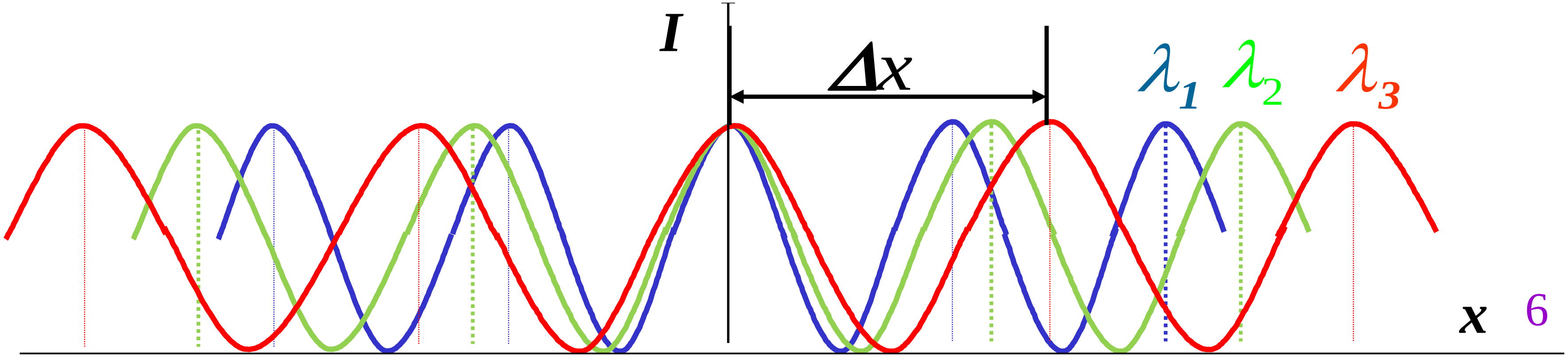


③ 几何参数D，d不变，

波长λ越长，条纹间距Δx越大。

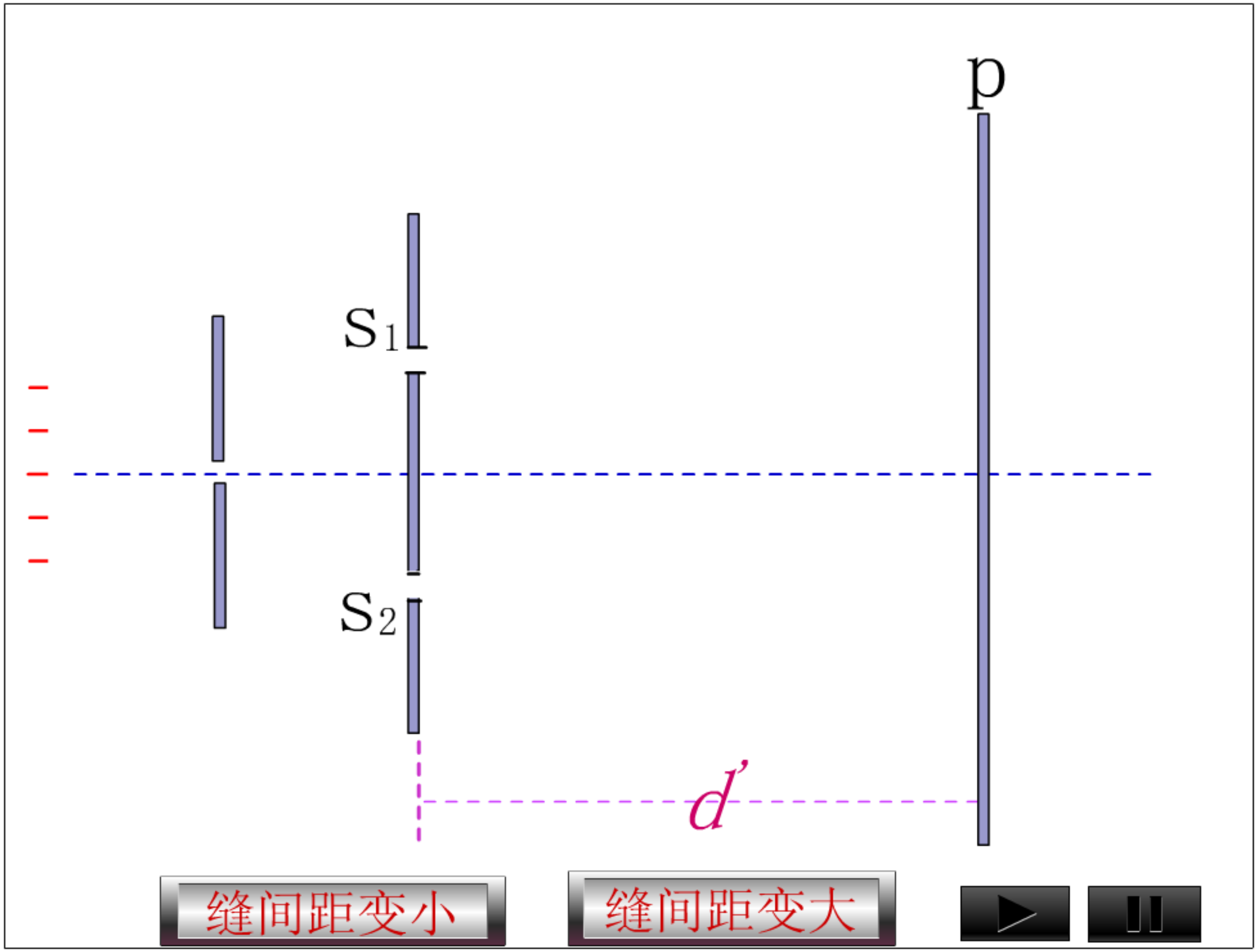
$$\boxed{\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda D}{d}}$$



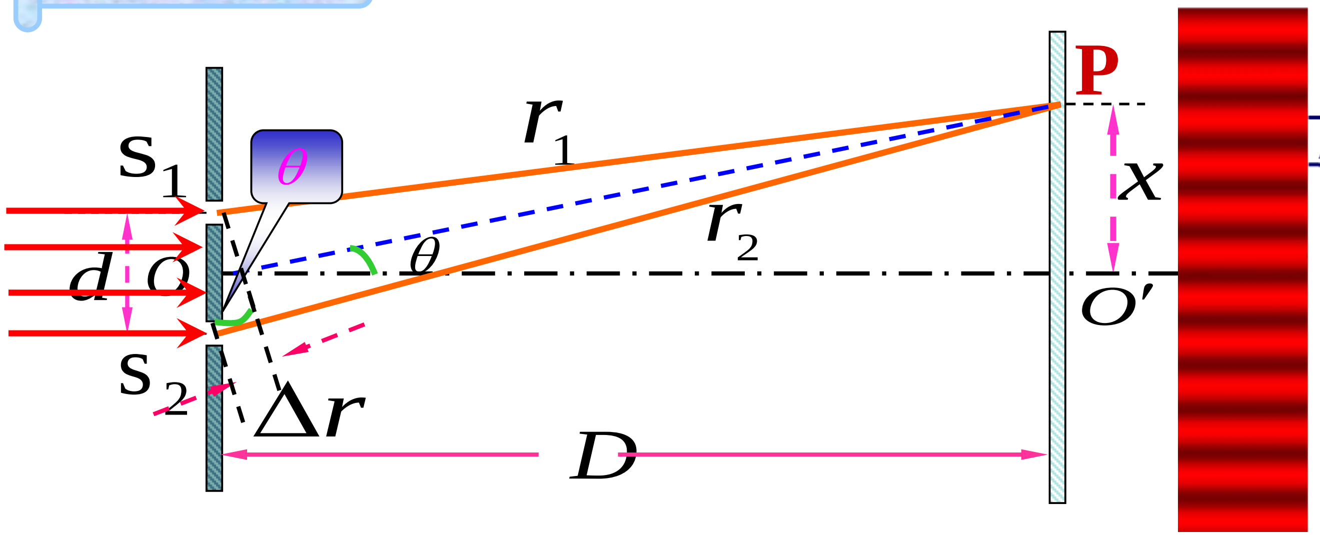


④波长λ不变，几何参数d越小（或D越大），条纹间距Δx越大，越易于分辨。

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



请思考 下述情况中，干涉条纹将如何变化?



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

$$x_{k明} = \pm k\frac{\lambda D}{d}$$

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

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

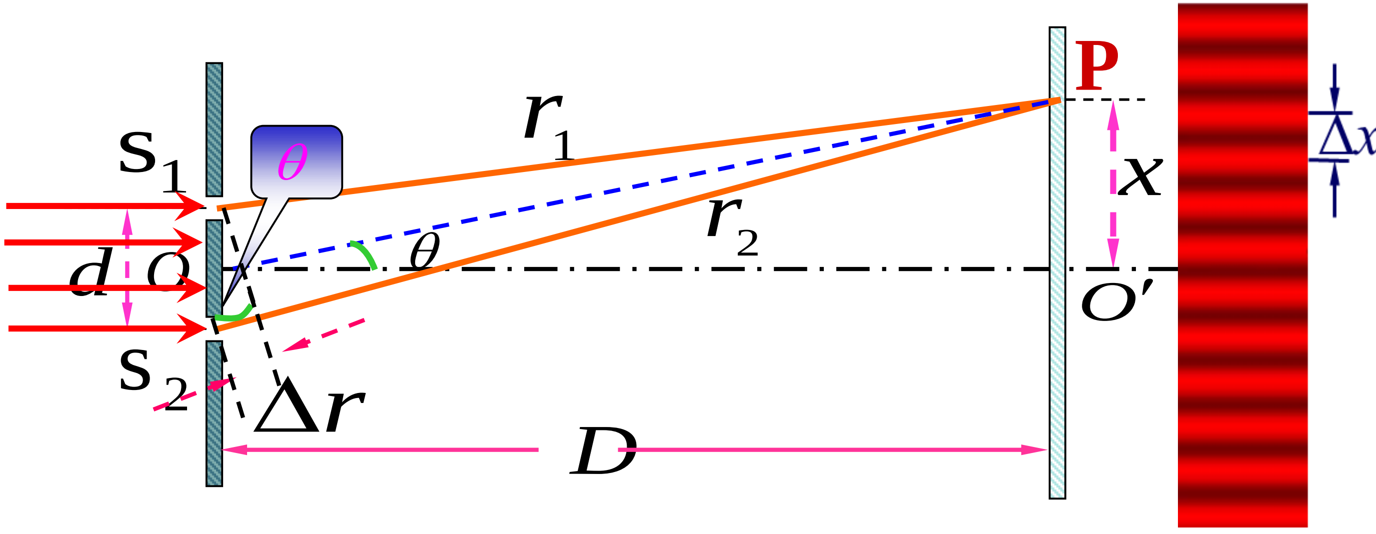
(1) 把整个装置浸入水中

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

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

(2) 在缝S_1后插入一块厚度为t，折射率为n透明薄片

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



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

$$x_{k明} = \pm k\frac{\lambda D}{d}$$

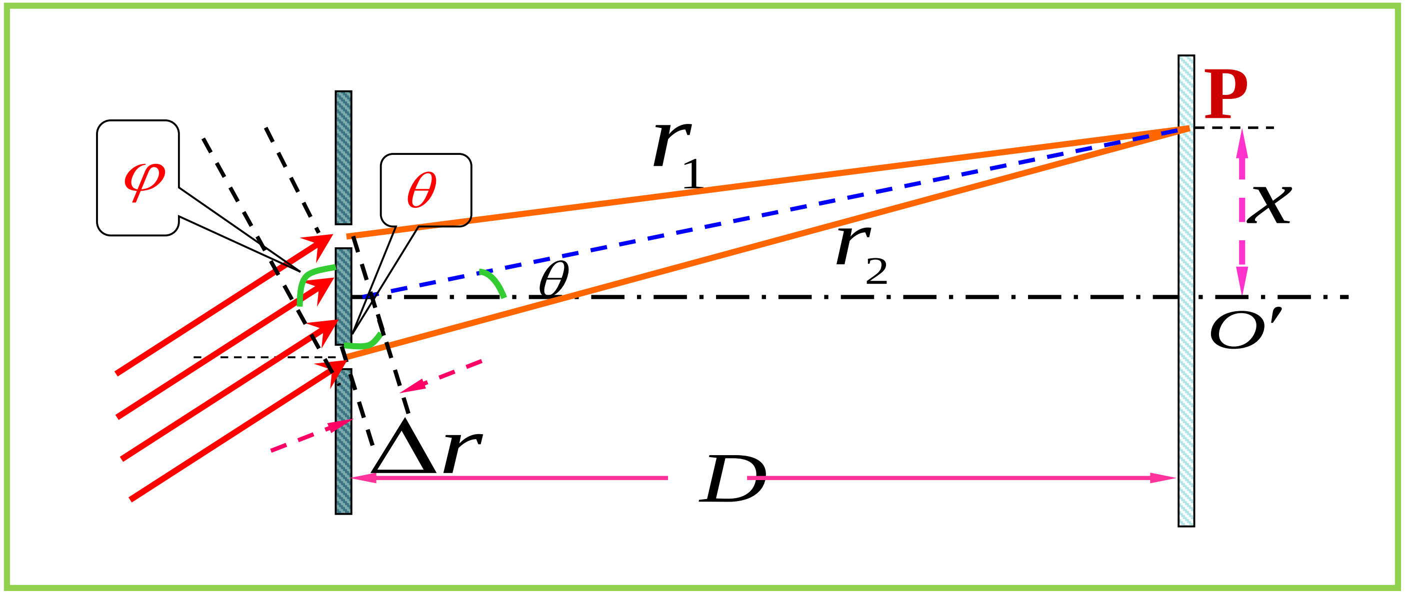
$$x_{暗} = \pm(2k-1)\frac{\lambda D}{2d}$$

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

（3）分别用红、蓝滤色片各遮住S_1和S_2

（4）平行光斜入射，条纹如何变化?

（4）平行光斜入射，条纹如何变化？

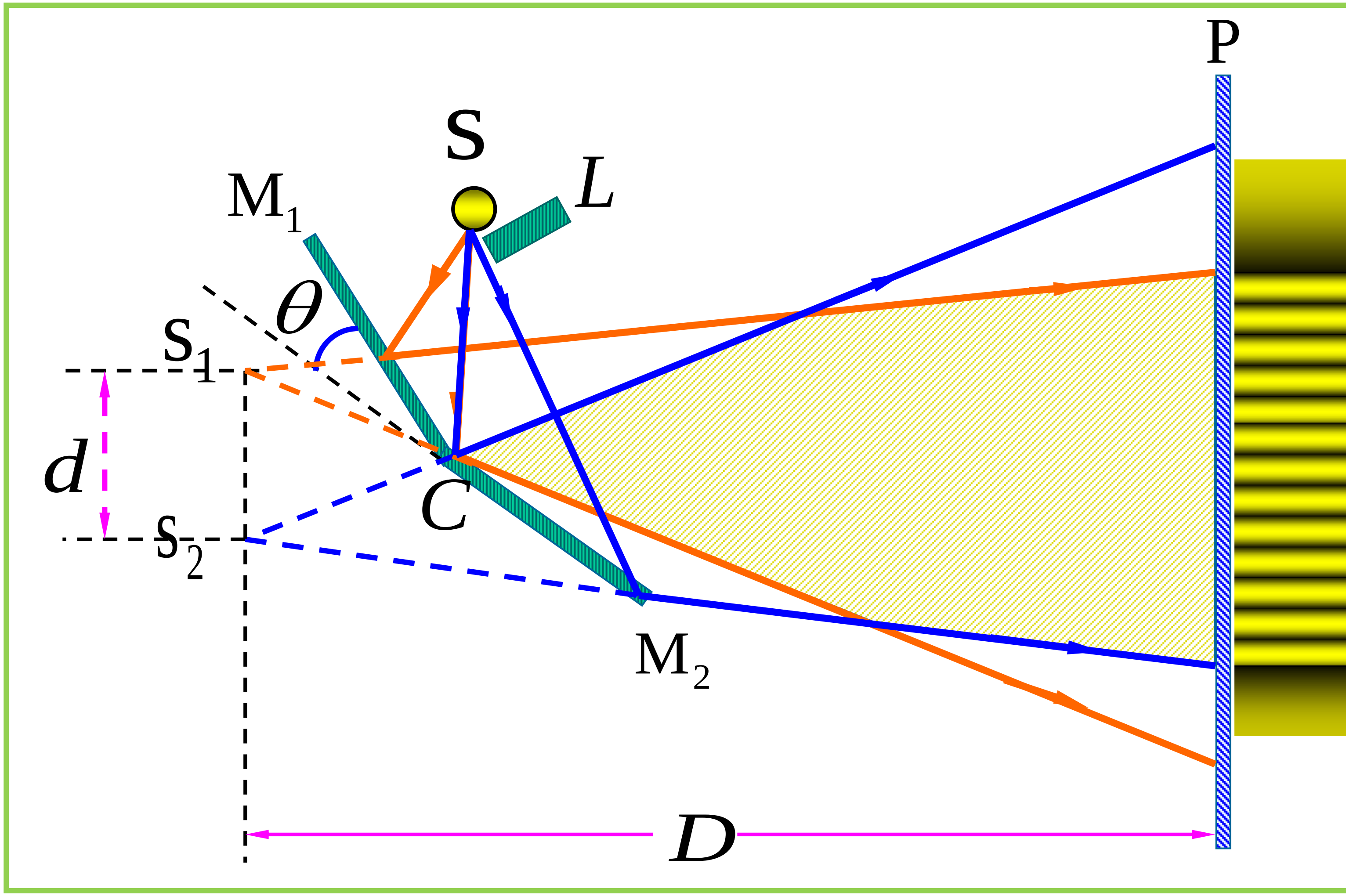


斜向上时：$\delta=(r_2-r_1)-d\sin\varphi\approx d\sin\theta-d\sin\varphi$

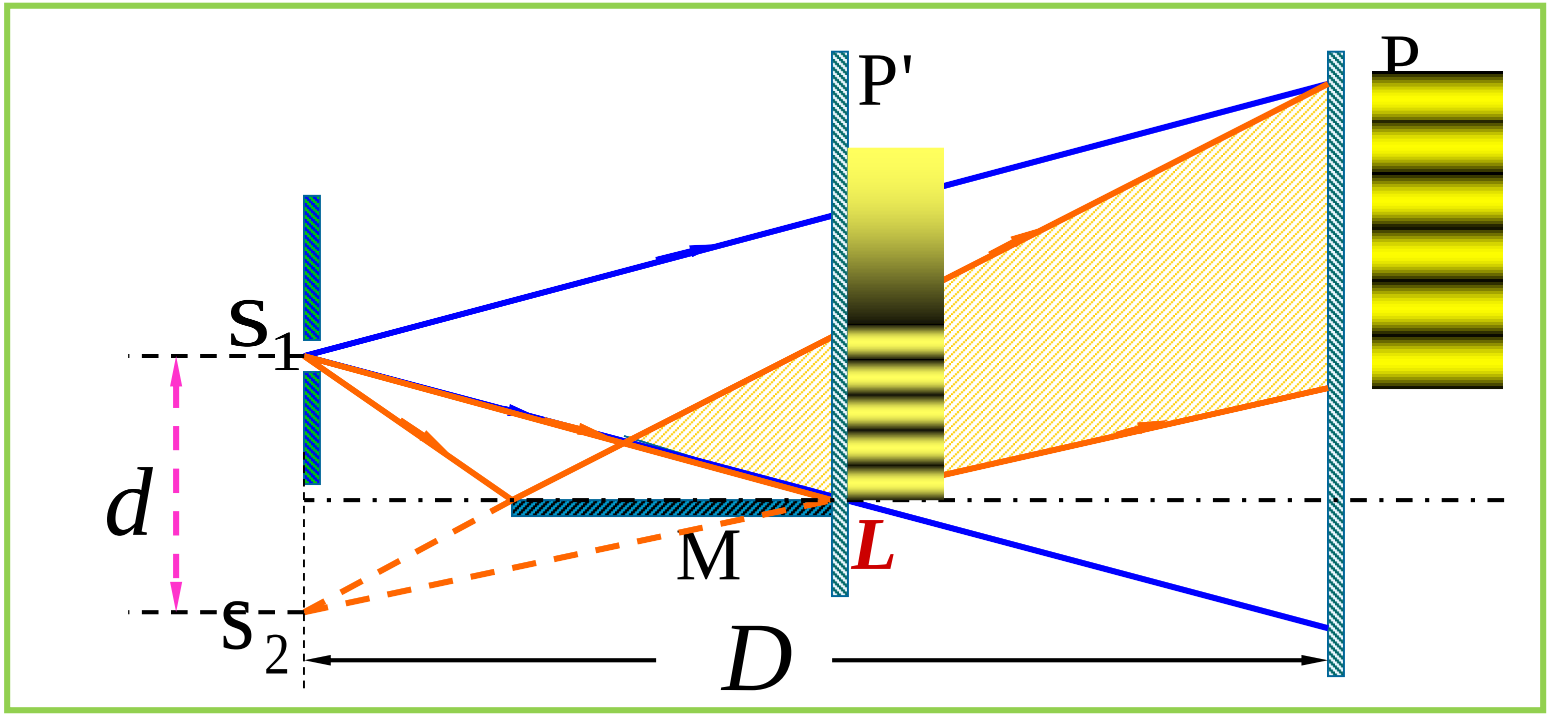
斜向下时：$\delta=(r_2-r_1)+d\sin\varphi\approx d\sin\theta+d\sin\varphi$

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.

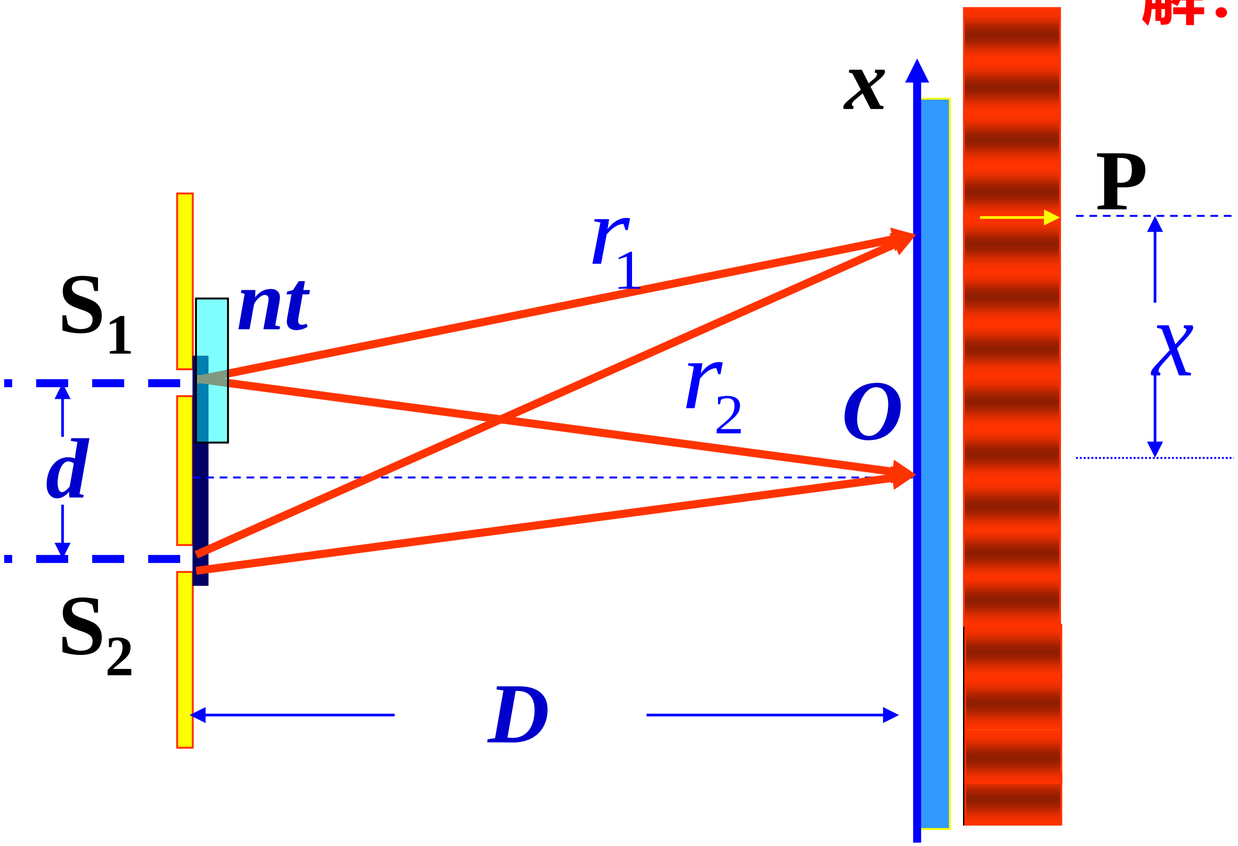
解: (1) $$x_k = \pm \frac{D}{d} k\lambda, \quad k = 0, \quad 1, \quad 2, \cdots$$

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

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

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

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)

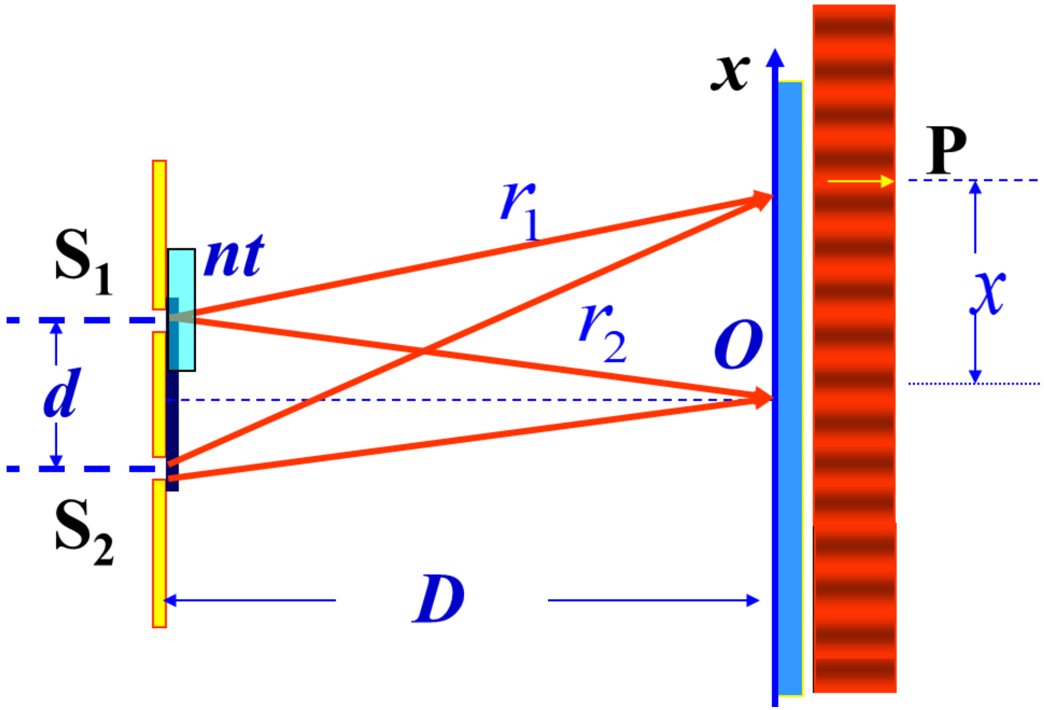
$$\delta = nt - t$$

$$= (n-1)t$$

$$= k\lambda$$

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

(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

11.1 光的干涉

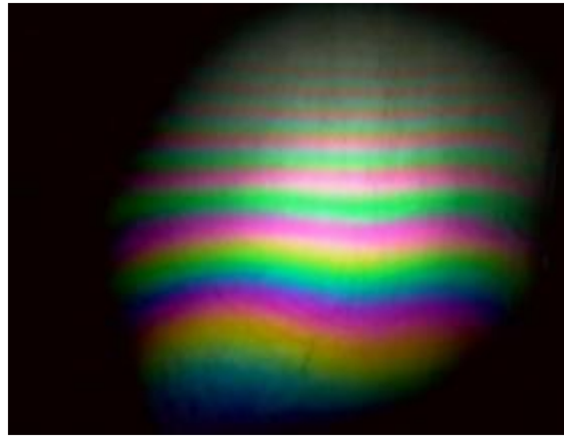
11.2 薄膜干涉 分振幅法获得相干光

11.3 光的单缝衍射

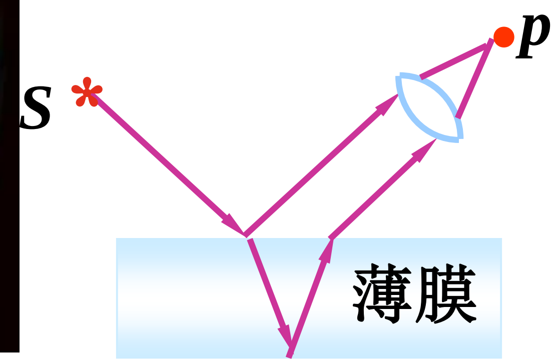
11.4 光栅衍射

11.5 光的偏振

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

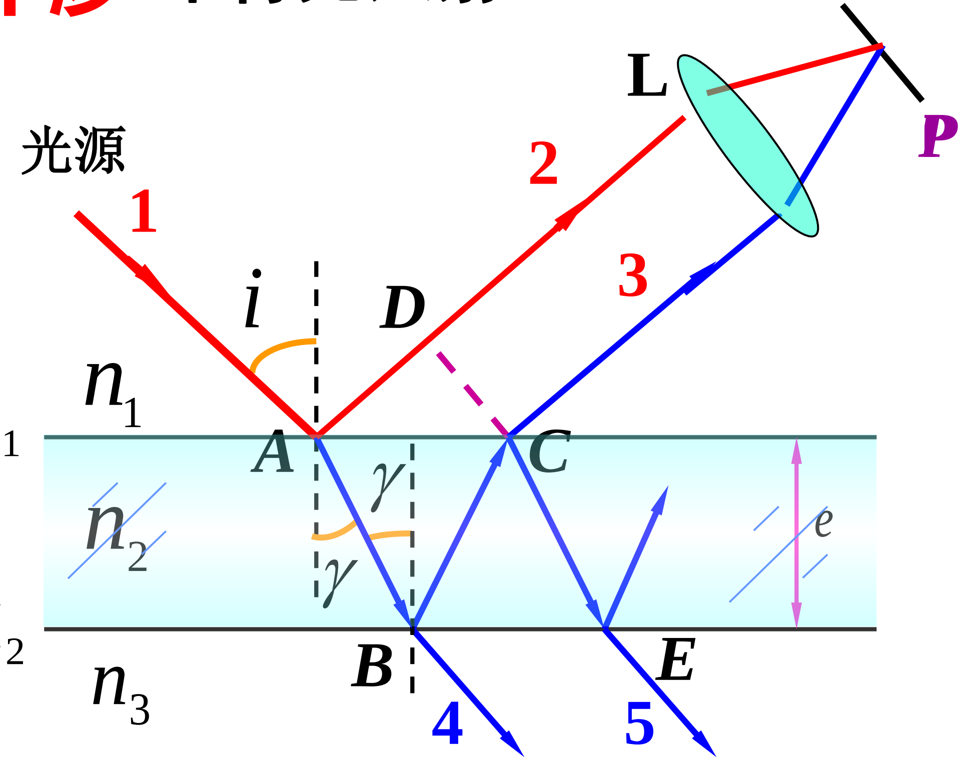
1. 两反射相干光的光程差

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

$$\left.\begin{aligned}
&\overline{AB}=\overline{BC}=\frac{e}{\cos\gamma}\\
&\overline{AD}=\overline{AC}\sin i = 2e\tan\gamma\sin i\\
&n_1\sin i = n_2\sin\gamma
\end{aligned}\right\}$$

M_1

M_2



$$\delta = \frac{2n_2e}{\cos\gamma} - 2n_2e\tan\gamma\sin\gamma + \delta_0$$

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

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

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

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

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

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

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

两表面平行的薄膜，结论普遍适用。

2. 条纹位置

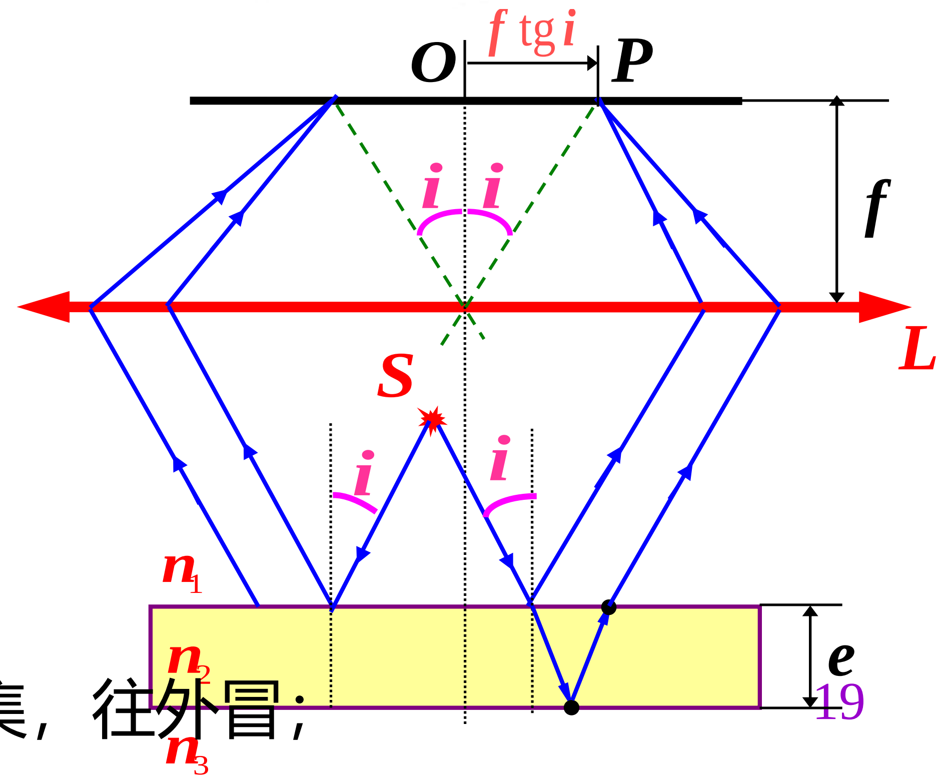
$\delta = k\lambda \;,\; k = 0,1,2,3,\cdots$　　亮纹

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

相邻条纹的光程差变化 $\Delta\delta = \lambda$

3. 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



4. 干涉条纹特点

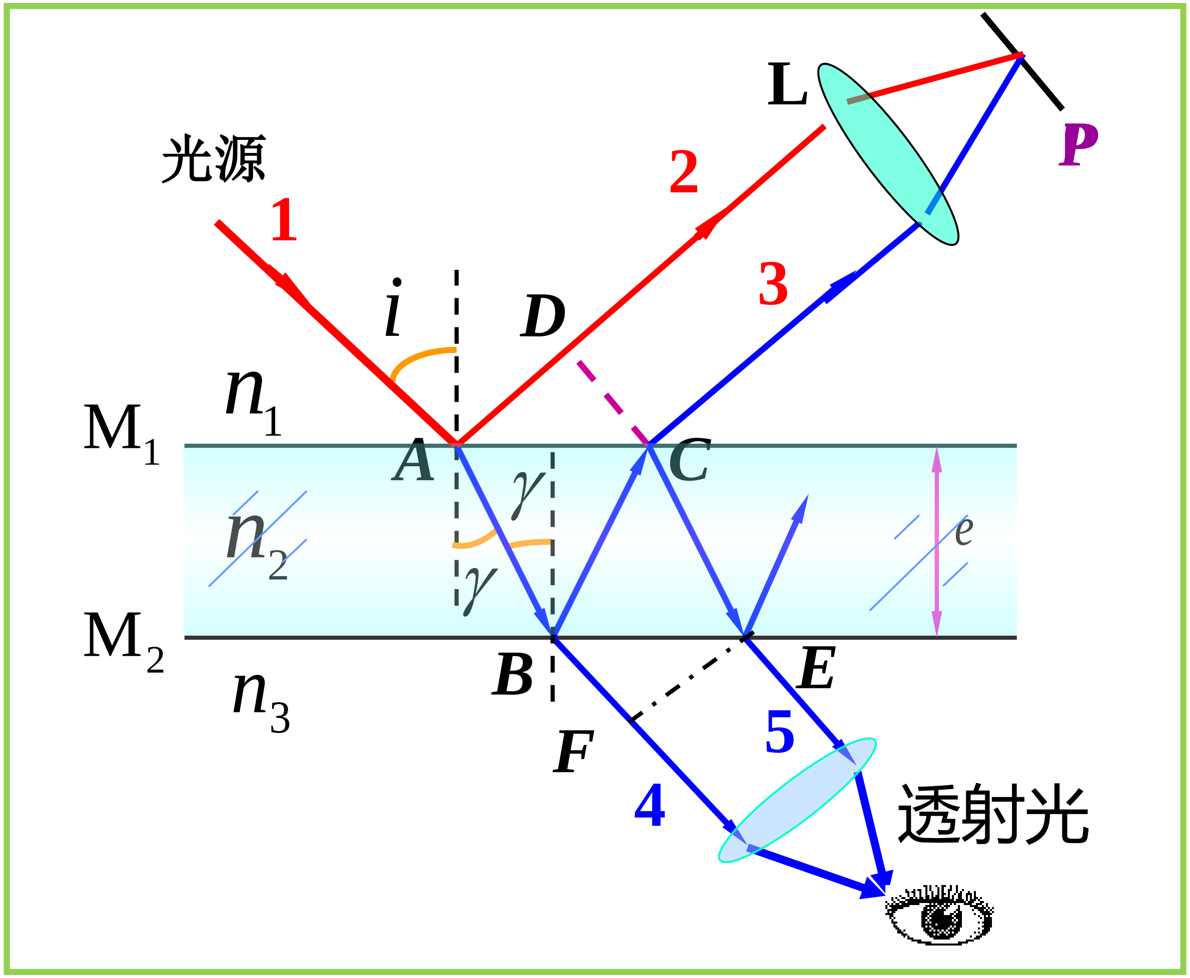
(1) 内疏外密的一系列同心圆弧；

(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，条纹更密集，往外冒；

5. 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

二、等厚干涉

1. 劈尖干涉

若薄膜两个表面不平行，便形成劈的形状，称为劈形膜。

(1)光程差

$$\delta \approx 2n_2 e\cos\gamma + \delta_0$$

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

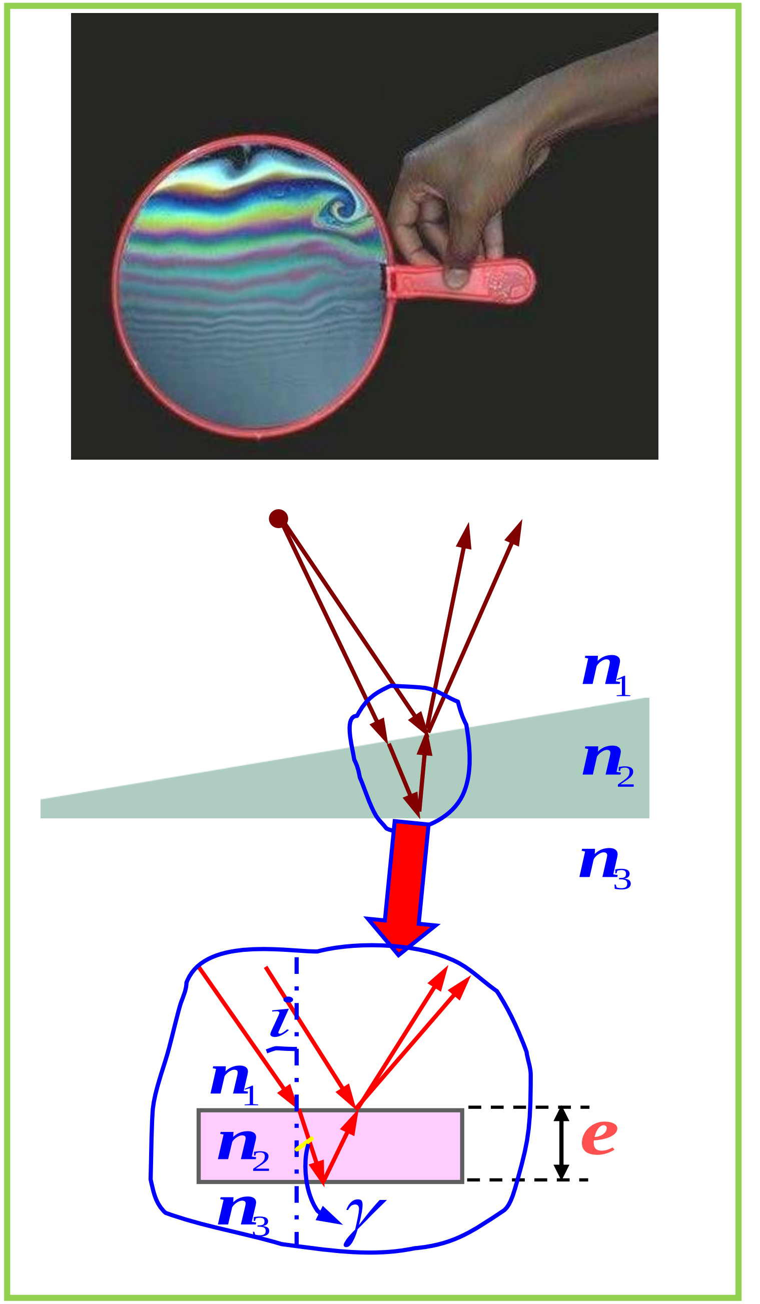
半波损失情况根据具体情况决定

通常，光垂直入射

$$i = \gamma = 0 \qquad \boxed{\delta \approx 2n_2 e + \delta_0}$$

光程差随膜的厚度变化→等厚干涉

空气薄膜： $\delta \approx 2ne + \dfrac{\lambda}{2}$



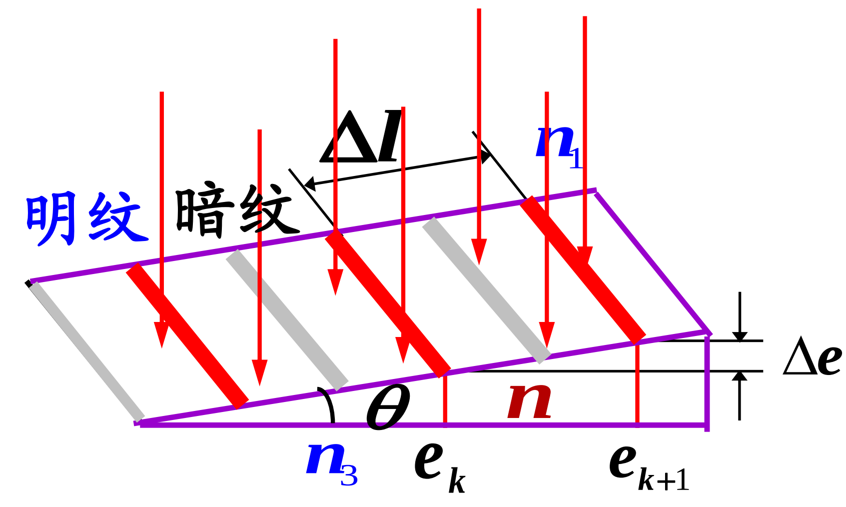
(2) 条纹位置

$$\delta = 2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad k=0,1,2,3,\cdots$$

明纹

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

暗纹



(3)干涉条纹特点

(a) 平行于棱边的明暗相间直条纹;

(b) 膜越厚，远离棱边干涉级次越高;

(c) 相邻条纹

相邻条纹的光程差：$\Delta\delta = \lambda = 2n \cdot \Delta e$

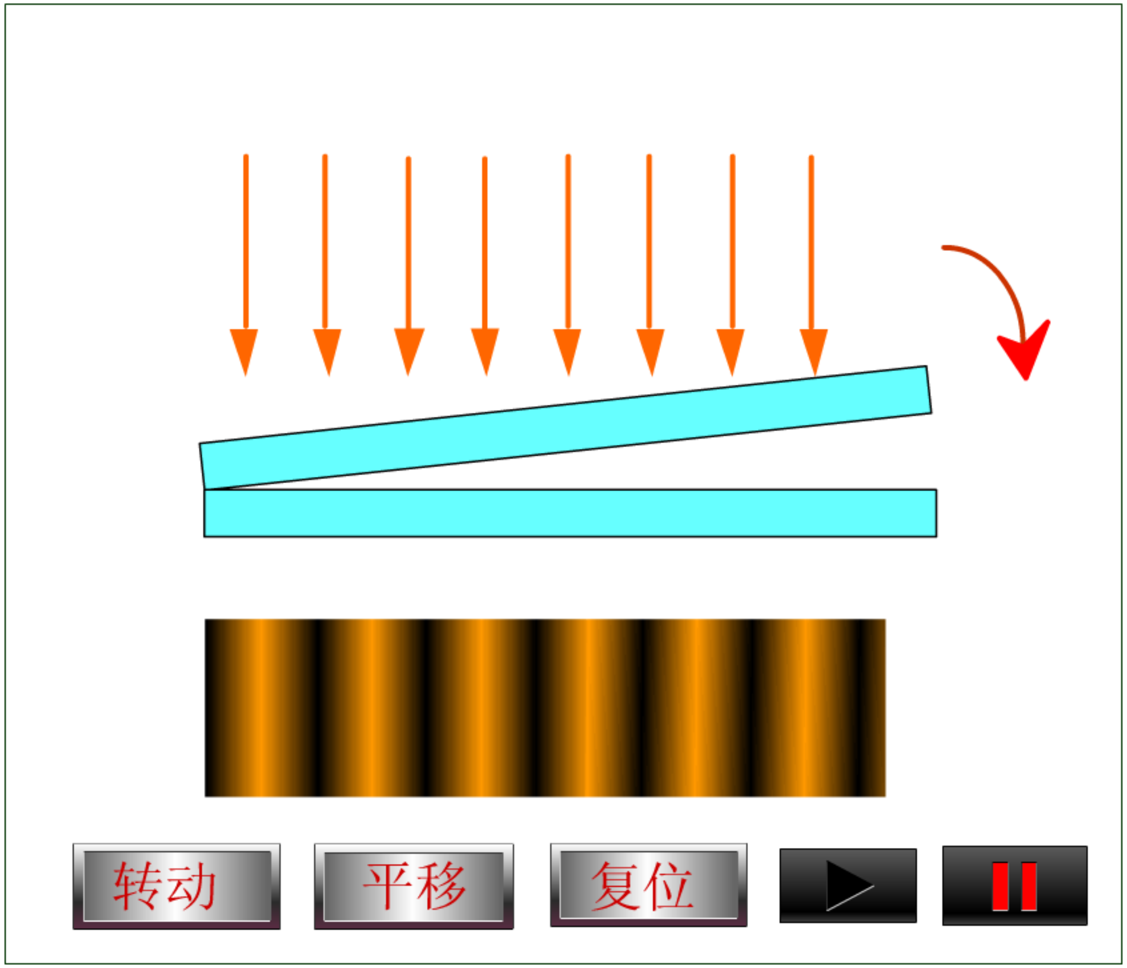
相邻条纹的膜厚差：$\Delta e = \dfrac{\lambda}{2n}$

条纹等间距：$\Delta l = \dfrac{\Delta e}{\sin\theta} \approx \dfrac{\lambda}{2n\theta}$

(d) 棱边明（或暗）条纹：依赖于半波损失

(4) 干涉条纹变化

$$\delta \approx 2n_2 e + \delta_0 \qquad \Delta l = \frac{\Delta e}{\sin\theta} \approx \frac{\lambda}{2n\theta}$$

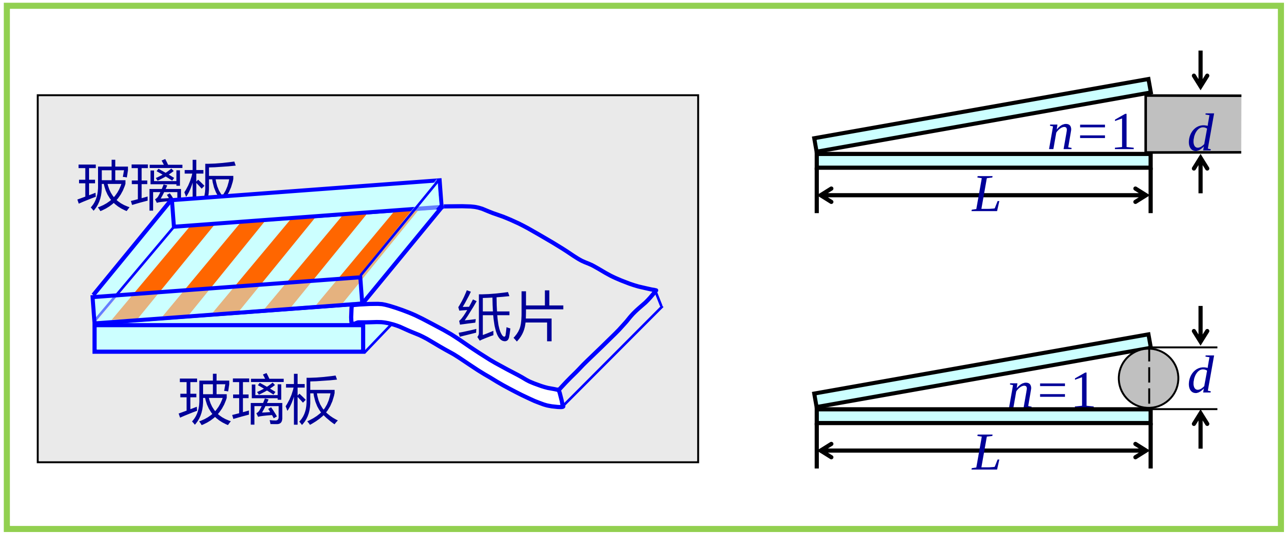


(a) 劈角变小；　　条纹变疏，向棱的方向移动

(b) 劈角不变，上表面平移　条纹疏密不变，向棱的方向移动

(5) 应用

① 测量薄膜厚度或细丝直径，测量微小长度或厚度的变化



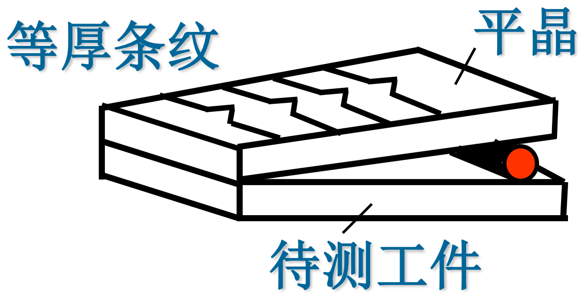
已知玻璃板底边长度L，测出相邻亮（暗）条纹间距Δl，则

$$d=\frac{\lambda L}{2\Delta l}$$

② 检验工件表面的质量

请问：此待测工件表面上，
有一条凹纹还是一条凸纹？

答：凸纹



2.牛顿环

(1)光程差

$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}$$

(2) 条纹位置

明纹 $\delta = 2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda\,,\ k = 0, 1, 2, \cdots$

暗纹 $\delta = 2ne_k + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, k = 0, 1, 2, \cdots$

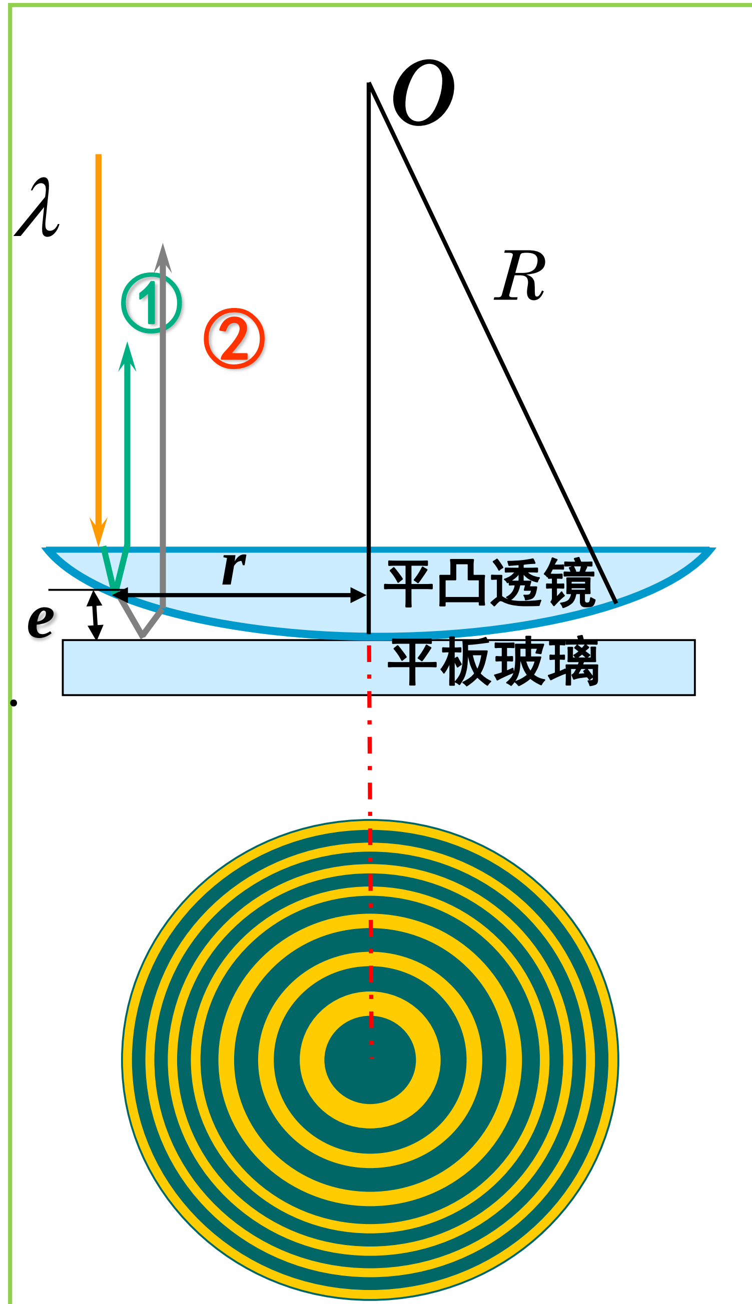
(3)干涉条纹特点

(a) 明暗相间同心圆环，接触点为暗点

(b) 圆环半径 $r_k^2 = R^2 - (R - e_k)^2 \approx 2Re_k$

空气膜:

$$r_k = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{(2k+1)R\lambda}{2}} & \text{明纹(中心)半径} \\ \sqrt{kR\lambda} & \text{暗纹(中心)半径} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \cdots$$



$r_k = \sqrt{kR\lambda}$

(c)暗环半径与 k 的平方根成正比

$$\Delta r = (\sqrt{(k+1)} - \sqrt{k})\sqrt{R\lambda}$$

条纹外密内疏

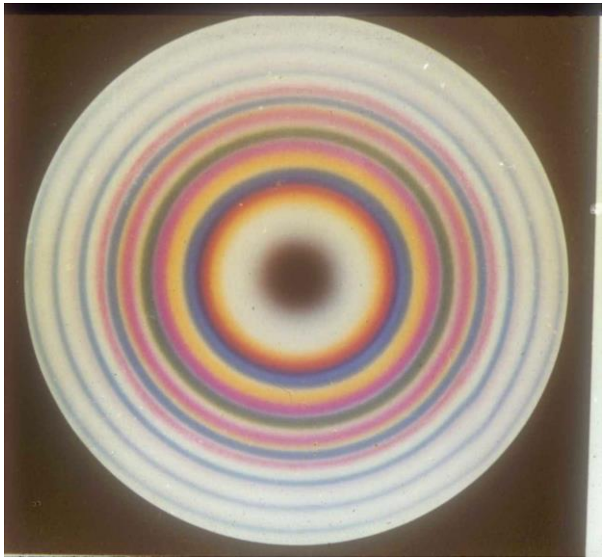
(d)越接近环中心，条纹级次越低

(4) 干涉条纹变化

(a)凸透镜略微上移，膜厚度变大，条纹内陷

等倾干涉　　膜厚度变大，条纹外冒

(b)白光入射，同一级条纹，λ 越大，半径越大→由紫到红的彩色条纹



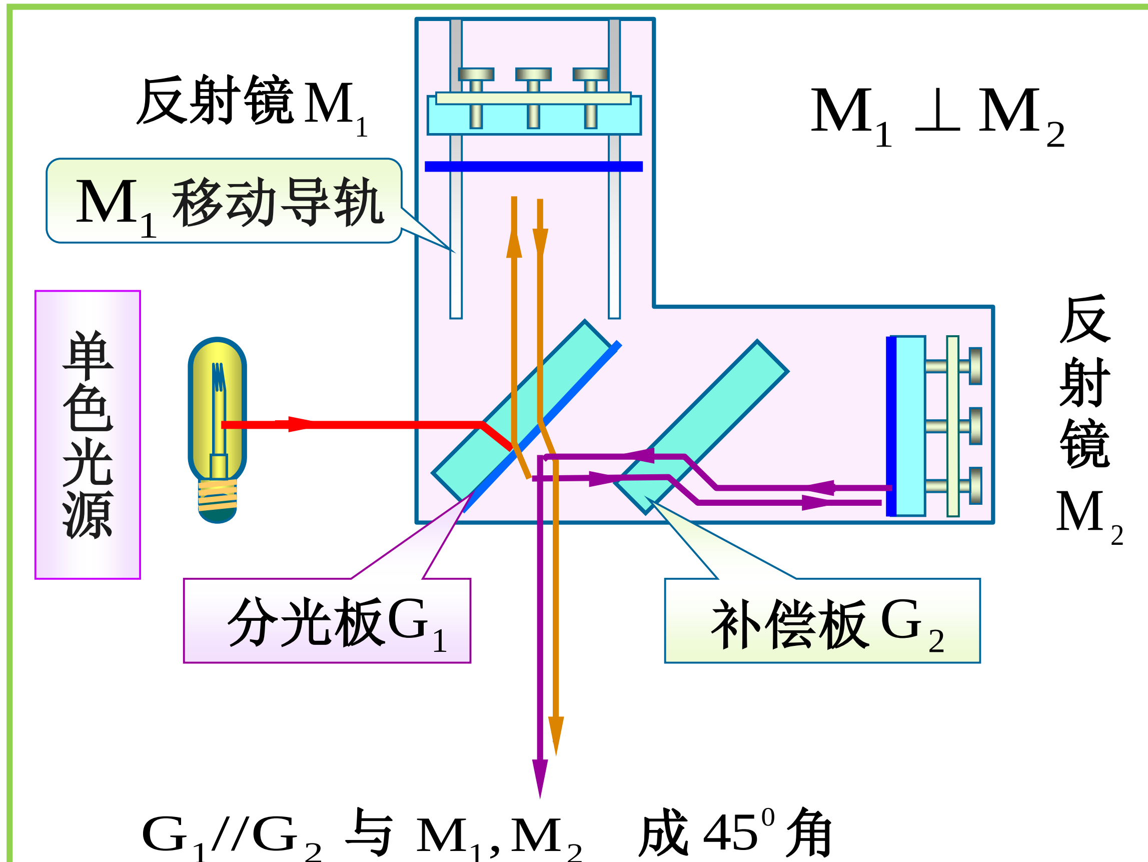
三、迈克尔逊干涉仪

迈克尔逊
A.A.Michelson

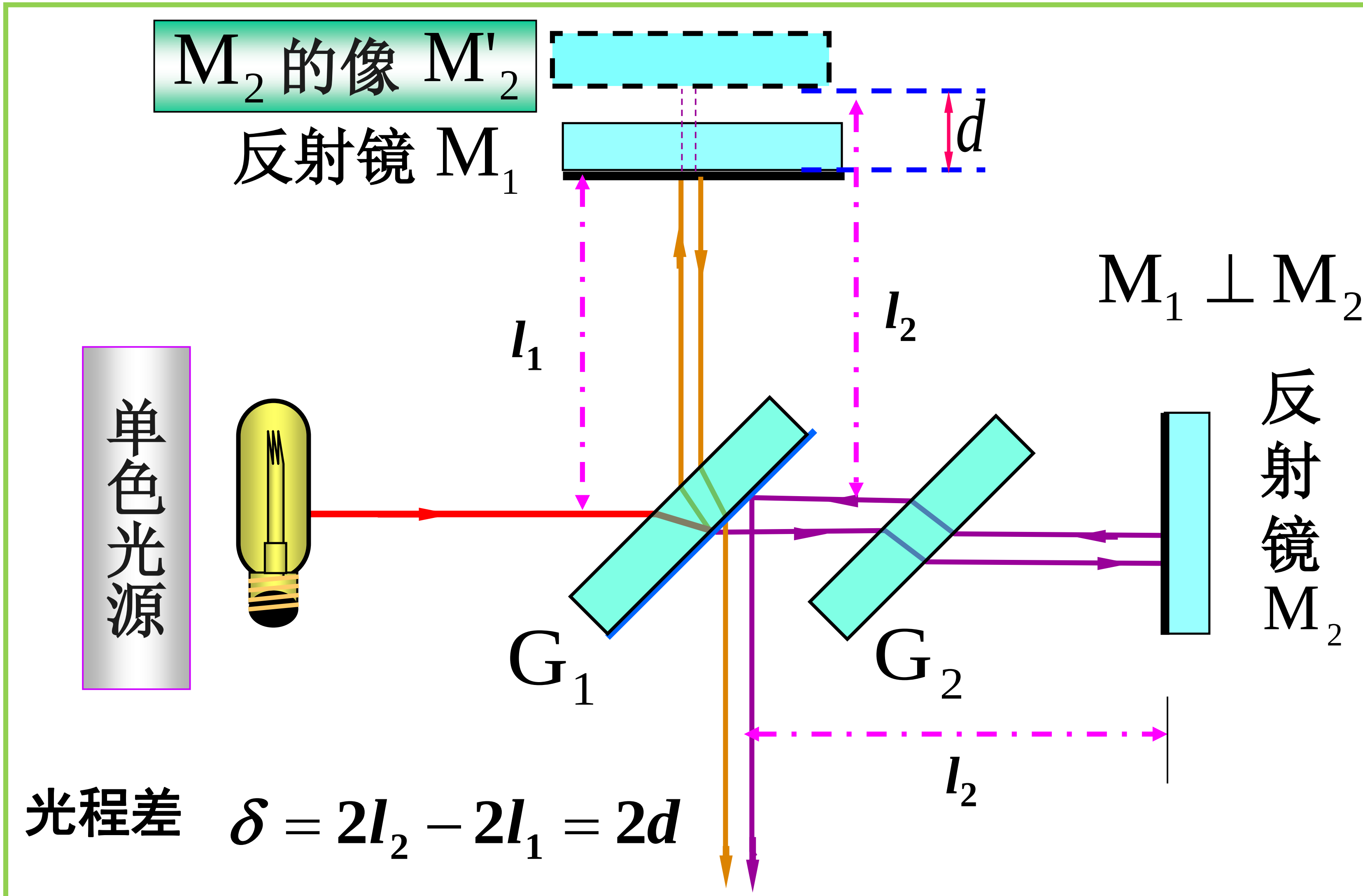
美籍德国人

——因创造精密光学仪器，用以进行光谱学和度量学的研究，并精确测出光速，获1907年诺贝尔物理奖。

迈克尔逊干涉仪——

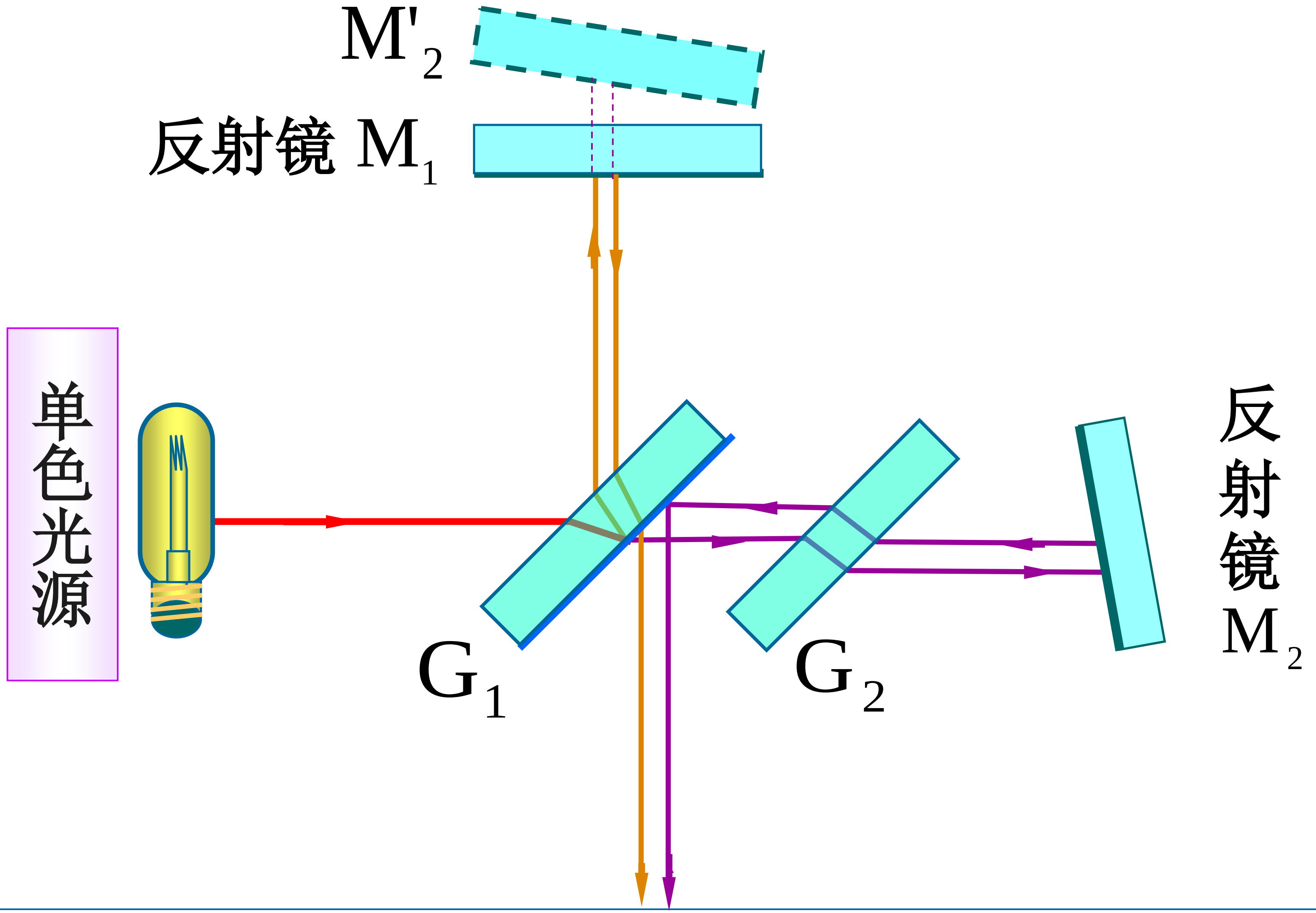


反射镜M_1
$M_1 \perp M_2$
M_1 移动导轨
单色光源
反射镜M_2
分光板G_1
补偿板G_2
$G_1 // G_2$ 与 M_1, M_2 成 45^0 角



光程差 $\delta = 2l_2 - 2l_1 = 2d$

当 M_1 与 M_2 垂直时可以获得等倾干涉图象



当M_1不垂直于 M_2 时，可形成劈尖型等厚干涉条纹.

迈克尔孙干涉仪的主要特性及应用

两相干光束在空间完全分开，

移动反射镜或在光路中插入介质片-----改变光程差

移动反射镜

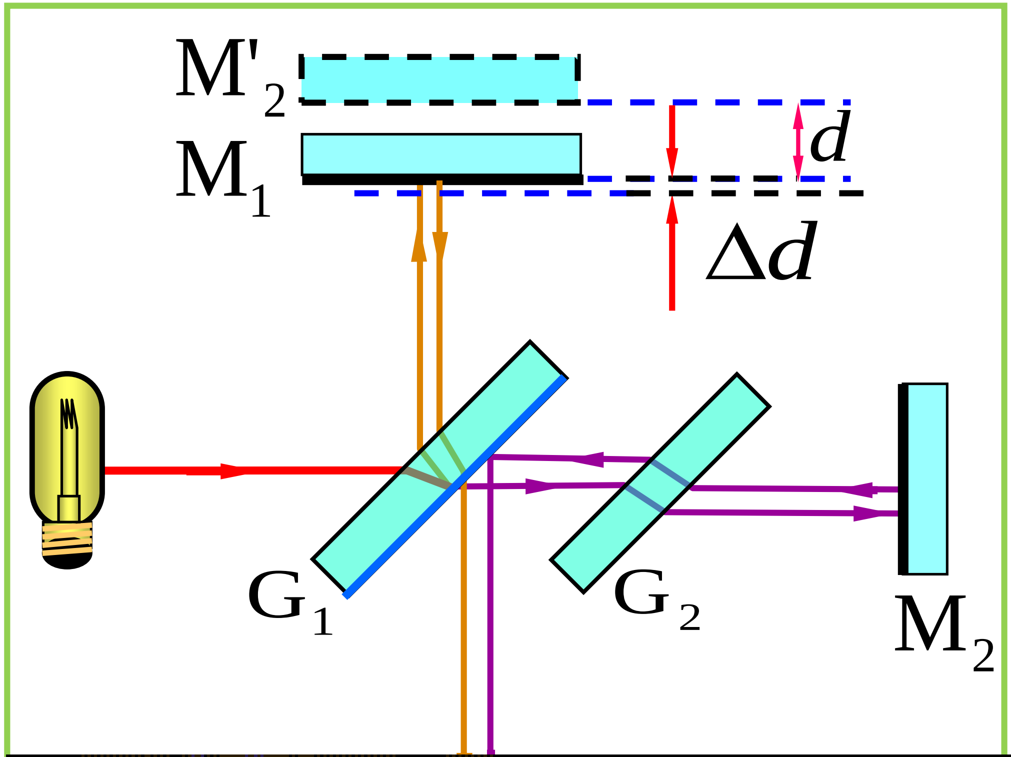
$$\delta = 2l_2 - 2l_1 = 2d$$

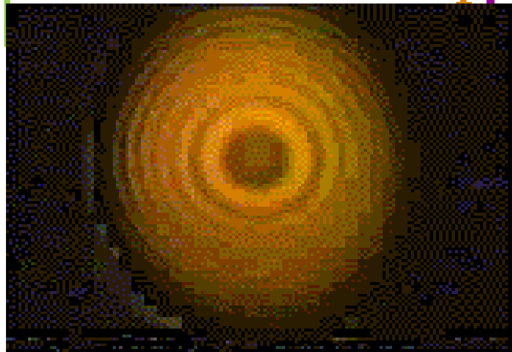
$$\Delta\delta = 2\Delta d$$

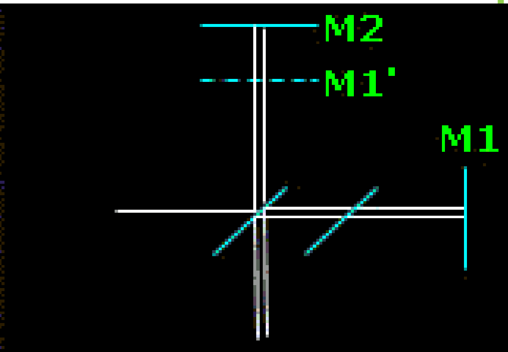
当M_1移动半个波长时，
光程差改变一个波长
一个条纹移过。

N个条纹移过时，M_1
平移的距离为：

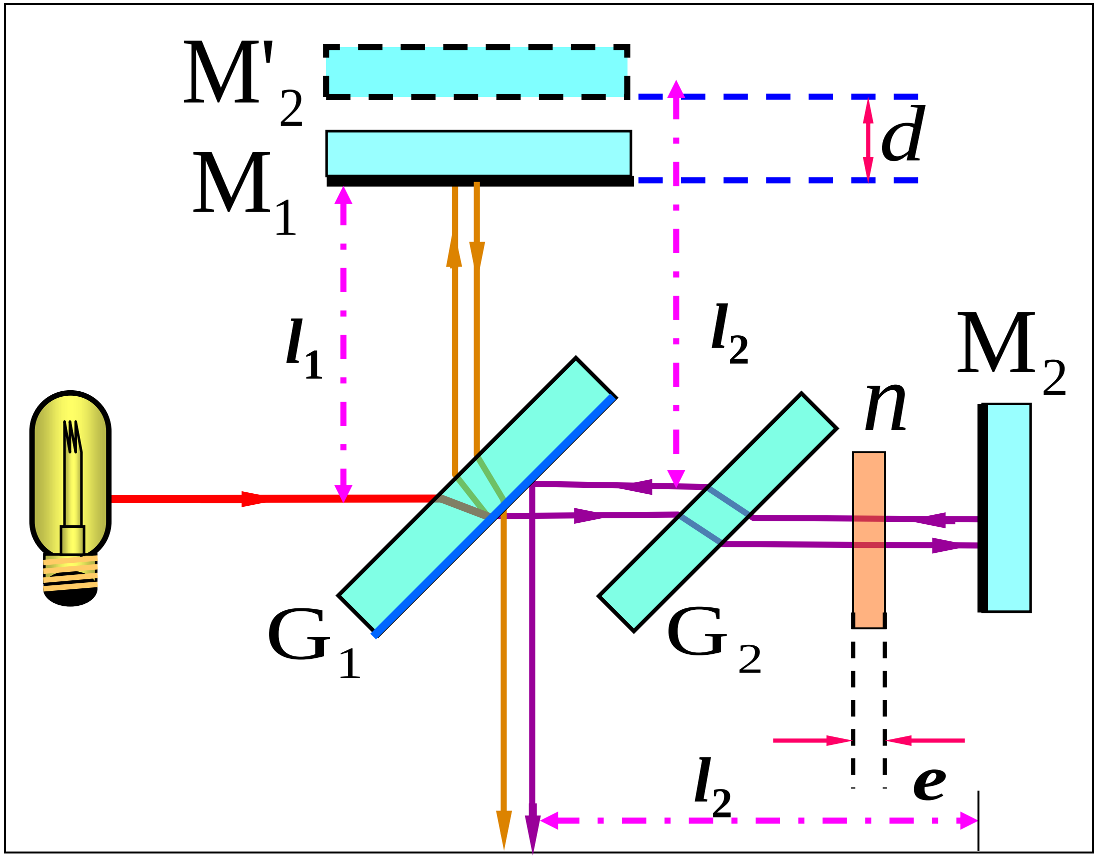
$$\Delta d = N\frac{\lambda}{2}$$







插入介质片



插入介质片前光程差

$$\delta = 2d$$

插入介质片后光程差

$$\delta' = 2[l_2 + (n-1)e] - 2l_1$$

$$= 2d + 2(n-1)e$$

光程差变化

$$\Delta\delta = \delta' - \delta = 2(n-1)e$$

$$2(n-1)e = N\lambda$$

干涉条纹移动数目