大学物理

光 学

OPTICS

光的干涉
(Interference of Light)

两光波在空间相遇形成稳定的强弱分布,称为干涉

研究对象：光的本性、光现象、光与物质的相互作用。

光学发展经历了四个阶段

一、几何光学时期(17-18世纪)

光的直线传播规律、光学仪器、光的本性。

二、波动光学(19世纪初)

光的电磁性质和传播规律，特别是干涉、衍射、偏振的理论与应用

三、量子光学时期(19世纪末-20世纪初)

以光的量子理论为基础, 研究光与物质的相互作用
光的波粒二象性、光子

四、现代光学时期(20世纪60年代末)

激光

- 光学 (optics)
  - 几何光学（geometrical optics）
    - 光的反射（reflection）
    - 光的折射（refraction）
  - 波动光学 (wave optics)
    - 光的干涉（interference）
      - 光源的发光机制 （ illuminant ）
      - 光的相干性 （ coherence ）
      - 获得相干光的方法 （methods）
    - 光的衍射（diffraction）
    - 光的偏振（polarization）
  - 量子光学 (quantum optics)
    - 黑体辐射（Blackbody radiation）
    - 光电效应（photoelectric effect）

光是一种电磁波

实验基础

波动性　　光的干涉、衍射实验

横　波　　光的偏振实验

本章内容分三大部分

光的干涉

光的衍射

光的偏振

现象、原理及应用

波动光学

研究对象： 光的传播、光与物质的相互作用的规律

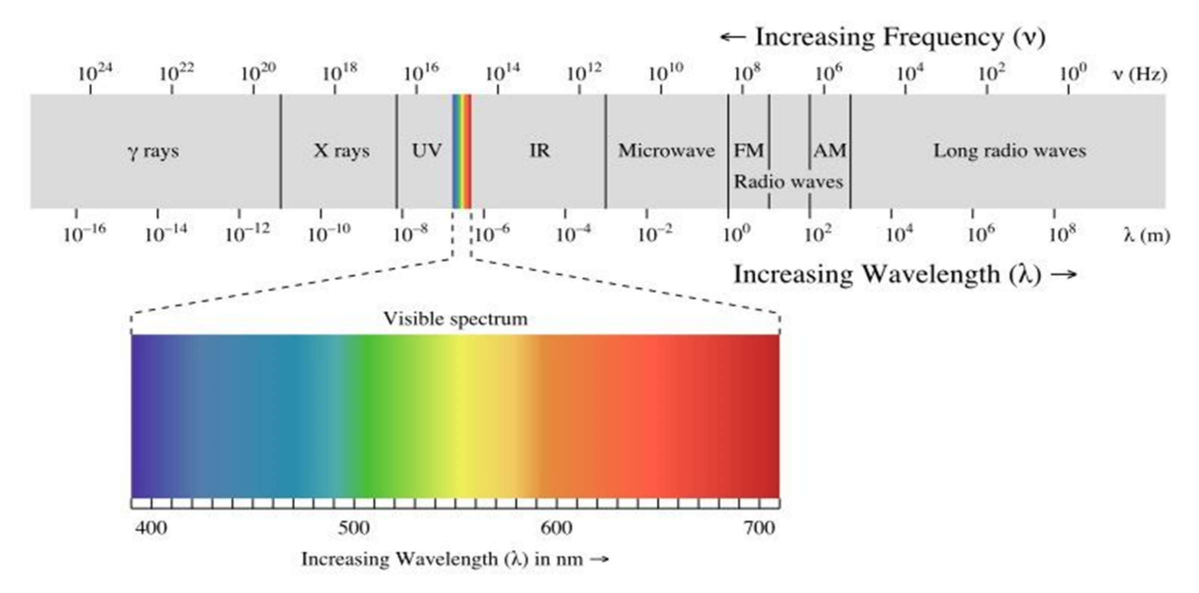
理论基础： 麦克斯韦电磁理论——光是某一波段的电磁波

可见光的频率范围

$7.8\times10^{14}\sim3.9\times10^{14}\text{Hz}$

可见光的波长范围

380~760nm

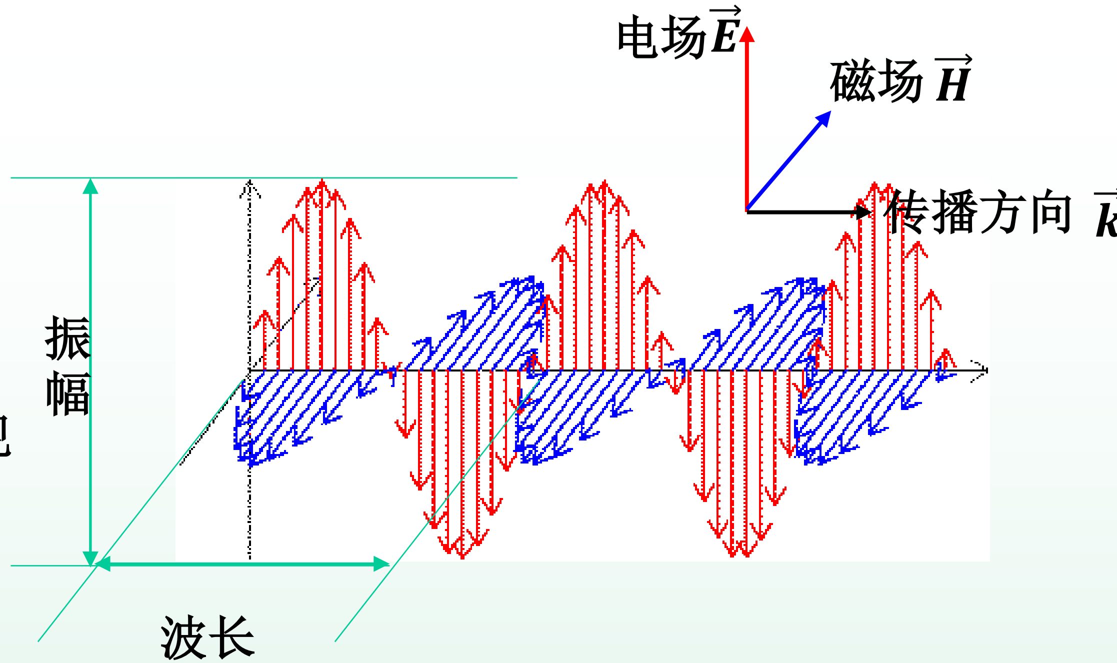


波动光学

光是一种电磁波

光矢量用$\vec{E}$表示，它在引起人眼视觉和底片感光上起主要作用。

真空中的光速 $c = 3 \times 10^8 \mathrm{m/s}$



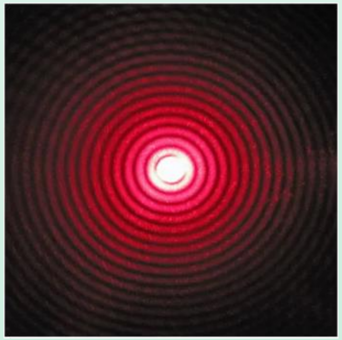
波动性

横波

干涉

薄膜干涉

衍射



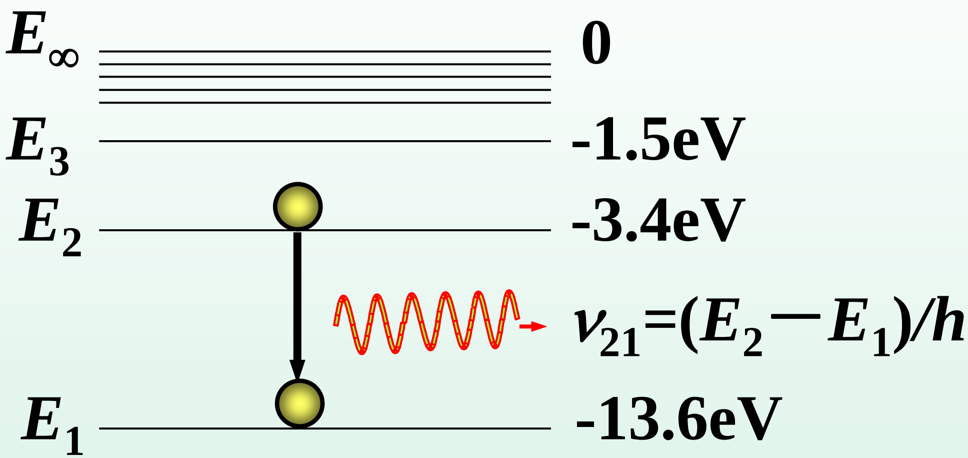
圆孔衍射

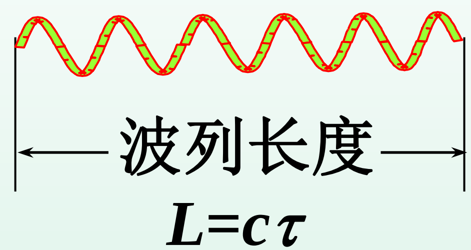
偏振

偏光3D眼镜

6.1 光源的发光机制
(The luminous principle of light source)

6.1.1 光源的发光机制　相干光



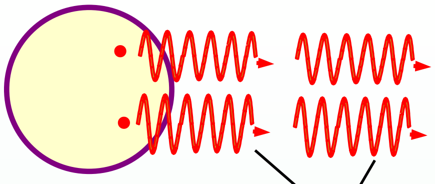


光源的发光是大量的分子或原子进行的一种微观过程

普通光源发光特点:

1)自发辐射(spontaneous radiation);

2)每一次发光持续时间很短($\tau < 10^{-8}$s)



独立(不同原子同时发出的光不相干)

普通光源

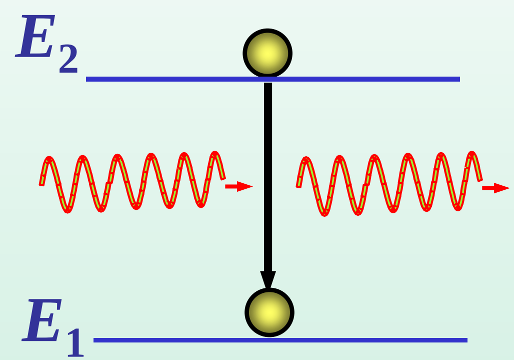
独立(同一原子先后发出的光不相干)

普通光源发出的两束光在空间相遇很难产生相干叠加，这样的光称为**非相干光**(**noncoherent light**)。

激光光源发光特点:

1)受激辐射(**stimulated radiation**);

2)每一次发光持续时间较长



激光光源发出的两束光在空间相遇能产生相干叠加，这样的光称为**相干光**(**coherent light**)。

光的干涉——自然界中的光的干涉现象

雨后油膜

昆虫的翅膀

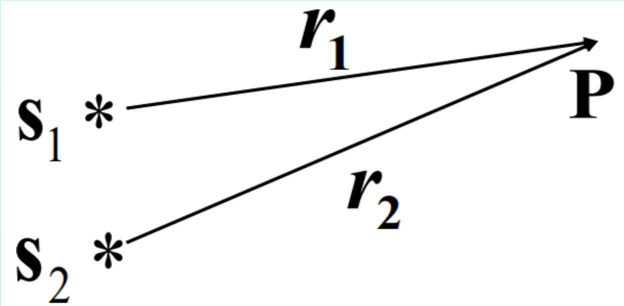
肥皂泡

光的干涉与光的相干性

光的干涉 是指两列或几列光波在空间相遇时相互叠加，在某些区域始终加强，在另一些区域则始终消弱，形成稳定的强弱分布的现象。

相干光： 能产生相干叠加的两束光称为相干光
相干条件： 振动频率相同、振动方向相同、相位差恒定

这两列波在P点的振动分别为：



$$E_1 = E_{10}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_1 + \varphi_1\right)$$

$$E_2 = E_{20}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_2 + \varphi_2\right)$$

$$E_1 = E_{10}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_1 + \varphi_1\right)$$

$$E_2 = E_{20}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_2 + \varphi_2\right)$$

由波的叠加原理可知在P点处合振动振幅的平方为

干涉项

$$E^2 = {E_{10}}^2 + {E_{20}}^2 + \boxed{2E_{10}E_{20}\cos\Delta\varphi}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$$

相干叠加（干涉项不为零）

若$\Delta\varphi$ 恒定（即不随时间变化），有 $\bar{I} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi$

相干条件

振动频率相同，振动方向相同，相位差恒定

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \pm 2k\pi & (k = 0,1,2,\cdots)\ \bar{I}\ \text{取最大,干涉相长} \\ \pm(2k+1)\pi & (k = 0,1,2,\cdots)\ \bar{I}\ \text{取最小，干涉相消} \end{cases}$$

非相干叠加（干涉项在一个周期内的平均值为零）

若$\Delta\varphi$ 不恒定，即$\Delta\varphi$在杂乱变化（因原子发光的间隙性和随机性），有

$$\overline{\cos\Delta\varphi} = 0$$

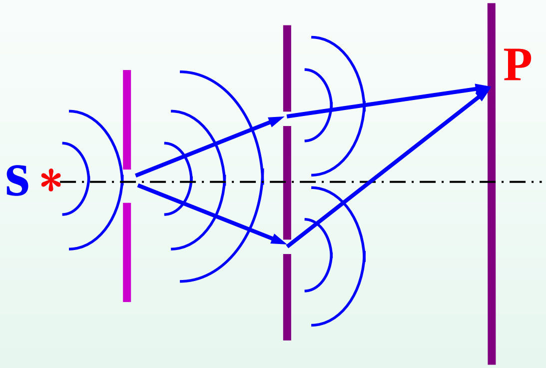
单频激光器具有很好的相干性，但在自然界中仍能观察到许多干涉现象，这是为什么？

相干光的获得

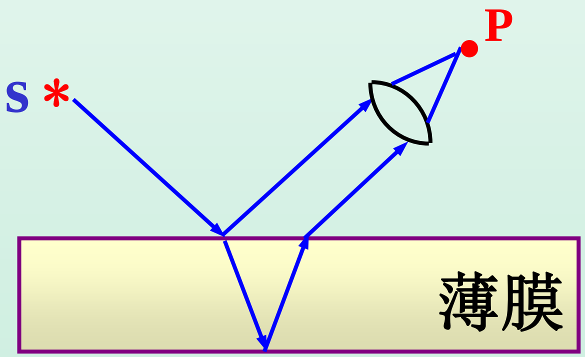
- 分波面法
  - 杨氏双缝干涉
  - 双棱（面）镜干涉
  - 洛埃镜干涉
- 分振幅法 → 薄膜干涉
  - 等倾干涉 → 迈克尔逊干涉仪
  - 等厚干涉
    - 劈尖干涉
    - 牛顿环
  - 增透膜
  - 增反膜

怎样获得相干光?

将来自同一原子的同一次发光“一分为二”。



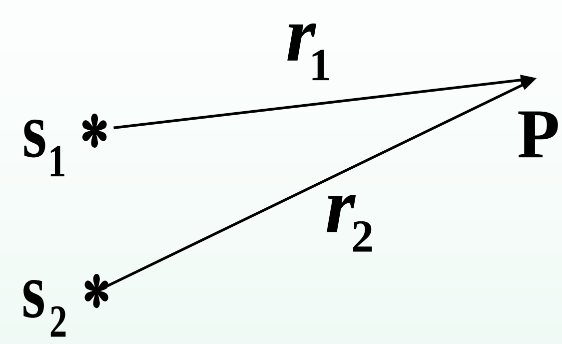
分波面法



分振幅法

6.1.2 光程(optical path)　光程差(optical path difference)

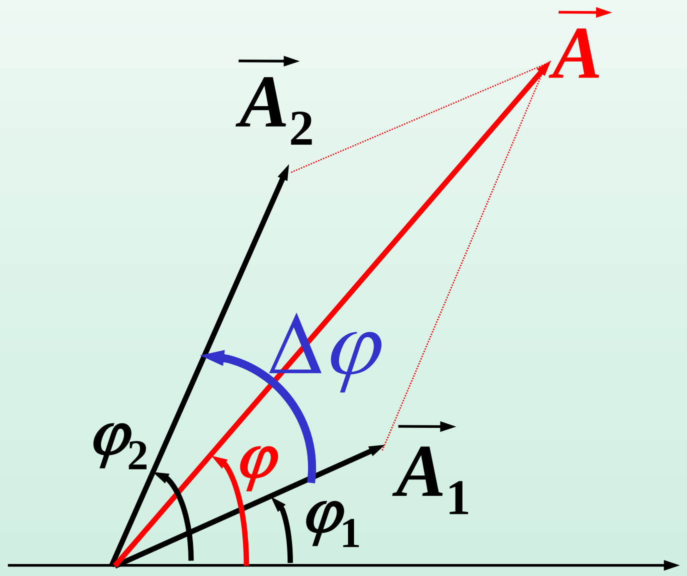
设φ_{01}、φ_{02}分别为s_1、s_2光源的初相;
A_1、A_2分别为s_1、s_2 在P点的振幅,
λ_1和λ_2为两波在r_1和r_2两段路程上介质中的波长, 则两波在P点的振动为



$$E_1 = A_1 \cos(\omega_1 t - \frac{2\pi r_1}{\lambda_1}) + \varphi_{01})$$

$$E_2 = A_2 \cos(\omega_2 t - \frac{2\pi r_2}{\lambda_2} + \varphi_{02})$$

两光波在空间某点P相遇,
讨论相遇点的光强分布。



P点的光振动合成矢量图

由波的叠加原理可知在相遇点P合振动的振幅平方为

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\Delta\varphi)$$

光强分布为: $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\varphi)$

光强分布与相位差$\Delta\varphi$有关

$$\Delta\varphi = (\varphi_{01} - \varphi_{02}) + \left(\frac{2\pi r_2}{\lambda_2} - \frac{2\pi r_1}{\lambda_1}\right) = (\varphi_{01} - \varphi_{02}) + \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 r_2 - n_1 r_1)$$

其中λ为两波在真空中的波长, 令$\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$

定义:光在媒质中通过的路程(r)与媒质折射率(n)的乘积(nr)称为光程(optical path)

$\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$称为光程差(optical path difference)

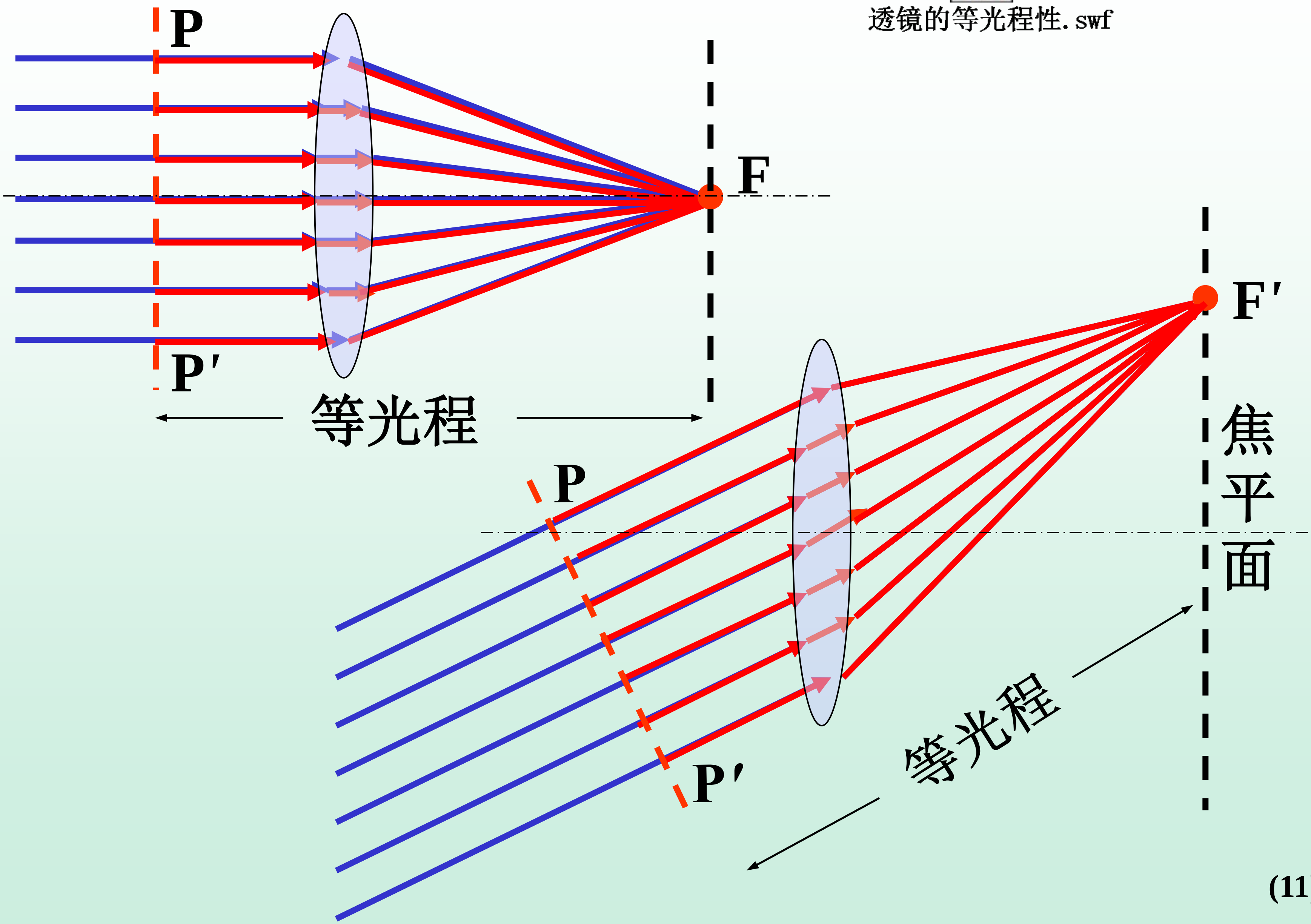
当$\varphi_{01}=\varphi_{02}$时

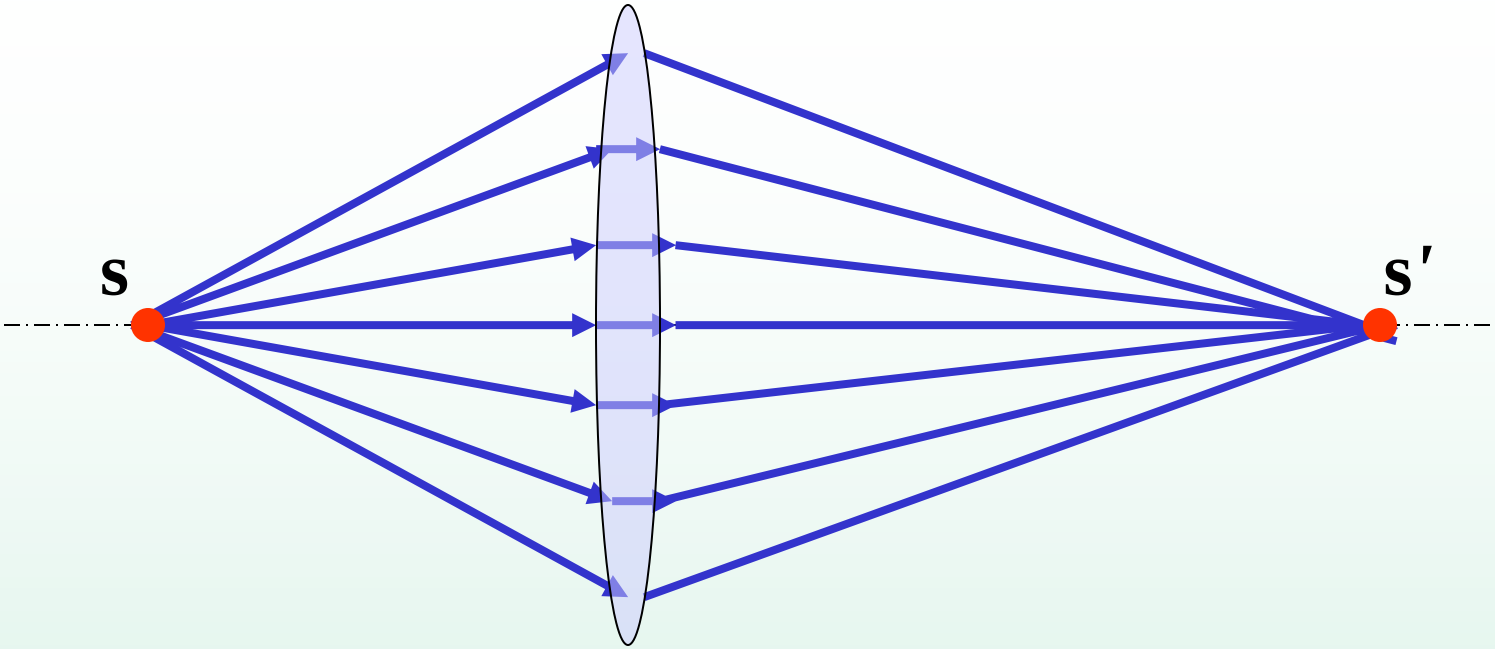
光程差与相位差之间关系:

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

$$\begin{cases}\delta=\pm k\lambda & k=0,1,2,\ldots & \text{干涉加强(明纹)}\\ \delta=\pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k=0,1,2,\ldots & \text{干涉减弱(暗纹)}\end{cases}$$

薄透镜的等光程性(记住)





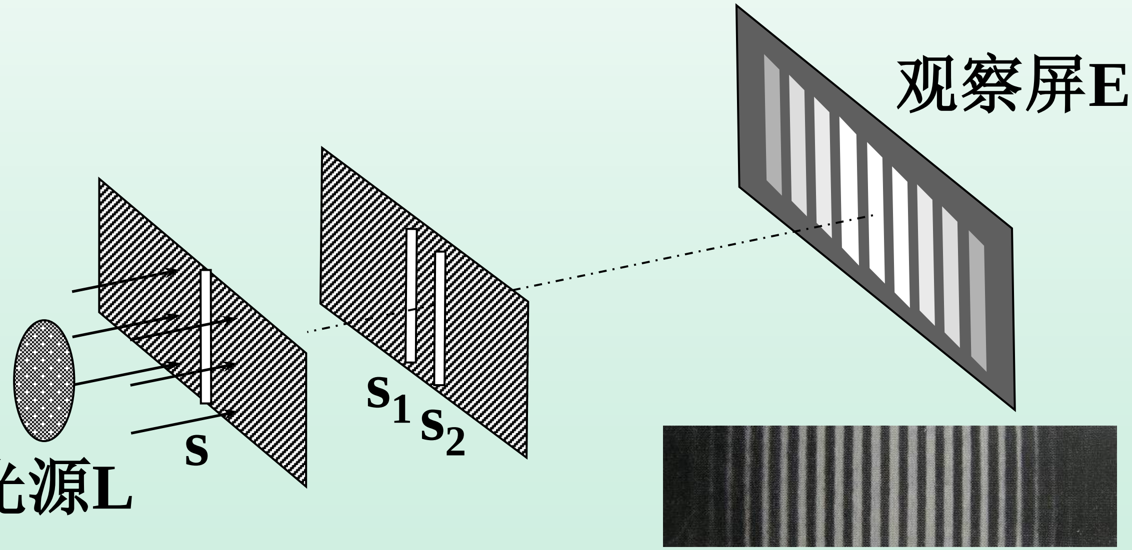
透镜成象均为亮点表明各条光线在会聚点相位相同,也就是各条光线光程相等。

重要结论: 透镜可以改变光线的传播方向, 但对物、象间各光线不会引起附加的光程差。

6.2 分波阵面的干涉
(The interference of dividing wave front)

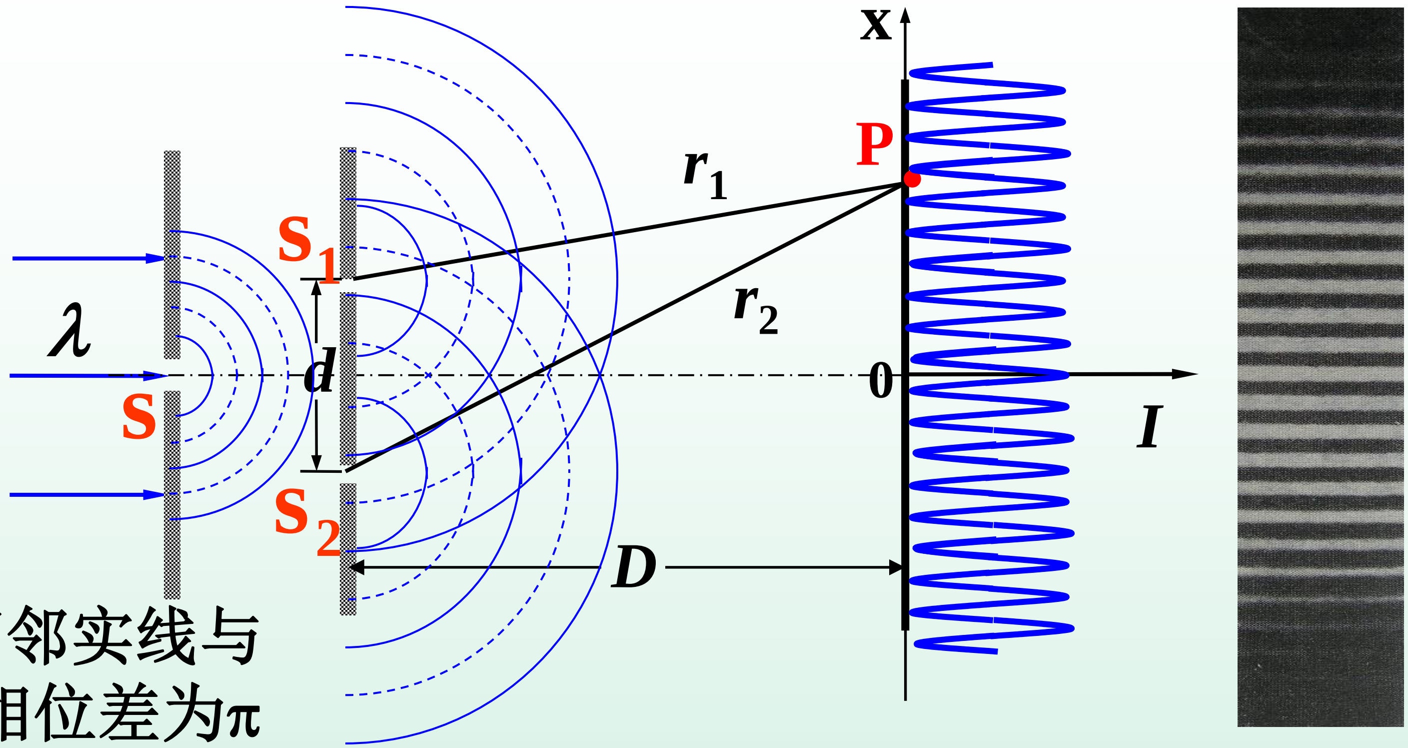
6.2.1 杨氏双缝干涉
(Young double-slit interference)

1. 实验装置(1801年)



托马斯· 杨
(Thomas Young)
1773-1829,英国
物理学家

2. 干涉条纹分析



图中: 相邻实线与
虚线的相位差为π

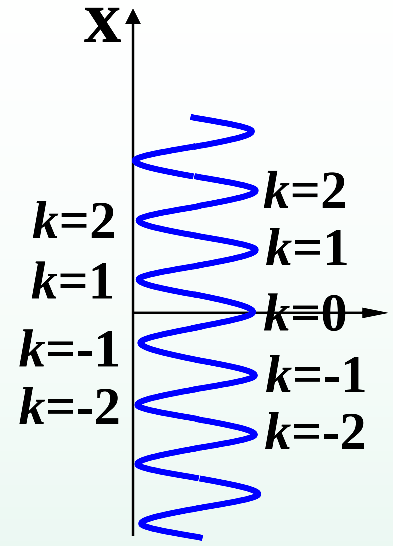
设φ_{01}、φ_{02}分别为s_1、s_2相干光的初相; A_1、A_2分别为s_1、s_2在P点的振幅。假设$A_0 = A_1 = A_2$，$\varphi_{01} = \varphi_{02}$

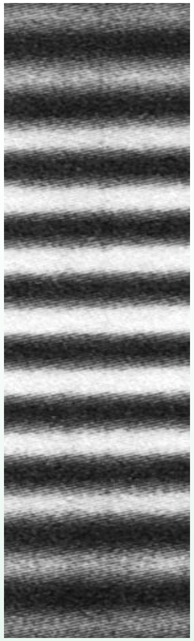
两光波在P点处的光强: $I = A^2 = 2A_0^2 + 2A_0^2\cos(\Delta\varphi)$

1) 干涉条纹的光程差分布

P点处的相位差: $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \pm 2k\pi & k=0,1,2,\ldots \text{明纹中心} \\ \Delta\varphi = \pm(2k-1)\pi & k=1,2,\ldots \text{暗纹中心} \end{cases}$$





P点处的光程差为

$$\begin{cases} \boxed{\delta = r_2 - r_1 = \pm k\lambda} & k=0,1,2,\ldots \text{明纹中心} \\ \boxed{\delta = r_2 - r_1 = \pm(2k-1)\dfrac{\lambda}{2}} & k=1,2,\ldots \text{暗纹中心} \end{cases}$$

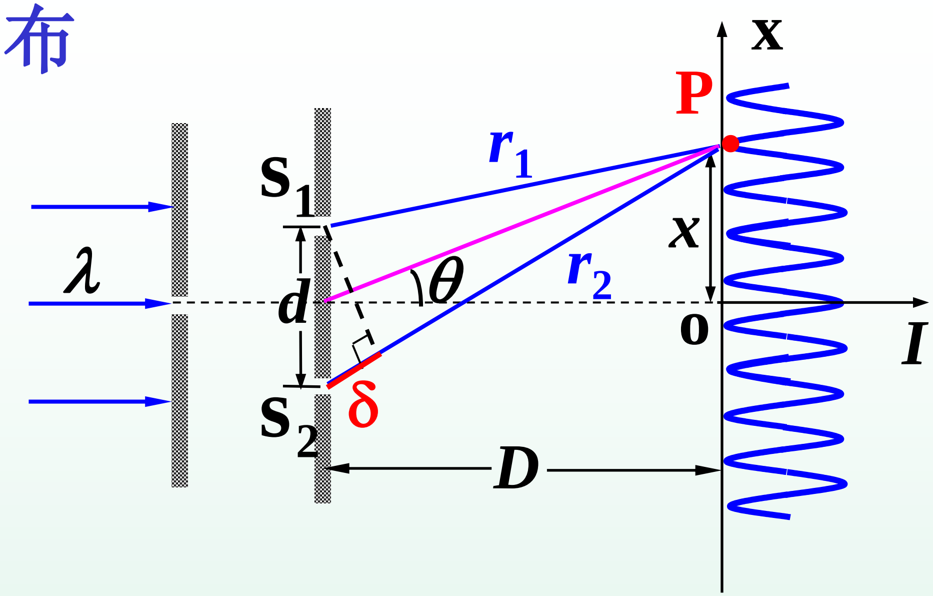
λ为真空中的波长, k称为级数。

2) 干涉条纹的位置分布

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

当θ很小时($<5^\circ$)

$\sin\theta \approx tg\theta = x/D$



$$\left\{\begin{array}{l} \boxed{x = \pm k\dfrac{D}{d}\lambda} \\ \boxed{x = \pm(2k-1)\dfrac{D}{d}\dfrac{\lambda}{2}} \end{array}\right.$$

$k = 0, 1, 2, \ldots$明纹中心

$k = 1, 2, 3, \ldots$暗纹中心

讨论:

1)重要结论:

光程差相等的点构成同一条干涉条纹;

相邻两条明(或暗)纹之间光程差的变化为λ。

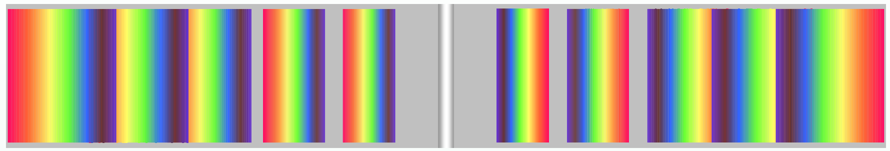
2)任意二条相邻明(暗)纹之间距离:

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

Δx与k无关,表明条纹是等宽等间距明暗相间平行条纹, x 越大级数越高。

d不可过大,因为d 过大条纹过密人眼分辨不了就看不到干涉现象(d 约几mm 到10^{-1}mm)

3)入射光为白色光:



a)各级明纹(不含零级)都是彩色条纹

各级明纹不同波长对应的位置: $x = k\dfrac{D}{d}\lambda$

b)中央零级明纹是白色条纹

c)高级次明纹可出现重合

各级明纹的宽度: $\Delta x = k\dfrac{D}{d}\Delta\lambda$

例1: 已知d=0.1mm, D=20cm 入射光波长λ=5460Å

求 1)第一级暗纹位置 2)如某种光照射此装置,测得第二级明纹之间距离为5.44mm, 此光波波长?

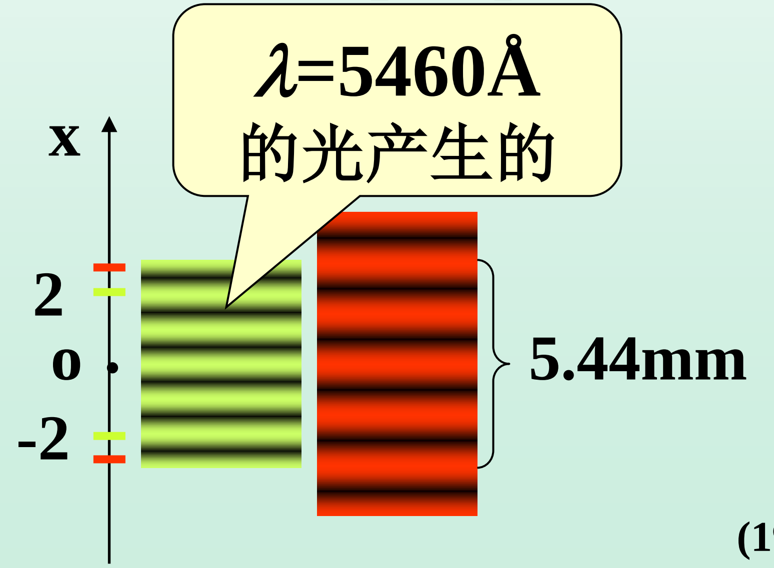
3)如肉眼仅能分辨两条纹的间距为0.15mm, 现用肉眼观察干涉条纹, 双缝的最大间距?

解: 1) $x = \pm(2k-1)\dfrac{D}{d}\dfrac{\lambda}{2}$ 取$k = 1$

$$x_1 = \frac{D}{d}\frac{\lambda}{2} = \frac{20\times 5460\times 10^{-8}}{0.01\times 2} = 5.46\times 10^{-2}[\mathrm{cm}]$$

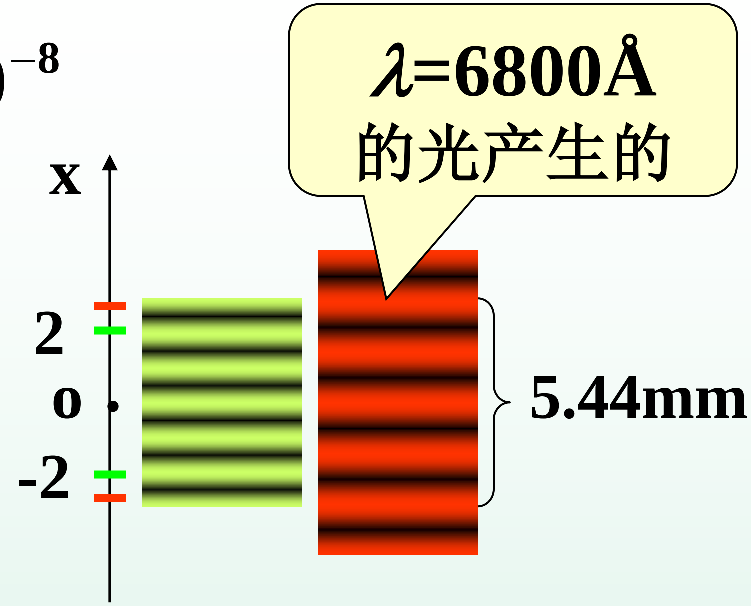
2) $x = \pm k\dfrac{D}{d}\lambda$ 取$k = 2$

$$x_2 = \frac{5.44}{2} = 2.72[\mathrm{mm}]$$



$$\lambda = \frac{x_2 d}{kD} = \frac{2.72\times10^{-1}\times0.01}{2\times20}\times10^{-8}$$

$$=6800\ [\text{Å}]$$



3)如$\Delta x=0.15$

$$d = \frac{D\lambda}{\Delta x} = \frac{200\times5460\times10^{-7}}{0.15} = 0.728[\text{mm}]$$

双缝间距必须小于0.728mm才能看到干涉条纹。

例2:杨氏双缝,d=0.5mm,D=25cm, λ_1=4000Å, λ_2=6000Å

1)分别求出二种波相邻明(暗)纹间距Δx

2)距中央明纹多远处首次重合? 各为第几级条纹?

解:1)由条纹的间距公式 $\Delta x = \dfrac{D}{d}\lambda$

$$\Delta x_1 = \frac{D}{d}\lambda_1 = 2\times10^{-2}[\mathrm{cm}] \quad \Delta x_2 = \frac{D}{d}\lambda_2 = 3\times10^{-2}[\mathrm{cm}]$$

2)设在x处 λ_1 的k_1级与 λ_2 的 k_2 级首次重合, 则有

$$x = k_1\frac{D}{d}\lambda_1 = k_2\frac{D}{d}\lambda_2 \qquad \therefore 2k_1 = 3k_2$$

取k_1=3, 则 k_2=2 $\quad \therefore x = k_2\dfrac{D}{d}\lambda_2 = 6\times10^{-2}[\mathrm{cm}]$

λ_2的第二级与 λ_1 的第三级重合。

例3:杨氏双缝实验, 用透明薄片挡住一个缝发现中央明纹移动了3.5个条纹, 如入射光波长λ=5500Å , 薄片折射率n=1.4 。

问: 1)该薄片增加了多少光程差? 2)该薄片厚度e=?

解1: 1)如挡s_1, 0级上移到P点处,即无薄片时的3.5级处。

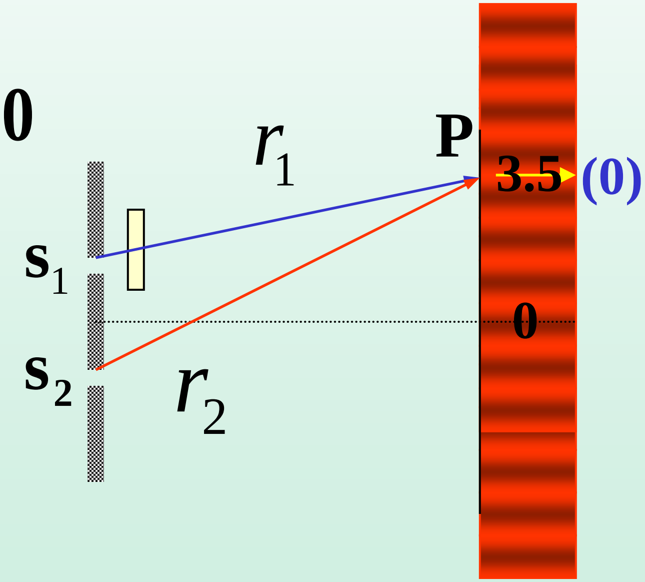
无薄片, P点光程差: $r_2 - r_1 = 3.5\lambda$

加薄片, P点光程差: $r_2 - [r_1 + (n-1)e] = 0$

薄片增加的光程差:

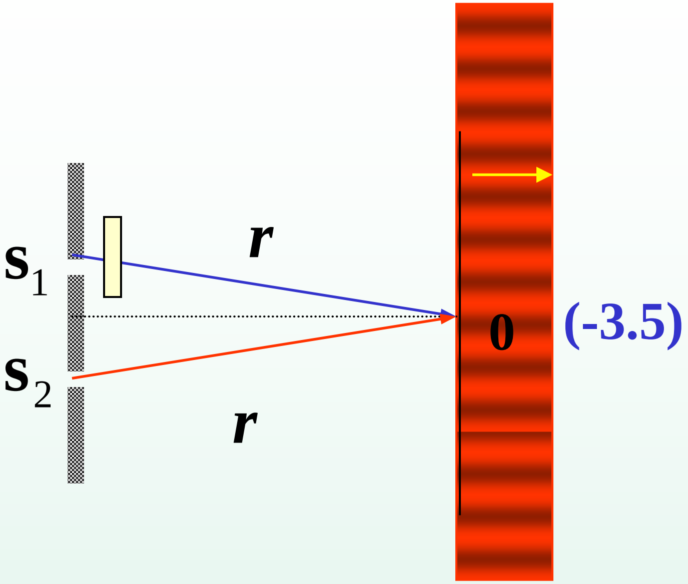
$$(n-1)e = r_2 - r_1 = 3.5\lambda = 1.93\times10^{-6}[\mathrm{m}]$$

2) $$e = \frac{3.5\lambda}{n-1} = 4.83\times10^{-6}[\mathrm{m}]$$



解2:1)考察中心点的光程差

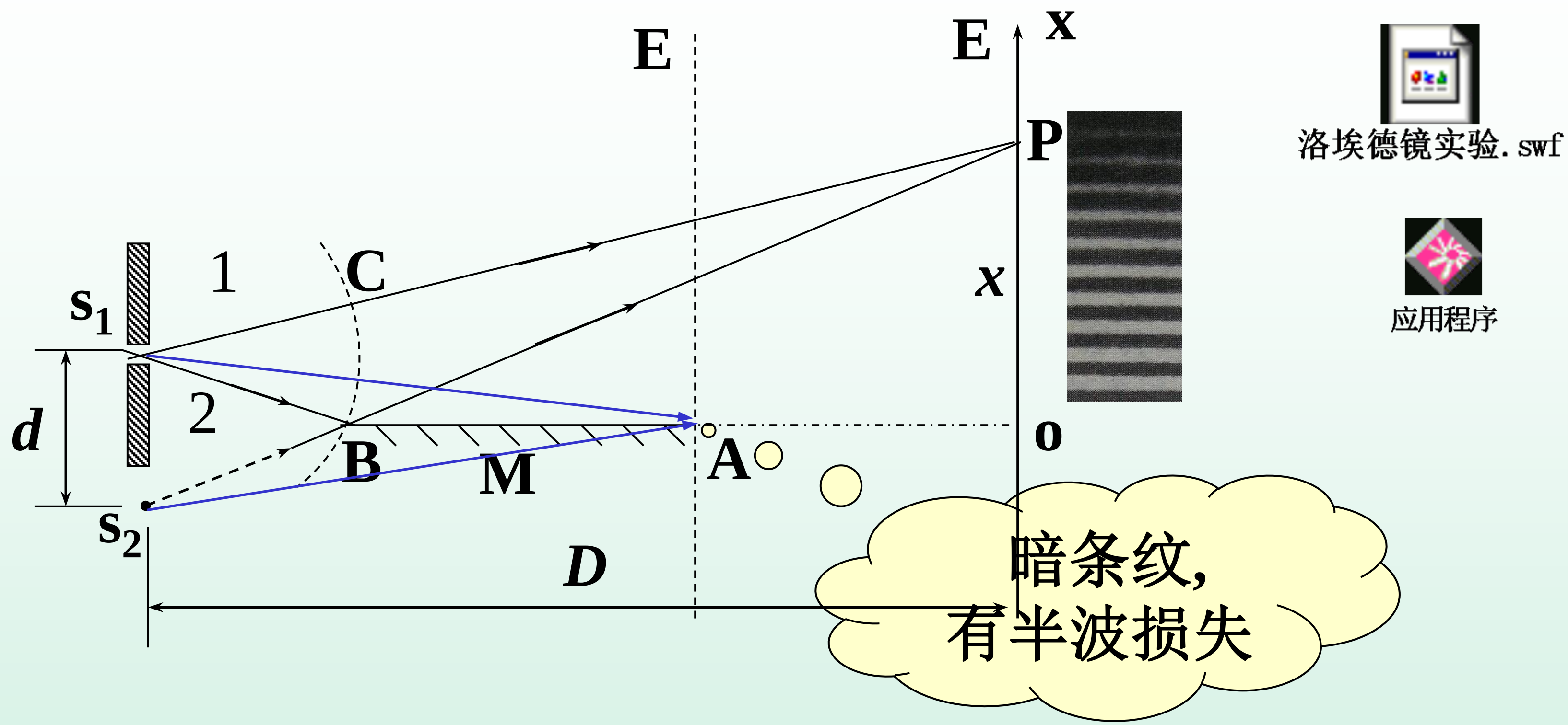
$$\delta = r - [r + (n-1)e] = -3.5\lambda$$



$$\therefore (n-1)e = 3.5\lambda = 1.93\times10^{-6}[\mathrm{m}]$$

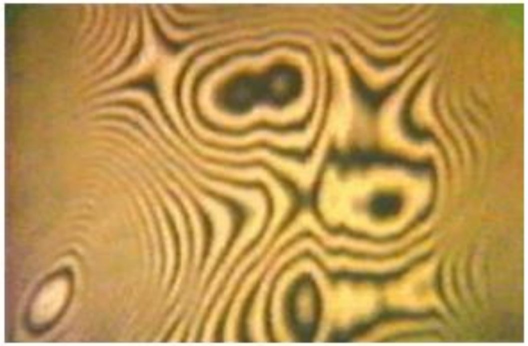
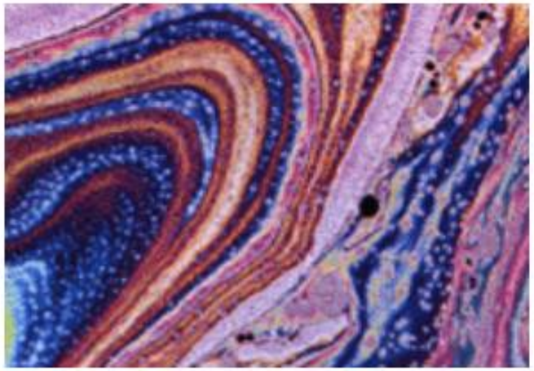
$$2)\ e = \frac{3.5\lambda}{n-1} = 4.83\times10^{-6}[\mathrm{m}]$$

6.2.2 劳埃德镜(Lloyd mirror)与半波损失(half-wave loss)



光从光疏介质射向光密介质时, 在正入射(即入射角为0°)或掠入射(即入射角为90°)的情况下, 在二种介质界面处反射时相位发生 π 的突变, 此现象称为半波损失。

薄膜干涉

油膜


肥皂膜

照相机的膜

蓝闪碟

孔雀

银胸丝冠鸟

斑喉伞鸟

薄 膜 干 涉

薄膜的等倾干涉

薄膜等厚干涉

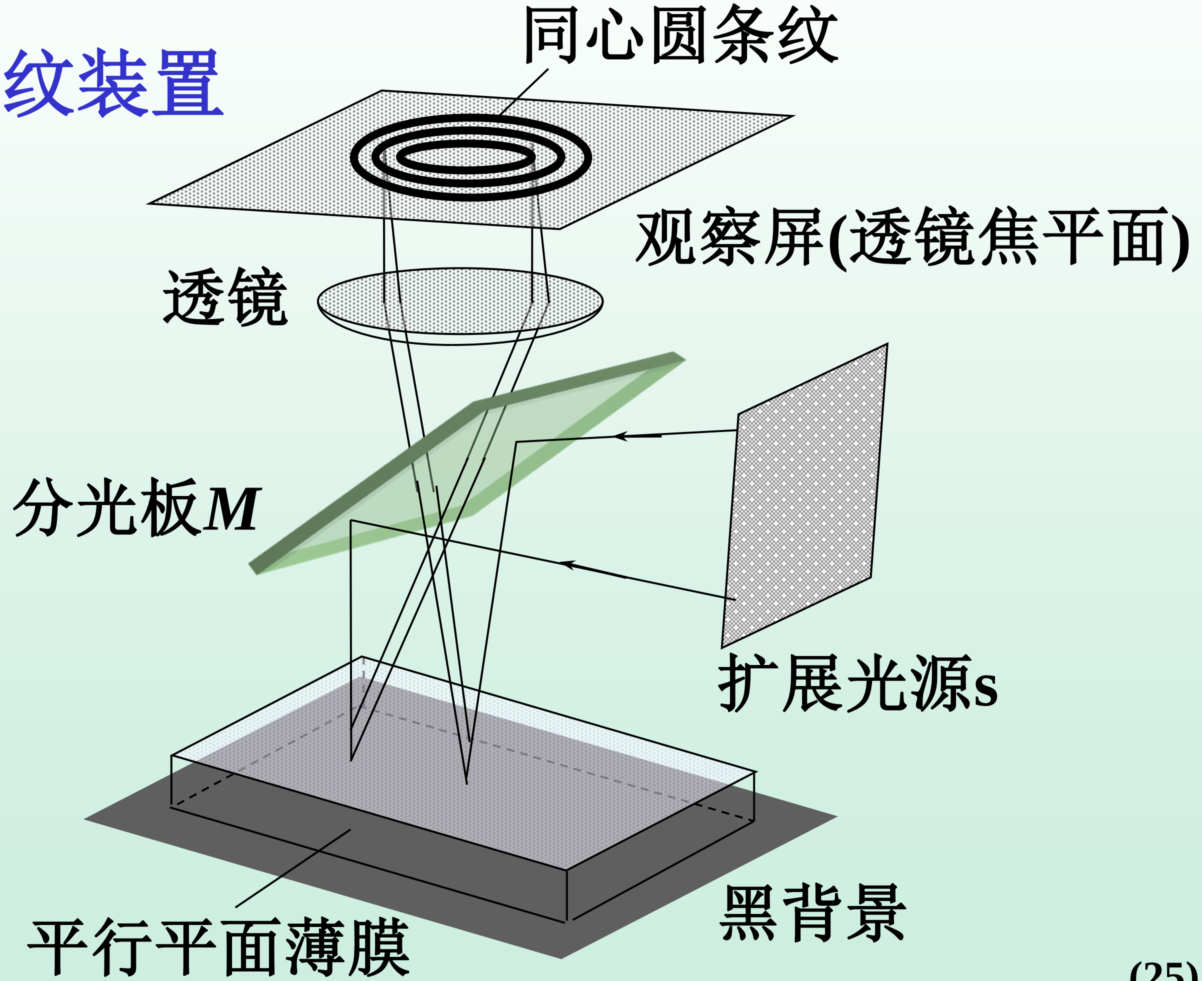
劈尖干涉 牛顿环

6.3 分振幅干涉

(The interference of dividing amplitude)

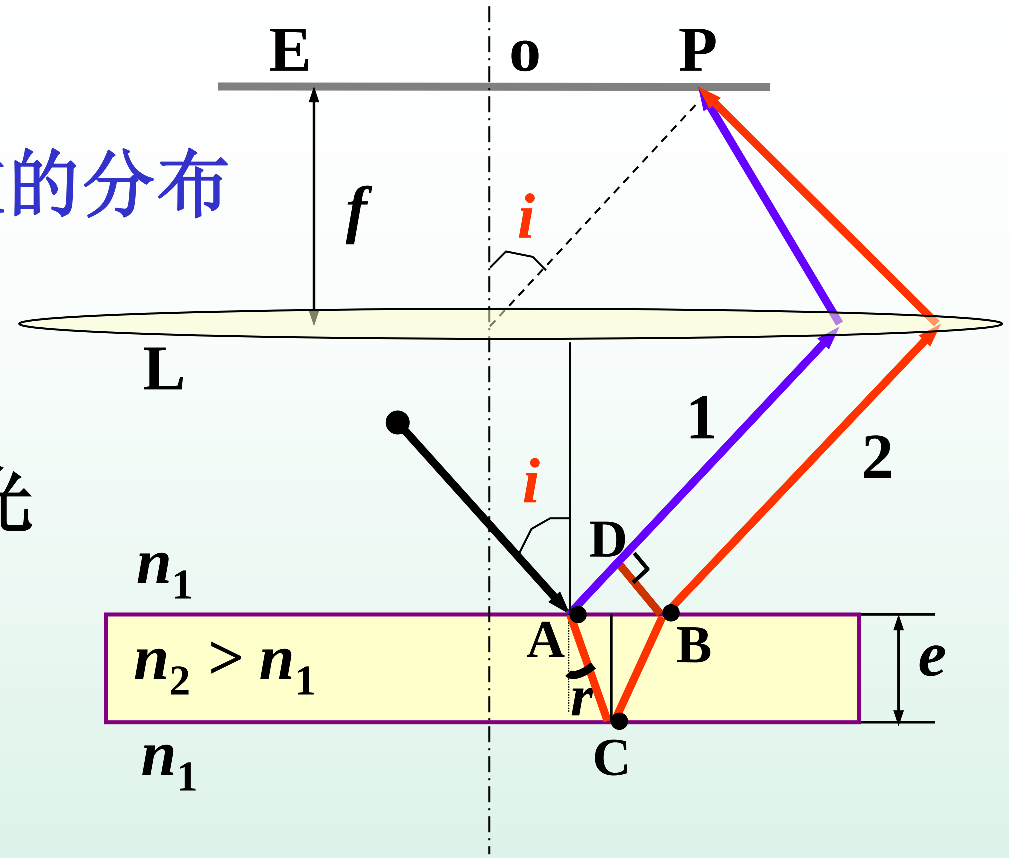
6.3.1 等倾干涉(equal inclination interference)

1.观察等倾干涉条纹装置



2.干涉条纹分析

1) 点光源照射时干涉条纹的分布



一束光照射在薄膜上
光束1: A点反射的光
光束2: 从A-C-B射出的光

1、2二束光的光程差为:

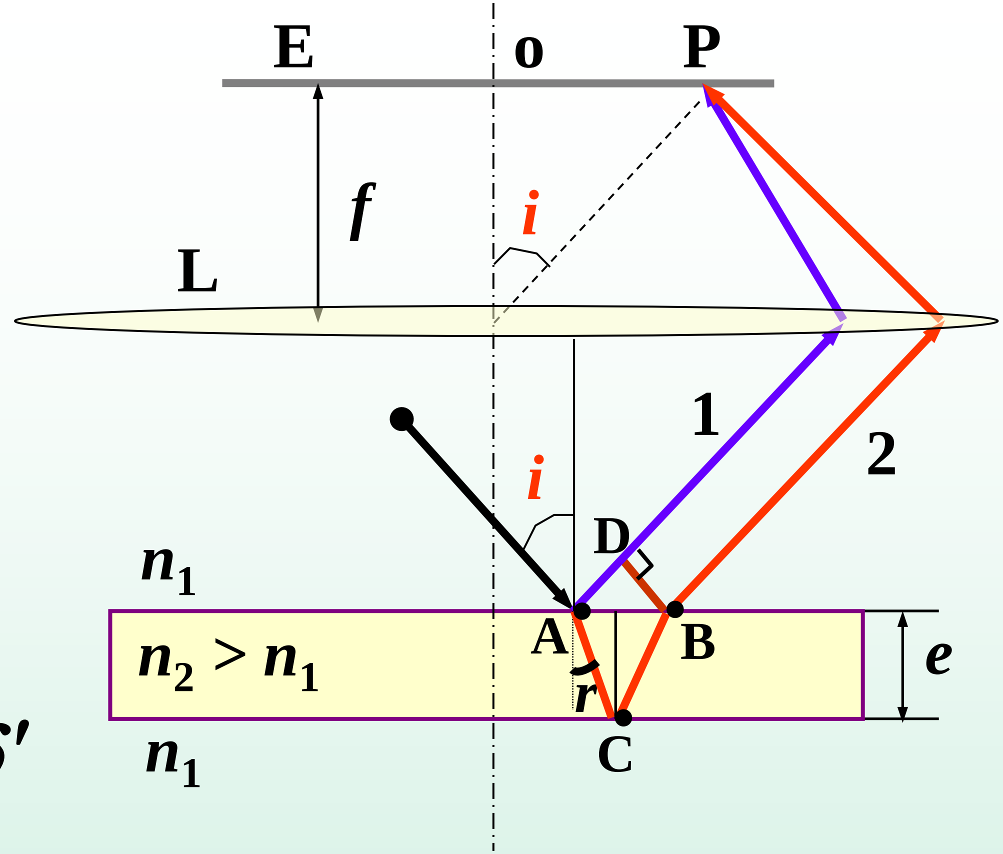
$$\delta = n_2(\overline{AC} + \overline{CB}) - n_1\,\overline{AD} + \delta'$$

δ'为附加光程差

$\delta' = \lambda/2$ or 0 ,由周围的介质折射率决定（考虑有没有由于反射引起的半波损失）。

入射角: i, 折射角: r

$$\begin{cases} \overline{AC} = \overline{CB} = \dfrac{e}{\cos r} \\ \overline{AD} = \overline{AB}\sin i \\ \overline{AB} = 2e\tan r \\ n_1 \sin i = n_2 \sin r \end{cases}$$



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

$$\boxed{\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = k\lambda}$$

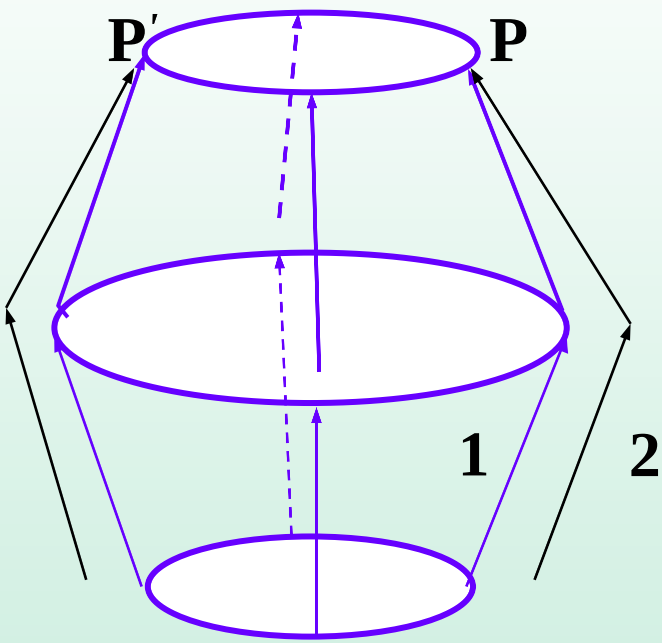
k=1,2,3,.......明

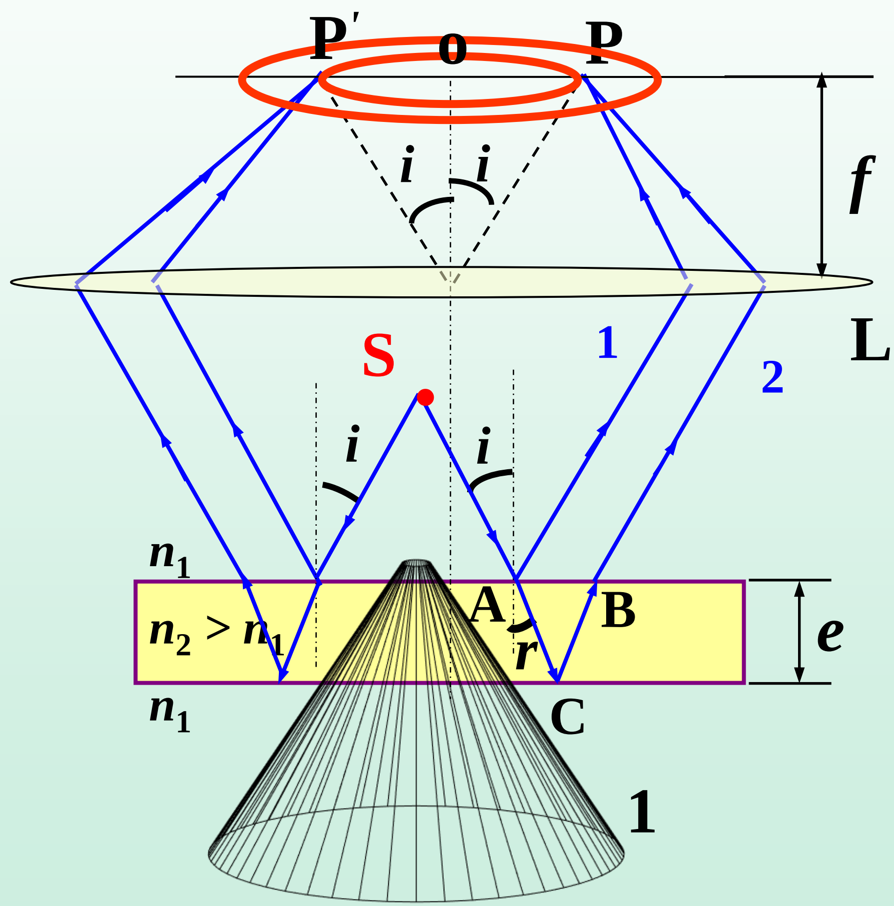
$$\boxed{\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = (2k+1)\frac{\lambda}{2}}$$

k=0,1,......暗

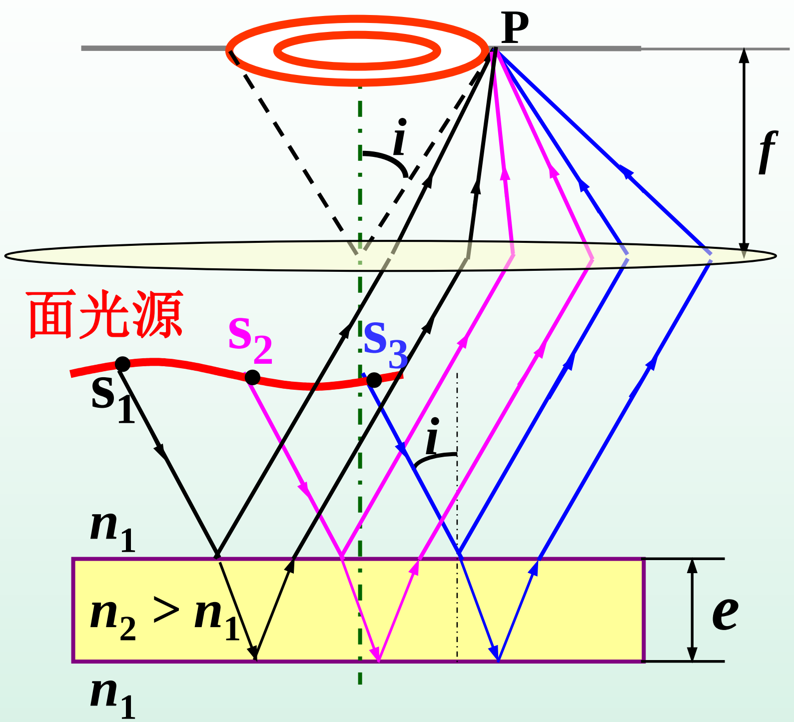
$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta'$$

倾角 i 相同, δ 也相同, 而 δ 相同的点构成同一级干涉条纹, 故称为**等倾条纹(equal inclination fringes)**。



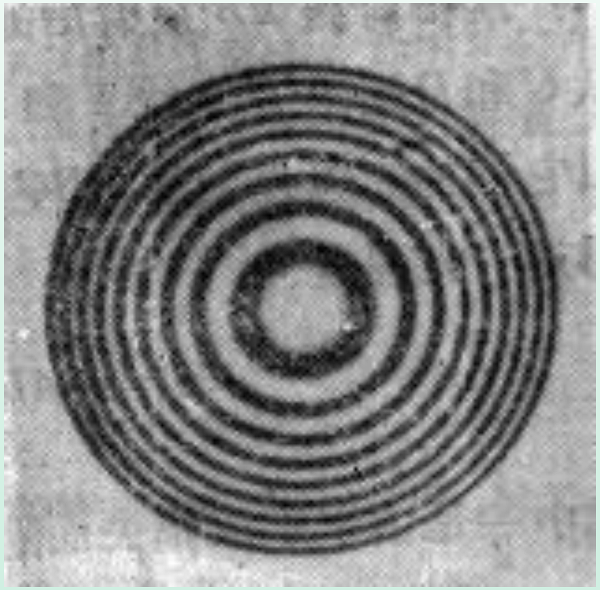


2) 面光源照明时干涉条纹的分布



s_1、 s_2 、 s_3发出的光只要入射角 i 相同，都将会聚在同一个圆环上。

分振幅干涉,使用面光源时,每个点光源产生的一组同心圆条纹彼此互相重叠。



等倾条纹照相

讨论: $\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = k\lambda$

1) i 越大 ⟶ δ 越小

所以越向外,条纹级次k越小; 中心处级次最大。

2)薄膜厚度变化, 条纹有何变化?

应用程序

e 增加时,条纹向外移,条纹从中央"冒"出

e 减少时,条纹向里移,条纹从中央"缩"进

思考:移动一个条纹, 薄膜厚度 e 改变多少?

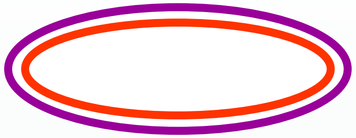
设观察中心处($i=0$), k和$k+1$级对应厚度为e_k 和e_{k+1}

$$2n_2 e_k + \delta' = k\lambda \qquad 2n_2 e_{k+1} + \delta' = (k+1)\lambda$$

介质膜: $\boxed{\Delta e = e_{k+1} - e_k = \dfrac{\lambda}{2n_2}}$ 空气膜: $\boxed{\Delta e = \dfrac{\lambda}{2}}$

3)白色光入射:

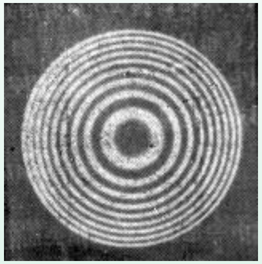
$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = k\lambda$$



n_1, n_2, e 保持不变时, k相同, λ越大, i 越小,

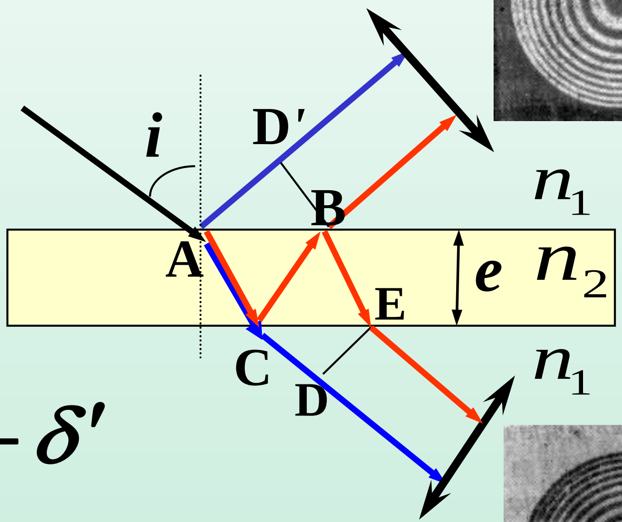
各级明纹为彩色条纹;对同级而言,红色在内紫色在外。

3.透射光的干涉



1光束:ACD　　$(n_2 > n_1)$

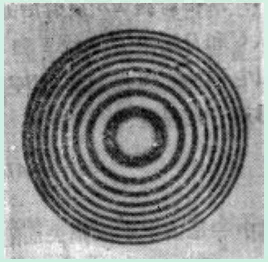
2光束:ACBE



1、2两束光的光程差:

$$\delta = n_2(\overline{BE} + \overline{CB}) - n_1\overline{CD} + \delta'$$

$$\therefore \delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta'$$



$$\boxed{\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = k\lambda}$$ k=1,2,…… 明

$$\boxed{\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = (2k+1)\frac{\lambda}{2}}$$ k=0,1,2,…… 暗

讨论:透射光也是一组明暗相间的圆形等倾条纹

对应某入射角 i : 反射光明暗条纹与透射光的互补

4.应用: 镀增透(反)膜

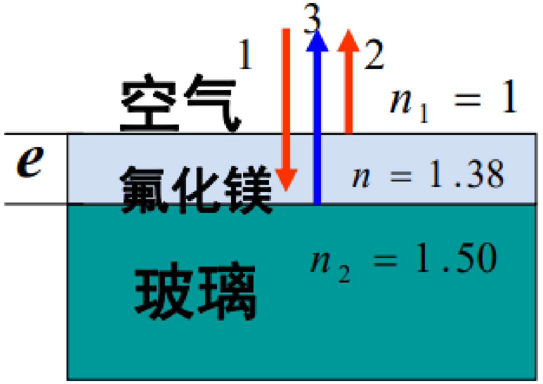
应用：增透（反）膜

在光学仪器上镀膜，使某种波长的反射光或透射光因干涉而减少或加强，以提高仪器反射率或透射率

增透膜($n_1<n<n_2$) :当单色光垂直入射薄膜表面时, 在上下表面反射形成相干光2、3, 都有半波损失, 其光程差为

$$\delta = 2ne = (2k+1)\lambda/2 \quad k = 0,1,2,3\cdots$$

两束光相干减弱，因2、3光强有差别，故不会完全相消，使反射光减弱，由能量守恒，透射光必定增强。

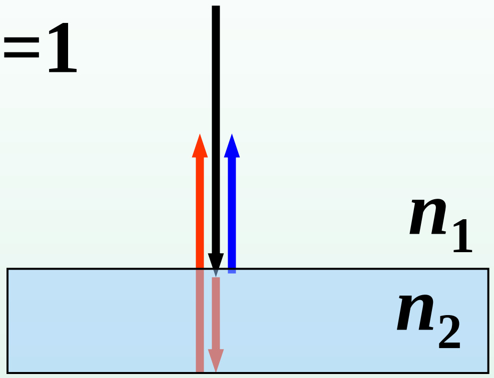


镜片左边涂有抗反射涂层

右边则没有抗反射涂层

例4: 黄光 λ=600nm 垂直照射在平行平面肥皂膜上(n_2=1.33)如反射光恰好是第一级明纹,求肥皂膜的厚度 e ? 黄光在肥皂膜内的波长。

解: 1)垂直入射i=0°, n_1=1, n_2=1.33, k=1



$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

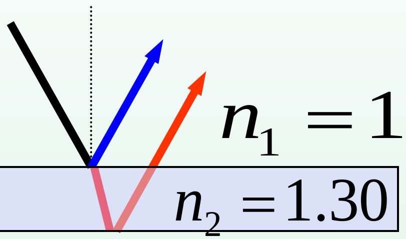
$$2n_2 e + \frac{\lambda}{2} = \lambda$$

$$e = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{600\times 10^{-9}}{4\times 1.33} = 1.13\times 10^{-7}[\mathrm{m}]$$

$$2)\ \lambda' = \frac{\lambda}{n} = \frac{600}{1.33} = 451[\mathrm{nm}]$$

例5: 有一层折射率为1.30的薄油膜,当观察方向与膜面法线方向夹角成 30° 时可看到从膜面反射来的光波长为5000Å问 1)油膜最薄厚度为多少? 2)如从膜面法线方向观察反射光波长为多少?

解: 1) $\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda$



k=1,2,......明

最薄厚度, 取 k=1; i=30°

$$e_{\min} = \frac{(k-1/2)\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}} = 2083.3(k-1/2) = 1041.6[\text{Å}]$$

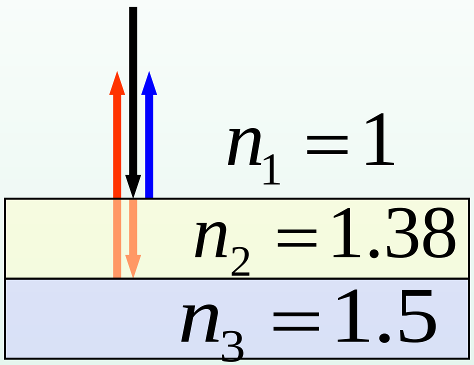
2) i=0 $\quad 2n_2 e_{\min} + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda$

$$\lambda = \frac{2n_2 e_{\min}}{k-1/2} = \frac{2798.16}{k-1/2}$$

k=1 $\quad \lambda \approx 5416$ Å

例6: 透镜(n_3=1.5)表面涂有增透膜(MgF_2:n_2=1.38)
为了让人眼最敏感的黄绿光 λ=550nm
尽可能透过, 镀的膜厚度为多少?

解一: 反射光相消(有二次半波损失)



$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

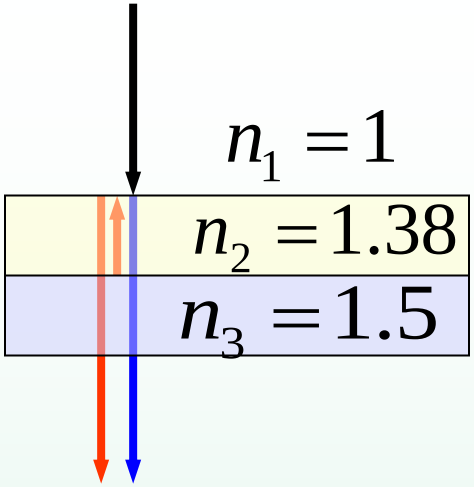
k=0,1,2,......暗

i=0

$$2n_2 e = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$e = \frac{(2k+1)\lambda}{4n_2} = (2k+1)\times 9.96\times 10^{-8}[\mathrm{m}] \quad k=0,1,2,.....$$

解二: 透射光加强 (有一次半波损失)



$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$i = 0,$$

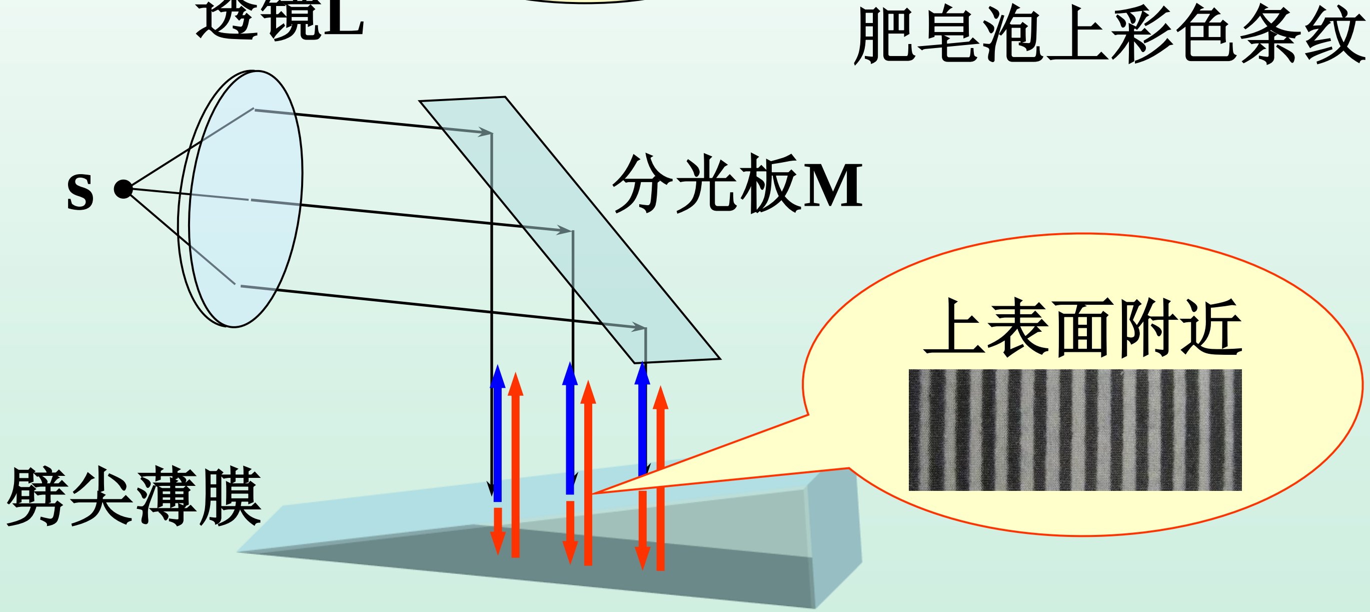
$$\delta = 2n_2 e + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \qquad k=1,2,\ldots\ldots$$

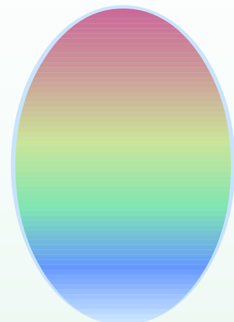
$$e = \frac{(2k-1)\lambda}{4n_2} = (2k-1)\times 9.96\times 10^{-8}[\mathrm{m}] \quad k=1,2,\ldots\ldots$$

6.3.2等厚干涉(interference of equal thickness)

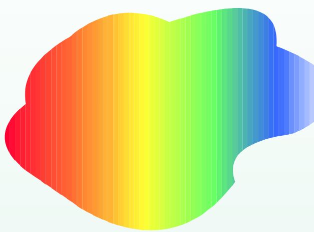
劈尖干涉.swf

1.观察劈尖等厚干涉条纹装置



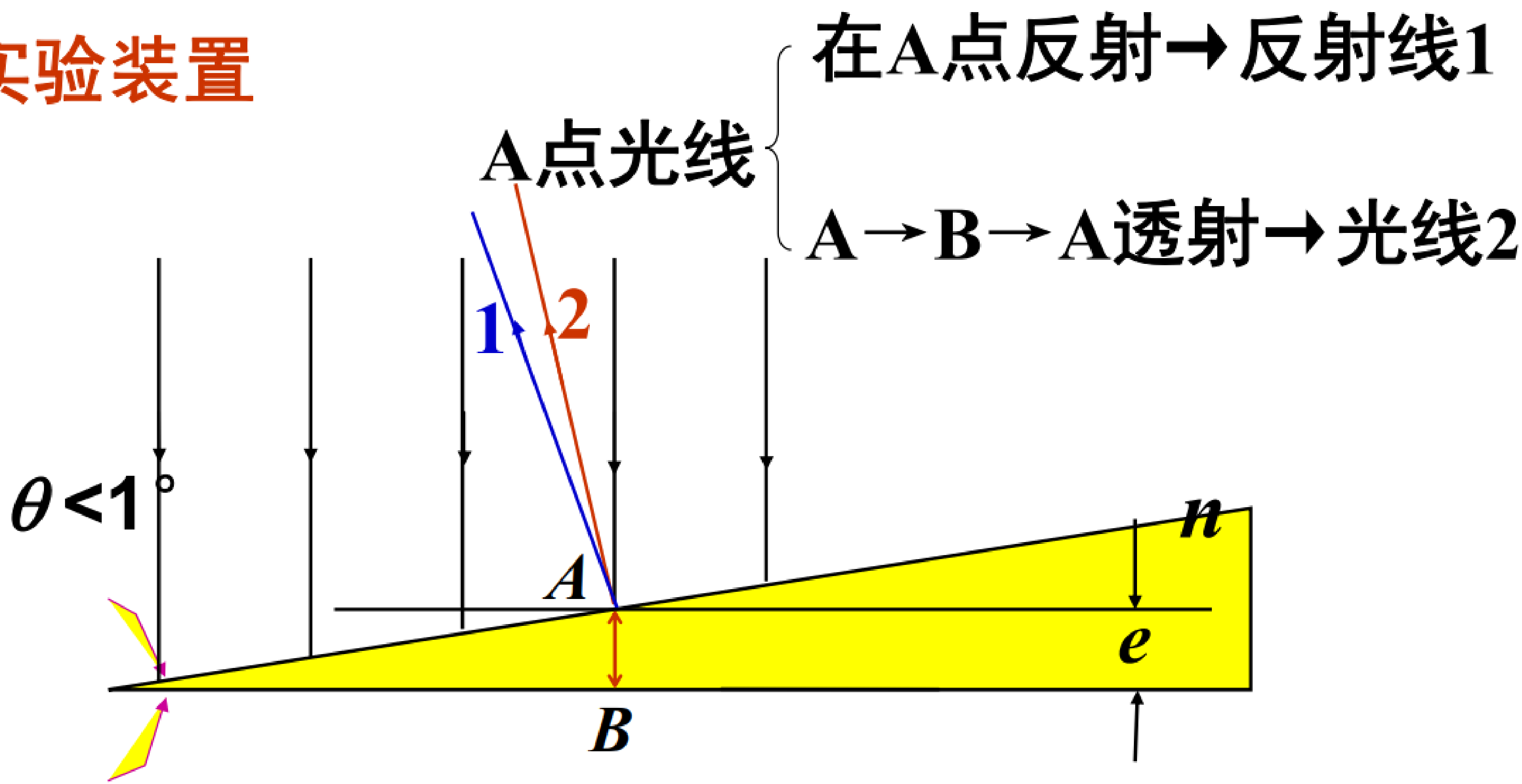


肥皂泡上彩色条纹

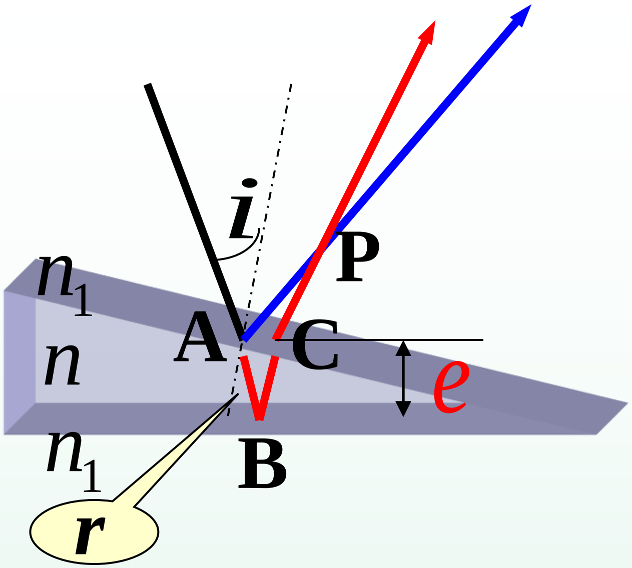


地面彩色油膜

实验装置



2.干涉条纹分析



$$\delta = n(\overline{AB}+\overline{BC}) - n_1(\overline{AP}-\overline{CP}) + \delta'$$

$$\delta \approx 2ne\cos r + \delta'$$

$$= 2e\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} + \delta'$$

在正入射(即垂直入射)时, $i=0$

$$\delta = 2ne + \delta'$$

$\delta'=\lambda/2$ or 0 ,由周围的介质折射率决定。

$$\boxed{\delta = 2ne + \delta' = k\lambda}$$

k=1,2,3,...明纹中心

$$\boxed{\delta = 2ne + \delta' = (2k+1)\frac{\lambda}{2}}$$

k=0,1,2,...暗纹中心

讨论:

$$\delta = 2ne + \delta'$$

1)劈尖上厚度 e 相等处,上、下表面反射光的光程差δ相等, 这些δ相等的点构成同一级干涉条纹, 故称为**等厚条纹(equal thickness fringes)**。

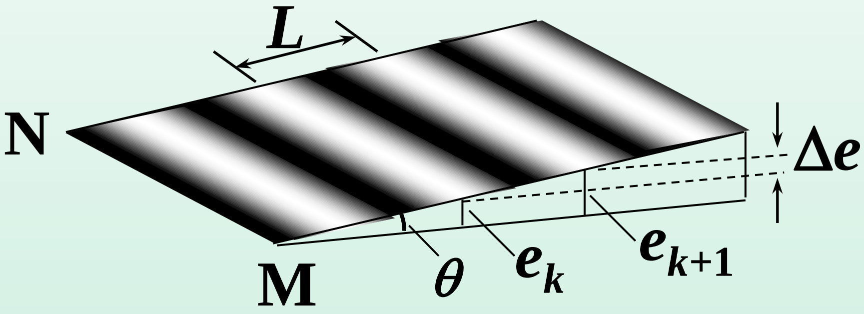
2)棱边: $e = 0$, $\delta' = \lambda/2$ 是暗纹; $\delta' = 0$ 是明纹

3)相邻明(暗)纹对应的厚度之差Δe

$$\Delta e = e_{k+1} - e_k \qquad (1)$$

$$2ne_{k+1} + \delta' = (k+1)\lambda \qquad (2)$$

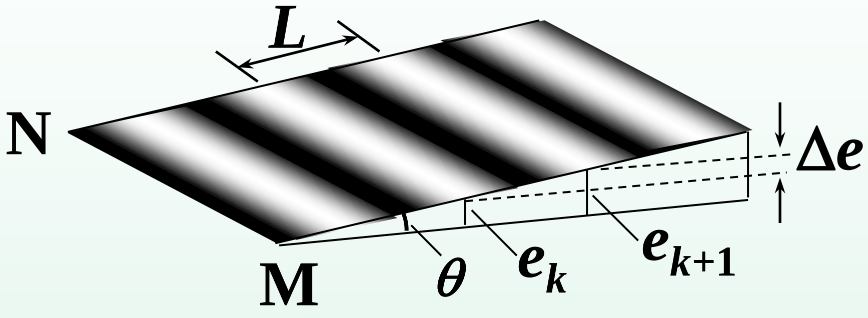
$$2ne_k + \delta' = k\lambda \qquad (3)$$



由上面三式解得: $\boxed{\Delta e = \dfrac{\lambda}{2n}}$ (介质劈) $\boxed{\Delta e = \dfrac{\lambda}{2}}$ (空气劈)

4)相邻明(暗)纹之间距离L: $L\sin\theta=\dfrac{\lambda}{2n}$

$$\boxed{L=\frac{\lambda}{2n\sin\theta}}$$ (介质劈)



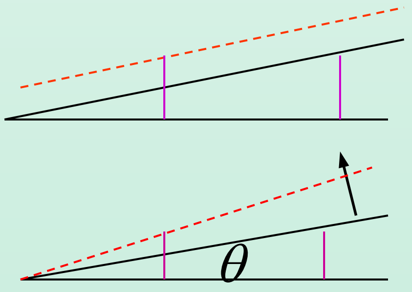
$$\boxed{L=\frac{\lambda}{2\sin\theta}}$$ (空气劈)

a)L与k无关, 所以是等宽等间距明暗相间平行条纹

b)λ相同, θ大则L小(条纹密)

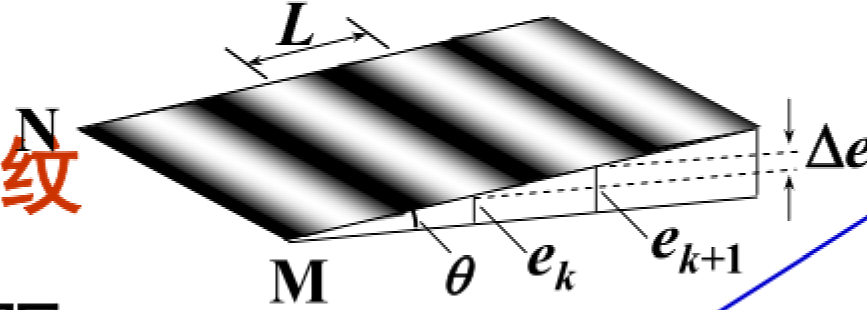
思考: 1)上玻璃片向上(下)平移,
条纹如何变化?

2)θ变大(小)条纹如何变?



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

2） 棱边 $e=0$ $\delta=\lambda/2$暗纹

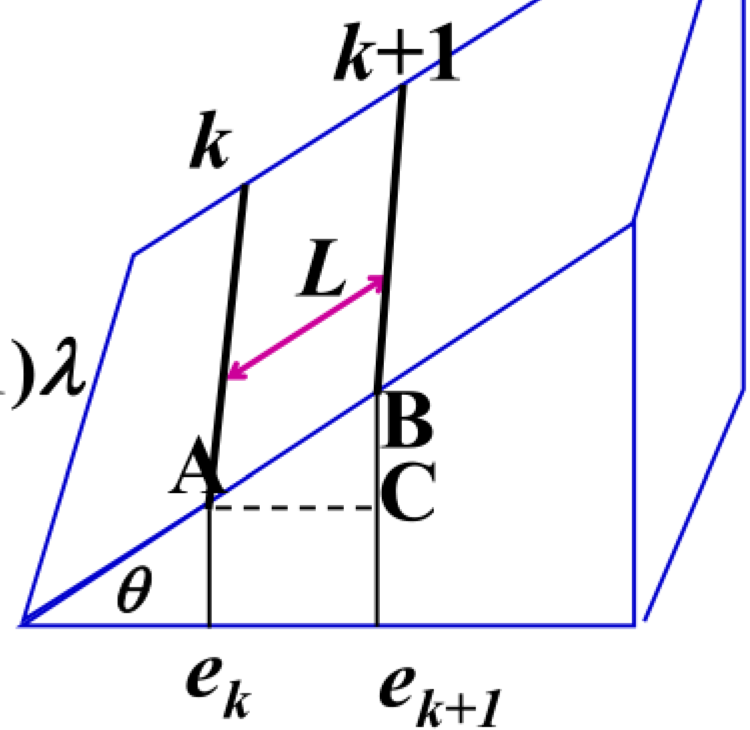


3） 相邻明（暗）纹间距 L

k 级明纹 $2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$

k+1级明纹 $2ne_{k+1} + \frac{\lambda}{2} = (k+1)\lambda$

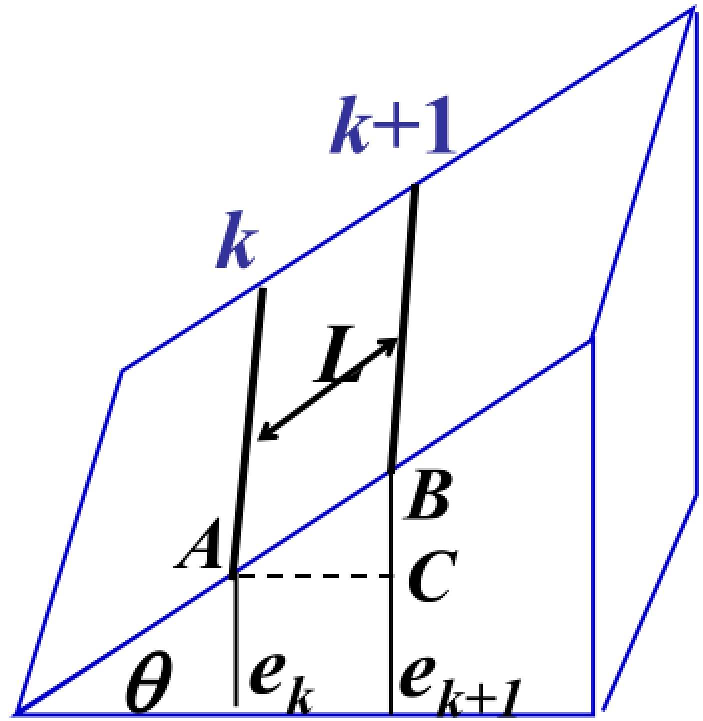
$$e_{k+1} - e_k = \frac{\lambda}{2n}$$



$$e_{k+1} - e_k = \frac{\lambda}{2n}$$

$$\boxed{L = \frac{\lambda}{2n\sin\theta}}$$

$$\boxed{L = \frac{\lambda}{2n\theta}}$$



$$\boxed{L = \frac{\lambda}{2n\theta}}$$

(1) L与 k 无关，条纹等间距

(2) $L \propto \lambda$

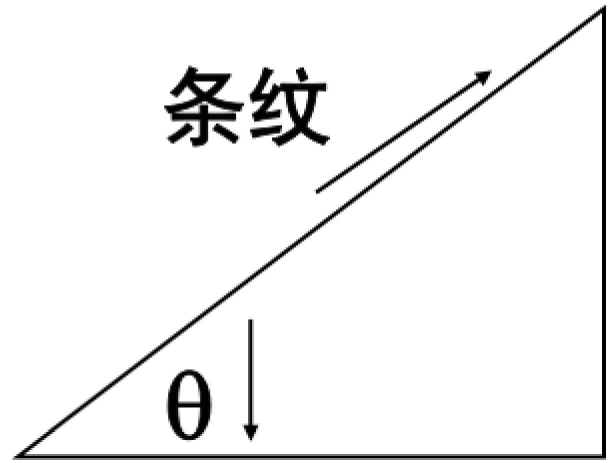
(3) $L \propto \dfrac{1}{\theta}$ $\theta\uparrow, L\downarrow$ 条纹变密

(4) $L \propto \dfrac{1}{n}$ n 越大条纹变密

4) 条纹动态分析

$$\boxed{L=\frac{\lambda}{2n\theta}}$$

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



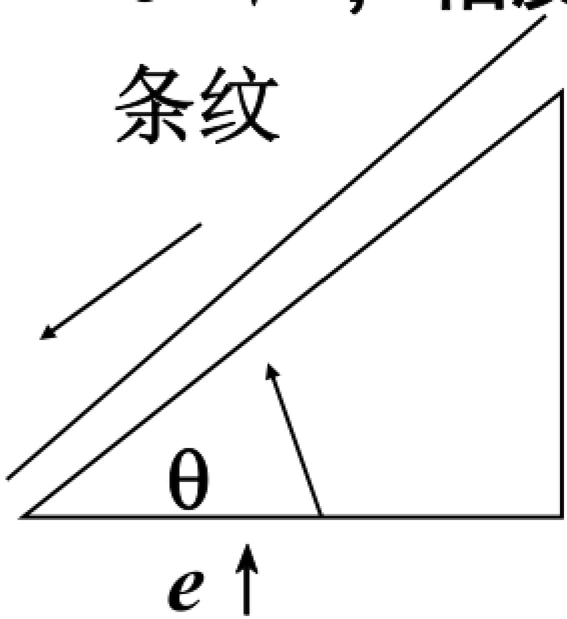
(1) n、λ 不变，θ↓ L↑

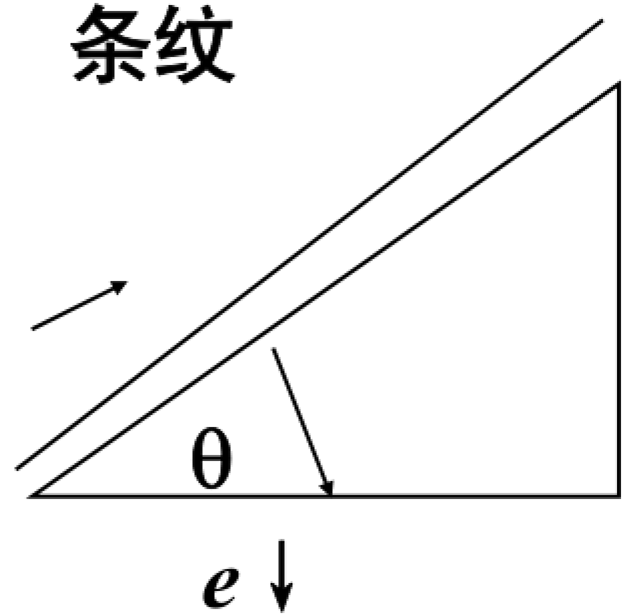
条纹向远离棱边的方向运动

(2) e 均匀上升,等厚线向棱边移动

$$2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$e\downarrow$ ，相反





3.应用

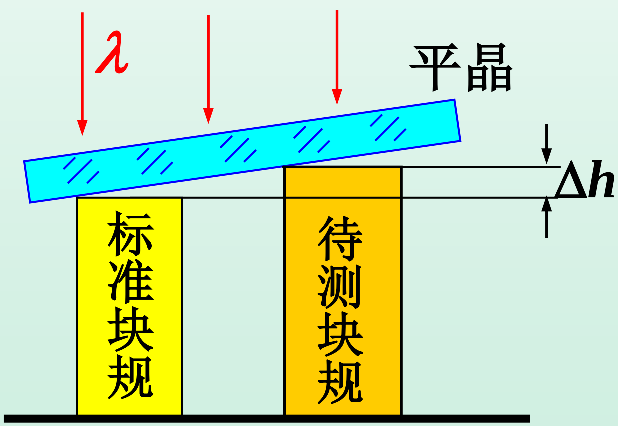
1)精确测量:

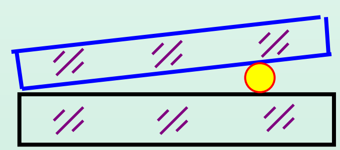
$$\boxed{L = \frac{\lambda}{2n\sin\theta}}$$

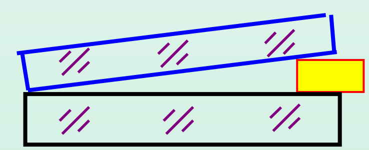
▲测波长: 已知θ、n, 测L 可得λ

▲测折射率: 已知θ、λ, 测L 可得n

▲测细小直径、厚度、微小变化:



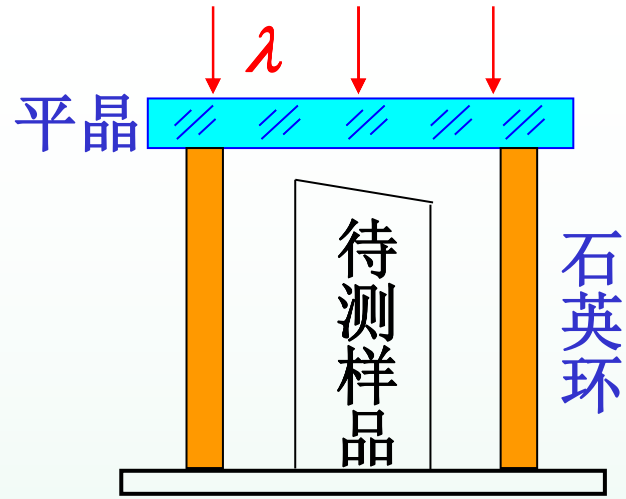




待测样品受热膨胀，条纹向右移;

如移过N个条纹, 样品伸长多少?

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

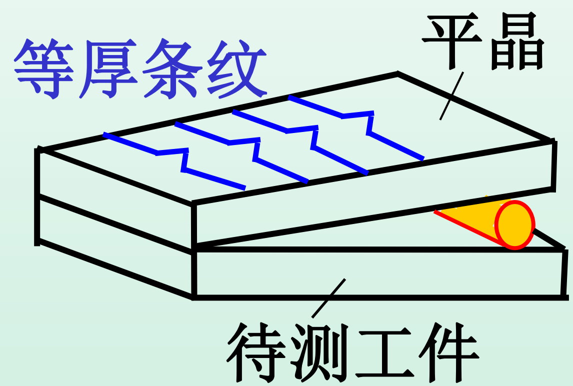


干涉膨胀仪

2)检验光学玻璃质量

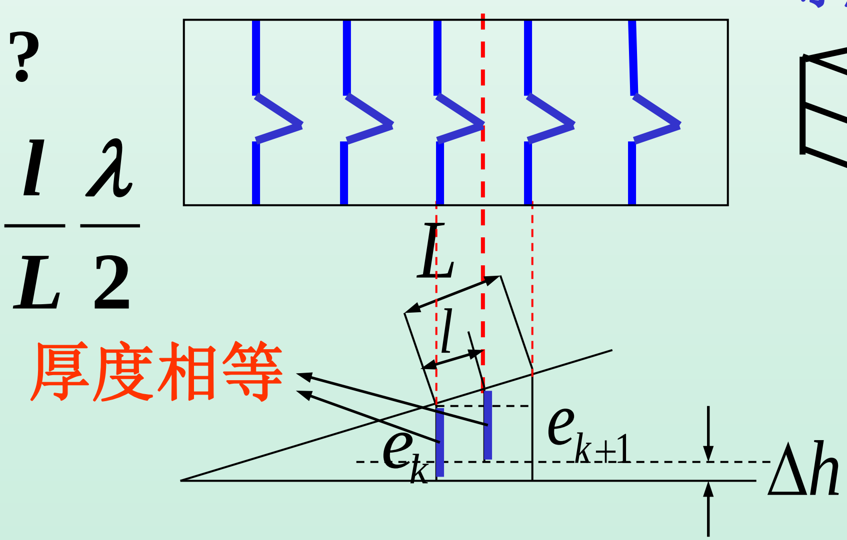
待测工件表面有什么缺陷?

待测工件上表面中间有一条凸起线;

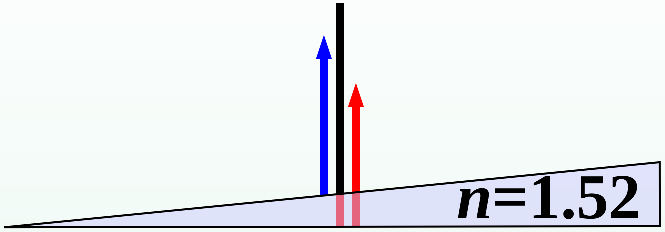


最多凸了多少?

$$\Delta h = l\sin\theta = \frac{l}{L}\frac{\lambda}{2}$$



例7: 测微小角度:玻璃劈, 折射率n=1.52, λ=5893Å 的钠光垂直照射玻璃劈,测得相邻暗纹之间距离为 L=0.25cm 求劈角θ



解: $$\delta_k = 2ne_k + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

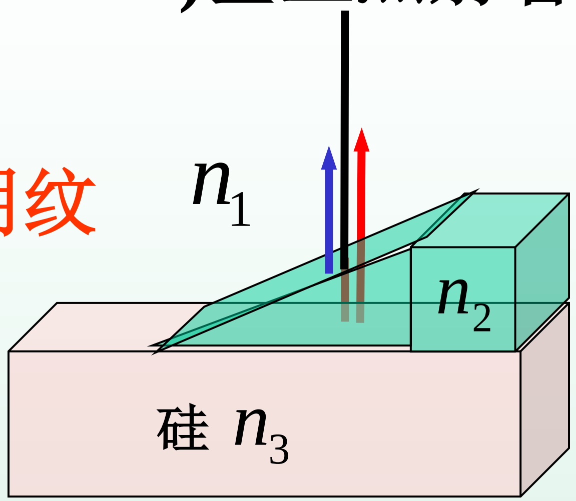
$$\delta_{k+1} = 2ne_{k+1} + \frac{\lambda}{2} = \left[2(k+1)+1\right]\frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

$$\Delta e = e_{k+1} - e_k = \frac{\lambda}{2n} \qquad \Delta e = L\sin\theta = \frac{\lambda}{2n}$$

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2nL} = 7.75\times 10^{-5} \qquad \theta \approx 7.75\times 10^{-5}[\text{rad}]$$

例8: 硅(半导体元件),表面有一层氧化硅(n_2=1.5),测其厚度e, 削成斜面, 用钠光灯(λ=5893Å)垂直照射看到第5 个条纹, 求 : e =?

解: $\delta = 2n_2 e = k\lambda \quad k=0,1,2,\ldots$ 明纹



$$n_1 < n_2 < n_3$$

二次半波损失, 所以光程差中无$\lambda/2$, 底边(e=0)为明纹.

取 k=4

$$e = \frac{k\lambda}{2n_2} = \frac{4 \times 5893 \times 10^{-10}}{2 \times 1.5} = 7.857 \times 10^{-7}[\mathrm{m}]$$

$$e = 0.78[\mu\mathrm{m}]$$

思考: 如$n_1>n_2>n_3$如何求解? 如$n_1 < n_2 > n_3$如何求解?

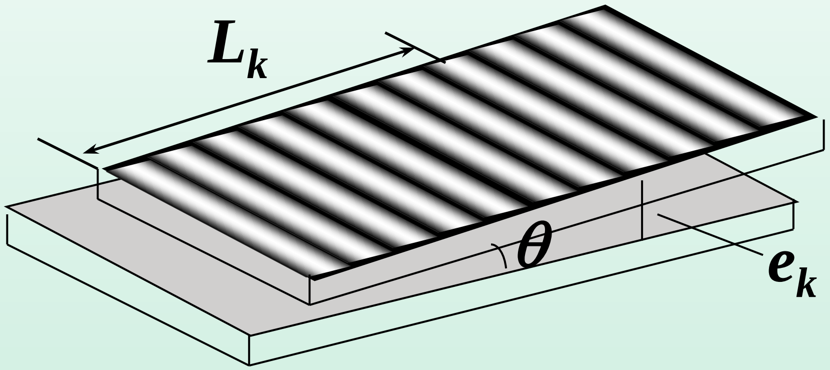
例9: 两平板玻璃之间形成一个$\theta=10^{-4}$rad的空气劈尖, 若用λ=600nm 的单色光垂直照射。**求:**

1)第15条明纹距劈尖棱边的距离;

2)若劈尖充以液体(n=1.28)后, 第15条明纹移动了多少?

解: 1) 设第k条明纹对应的空气厚度为e_k

$$由\ \delta = 2e_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$



$$e_{15} = \frac{2\times15-1}{4}\times600\times10^{-9}$$

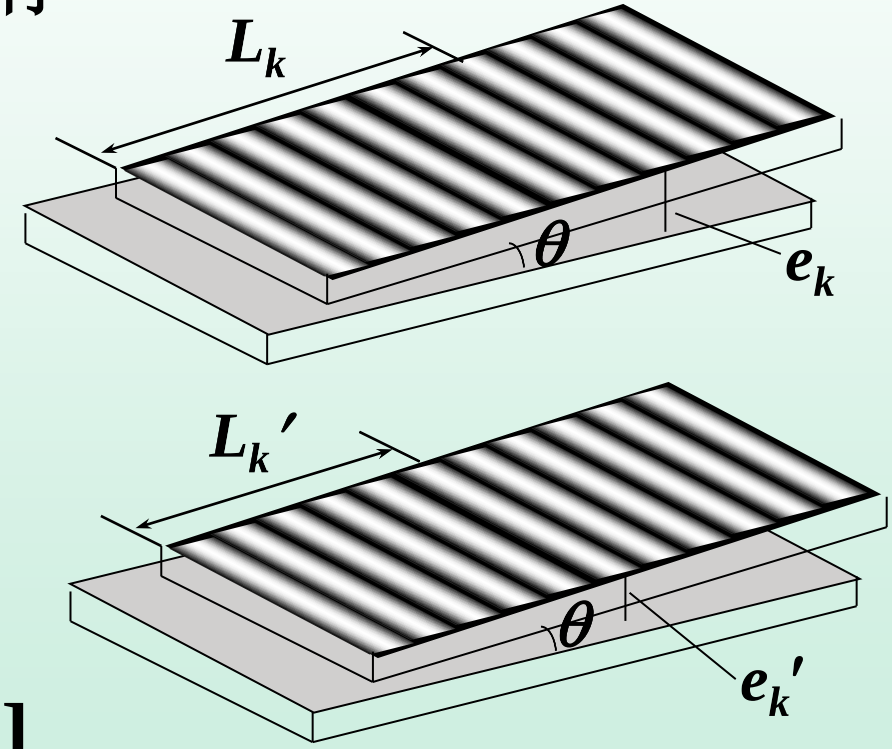
$$= 4.35\times10^{-6}[\mathrm{m}]$$

$$\therefore L_{15} = \frac{e_{15}}{\sin\theta} \approx \frac{e_{15}}{\theta} = 4.35\times10^{-2}[\mathrm{m}]$$

2)第15条明纹向棱边方向移动(为什么?)

设第15条明纹距棱边的距离为 L_{15}' , 所对应的液体厚度为e_{15}'

因空气中第15条明纹对应的光程差等于液体中第15条明纹对应的光程差, 有



$$2e_{15}+\frac{\lambda}{2}=2ne_{15}'+\frac{\lambda}{2}$$

$$\therefore e_{15}'=\frac{e_{15}}{n}$$

$$\Delta L=L_{15}-L_{15}'$$

$$=\frac{e_{15}-e_{15}'}{\theta}=9.5\times10^{-3}[\mathrm{m}]$$

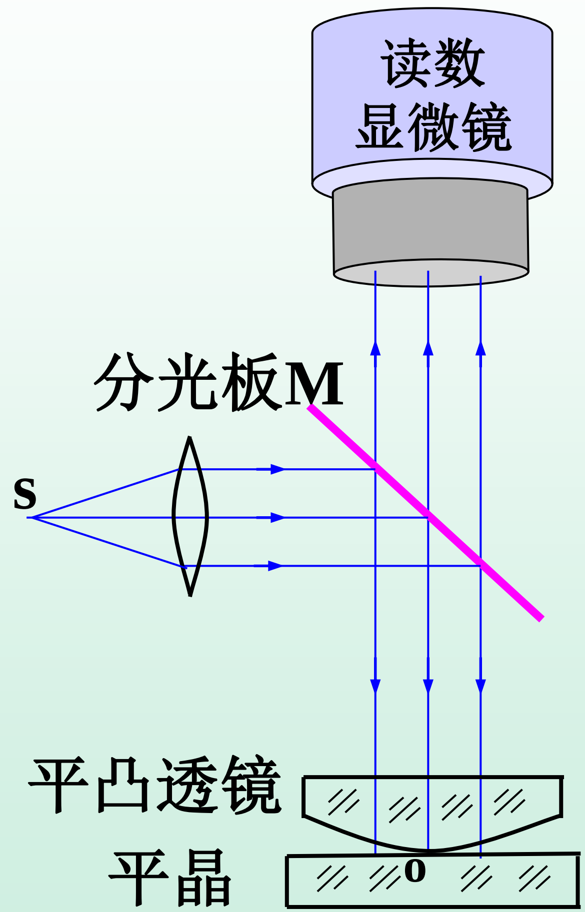
6.3.3 牛顿环(Newton rings)

1.观察牛顿环装置

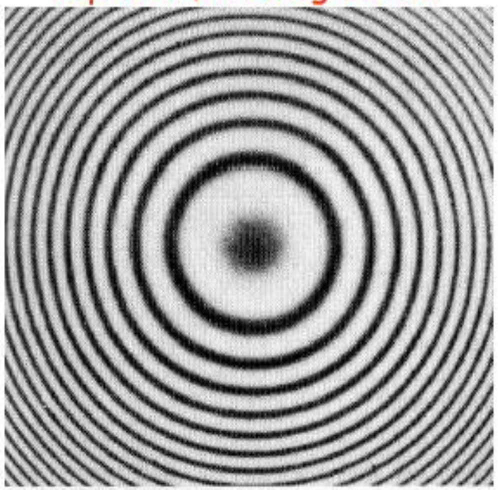
R—平凸透镜半径

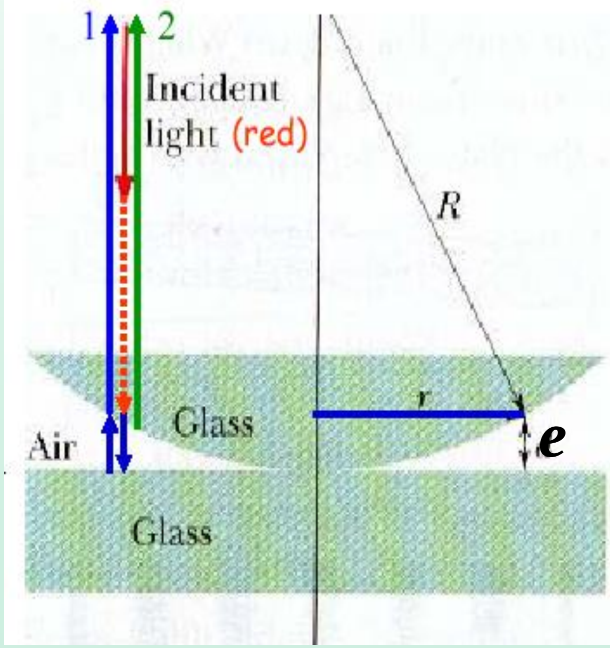
o—平凸透镜与
平晶的接触点

相当于劈尖干涉



top view, looking down:





2.干涉条纹分析

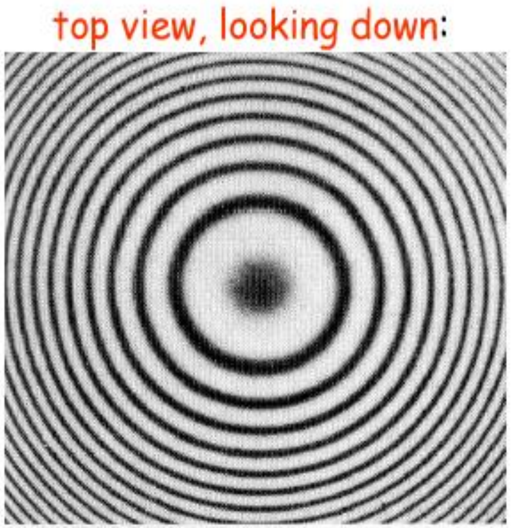
空气劈:

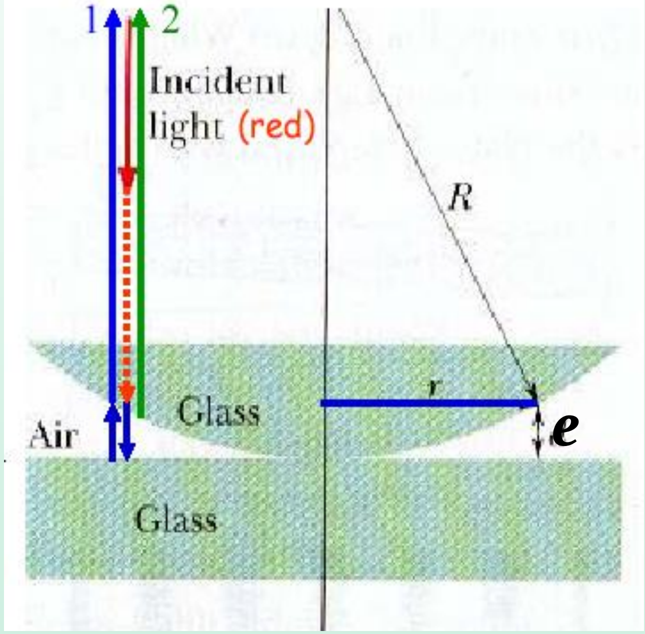
$$\boxed{\delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = k\lambda}$$

k=1,2,3,......明纹中心

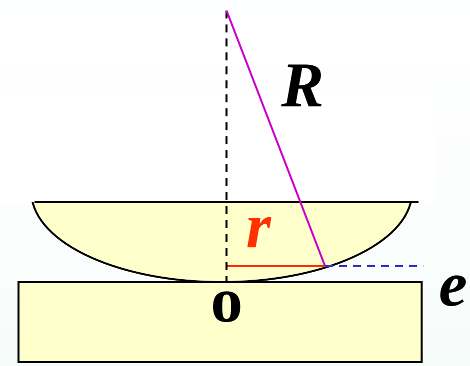
$$\boxed{\delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}}$$

k=0,1,2,......暗纹中心





3.牛顿环干涉条纹的分布特点



1)中心接触点:

$e=0$, $\delta=\lambda/2$ 是暗纹;

2)明暗纹位置(环半径)

$$r^2 = R^2 - (R-e)^2 = 2R\cdot e - e^2 \approx 2R\cdot e$$

$e = r^2/2R$ 代入明(暗)纹式中化简得:

$$\boxed{r = \sqrt{\frac{(2k-1)R\lambda}{2}}}$$

k=1,2,3,......明纹中心

$$\boxed{r = \sqrt{kR\lambda}}$$

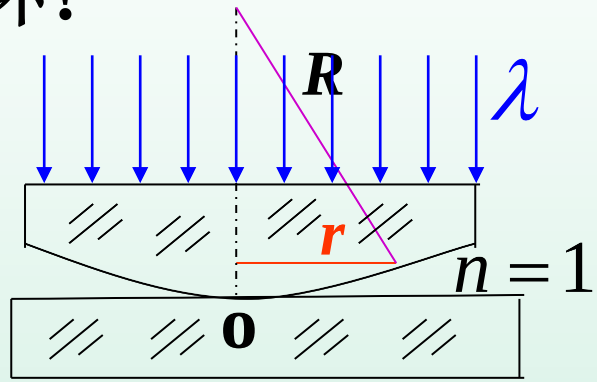
k=0,1,2,......暗纹中心

牛顿环是同心圆环,条纹从里向外逐渐变密,中心干涉级次最低。

例10: 如图为观察牛顿环的装置,平凸透镜的半径为R=1m的球面; 用波长 λ =500nm的单色光垂直照射。

求(1)在牛顿环半径r_m=2mm范围内能见多少明环?

(2)若将平凸透镜向上平移e_0=1μm最靠近中心o处的明环是平移前的第几条明环?



解: (1) 第k条明环半径为

$$r = \sqrt{\frac{(2k-1)R\lambda}{2}}, k = 1,2,\cdots$$

令$r = r_m, \therefore k = 8.5$ 有8条明环

(2)向上平移后,光程差改变 $2ne_0$, 而光程差改变 λ 时, 明条纹往里"缩进"一条,共"缩进"条纹:

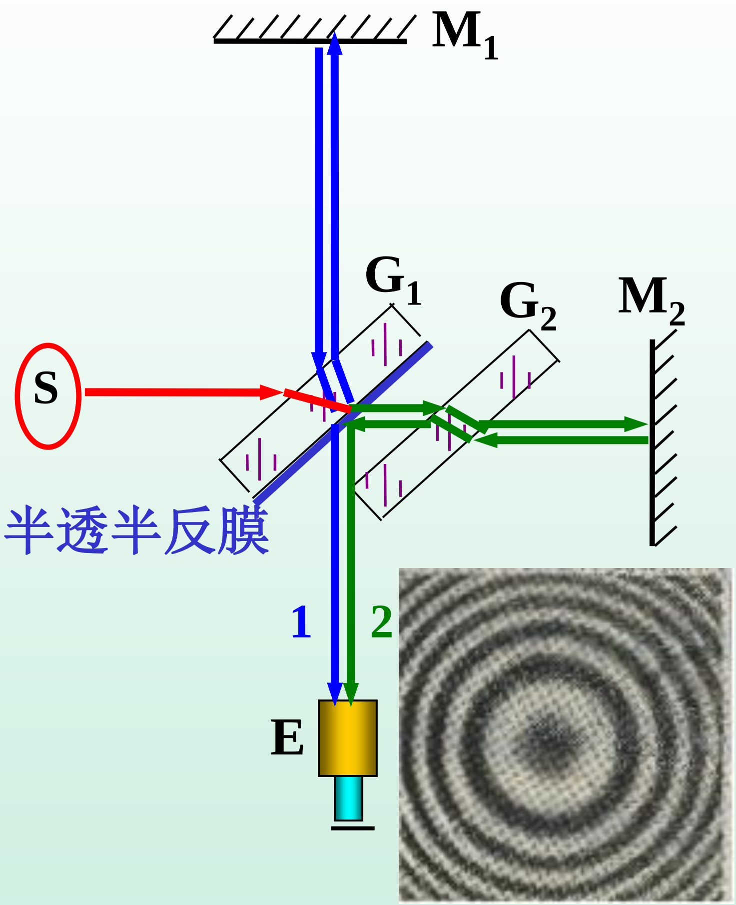
$$\frac{2ne_0}{\lambda} = \frac{2\times1\times1\times10^{-6}}{5\times10^{-7}} = 4$$ 最中间为平移前的第5条

6.3.4 迈克尔逊干涉仪(Michelson interferometer)

1.迈克尔逊干涉仪构造

G_1: 分光板，G_2: 补偿板

M_1:平面镜(可动), M_2:平面镜(不动)



Michelson干涉仪产生的背景:
寻找以太(ether)

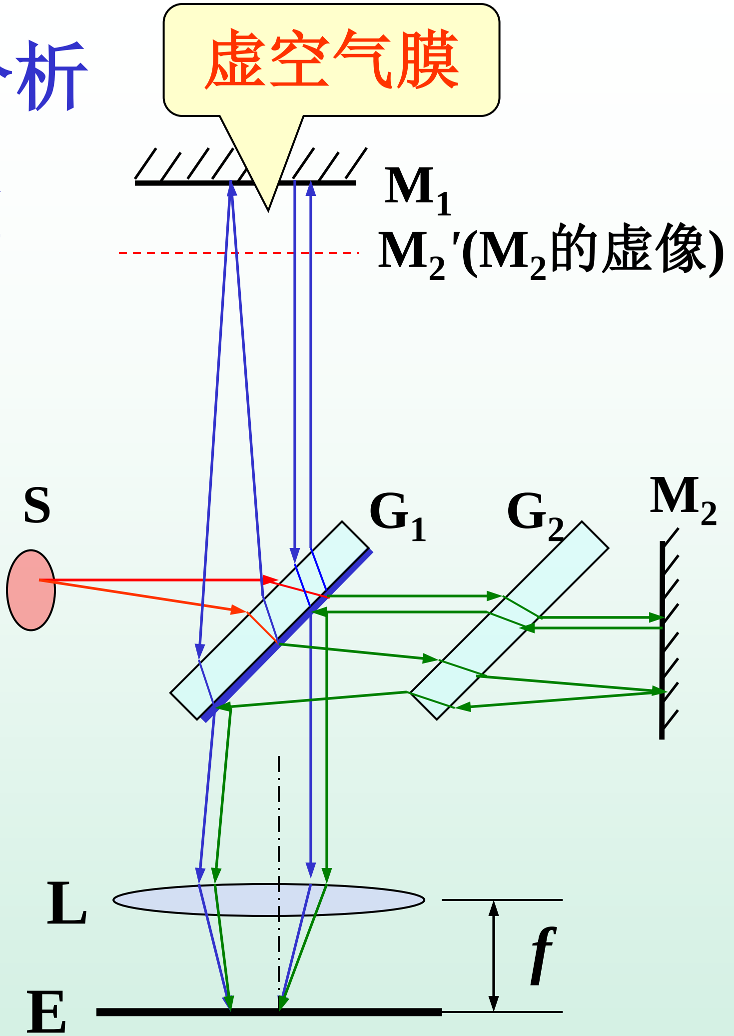
2. Michelson干涉仪的干涉条纹分析

1)若M_1与M_2'平行 ⟹ 等倾条纹

若用面光源, 须加一透镜L
在焦平面E上可见到干涉条纹。

若条纹从中央冒出来
(或缩进去)N个条纹时,
M_1平移的距离为

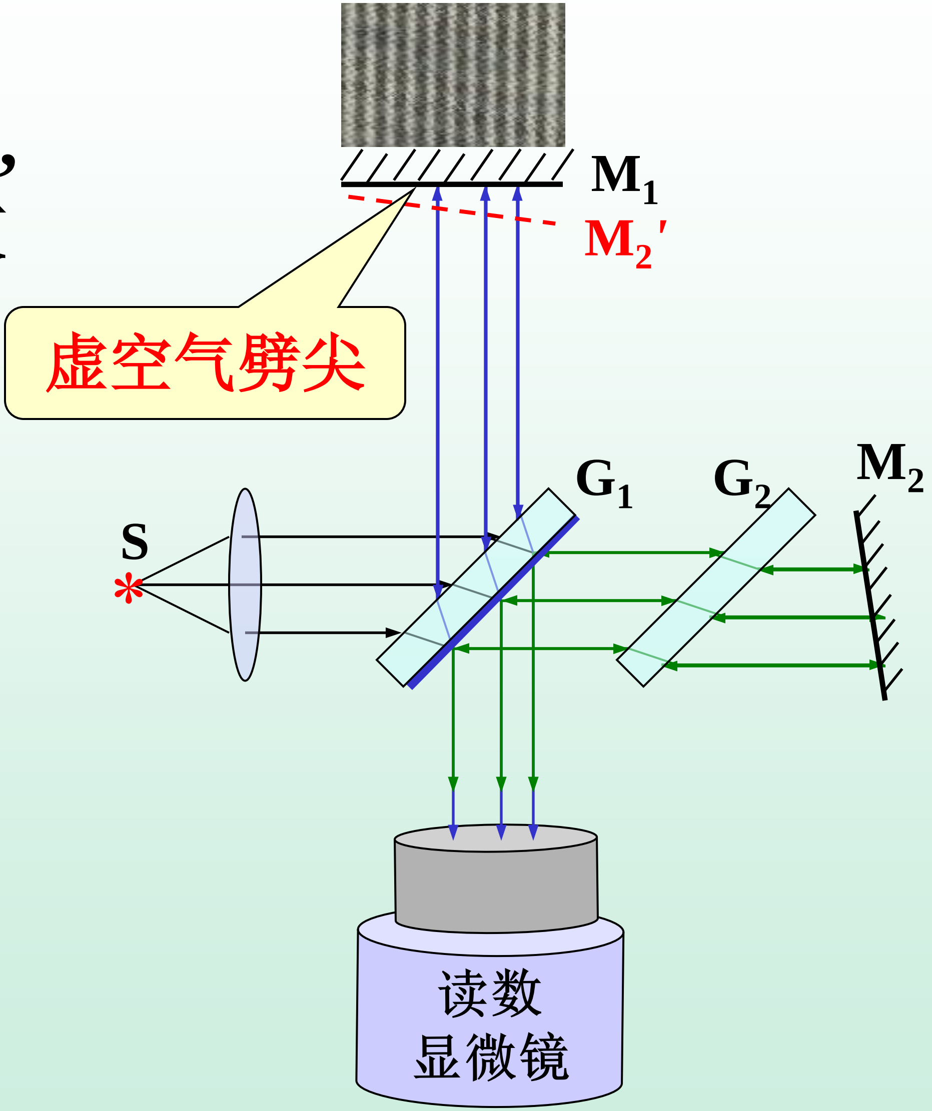
$$\boxed{\Delta d = N\frac{\lambda}{2}}$$



2)若M_1与M_2'有微小夹角 ⟶ 等厚条纹

M_1平移, 则干涉条纹移动,
若M_1平移Δd 时,干涉条纹
移过N条, 则:

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



3.应用

1)测光谱线的波长, 谱线宽度, 精细结构

2)校准长度, 测微小角度和微小位移, 测折射率

3)标准米的长度:已知氪86(^{86}Kr)波长λ=6057.802105Å

M_1镜移动的距离使得干涉圆环“冒出”或“吞进”N=3301527.46个圆环时为1m。即：

$$1[\mathrm{m}] = N\frac{\lambda}{2} = 3301527.46\frac{\lambda}{2}$$

例11: 用钠光灯(λ=589.3nm)作光源,在迈氏干涉仪的一支光路上, 放置一长度为140mm的玻璃容器, 当以某种气体充入容器时, 观察干涉条纹移动了180条

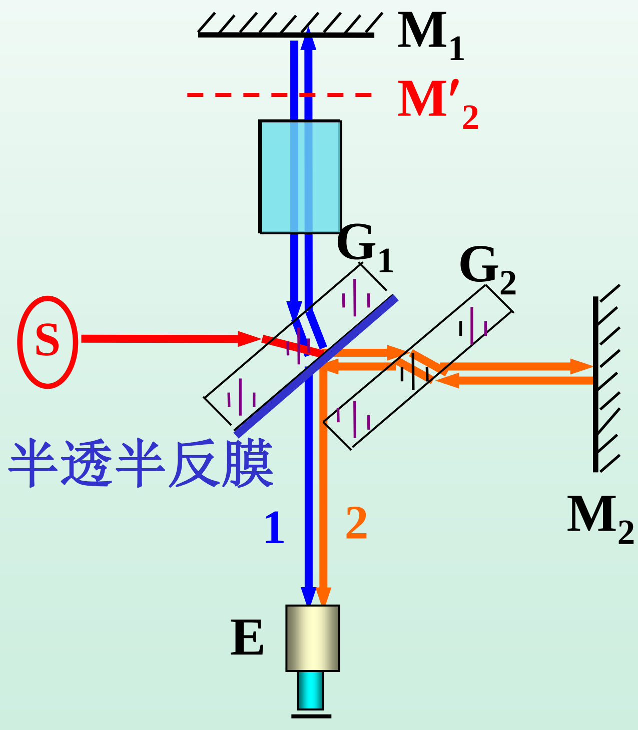
求: 该种气体的折射率 n=?(空气的n_0=1.000276)

解: 设l 为玻璃容器的长度,用被测气体代替空气后

光程差的改变量为$2(n-n_0)l$

$$2(n-n_0)l = N\lambda$$

$$n = n_0 + \frac{N\lambda}{2l} = 1.000655$$



光的干涉现象

相干条件:
1)振动频率相同
2)振动方向相同
3)相位差恒定

相位差与光程差关系:

$\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda$

$\Delta\varphi = 2k\pi$，明纹

$\Delta\varphi = (2k+1)\pi$，暗纹

获得相干光的方法

分波振面法

杨氏干涉

$$\delta = \frac{d}{D}x,\quad \Delta x = \frac{D}{d}\lambda$$

明: $x_k = 2k\frac{D\lambda}{2d}$

暗: $x_k = (2k+1)\frac{D\lambda}{2d}$

洛埃德镜

分波振幅法

薄膜的等倾干涉, e 相同, i不同

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

迈克尔逊干涉仪

$$\Delta d = N\frac{\lambda}{2}, (M_1 \perp M_2)$$

薄膜等厚干涉, i相同 e不同(垂直入射, i=0)

$\delta = 2ne + \delta'$

劈尖(i=0):

$$\delta = 2ne + \delta'$$

$$L = \frac{\lambda}{2n\sin\theta}$$

牛顿环(i=0):

明: $r_k = \sqrt{\frac{(2k-1)R\lambda}{2n}}$

暗: $r_k = \sqrt{\frac{kR\lambda}{n}}$