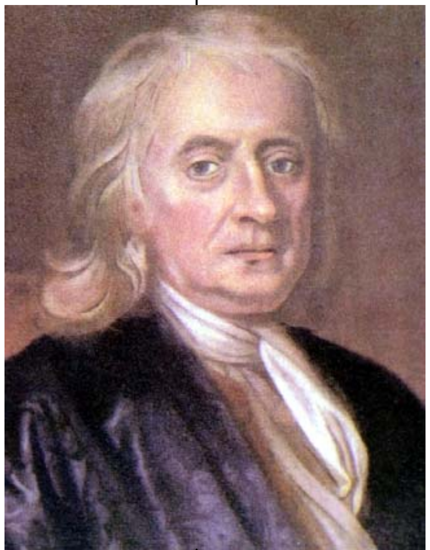

光 学
Optics

光到底是什么？……………

17世纪明确形成了两大对立学说

牛顿



由于波动说没有数学基础以及牛顿的威望使得微粒说一直占上风

惠更斯

19世纪初证明了波动说的正确性

微粒说

波动说

19世纪末光电效应现象使得爱因斯坦在20世纪初提出了光子说：光具有粒子性

这里的光子完全不同于牛顿所说的“微粒”

01:35:48

光的本性：即具有波动性，又具有粒子性

- 波动性：干涉、衍射、偏振(横波)
- 粒子性：黑体辐射、光电效应、康普顿效应

物理光学
- 波动光学：光的电磁理论
  - 光的干涉
  - 光的衍射
  - 光的偏振
- 量子光学：光的量子理论，研究光与物质相互作用的规律

几何光学：

根据光的直线传播，以光的折射、反射定律为基础；研究光在介质中的传播和成像规律的学科。

第一章 光的干涉

01:35:48

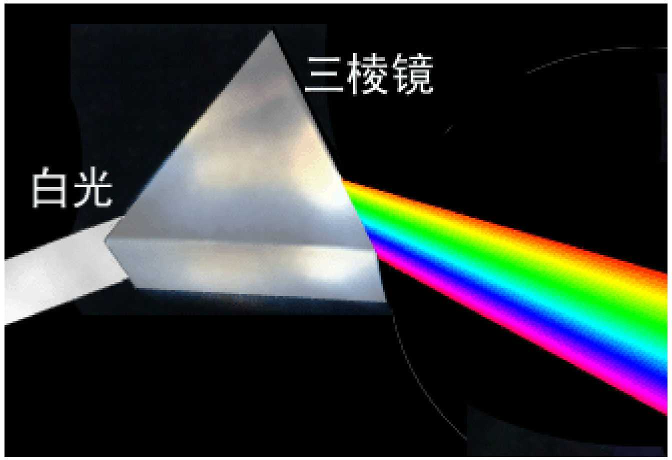
§1 光的相干性

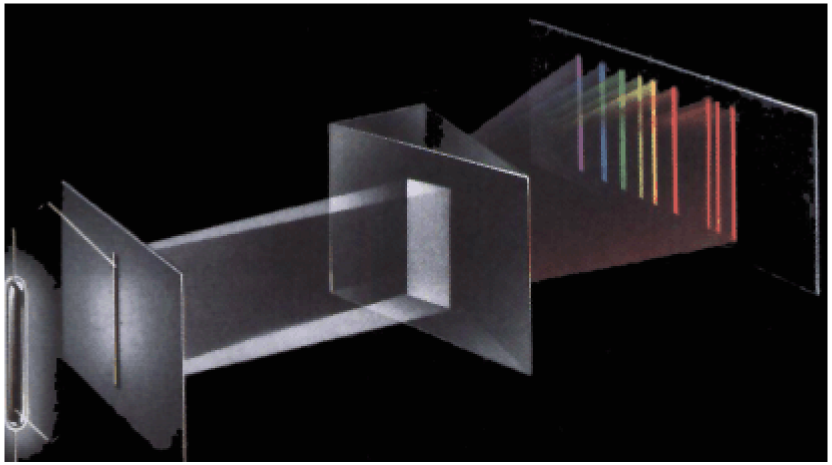
相干条件：频率相同、振动方向相同、相位差恒定

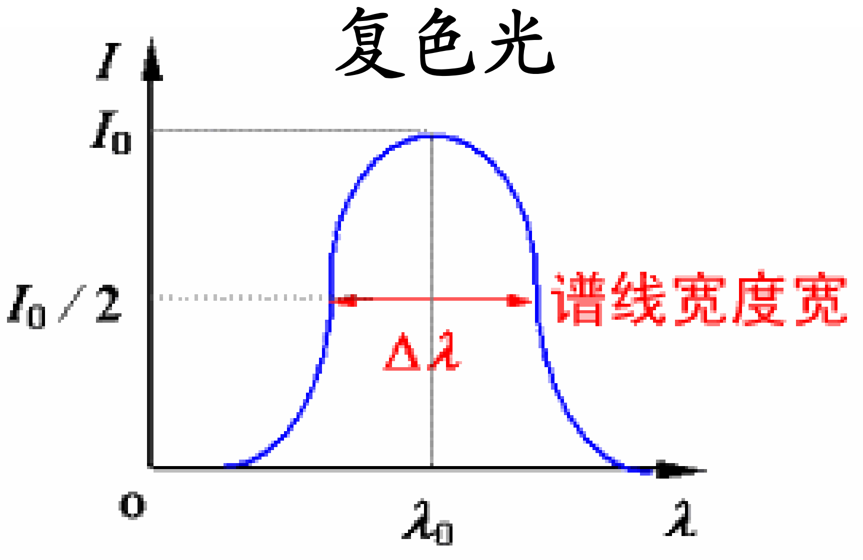
1.1 光的单色性

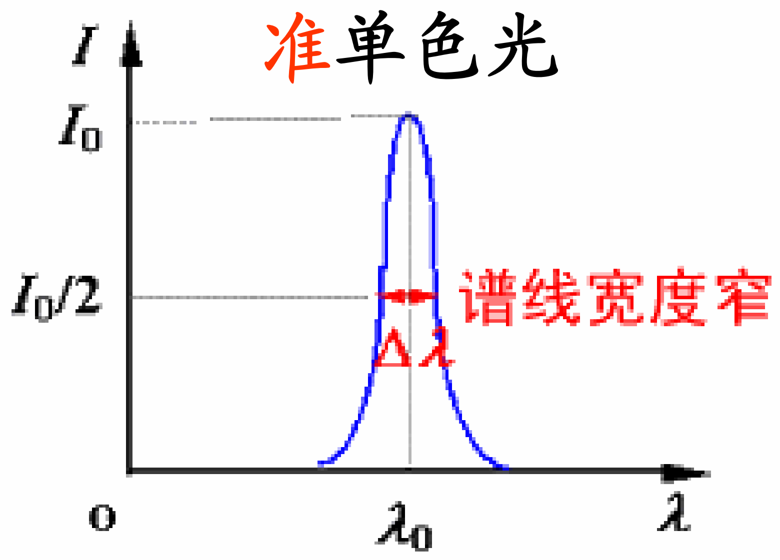
- 单色光——只含单一频率的光
- 复色光——不同频率单色光的混合：比如白光

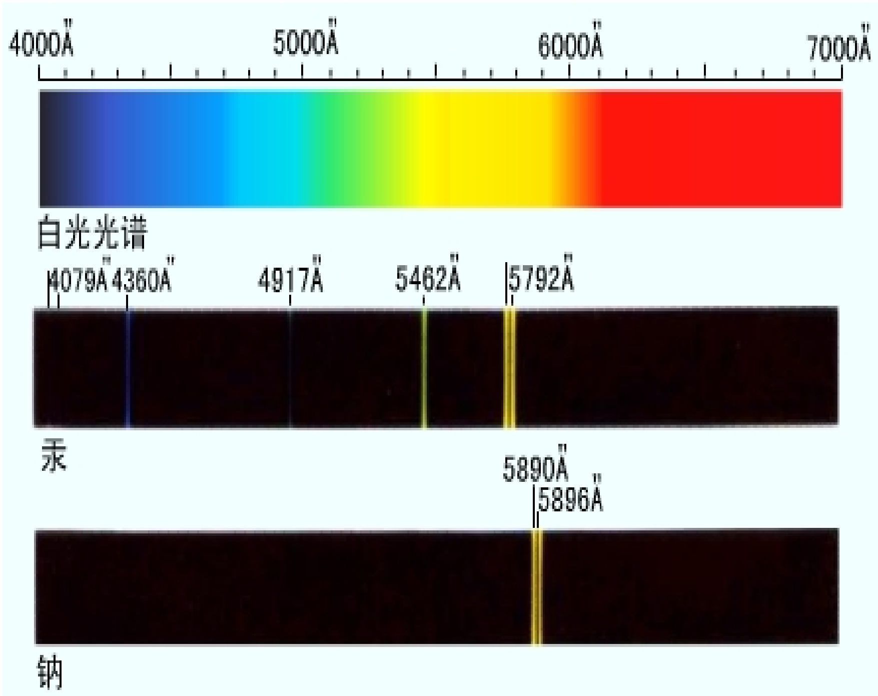
利用分光镜测量光源的光谱　$\lambda = uT = 2\pi u/\omega$









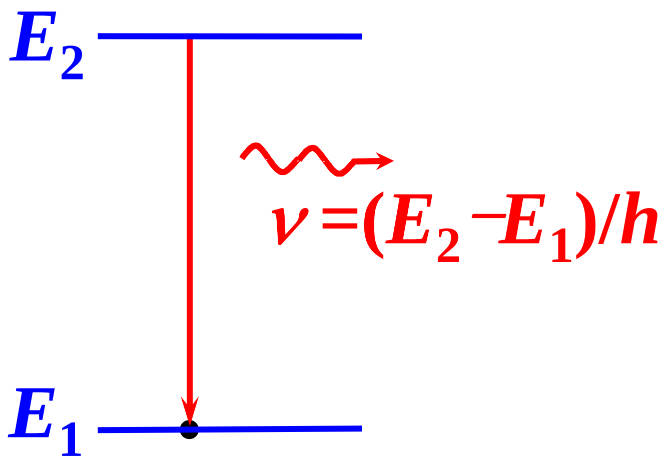


几种光源的比较			
光源	λ_0	$\Delta\lambda$	单色性
白光	550nm	$\sim\lambda_0$	差
钠灯(Na)	589.3nm	0.6nm	较好
低压镉灯(Cd)	643.8nm	0.0013nm	好
低压氪灯(Kr)	605.8nm	0.00047nm	好
氦氖激光器	632.8nm	10^{-9}nm	极好

01:35:48

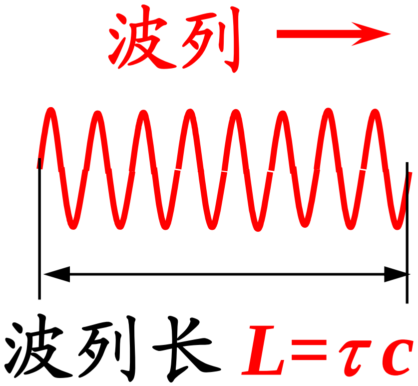
1.2 原子的发光机制

原子从高能态向低能态跃迁，
向外辐射电磁波



设跃迁过程经历的时间(驰豫时间、发光时间)为τ

每次发光只发出一段长为
$L=\tau c$的有限长波列



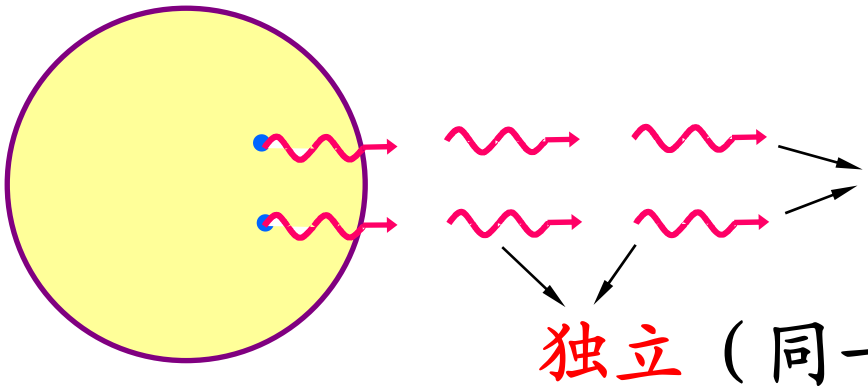
由傅立叶频谱分析可知，有限长的波列可以表示为许多不同频率不同振幅的简谐波的叠加

实际光波是包含了多种波长成分的复色光，
而严格的单色光实际是不存在的

01:35:48

(1) 普通光源：自发辐射

各次发光相互独立，具有随机性、间歇性

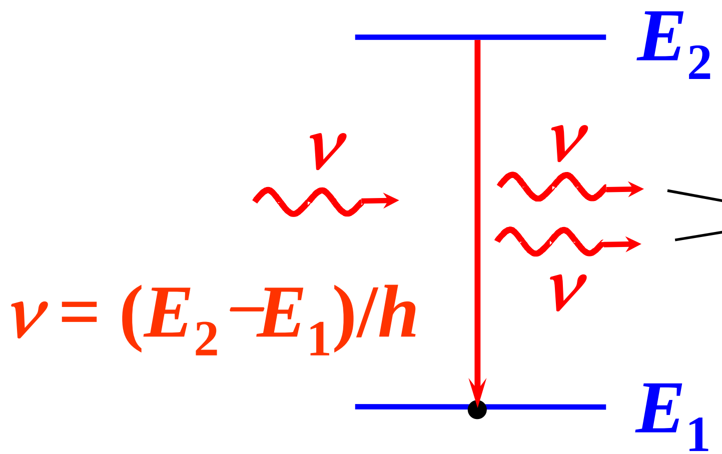


独立（不同原子发的光）

独立（同一原子先后发的光）

各波列的频率、振动方向不会完全相同，初相位无关

(2) 激光光源：受激辐射



频率、相位、振动方向均相同

直接叠加即可产生明显的干涉

01:35:48

判断题： #T5101.

使用复色光无法获得干涉条纹

01:35:48

§2 分波前干涉

2.1 杨氏双缝干涉

托马斯·杨（**Thomas Young**）

英国物理学家、医生和考古学家，

光的波动说的奠基人之一

波动光学：杨氏双缝干涉实验

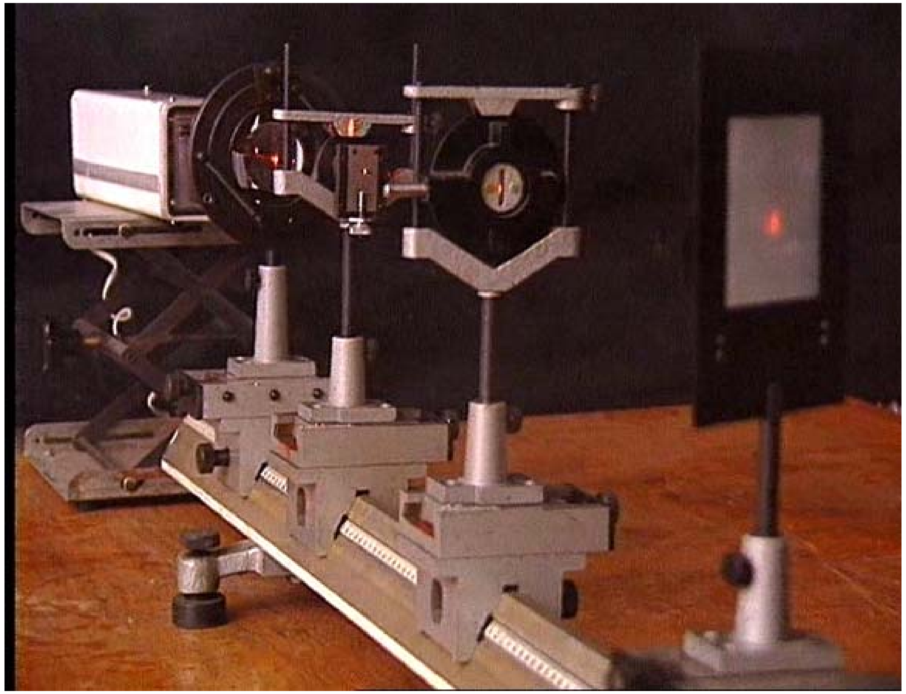
生理光学：三原色原理

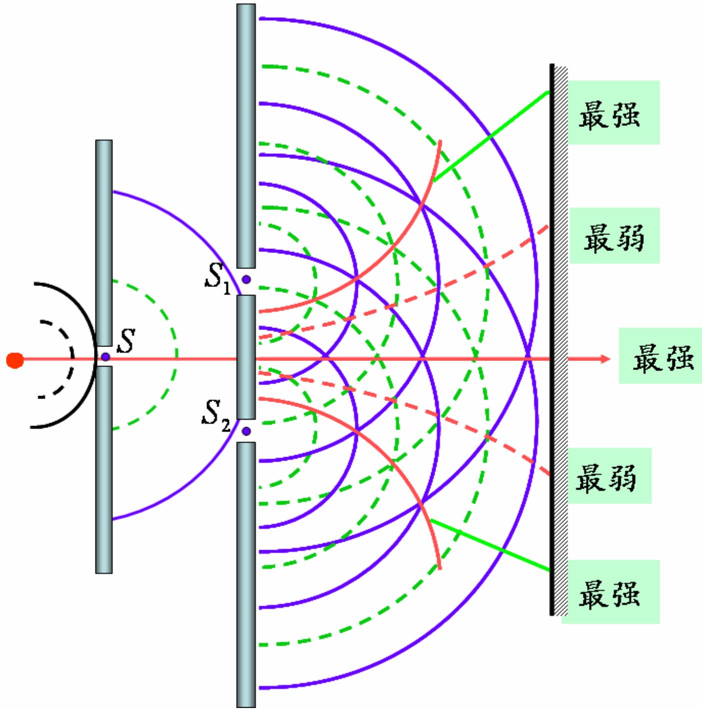
材料力学：杨氏弹性模量

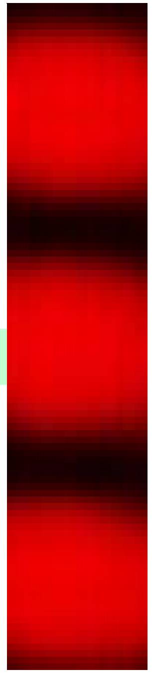
考古学　：破译古埃及石碑上的文字

托马斯·杨巧妙的解决了相干光源的问题，成功地利用普通光源观察到干涉现象，并用波动理论做出了解释

1. 杨氏双缝干涉实验







光源发出的光先照射到**单缝S**上

在单缝S的前面放置两个相距很近的狭缝S_1、S_2，

S到S_1、S_2的距离很小并且相等

通过双缝S_1、S_2的光来自同一子波源S的同一波前，

二者振动方向、频率、初相位均相同，将会产生干涉

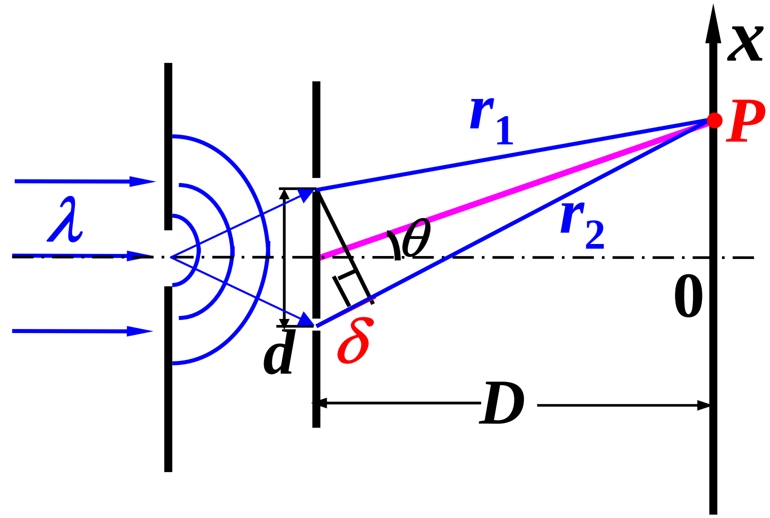
01:35:48

判断题： #T5102.

杨氏双缝实验中，分别用两个普通的独立的单色光源照射S_1和S_2，如果照相机的曝光时间比原子的发光时间($\sim 10^{-8}$s)还要短很多，则有可能拍得干涉图样的照片。

01:35:48

2. 明纹与暗纹条件



$d \gg \lambda$，$D \gg d$ ($d \sim 10^{-4}$m, $D \sim$ m)

同一子波源→初相差为0，相位差为

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

两缝处同相→波程差为

$$\delta = r_2 - r_1 \approx d\sin\theta \approx d\ \mathrm{tg}\,\theta = d\cdot\frac{x}{D}$$

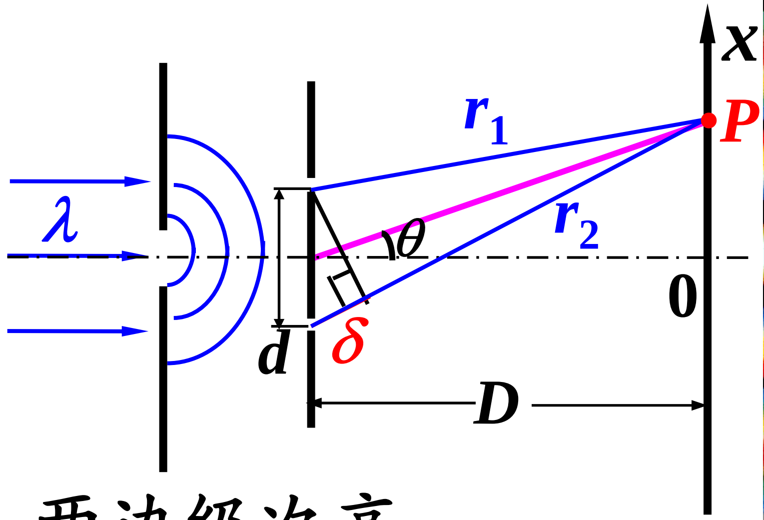
明纹条件：$\Delta\varphi = 2k\pi,\quad k = 0, \pm1, \pm2\ldots \qquad \delta = k\lambda$

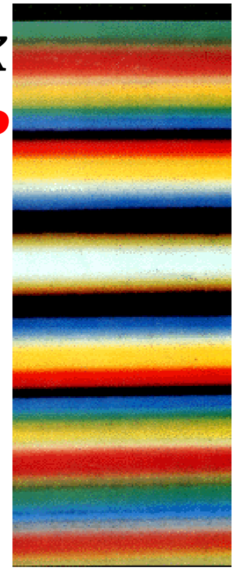
暗纹条件：$\Delta\varphi = (2k+1)\pi,\ \ k = 0, \pm1, \pm2\ldots \qquad \delta = (k+\frac{1}{2})\lambda$

明纹(中心)位置 $x_k = k\dfrac{D}{d}\lambda$ 暗纹位置 $x_{k+\frac{1}{2}} = (k+\dfrac{1}{2})\dfrac{D}{d}\lambda$

01:35:48

3. 条纹特点与变化





•若为单色光入射

一组明暗相间的平行条纹

θ不太大时条纹等间距

$$x_k = k\frac{D}{d}\lambda$$ 中间级次低，两边级次高

•明纹(暗纹)的间距均为 $\Delta x = \dfrac{D}{d}\lambda$

演示

$d\downarrow, D\uparrow, \lambda\uparrow \rightarrow \Delta x\uparrow$，条纹变疏，零级明纹位置不变

•改变单缝S位置　　　　若上下平移双缝呢？

S下移时，零级明纹及条纹整体上移，条纹间距不变

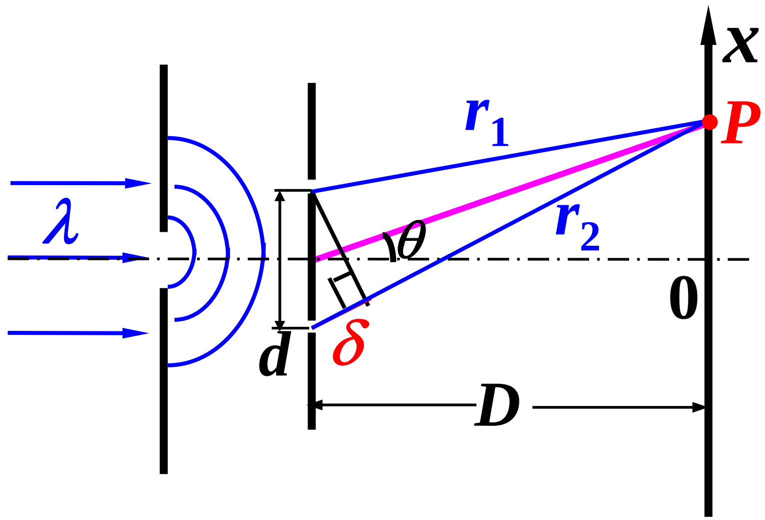
•若为白光入射

0级明纹中心为白色，其余明纹构成内紫外红的彩带

01:35:48

例: 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**; 从第**1**级明纹到同侧的第**4**级明纹相距为**7.5mm**; 求: **(1)**入射光的波长; **(2)**相邻明纹间的距离

解: **(1)** 明纹位置公式



$$x_k = k\frac{D}{d}\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots\ldots$$

$$\Delta x_{14} = x_4 - x_1 = (4-1)\frac{D}{d}\lambda$$

$$= \frac{3D}{d}\lambda = 7.5\text{mm} \Rightarrow \lambda = \frac{0.2\times 10^6}{3\times 1\times 10^9}\times 7.5\times 10^6\,\text{nm} = 500\text{nm}$$

(2)条纹间距公式 $\Delta x = \frac{D}{d}\lambda = \frac{1\times 10^9}{0.2\times 10^6}\times 500\text{nm} = 2.5\,\text{mm}$

01:35:48

例：用波长λ=0.5893μm钠光灯作光源，屏幕与双缝的距离D=500mm；求：

(1)d=1.2mm和d=10mm, 相邻明纹间距分别为多大？

(2)若相邻明纹的最小分辨距离为0.065mm, 能分辨干涉条纹的双缝间距是多少？

解：(1)d=1.2mm
$$\Delta x=\frac{D}{d}\lambda=\frac{500\times5.893\times10^{-4}}{1.2}=0.25\mathrm{mm}$$
可分辨

d=10mm
$$\Delta x=\frac{D}{d}\lambda=\frac{500\times5.893\times10^{-4}}{10}=0.030\mathrm{mm}$$
不可分辨

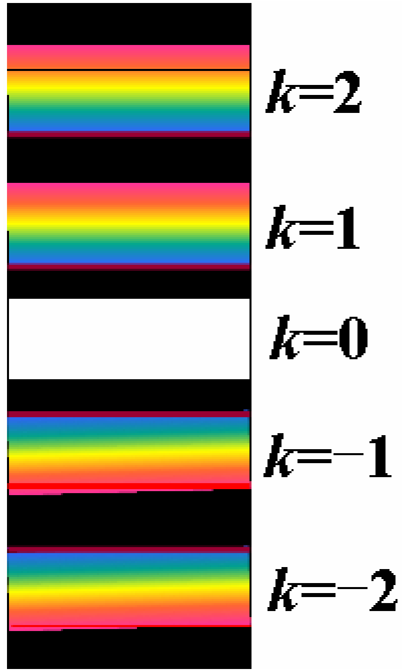
(2)若Δx最小为0.065mm, 则双缝间距d最大为
$$d=\frac{D}{\Delta x}\lambda=\frac{500\times5.893\times10^{-4}}{0.065}=4.5\,\mathrm{mm}$$

01:35:48

例：用波长4000Å～7000Å的白光作双缝干涉实验时，能观察到几级清晰可辨的彩色光谱？

解：除0级明纹外，两侧形成内紫外红的对称彩色光谱

当k级红色明纹位置$x_{k红} \geq (k+1)$级紫色明纹位置$x_{(k+1)紫}$时，光谱就发生重叠



由明纹位置公式有

$$x_{k红} = k\frac{D}{d}\lambda_{红}, \quad x_{(k+1)紫} = (k+1)\frac{D}{d}\lambda_{紫}$$

k级红色明纹与$(k+1)$级紫色明纹重合时有

$$k\frac{D}{d}\lambda_{红} = (k+1)\frac{D}{d}\lambda_{紫} \Rightarrow k = \frac{\lambda_{紫}}{\lambda_{红}-\lambda_{紫}} = \frac{4000}{7000-4000} = \frac{4}{3} < 2$$

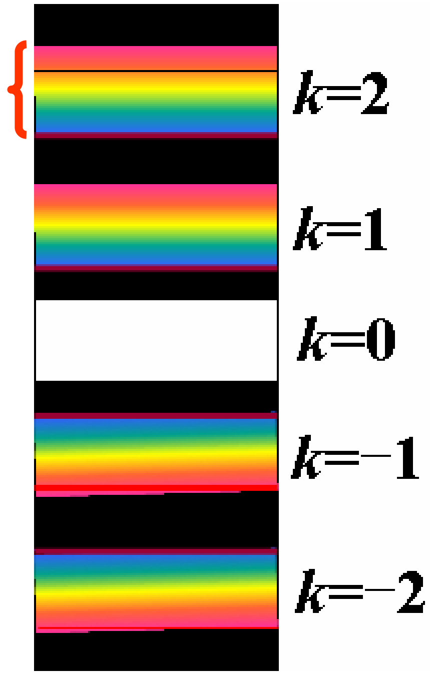
第2级红色明纹与第3级紫色明纹重叠，只能分辨第1级

01:35:48

例: 双缝间距离d=0.25mm, 双缝到屏幕的距离 D=50cm, 用波长400nm～700nm的白光照射双缝,

求: 第2级明纹彩色带(第2级光谱)的宽度。

解: 所求第2级明纹彩色带(光谱)的宽度, 实际上是7000Å的第2级明纹和4000Å的第2级明纹之间的距离



由明纹位置公式有

$$x_{2红}=2\frac{D}{d}\lambda_{红},\quad x_{2紫}=2\frac{D}{d}\lambda_{紫}$$

这两种波长的第2级明纹位置相距为

$$\Delta x=2\frac{D}{d}(\lambda_{红}-\lambda_{紫})=1.2\text{mm}$$

d=0.25mm, D=500mm, $\lambda_{红}=7\times10^{-4}$mm, $\lambda_{紫}=4\times10^{-4}$mm

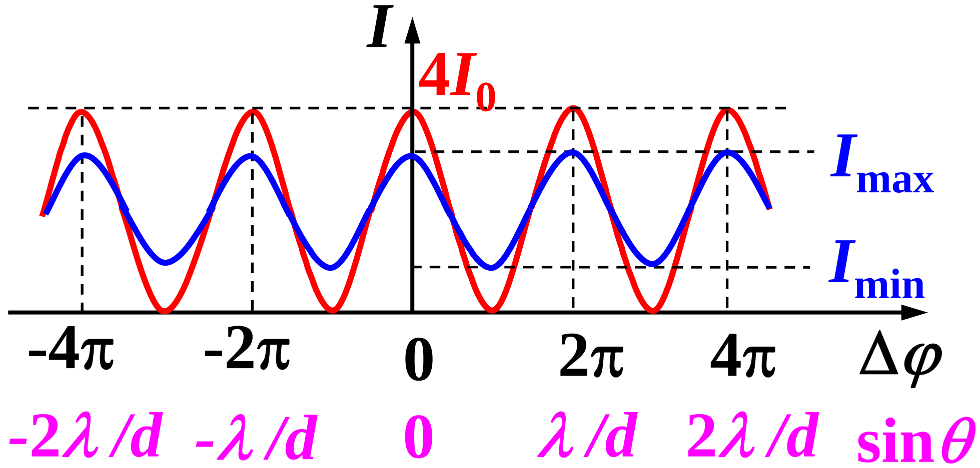
01:35:48

4. 光强曲线

$$I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi$$ 若$I_1=I_2=I_0$，则 $$I=4I_0\cos^2\frac{\Delta\varphi}{2}$$

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

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



5. 对比度

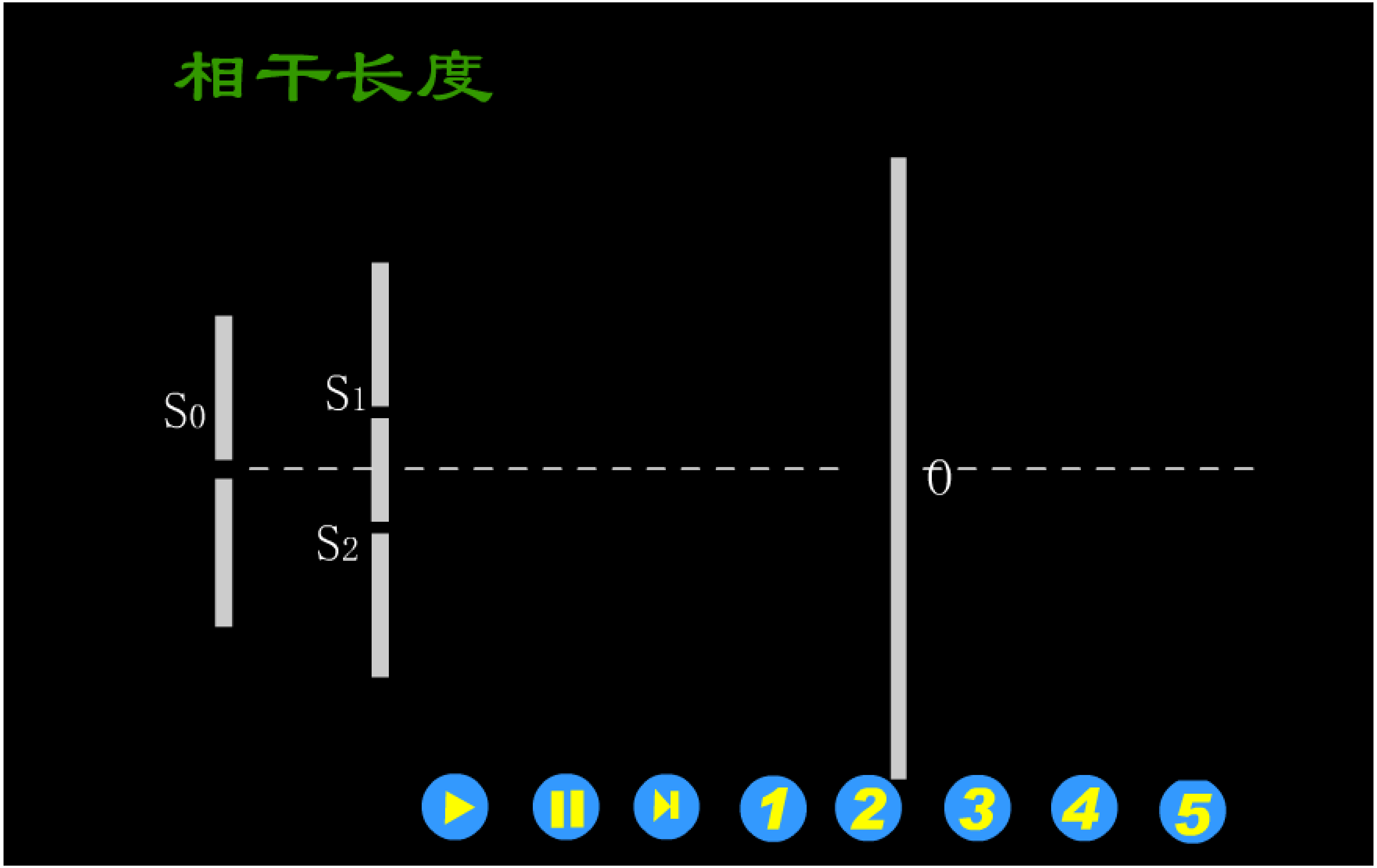
条纹衬比度(对比度，反衬度、contrast)
$$V=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}}$$

若$I_1=I_2=I_0$，则$I_{max}=4I_0$，$I_{min}=0$→衬比度好 ($V=1$)

若$I_1\neq I_2$ →衬比度不好 ($V<1$)

实验中应尽量使双缝宽度相等，使得 $I_1\approx I_2$

6. 相干长度



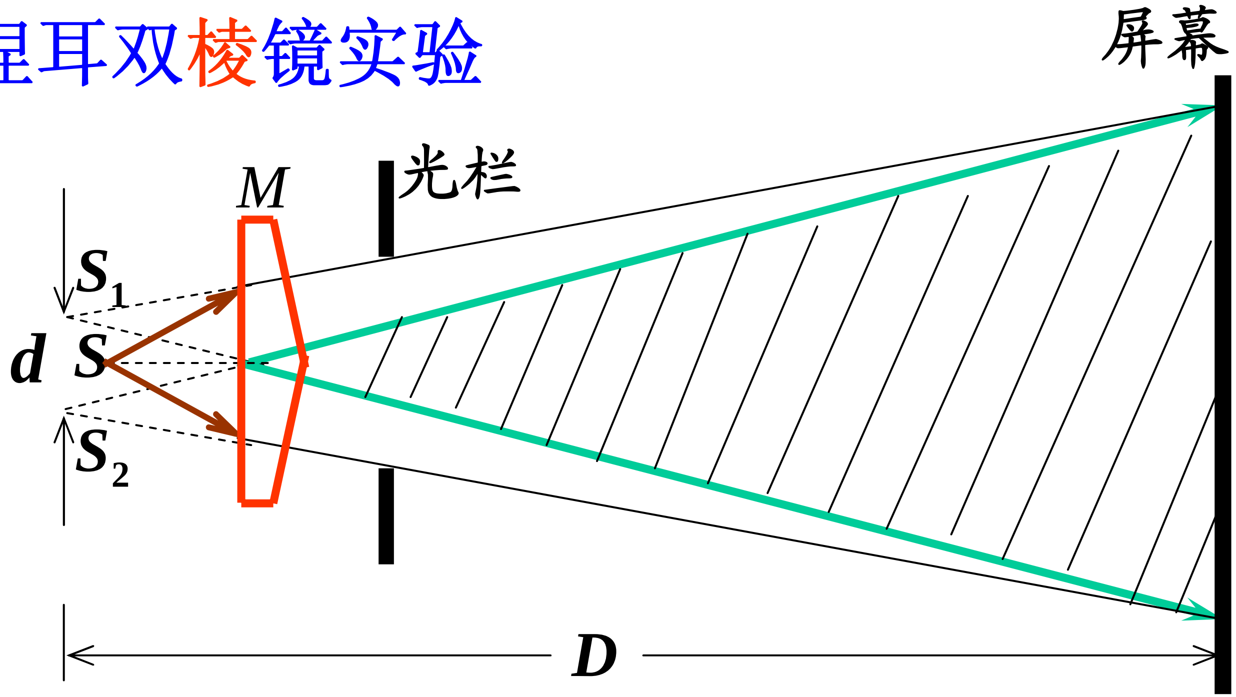
电磁波的相干条件补充：

(1)两振幅差别不能太大；(2)两列光的光程差不能太大

01:35:48

2.2 类双缝干涉

1. 菲涅耳双棱镜实验

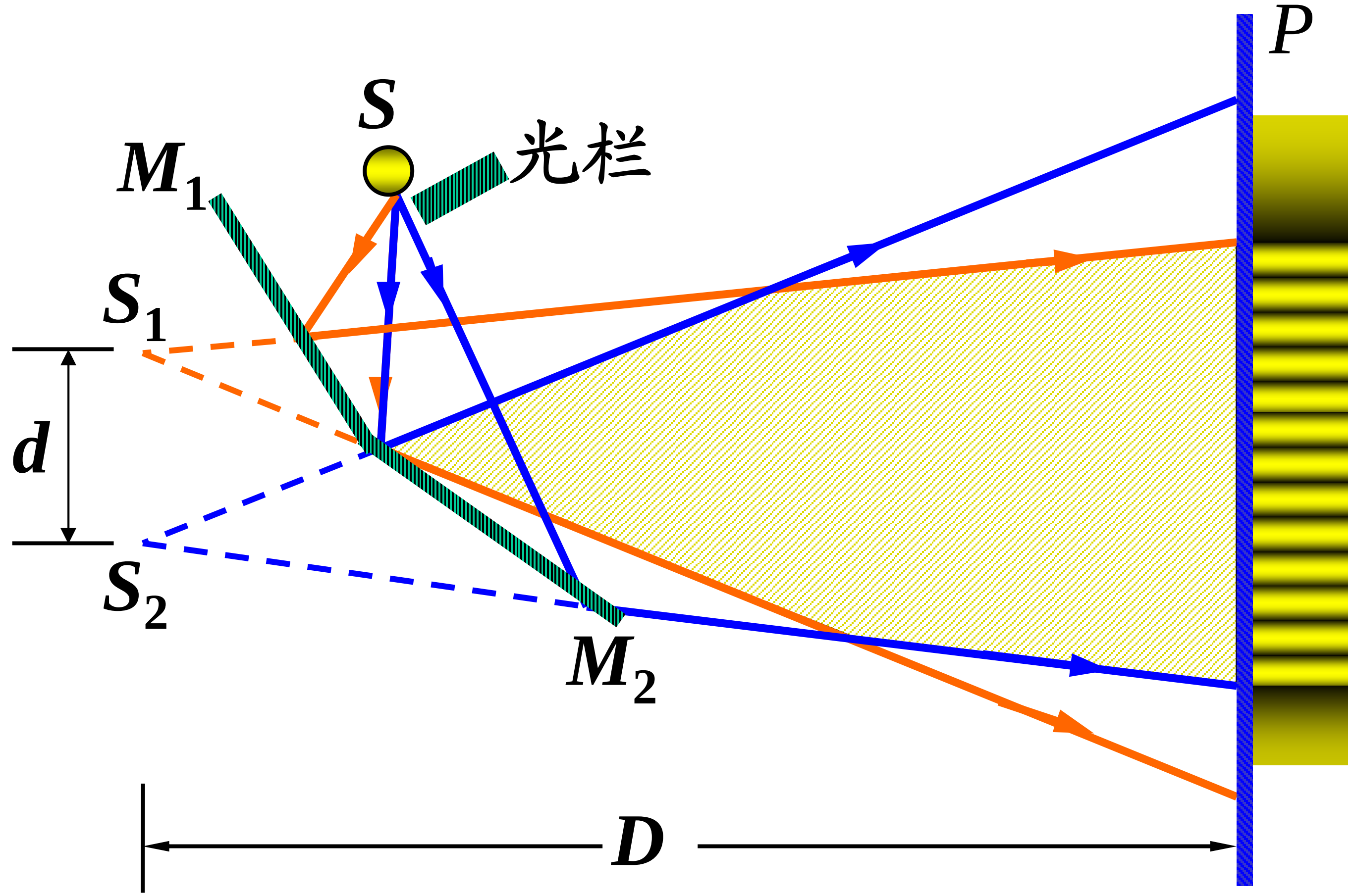


由一个顶角很大的等腰三棱镜，或者说由两个楔角很小的直角三棱镜组成，从而避免了狭缝的使用。

光源S发出的光经双棱镜折射后分成两部分，
相当于从两个相位相同的相干虚光源S_1、S_2发出的光，
在重叠区内产生干涉。

01:35:48

2. 菲涅耳双面镜干涉实验

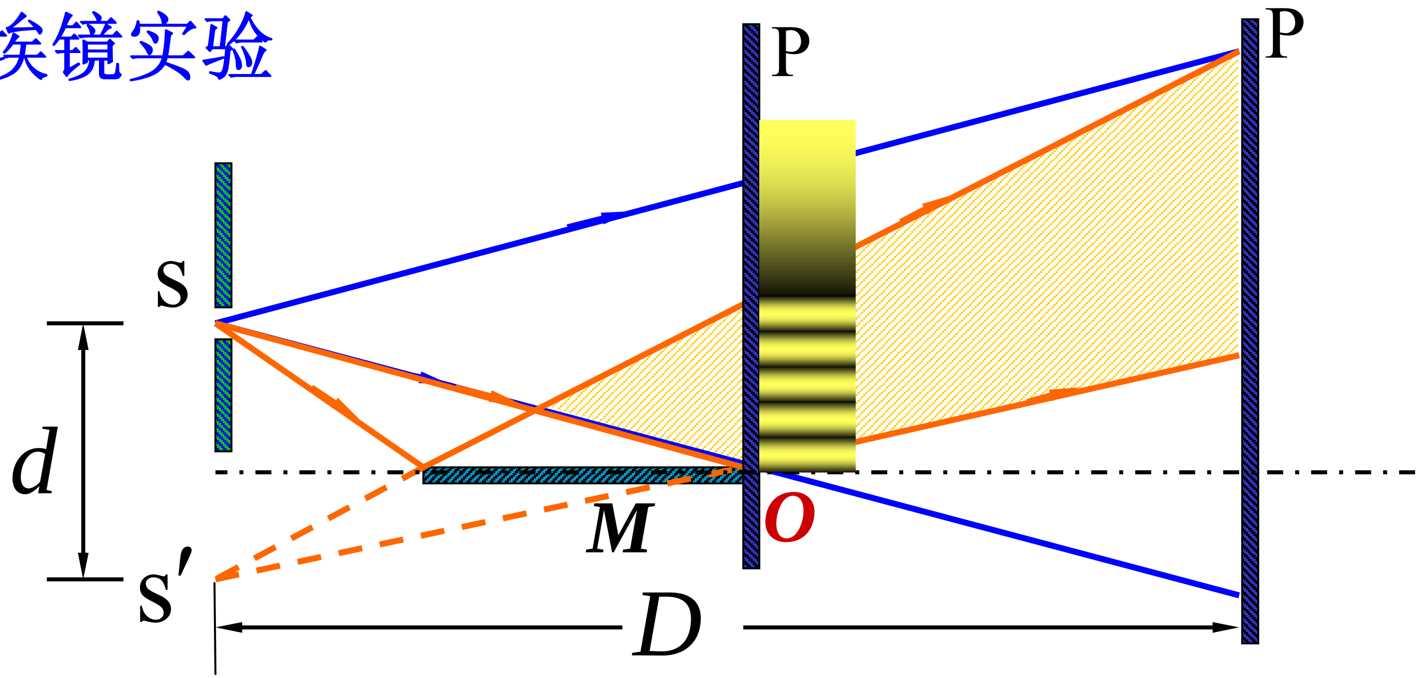


两个夹角很小的平面镜M_1、M_2构成一个双面镜

点光源S经双面镜成的像S_1、S_2就是两个相干光源

01:35:48

3. 洛埃镜实验



点光源S直接发出的光线，和它经距离不远处(~ 0.1mm)的平面镜*M*反射的光线，相干叠加形成干涉条纹。

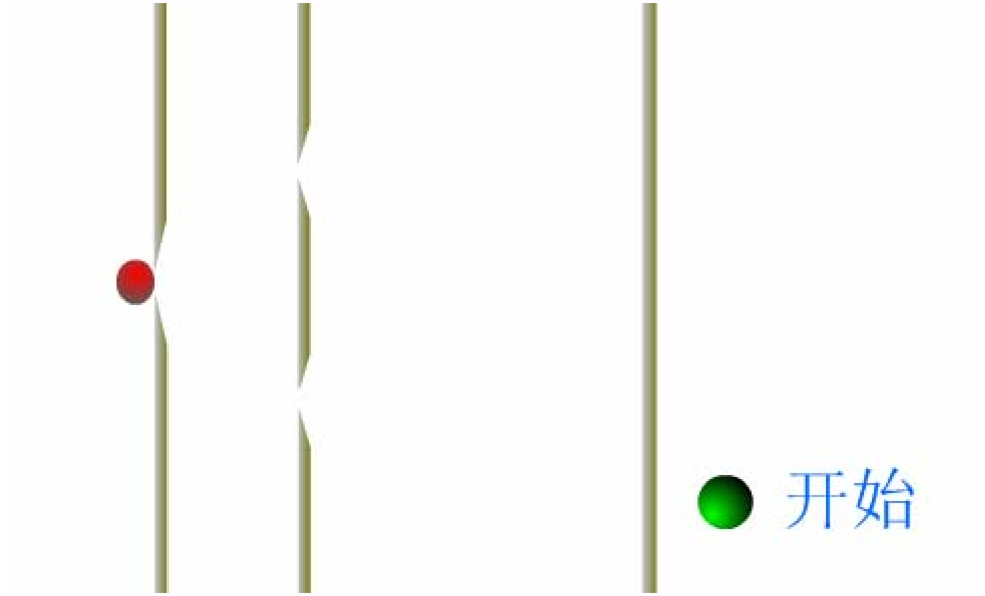
点光源S和它在平面镜*M*中所成的像S′作为相干光源

当屏幕移至*O*处，但观察到的并非明纹，而是暗纹!

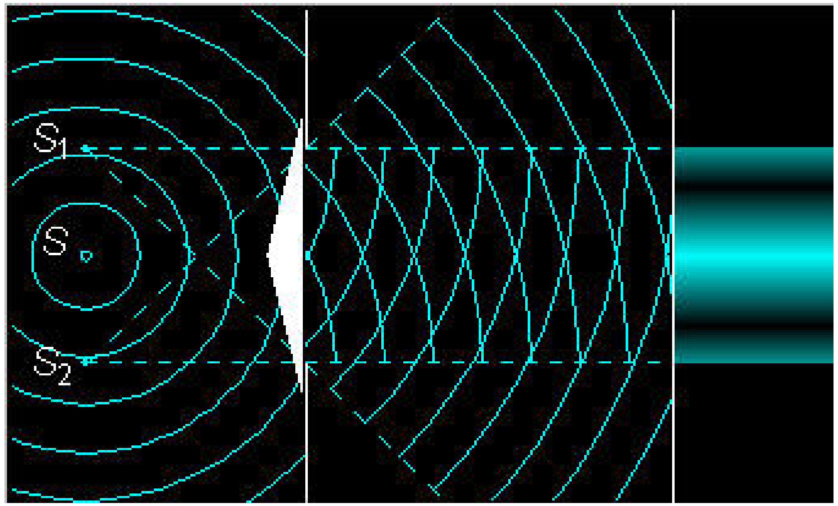
空气→玻璃(光疏→光密)，反射光有半波损失

$$\delta = S'O - SO \pm \frac{\lambda}{2} \approx d\sin\theta \pm \frac{\lambda}{2}$$

01:35:48

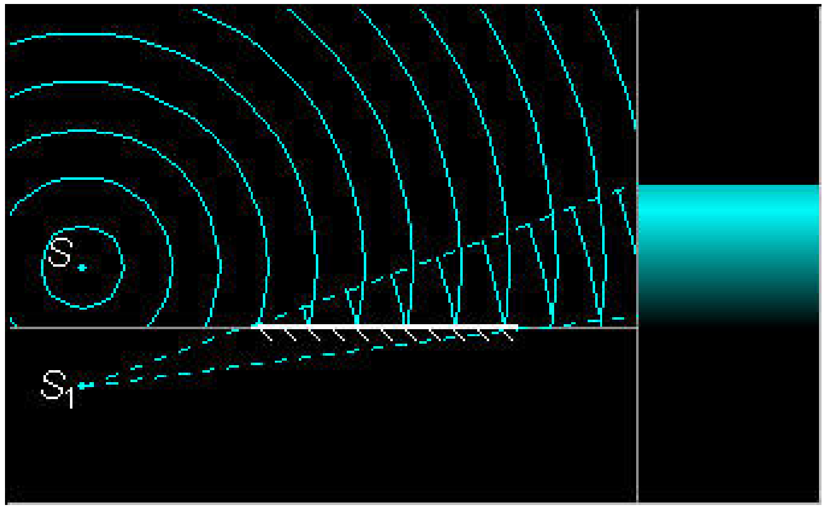


杨氏双缝



菲涅耳双棱镜

把单个波前分解为两个波前，以满足频率相同、振动方向相同、相位差恒定的相干条件。



洛埃镜

分波前法：把光波的波前分为两部分以获得相干光源。

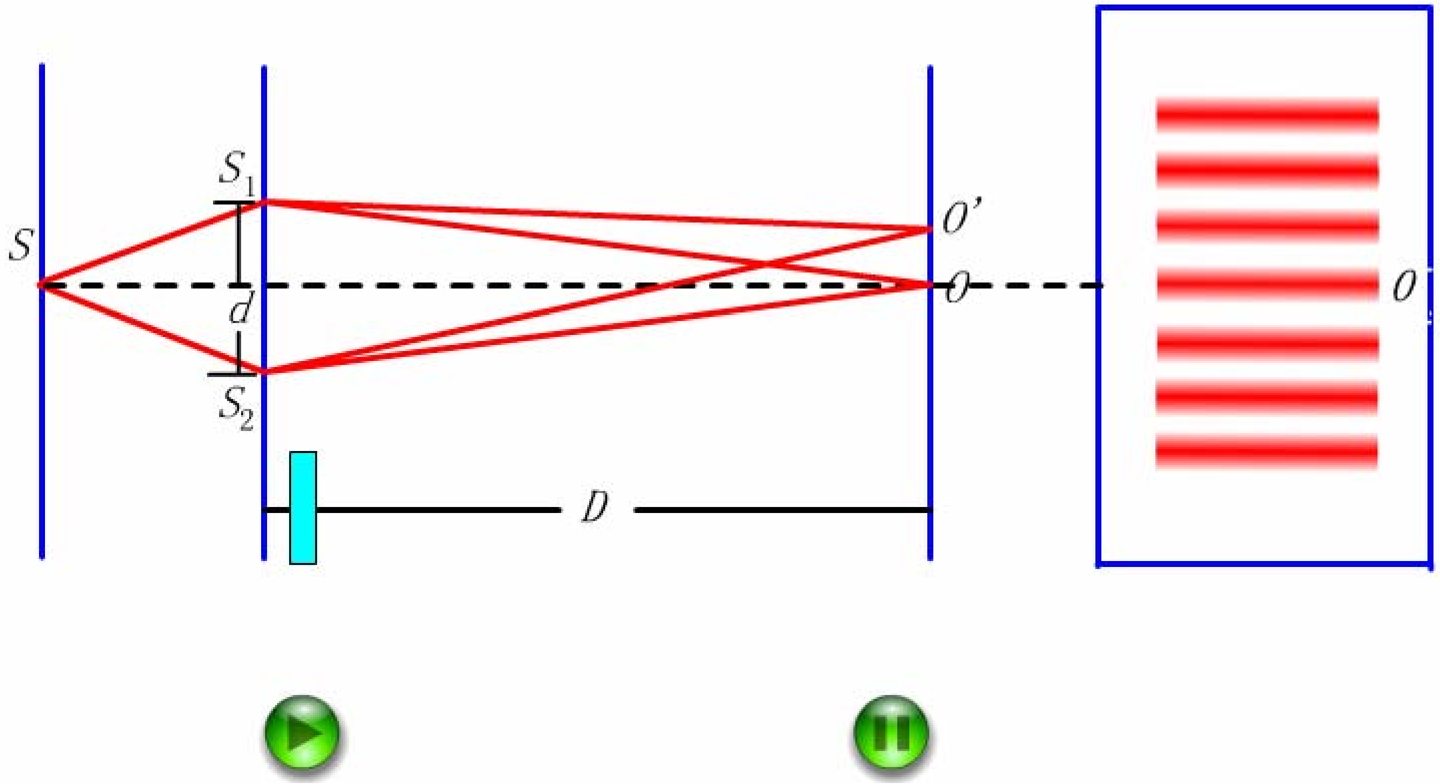
01:35:48

§3 光程、光程差

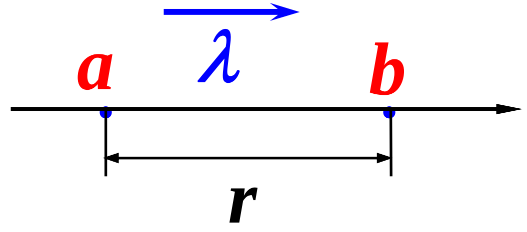
若在S_1后加透明介质薄膜，干涉条纹如何变化？

零级明纹上移至点O′，干涉条纹整体向上平移；

若在S_2后加透明介质薄膜，则干涉条纹整体下移。



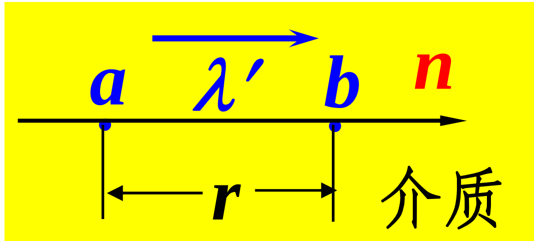
1. 光程



光在真空中从a→b向右传播:

b点相位落后 $\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_b = \frac{2\pi}{\lambda} r$ 真空中的波长 $\lambda = cT$

光在折射率为**n**的某种介质中从a→b:



b点相位落后 $\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_b = \frac{2\pi}{\lambda'} r = \frac{2\pi}{\lambda} nr$

介质中的波长 $\lambda' = uT = \frac{c}{n} T = \frac{\lambda}{n}$ 介质中的波速 $u = \frac{c}{n}$

光在介质中传播 **r** 和在真空中传播**nr** 引起的相位差相同

称**nr**为与介质中路程 **r** 相应的光程 $L = nr$

光程是光的等效真空路程，把光在介质中传播路程 **r** 等效成在真空中传播了路程**nr**，统一使用真空中波长

01:35:48

选择题： #S5101.

真空中波长为λ_0的两条光线**A**、**B**，若**A**在空气中传播，**B**在玻璃中传播，则在相同的时间$\triangle t$内，它们传播的

(1) 路程相同，光程相同；
(2) 路程相同，光程不同；
(3) 路程不同，光程相同；
(4) 路程不同，光程不同。

01:35:48

选择题： #S5102.

单色光从空气射入水中，下列说法中正确的是：

(1) 波长变短，光速变小；

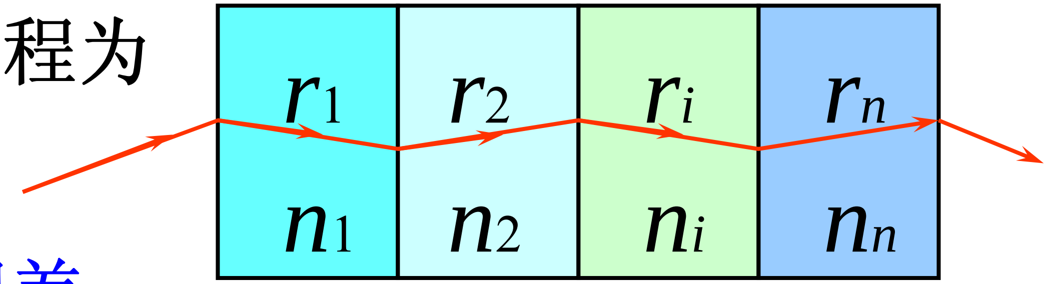
(2) 波长不变，频率变大；

(3) 频率不变，光速不变；

(4) 波长不变，频率不变。

• 若光通过多种介质，光程为

$$L=\sum(n_i r_i)$$

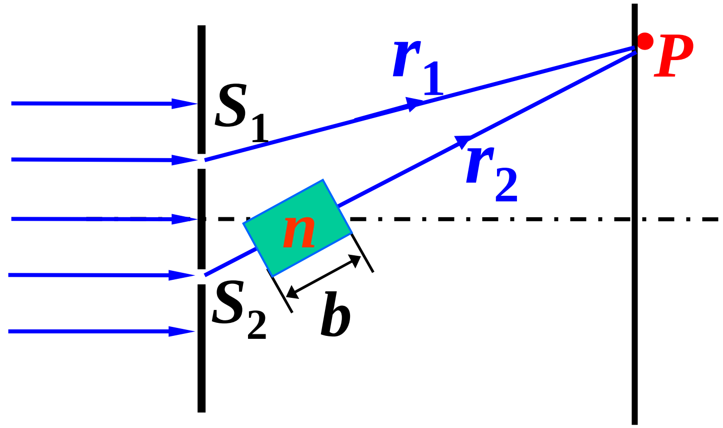


• 光通过两条光路的光程差

$$\delta = L_2 - L_1$$

相位差 $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}\delta$

真空中波长



• 典型相位差对应的光程差

$\triangle\varphi$	δ
π	$\lambda/2$
2π	λ
$2k\pi$	$k\lambda$
$(2k+1)\pi$	$(k+1/2)\lambda$

图中两光路到**P**点的相位差：

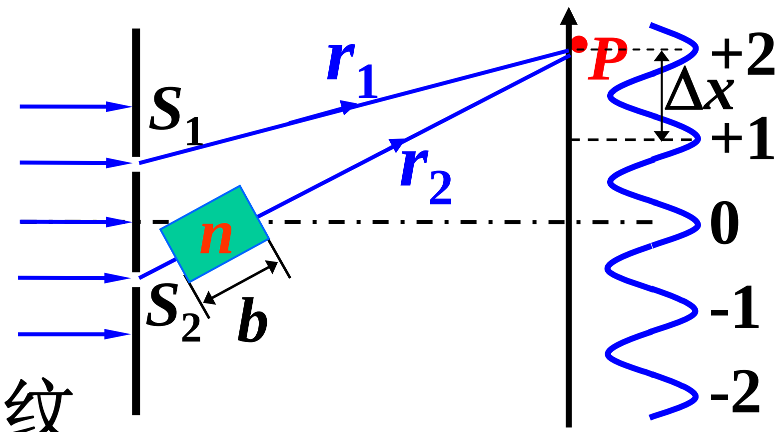
$$\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2$$

$$=\frac{2\pi}{\lambda}\left\{\left[(r_2-b)+nb\right]-r_1\right\}$$

$$=\frac{2\pi}{\lambda}\left[(r_2-r_1)+(n-1)b\right]$$

01:35:48

2. 介质对干涉条纹的影响



- 设无介质时，**P**处为**k**级明纹

$$\frac{2\pi}{\lambda}(r_2-r_1)=2k\pi \Rightarrow r_2-r_1=k\lambda$$

- 若S_2后有介质时，**P**处为**k′**级明纹

$$\frac{2\pi}{\lambda}\left[(r_2-r_1)+(n-1)b\right]=2k'\pi \Rightarrow \Delta k=k'-k=\frac{(n-1)b}{\lambda}>0$$

P处级次增大Δ**k**，下移了Δ**k**个条纹，下移距离Δ**k**·Δ**x**

- 若S_1后有厚度**b**、折射率**n**的介质时，**P**处为**k′**级明纹

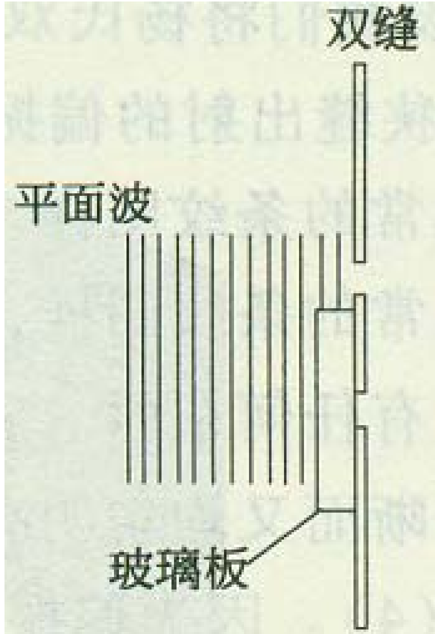
$$\frac{2\pi}{\lambda}\left\{r_2-\left[(r_1-b)+nb\right]\right\}=\frac{2\pi}{\lambda}\left[(r_2-r_1)-(n-1)b\right]=2k'\pi$$

$$\Rightarrow \Delta k=\frac{-(n-1)b}{\lambda}<0$$ **P**处的级次减小了，条纹整体上移

01:35:48

选择题：#S5103.

如图所示，双缝干涉实验中，将一个玻璃板盖在下面的缝S_2上，由于光在玻璃中的波长比空气中的短，光透过两缝后相位将不同。如果两者的相位差是π，则干涉图样如何变化？



(1) 因为反相相消，所以干涉条纹消失；

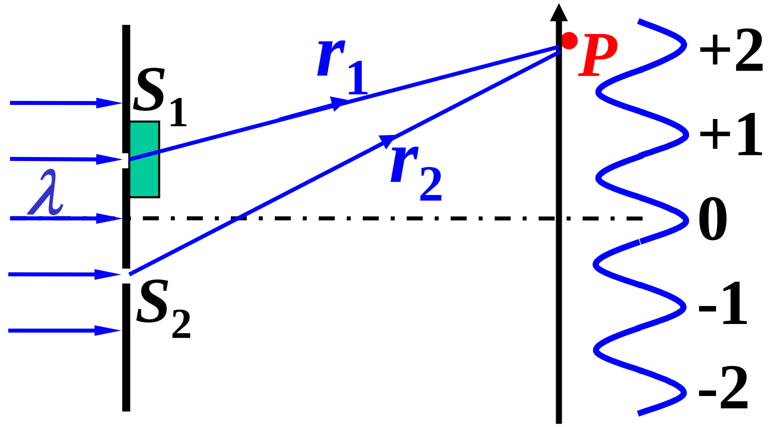
(2) 干涉条纹整体上移；

(3) 干涉条纹整体下移；

(4) 明纹和暗纹的位置互换。

例: 当双缝中的S_1后面盖上折射率为n=1.58的云母片时，观察到屏幕上干涉条纹移动了9个条纹间距，已知波长λ=5500Å，求: 零级明纹的新位置、云母片的厚度b

解: S_1后有介质时，条纹将上移移动了9个条纹，零级明纹移至原来的第9级明纹处:



$$x = 9 \cdot \Delta x = 9\frac{D}{d}\lambda$$

双缝间距

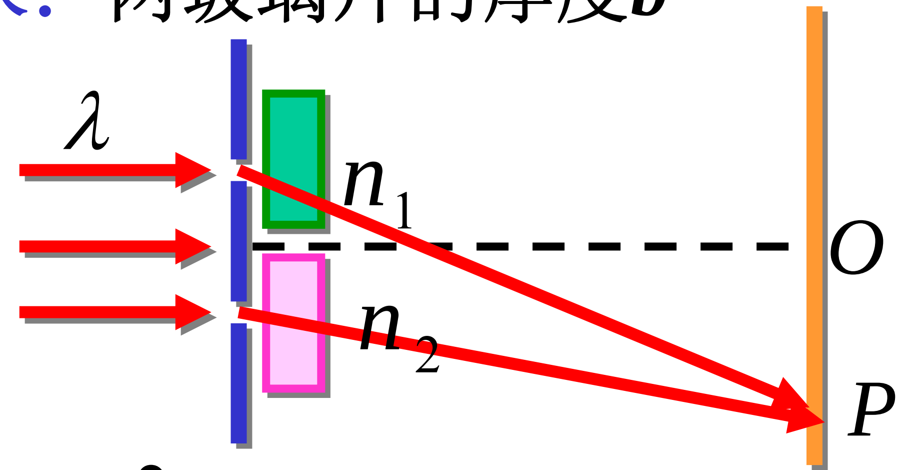
光程差的改变量为 $-(n-1)b = (k'-k)\lambda = (0-9)\lambda = -9\lambda$

$\therefore b = \dfrac{9\lambda}{n-1}$ $=9\times5500\times10^{-10}/(1.58-1)=8.53\times10^{-6}$m

S_1发出的光可近似看作垂直通过云母片

01:35:48

例：双缝中的一个缝S_1用折射率为n_1=1.40的薄玻璃片遮盖，另一个缝S_2用相同厚度但折射率为n_2=1.70的薄玻璃片遮盖，则屏上原来的零级明纹所在点，现在为第+5级明纹所占据。设λ=480nm，求：两玻璃片的厚度b



解：两缝均被薄玻璃片遮盖

两束光到某一点的相位差为

$$\frac{2\pi}{\lambda}\left\{\left[\left(r_2-b\right)+n_2b\right]-\left[\left(r_1-b\right)+n_1b\right]\right\}$$

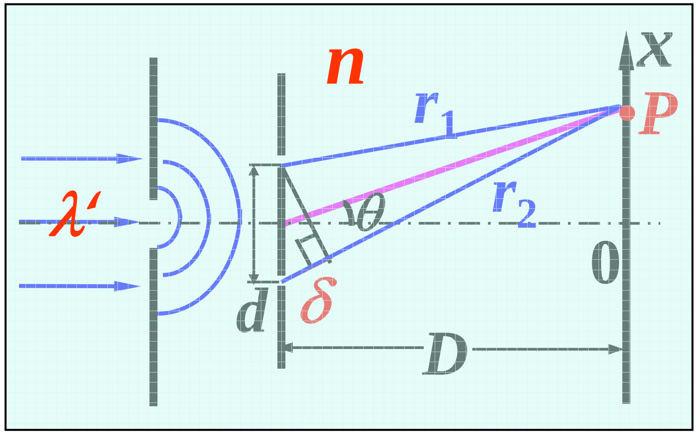
$$=\frac{2\pi}{\lambda}[(r_2-r_1)+(n_2-1)b-(n_1-1)b]=\frac{2\pi}{\lambda}[(r_2-r_1)+\left(n_2-n_1\right)b]$$

与原来相比光程差的改变量为$(n_2-n_1)b=\Delta k\lambda=(5-0)\lambda$

$$b=\frac{5\lambda}{n_2-n_1}=\frac{5\times4800\times10^{-10}}{1.70-1.40}=8\times10^{-6}\left(m\right)=8\left(\mu m\right)$$

01:35:48

例: 若将双缝装置浸入折射率为**n**的水中，那么条纹的间距增加还是减小?



解: 入射光在水中的波长变为

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n} \quad \lambda\text{：真空中的波长}$$

两条光路的相位差变为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda'}(r_2 - r_1) = \frac{2\pi}{\lambda} n(r_2 - r_1) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta \quad \Leftarrow \delta = n(r_2 - r_1)$$

•明纹 $\Delta\varphi = 2k\pi,\ \ k = 0, \pm 1, \pm 2\ldots\ldots$ 光程差 $\delta = k\lambda = n(r_2 - r_1)$

$$r_2 - r_1 = \frac{k\lambda}{n} = k\lambda' \quad \text{由几何关系}\ r_2 - r_1 \approx d\cdot\frac{x}{D} \quad \Rightarrow \frac{k\lambda}{n} = d\cdot\frac{x}{D}$$

k级明纹的位置

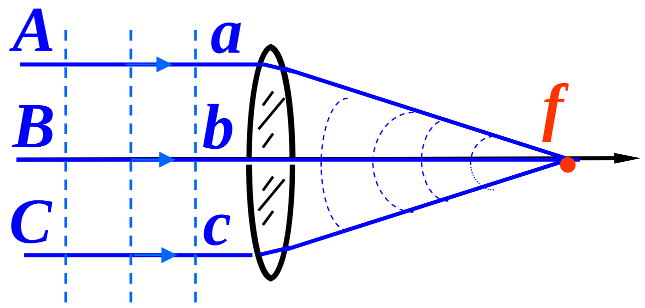
$$x_k' = k\frac{D\lambda}{dn} = k\frac{D}{d}\lambda'$$

相邻明纹(或暗纹)的间距

$$\Delta x' = \frac{D}{d}\lambda' = \frac{D\lambda}{dn} = \frac{\Delta x}{n} < \Delta x$$

01:35:48

3. 透镜不会产生附加光程差



- 平行光线A、B、C入射到透镜上

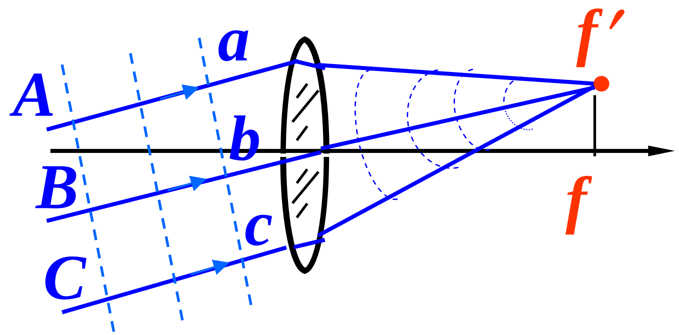
  考察同一波面上的*a*、*b*、*c*三点

  通过透镜前，*a*、*b*、*c*同相位

  它们通过透镜后会聚于*f*、*f′*

  f、*f′*都是亮点→各光线同相叠加

  Aaf、*Bbf*、*Ccf* 三条光路等光程



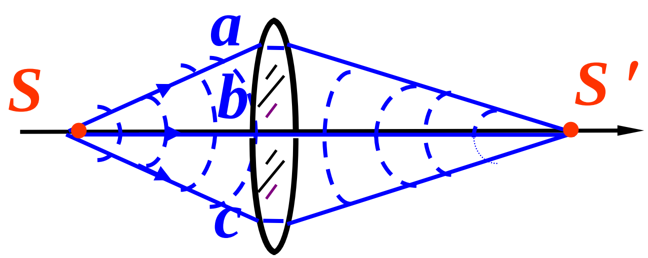
- 物点*S*经过透镜成像

  a、*b*、*c*在同一波面上，同相位

  通过透镜后在*S′*点成像

  像点*S′*是亮点，各光线同相叠加

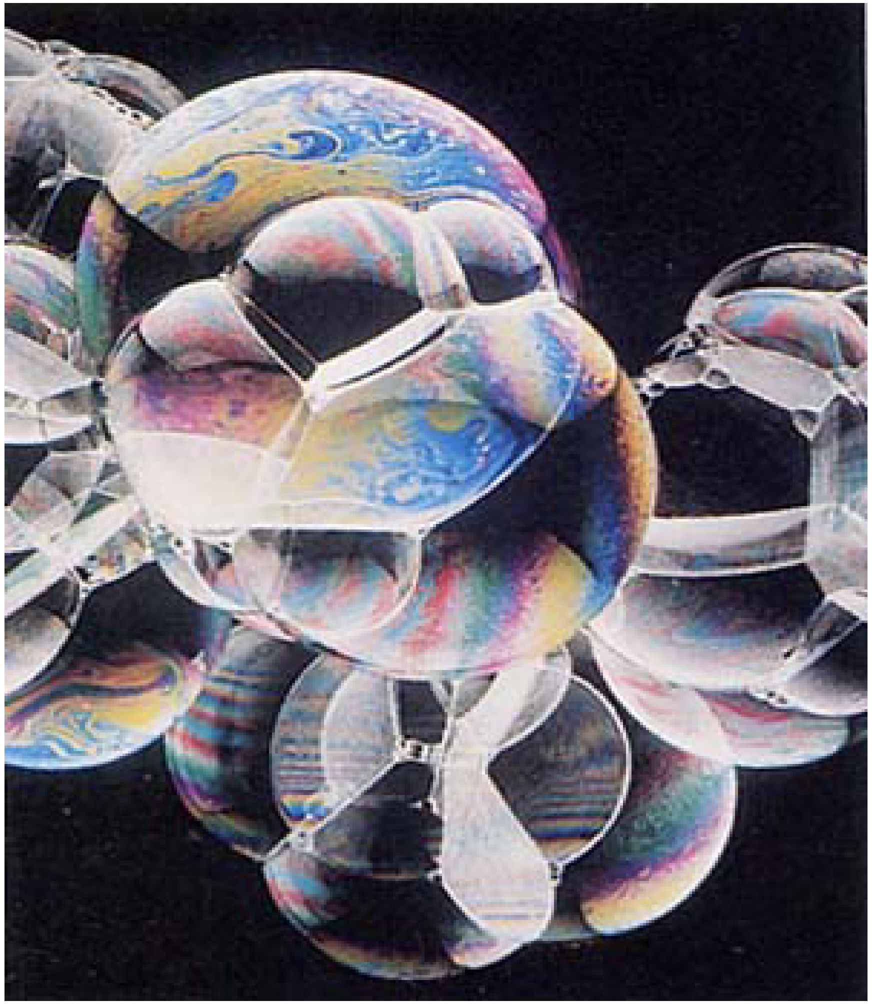
  物点和像点之间的各光线都是等光程的



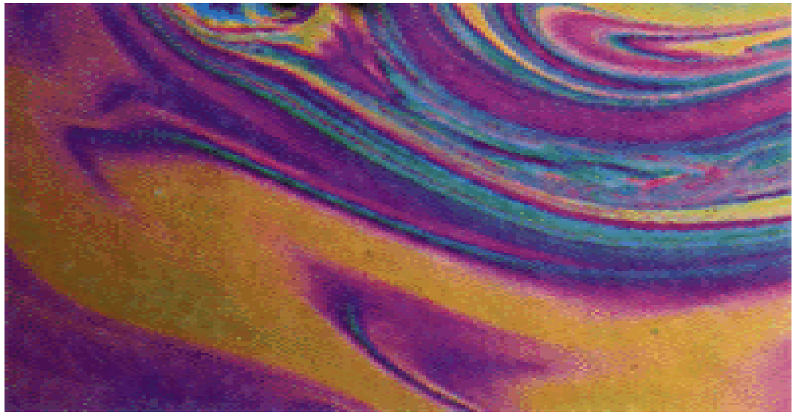
01:35:48

§4 分振幅干涉

4.1 薄膜干涉



肥皂泡上的彩色花纹



阳光下的油膜

昆虫翅膀

01:35:48

1. 薄膜干涉的成因

以阳光下的油膜为例，人眼观察薄膜表面上任一点**B**

从光源**S**点发出的光线在薄膜表面**B**处形成反射光线***a***

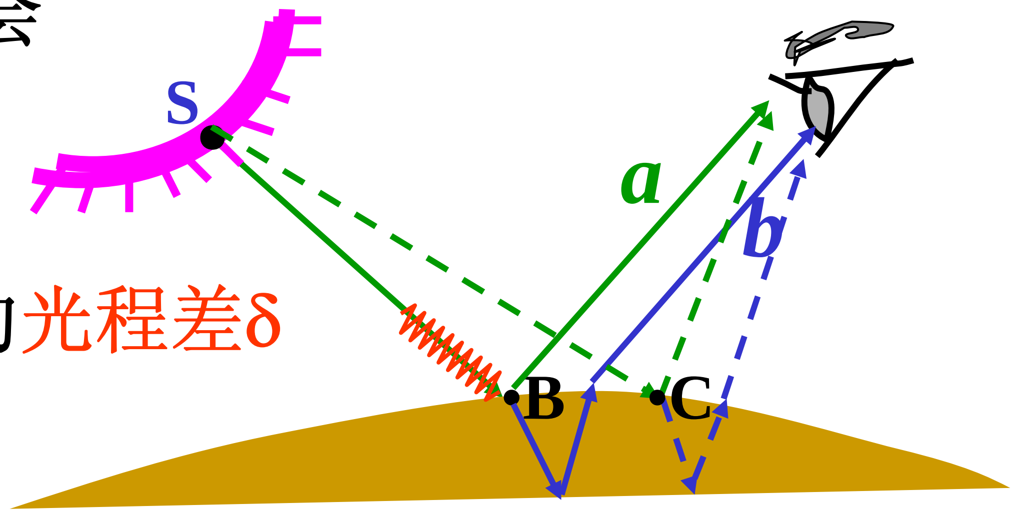
折射光经薄膜下表面反射到上表面，又折射成光线***b***

光线 ***a*** 和 ***b*** 来自同一光束(同一个波列)

频率相同、振动方向相同、初相位相同，为相干光，

经过人眼(透镜)会聚一点，发生干涉现象。

对薄膜上其他各点也会形成两束反射光



对单色光入射，

B处的明暗取决于***a***和***b***的光程差δ

阳光为复色光，所以看到的是彩色条纹。

01:35:48

产生相干的反射光和折(透)射光来自同一束入射光

入射光的能量分成了反射光的能量和透射光的能量

形象地说成：振幅被“分割”成了两部分——**分振幅法**

▲膜为何要薄？ — 光的相干长度(波列长度)所限

膜的薄、厚是相对的，与光源的单色性好坏有关

01:35:48

判断题： #T5103.

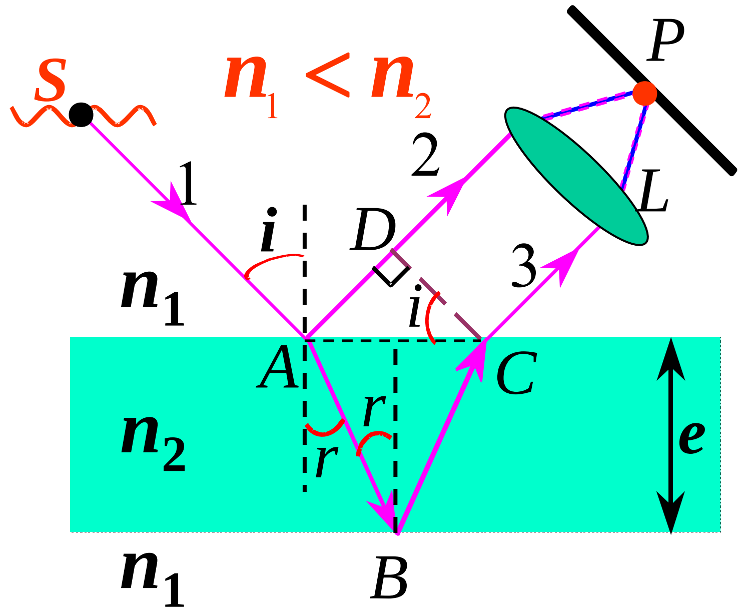
窗玻璃也有两个表面，但由于玻璃是透明的，反射很弱，所以观察不到干涉条纹。

2. 两束反射光线的光程差

设薄膜厚度为e，折射率为n_2

处于折射率为n_1($<n_2$)的介质中

光线2和3平行，经透镜会聚于P



∵初相位相同，相位差→光程差

透镜不产生附加光程差

过C做光线2的垂线CD

在P点的光程差$\delta = n_2(AB+BC) - n_1 AD + \lambda/2$

光线2是由光疏媒质入射到光密媒质反射而成，

在反射点A要发生半波损失，在B点会发生半波损失吗？

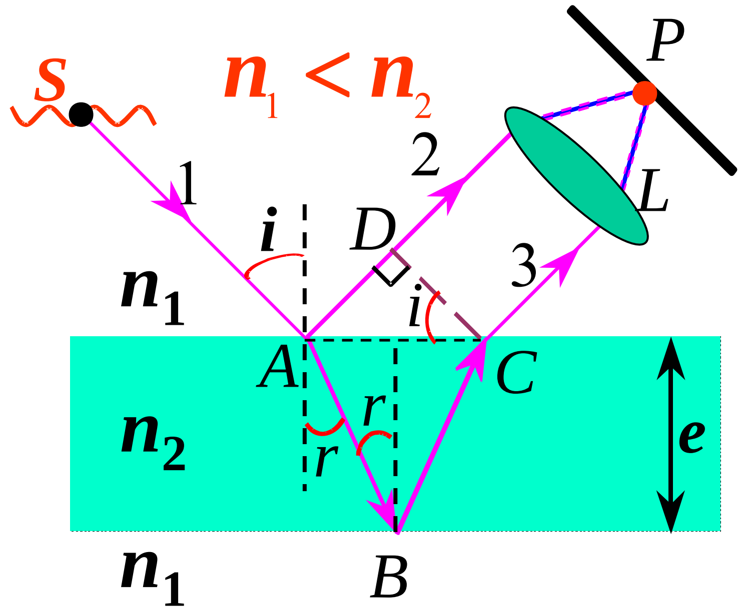
过A点做两介质面的法线，入射角为i，折射角为r

$$AB = BC = \frac{e}{\cos r}, \quad AD = AC\sin i = 2e\cdot \mathrm{tg}r\cdot \sin i \Leftarrow \frac{AC}{2} = e\cdot \mathrm{tg}r$$

01:35:48

$$\delta = n_2(AB+BC) - n_1 AD + \frac{\lambda}{2}$$

$$= 2n_2 \frac{e}{\cos r} - 2n_1 e \cdot \mathrm{tg} r \cdot \sin i + \frac{\lambda}{2}$$



由折射定律 $n_1 \sin i = n_2 \sin r$

$$\delta = \frac{2n_2 e}{\cos r} - 2n_2 e \frac{\sin r}{\cos r} \sin r + \frac{\lambda}{2}$$

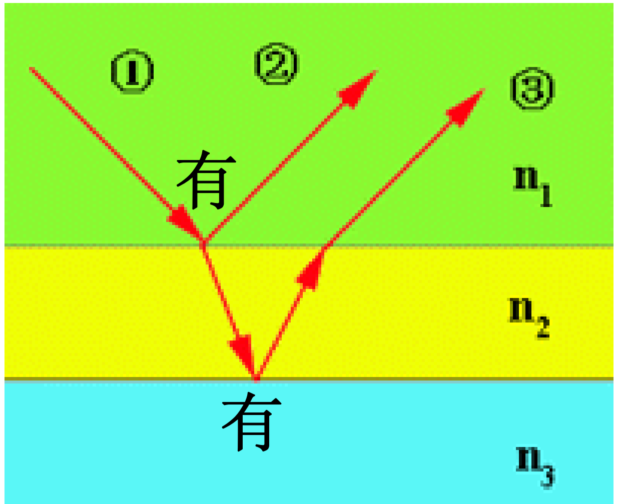
$$= \frac{2n_2 e}{\cos r}(1-\sin^2 r) + \frac{\lambda}{2} = 2en_2 \cos r + \frac{\lambda}{2}$$

$$n_1^2 \sin^2 i = n_2^2 \sin^2 r = n_2^2(1-\cos^2 r) \Rightarrow n_2 \cos r = \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$$

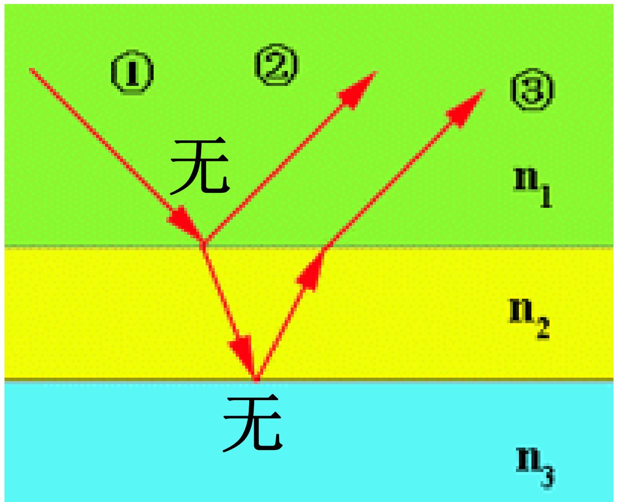
$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,3,\cdots \text{ 明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \text{ 暗纹} \end{cases}$$

01:35:48

•Case1: $n_1<n_2<n_3$

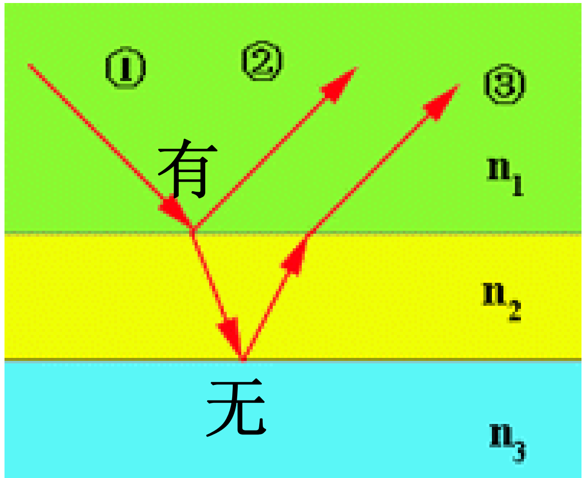


•Case2: $n_1>n_2>n_3$

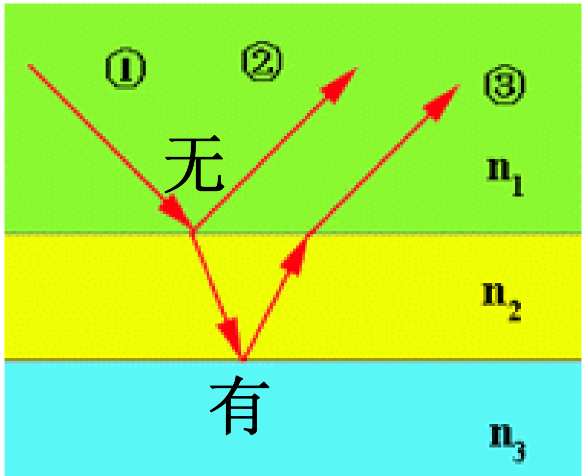


无 $\frac{\lambda}{2}$

•Case3: $n_1<n_2>n_3$



•Case4: $n_1>n_2<n_3$

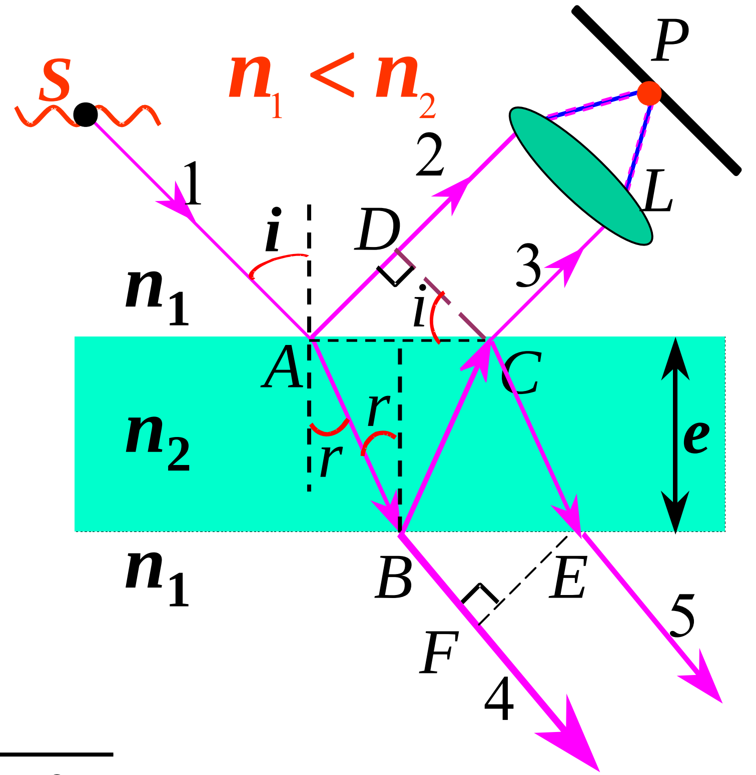


有 $\frac{\lambda}{2}$

01:35:48

3. 增透膜、增反膜

经过薄膜的两束透射光线4和5也有干涉现象



过E做光线4的垂线EF

光线4是由两次透射形成，无半波损失

光线5在点B、C处反射均为光密→光疏，没有半波损失

对透射光4和5： $\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$

对反射光2和3： $\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \dfrac{\lambda}{2}$

若透射光干涉相长，则反射光一定干涉相消 →增透膜

若反射光干涉相长，则透射光一定干涉相消 →增反膜

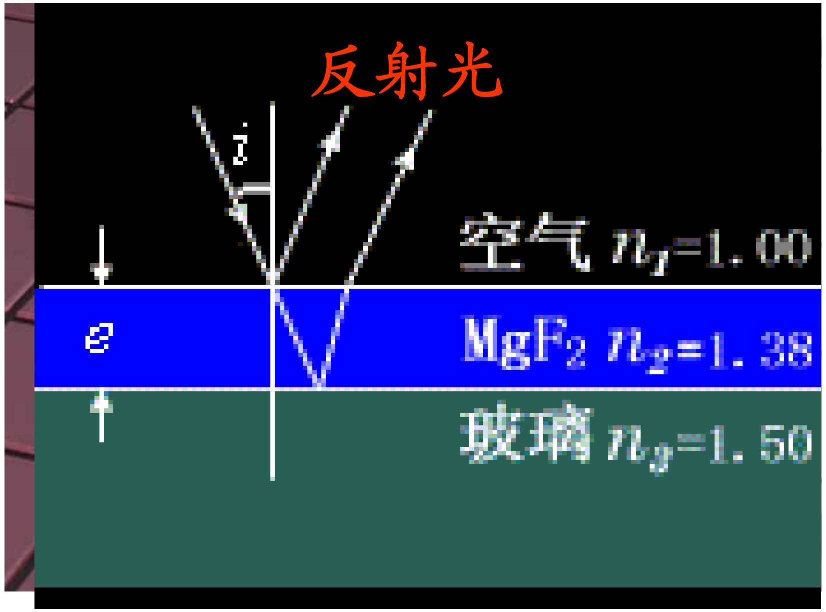
01:35:48

➢镜头为什么呈紫红色?

镜头上涂有一层MgF_2薄膜，以使人眼最敏感的黄绿光(λ=550nm)增透，

即此波长的光反射相消

$n_1<n_2<n_3$，反射光的光程差



$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$ $=2en_2$ ←若光垂直入射(i=0)

•相消条件 $2n_2 e = (k+1/2)\lambda \quad k = 0,1,2,3\cdots$

若取k=1，则增透膜的厚度 $e = 3\lambda/(4n_2) \approx 299nm$

此厚度的增透膜在可见光范围内有没有增反？ 演示

•相长条件 $2n_2 e = k\lambda \quad k = 1,2,3\cdots$ 可见光400~700nm

$k=1, \lambda_1 = 825\text{nm}$ $k=2, \lambda_2 = 412.5\text{nm}$√ $k=3, \lambda_3 = 275\text{nm}$

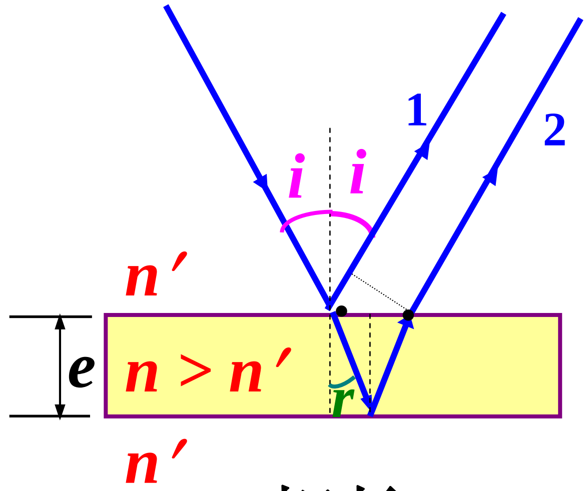
01:35:48

例: 折射率n=1.32的肥皂膜处于空气中，在白光照射下，若从30°方向观察(反射光)，肥皂膜呈黄色(λ=5500Å)

求: (1)膜的最小厚度;

(2)与法线成60°方向观察，膜的颜色;

(3)垂直照射，膜的颜色?



解: (1)两反射光的光程差

$$\delta = 2e\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad k = 1,2,3\cdots \quad 相长$$

将i=30°, λ=5500Å, n=1.32, n'=1代入上式

相长时，k从1开始，所以最小厚度为e_{min}=112.6nm

(2)将i=60°, e=e_{min}=112.6nm, n=1.32, n'=1, 代入上式

k=1时为可见光，λ= 4886.8Å　青色

(3)将i=0, e=e_{min}=112.6nm等代入，k=1时 λ= 5945Å 黄色

01:35:48

4.2 等厚条纹

$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,3,\cdots \text{ 明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \text{ 暗纹} \end{cases}$$

对一定的介质(***n*$_1$,*n*$_2$**)，光程差δ取决于厚度***e***及入射角***i***

分别针对***e*** 和***i***不同→两种情况：等厚干涉、等倾干涉

➢固定入射角，比如当***i*=0**(正入射）

$$\delta(e) = 2en_2 + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda, \quad k = 1,2,3,\cdots & \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, \quad k = 0,1,2,\cdots & \text{暗纹} \end{cases}$$

光程差取决于薄膜的厚度

对于厚度相同的点，其明暗的情况相同

同一厚度***e***对应同一级条纹 —— 等厚条纹

01:35:48

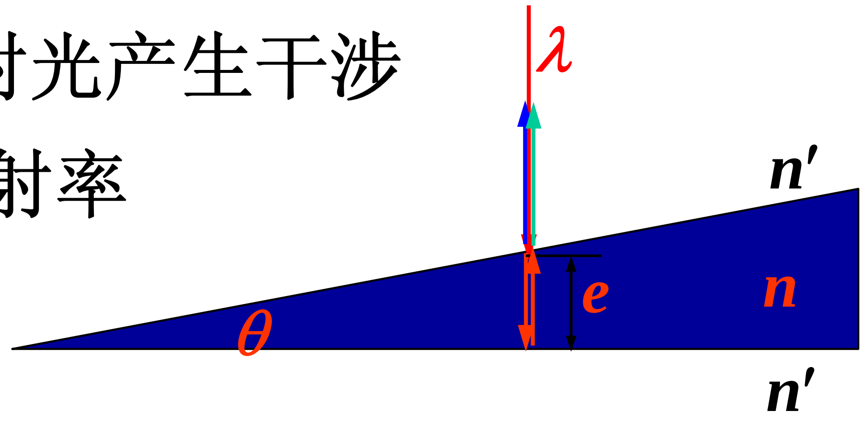
1. 劈尖

夹角很小的两个平面所构成的薄膜 θ：$10^{-4}\sim10^{-5}$ rad

如图若入射角$i\approx0$，两束反射光产生干涉

设两边的折射率≠薄膜的折射率

有半波损失 $\delta=2en+\dfrac{\lambda}{2}$

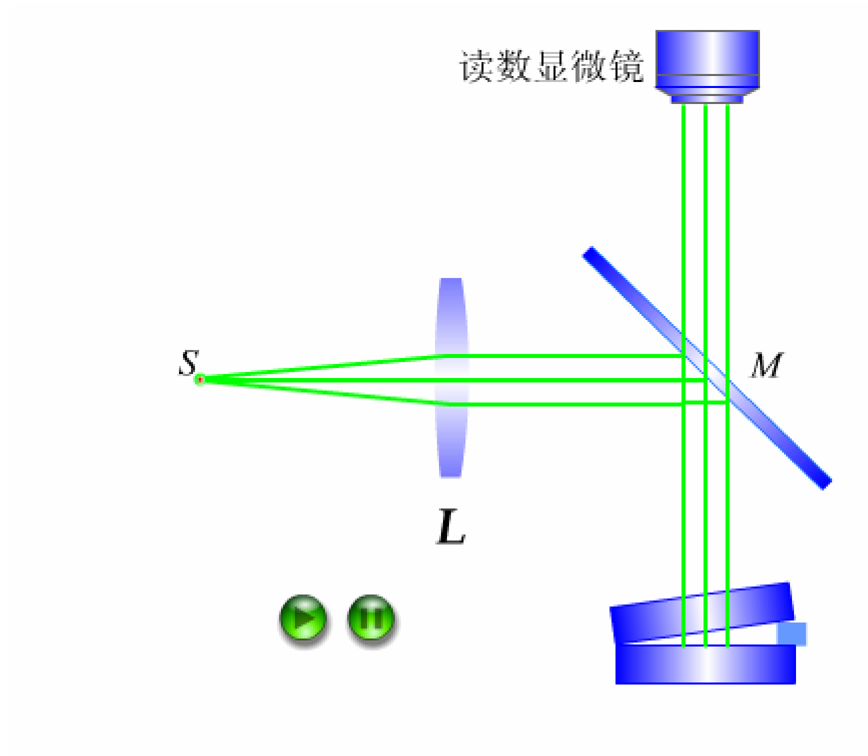


(1)条纹特点及变化

- 劈棱处 $e=0$ $\delta=\lambda/2$ 暗纹
- 各级暗纹位置(厚度)

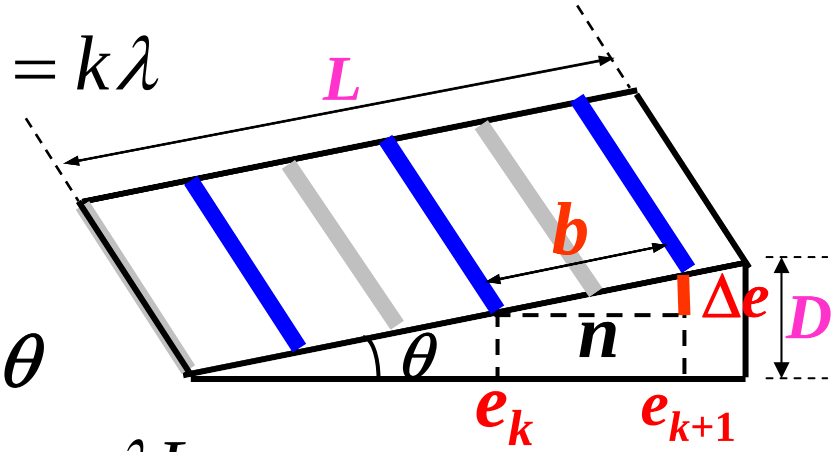
$$2en+\frac{\lambda}{2}=(2k+1)\frac{\lambda}{2}\Rightarrow e_k=\frac{k\lambda}{2n}$$

- 相邻暗纹的厚度差 $\Delta e=\dfrac{\lambda}{2n}$



•相邻明纹的厚度差 $2ne+\frac{\lambda}{2}=k\lambda$

$$2n\Delta e=\Delta k\lambda \Rightarrow \Delta e=\frac{\lambda}{2n}$$



•相邻条纹的间距 $\Delta e = b\sin\theta \approx b\theta$

$$b \approx \frac{\Delta e}{\theta}=\frac{\lambda}{2n\theta} \qquad \sin\theta=\frac{D}{L} \Rightarrow b=\frac{\lambda L}{2nD}$$

•若θ↓，则b↑，条纹变疏；若θ↑，则b↓，条纹变密

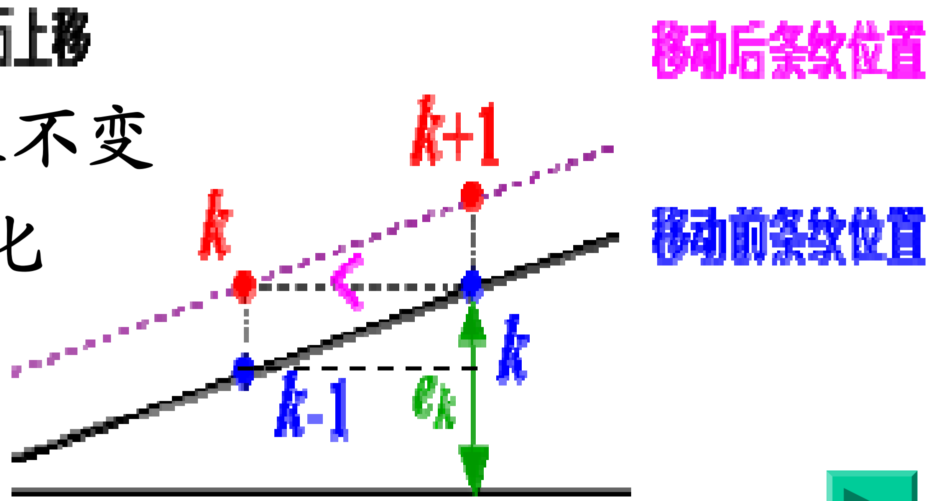
•膜厚变化的影响

条纹向劈棱方向平移，间距不变

每移动1个条纹，膜厚的变化

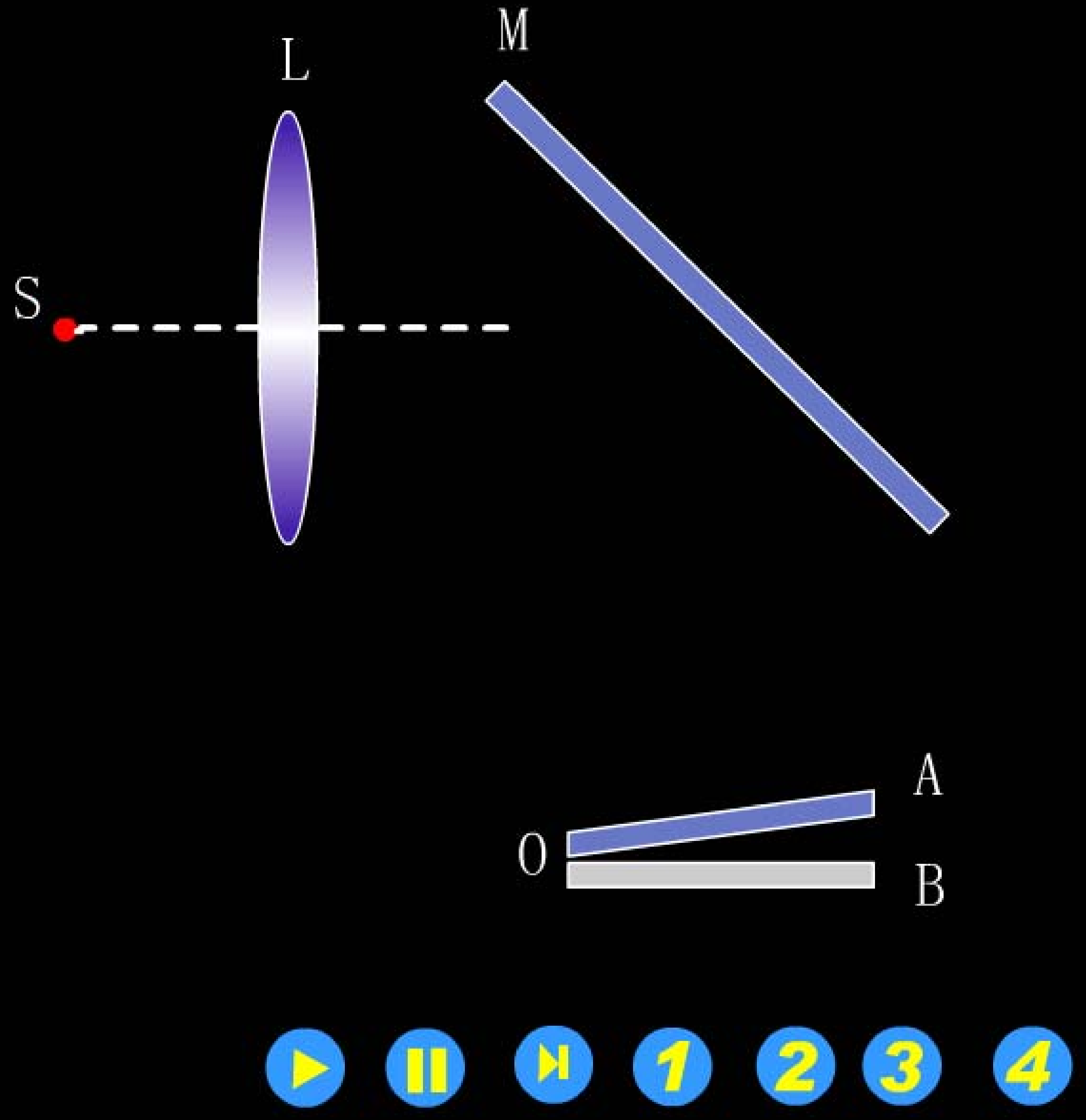
即相邻条纹的厚度差：

$$\Delta e=\frac{\lambda}{2n}$$



01:35:48

劈尖干涉

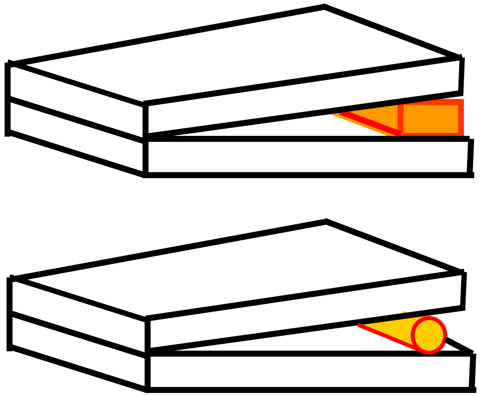


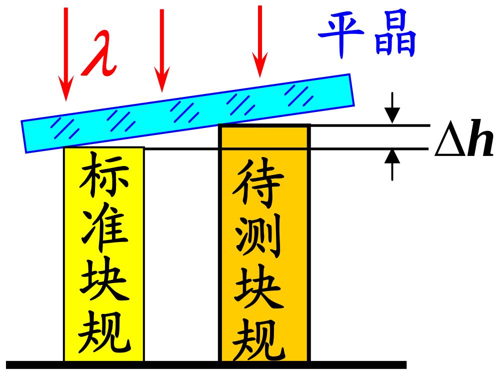
(2)劈尖的应用

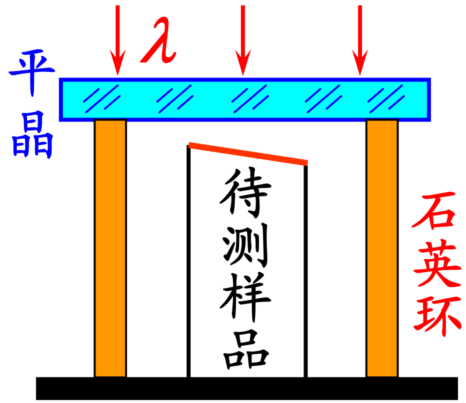
相邻条纹间距 $b=\dfrac{\lambda}{2n\theta}=\dfrac{\lambda L}{2nD}$

•测$\boldsymbol{b}$, 求波长λ、折射率$\boldsymbol{n}$、细小厚度(直径)、微小变化

干涉膨胀仪：用于测量固体样品微小的热膨胀系数





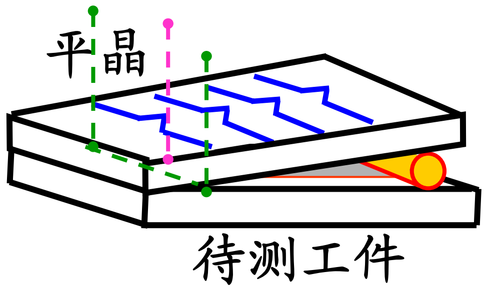


•测量表面平整度

同一条纹对应的空气薄膜厚度相同，

若条纹朝偏离劈棱方向弯曲，

说明待测平面上有隆起。



01:35:48

选择题： #S5104.

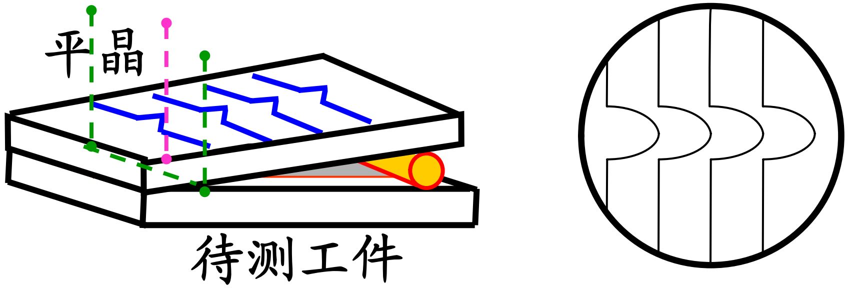
用劈尖干涉检测工件的表面，当波长为λ的单色光入射时，观察到的干涉条纹如图所示，每一条纹弯曲部分的顶点恰与右邻条纹的直线部分的连线相切，则可知工件表面［ **A** ］

A. 有一凸起，高为λ/2

B. 有一凸起，高为λ/4

C. 有一凹陷，深为λ/2

D. 有一凹陷，深为λ/4



相邻条纹的厚度差 $\Delta d = \dfrac{\lambda}{2n}$

01:35:48

选择题： #S5105.

如图，两个直径有微小差别△D的彼此平行的滚柱之间的距离为L，夹在两块平面晶体的中间，形成空气劈形膜，当单色光垂直入射时，产生等厚干涉条纹。如果滚柱之间的距离L变小，则在L范围内干涉条纹的间距b和数目N如何变化？

(1) 间距增大，数目减少；

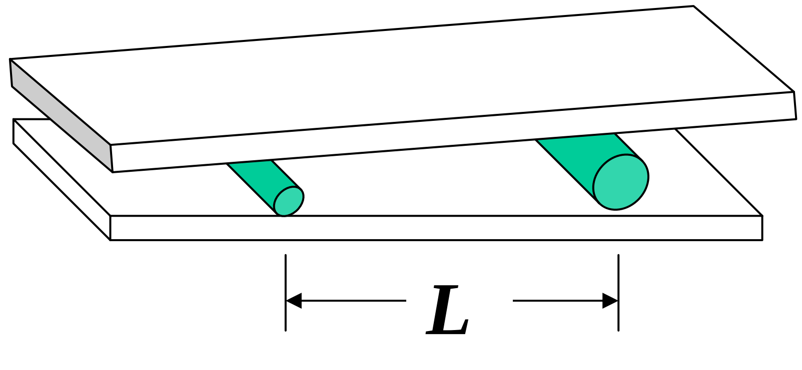
(2) 间距减小，数目增多；

(3) 间距增大，数目不变；

(4) 间距减小，数目不变；

(5) 间距不变，数目减少；

(6) 间距不变，数目增多。

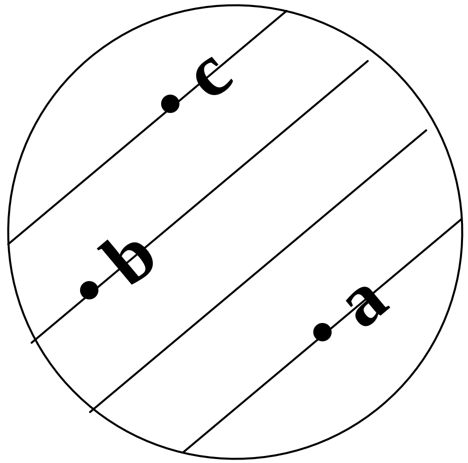


$$\sin\theta = \frac{\Delta e}{b} = \frac{\lambda/2}{b} \qquad N = \frac{\Delta D}{\Delta e}$$

01:35:48

选择题： #S5106.

两块圆形平玻璃板之间，夹着**3**个直径相近的小钢珠**a**、**b**、**c**，用单色平行光垂直照射，观察到下图所示的等厚条纹。



若在钢珠**a**处下压上面的平玻璃板，发现干涉条纹变密。

由上可知，三个钢珠的直径：

(1) $d_a>d_b>d_c$， $d_a-d_b=\lambda/2$， $d_b-d_c=\lambda$；

(2) $d_a>d_b>d_c$， $d_a-d_b=\lambda$， $d_b-d_c=\lambda/2$；

(3) $d_a<d_b<d_c$， $d_a-d_b=\lambda/2$， $d_b-d_c=\lambda$；

(4) $d_a<d_b<d_c$， $d_a-d_b=\lambda$， $d_b-d_c=\lambda/2$.

01:35:48

判断题： #T5104.

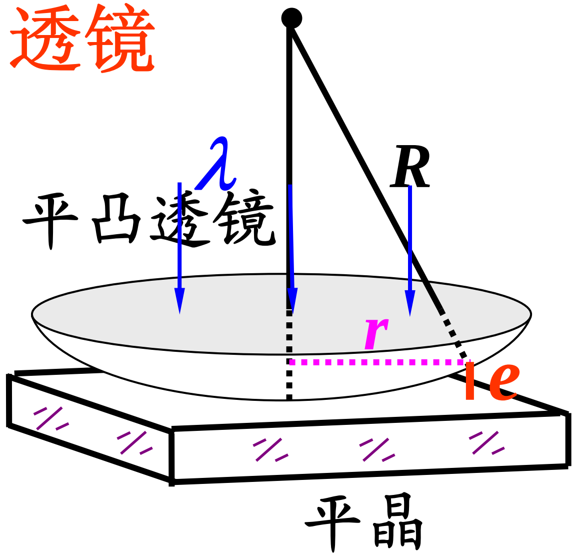
观察反射光形成的劈尖干涉条纹：
若在两块玻璃之间形成劈尖状空气薄膜，
由于半波损失，在劈棱处为暗条纹。
若反过来，
将一块玻璃腐蚀成劈尖状并放置于空气中，
则劈棱处为明条纹。

01:35:48

2. 牛顿环

在平晶上，放一曲率半径**R**很大的平凸透镜

在二者之间形成一圈环形空气薄膜



光程差 $\delta = 2en + \frac{\lambda}{2} = 2e + \frac{\lambda}{2} \Leftarrow n = 1$

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

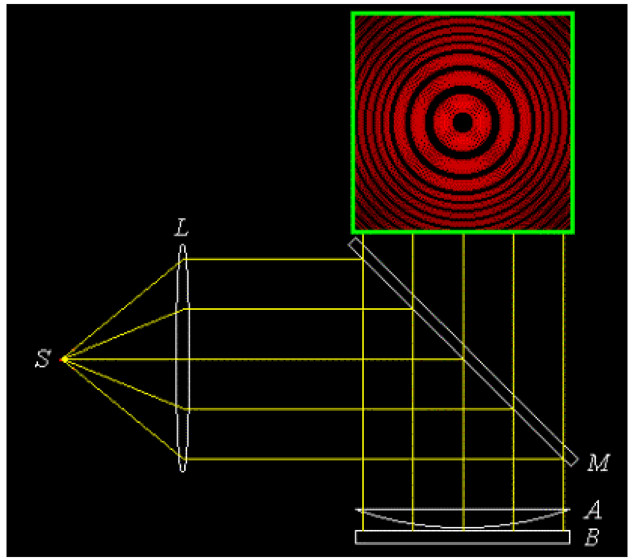
$e = \frac{r^2}{2R} \qquad \therefore \delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$ 相同**r**→同级条纹

(1)条纹特点及变化

•一系列不同**r** 的圆环——牛顿环

•各级暗环半径

$$\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow r_k = \sqrt{kR\lambda}$$



01:35:48

k级暗环半径 $r_k = \sqrt{kR\lambda} \propto \sqrt{k}$

中心接触点**(r=0, e=0)为0级暗斑**，级次：内低外高

•条纹间距 $\Delta r \propto (\sqrt{k} - \sqrt{k-1}) \quad k\uparrow,\ \Delta r \to 0$ 内疏外密

•明环半径 $\dfrac{r^2}{R} + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda \Rightarrow r_k = \sqrt{\dfrac{(2k-1)R\lambda}{2}} \quad k = 1, 2, 3\ldots$

•白光入射：对同一级条纹，$\lambda\uparrow$，则$r_k\uparrow$，内紫外红

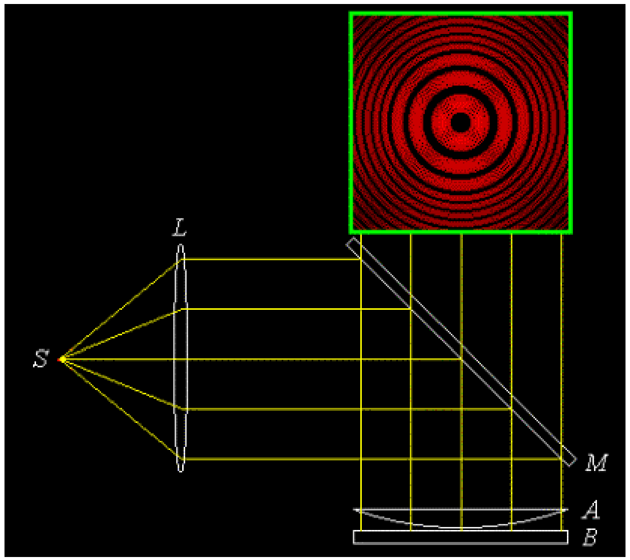
•平凸透镜上移距离d 向内陷入

$\delta = \dfrac{r^2}{R} + 2d + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda$ r**不变**, $\delta\uparrow$, **则**$k\uparrow$

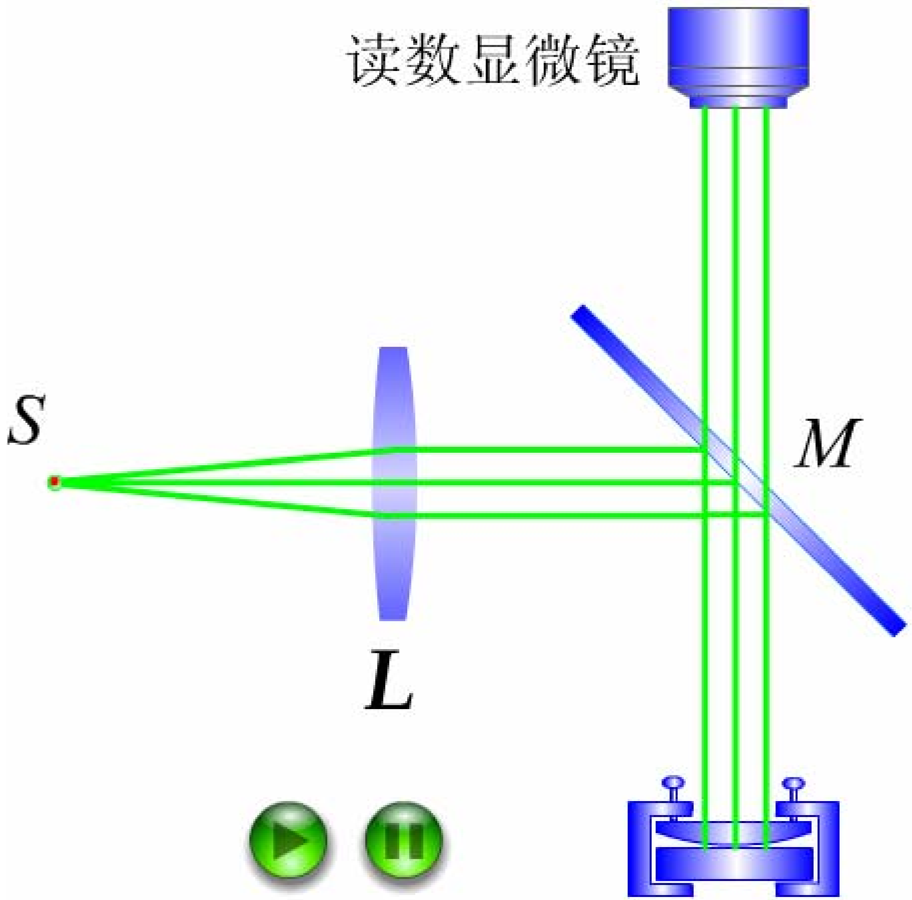
•透射光的干涉

条纹的明暗与反射时恰好相反，

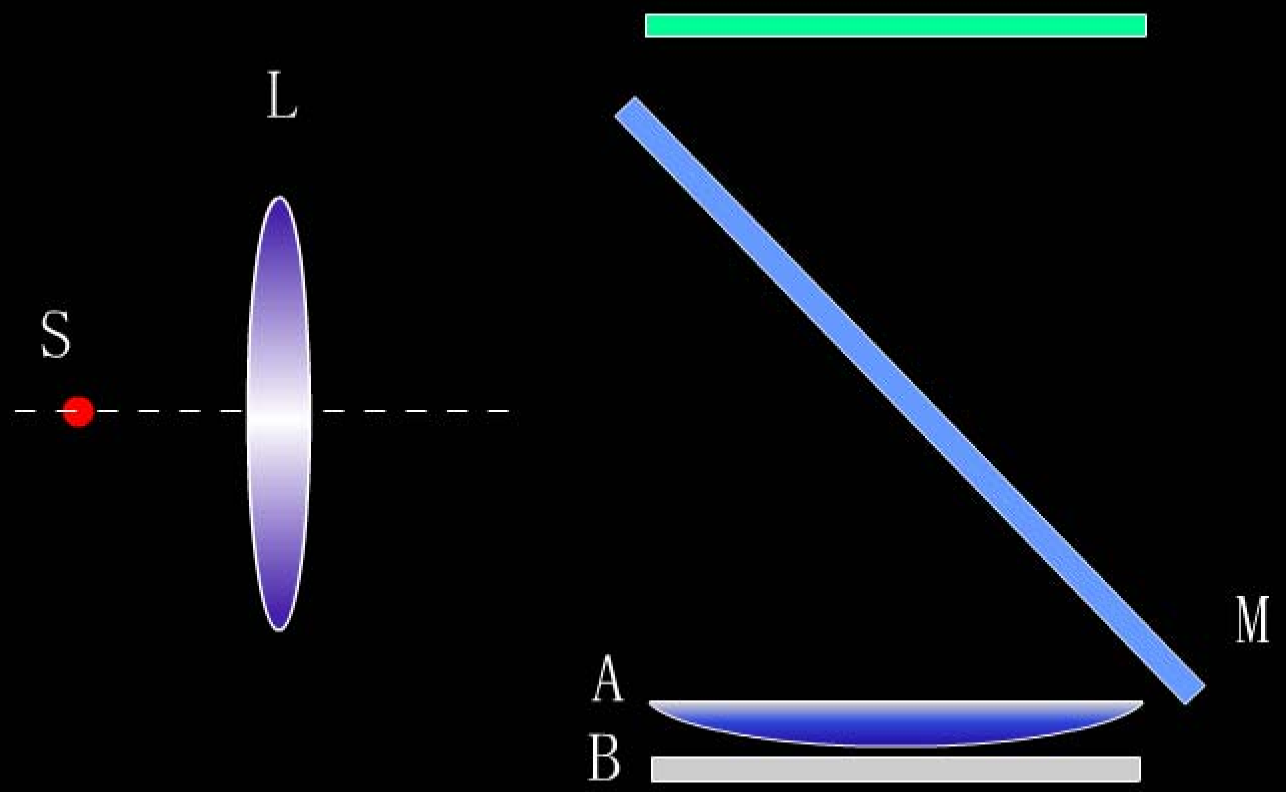
在接触点为亮斑。(为什么)？



01:35:48


读数显微镜
S
M
L

牛顿环



选择题： #S5107.

若将课本中所介绍的牛顿环实验装置放入水中，则所得干涉图样会怎样的变化？

(1) 半径增大，间距增大；

(2) 半径减小，间距减小；

(3) 半径增大，间距不变；

(4) 半径减小，间距不变。

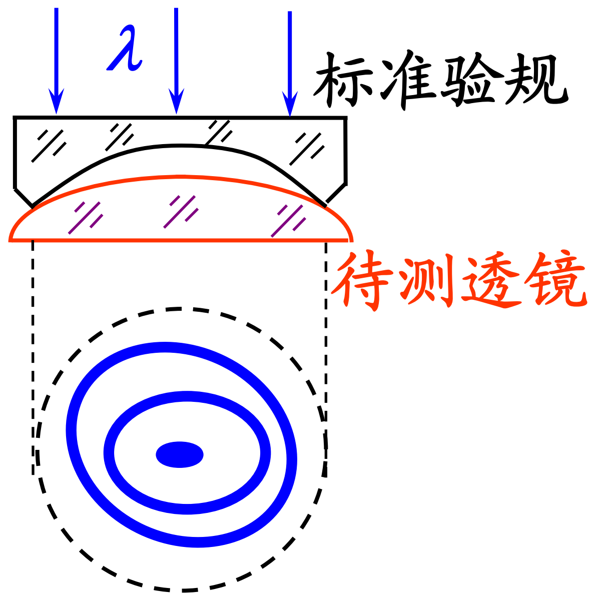
$$2n \cdot \frac{r^2}{2R} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow r_k = \sqrt{kR\,\lambda/n} = \sqrt{kR\lambda'}$$

01:35:48

(2) 牛顿环的应用

第**k**级暗环半径 $r_k = \sqrt{kR\lambda}$

$$\Rightarrow r_{k+\Delta k}^2 - r_k^2 = \Delta kR\lambda$$



- 已知波长λ，测透镜的曲率半径R
- 已知透镜的曲率半径R，测波长λ
- 检验透镜表面质量

图示条纹说明待测透镜表面不规则

例：用λ=0.633μm的单色光做牛顿环实验，测得第**k**个暗环半径为5.63mm，第**k**+5个暗环半径为7.96mm，

求：平凸透镜的曲率半径R

解：由 $r_{k+5}^2 - r_k^2 = 5R\lambda$

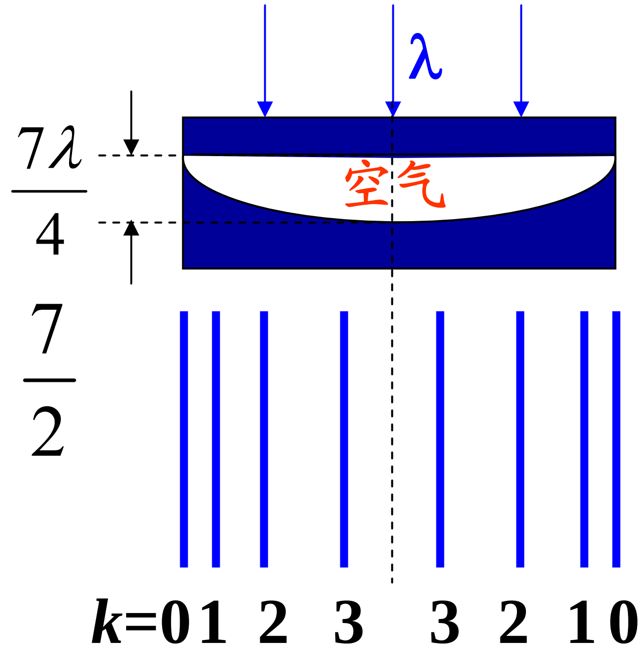
$$R = \frac{r_{k+5}^2 - r_k^2}{5\lambda} = \frac{\left(7.96^2 - 5.63^2\right)\times 10^{-6}}{5\times 6.33\times 10^{-10}} = 10.0\text{m}$$

01:35:48

例: 图示装置下半部分为一圆柱形凹面，用波长为λ的平行单色光垂直照射，观察空气薄膜上下表面反射光形成的等厚条纹，计算并画出各级暗纹的位置。

解: 反射光形成的暗纹

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



$$\Rightarrow 2e = k\lambda \quad \because 0 \le e \le \frac{7\lambda}{4} \quad \therefore 0 \le k \le \frac{7}{2}$$

k可以取**0**，**1**，**2**，**3**

当**k=0**，**e =0**，在薄膜的两个边缘处

当**k=3**，$e = \frac{3\lambda}{2} = \frac{6\lambda}{4} < \frac{7\lambda}{4}$ 分列在薄膜最厚处的两侧

$e = 0、\frac{\lambda}{2}、\frac{2\lambda}{2}、\frac{3\lambda}{2}$ 共**8**条平行暗纹　圆柱形→不是圆环

01:35:48

4.3 等倾条纹

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

➢若薄膜厚度*e*均匀

光程差决定于倾角*i*

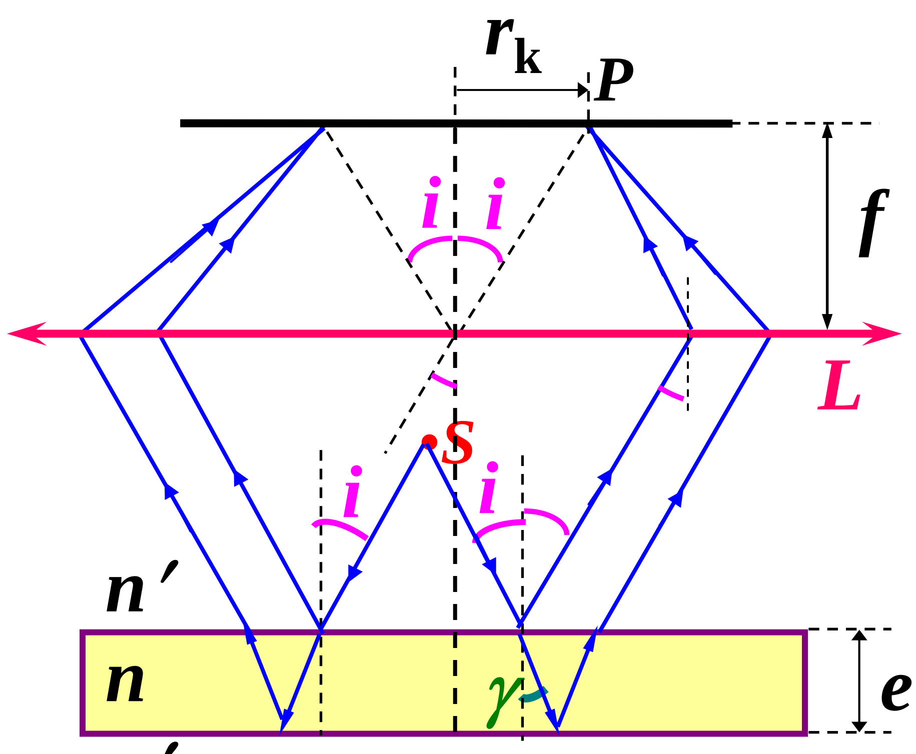
$$\delta(i) = \begin{cases} k\lambda, & k = 1, 2, 3\cdots \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, & k = 0, 1, 2\cdots \end{cases}$$

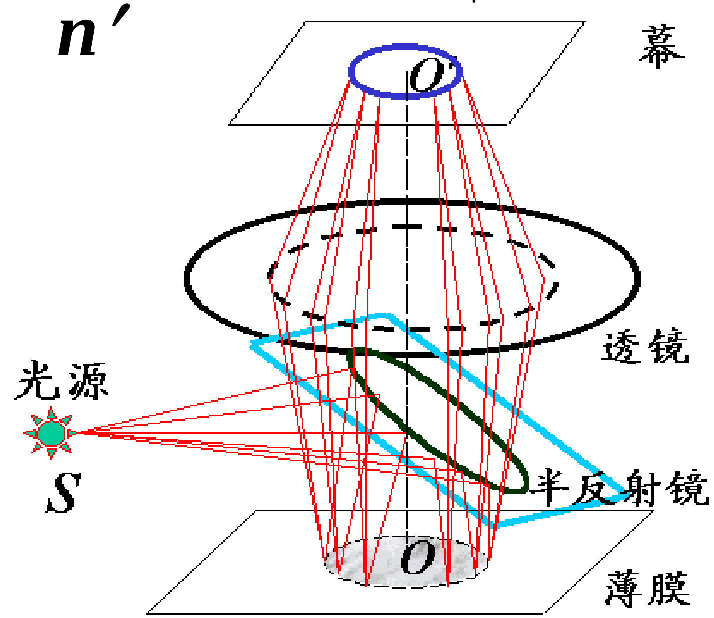
相同倾角的光线对应同一级条纹——等倾条纹

*S*发出的同一光锥面上的光线在屏幕上形成一个圆环

半径$r_k = f\,\mathrm{tg}\,i$　其中*f*为焦距

注意区分半径r_k和折射角γ



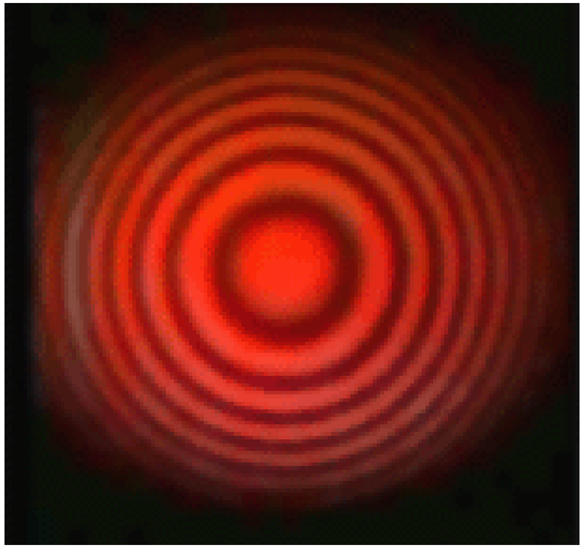


01:35:48

▲条纹特点

•形状：$r_k = f\ \mathrm{tg}\ i$

对不同倾角，形成一系列同心圆环



•条纹级次分布：

对明纹 $\delta(i) = 2e\sqrt{n^2 - n'^2\sin^2 i} + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda$

$k\uparrow \rightarrow \delta\uparrow \rightarrow i\downarrow \rightarrow r_k\downarrow$ 级次: 内高外低

•圆环中心O处，级次最高　此处$r_k=0$，$i=0$

$\delta = 2ne + \dfrac{\lambda}{2} = k_O\lambda \leftarrow$ 若中心为明纹 $\Rightarrow k_O = \dfrac{2ne}{\lambda} + \cancel{\dfrac{1}{2}}$ ←暗纹

•波长对同级条纹的影响：$2e\sqrt{n^2 - n'^2\sin^2 i} = k\lambda - \dfrac{\lambda}{2}$

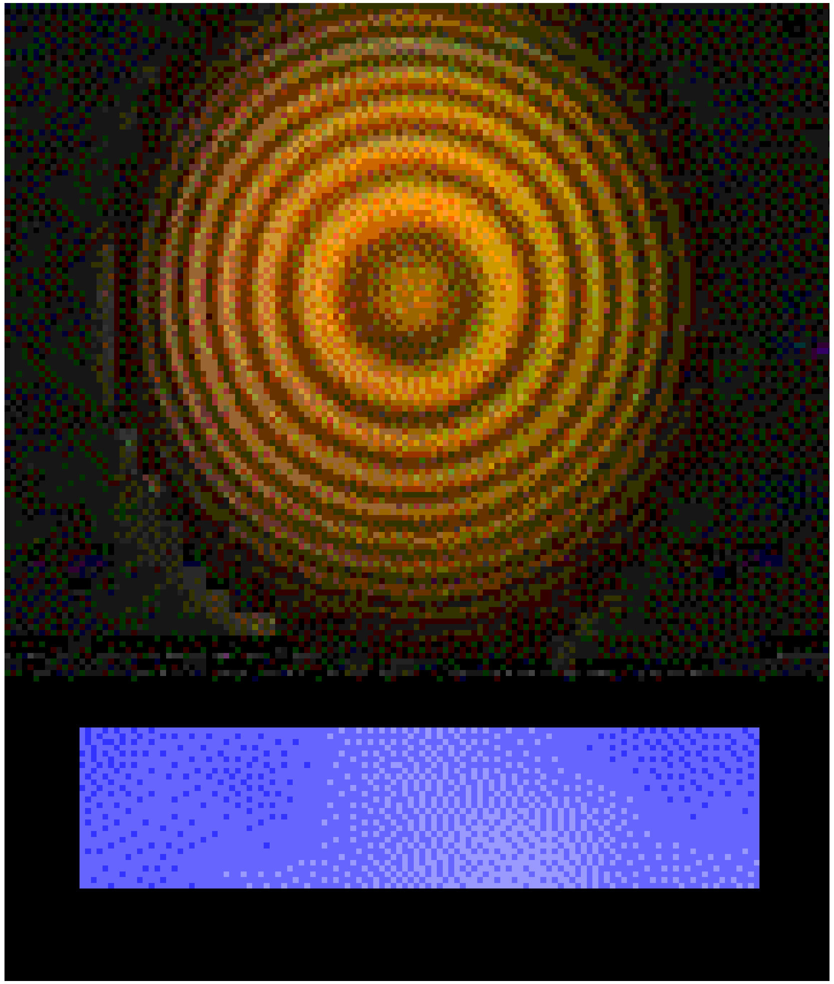
k，e 一定，$\lambda\uparrow \rightarrow i\downarrow \rightarrow r_k\downarrow$　复色光入射：内红外紫

01:35:48

•条纹间隔：$\delta = 2ne\cos\gamma + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \Rightarrow -2ne\sin\gamma\Delta\gamma = \Delta k\lambda$

取△**k=−1(内高外低)**，相邻条纹的角间距 $\Delta\gamma = \frac{\lambda}{2ne\sin\gamma}$

$r_k = f\tan i \quad r_k\uparrow \rightarrow i\uparrow \rightarrow \gamma\uparrow \rightarrow \Delta\gamma\downarrow$ 内疏外密



•膜厚变化对条纹的影响

***e*增大时，条纹不断从中央冒出**

δ一定, $e\uparrow \rightarrow \cos\gamma\downarrow \rightarrow \gamma\uparrow \rightarrow r_k\uparrow$

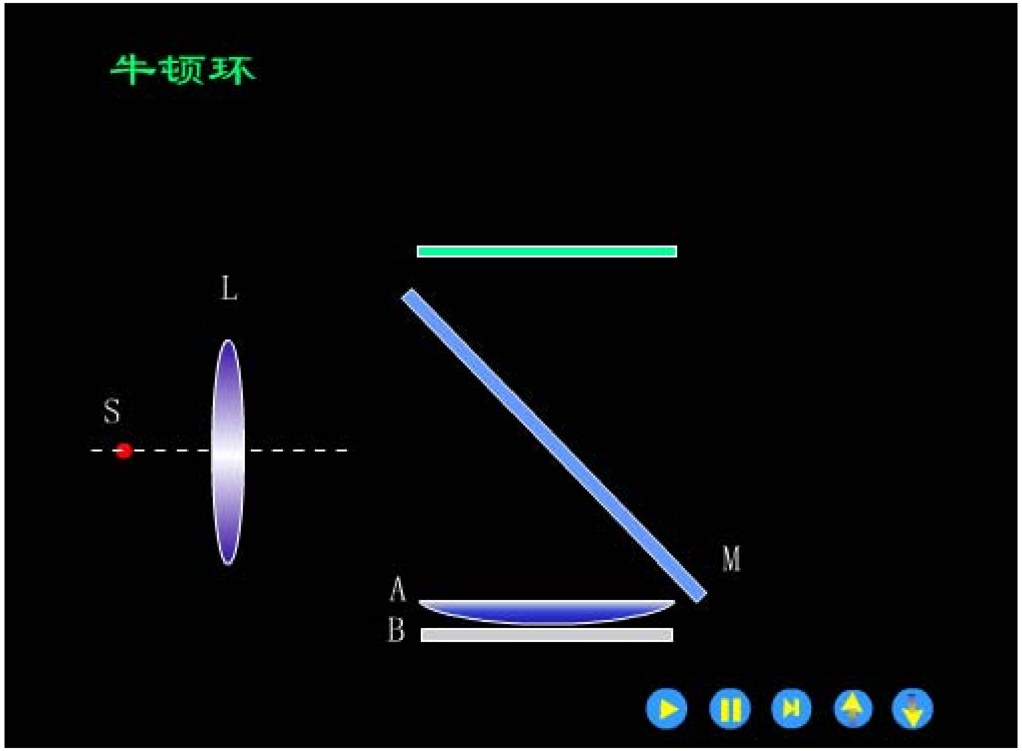
每冒出1个条纹，膜厚增加多少？

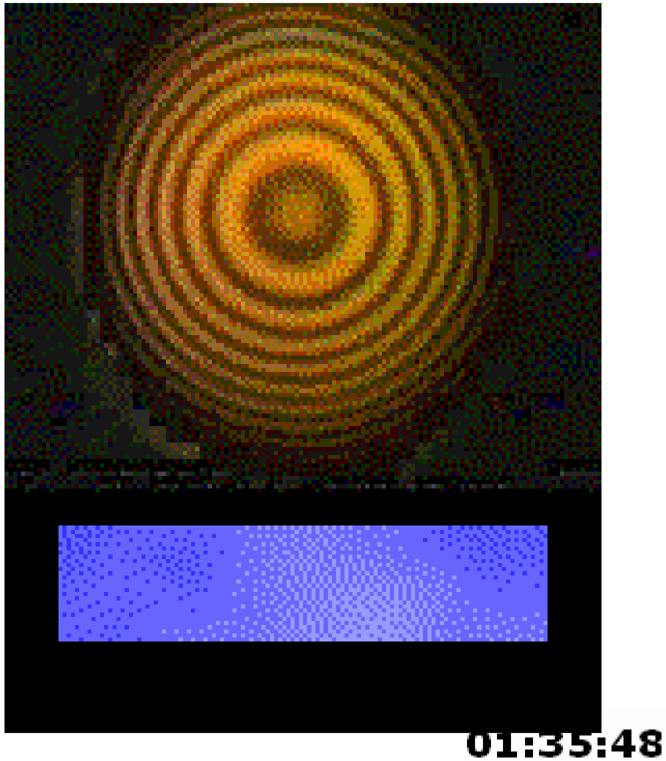
圆环中心处 $2ne + \frac{\lambda}{2} = k_o\lambda$

$e\uparrow \rightarrow k_o\uparrow \quad 2n\Delta e = \Delta k_o\lambda$

$\Delta k_o = 1 \Rightarrow \Delta e = \frac{\lambda}{2n}$

	牛顿环	等倾干涉
•圆环半径：	$r_k = \sqrt{kR\lambda}$ (暗纹)	$r_k = f\tan i$
•环纹间距：	内疏外密	内疏外密
•级次分布：	内低外高	内高外低
•复色光：	内紫外红	内红外紫
•膜厚增加：	环纹内陷	环纹冒出



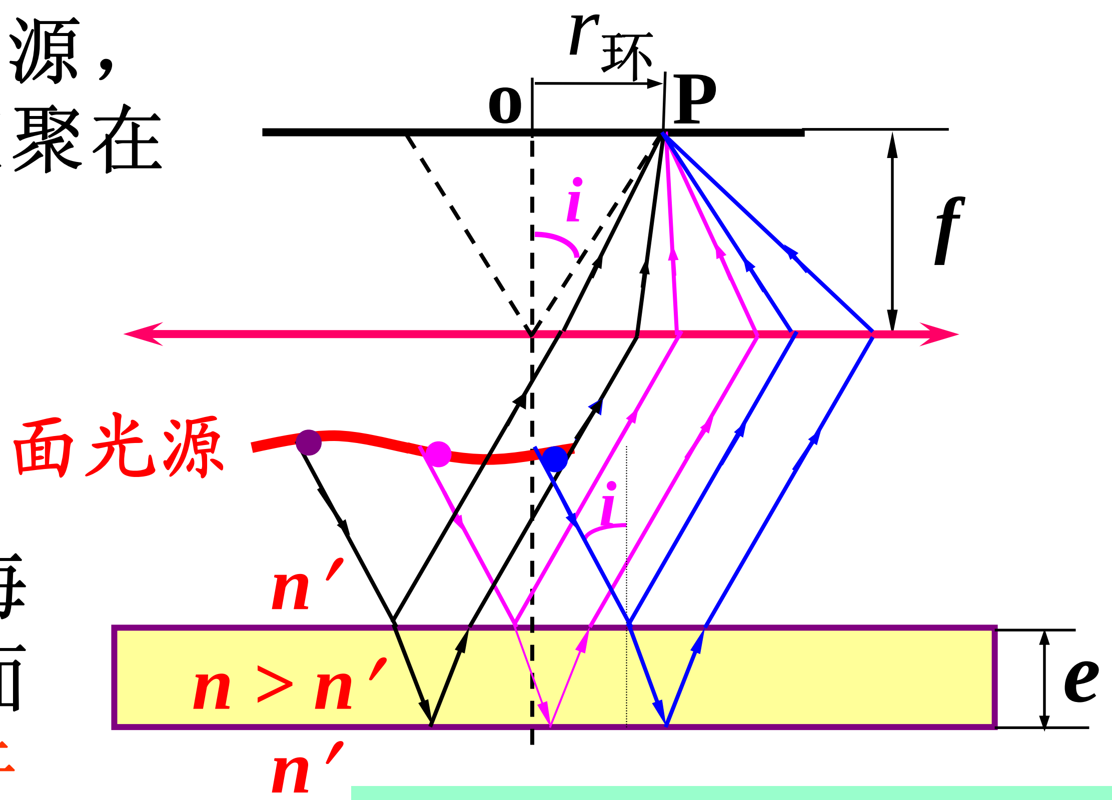


▲薄膜干涉可以使用扩展光源，以增大条纹的亮度

不管来自哪个点光源，只要i相同，都将汇聚在同一个圆环上。

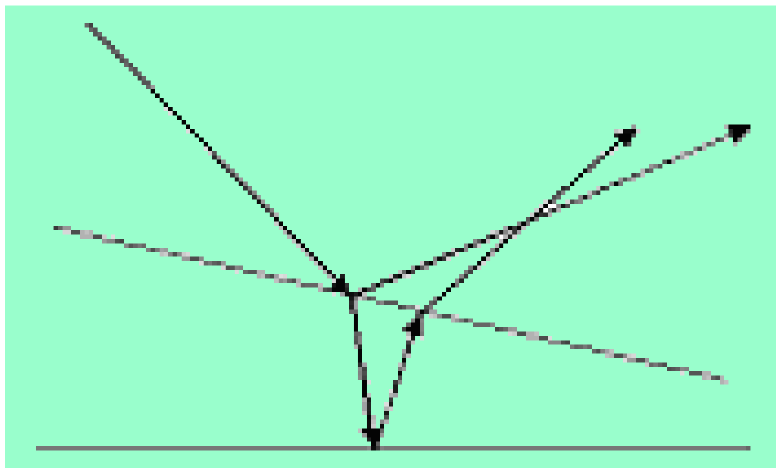
扩大了视场，也使条纹更加明亮。

各点光源非相干，每个点光源在上下表面两次反射的光线相干



▲等倾干涉中使用了凸透镜，定域于无限远处

等厚干涉中不需要凸透镜，定域于薄膜表面附近



01:35:48

- 相干光的获得
  - 分波阵面法
    - 杨氏双缝干涉
    - 双棱（面）镜干涉
    - 洛埃镜干涉 → 半波损失
  - 分振幅法 → 迈克耳逊干涉仪
    - 薄膜干涉
      - 增透膜
      - 增反膜
      - 正入射 → 等厚干涉 → 定域于薄膜表面
        - 劈尖干涉
        - 牛顿环
      - 厚度均匀 → 等倾干涉 → 定域于无穷远处

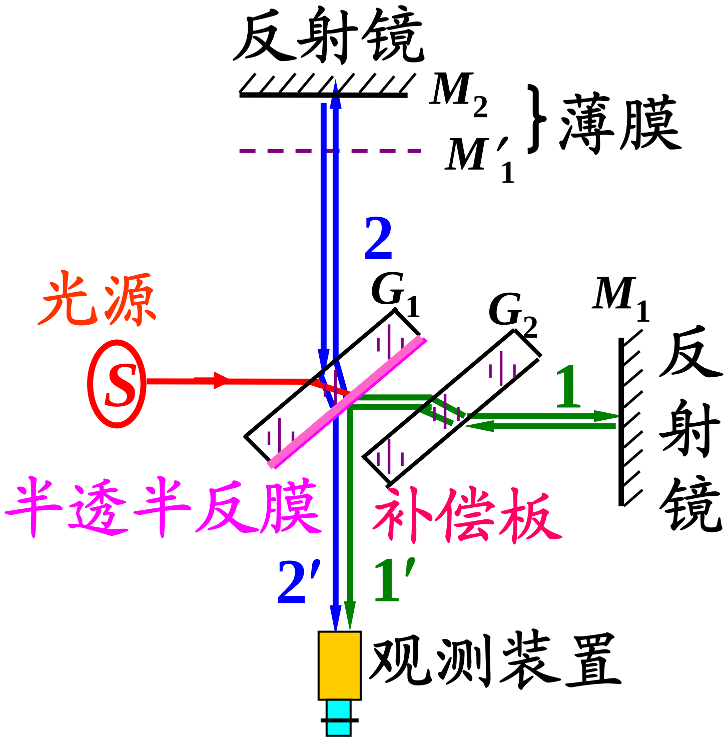
01:35:48

§5 迈克耳逊干涉仪

迈克耳逊
Michelson

- 迈克尔逊干涉仪是**1883**年美国物理学家迈克尔逊和莫雷合作，为研究“以太”漂移而设计制造出来的精密光学仪器。
- 迈克耳逊－莫雷实验否定了绝对参照系“以太”的存在，使经典物理学的绝对时空观受到了严重的挑战，为狭义相对论的建立提供了实验基础。
- 迈克尔逊因发明干涉仪和在光速测量方面的成就而获**1907**年诺贝尔奖。
- 迈克耳逊干涉仪是用分振幅的方法产生双光束以实现干涉的仪器。
- 根据该仪器的原理，研制出多种专用干涉仪。

5.1 原理



- 两平面镜垂直放置，其中M_1固定，M_2可前后移动
- G_1、G_2是两块相同的平行玻璃板，与M_1、M_2成45°
- G_1的一个表面涂有半透明的薄层银，G_2为相位补偿器
- M_1'为M_1经薄层银面成的像，M_1'与M_2形成空气薄膜
  若M_1、M_2严格垂直，则M_1'、M_2严格平行。

01:35:48

▲若M_1'、M_2平行⇒等倾条纹

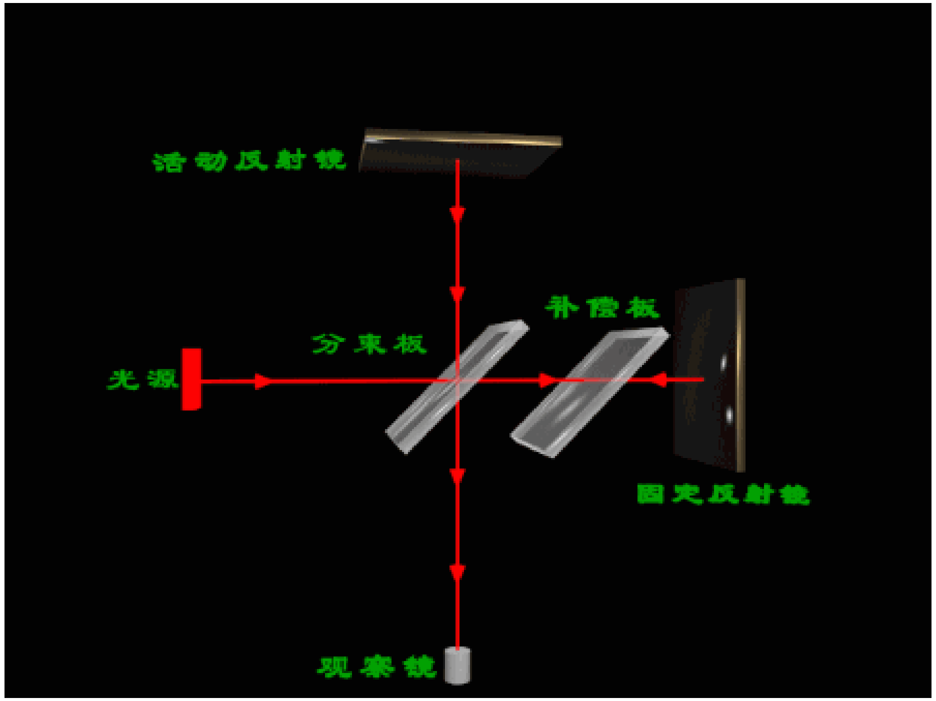
前后移动反射镜M_2，
即改变薄膜的厚度e

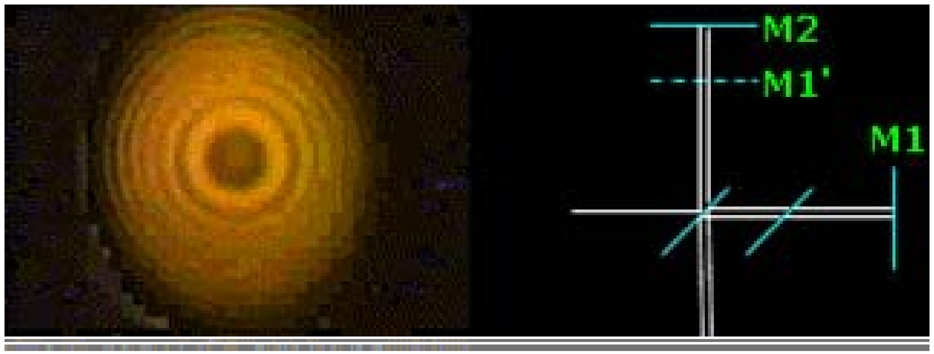
看到干涉条纹从圆环
中心冒出或缩进。

等倾干涉每冒出1个条纹，
膜厚增加

$$\Delta e = \frac{\lambda}{2n} = \frac{\lambda}{2} \leftarrow \text{空气} n=1$$

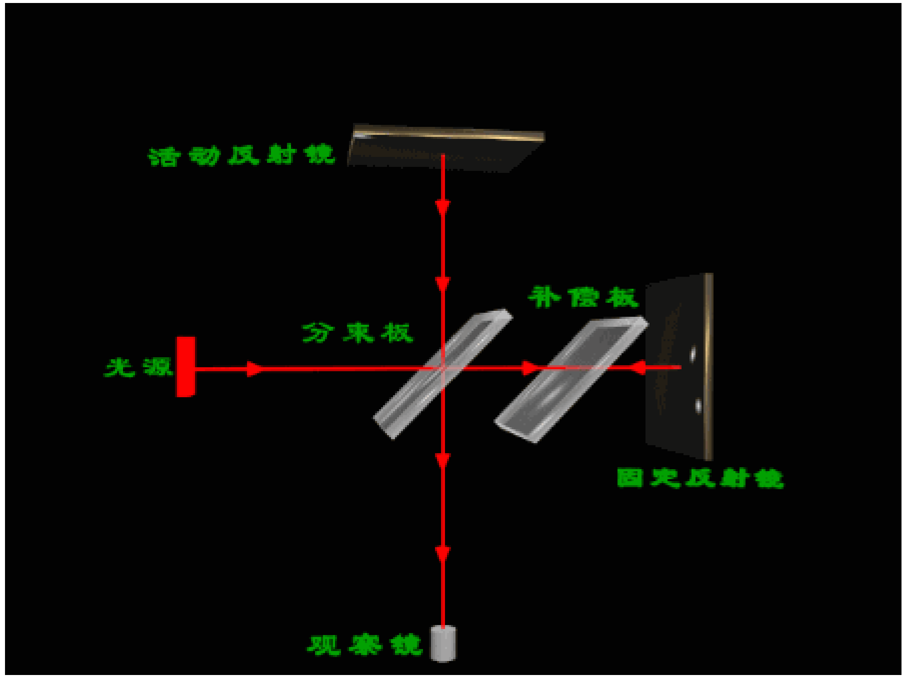
若M_2移动时，有N个条
纹陷入中心，则表明M_2
相对于M_1移近了$N\lambda/2$





01:35:48

▲若M_1'、M_2有小夹角⇒等厚条纹

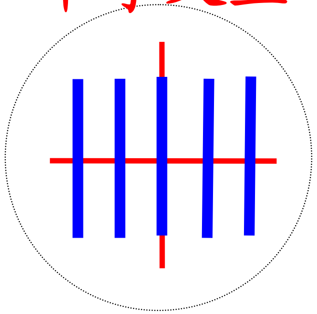


调节使M_2与M_1'接近重合，再细心调节使M_2与M_1'有一很小夹角，形成劈尖。

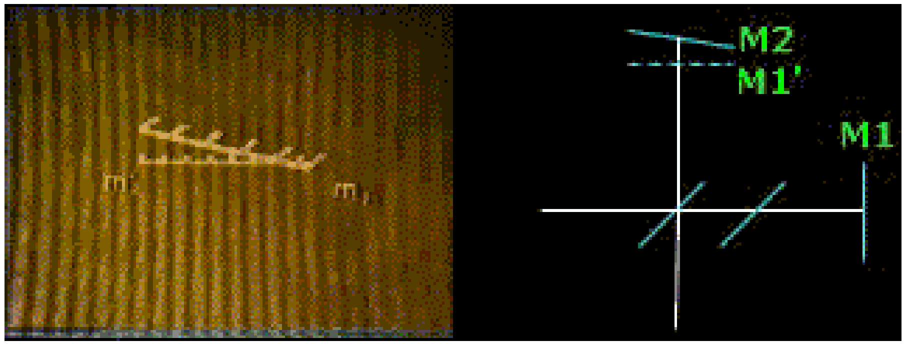
劈尖干涉每移过1个条纹，膜厚的变化为

$$\Delta e = \frac{\lambda}{2n} = \frac{\lambda}{2} \leftarrow 空气 n=1$$

十字叉丝



若条纹移过N条，说明M_2平移了距离$d=N\lambda/2$



•记下平移的距离和条纹移动的数目，可测出波长

•已知波长，则可由N来测量微小伸长量(如热胀冷缩量)

01:35:48

5.2 应用

•测量波长、微小位移 以波长λ为尺度，可精确到$\lambda/20$

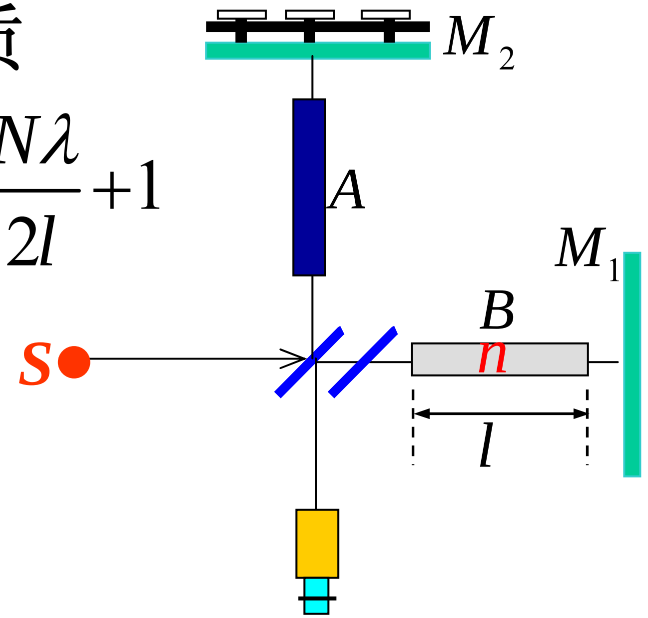
•测介质折射率

光源、两个反射面M_1和M_2、接收器(或观察者)四者在空间完全分开，便于在光路中安插其它器件。

比如在光路1中插入长为l 的待测介质

产生附加光程差：$2(n-1)l = N\lambda$ $\Rightarrow n=\dfrac{N\lambda}{2l}+1$

观察到移过了N 个条纹



例：在迈克耳逊干涉仪的两臂中分别插入10cm长的真空玻璃管A、B，现给B充以一个大气压的空气，此过程中观察到条纹移动了107.2条，所用波长为546nm，

求：管中空气的折射率？

解：

$$n=\frac{107.2\times\lambda}{2l}+1=1.0002927$$

01:35:48

本章内容

★★★熟悉★★★

◆双缝干涉：条纹间距

◆等倾干涉

◆等厚干涉：劈尖、牛顿环

干涉图样，条纹特点

★★理解★★

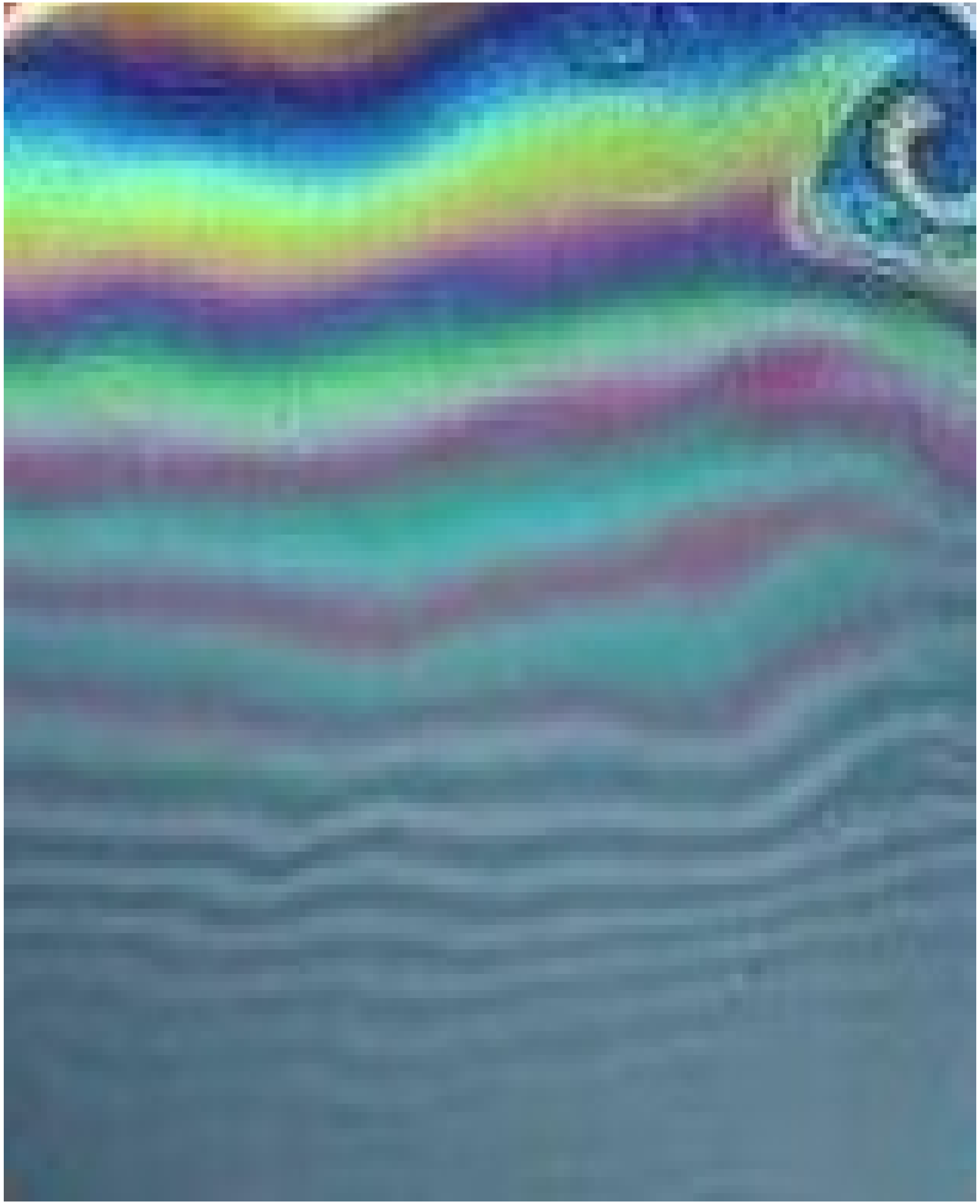
◆光程：λ——真空中波长

◆增透膜，增反膜

◆迈克尔逊干涉仪

★了解★

◆类双缝干涉: 洛埃镜——半波损失



作业:

物理学教程

(第二版)下册

P236

8，11，12，

15，18, 19

01:35:48