第五篇

光学

- 光学是一门历史悠久的学科

人类认识自然，90%的信息来自视觉，所以人类对光现象的研究可谓由来已久。

- 光学又是一门长时间保持生机勃勃的学科

尤其是上世纪60年代初激光问世以来，光科学取得了革命性发展， 冲击了整个物理学科，并且对其他学科（化学、生物医学、微电子、材料、信息工程等等学科）都产生了巨大的影响。

光究竟是什么？

- 光是微粒流

----几何光学：以光的直线传播规律为基础,研究各种光学仪器的理论。

- 光是波，光是电磁波

----波动光学：以光的电磁理论为基础, 研究光传播规律，特别是干涉、衍射。

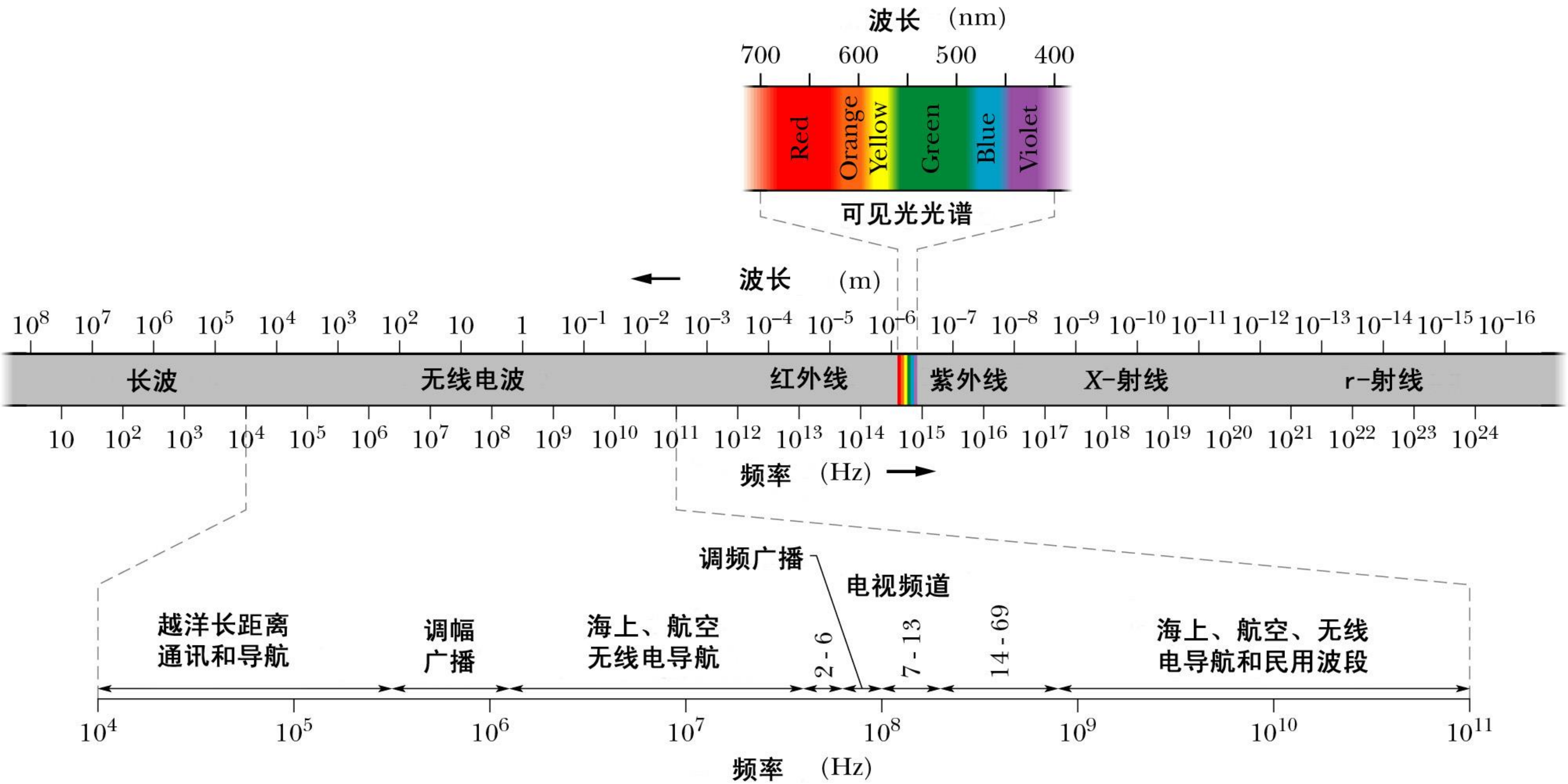
- 光是粒子也是波，是量子化了的电磁场

----量子光学：以光的量子理论为基础,

研究光与物质相互作用的规律

不断深化着对光本性的认识。

光究竟是什么？？？？？？



根据光的电磁理论，光是一定波段的电磁波。

可见光—人眼能感受到的电磁波，其波长λ约在

390 nm～760 nm（3900～7600 Å ，1 Å=10^{-10} m）

对应的频率为（7.7～3.9 ）×10^{14} Hz。

平面电磁波 $\begin{cases} E = E_0 \cos\omega(t - \dfrac{r}{u}) \\ H = H_0 \cos\omega(t - \dfrac{r}{u}) \end{cases}$

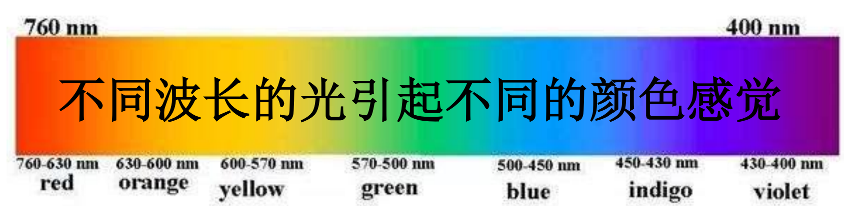
对人眼视觉、底片感光、检测光的元件、光化学作用、光合作用上起主要作用的是电场强度矢量。

光矢量：$\vec{E}$矢量　　光强：$I \propto E^2$

光速：$u = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_r \mu_r}}$　　$c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 m/s$

介质折射率n ：$\boxed{n = \dfrac{c}{u} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}$

光波长：$\boxed{\lambda = uT = \dfrac{u}{\nu} = \dfrac{c}{n\nu}}$



单色光：指具有确定的单一频率(波长)的光。

白光：普通光源发出的是混色光。

利用光的电磁波理论来讲波动光学，包括干涉、衍射和偏振

波动光学：

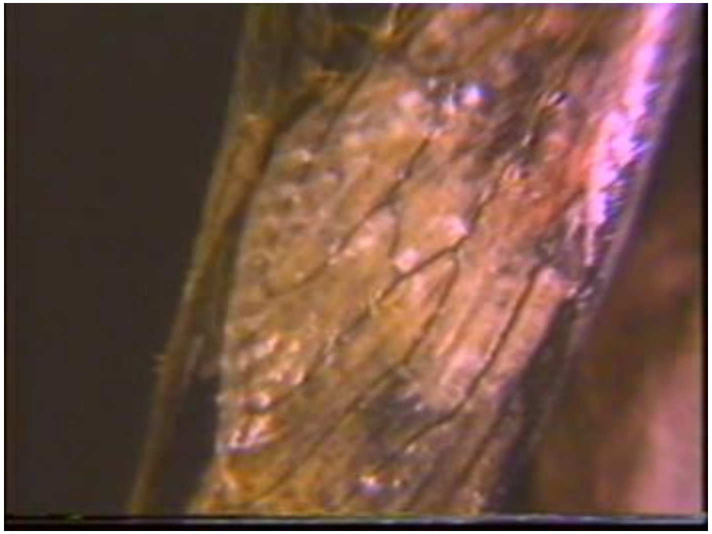
一、光的干涉

二、光的衍射

三、光的偏振

第21章 光的干涉

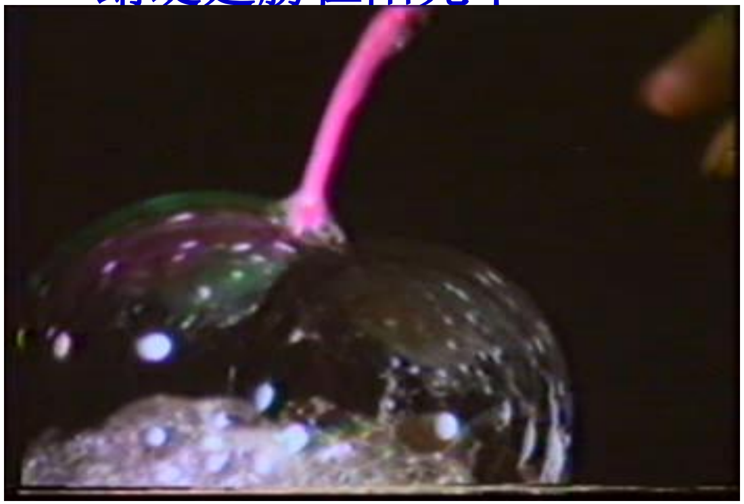
丰富多彩的光的干涉现象



蝉翅在阳光下

蜻蜓翅膀在阳光下

白光下的油膜



肥皂泡

两列同频、同向、相位差恒定的光波的叠加--相干叠加

$$E_1 = E_{10}\cos(\omega t + \varphi_{10})$$

$$E_2 = E_{20}\cos(\omega t + \varphi_{20})$$

$$E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\Delta\varphi$$

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

$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ $\Delta\varphi = 2k\pi$ --干涉加强

$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$ --干涉减弱

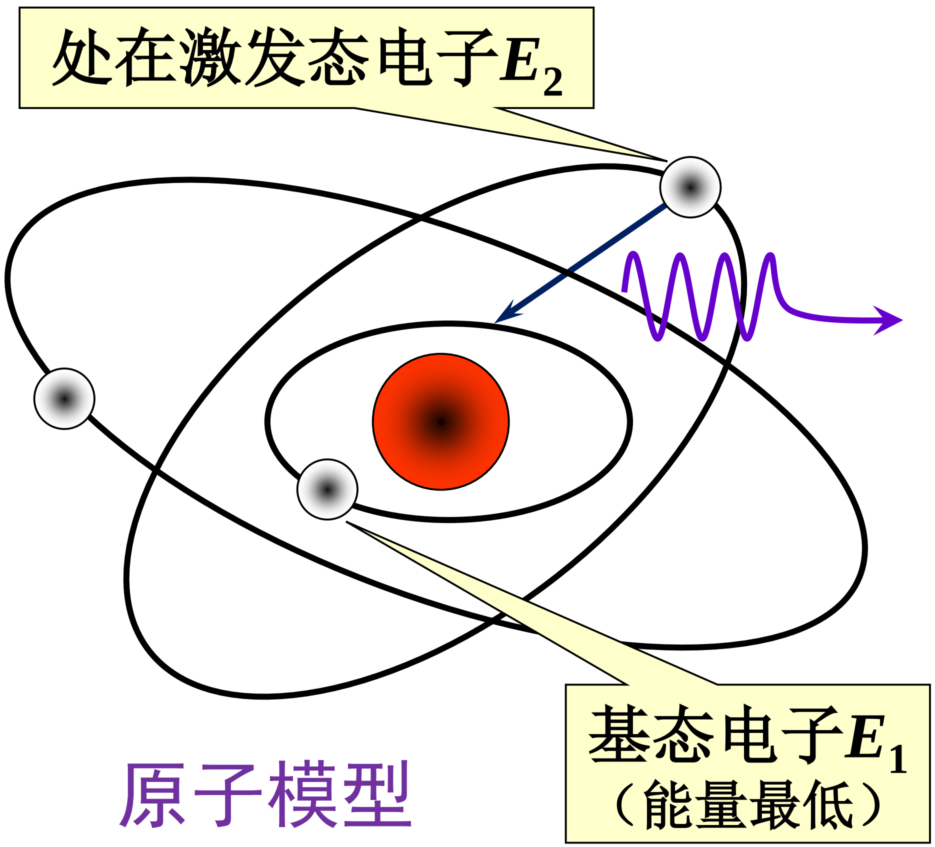
问题：为什么通常情况下观察不到普通光源发出的光的干涉现象？

§1　光源的发光机制　相干光的获得

一. 光源发光的机制

光源的最基本发光单元是原子、分子。

光源的发光是原子的外层电子进行能级跃迁的过程



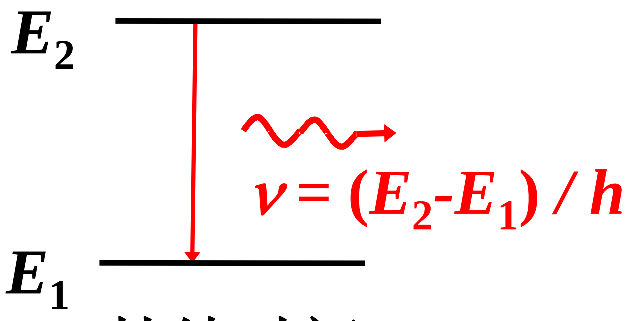
原子模型

自发辐射

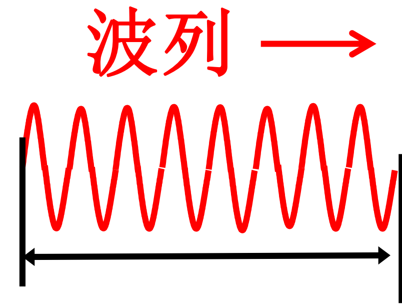
受激辐射

1、自发辐射（普通光源发光）：

能级跃迁辐射



持续时间$\tau \sim 10^{-8}$s

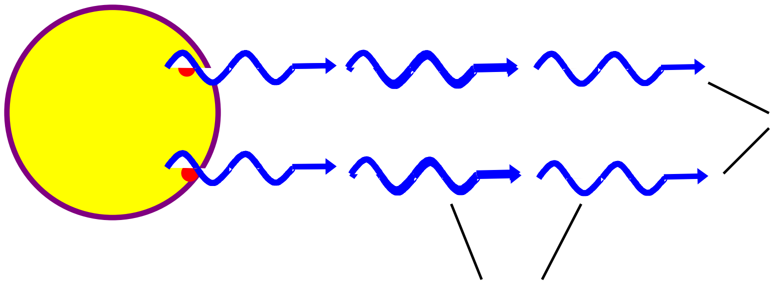


波列长$L = \tau c$

（1）单个激发态原子的**发光是断续的**（**间歇性**），一次发射的光波是一段频率一定、振动方向一定、有限长的光波（通常称为光波列）；

（2）一个原子不同时间发光的频率不同、振动方向不同，在相位上没有固定关系；

（3）光源内所有原子发光的时间不同，不同原子发光的频率、振动方向都是随机的，在相位上更没有固定关系。



不 同 原 子 同 时 发的光不相干

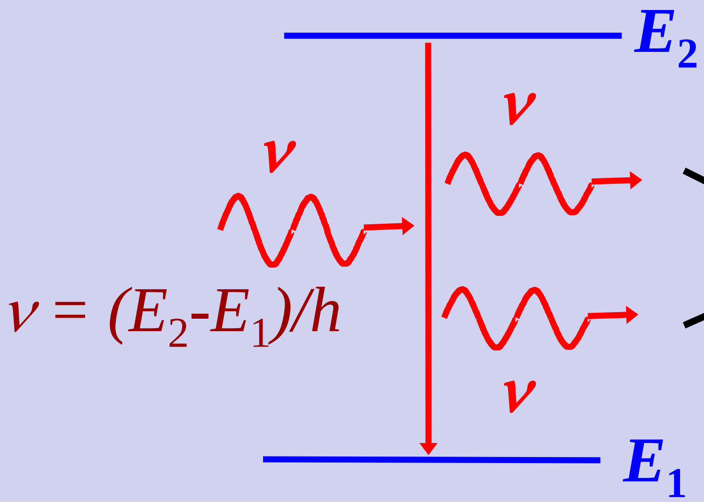
非相干光束

同一原子两次发的光不相干

因此：这样的原子（分子）集体发射的光线，为一束包含“多成分”的光。是非相干光源。

普通光源：自发辐射 所发的光是非相干光

2、受激辐射（激光光源）



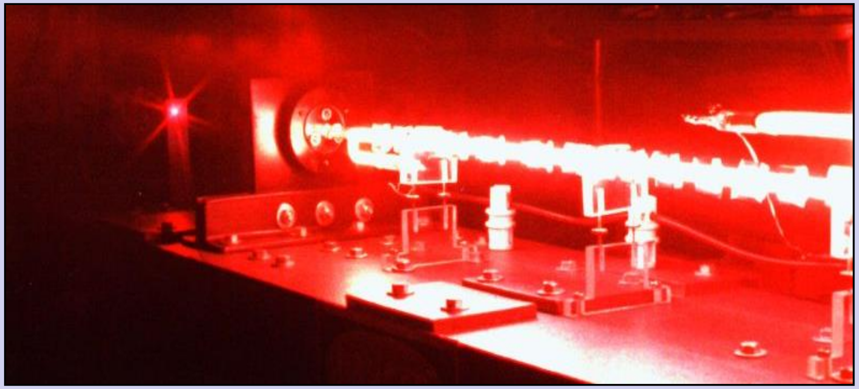
与入射光波完全一样

相干光束

（四同光束：频率, 相位, 振动方向,传播方向都相同）

激光光源：受激辐射 所发的光是相干光

氦氖激光器;
红宝石激光器;
半导体激光器等等。



➢ **普通光源：两个独立的光源，或同一光源的不同部位发出的光，或同一光源的同部位在不同时刻发出的光，不满足相干条件。**

问题：怎么从普通光源获得相干光？

☀ **从普通光源获得相干光的原则：**

从一个原子一次发光中获得，**即将某个原子某次发出的光波列分成部分。**

☀ **从普通光源相干光的获得方法：**

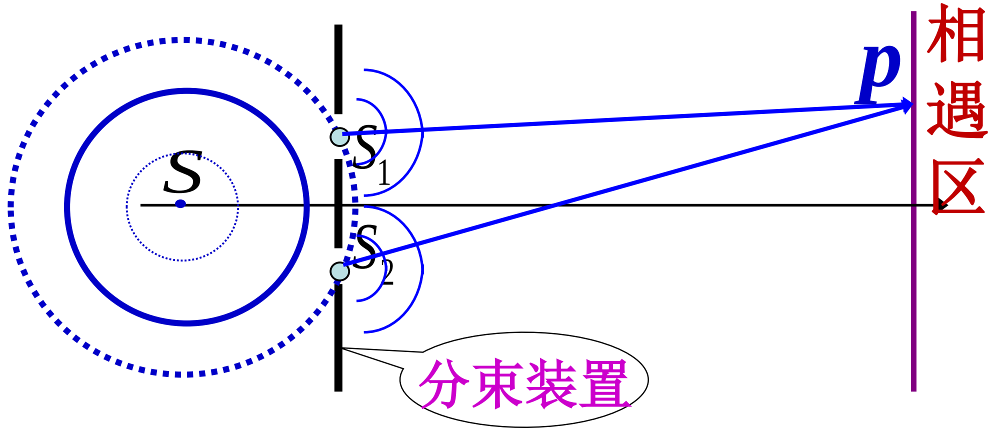
分波面——杨氏双缝干涉，菲涅耳双棱镜，洛埃镜。

分振幅——薄膜干涉（劈尖干涉，牛顿环）。

二、相干光的获得

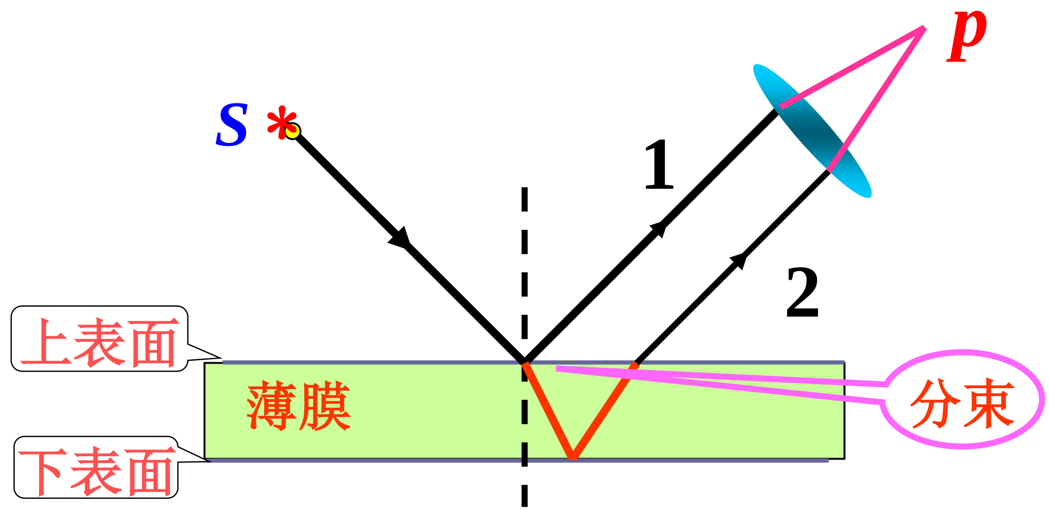
分波阵面法：

从一次发光的同一波面上取出几部分，分开后再相遇



分振幅法：

一束光线分成两（束）部分分开后再相遇

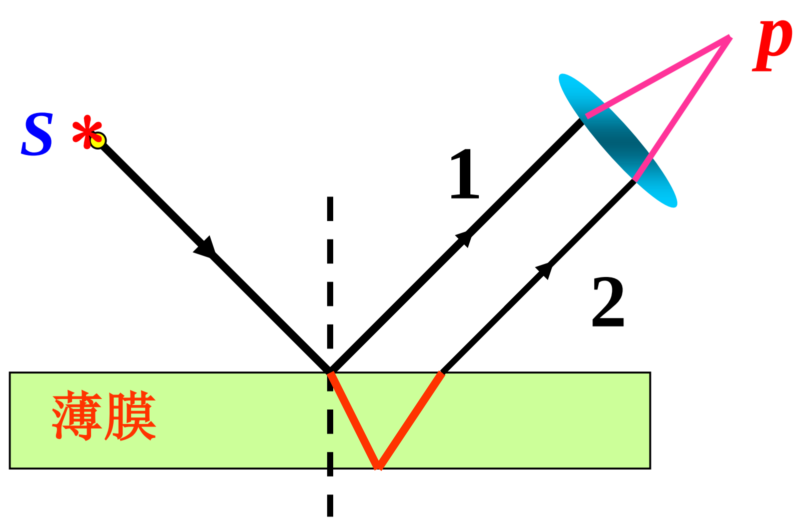


相遇区的光强分布取决于两束光在相遇点的相位差：$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$

同相波源

同相波源，则两相干光在P点的相位差：

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



问题：

1）怎么方便地计算出两列相干光在不同介质中传播后而相遇的相位差？

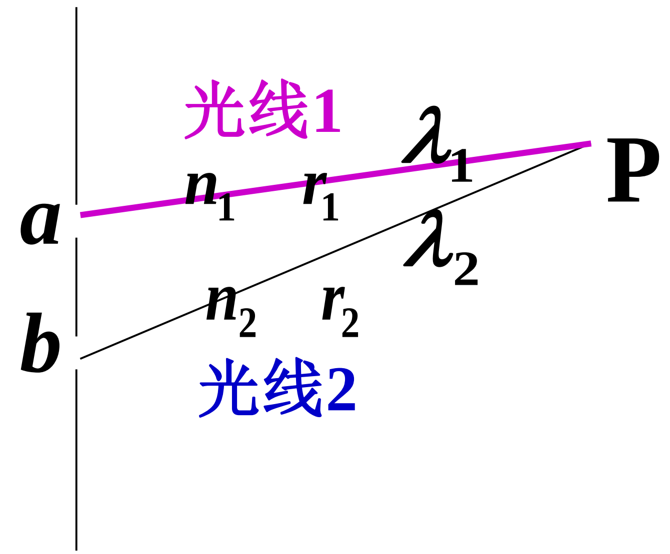
2）光路中引入透镜后对相位差有无影响？

3）光波在介质分界面差产生反射时，反射光的相位有没有变化？

§2 光程 薄透镜的等光程性 反射时的相位突变

一、光程与光程差

同相波源 $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$



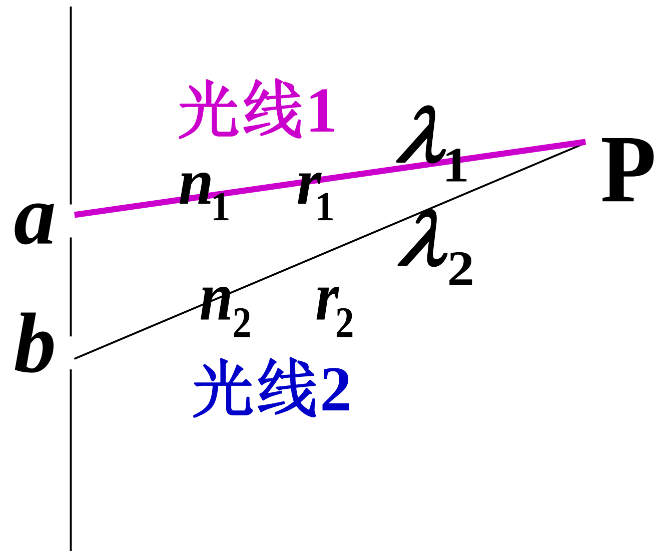
如果两波到达场点P的过程中经过的介质不同，则两相干光在P点的相位差：

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_2} - \frac{r_1}{\lambda_1}\right)$$

往往给出的是光在真空中的波长λ、光速 c。

光在真空中的波长λ与介质中的波长λ_n 的关系：？

光在**真空中**的波长λ、光速 c。进入折射率为 n 的介质中后，<u>频率不变</u>，波长变为λ_n，光速为 u，则有：



$$\boxed{n=\frac{c}{u}}=\frac{\lambda}{\lambda_n}\qquad \therefore \boxed{\lambda_n=\frac{\lambda}{n}}$$

$$\because \lambda_1=\frac{\lambda}{n_1},\qquad \lambda_2=\frac{\lambda}{n_2}$$

$$\Delta\varphi=2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_2}-\frac{r_1}{\lambda_1}\right)\qquad \boxed{\Delta\varphi=2\pi\left(\frac{n_2 r_2}{\lambda}-\frac{n_1 r_1}{\lambda}\right)}$$

1. 定义**光程:** 折射率与几何路程的乘积 nr

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_2} - \frac{r_1}{\lambda_1}\right)$$

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

光程的意义：光在折射率为 n 的介质中前进 r 路程引起的相位改变与在真空中前进 nr 距离的等效.

$$\frac{r}{u} = \frac{nr}{c}$$

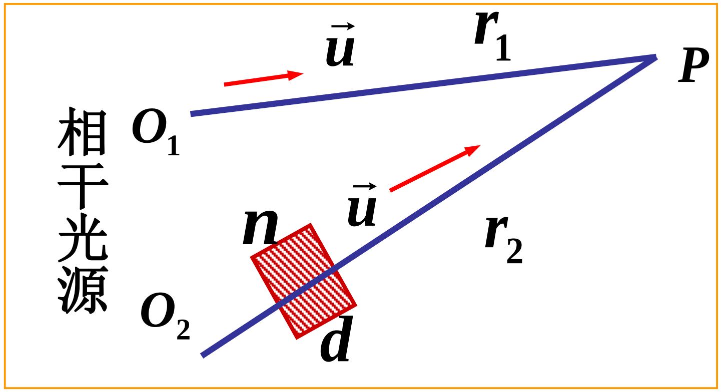
或：光在介质中的走过r路程的所用的时间，与光在真空中走过的几何路程为nr所用的时间相等。

光通过相等的光程，所需时间相同，位相改变也相同。

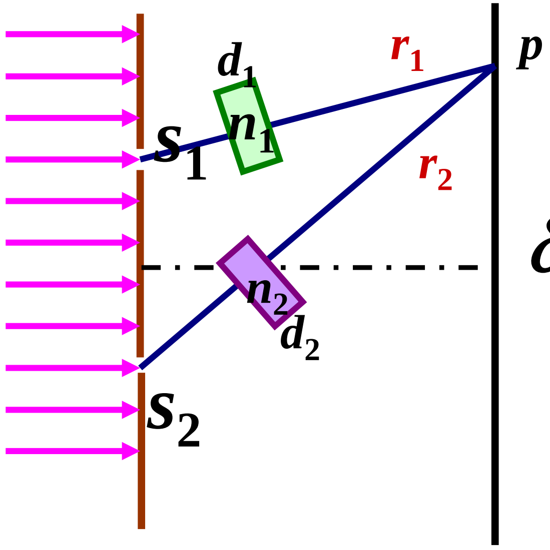
2. 光程差： $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$

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

例　如图，计算两波源发出的光经不同路径到达p点时的光程差。

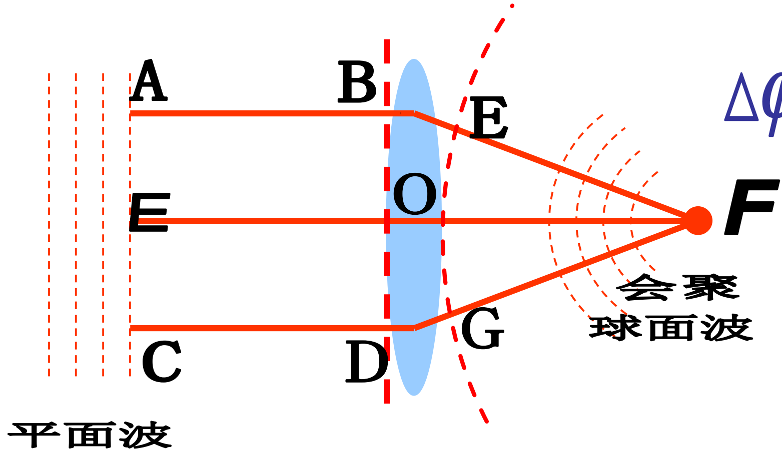


$$\delta = (r_2 - d + nd) - r_1$$



$$\delta = (r_2 - d_2 + n_2 d_2) - (r_1 - d_1 + n_1 d_1)$$

二、薄透镜不产生附加光程差

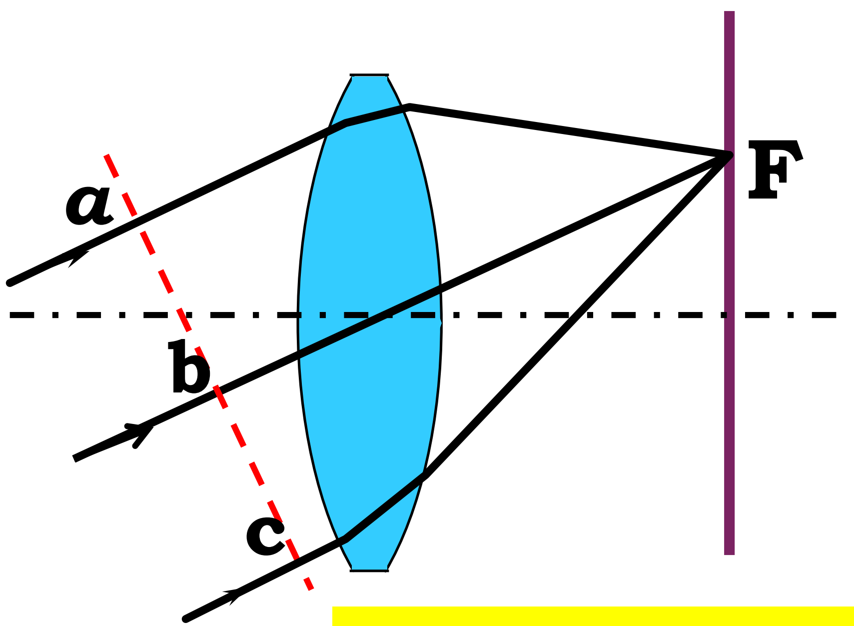


$\Delta\varphi = 0$

$\delta = 0$

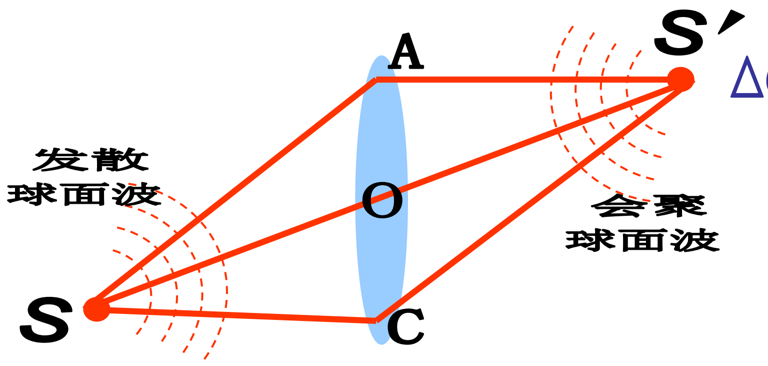
即各路等光程

$$L_{ABF} = L_{EOF} = L_{CDF}$$



BD波阵面上各点同相位。发出的子波经透镜后到**F**形成**亮点（同相位）**，说明各光线虽几何路程不等，但光程是相等的。

（无穷远处的）**物点**到**象点**各光线的光程相等



$\Delta\varphi = 0$　　$\delta = 0$

即各路等光程

$L_{SAS'} = L_{SOS'}$
$= L_{SCS'}$

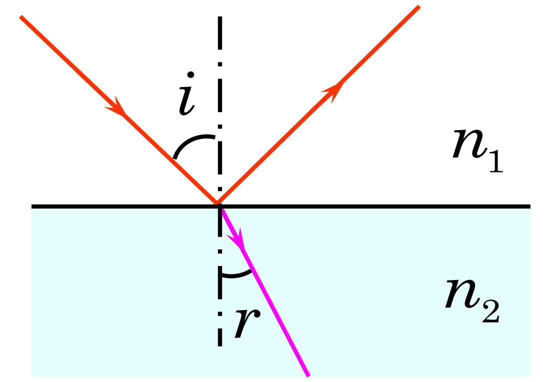
物点到象点各光线的光程相等

当用透镜或透镜组成的光学仪器观测干涉时

透镜的不会带来附加的光程差

三、半波损失和附加光程差

半波损失：光从光疏介质到光密介质反射时，入射光与反射光间有π的相位突变，即在反射过程中损失了半个波长的现象。折射光都无半波损失



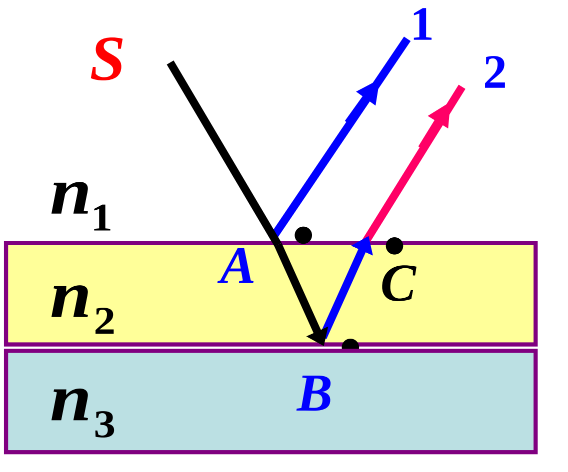
- $n_1 < n_2$ 反射光有半波损失。
- $n_1 > n_2$ 反射光没有半波损失。

※ $n_1 > n_2 > n_3$ 1,2都无半波损失

$n_1 < n_2 < n_3$ 1,2都有半波损失

※ $n_1 < n_2 > n_3$ 1有; 2无

$n_1 > n_2 < n_3$ •1无; 2有



研究光的干涉主要包含以下几个方面

- 实验装置 $\begin{cases}\text{分波阵面法}\\ \text{分振幅法}\end{cases}$
- 确定相干光束 求出光程差(相位差)
- 分析干涉花样 给出强度分布
- 应用及其它

§3 分波阵面法双光束干涉

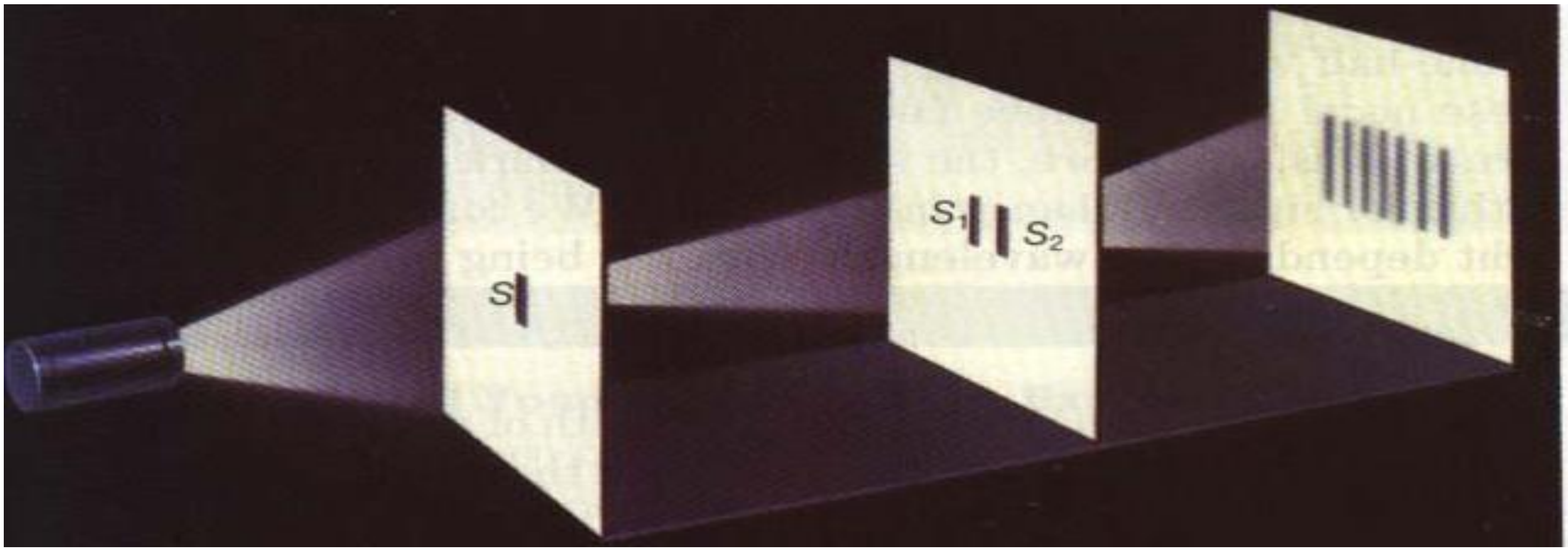
- 杨氏双缝干涉实验

英国医生兼物理学家托马斯-杨（T. Yang）于1801年首先成功地进行了光的干涉实验，看到了干涉条纹，并首次测量了光波的波长，使光的波动理论得到了证实。

- 其他分波振面法干涉
  - 菲涅尔双面镜
  - 菲涅尔双棱镜
  - 洛埃境

一、杨氏双缝干涉

1. 装置与现象

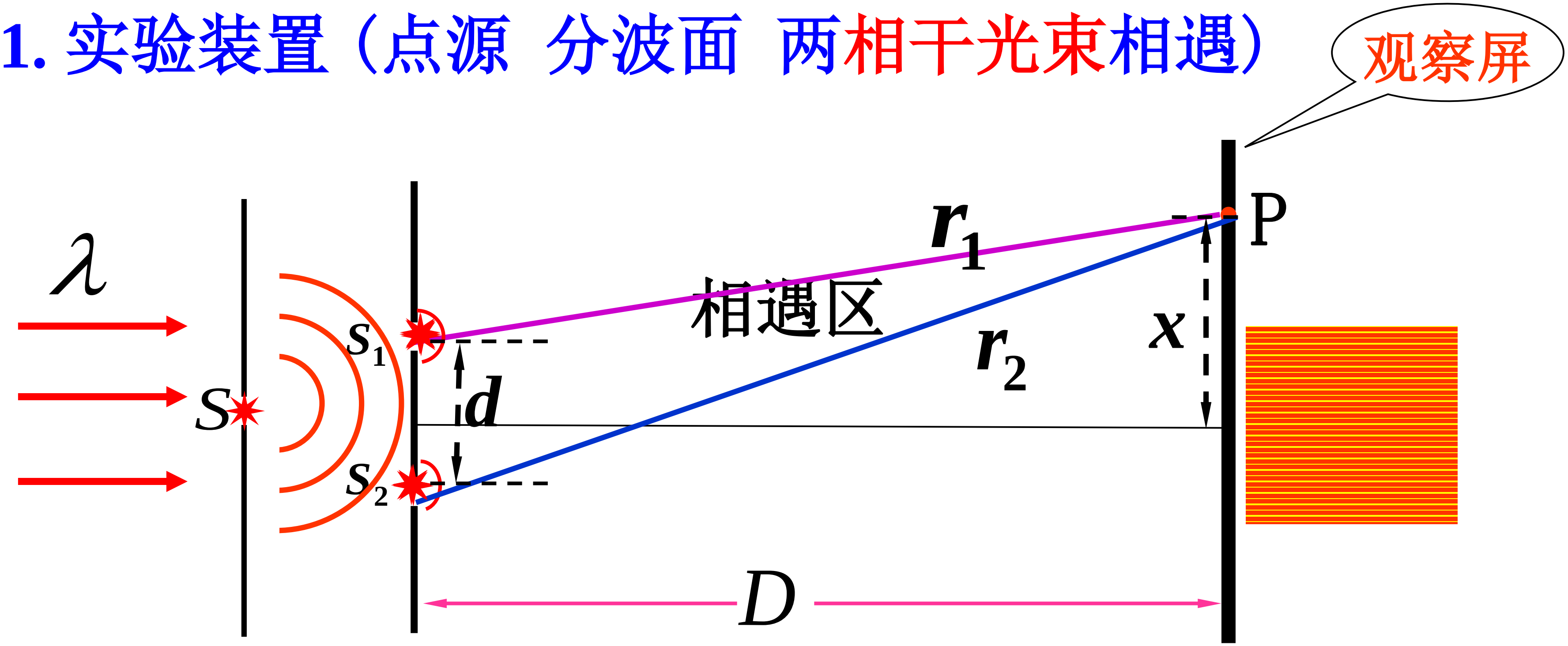


•普通单色平行光通过狭缝S；

•从S出射的光波透过S_1和S_2两狭缝，由惠更斯原理知，S_1和S_2可看成两个新的子波源，发出两列子波；

•两列波在空间重叠而产生干涉，屏幕上看观察到明暗相间的条纹。

1. 实验装置（点源 分波面 两相干光束相遇）

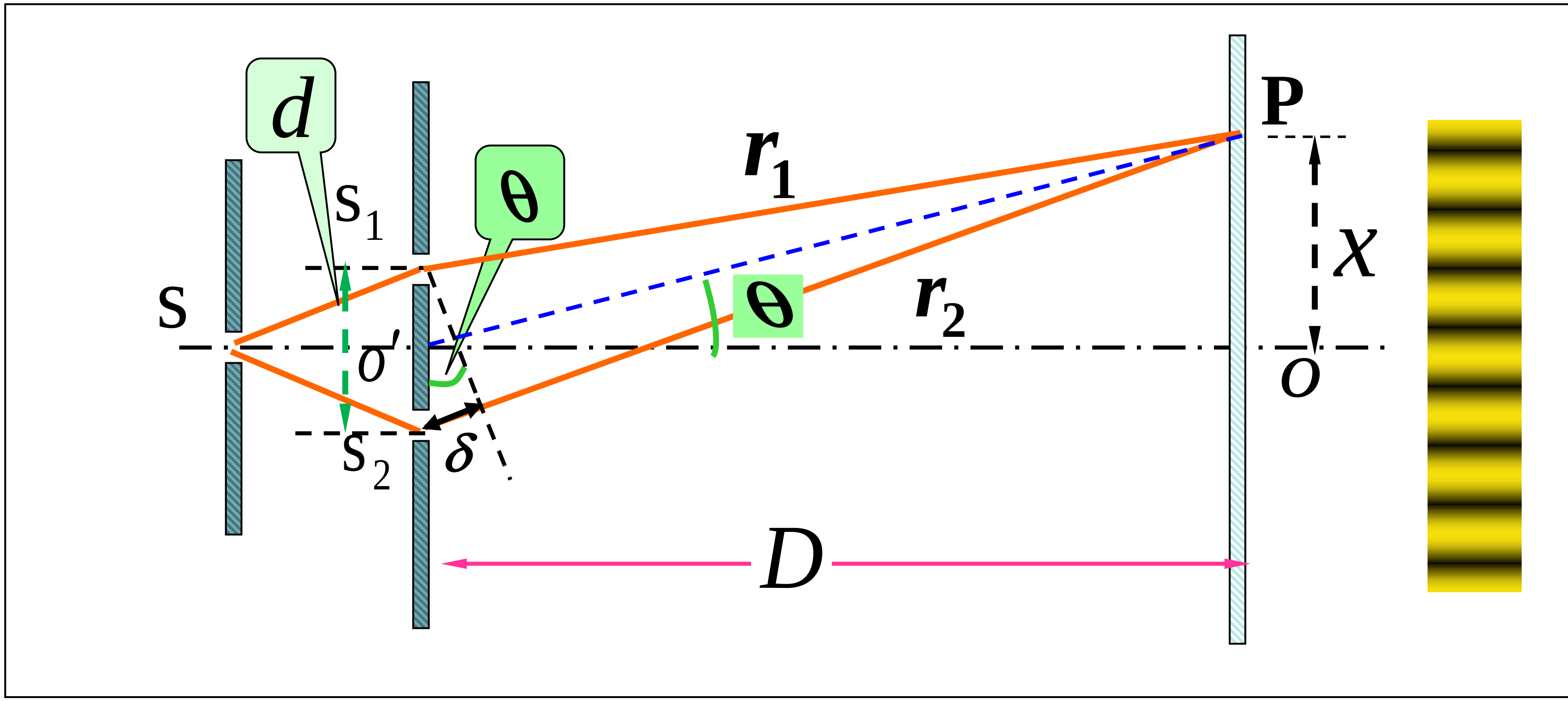


（d~ 10^{-4} m， D~1m）

$$d \ll D, x \ll D$$

2． 两束相干光在屏上叠加时的**强度分布**

2. 两束相干光在屏上叠加时的**强度分布**



$$\because d << D, x << D \quad \therefore \sin\theta \approx \tan\theta = x / D$$

光程差: $\delta = r_2 - r_1 \approx d\sin\theta = d\dfrac{x}{D}$

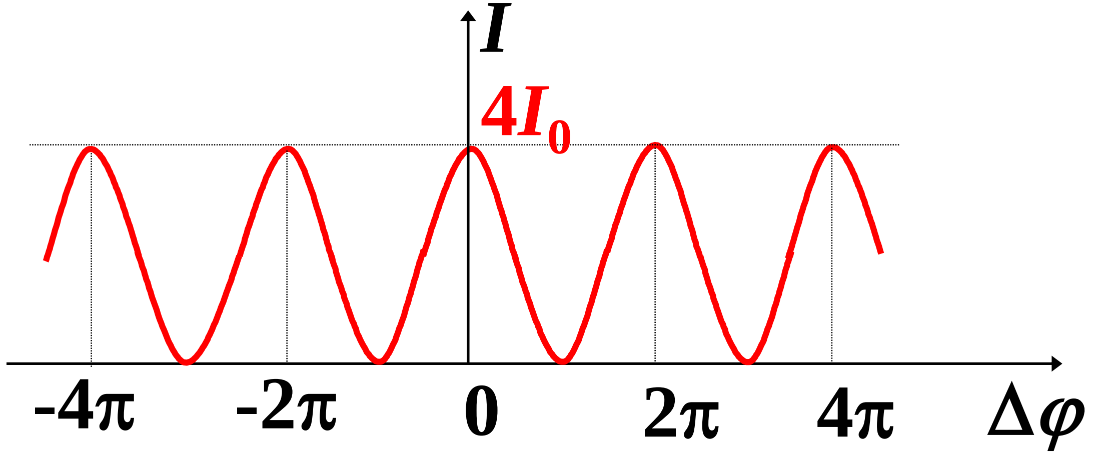
相位差: $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}\delta$

P点振幅 $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi$

P点光强： $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi$

若 $I_1 = I_2 = I_0$， 则 $I = 4I_0\cos^2\dfrac{\Delta\varphi}{2}$

明纹 $I_{max} = 4I_0$ 暗纹 $I_{min} = 0$



光强分布曲线

光程差: $\delta = \dfrac{dx}{D} = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{加强 明纹} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{减弱 暗纹} \end{cases} \quad k = 0,1,2,\cdots$

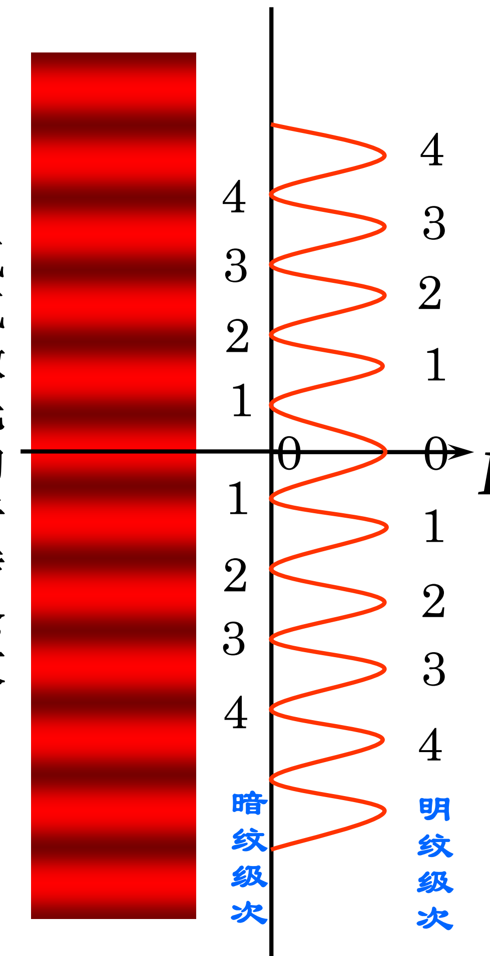
明纹中心: $x = \pm k\dfrac{D}{d}\lambda,\qquad k=0, 1, 2\ldots$

暗纹中心: $x = \pm(2k-1)\dfrac{D}{d}\dfrac{\lambda}{2},\ k= 1, 2\ldots$

条纹特点

①条纹间距: $\Delta x = \dfrac{D}{d}\lambda$

②干涉条纹明、暗相间，等间距，对称分布在中央明纹两侧。



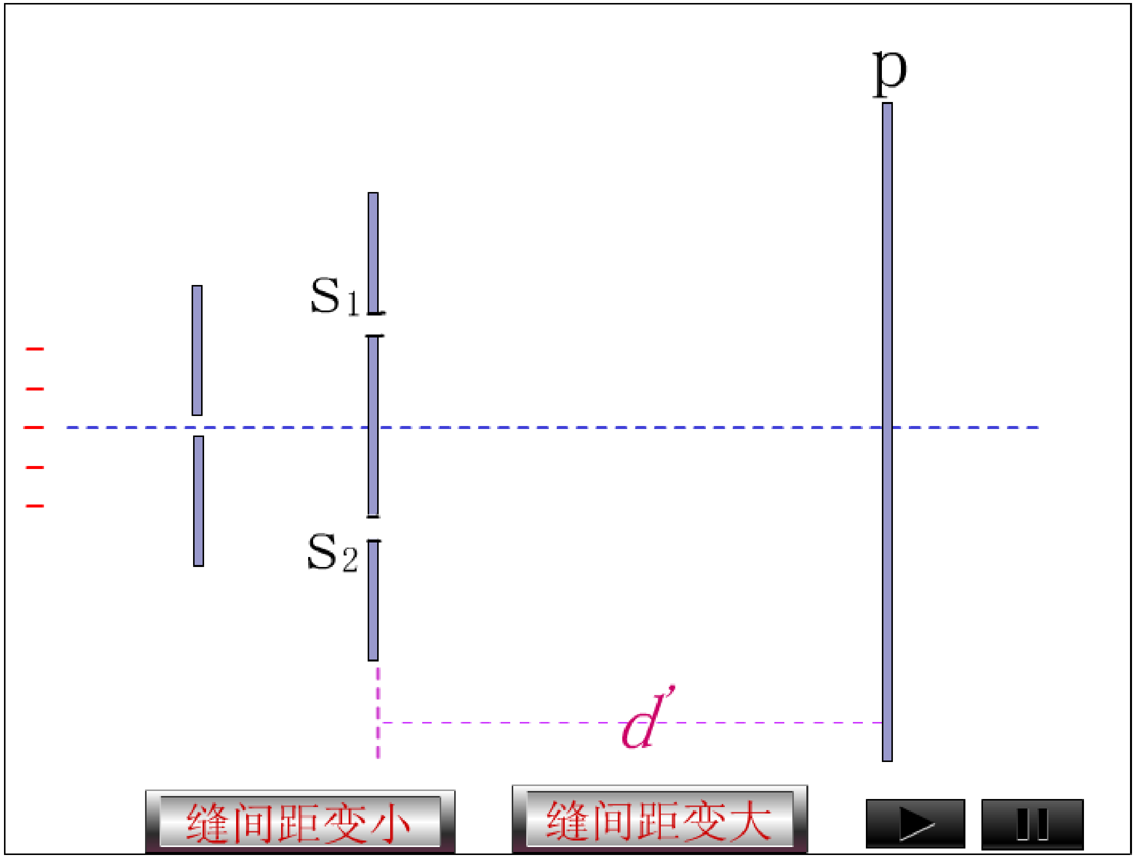
氦氖激光的干涉条纹


钠黄光产生的干涉条纹

讨论1：影响条纹的间距的因素：

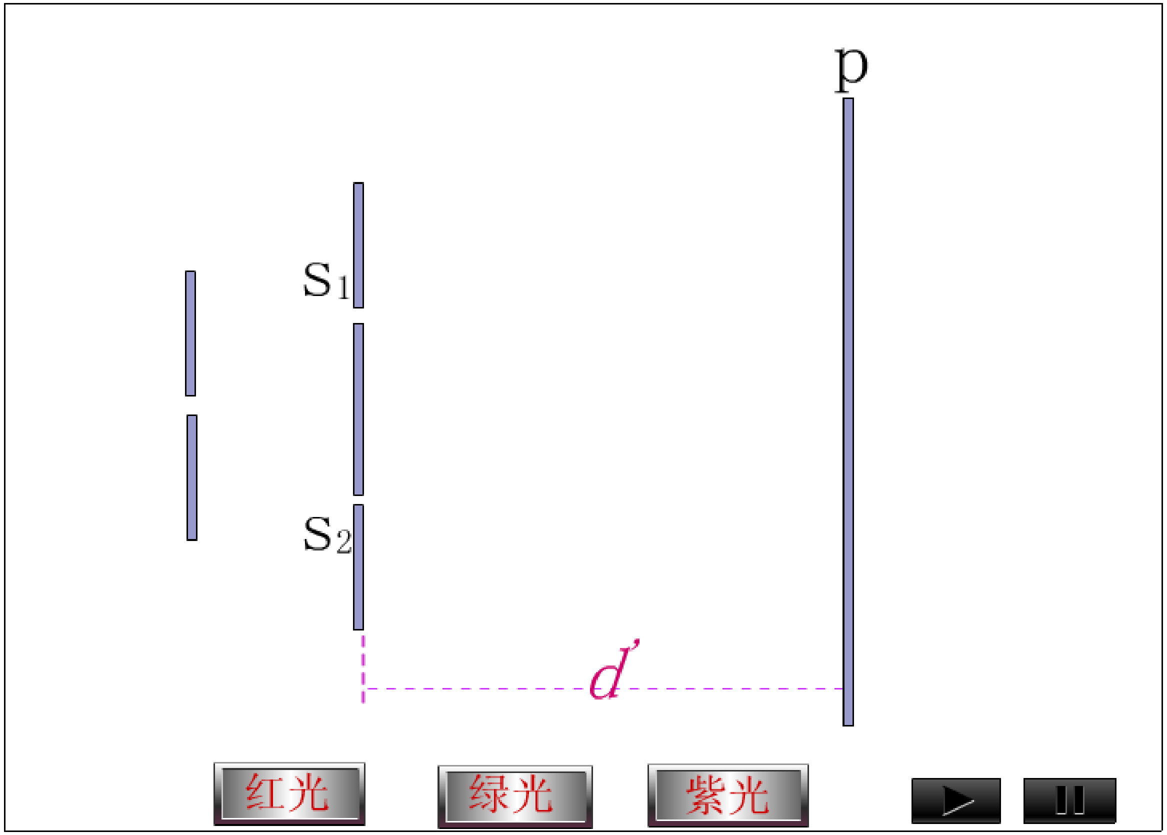
$$\Delta x = \frac{D}{d}\lambda$$

1）当D、λ一定时，Δx与d成反比，d越小，条纹分辨越清。



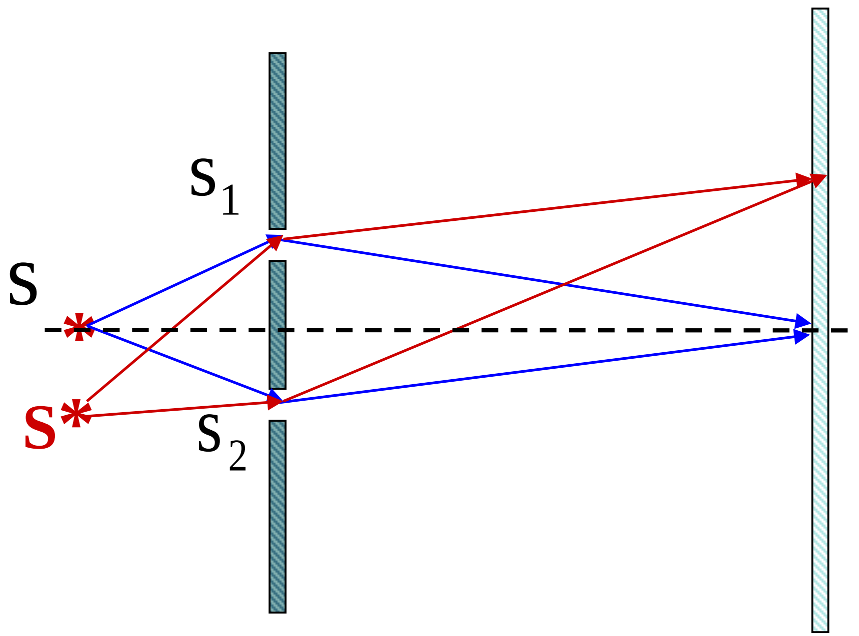
2）当D、d一定时，Δx与λ成正比.

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



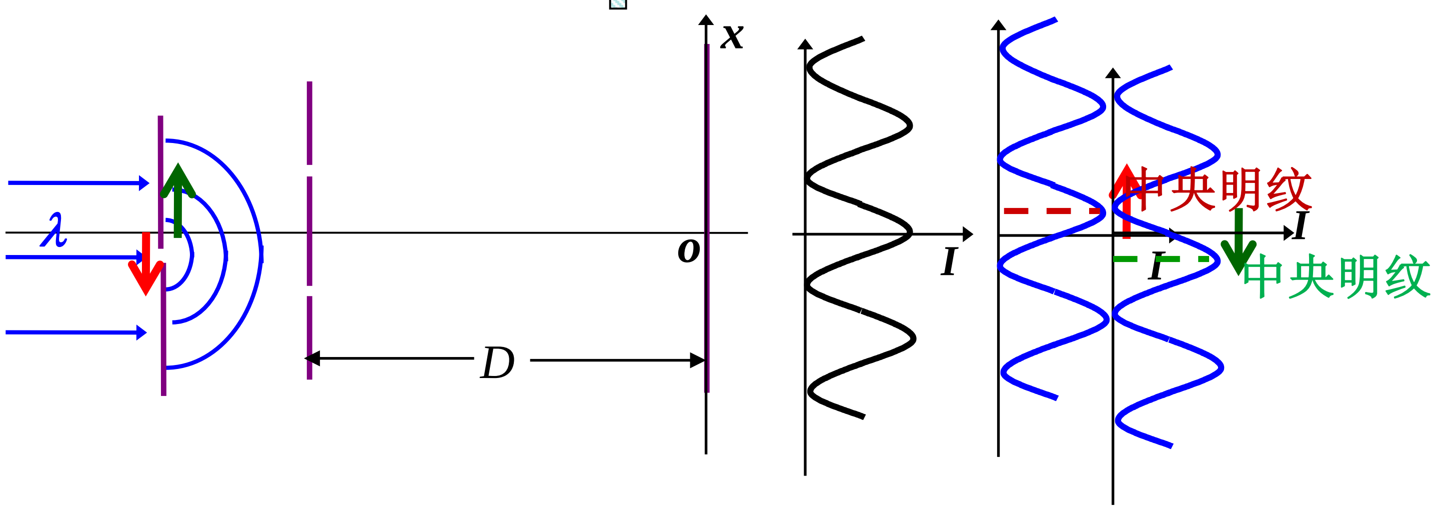
紫光比绿光、红光的条纹间距要小。

讨论2： 装置不对称对条纹影响

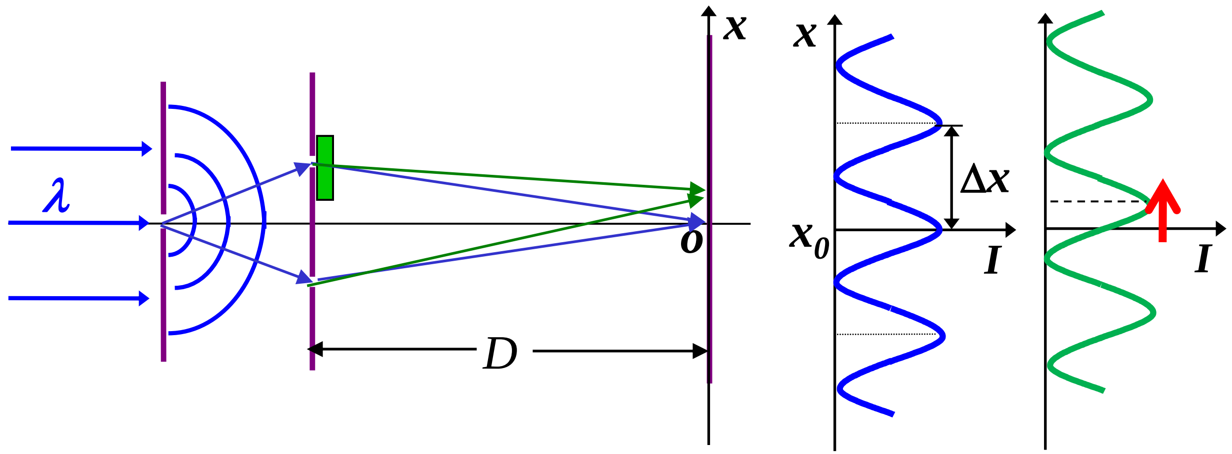


中央明纹 $\delta = 0$

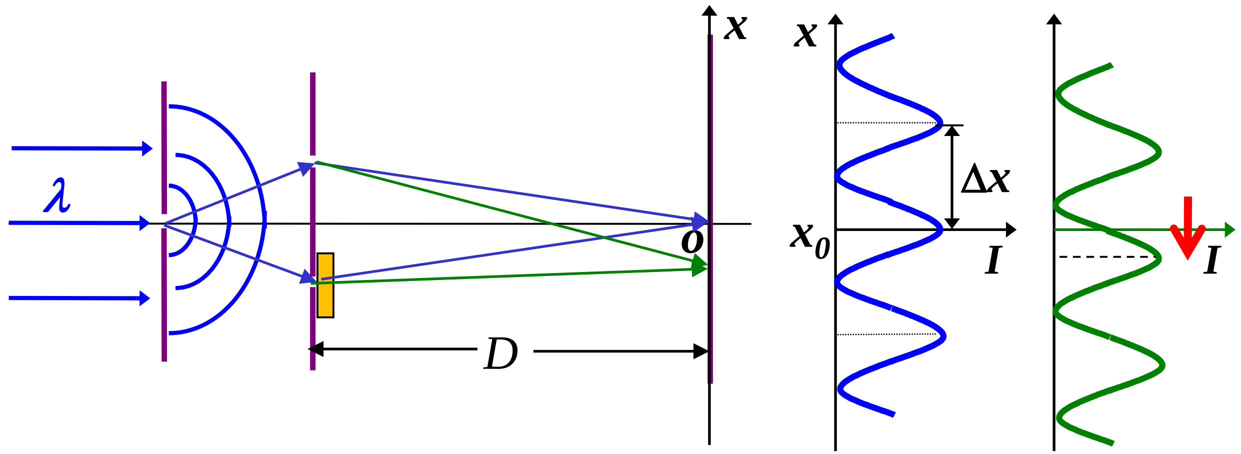
中央明纹: $\delta = L_2 - L_1 = 0$



讨论3　狭缝遮盖对条纹影响



中央明纹 $\delta = 0$



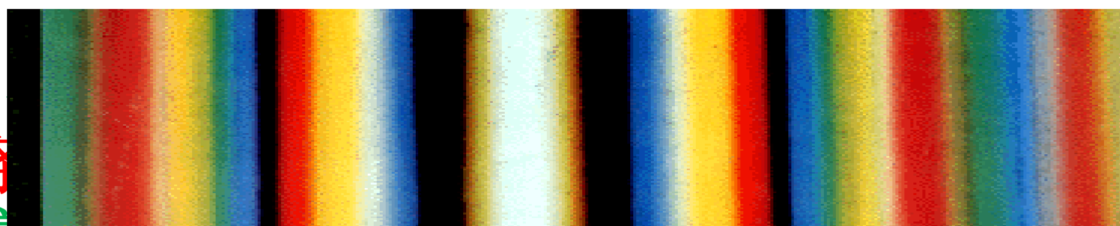
讨论4 复色光入射条纹特点

频率递增，波长递减

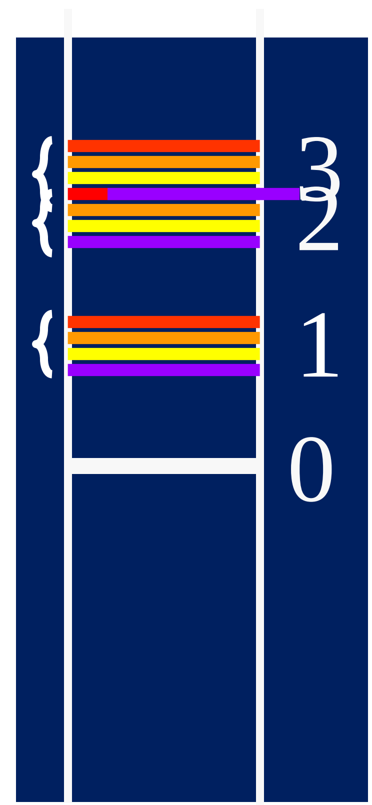
明条纹位置：$x=\pm k\dfrac{D}{d}\lambda$

红	橙	黄	绿	青	蓝	紫

例:用白光（390nm-750nm)作光源观察双缝干涉。设缝间距为d，试求能观察到的清晰可见光谱的级次。



白光入射的杨氏双缝干涉照片

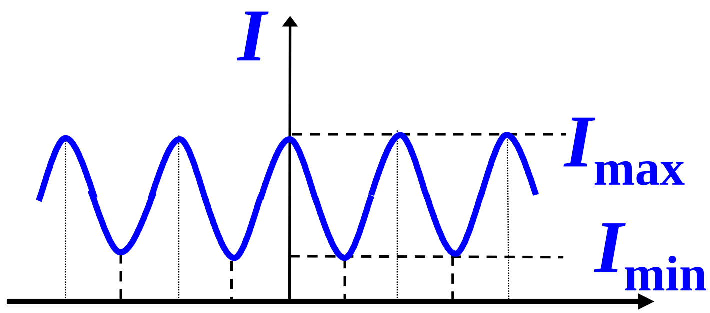


解：某一级的红光和高一级次的紫光最先发生重叠。 $k\lambda_{红}=(k+1)\lambda_{紫}$

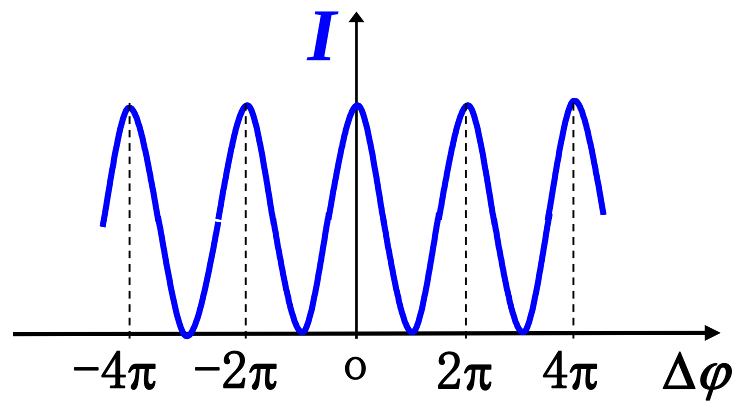
$$\Rightarrow k=\frac{\lambda_{紫}}{\lambda_{红}-\lambda_{紫}}=\frac{390}{750-390}=1.08$$

清晰的可见光谱只有一级

讨论5　缝宽（光源的宽度）、光源的单色性、光束强度比（两缝宽度比）对干涉条纹的影响



对比度差 $(V < 1)$



对比度好 $(V = 1)$

条纹对比度：

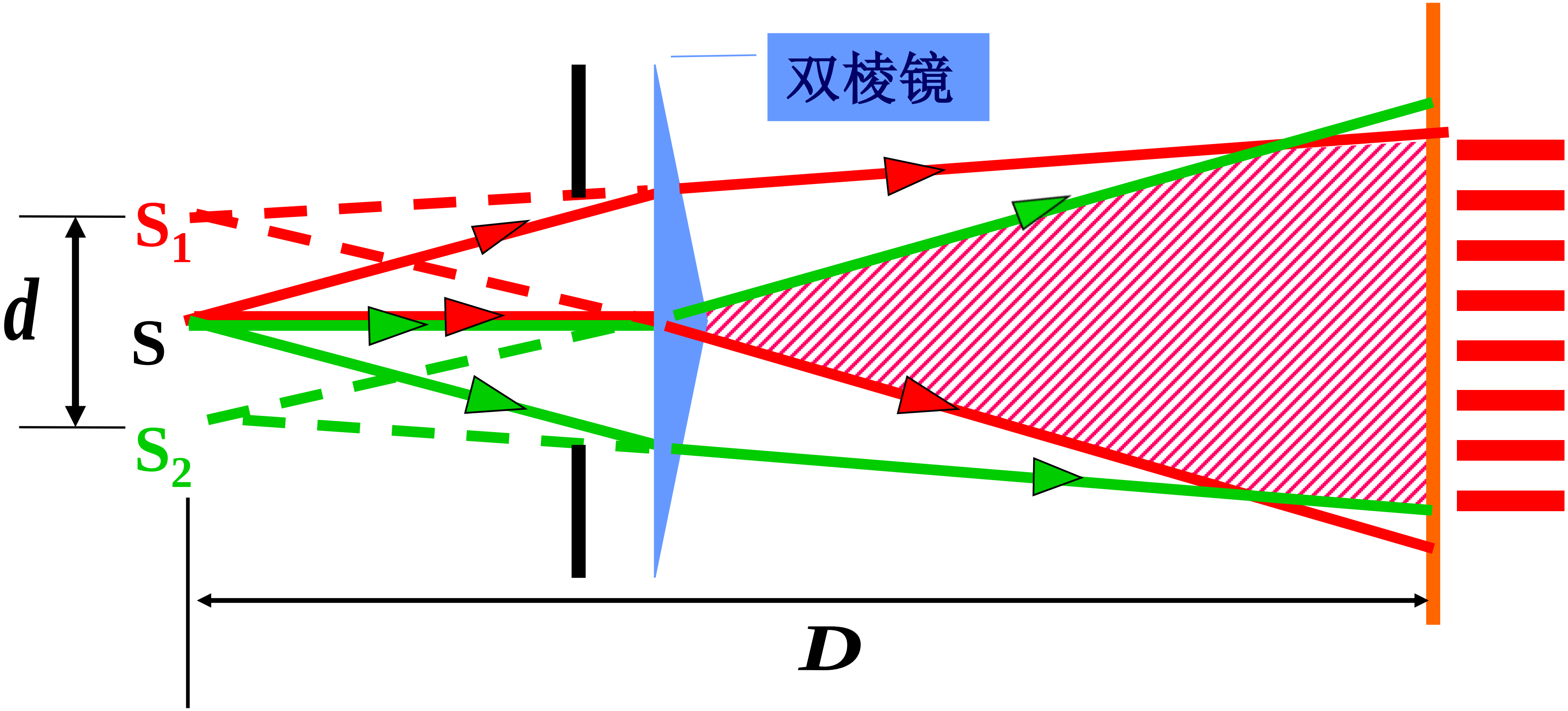
$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

决定对比度的因素：

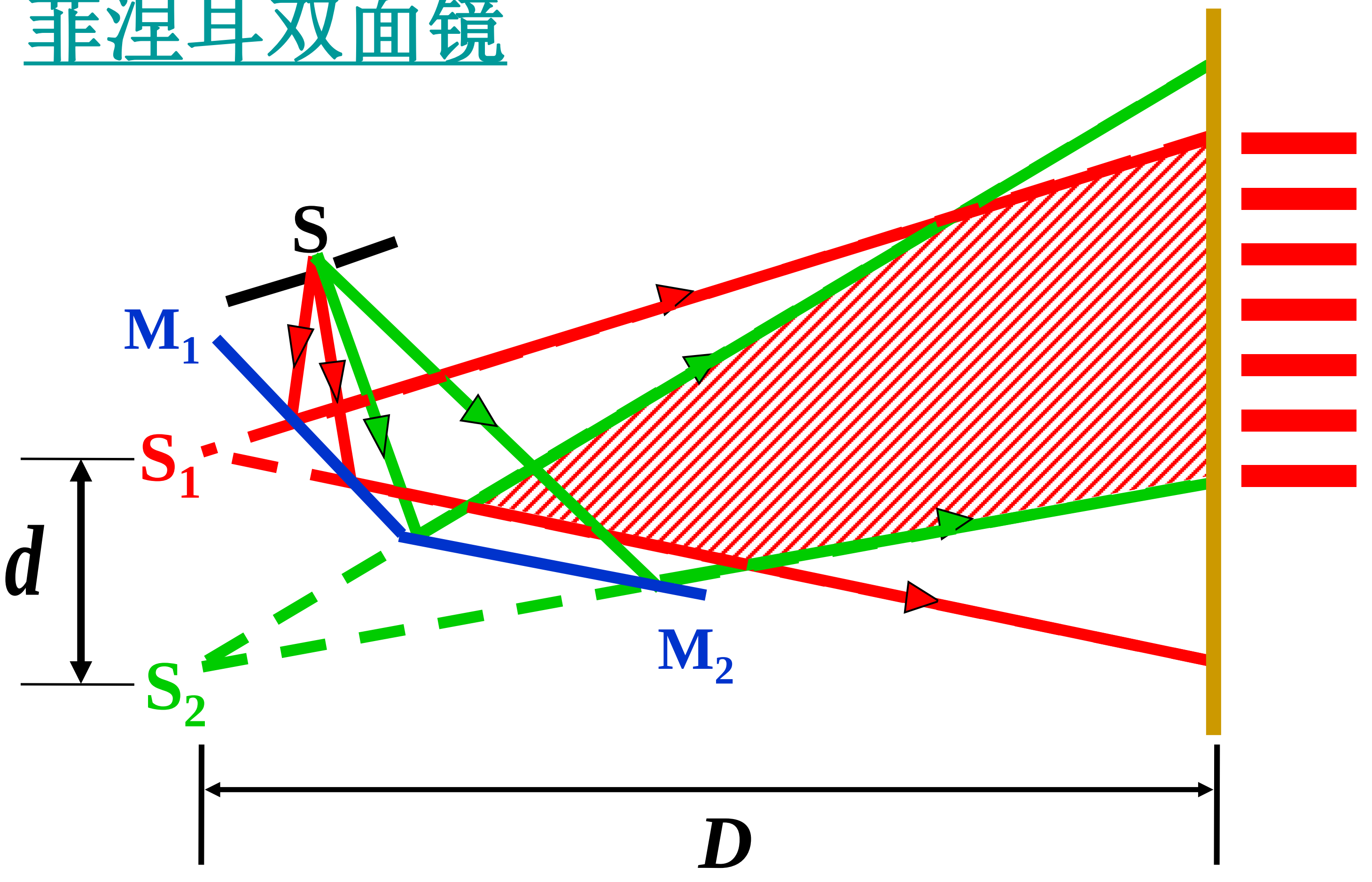
光源的单色性	光源的宽度	光束比
单色性越好，形成的条纹越细	需要点光源	要求缝宽相等
		缝宽不同？

二、其他分波面法干涉实验

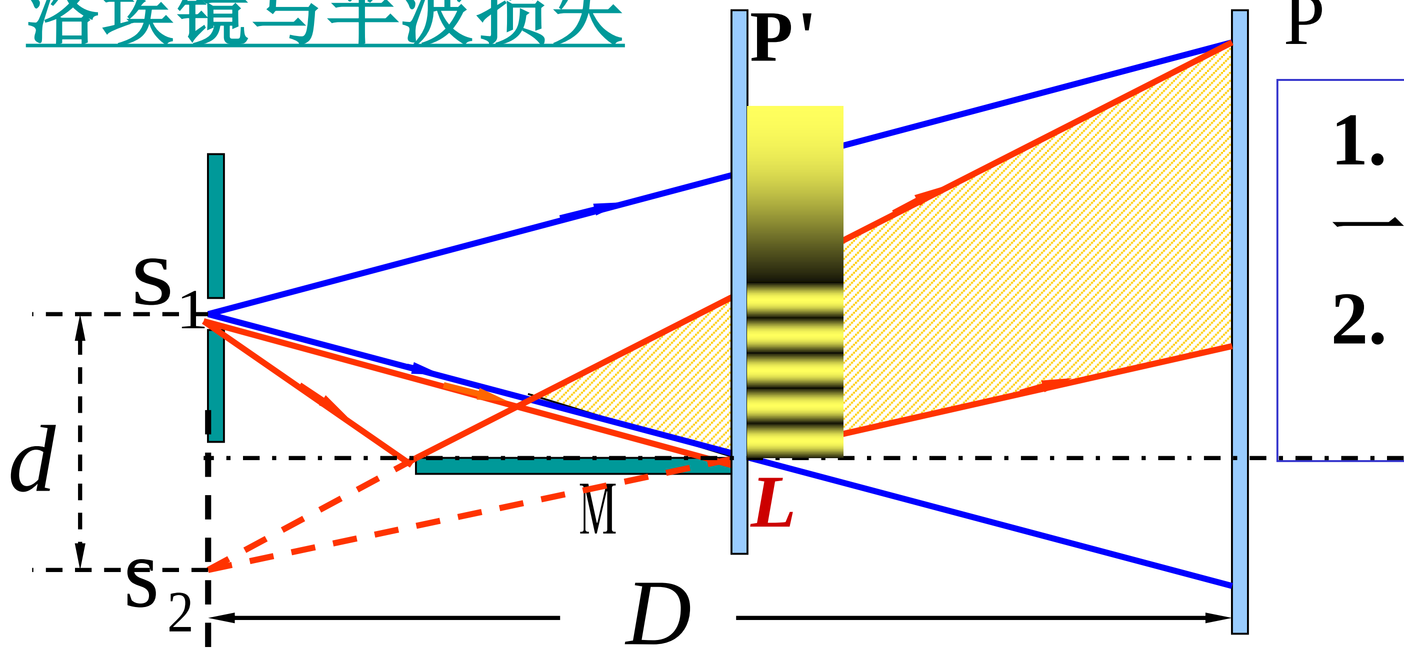
菲涅耳双棱镜



菲涅耳双面镜



洛埃镜与半波损失



1. 只在镜的一侧有条纹
2. 镜边缘处为暗纹

如把屏紧靠镜端L，在L点因有$s_2L=s_1L$，似乎L点应是亮点，但实验给出L点却是暗点。

当光从光疏（n小）射向光密媒质（n大）在界面上反射时有半波损失

此处 $\delta = d\sin\theta + \dfrac{\lambda}{2}$ 或 $\dfrac{d}{D}x + \dfrac{\lambda}{2}$

例. 在图示的双缝干涉实验中，若用分别折射率为$n_1=1.4$和$n_2=1.7$的玻璃片覆盖缝S_1 和缝 S_2 ，将使屏上原来覆盖玻璃片时的中央明条纹所在处变为第五级明纹。设照射的单色光波长$\lambda=480\text{nm}$ ，求玻璃片的厚度d（可认为光线垂直穿过玻璃片）。

解：原中央明条处

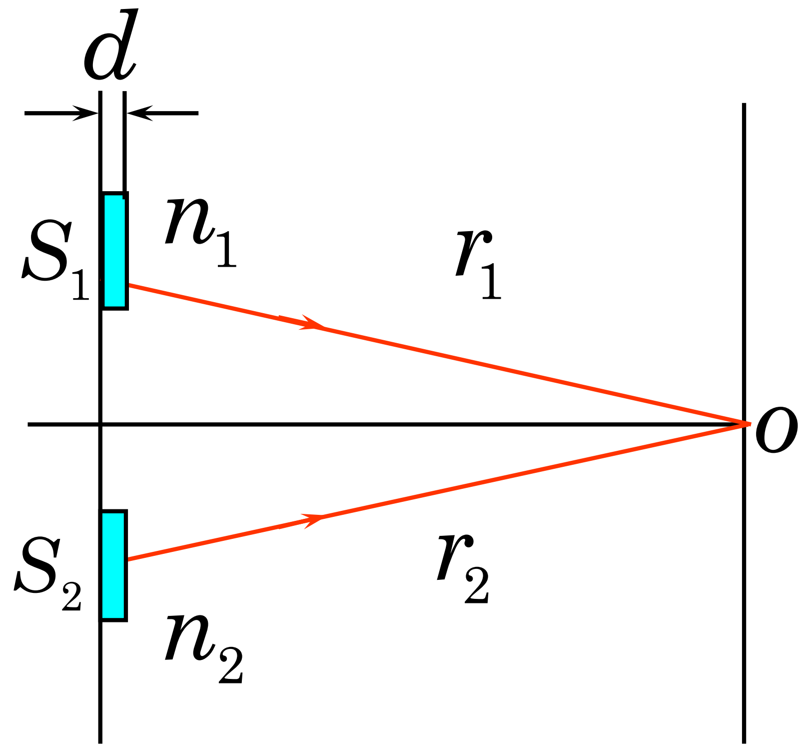
$$\delta = r_2 - r_1 = 0$$

覆盖玻璃后，

$$\delta' = (r_2 - d + n_2 d) - (r_1 - d + n_1 d)$$

$$= (n_2 - n_1)d = 5\lambda$$

$$\therefore d = \frac{5\lambda}{n_2 - n_1} = 8.0\times10^{-6}\text{m}$$



例：在双缝干涉实验中，波长 $\lambda=550\text{nm}$ 的单色平行光垂直入射到缝间距 $d=2\times10^{-4}\,\text{m}$ 的双缝上，屏到双缝的距离 $D=2\text{m}$.（ $1\text{nm}=10^{-9}\,\text{m}$ ） 求：

（1）中央明纹两侧的两条第10级明纹中心的间距；

（2）用一厚度为 $e_1=8.6\times10^{-6}\,\text{m}$ 的玻璃片覆盖一缝，使用厚度为 $e_2=2\times10^{-6}\,\text{m}$ 的玻璃片覆盖另一缝，两个薄膜的折射率均为 $n=1.58$，零级明纹将移到原来的第几级明纹处？

解：（1） $\Delta x=\quad D\lambda/d$ ＝0.11m

（2）覆盖玻璃后，零级明纹应满足

$$\left.\begin{array}{c}(n-1)e_1+r_1=(n-1)e_2+r_2\\ \text{设此点为不盖玻璃片时的第}k\text{级明纹，}\\ \text{则应有：}r_2-r_1=k\lambda\end{array}\right\}(n-1)\triangle e=k\lambda$$

$$k=(n-1)\triangle e/\lambda=6.96\approx7$$

零级明纹移到原第7级明纹处