22. 干涉

22.1 光的相干性

22.2 双缝干涉及其他分波面干涉实验

22.3 时间相干性

22.4 空间相干性

22.5 光程

22.6 薄膜干涉（一） — 等厚条纹

22.7 薄膜干涉（二） — 等倾条纹

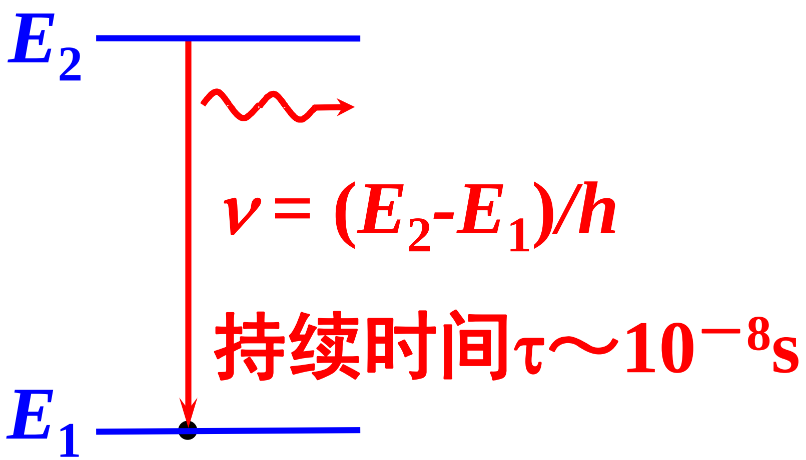
22.8 迈克耳孙干涉仪

22.1 光的相干性

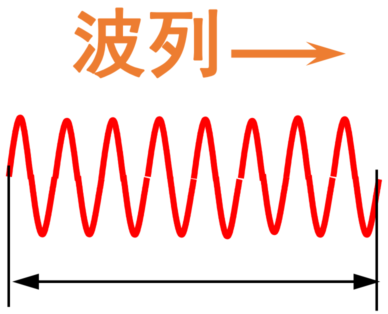
一、光源（light source）

光源发光是大量原子、分子的微观过程。

能级、跃迁、辐射、波列

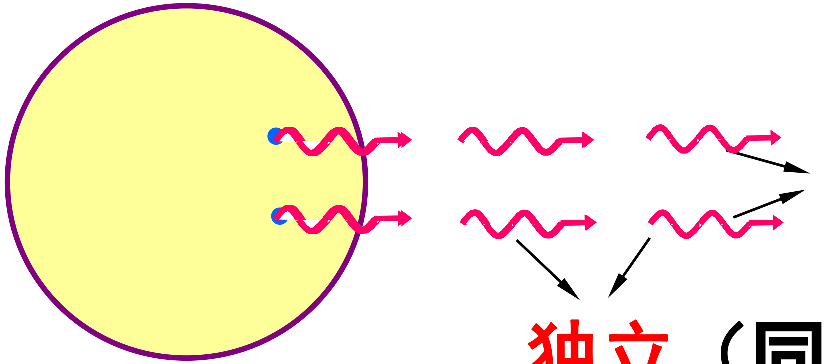


能级跃迁辐射



波列长 $L = \tau c$

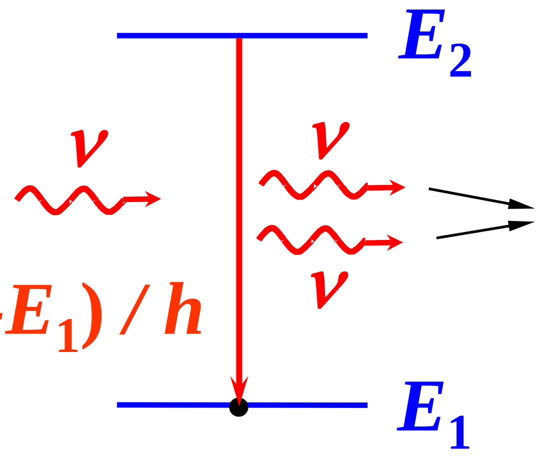
1、普通光源：自发辐射



独立（不同原子发的光）

独立（同一原子先后发的光）

2、激光光源：受激辐射



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

完全一样（传播方向，频率，相位，振动方向）

二、光的相干性

$$I = \left| \overline{\vec{E} \times \vec{H}} \right|$$ （对时间平均）

现 $\vec{E} \perp \vec{H}$，$B = \dfrac{n}{c} E$，光频 $B = \mu_0 H$，得

$$I = \frac{n}{c\mu_0} \overline{\vec{E}^2} = nc\varepsilon_0 \overline{\vec{E}^2}$$

1、两列光波的叠加

两束光叠加，相干和不相干

$\vec{E}_1(P,t)$，$\vec{E}_2(P,t)$。 在交叠区域 $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

$$I = nc\varepsilon_0 \overline{\vec{E}^2} = nc\varepsilon_0 \overline{(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)\cdot(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)}$$

$$= nc\varepsilon_0 (\overline{\vec{E}_1^2} + \overline{\vec{E}_2^2} + 2\overline{\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2})$$

记为 $I = I_1 + I_2 + I_{12}$

I_1、I_2分别是二光各自单独存在时的光强，

$I_{12} = 2nc\varepsilon_0 \overline{\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2}$ 叫做干涉项 (可正可负)

若 各处都有 $I_{12} = 0$，则 $I = I_1 + I_2$，不发生干涉。

若 $I_{12} \neq 0$，则 $I \neq I_1 + I_2$，干涉 。

关于 干涉条件：

- 假如各处 $\vec{E}_1 \perp \vec{E}_2$，则 $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = 0$，不能干涉。

以后讨论的多数情形有 (或近似有) $\vec{E}_1 \parallel \vec{E}_2$ ，合成时可当作标量波处理。

- 设为简谐波，但频率不同。当作标量波，

$$E_1 = A_1\cos(\omega_1 t - k_1 r_1 - \varphi_{10})$$

$$E_2 = A_2\cos(\omega_2 t - k_2 r_2 - \varphi_{20})$$

长时间内 $\overline{E_1 E_2} = 0$ 。 $\therefore$ 频率不同的两光不能干涉。

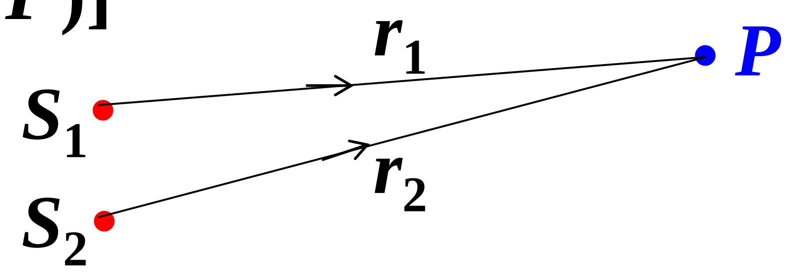
- 设同频率

$A_1(P)$

$$E_1(P,t) = A_1\cos[\omega t - \varphi_1(P)]$$

$$E_2(P,t) = A_2\cos[\omega t - \varphi_2(P)]$$

$$\begin{cases}\varphi_1(P) = k r_1 + \varphi_{10} \\ \varphi_2(P) = k r_2 + \varphi_{20}\end{cases}$$



振动合成， $E = E_1 + E_2 = A\cos[\omega t - \varphi(P)]$

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

$$\Delta\varphi = \varphi_1(P) - \varphi_2(P)$$

$$I = I_1 + I_2 + \underbrace{2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi}_{\text{干涉项}}$$

可当作标量波时，两列同频率的简谐波(理想单色波)总能干涉。但是，实际光波不是理想单色波。

普通光源，发光机制， 随机过程，

一原子一次发光持续时间 $\leq 10^{-8}$ s ，一束光是大量原子发的光的总合，维持确定初相的时间 $\leq 10^{-8}$ s 。

实际光波的振幅、相位都迅速随机改变。

简化模型：

振幅稳定，

相位随机迅变 (取$0-2\pi$间各值机会均等)。

二独立光源 S_1、S_2， φ_{10} 和 φ_{20} 无联系，于是 $\Delta\varphi$ 在观测时间内随机改变了很多很多次，使得

$\overline{\cos\Delta\varphi} = 0$ ， $I = I_1 + I_2$ ， 不发生干涉。

两束准单色光，同频率：

(完全) 有确定的相位关系，

称为 相干的 (coherent)

如果振动方向相同，可按标量波处理，就有

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

- 相干叠加

相位差极度混乱 (随机迅变)

不相干的 (incoherent)

$$I = I_1 + I_2$$

- 非相干叠加

- 实际上有时介于相干与不相干之间，称为部分相干。

产生干涉的必要条件

- 频率相同
- 存在相互平行的振动分量
- 相位差稳定

非相干光： $\overline{\cos\Delta\varphi}=0$

$I=I_1+I_2$ —非相干叠加

完全相干光： $\overline{\cos\Delta\varphi}=\cos\Delta\varphi$

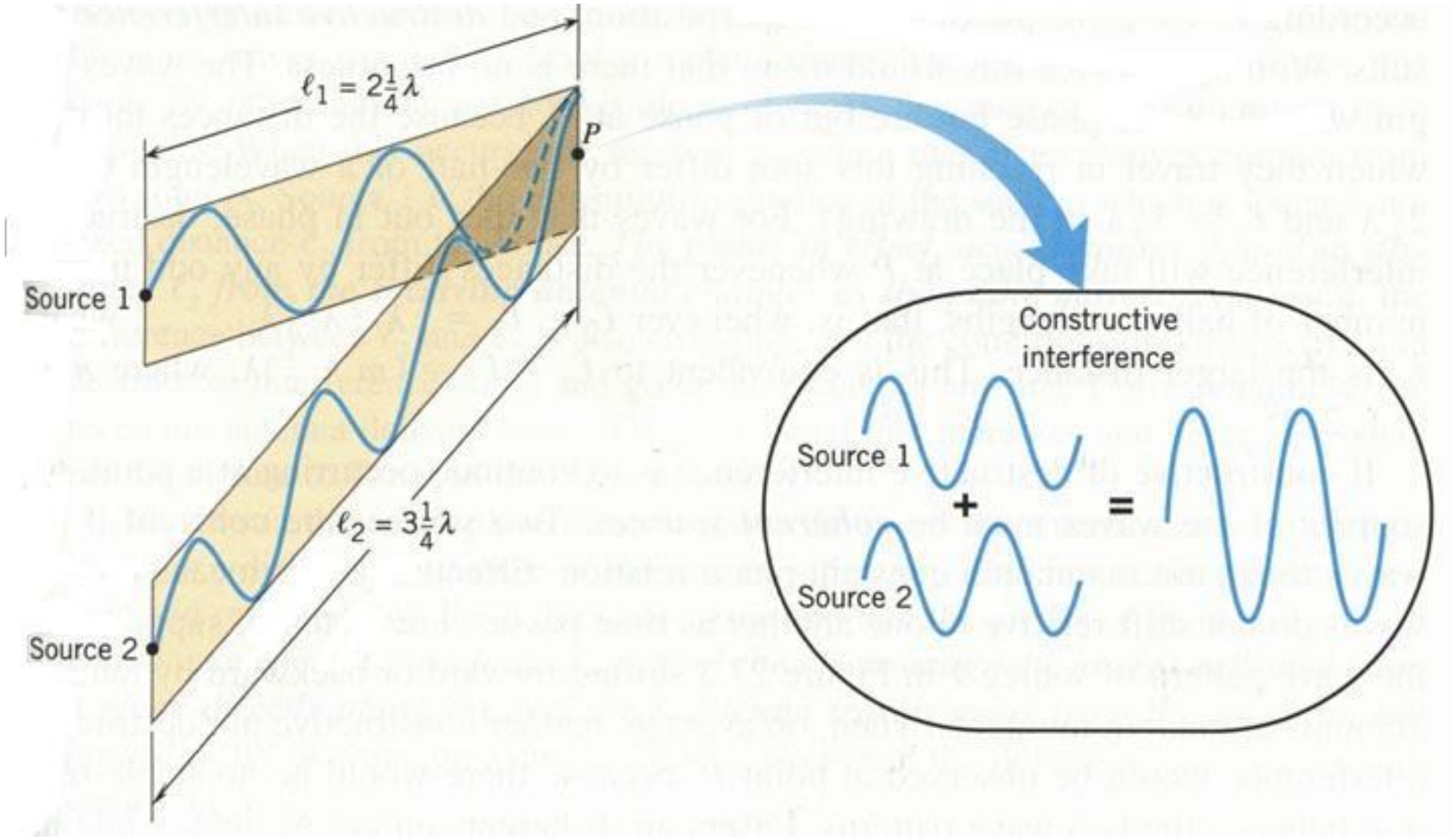
●相长干涉（明） $\Delta\varphi=\pm 2k\pi$，（$k=0,1,2\ldots$）

$$I=I_{\max}=I_1+I_2+2\sqrt{I_1 I_2}$$

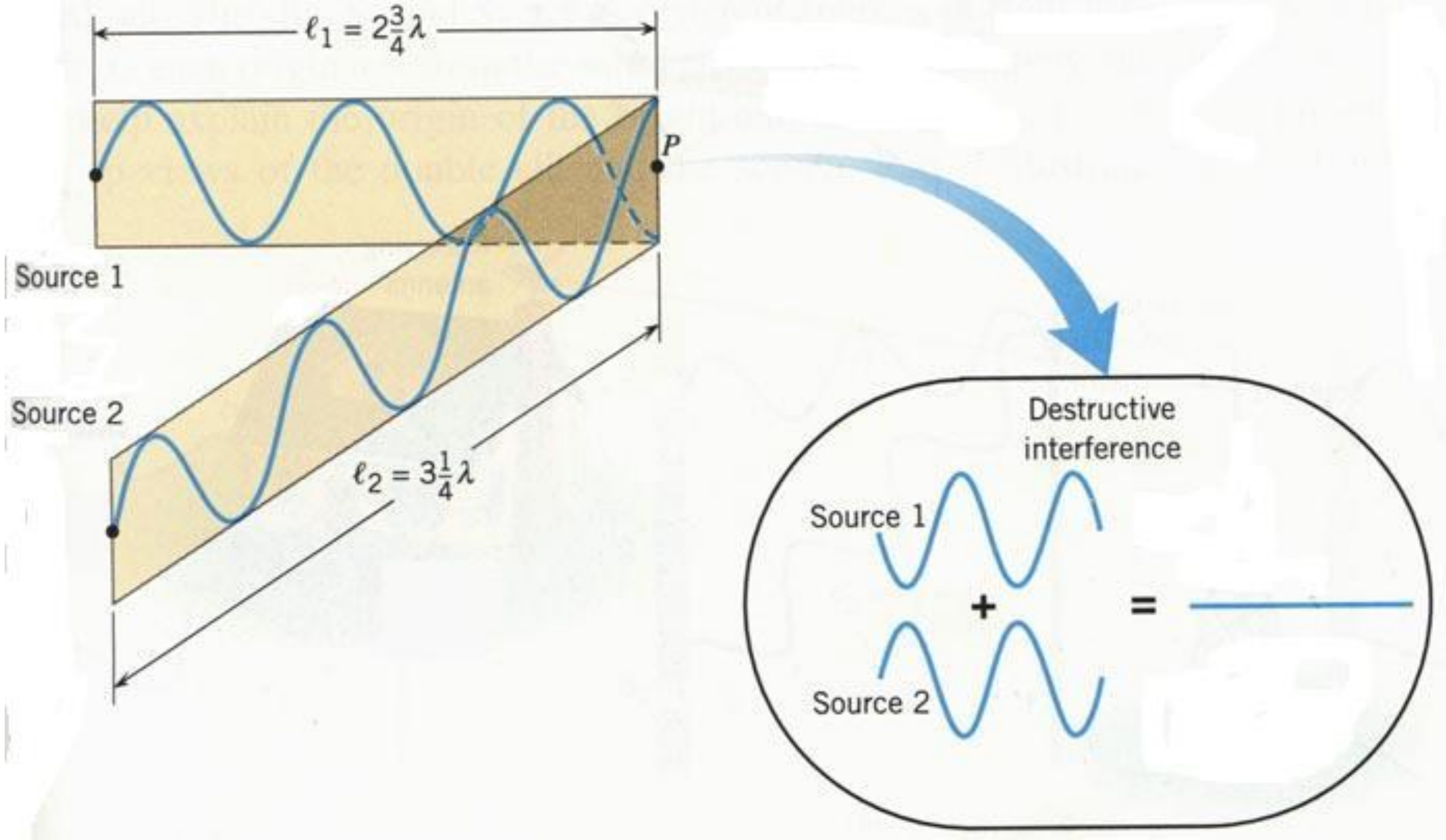
●相消干涉（暗） $\Delta\varphi=\pm(2k+1)\pi,(k=0,1,2\ldots)$

$$I=I_{\min}=I_1+I_2-2\sqrt{I_1 I_2}$$

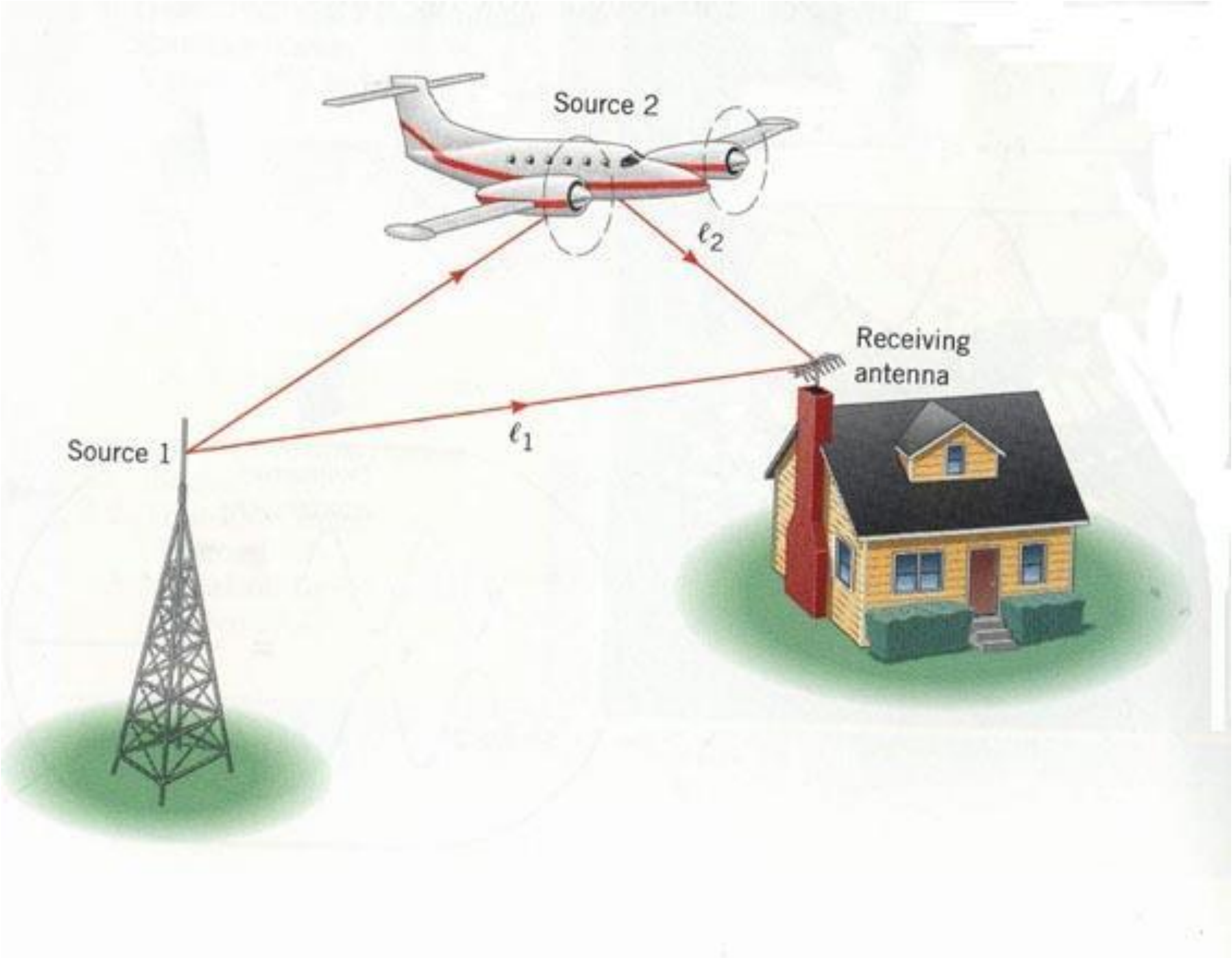
干涉相长 Constructive interference



干涉相消 Destructive interference

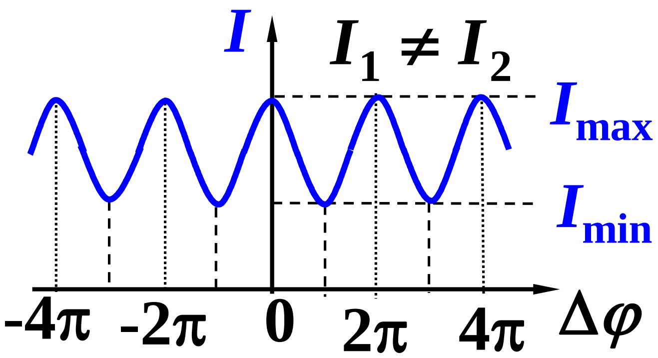


电磁波的干涉 **Fluttering TV pictures**

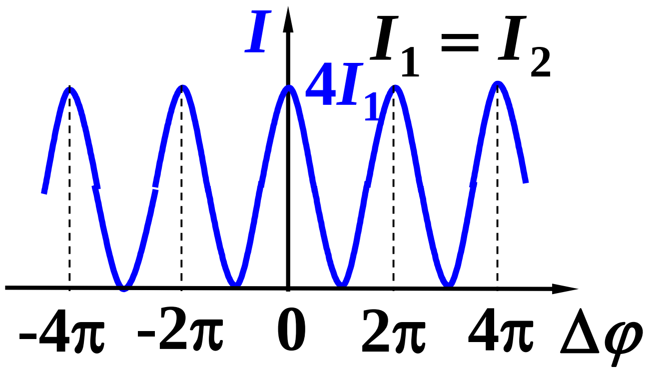


2、条纹衬比度（对比度，反衬度，contrast）

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



衬比度差（$V < 1$）



衬比度好（$V = 1$）

决定衬比度的因素：

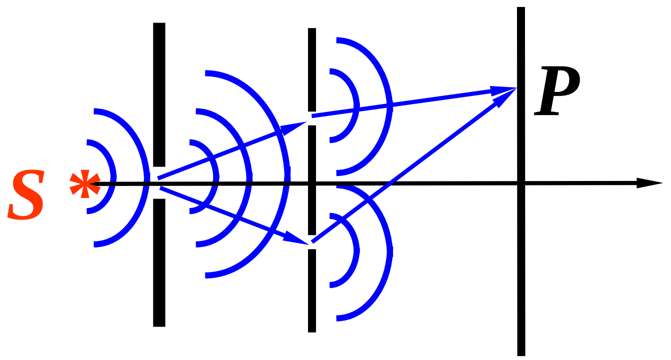
振幅比，光源的单色性，光源的宽度

干涉条纹可反映光的全部信息（强度，相位）

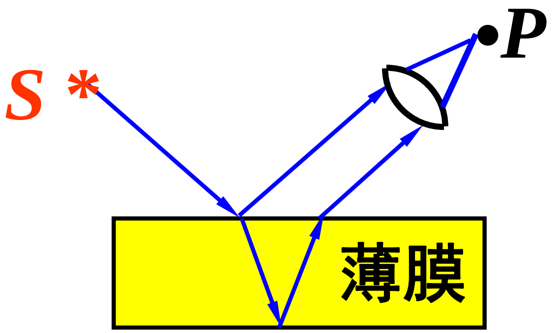
3、由普通光源获得相干光的途径

为了有稳定的 相位差 ，应从同一 点光源发的光分出二束，经不同路径后再相遇而叠加。常见的有两种方法：

分波面法：



分振幅法：

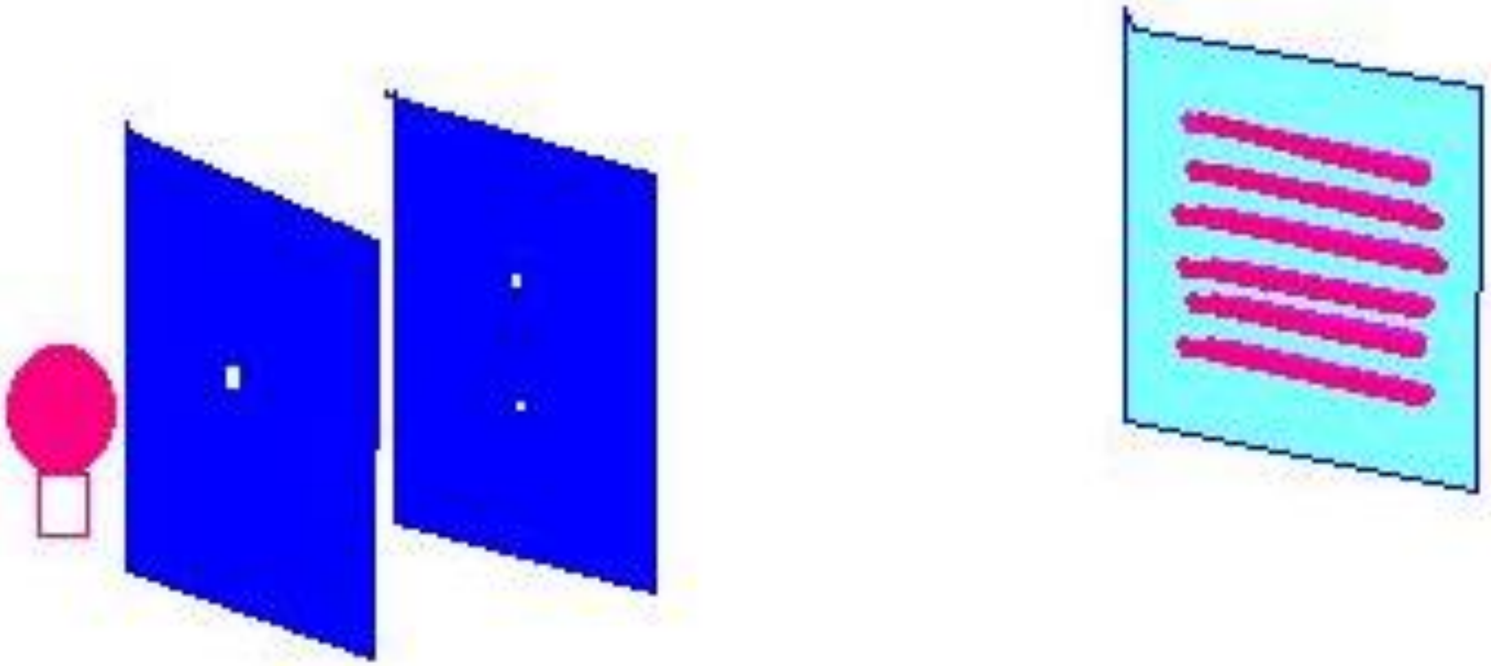


两束相干光在 P 点相干叠加

22.2 双缝干涉及其他分波面干涉实验

杨氏实验

1801年， T. Young （1773-1829）



两个点源的干涉

两列球面波的干涉场

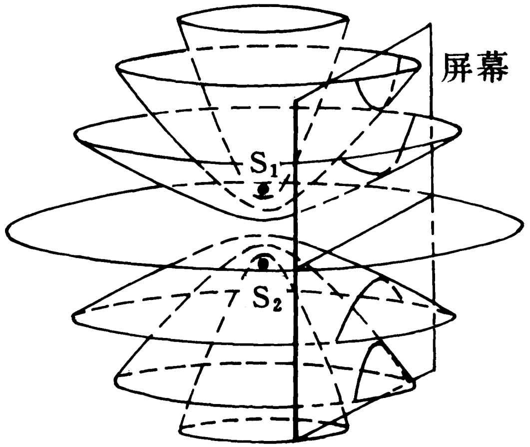
设在均匀煤质中有两个作同频简谐振动的相干点波源S_1和S_2，其间距为d，它们各自向周围媒质发出球面波。考察空间任意一点P的光强。

等强度点的轨迹是以S_1和S_2为焦点、 并以其连线为轴线的双叶旋转双曲面。

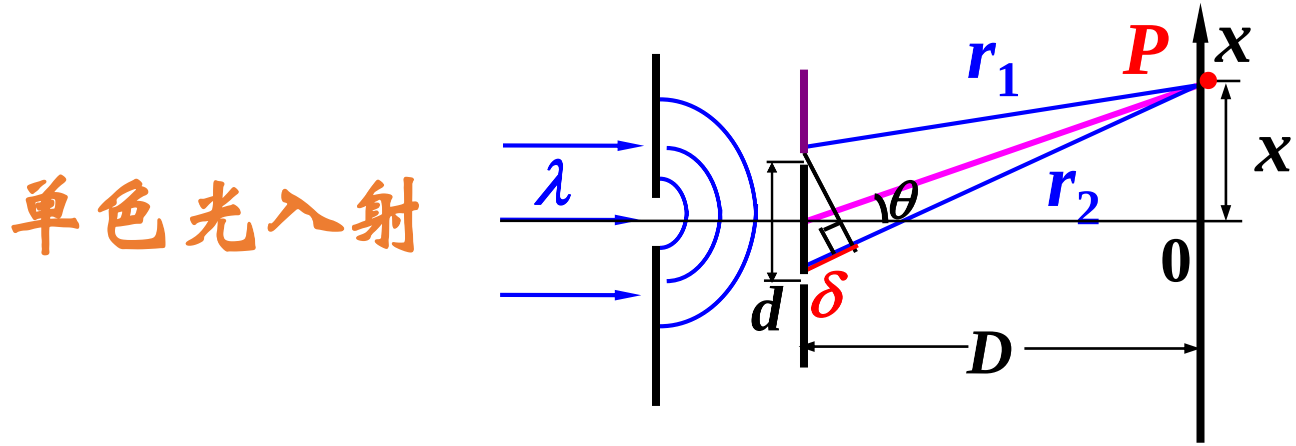
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta\right)$$

$$\approx 4I_0\cos^2\frac{\pi\delta}{\lambda}$$

$$\delta = r_2 - r_1 = \text{常量}$$



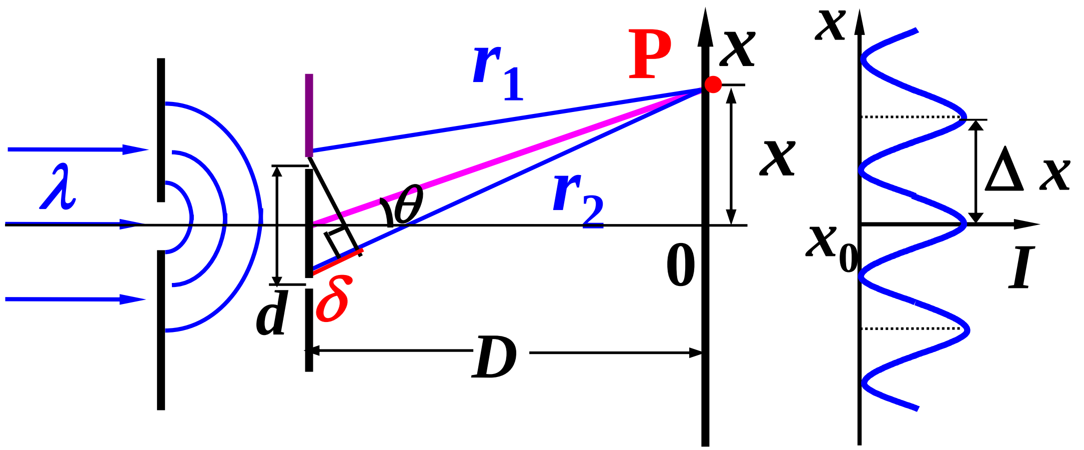
一、双缝干涉



$d >> \lambda$，$D >> d$ （$d \sim 10^{-4}$m， $D \sim 1$m）

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

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



$$\boxed{\delta = d\cdot\frac{x}{D} \qquad \Delta\varphi = \frac{\delta}{\lambda}2\pi}$$

明纹： $\Delta\varphi = \pm 2k\pi,\ k = 0,1,2,\cdots$

$$\delta = \pm k\lambda,\ x_{\pm k} = \pm k\frac{D}{d}\lambda$$

暗纹： $\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi,\ k = 0,1,2,\cdots$

$$\delta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2},\ x_{\pm(2k+1)} = \pm(2k+1)\frac{D}{2d}\lambda$$

条纹间距：

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

二、双缝干涉光强公式

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

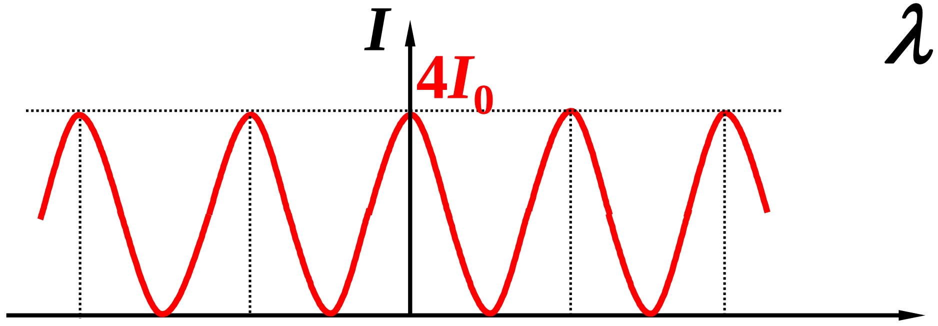
设 $I_1 = I_2 = I_0$，则光强为

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

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

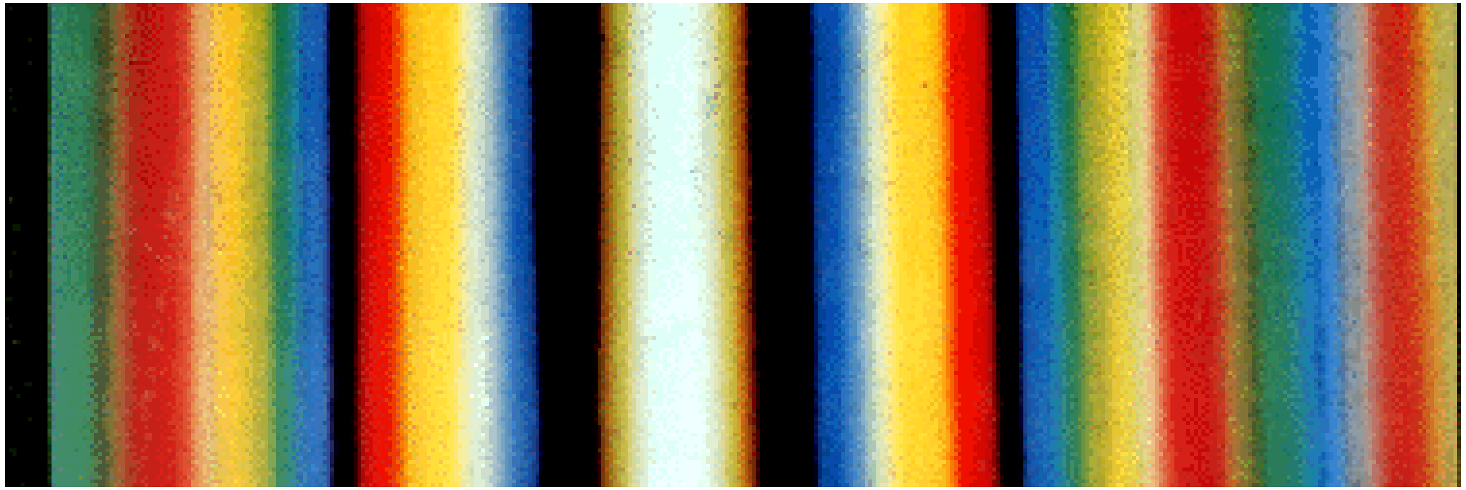
$$k = \frac{d\sin\theta}{\lambda}$$

光强曲线



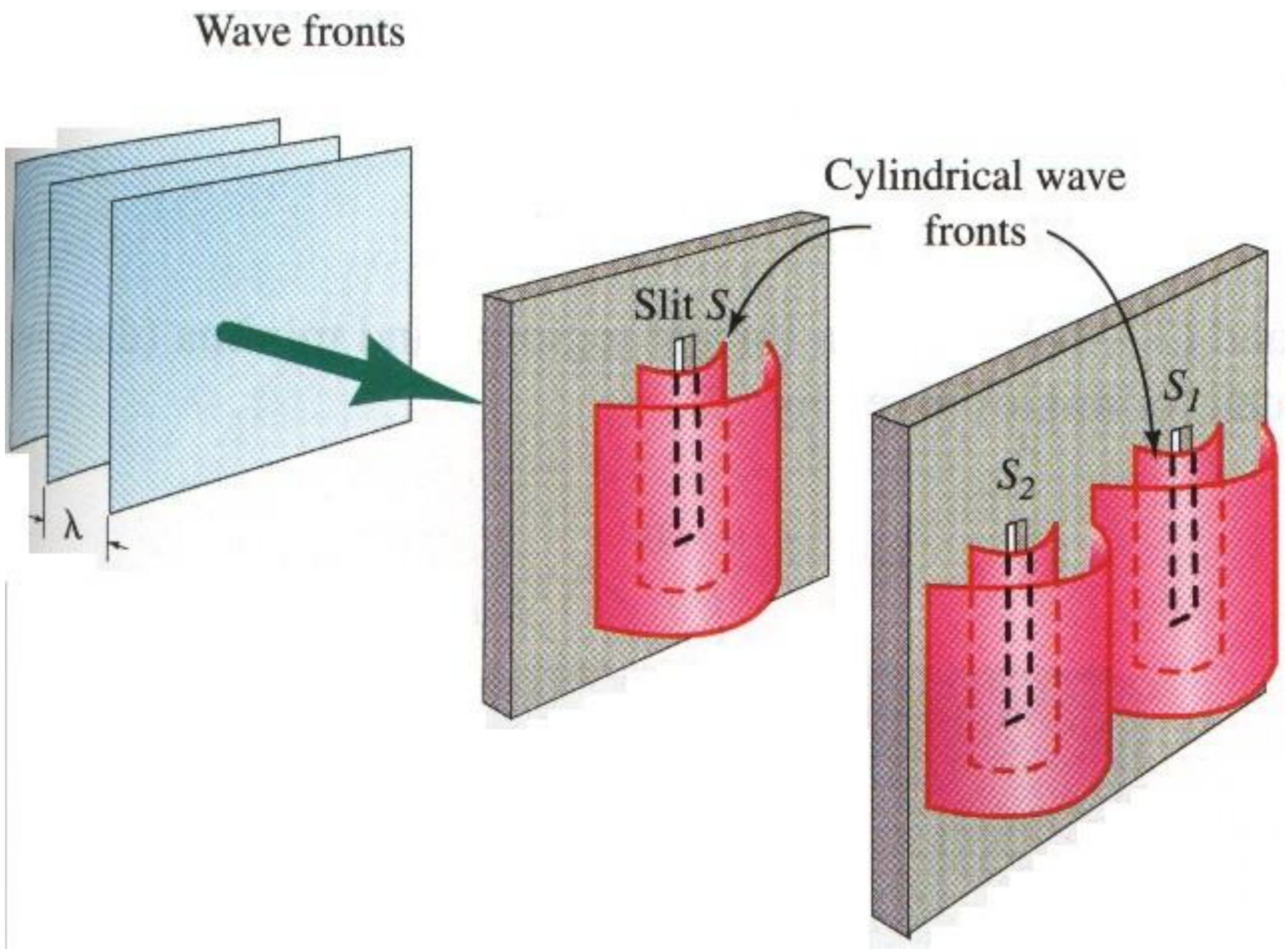
-4π	-2π	0	2π	4π	$\Delta\varphi$
-2	-1	0	1	2	k
x_{-2}	x_{-1}	0	x_1	x_2	x
$-2\lambda/d$	$-\lambda/d$	0	λ/d	$2\lambda/d$	$\sin\theta$

红光入射的杨氏双缝干涉照片

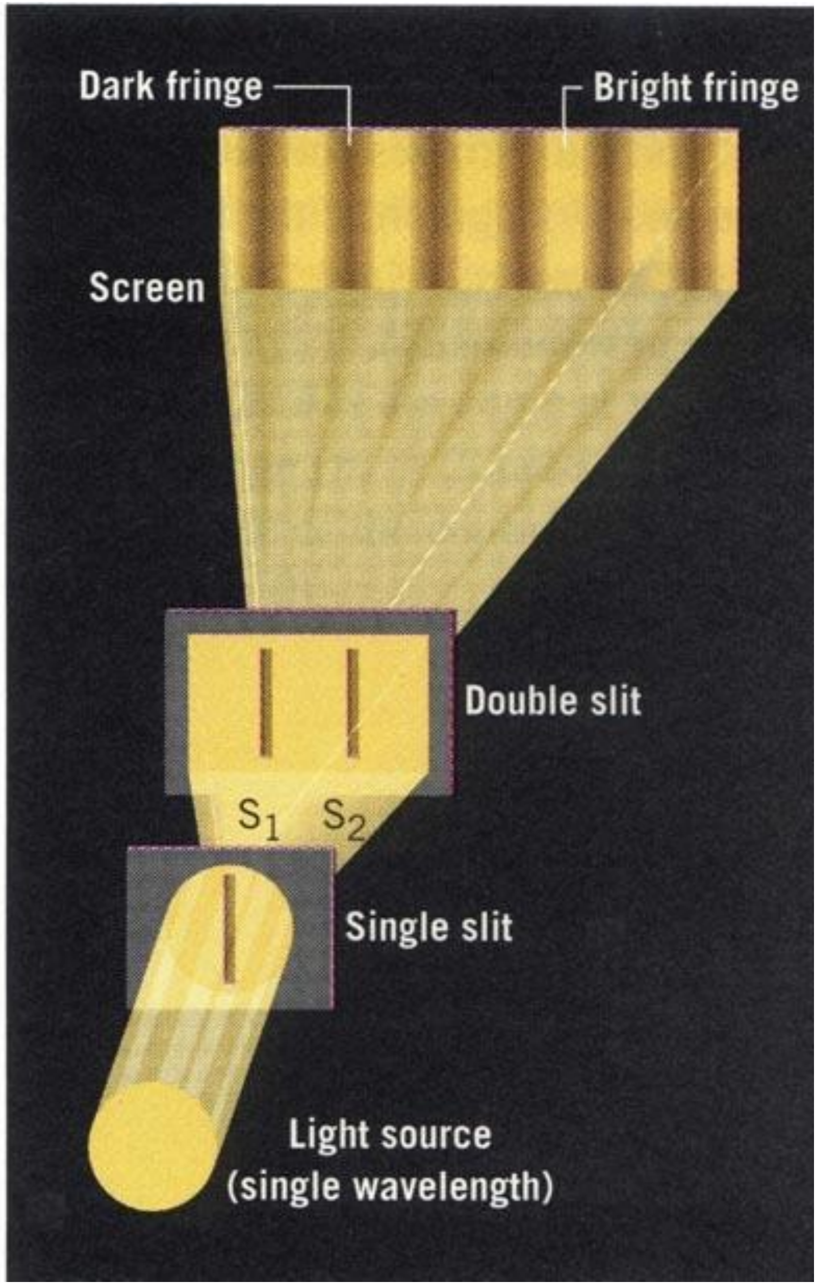


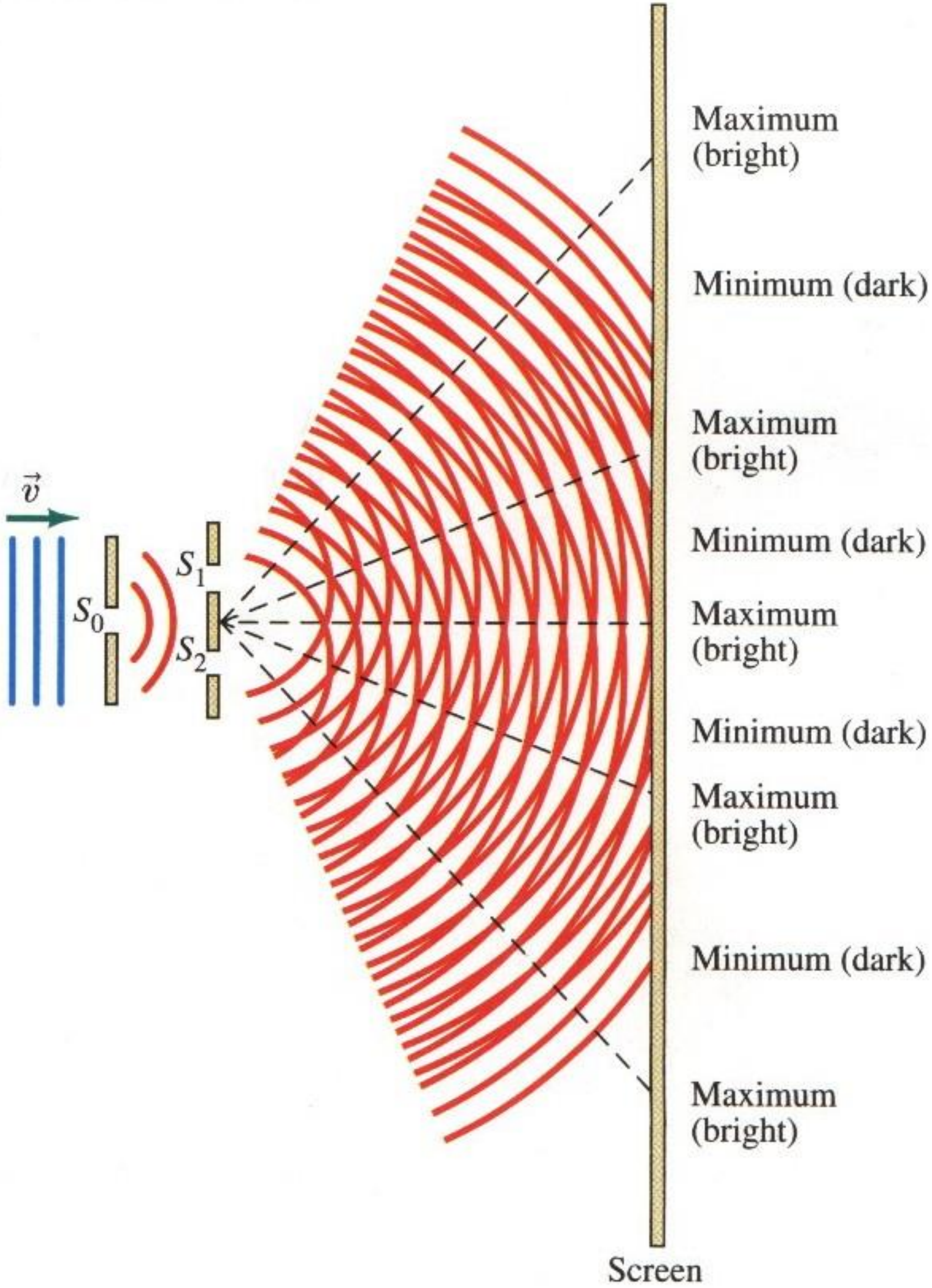
白光入射的杨氏双缝干涉照片

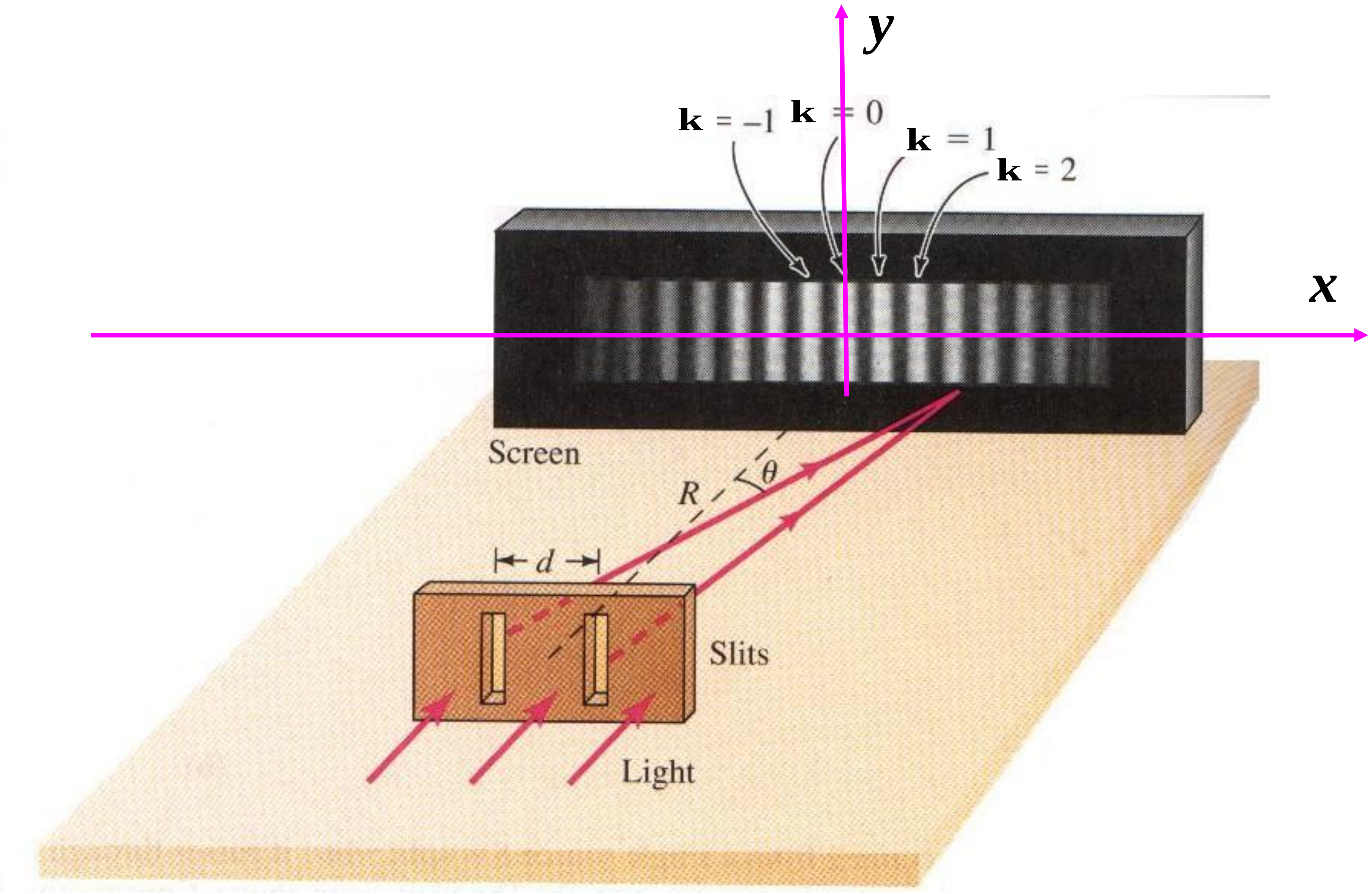
S，S_1，S_2是相互平行的狭缝



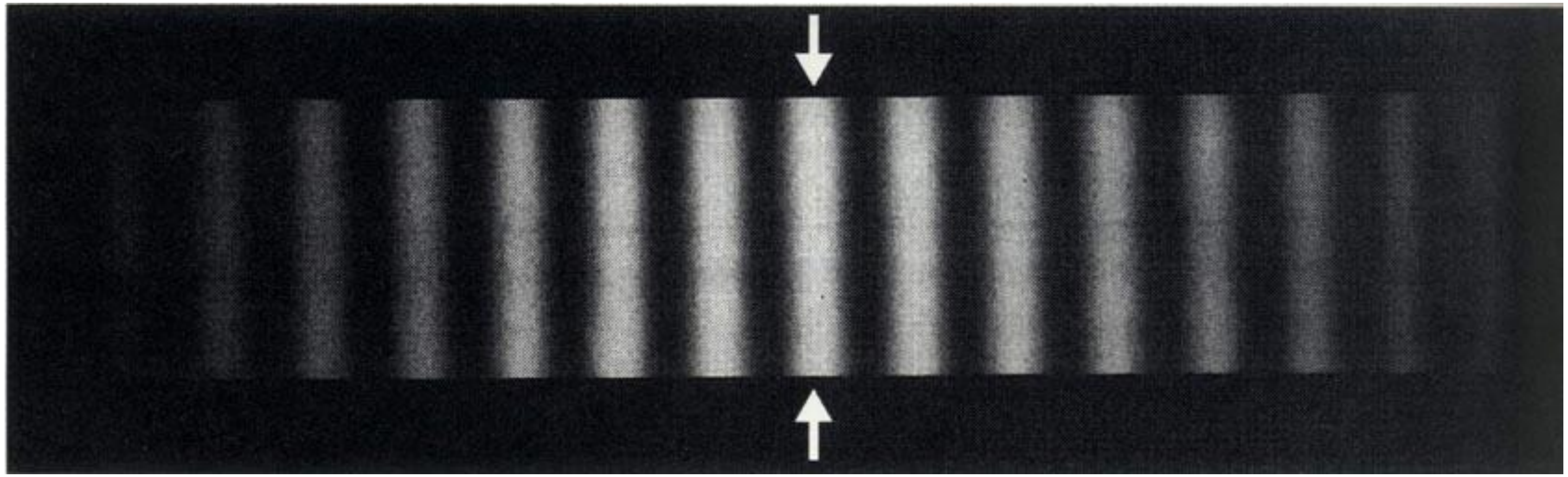
Young’s double-slit experiment


Dark fringe
Bright fringe
Screen
Double slit
S_1 S_2
Single slit
Light source
(single wavelength)

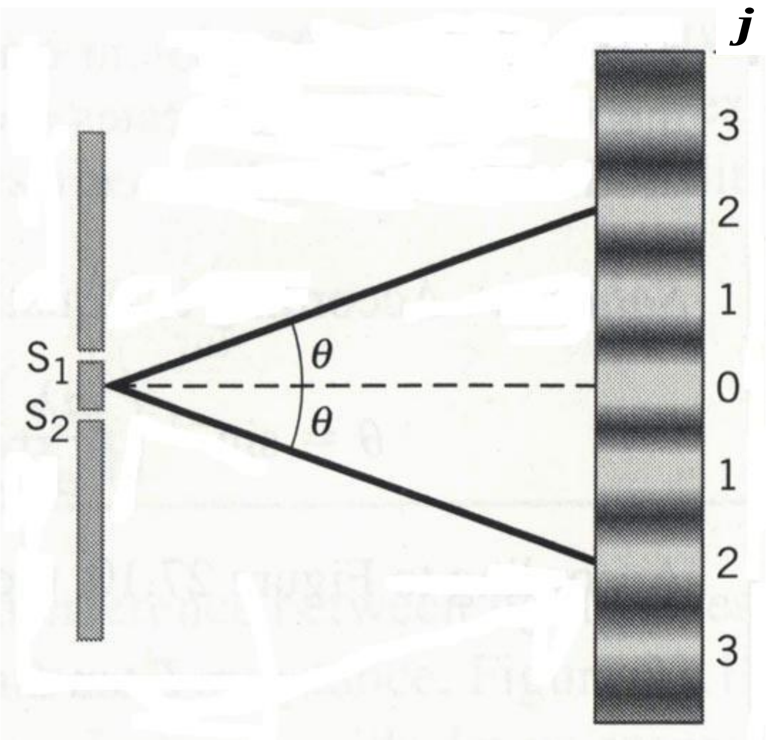

$\vec{v}$
S_0
S_1
S_2
Maximum (bright)
Minimum (dark)
Maximum (bright)
Minimum (dark)
Maximum (bright)
Minimum (dark)
Maximum (bright)
Minimum (dark)
Maximum (bright)
Screen

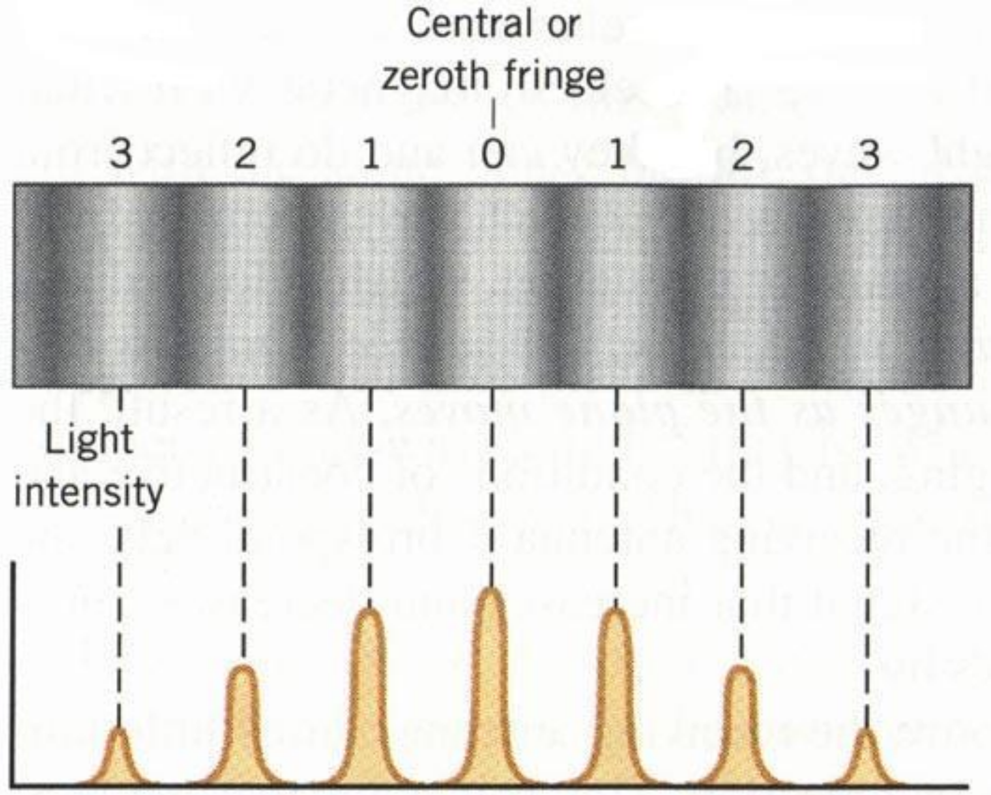


y
k = −1
k = 0
k = 1
k = 2
x
Screen
R
θ
d
Slits
Light

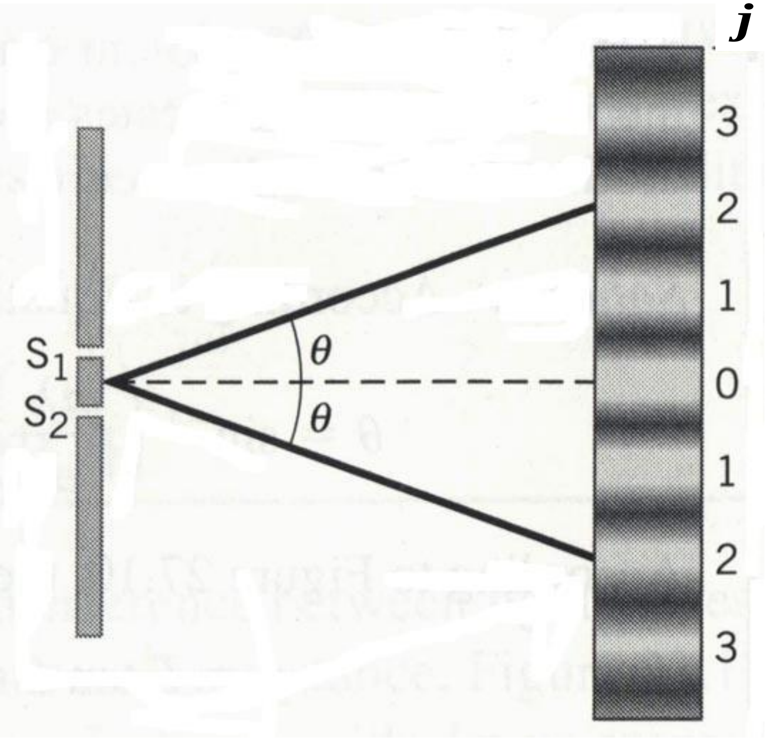


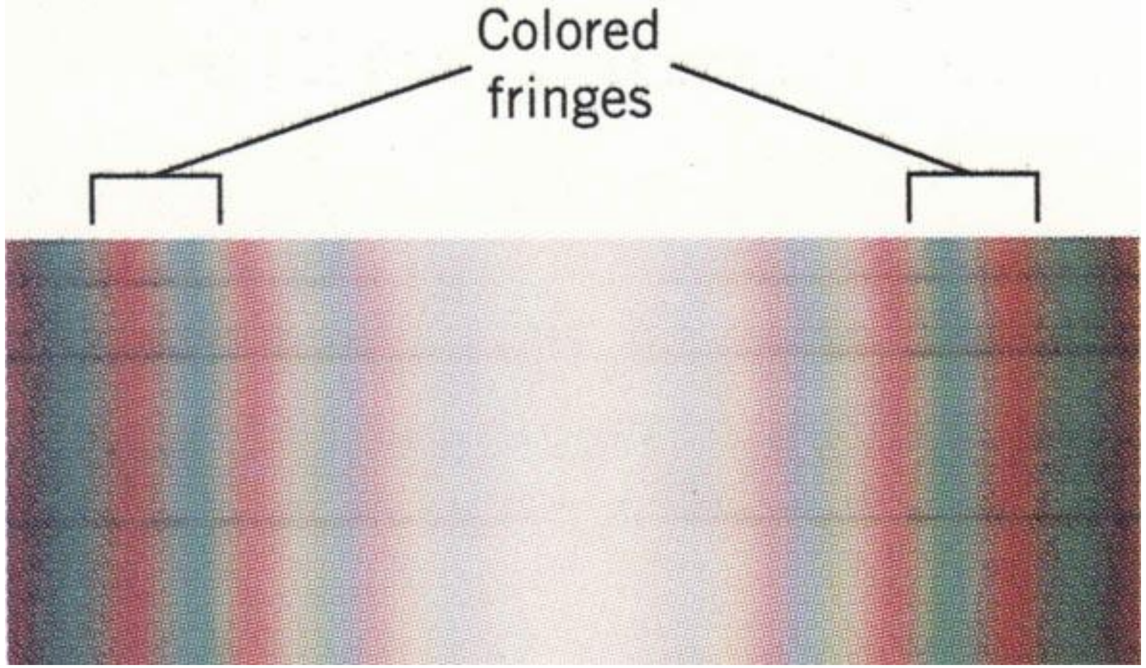
The fringe pattern





例22.1 白色平行光垂直入射到间距为 d=0.25mm 的双缝上，距缝 50cm 处放置屏幕，分别求第一级和第五级明纹彩色带的宽度。（设白光的波长范围是从400.0nm 到 760.0nm）。





解:

$$\mathbf{x_k = k\frac{D}{d}\lambda}$$

$$\mathbf{\Delta x_k = k\frac{D}{d}\Delta\lambda}$$

$$\Delta x_1 = \frac{D}{d}\Delta\lambda = \frac{500}{0.25}(760-400)\times10^{-6}\,\mathrm{mm} = 0.72\mathrm{mm}$$

$$\Delta x_5 = 5\Delta x_1 = 3.6\mathrm{mm}$$

三、双缝干涉条纹的特点

（1）一系列平行的明暗相间的条纹；

（2）θ不太大时条纹等间距；

（3）中间级次低，两边级次高

级次：$k = \dfrac{d\sin\theta}{\lambda} = \dfrac{r_2 - r_1}{\lambda}$

明纹：$\pm k$，$k = 0,1,2\ldots$ （整数级）

暗纹：$\pm(2k+1)/2$ （半整数级）

（4）$\Delta x \propto \lambda$，白光入射时，0级明纹中心为白色（可用来定0级位置），其余级明纹构成彩带，第2级开始出现重叠（书p.6 例 22.1）

四、干涉问题分析的要点

（1）确定发生干涉的光束；

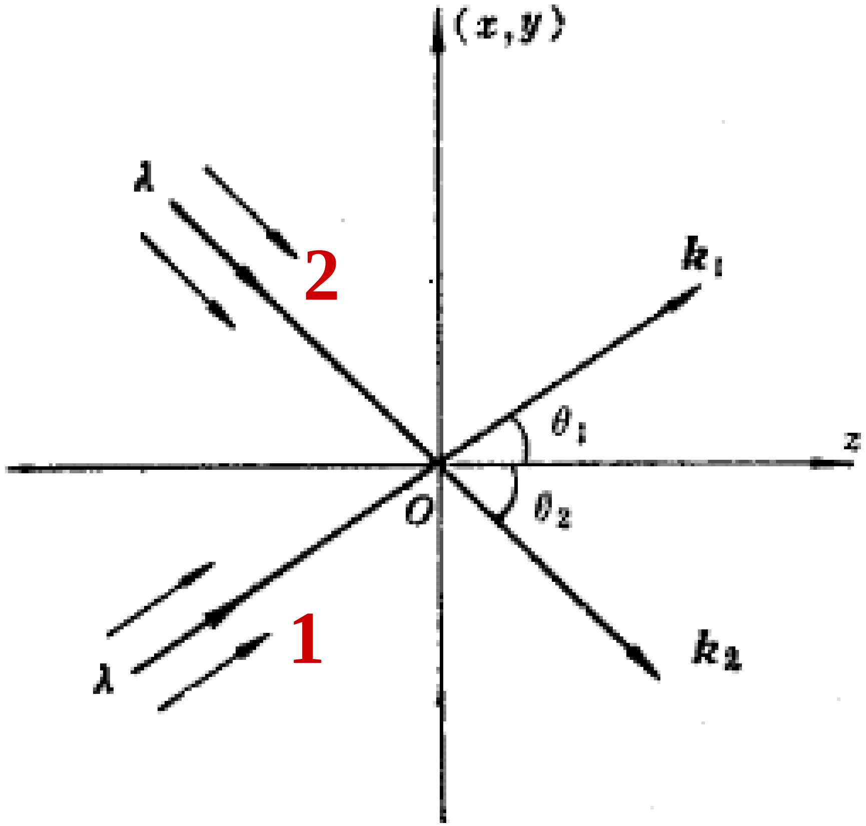
（2）计算波程差（光程差）；

（3）明确条纹特点：

形状、 位置、级次分布、条纹移动等；

（4）求出光强公式、画出光强曲线。

例22.2 两束相干平行光同时照射在z=0的平面上。设两束光的波长为λ，振幅分别为A_1和A_2，在坐标原点处的初相位均为零，传播方向与xz平面平行，与z轴的夹角分别为θ_1和θ_2。求xy平面上干涉条纹的形状和间距。

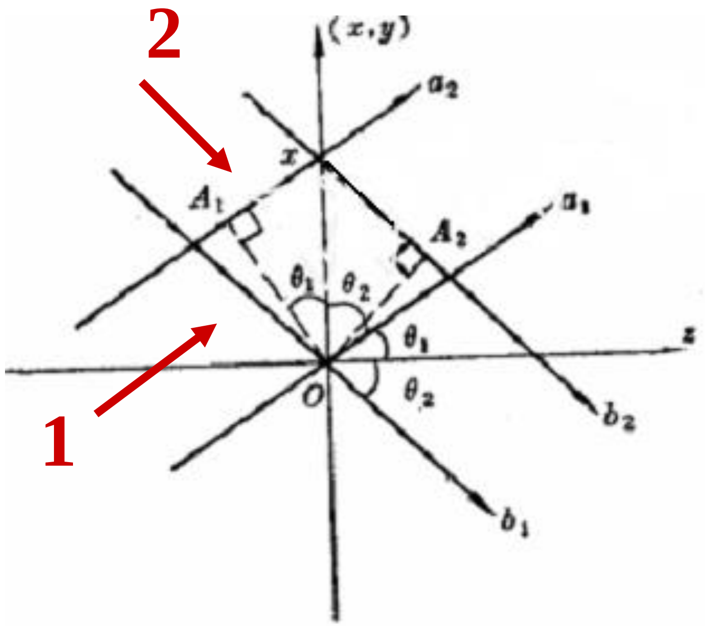


解： **沿波传播方向每增加λ 的距离，相位落后2π。**

$$\varphi_1(x) = -\frac{2\pi}{\lambda} x \sin\theta_1$$

$$\varphi_2(x) = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin\theta_2$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2(x) - \varphi_1(x) = \frac{2\pi}{\lambda} x(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)$$



根据干涉极大条件，可求得亮纹位置为

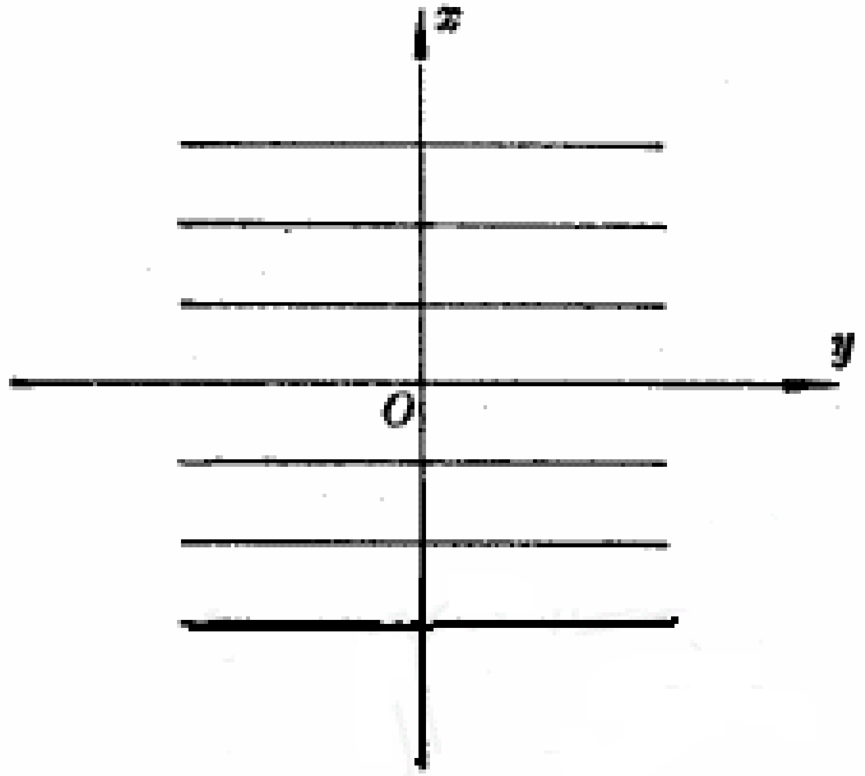
$$\frac{2\pi}{\lambda} x(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) = 2k\pi$$

即 $$x(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) = k\lambda$$

式中 k 为整数。从这一结果可求得干涉条纹间距为

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}$$

结果表明，亮纹位置只与x有关，而与y无关，因而干涉条纹是与y轴平行的直条纹。



五、其他分波面干涉实验

要求明确以下问题：

1、如何获得的相干光；

2、明、暗纹条件；

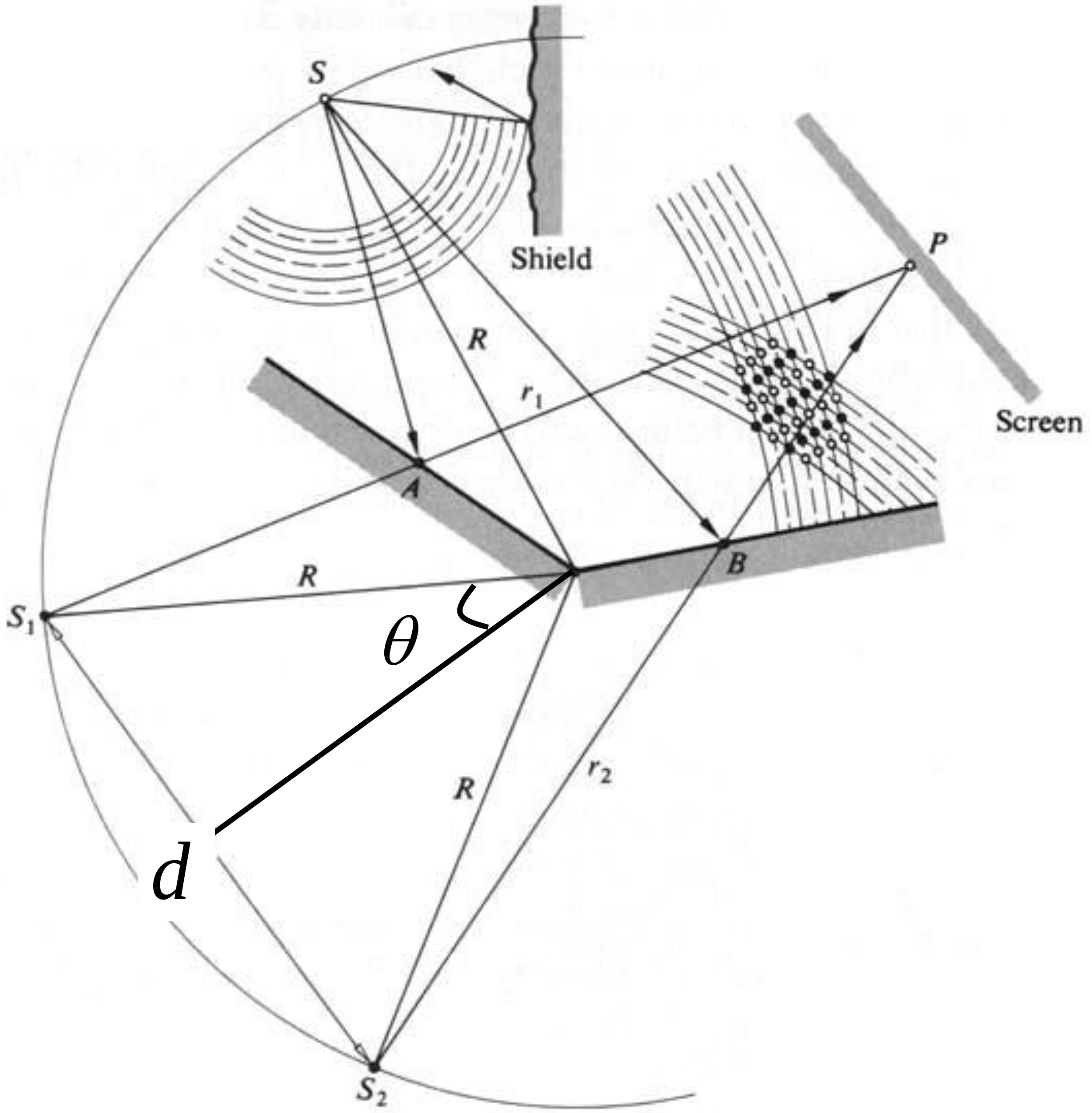
3、干涉条纹特点：

形状、间距、 级次位置分布；

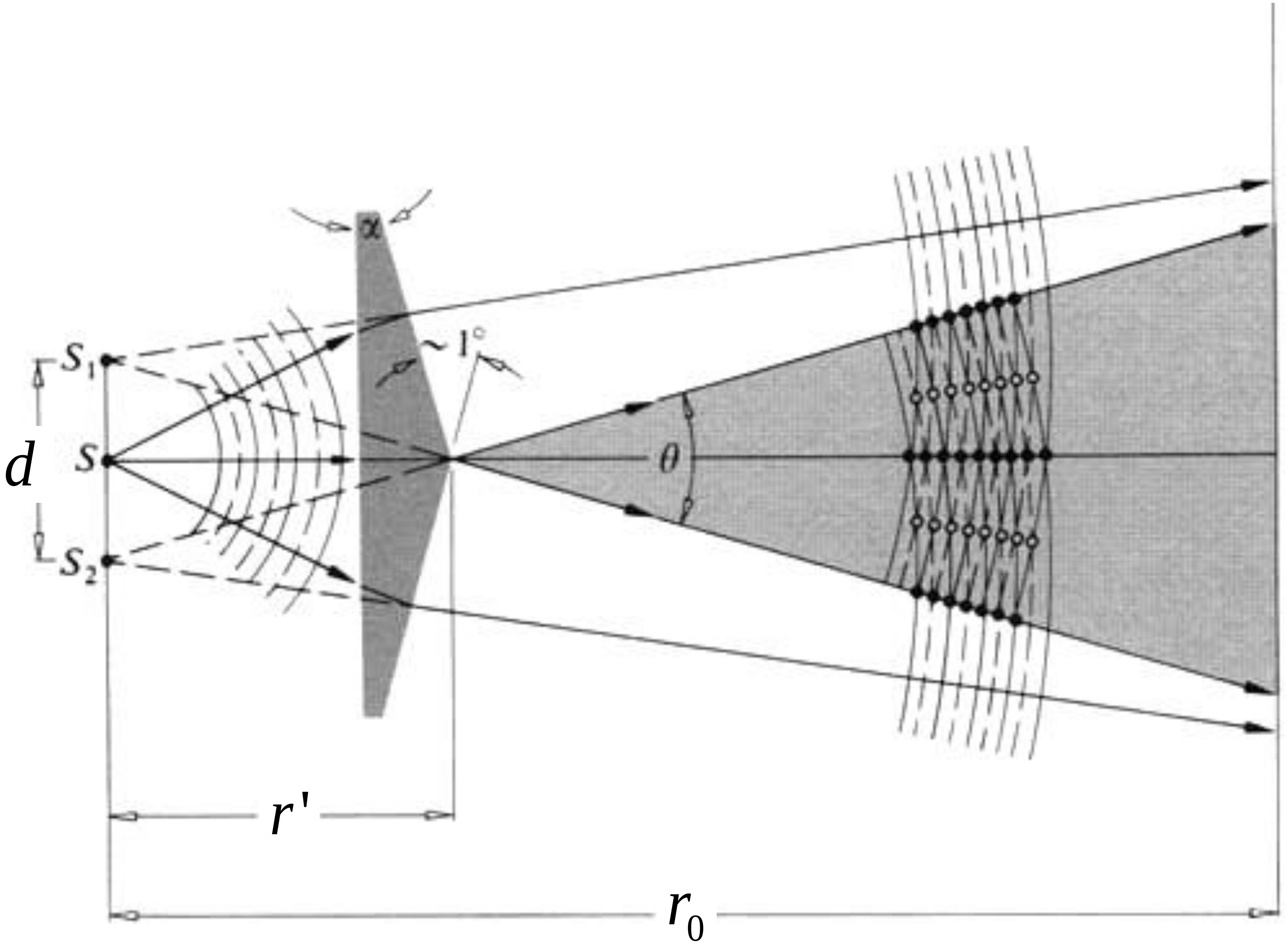
4、劳埃德镜实验，半波损失。

菲涅耳双面镜

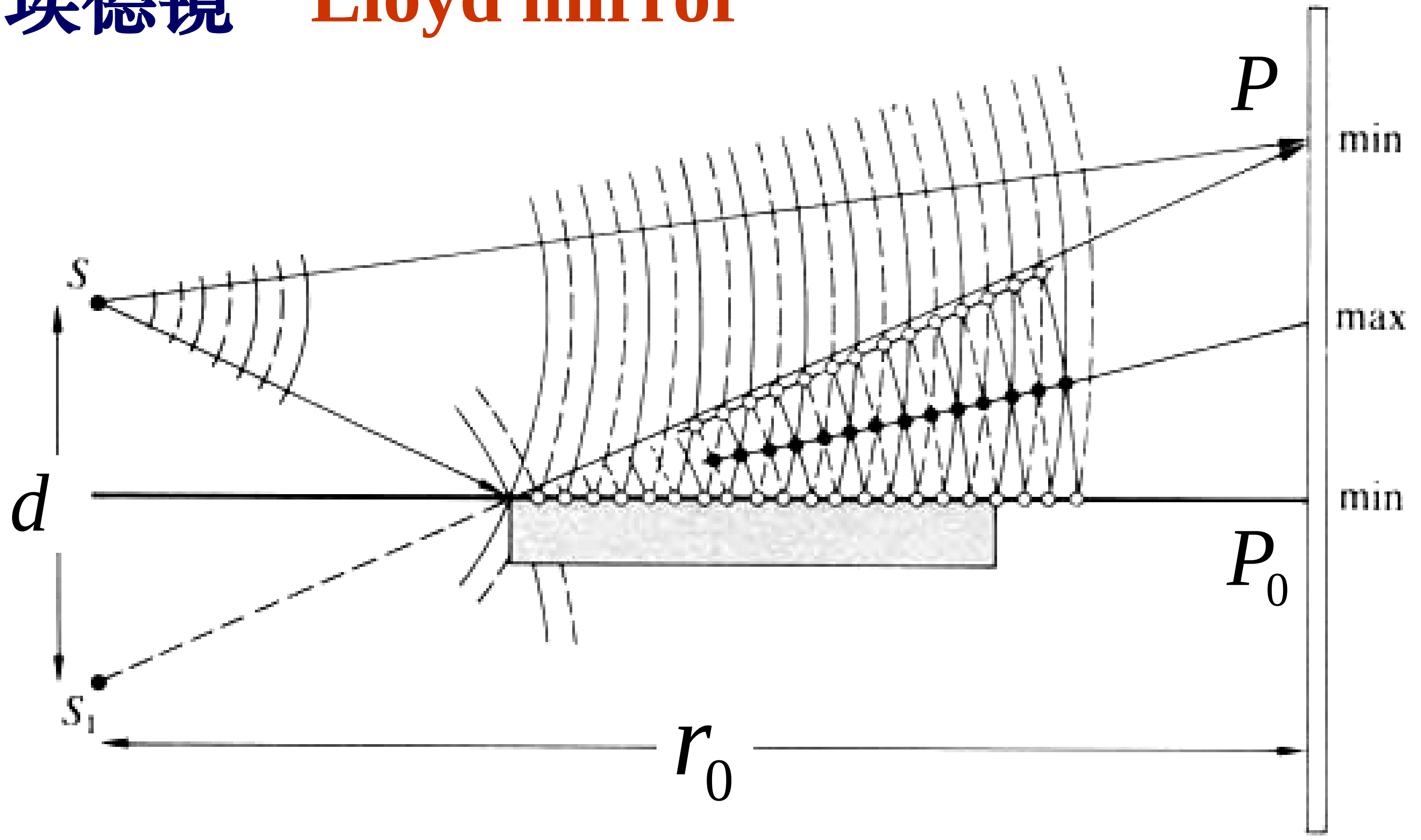
Fresnel's double mirror



菲涅耳双棱镜 Fresnel double prism

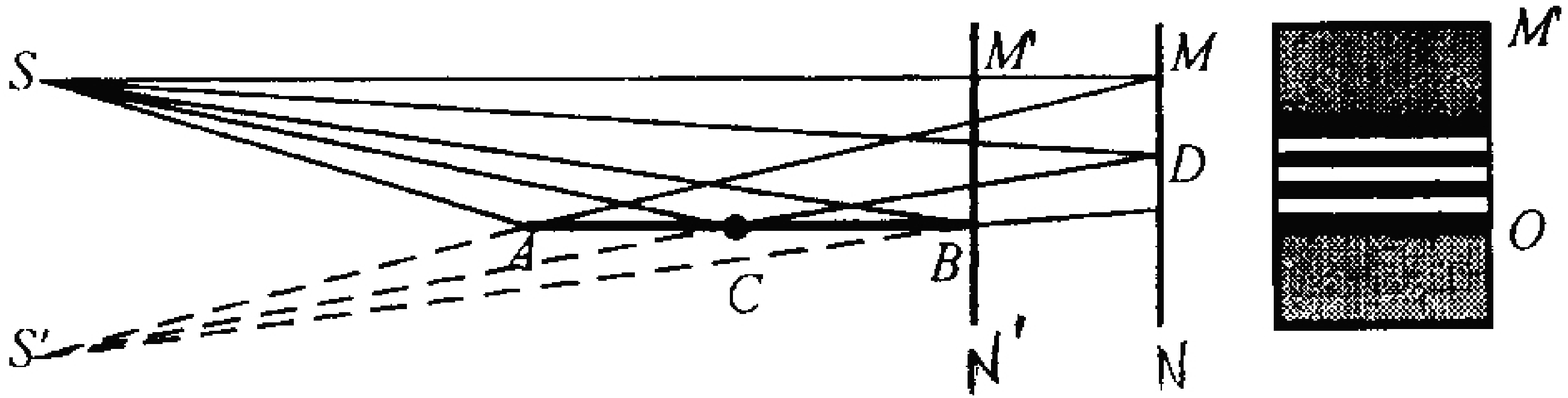


劳埃德镜 Lloyd mirror

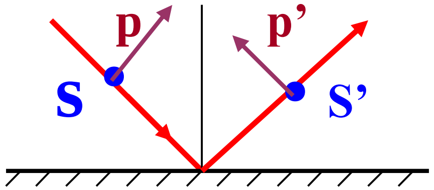


掠入射，产生了π相位变化（半波损失）

劳埃德镜



反射相位突变问题



有时要将反射光线偏振态与入射光线偏振态直接地作比较，以便确定反射光和入射光叠加的干涉场，由此提出反射相位是否突变的问题。光在界面的入射点也是反射点。当反射光在入射点的线偏振态与入射光的线偏振态恰巧相反，这表明界面反射有了相位突变π，也称之为有半波损；若两者的线偏振态恰巧一致，这表明界面反射无相位突变，即没有半波损。这一表述本身已隐含着这样一个事实 — 反射光p(s) 振动与入射光p(s) 振动方向是在一条直线上，这只有两种情况，正入射和掠入射，否则像斜入射那样，虽然两者的s振动是在一条直线上，但两者的p振动不在一条直线上，所谓“相反”或“一致”已经失去意义，这时应按实际需要作具体的针对性分析。

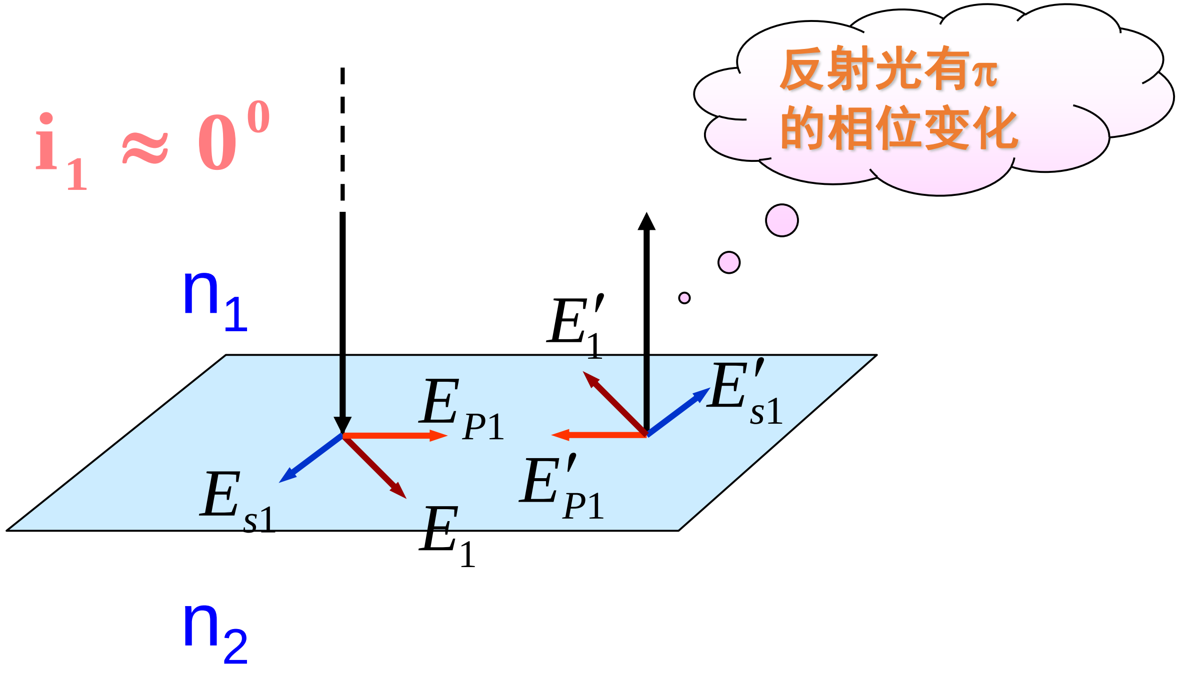
可以证明：

在正入射的情况下，光从光疏介质到光密介质时反射光有半波损失，从光密介质到光疏介质时反射光无半波损失。

在掠入射的情况下，无论光从光疏介质到光密介质，还从光密介质到光疏介质时，反射光均有半波损失。

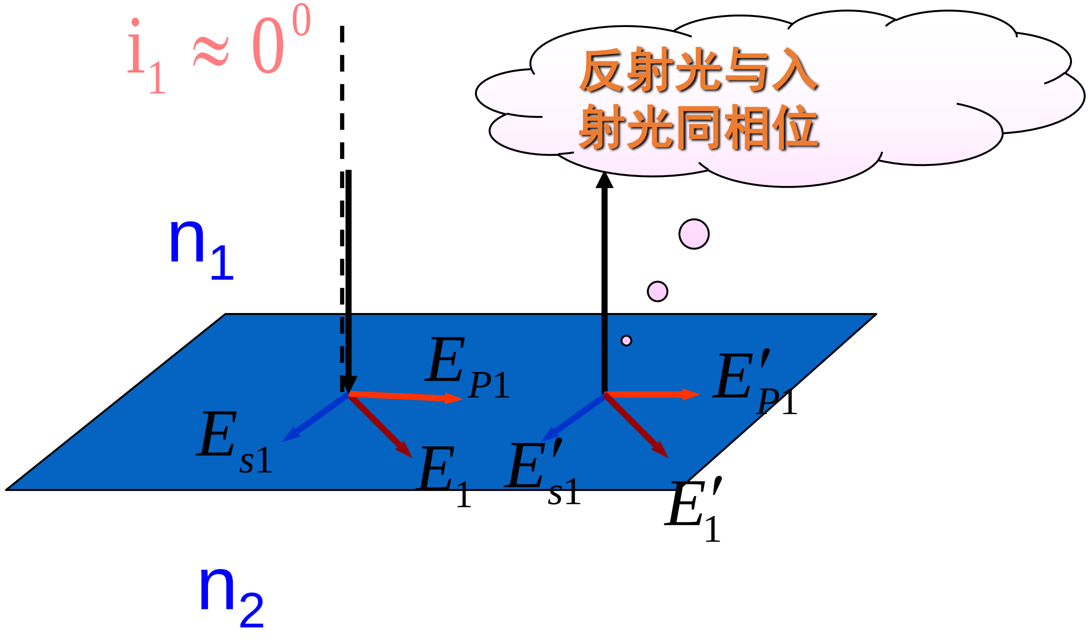
在任何情况下透射光都没有半波损失。

光从光疏介质到光密介质垂入射时



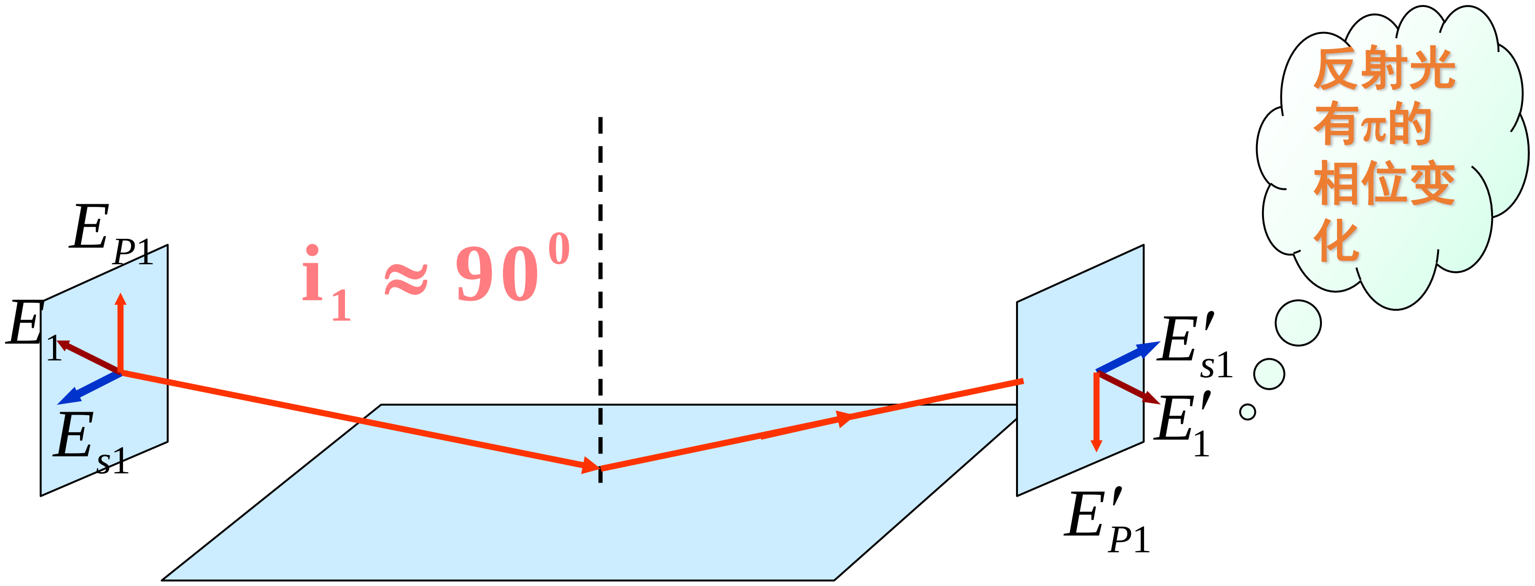
$n_1<n_2$

光从光密介质到光疏介质垂入射时

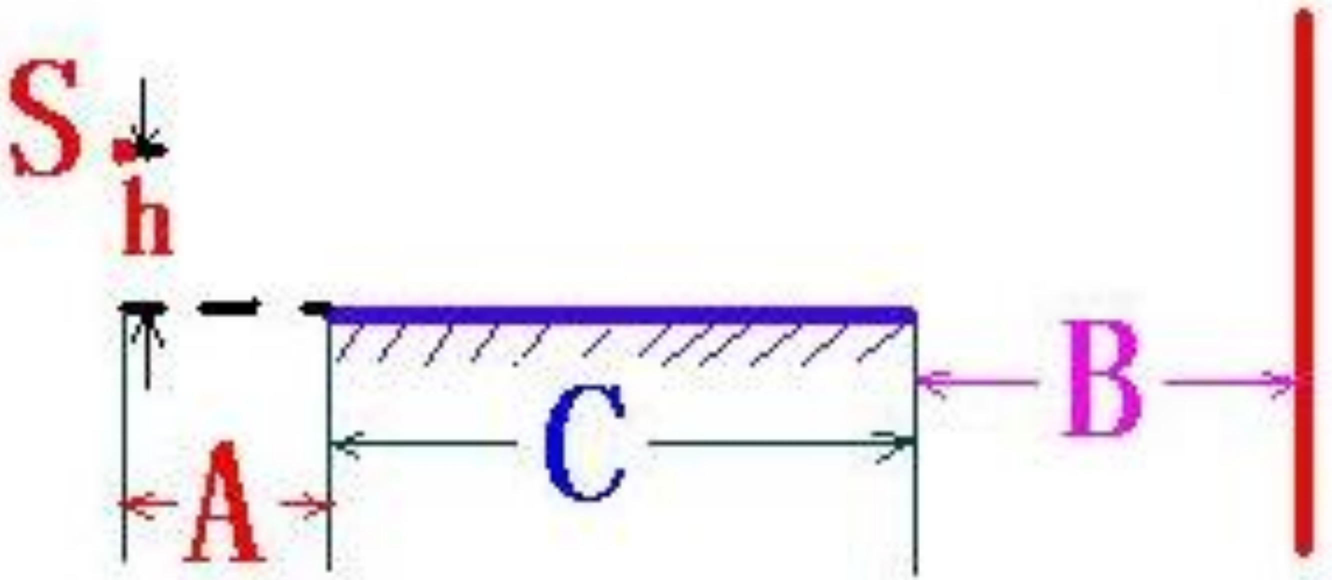


$n_1 > n_2$

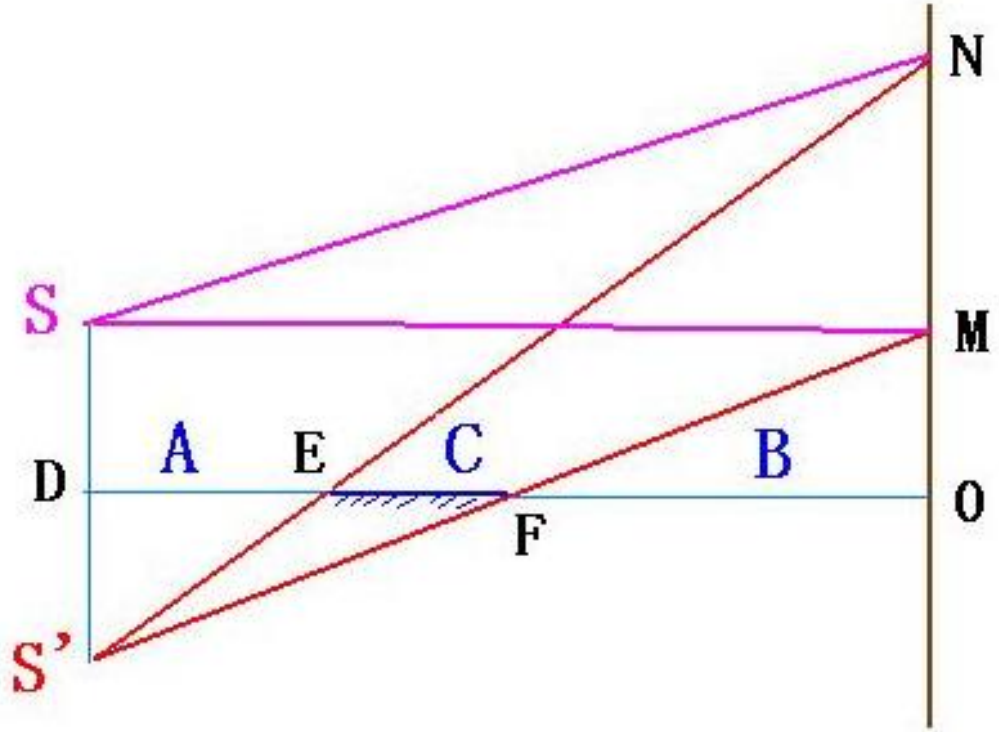
掠入射



例22.3 如图所示，劳埃德镜的镜长C=5.0 cm，幕与镜的右侧边缘相距B=3.0m，线光源S与镜的左侧边缘之间的位置关系已在图中示出，其中A=2.0cm, h=0.5mm, 所用单色光的波长为λ=589.3 nm，试求幕上干涉条纹的间距。幕上能出现多少根干涉条纹？



解：产生干涉的两个光波可看成是从光源S与S的镜像S'发出的，发生干涉的区域为MN。



条纹间距为

$$\Delta x = \frac{A+C+B}{2h}\lambda$$

$$= \frac{3.07\times 5893\times 10^{-10}}{2\times 0.5\times 10^{-3}} m = 1.81\times 10^{-3} m$$

△ONE相似于△S'DE $\Rightarrow ON = \dfrac{B+C}{A}h$

△OMF相似于△S'DF $\Rightarrow OM = \dfrac{B}{A+C}h$

如果O点有光的干涉，由于半波损失O点为暗条纹。

ON段的暗条纹数为 $n_1 = \dfrac{ON}{\Delta x}$

OM段的暗条纹数为 $n_2 = \dfrac{OM}{\Delta x}$

MN段的暗条纹数为

$$\mathrm{n} = \frac{\mathrm{ON} - \mathrm{OM}}{\Delta \mathrm{x}} = \left(\frac{\mathrm{B}+\mathrm{C}}{\mathrm{A}} - \frac{\mathrm{B}}{\mathrm{A}+\mathrm{C}} \right) \frac{2\mathrm{h}^2}{(\mathrm{A}+\mathrm{B}+\mathrm{C})\lambda}$$

$\approx$ **30**

例22.4 一微波检测器安装在湖滨高出水面0.5m处。当一颗发射波长为21cm单色微波的射电星体徐徐自地平线升起时，检测器指出一系列信号强度的极大和极小。当第一个极大出现时，射电星体相对地平线的仰角φ为多少?

解： 采取直接计算光程差的办法求解。$\Delta L(P) = CP - C'P + \dfrac{\lambda}{2}$

$$CP = \frac{h}{\sin\varphi}$$

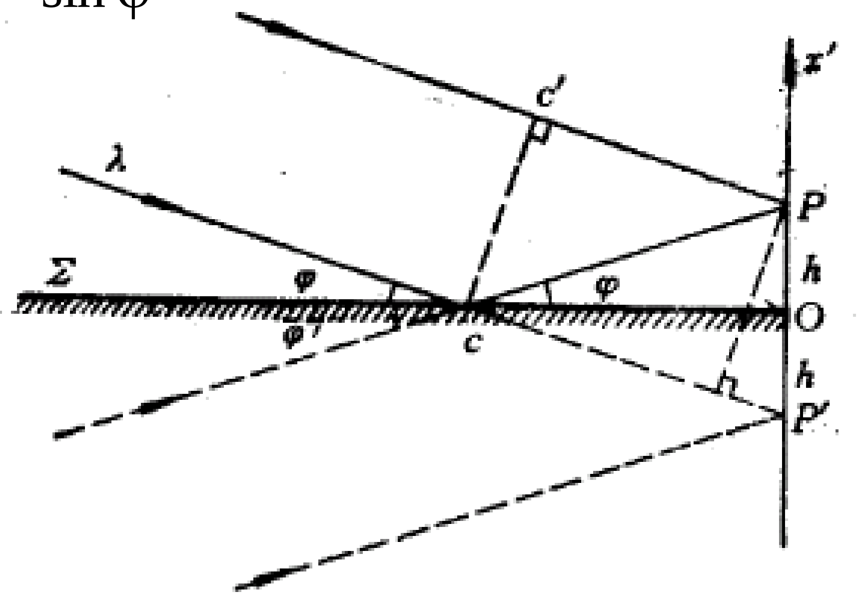
$$C'P = CP\sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\varphi\right) = \frac{h}{\sin\varphi}\cos 2\varphi$$

$$\Delta L(P) = \frac{h}{\sin\varphi}(1-\cos 2\varphi) + \frac{\lambda}{2} = 2h\sin\varphi + \frac{\lambda}{2}$$

令 $\Delta L(P) = \lambda$ (第一次出现相干极大)，得

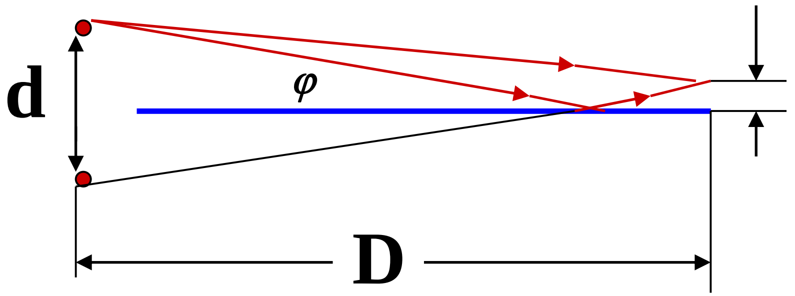
$$2h\sin\varphi = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \sin\varphi = \frac{\lambda}{4h} = 0.105$$

$$\Rightarrow \varphi = 6^{\circ}2'$$



本题也可用其他方法求解，说明如下。

(1) 将星体和星体对湖面成的像看作两相干点源，于是可以照搬杨氏干涉装置。但双孔间距d和双孔到接收屏的距离D不知，可以灵活地将这两个未知量转化为用φ的函数表示。



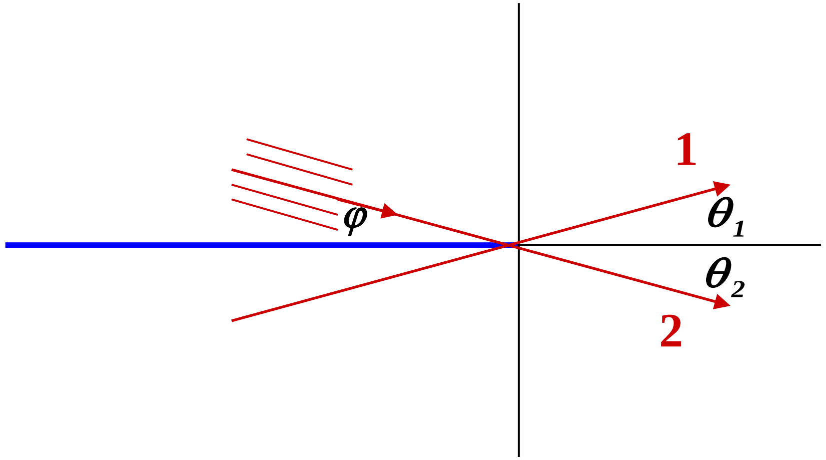
$$h = \Delta x / 2$$

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

$$2\varphi = \frac{d}{D}$$

$$\Rightarrow \quad \varphi = \frac{\lambda}{2\Delta x} = \frac{\lambda}{4h}$$

(2) 星体离地面很远，入射到湖面的光为平行光，反射光也为平行光，因此这是两束平行光的干涉。



$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}$$

本题中 $\theta_1 = \theta_2 = \varphi$

$$2h = \Delta x = \frac{\lambda}{2\sin\varphi}$$

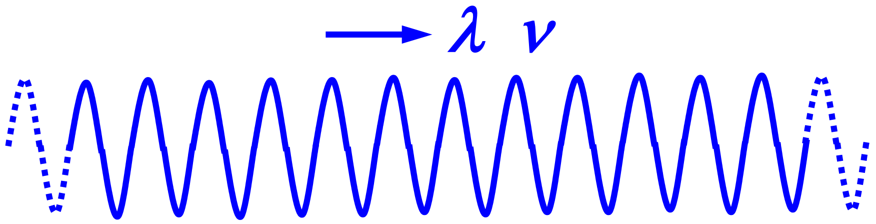
$$\Rightarrow \quad \sin\varphi = \frac{\lambda}{4h}$$

无论采用哪一种方法，反射半波损都必须考虑。

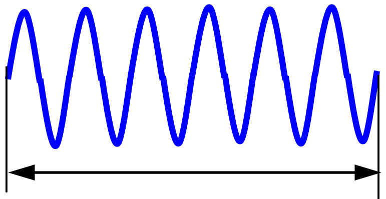
22.3 时间相干性（temporal coherence）

一、光的非单色性

1、理想的单色光



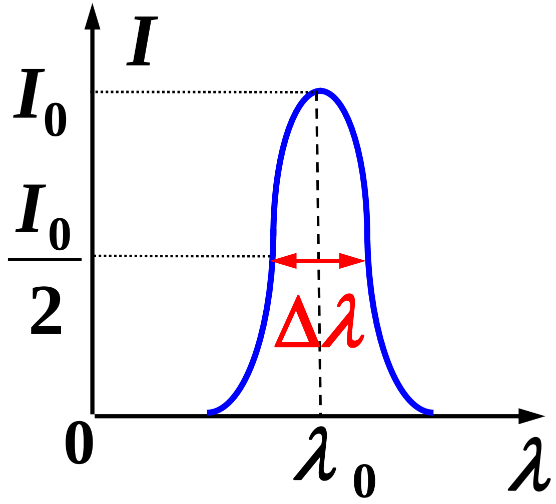
2、实际光束：波列 准单色光



波列长$L=\tau c$

$$E(t)=\exp(-i\omega_0 t), -\frac{\tau}{2}<t<\frac{\tau}{2}$$

$$E(t)=0, \text{其它时间}$$

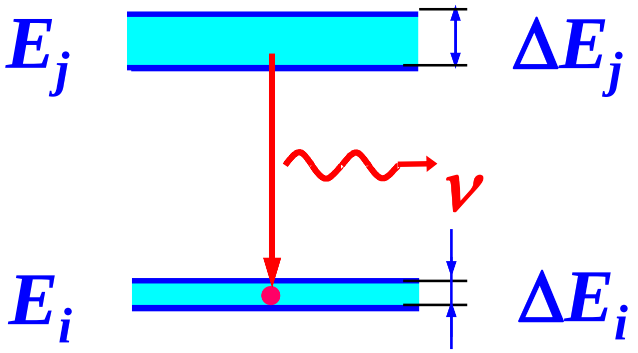


$\Delta\lambda$:谱线宽度

准单色光：在某个中心波长（频率）附近有一定波长（频率）范围的光。

3、造成谱线宽度的原因

（1）自然宽度



$$\tau \cdot \Delta E \sim \hbar$$

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E_i + \Delta E_j}{h}$$

（2） 多普勒增宽

$$\Delta\nu \propto \bar{v} \propto \sqrt{T}, \qquad T\uparrow \rightarrow \Delta\nu\uparrow$$

（3） 碰撞增宽

$$\Delta\nu \propto \bar{z} \propto p\,(T\text{一定}),\quad p\uparrow \rightarrow \Delta\nu\uparrow$$

例22.5 杨氏实验装置中，采用加有蓝绿色滤光片的白光光源，波长范围为$\Delta\lambda = 100$ nm，平均波长为$\lambda = 490$ nm. 试估算从第几级开始，条纹将变得无法分辨。

解: 设该蓝绿光的波长范围为 (λ_1, λ_2)，则按题意有

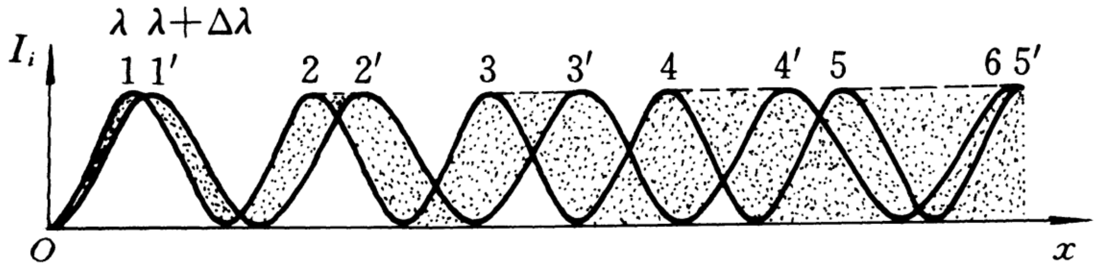
$$\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda = 100 \text{ nm} \qquad \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2) = \lambda = 490 \text{ nm}$$

相应于λ_1和λ_2，杨氏干涉条纹中k级极大的位置分别为:

$$x_1 = k\frac{D}{d}\lambda_1 \qquad \mathbf{x_2 = k\frac{D}{d}\lambda_2}$$

因此，k级干涉条纹所占据的宽度为

$$\delta x = x_2 - x_1 = k\frac{D}{d}(\lambda_2 - \lambda_1) = k\frac{D}{d}\Delta\lambda$$



显然，当此宽度大于或等于相应于平均波长λ的条纹间距时，干涉条纹变得模糊不清。这个条件可以表达为

$$k\frac{D}{d}\Delta\lambda \geq \frac{D}{d}\lambda$$

$$k \geq \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 4.9$$

所以，从第五级开始，干涉条纹变得无法分辨。

另一方面，如图所示，当波长为$(\lambda+\Delta\lambda)$的第k_M级亮纹中心，与波长为λ的第(k_M+1)级亮纹中心重合时，即当

$$k_M\frac{D}{d}(\lambda+\Delta\lambda)=(k_M+1)\frac{D}{d}\lambda$$

时，总的干涉条纹的可见度降为零。实际上，这就是亮纹宽度δx等于条纹间距Δx的条件。由此可以确定干涉条纹可见度降为零时的干涉级为

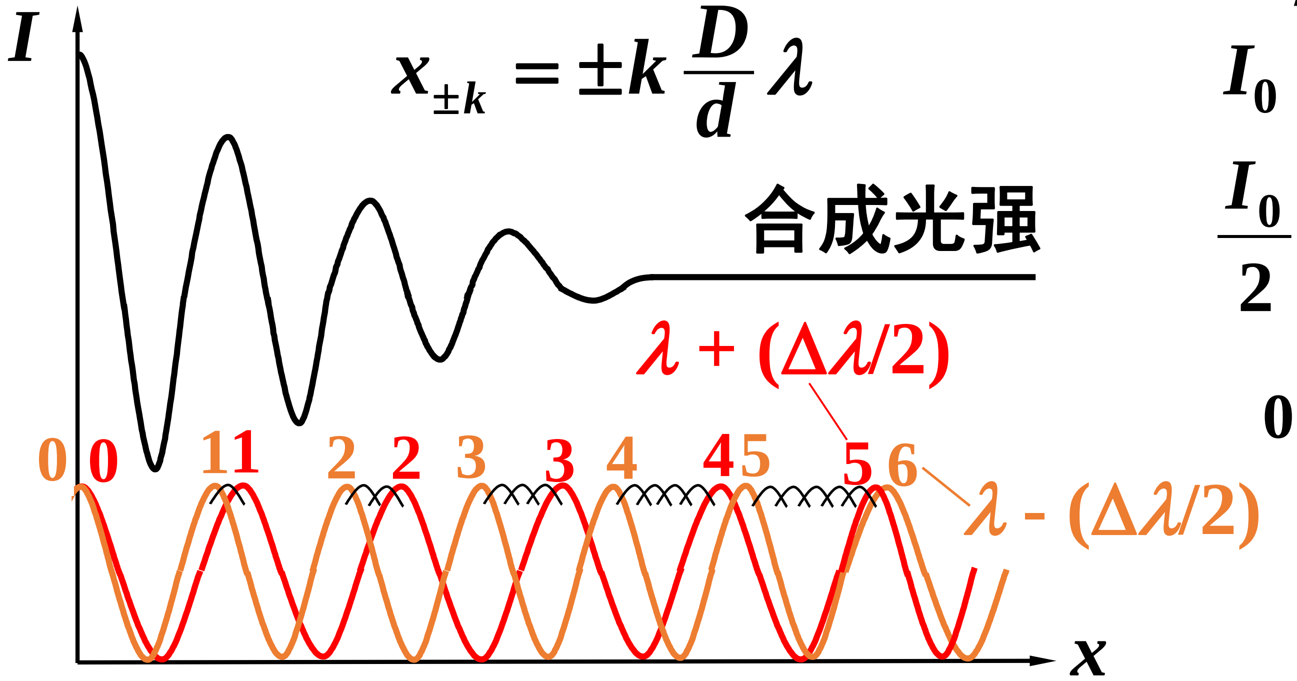
$$k_M=\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

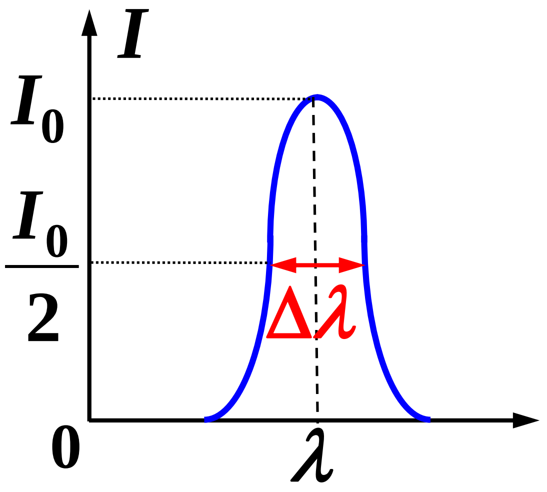
与该干涉级k_M对应的光程差δ_M，就是实现相干的最大光程差，即

$$\delta_M=k_M(\lambda+\Delta\lambda)\approx\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

二、非单色性对干涉条纹的影响

$$x_{\pm k}=\pm k\frac{D}{d}\lambda$$





设能产生干涉的最大级次为k_M，则有

$$\left.\begin{array}{l} k_M(\lambda+\dfrac{\Delta\lambda}{2})=(k_M+1)(\lambda-\dfrac{\Delta\lambda}{2}) \\ \text{又} \quad \lambda \gg \Delta\lambda \end{array}\right\} \longrightarrow \boxed{k_M=\frac{\lambda}{\Delta\lambda}}$$

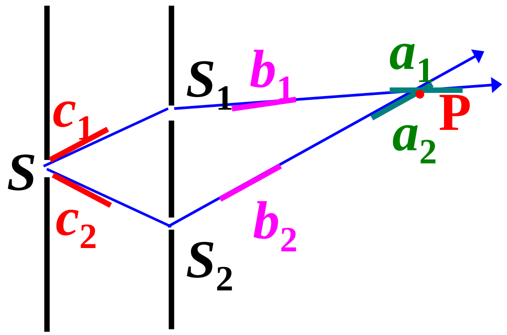
三、相干长度与相干时间

1、相干长度（coherent length）

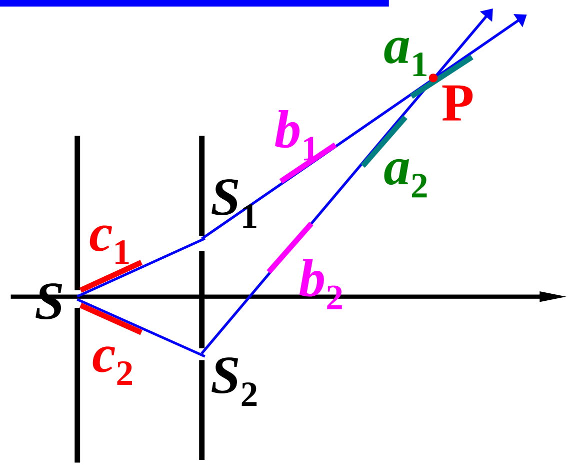
两列波能发生干涉的最大光程差叫相干长度。

相干长度 $$\boxed{\delta_M = k_M\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}}$$

λ：中心波长



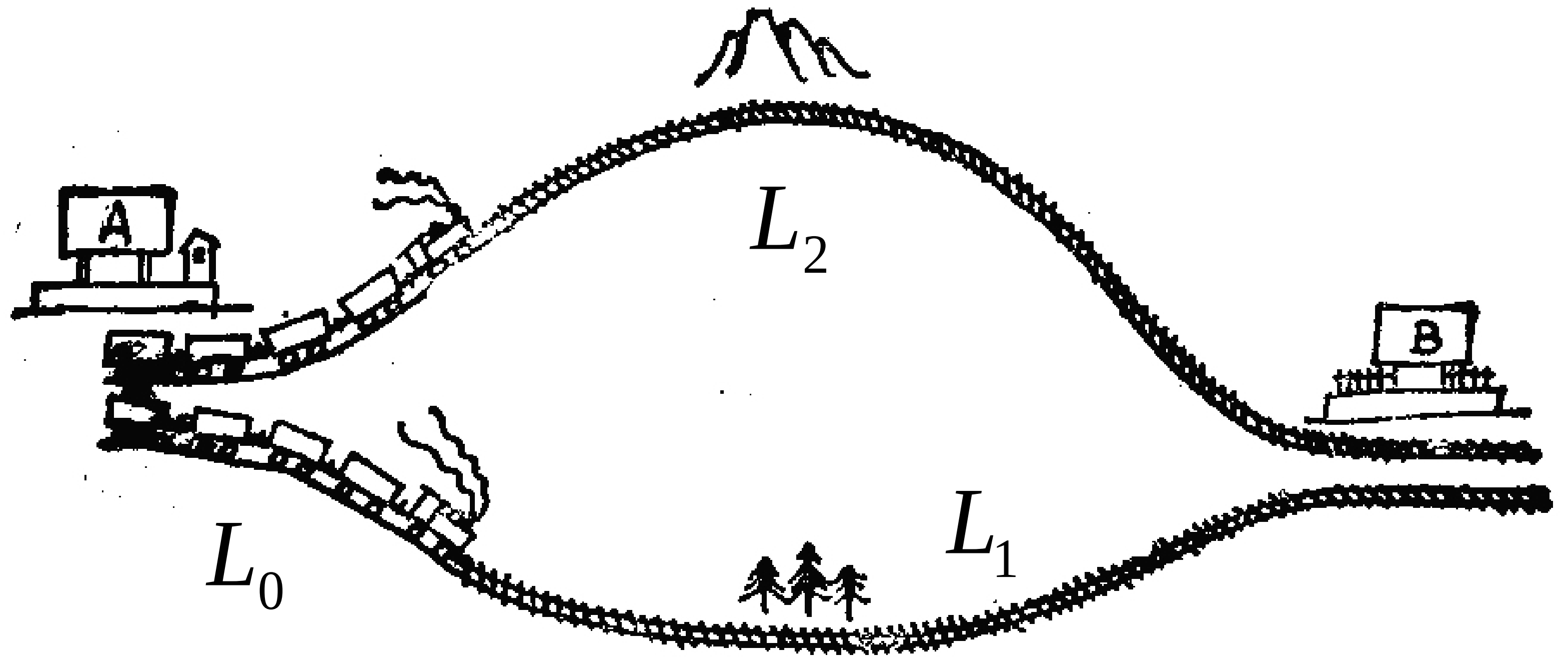
能干涉

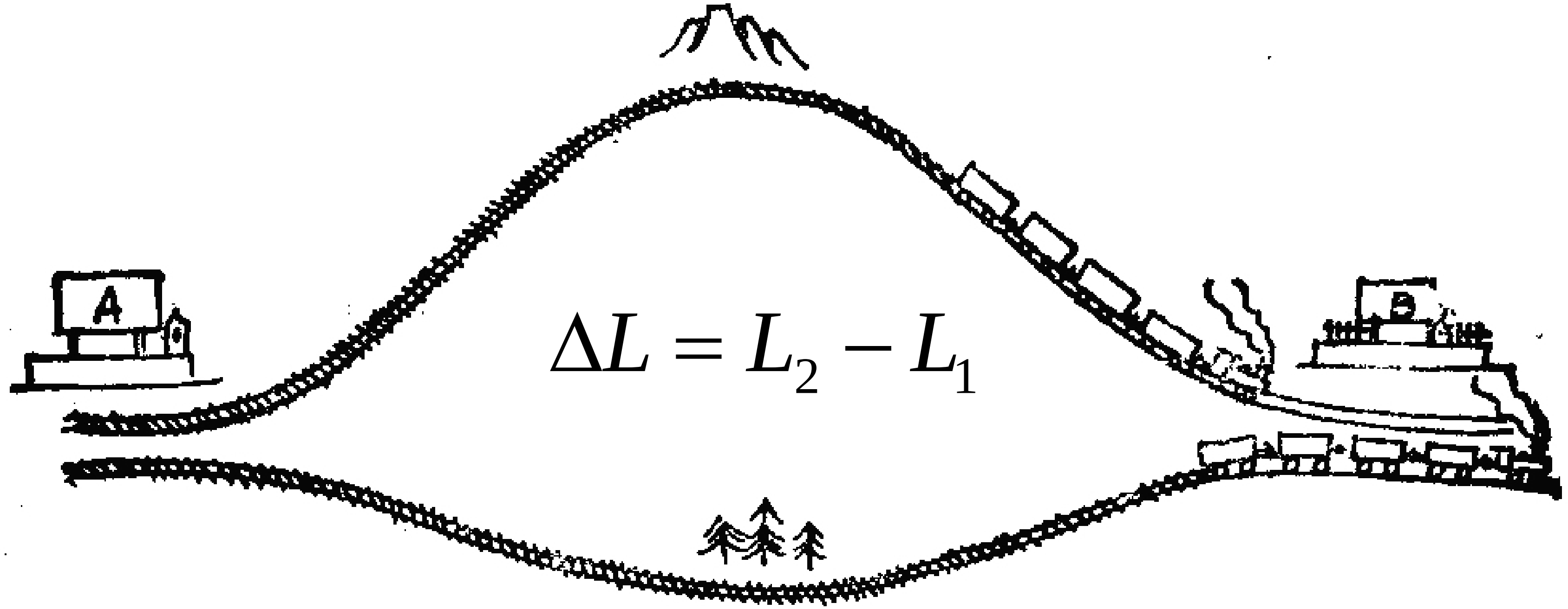


不能干涉

只有同一波列分成的两部分，经过不同的路程再相遇时，才能发生干涉。

波列长度就是相干长度：$L = \tau c = \delta_M$


A
B
L_2
L_1
L_0


A
B
$\Delta L = L_2 - L_1$

普通单色光：

$\Delta\lambda$：10^{-3} — 10^{-1} nm

δ_M：10^{-3} — 10^{-1} m

激光：

$\Delta\lambda$：10^{-9} — 10^{-6} nm

（理想情况）

δ_M：10^{1} — 10^{2} km

（实际上，一般为10^{-1}— 10^{1}m）

2、相干时间（coherent length）

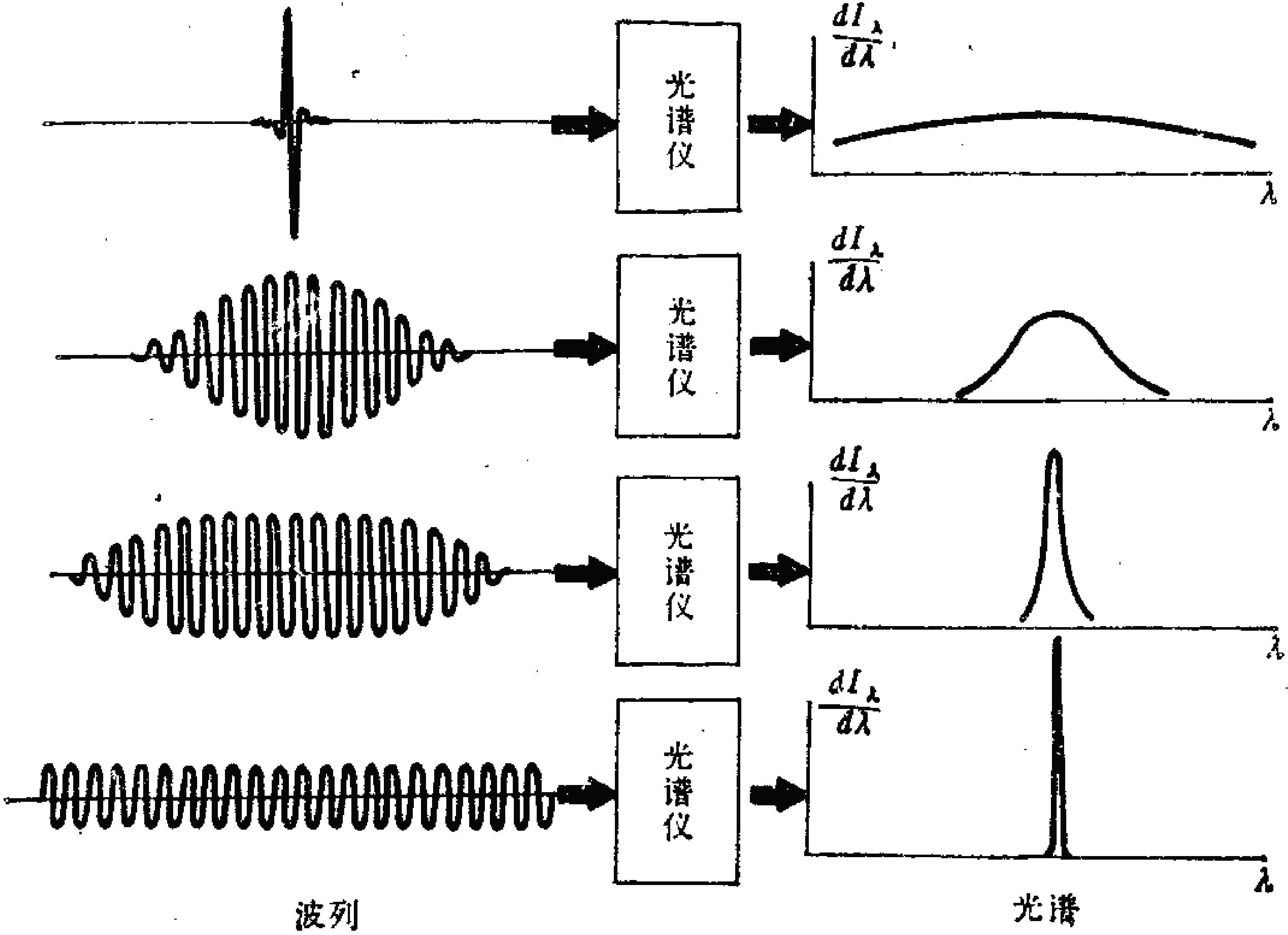
光通过相干长度所需时间叫相干时间。

相干时间 $\boxed{\tau=\dfrac{\delta_M}{c}}$ $\Delta\lambda\downarrow\rightarrow\delta_M\uparrow\rightarrow\tau\uparrow$

$$\tau\Delta\nu\approx 1$$

时间相干性的好坏， 就是用相干长度δ_M（波列长度）或相干时间τ（波列延续时间）的长短来衡量的。

光的单色性好，相干长度和相干时间就长，时间相干性也就好。


光谱仪
光谱仪
光谱仪
光谱仪
$\frac{dI_\lambda}{d\lambda}$
λ
波列
光谱

22a结束