第十三章

光学

中国矿业大学北京理学院

通常把光学分成几何光学、物理光学和量子光学

几何光学是从几个由实验得来的基本原理出发，利用光线的概念、折射、反射定律来描述光在各种媒质中传播的途径。

物理光学是从光的波动性出发来研究光在传播过程中所发生的现象的学科，所以也称为波动光学。它可以比较方便的研究光的干涉、光的衍射、光的偏振，以及光在各向异性的媒质中传播时所表现出的现象。 基础就是经典电动力学的麦克斯韦方程组。

量子光学，1900年普朗克在研究黑体辐射时，为了从理论上推导出得到的与实际相符甚好的经验公式，他大胆地提出了与经典概念迥然不同的假设，即“组成黑体的振子的能量不能连续变化，只能取一份的分立值”。

§13-1 光是电磁波

1. 电磁波

19世纪60年代，麦克斯韦建立了电磁场理论，并预言电磁波的存在。之后，赫兹从实验上证实了麦克斯韦电磁场理论的正确性。

光是电磁波。

1.1 电磁波的波源

任何振动电荷或电荷系都是发射电磁波的波源。例如，天线中振荡的电流，振荡的电偶极子等。

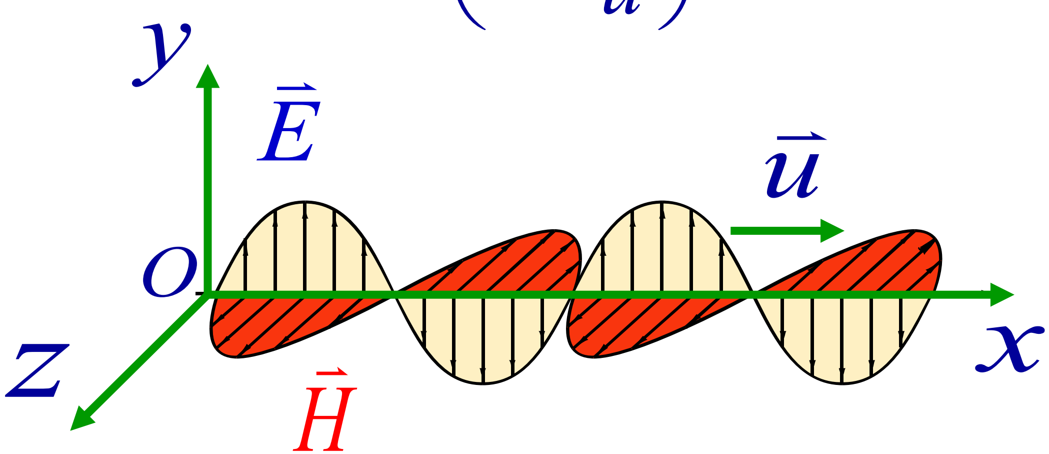
1.2 电磁波是电场强度与磁场强度的矢量波

沿x轴传播的平面电磁波电场强度和磁场强度分别表示为

$$\vec{E}(x,t)=\vec{E}_0\cos\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)$$

$$\vec{H}(x,t)=\vec{H}_0\cos\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)$$

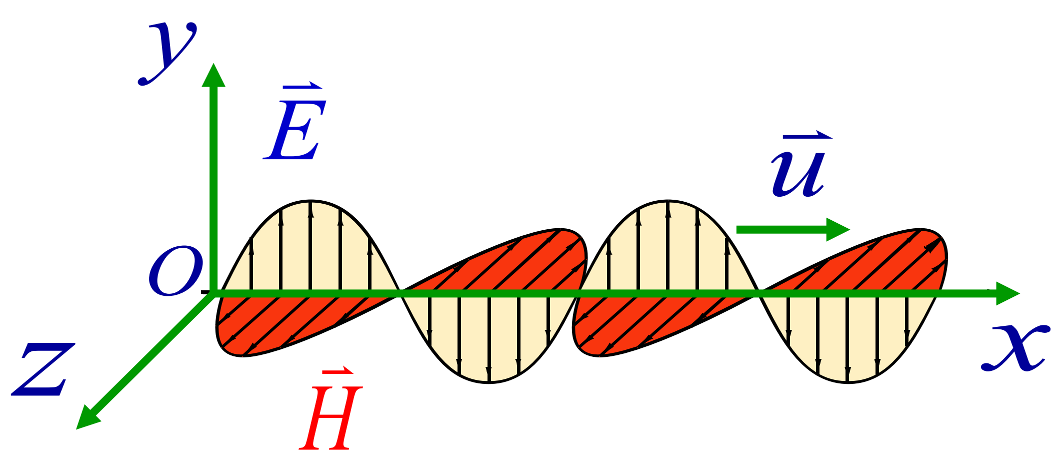
式中$\vec{E}_0$和$\vec{H}_0$分别为场矢量$\vec{E}$和$\vec{H}$的振幅，ω为电磁波的角频率，u为波速。



平面简谐电磁波的基本特性

（1）场矢量$\vec{E}$和$\vec{H}$，在同一地点同时存在，具有相同的相位，都以相同的速度传播。

（2）$\vec{E}$和$\vec{H}$，相互垂直，且都与波的传播方向垂直，$\vec{E}$、$\vec{H}$、$\vec{u}$三者满足右手螺旋关系。电磁波是横波，具有偏振性。



(3) $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 的量值满足关系

$$\sqrt{\varepsilon}E = \sqrt{\mu}H$$

(4) 波速 $u = \sqrt{\dfrac{1}{\varepsilon\mu}}$

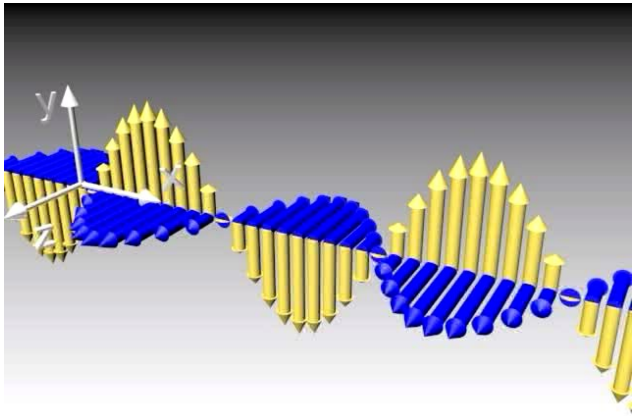
真空中 $c = (\varepsilon_0\mu_0)^{-1/2} = 2.9979\times10^{8}\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$

(5) 非强磁性介质的折射率

$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\varepsilon_r\mu_r} \approx \sqrt{\varepsilon_r}$$

电磁波的能量

在各向同性介质中，电磁能量传播方向与波速方向相同。



能量密度 $w=\frac{1}{2}\varepsilon E^2+\frac{1}{2}\mu H^2$

能流密度（坡印亨矢量） $\vec{S}$

大小 $S=wu=\frac{1}{2}(\varepsilon E^2+\mu H^2)\sqrt{\frac{1}{\varepsilon\mu}}=HE$

坡印亨矢量 $\vec{S}=\vec{E}\times\vec{H}$

平均能流密度（波的强度 I）

$$I=\overline{S}=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}S\mathrm{d}t$$

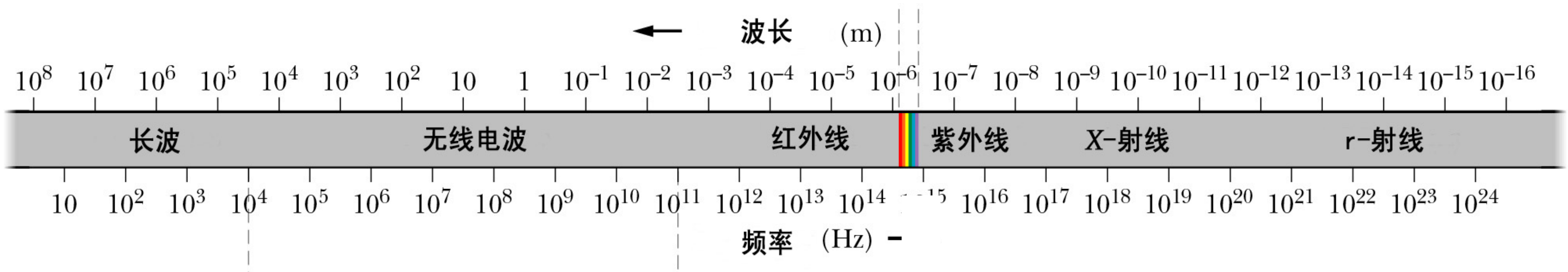
$$=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}E_0H_0\cos^2\omega(t-\frac{r}{u})\mathrm{d}t=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}E_0^2$$

平均能流密度正比于 E_0^2，通常采用其相对强度

$$I=\frac{1}{2}E_0^2$$

2. 光是电磁波

实验和电磁波理论表明，光是电磁波。



可见光的波长和频率范围

光色	波长(nm)	频率(Hz)	中心波长 (nm)
红	760~622	$3.9\times10^{14}\sim4.8\times10^{14}$	660.0
橙	622~597	$4.8\times10^{14}\sim5.0\times10^{14}$	610.0
黄	597~577	$5.0\times10^{14}\sim5.4\times10^{14}$	570.0
绿	577~492	$5.4\times10^{14}\sim6.1\times10^{14}$	540.0
青	492~470	$6.1\times10^{14}\sim6.4\times10^{14}$	480.0
兰	470~455	$6.4\times10^{14}\sim6.6\times10^{14}$	460.0
紫	455~400	$6.6\times10^{14}\sim7.5\times10^{14}$	430.0

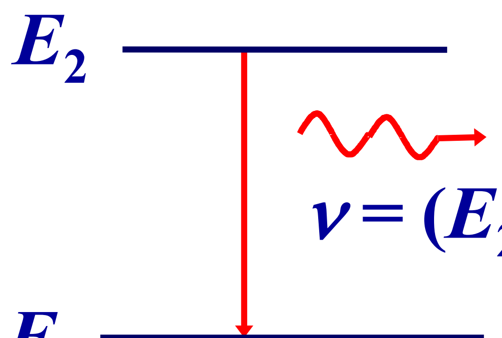
§ 13-2 光源　光的干涉

1. 光源

发射光波的物体称为光源

光源的最基本发光单元是分子、原子。

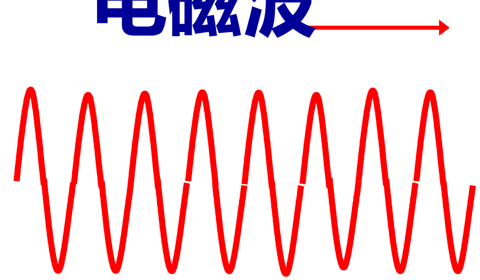
能级跃迁辐射



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

ν为光波频率

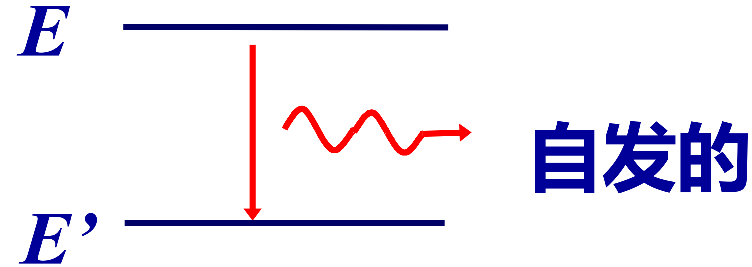
电磁波

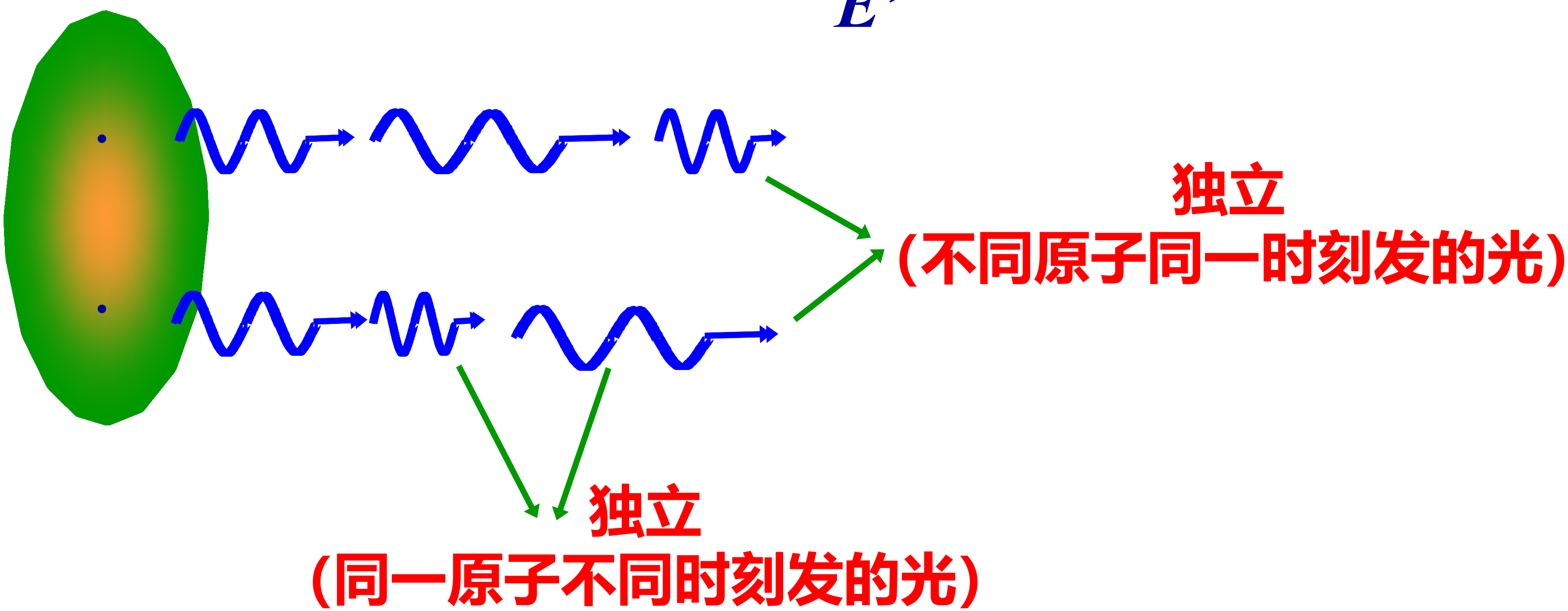


波列长 $L = \tau c$

光源分类

普通光源： 自发辐射

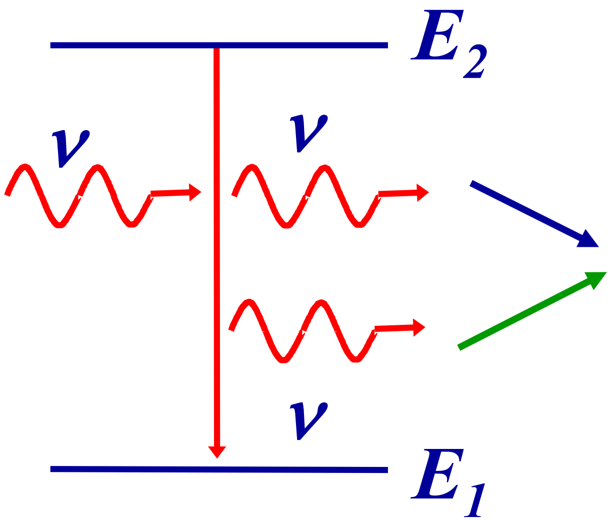




光源分类

激光光源：受激辐射

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



完全一样(频率、位相、振动方向,传播方向)

单色光与复色光

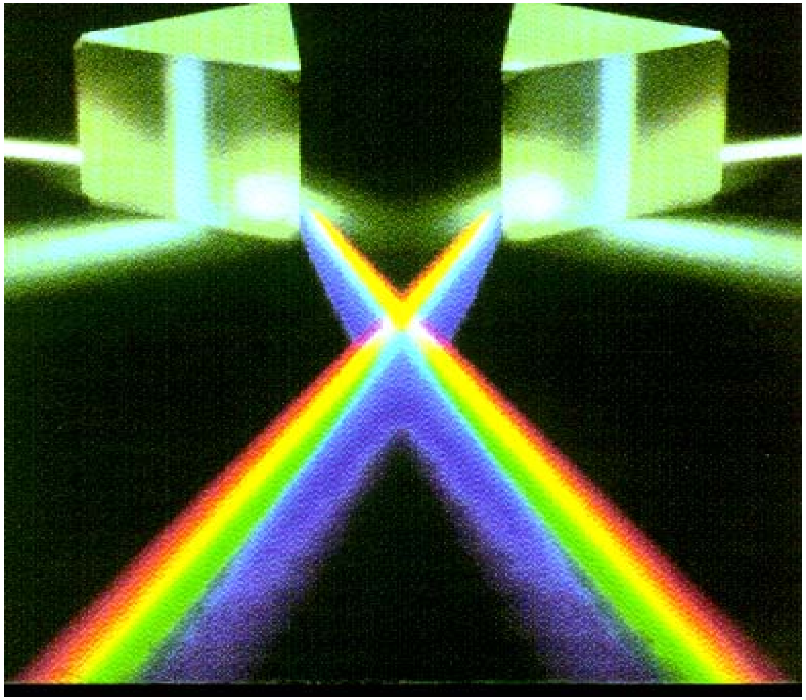
4.3×10^{14}HZ
（7600Å）

7.5×10^{14}HZ
（4000Å）

单色光：具有单一频率的光波称为单色光。

复色光：不同频率单色光的混合光。

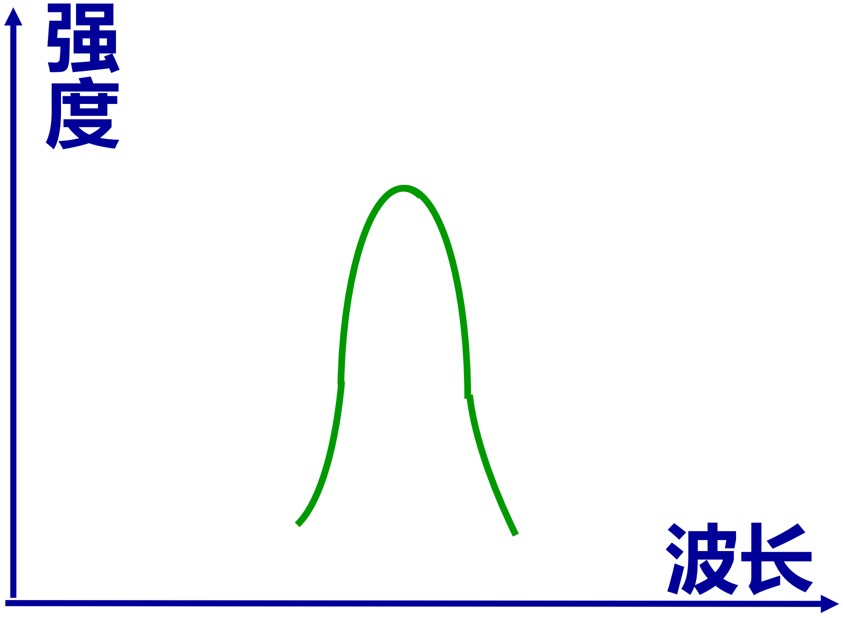
自然界中的复色光



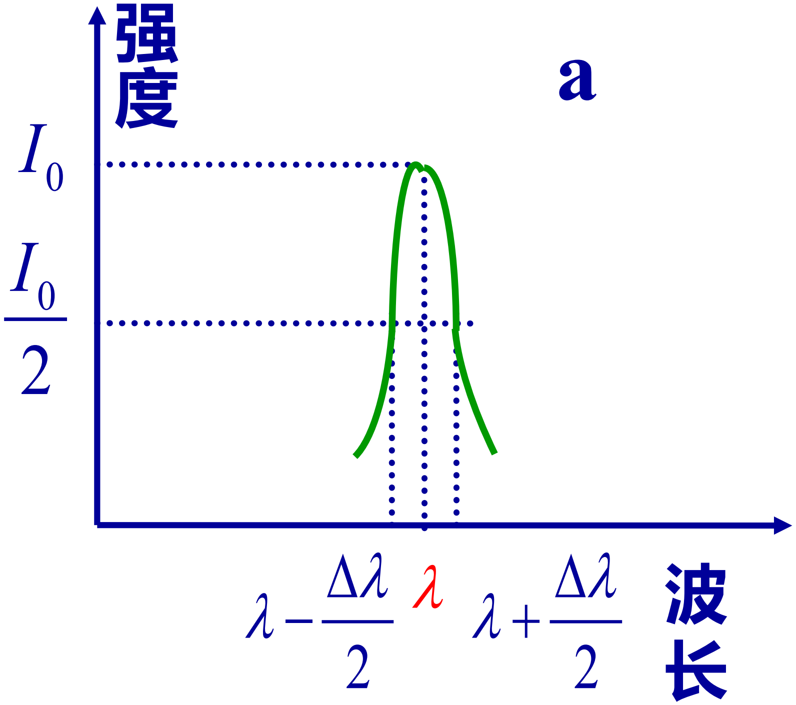
光谱曲线

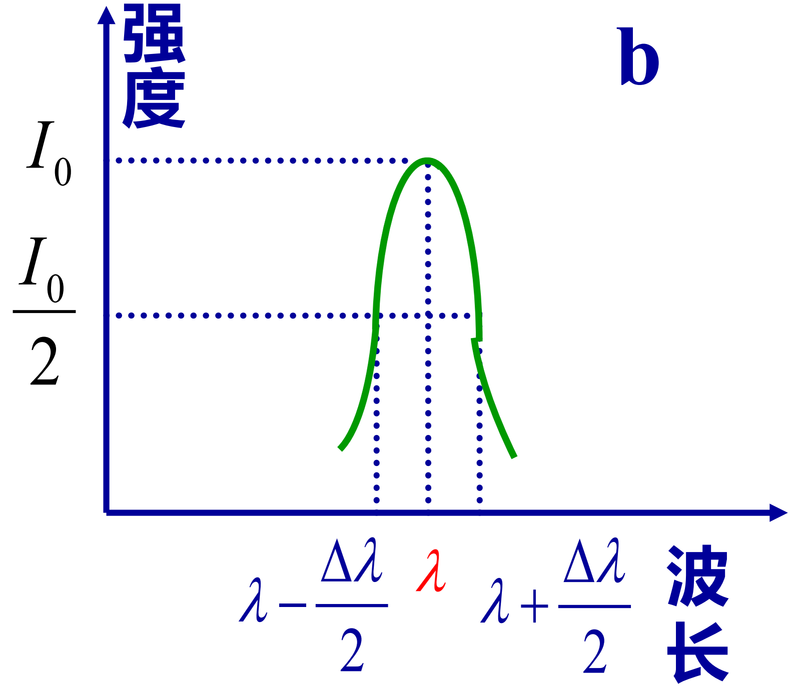
- 严格意义上的单色光并不存在，光波具有一定的频率范围。

光谱曲线（谱线）：以波长（或频率）为横坐标，强度为纵坐标，可以直观的表示出强度与波长（或频率）关系的曲线。



单色性与谱线宽度

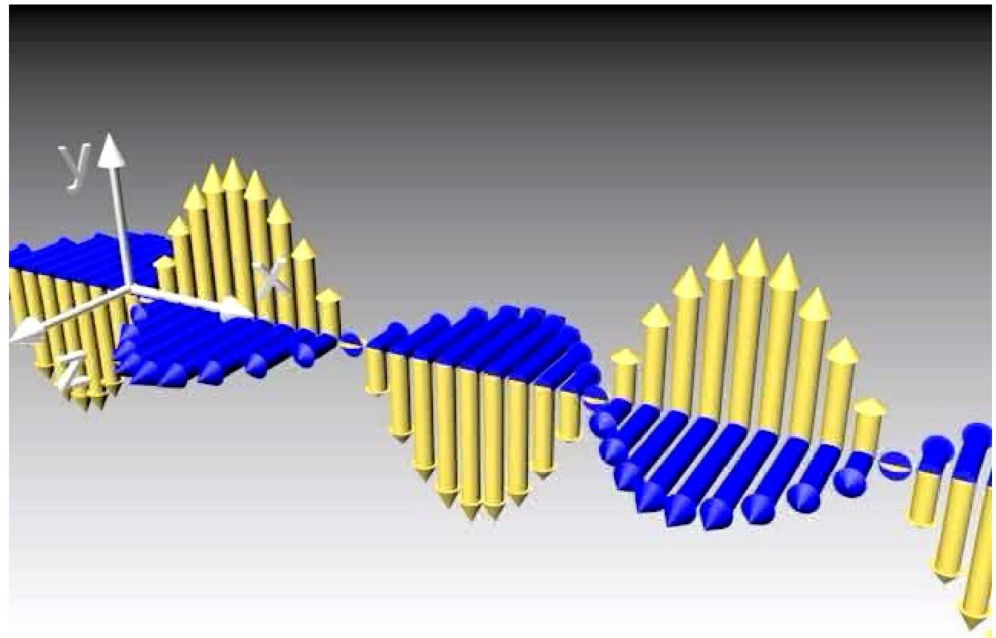




- **谱线宽度：光强为$I_0/2$两点间的波长范围** $\Delta\lambda$

2. 光波的叠加

光波的描述



光波是传播着的交变电磁场，E与H的传播。

能引起视觉以及光化学反应的是电场分量E。

光矢量（电矢量）

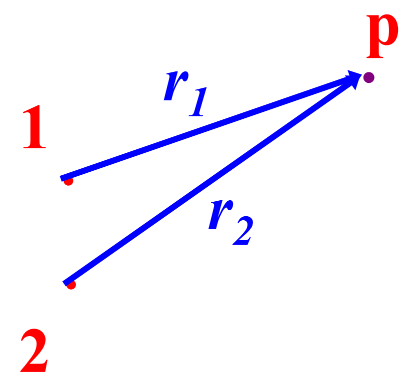
电场分量E

$$E = E_0 \cos\omega(t - \frac{x}{c})$$

$$I \propto E_0{}^2$$

相干光

光波中的电振动矢量 $\vec{E}$ 称为光矢量。



两列光波的叠加

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega$$

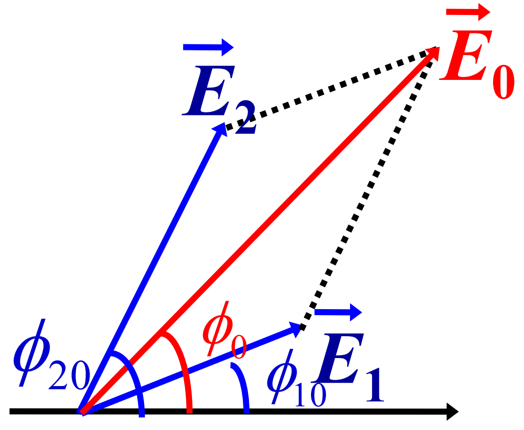
P:

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

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

$$E = E_1 + E_2 = E_0\cos(\omega t + \phi_0)$$

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



其中：$\Delta\phi = \phi_{20} - \phi_{10}$

相长干涉或相消干涉的条件

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

- **相长干涉（明）**

$$\Delta\phi = \pm 2k\pi,\ \cos\Delta\phi = 1$$

$$(k = 0,1,2,3\ldots)$$

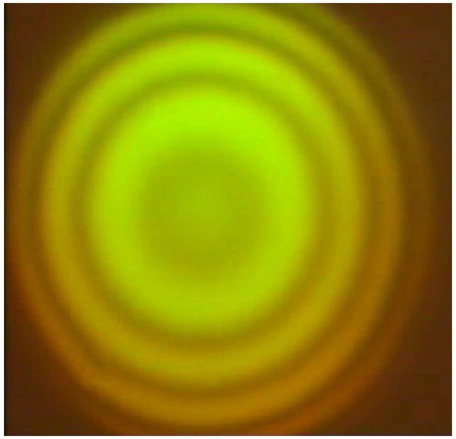
$$I = I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

- **相消干涉（暗）**

$$\Delta\phi = \pm(2k+1)\pi,\ \cos\Delta\phi = -1$$

$$(k = 0,1,2,3\ldots)$$

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



干涉图

结论：

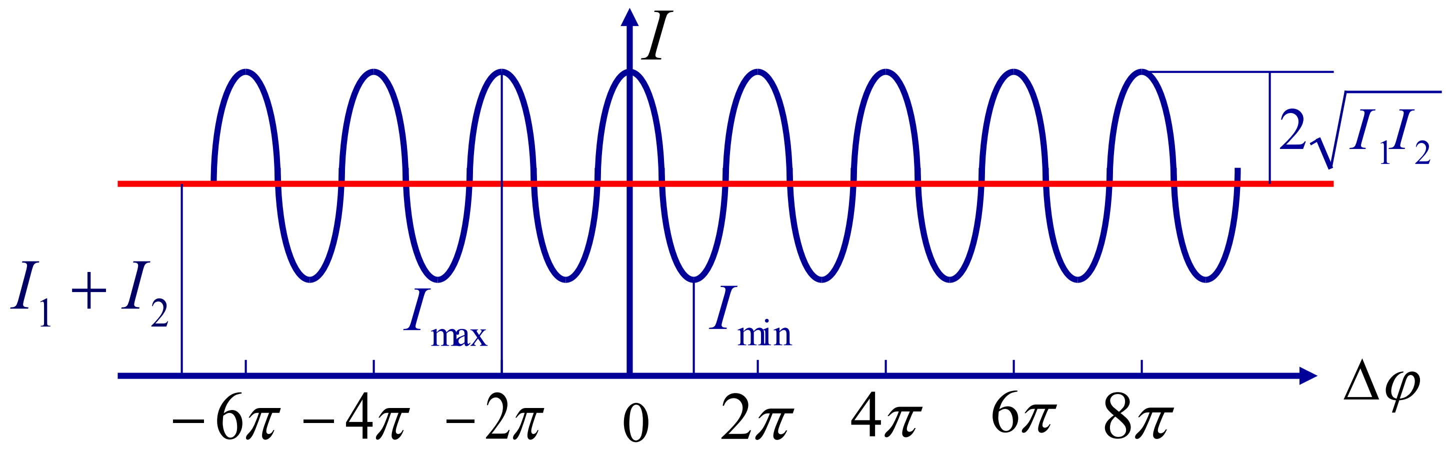
相干条件： **频率相同，振动方向相同，相位差恒定。**

干涉判据：

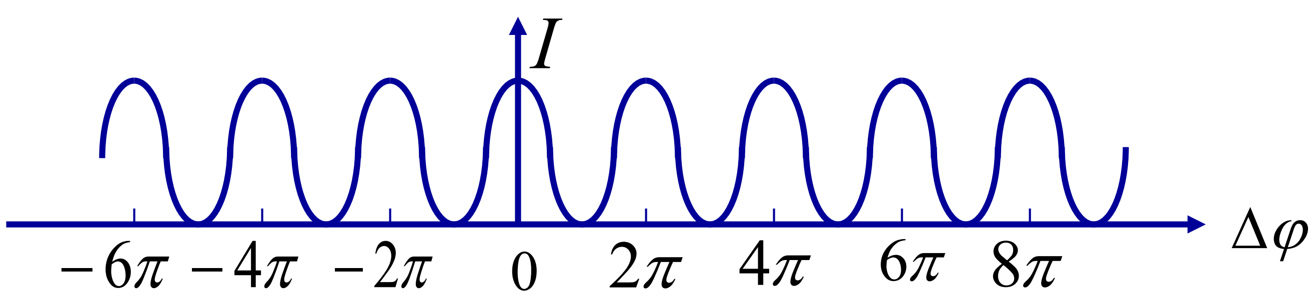
$$\Delta\phi = \begin{cases} \pm 2k\pi, k = 0,1,2,\ldots(\text{干涉加强}) \\ \pm\left(2k+1\right)\pi,\ \ k = 0,1,2,\ldots(\text{干涉减弱}) \end{cases}$$

干涉现象的光强分布

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



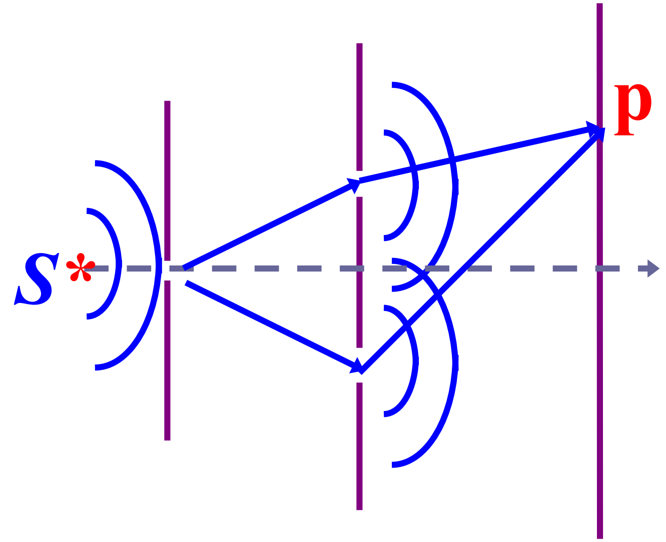
$I_1 = I_2$ $\qquad I = 4I_1\cos^2(\Delta\varphi/2)$



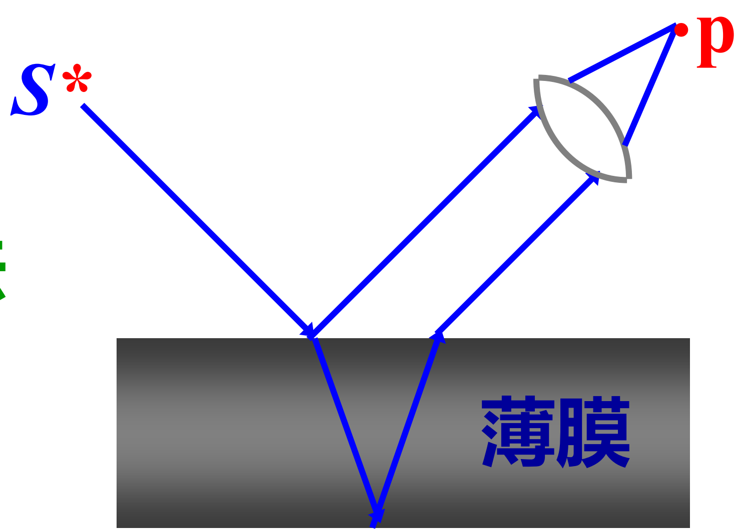
§ 13-3 获得相干光的方法　双缝干涉

相干光的获得方法

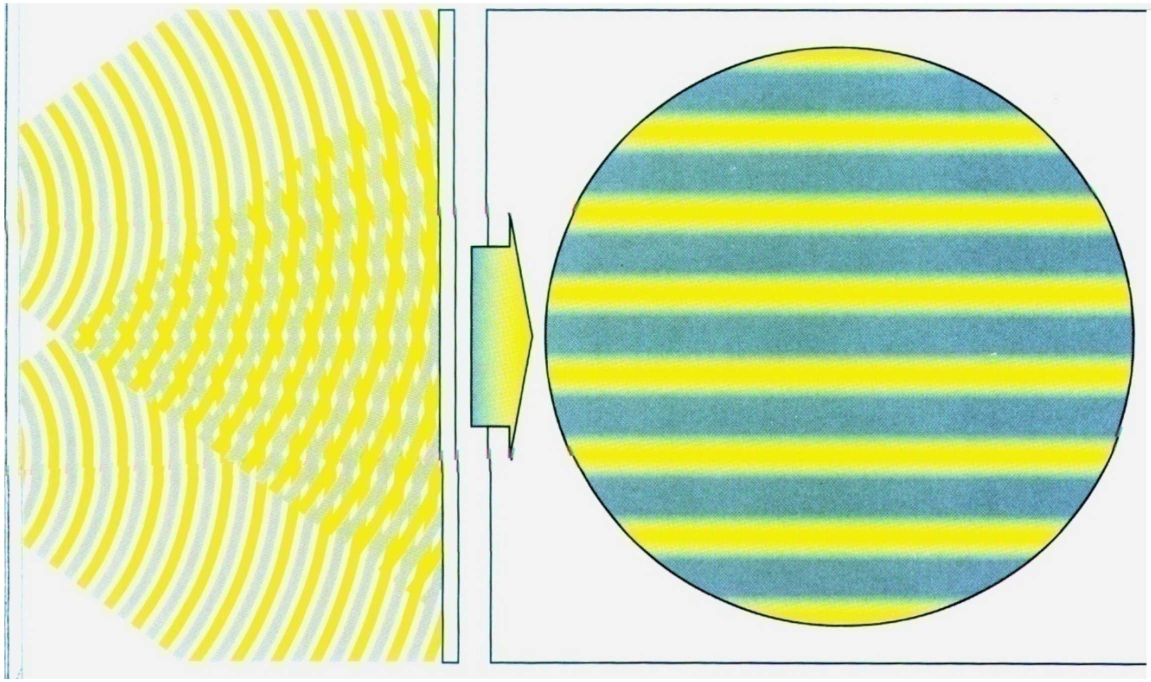
分波面法



分振幅法



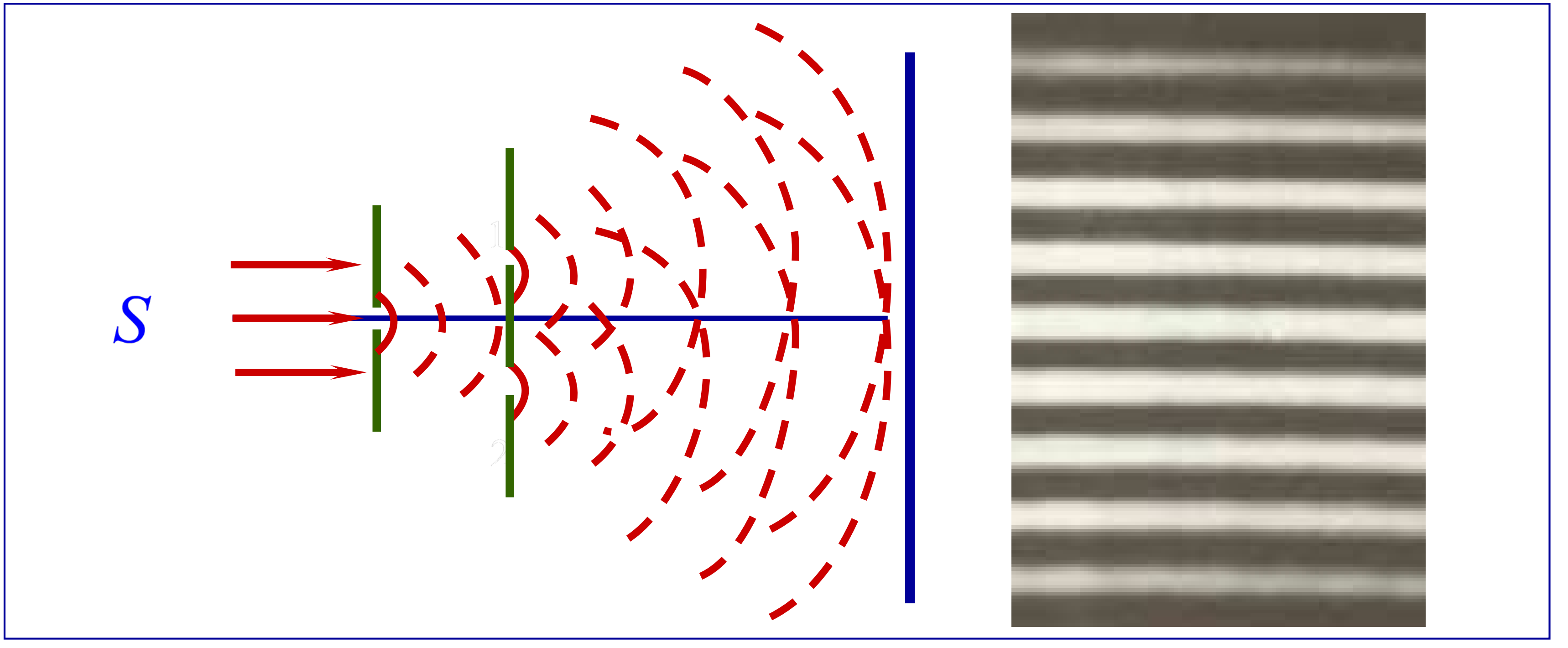
1．杨氏双缝实验



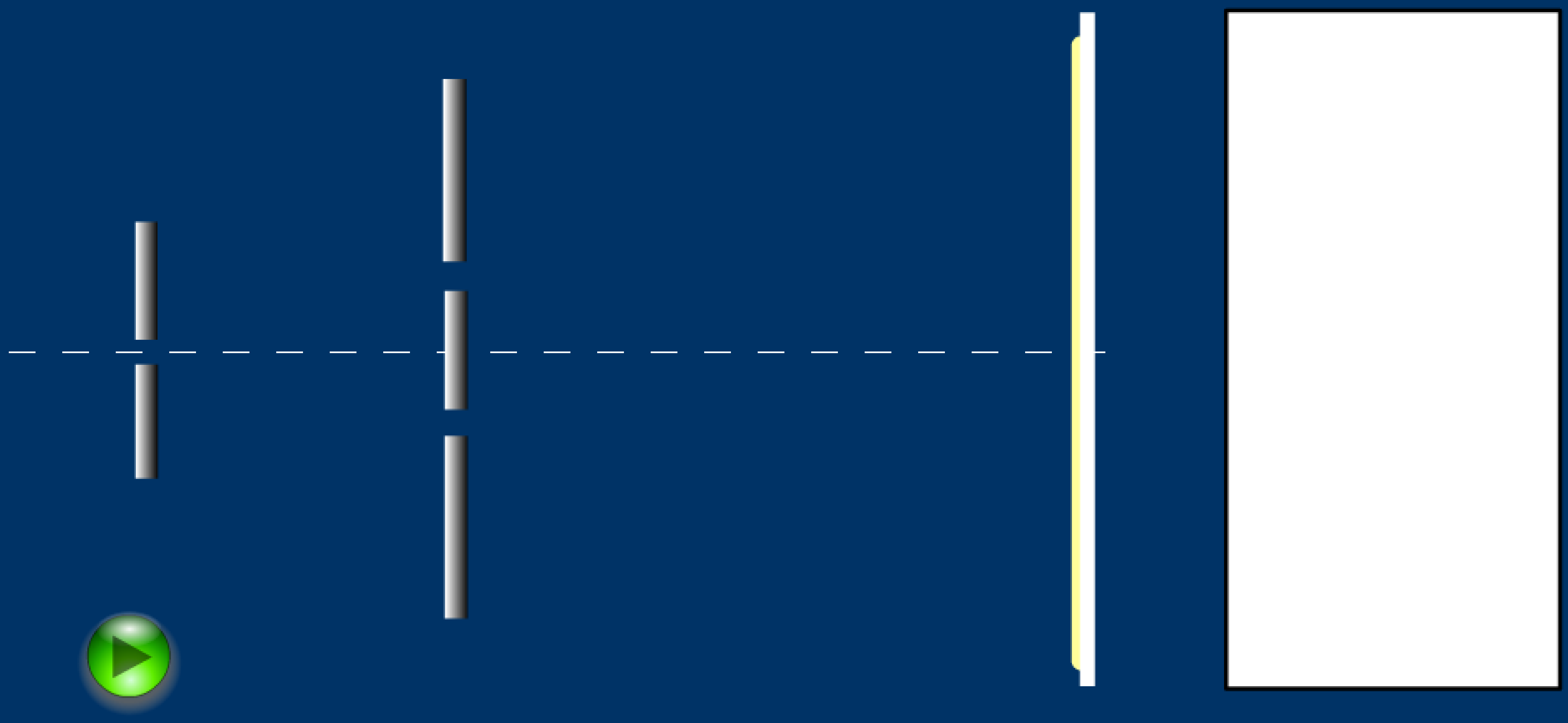
托马斯· 杨

1801年他进行了著名的杨氏双缝实验，证明光以波动形式存在，而不是牛顿所想象的光颗粒（Corpuscles），该实验被评为“物理最美实验”之一。

1.杨氏双缝干涉实验

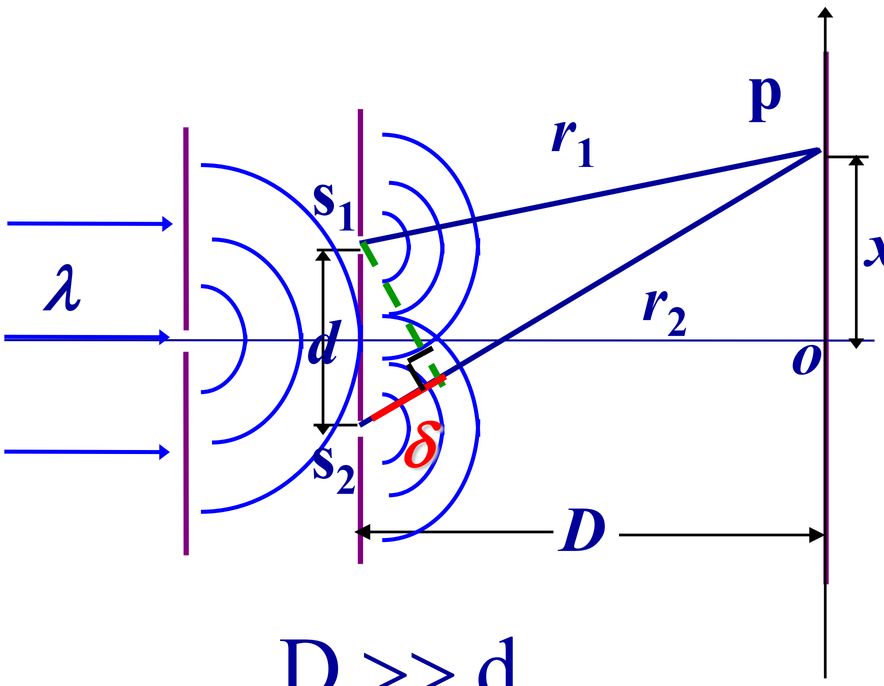


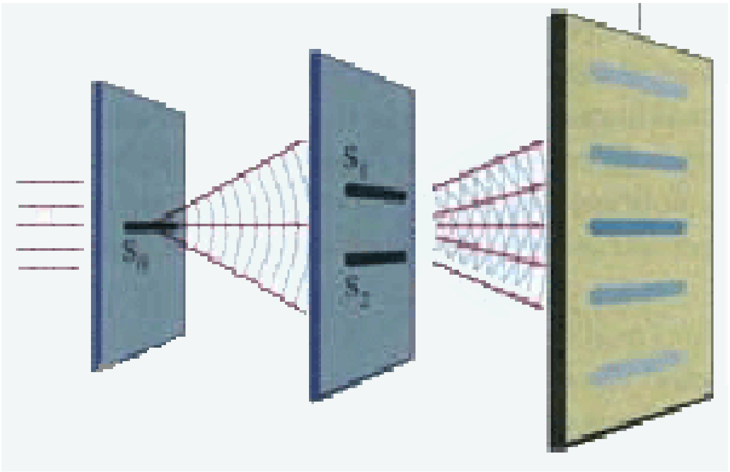
S_1、S_2 是同一光源 S 形成的，振动方向相同、频率相同、相位差恒定，满足相干条件，产生干涉现象。



双缝干涉

相干光的获得：分波阵面法





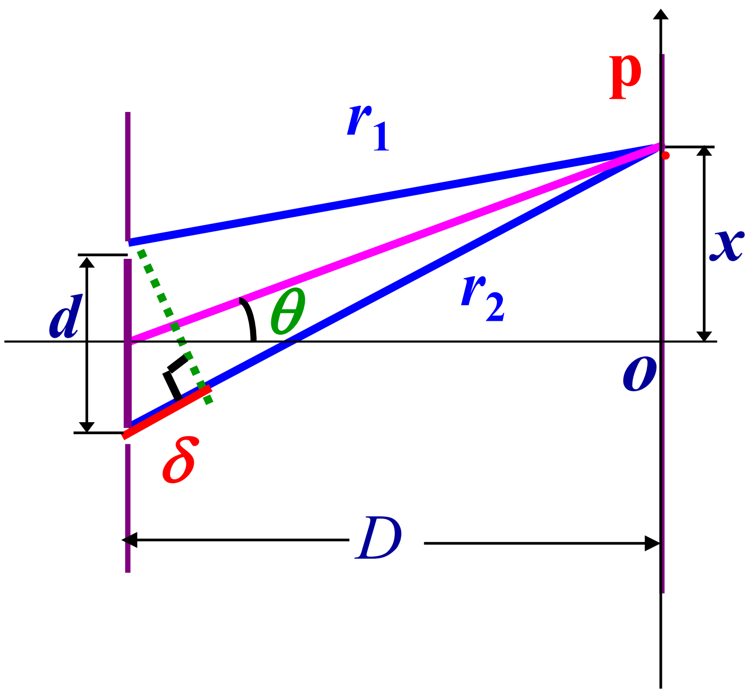
$$D >> d$$

$$\delta \Rightarrow \Delta\varphi$$

干涉明暗条纹

设实验在真空（或空气）中进行，则波程差为：

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

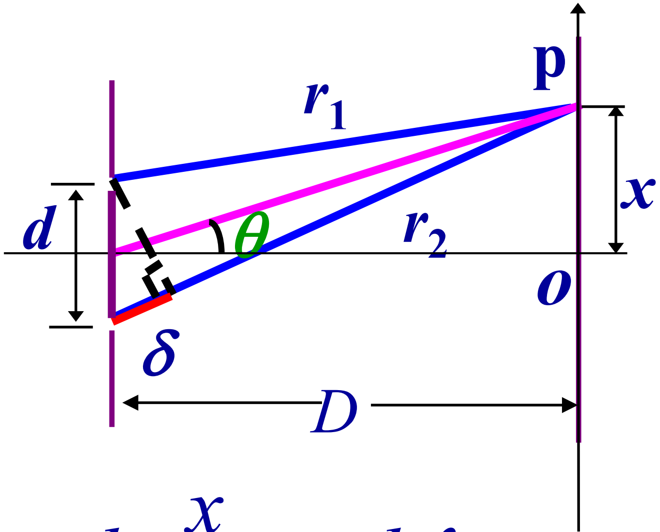


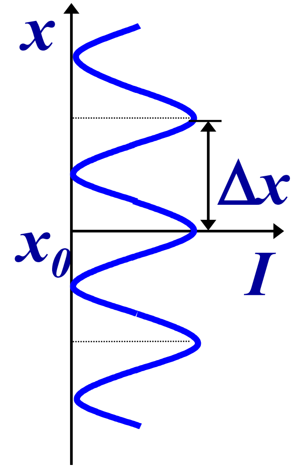
干涉相长的条件

$$\delta = d\cdot\frac{x}{D} = \pm k\lambda$$

干涉相消的条件

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





思考：

若用白光辐照……

$$\delta = d \cdot \frac{x}{D} = \pm k\lambda$$

明纹（中心）位置

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

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

暗纹（中心）位置

$$x_{暗} = \pm(k+\frac{1}{2})\frac{D}{d}\lambda \text{ ,k} = 0,1,2\ldots$$

两相邻明纹（或暗纹）间距

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