

大学物理

张磊 (13072919527)

B824, Cyrus Tang Building

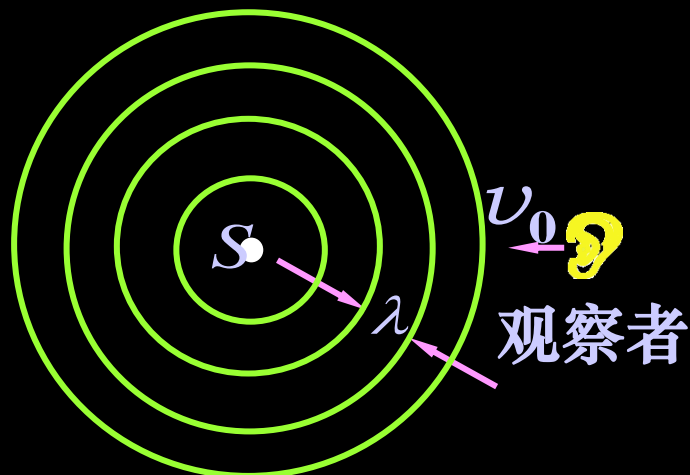


机械波的多普勒效应

1. 波源静止，观察者运动

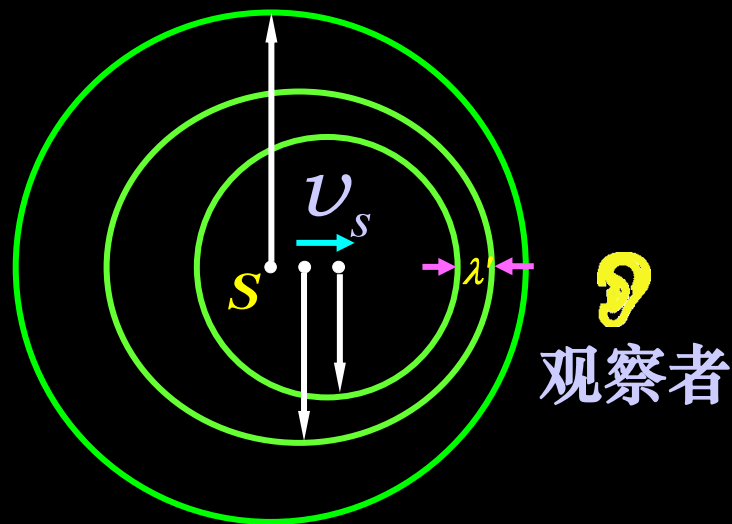
$$f = (1 + \frac{v_o}{u}) f_0$$

靠近 $v_o > 0$ 远离 $v_o < 0$



2. 波源运动，观察者静止

$$f = \frac{u}{\lambda'} = \frac{u}{u - v_s} f_0$$



3. 波源和观察者同时运动

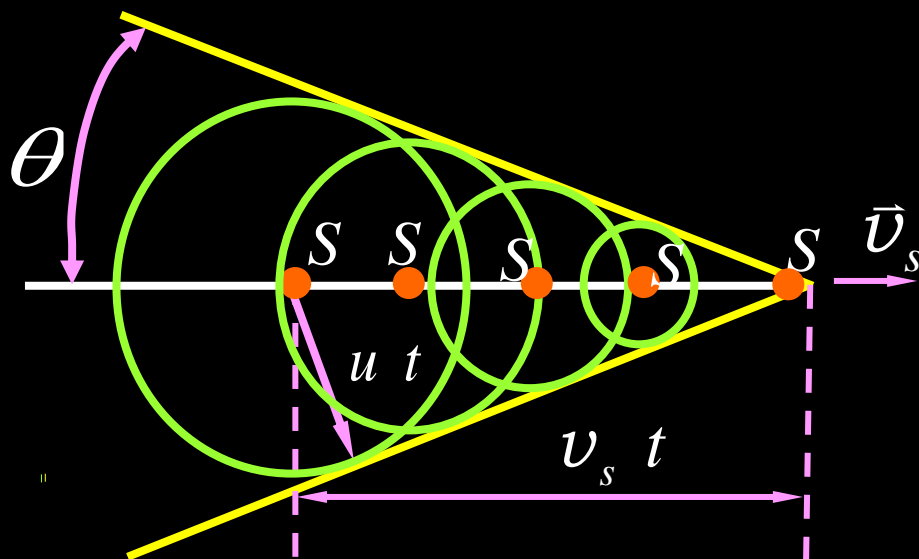
$$f = \frac{u + v_o}{\lambda - v_s T} = \frac{u + v_o}{u - v_s} f_0$$

靠近 $v_s > 0$;

远离 $v_s < 0$

冲击波（激波）

$v_s > u$ 时，多普勒效应失去意义，此时形成冲击波。



马赫角

$$\sin \theta = \frac{u}{v_s}$$



后发出的波面将超越先发出的波面，形成锥形波阵面

第14章 波动光学基础



北极光

光本质的两种学说



微粒学说

光是粒子流，由发光物体发出并遵循力学规律

波动学说

光是机械波，在弹性介质“以太”中传播

光的本性

- 光的电磁理论 — **波动性**：干涉、衍射、偏振
- 光的量子理论 — **粒子性**：黑体辐射、光电效应、康普顿效应

光学的分类

- **几何光学**

以光的直线传播和反射、折射定律为基础，研究光学仪器成象规律。

- **物理光学**

以光的波动性和粒子性为基础，研究光现象的基本规律

➤ **波动光学** —— 光的波动性：研究光的传输规律及其应用的学科

➤ **量子光学** —— 光的粒子性：研究光与物质相互作用规律及其应用的学科

§14.1 光是电磁波

1. 电磁波的产生及传播

凡作加速运动的电荷或电荷系都是发射电磁波的波源。

例如：天线中的振荡电流 分子或原子中电荷的振动

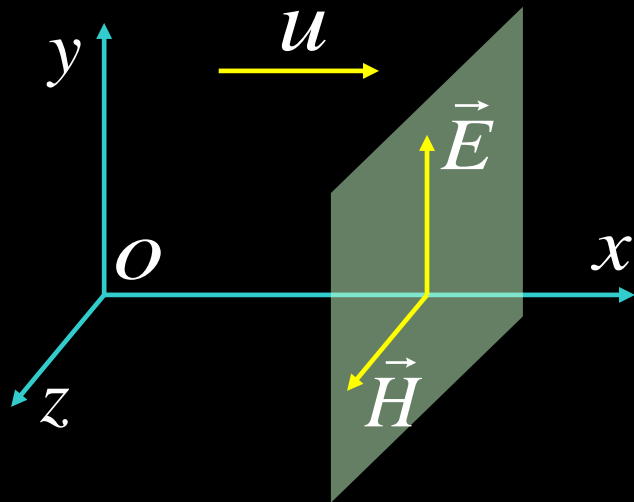
$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\varphi_m}{dt} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$$

变化磁场可以激发涡旋电场

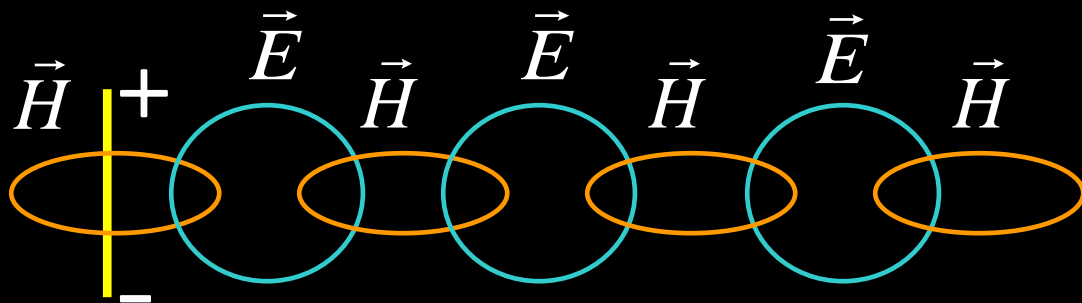
传导电流和变化电场可以激发涡旋磁场

设真空中一平面电磁波



电磁波是矢量波(横波)

电磁波 = 交变电磁状态的传播



变化的电场产生磁场，变化的磁场产生电场，交替变化，由近及远地传播出去，形成电磁波。

由麦克斯韦理论可得：

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

同理：

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

当电场振动沿 x 轴正向传播 \rightarrow 平面简谐波

$$\left. \begin{aligned} E &= E_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) \right] \\ H &= H_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) \right] \end{aligned} \right\} H_0 = \frac{E_0}{\mu_0 u} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0$$

• 在真空中： $u = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s} = c$

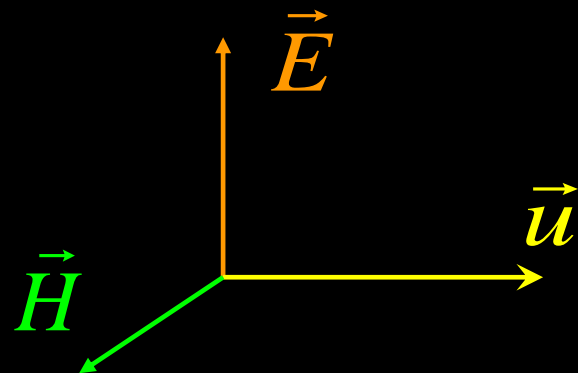
折射率

• 在介质中： $u = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r} = c/\sqrt{\varepsilon_r \mu_r} = c/n < c$

2. 电磁波的性质☆

(1) 电磁波是横波

振动量 \vec{E} , \vec{H} 与波速 \vec{u} 构成相互垂直的右手螺旋关系。

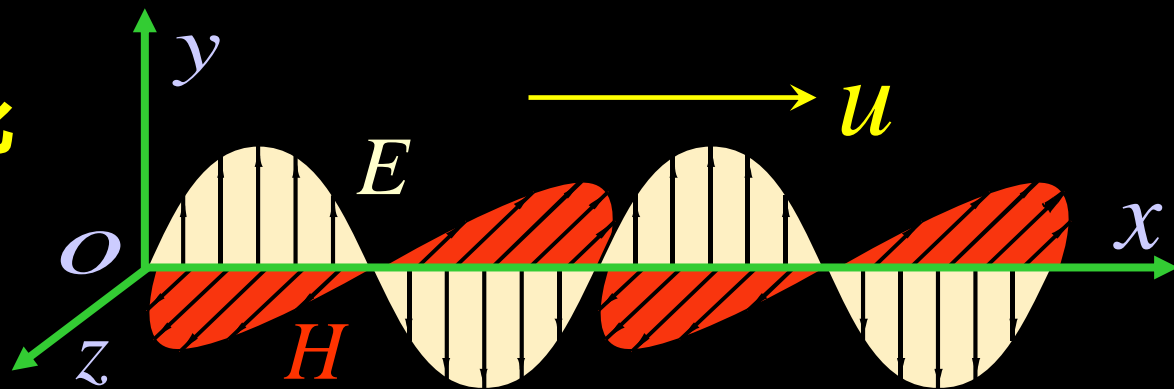


(2) 电磁波的偏振性

\vec{E} , \vec{H} 分别在各自的平面上振动。

(3) 电场与磁场同相变化

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



(4) 电磁波的能量

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad w_m = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad w = w_e + w_m$$

光是电磁波 —— 矢量横波，交变电磁状态的传播

(1) 电磁波是横波

振动量 \vec{E}, \vec{H} 与波速 \vec{u} 构成相互垂直的右手螺旋关系。

(2) 电磁波的偏振性

\vec{E}, \vec{H} 分别在各自的平面上振动。

$$\begin{cases} E = E_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) \right] \\ H = H_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) \right] \end{cases}$$

(3) 电场与磁场同相变化

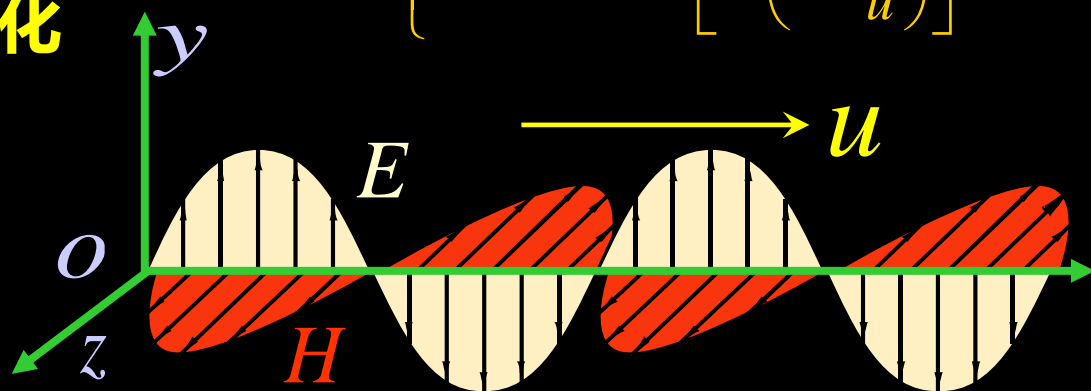
$$\sqrt{\epsilon} E = \sqrt{\mu} H$$

(4) 电磁波的能量

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

$$w_m = \frac{1}{2} \mu H^2$$

$$w = w_e + w_m$$



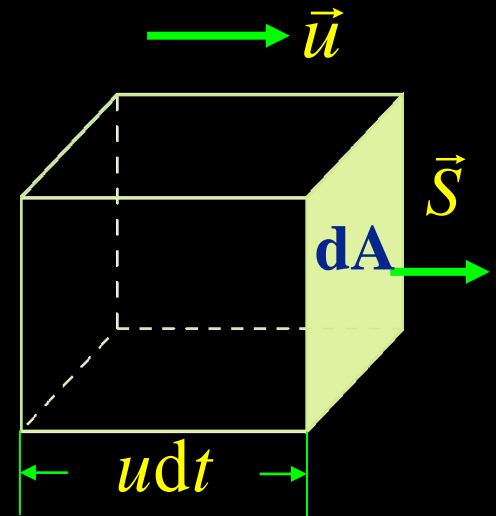
能流密度 \vec{S} (坡印亭矢量)

$$S = \frac{dA \cdot u dt \cdot w}{dA \cdot dt} = uw \quad \sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$$

$$= \frac{1}{2}(\epsilon E^2 + \mu H^2) \sqrt{\frac{1}{\epsilon\mu}} = EH$$

坡印亭矢量

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$



波的强度 I $I = \bar{S} = \langle S \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} S dt$

$$= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} E_0 H_0 \cos^2 \omega \left(t - \frac{r}{u} \right) dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0^2$$

$$\Rightarrow I \propto E_0^2$$

★ 结论: I 正比于 E_0^2 或 H_0^2 , 通常用其相对强度 $I = \frac{1}{2} E_0^2$ 表示

电磁波谱

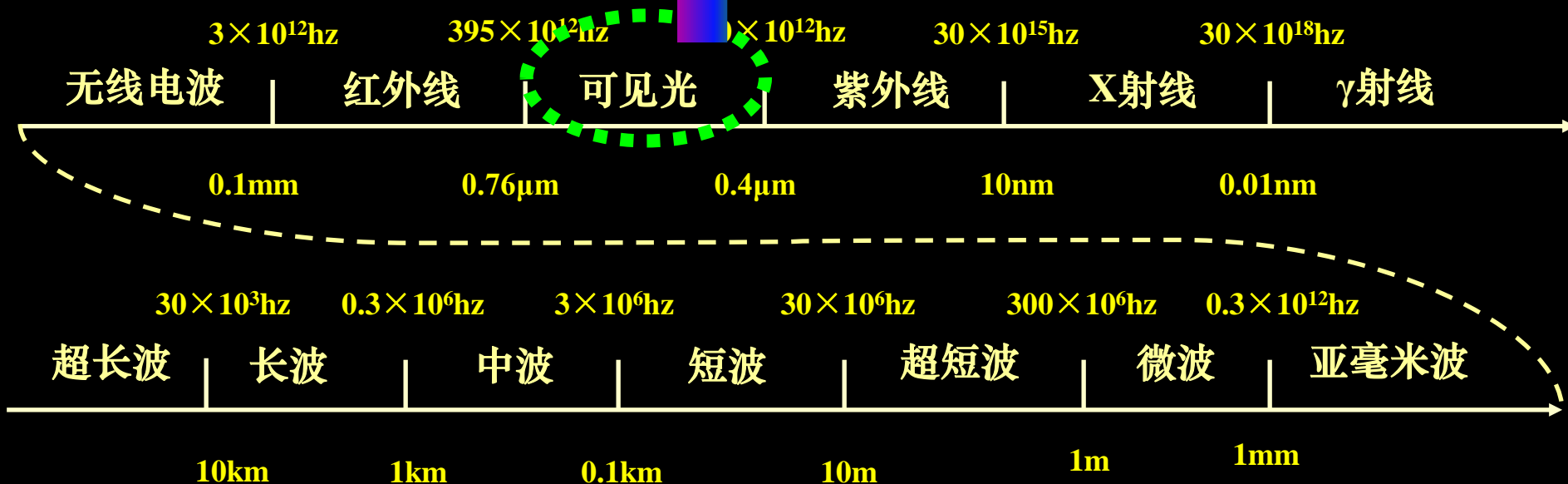
电磁波具有各种频率：无线电，微波，红外线，可见光，紫外线，…………

- 可见光 (visible light) —— 能够引起人的视觉的电磁波。

$$7.60 \times 10^{-7} \sim 3.90 \times 10^{-7} m$$

$$\Rightarrow 760 \sim 390 nm$$

人的颜色感觉和
可见光频率有关



实验证明：引起人视觉和化学效应的电磁波是**电场强度矢量**，所以也常将电场强度矢量称为**光矢量**。

3. 光是电磁波

◆诸多的现象和理论研究表明：光是电磁波。

(1)光与电磁波的传播速度相等；有反射，折射，干涉，衍射，偏振性质。

(2)用电磁波理论研究光学现象的结果也说明光是电磁波。

◆可见光七彩颜色的波长和频率范围

光色	波长(nm)	频率(Hz)	中心波长 (nm)
红	760~622	$3.9 \times 10^{14} \sim 4.8 \times 10^{14}$	660
橙	622~597	$4.8 \times 10^{14} \sim 5.0 \times 10^{14}$	610
黄	597~577	$5.0 \times 10^{14} \sim 5.4 \times 10^{14}$	570
绿	577~492	$5.4 \times 10^{14} \sim 6.1 \times 10^{14}$	540
青	492~470	$6.1 \times 10^{14} \sim 6.4 \times 10^{14}$	480
兰	470~455	$6.4 \times 10^{14} \sim 6.6 \times 10^{14}$	460
紫	455~400	$6.6 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$	430

人眼最为敏感的光是黄绿光，即 555 nm 附近。

§14.2 光源

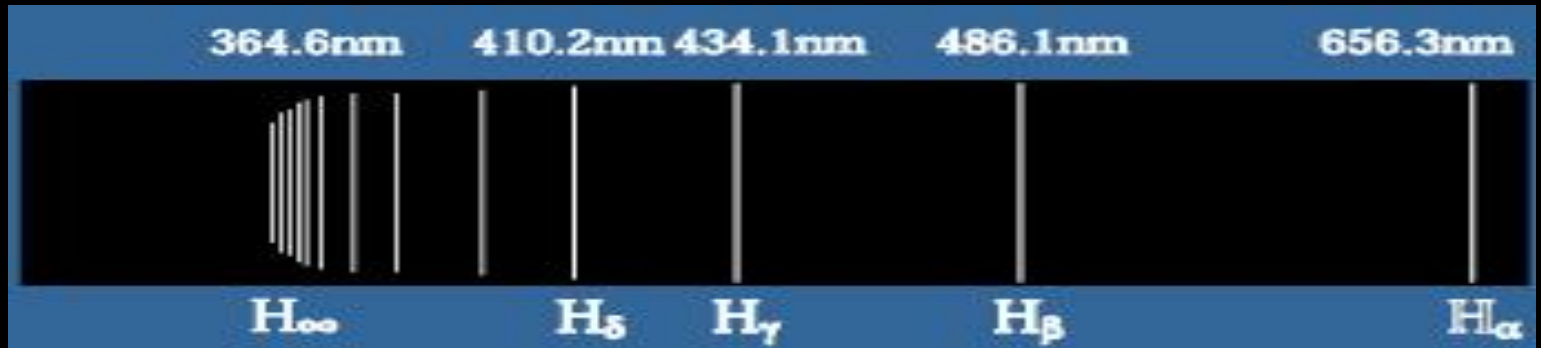
一. 光源

◆光源：任何发光的物体都可以称为光源。

◆光源的分类

按光谱分为：线谱光源 连续谱光源

(1) 线谱光源



氢原子的巴耳末线系照片

(2) 连续谱光源



按发光机理

自发光辐射

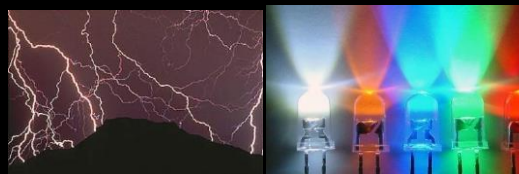
热辐射

例如：太阳，白炽灯。



电致发光

例如：闪电，霓虹灯，LED等。



光致发光

例如：日光灯，荧光、磷光物质。



化学发光

例如：燃烧，磷自燃，萤火虫等。



受激辐射

激光： 基于特定能级间粒子数反转体系的受激辐射

激光的特点：高定向性；高单色性；高亮度；高相干性。

同步辐射光： 同步加速器产生的辐射光。

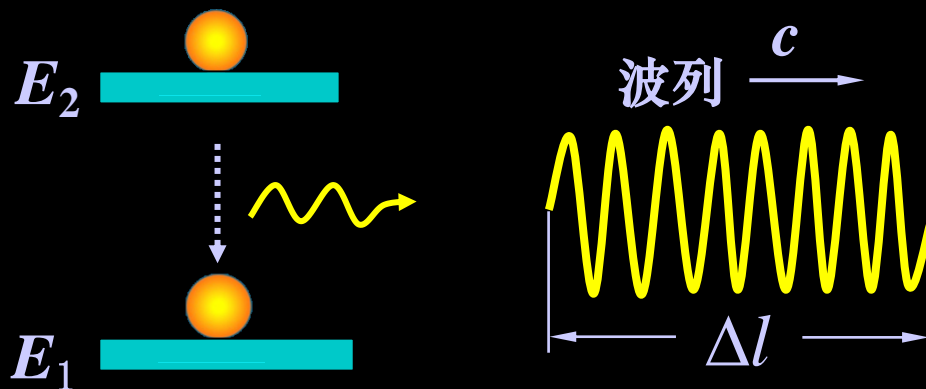
同步辐射光的特点：
强度高；方向性好；偏振性好；
稳定性好；波谱宽等。

二. 光源发光机理

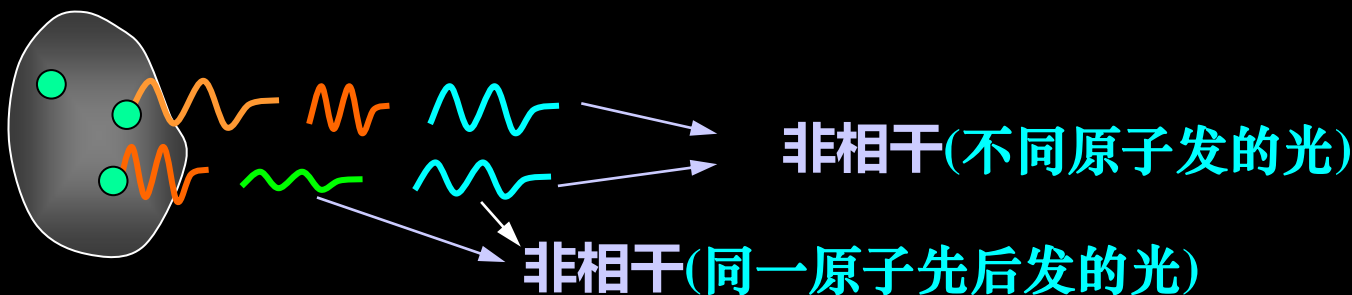
光源的最基本发光单元是分子、原子

◆ 自发辐射

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



◆ 光源中各光波列之间关系



原子的激发和辐射是彼此独立的、
随机的、间歇进行的

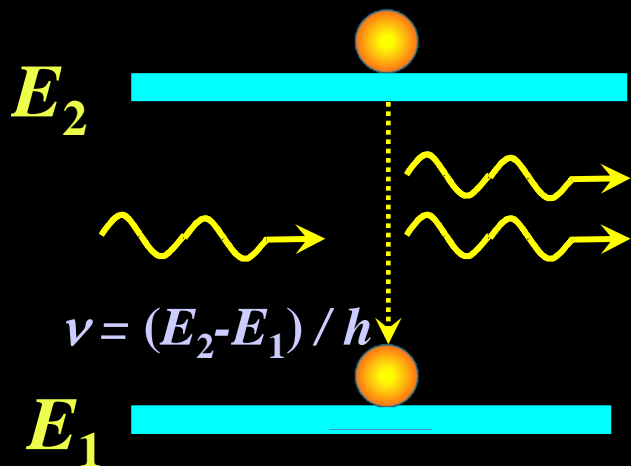


两个灯泡照明，
不会产生光强度
的稳定分布

- 一般光源的发光特点：1 间歇性； 2 随机性。

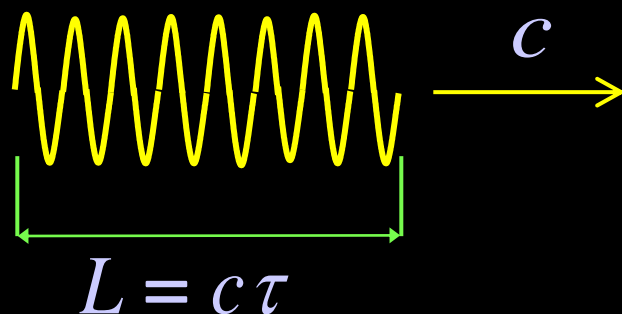
受激辐射

- 激发态原子或分子的受激辐射



完全一样
(频率 位相 振动方向 传播方向)

- 光波列 (wave train)



三. 光波的叠加

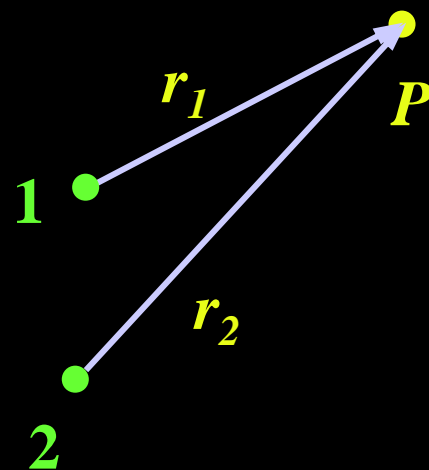
$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos(\omega_1 t - \frac{\omega_1 r_1}{c} + \varphi_1) \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \cos(\omega_2 t - \frac{\omega_2 r_2}{c} + \varphi_2)$$

$$\vec{E}_p = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad E_p^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$$

光强 $I_p = I_1 + I_2 + 2\langle E_1 \cdot E_2 \rangle$

当交叉项 $2\langle E_1 \cdot E_2 \rangle = 0 \rightarrow$ 非相干叠加

当交叉项 $2\langle E_1 \cdot E_2 \rangle \neq 0 \rightarrow$ 相干叠加



$$\begin{aligned} \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \{ & \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{\omega_1 r_1 + \omega_2 r_2}{c}] \\ & + \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{\omega_1 r_1 - \omega_2 r_2}{c}] \} \end{aligned}$$

★说明

- 光能探测器，如人眼，光电池等，对光能的响应时间比发光的弛豫时间 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 秒 长的多(如人眼的视觉暂留时间为 10^{-1} 秒)，因此它记录和探测到的光强度是一段时间的平均值。

这就是以下我们在处理问题的时候为何取平均的原因了。

- 如果探测器的光能响应时间小于原子辐射的弛豫时间，也就是说，在一段小于辐射的弛豫时间中观察，如果频率相同，当然也可以看到通常的干涉了；如果频率不相同，相差很小，产生拍的现象了。

★ 讨论

1. 非相干叠加

$$(1) \quad \vec{E}_1 \perp \vec{E}_2 \quad \longrightarrow \quad \langle E_1 \cdot E_2 \rangle = \left\langle E_1 E_2 \cos \frac{\pi}{2} \right\rangle = 0$$

$$(2) \quad \omega_1 \neq \omega_2$$

$$\frac{1}{2T} \int_t^{t+T} E_{01} \cdot E_{02} \left\{ \cos \left[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{\omega_1 r_1 + \omega_2 r_2}{c} \right] \right. \\ \left. + \cos \left[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{\omega_1 r_1 - \omega_2 r_2}{c} \right] \right\} dt = 0$$

$$\text{即 } \langle E_1 \cdot E_2 \rangle = 0$$

$$(3) \quad (\varphi_1 - \varphi_2) \text{ 不恒定} \quad \longrightarrow \quad \langle E_1 \cdot E_2 \rangle = 0$$

$$\text{非相干叠加时 } I_P = I_1 + I_2$$

2. 相干叠加 (重点掌握)

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi \quad \Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 - \frac{\omega(r_1 - r_2)}{c}$$

(1) 相长干涉 (明) $\Delta \varphi = \pm 2k\pi$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

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

如果 $I_1 = I_2 = I_0 \longrightarrow I = 4I_0$

(2) 相消干涉 (暗) $\Delta \varphi = \pm(2k + 1)\pi$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

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

如果 $I_1 = I_2 = I_0 \longrightarrow I = 0$

3. 相干条件、相干光源

相干条件: (1)频率相同 (2)相位差恒定 (3)光矢量振动方向平行

相干光源: 同一原子的同一次发光

◆相干条件、相干光源

相干的必要条件：(1) 频率相同； (2) 相位差恒定；
(3) 光矢量振动方向平行。

问题：频率相同，相位差恒定，光矢量振动方向介于垂直和平行之间的两列波是否相干？

答案：光矢量振动方向平行是干涉最好的情况，而光矢量振动方向垂直是绝对不可以相干的，所以光矢量振动方向介于垂直和平行之间的两列波是可以相干的，只是干涉的情况差些而已。

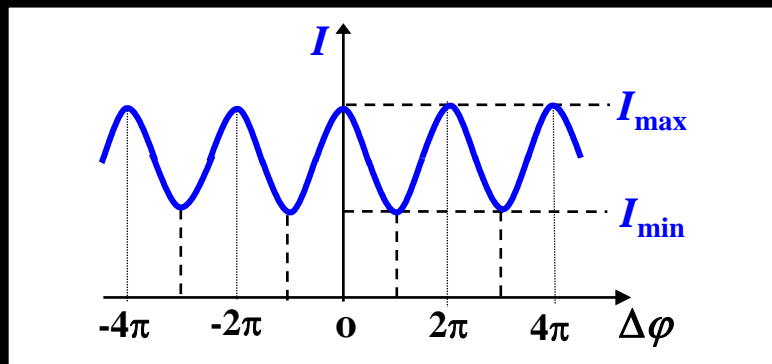
相干的补充条件：(1) 两叠加光波的光程差不能太大；
(2) 两叠加光波的振幅不能相差太大。

相干光源：同一原子的同一次发光

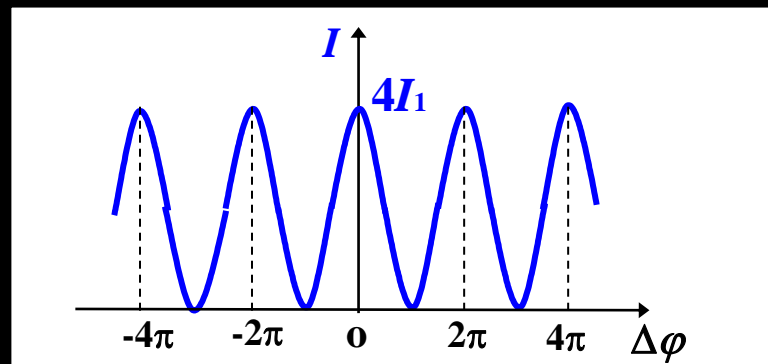
这样的波列才是频率，振动方向，初相位完全相同。

4. 条纹衬比度（对比度，反衬度）

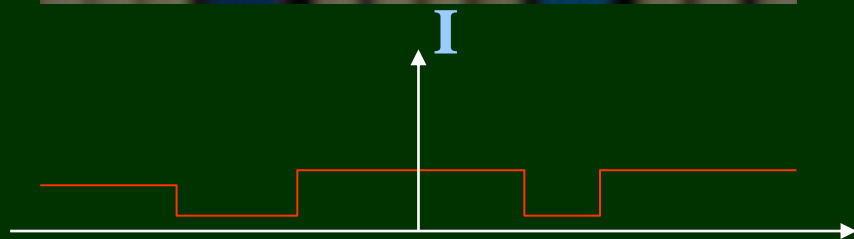
$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



衬比度差 ($\eta < 1$)

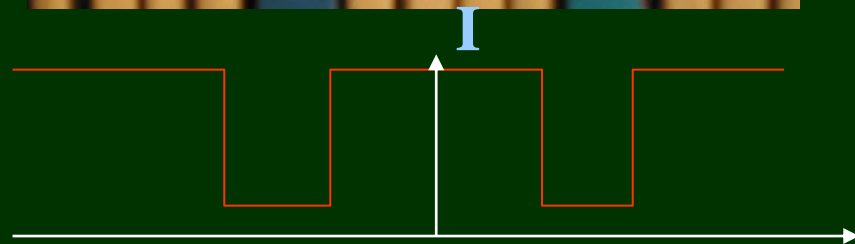


衬比度好 ($\eta = 1$)



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

暗光拍摄，衬比度差



强光拍摄，衬比度好

例 两同相相干点光源 S_1 、 S_2 相距 d ，发射功率相等、波长为 λ 的光信号，如图所示.不考虑衰减

求 (1) OX 轴上光信号最强的位置;

(2) OX 轴上光信号最弱的位置.

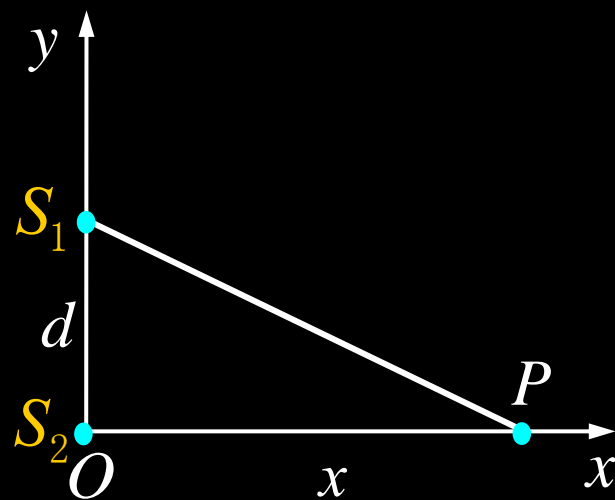
解 (1) 光程差 $\delta = \sqrt{d^2 + x^2} - x$

加强条件 $\sqrt{d^2 + x^2} - x = k\lambda$

信号加强的位置 $x = \frac{d^2 - k^2 \lambda^2}{2k\lambda}$

(2) 减弱条件 $\sqrt{d^2 + x^2} - x = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$

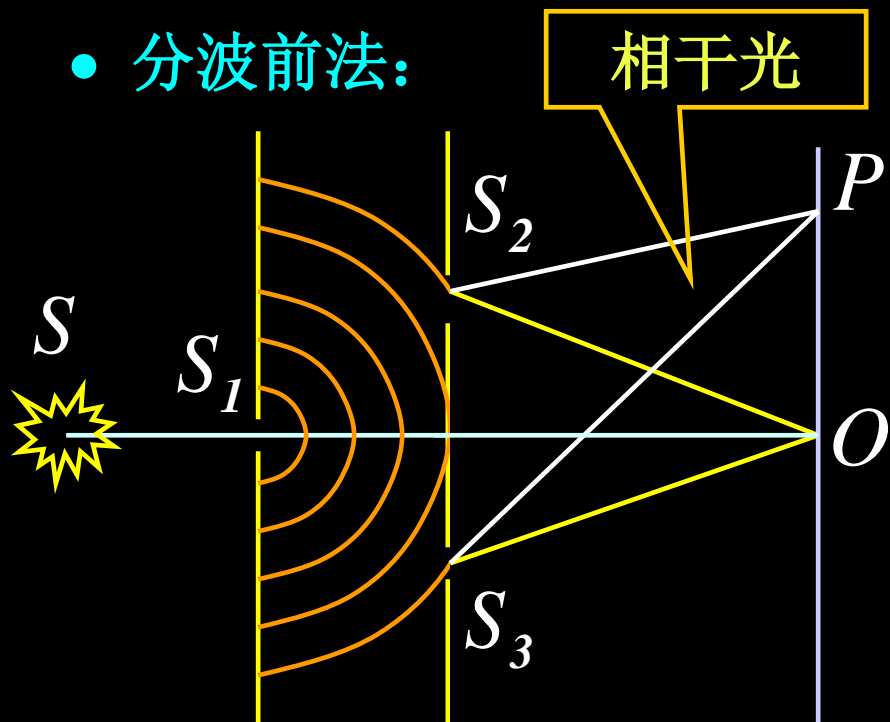
信号减弱的位置 $x = \frac{d^2 - (2k + 1)^2 \lambda^2}{(2k + 1)\lambda}$



获得相干光的方法

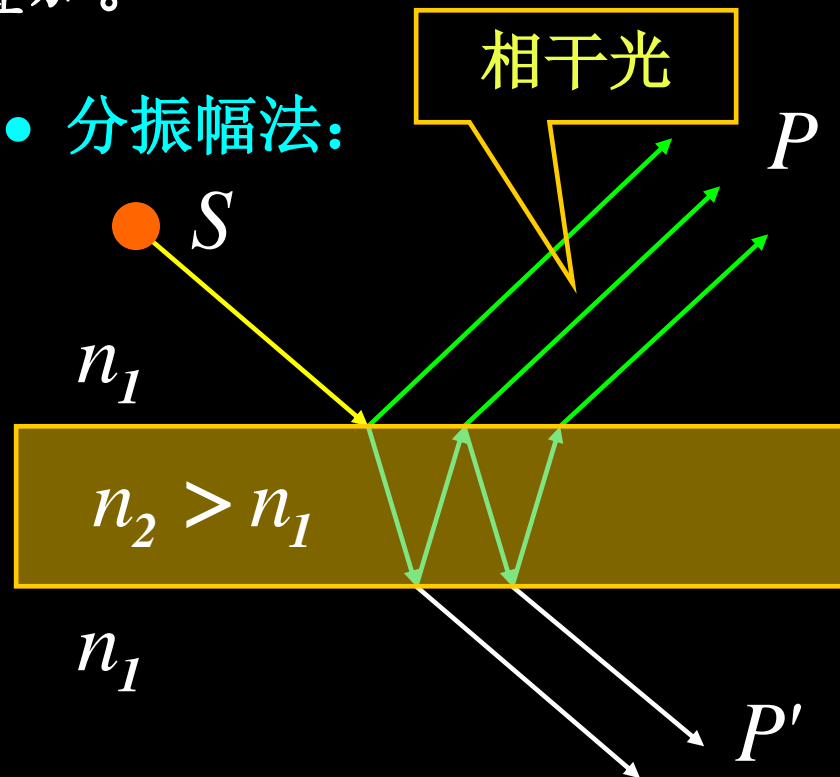
将光源上同一原子同一次发的光分成两部分，再使它们叠加。

• 分波前法：



从同一点光源发出的光波波前上，分离出两束光。

• 分振幅法：



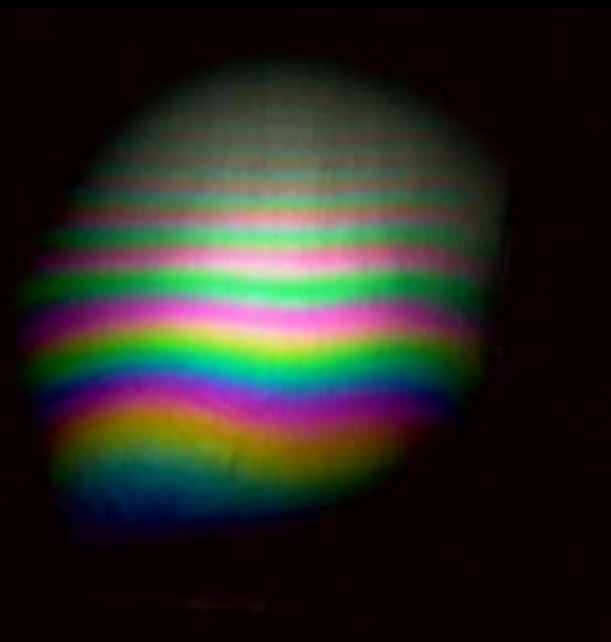
一束光射到薄膜，薄膜的上下表面发射后，分成的两束光

光的干涉

丰富多彩的干涉现象

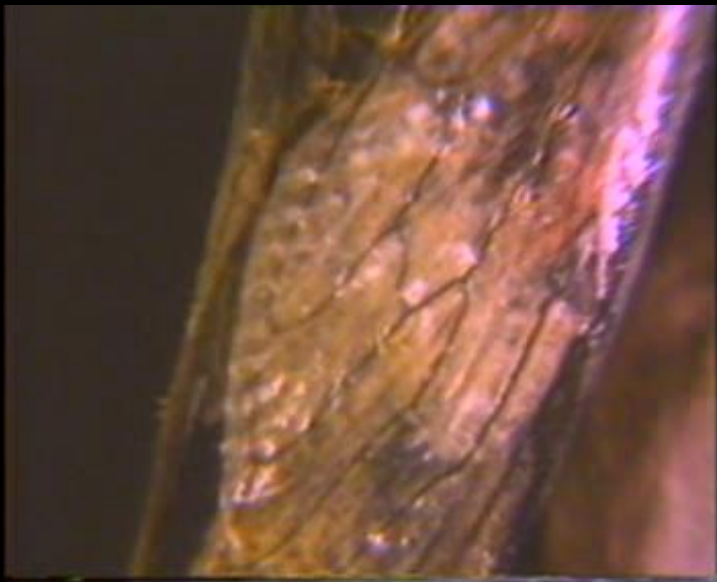


水膜在白光下



白光下的肥皂膜

蝉翅在阳光下



蜻蜓翅膀在阳光下

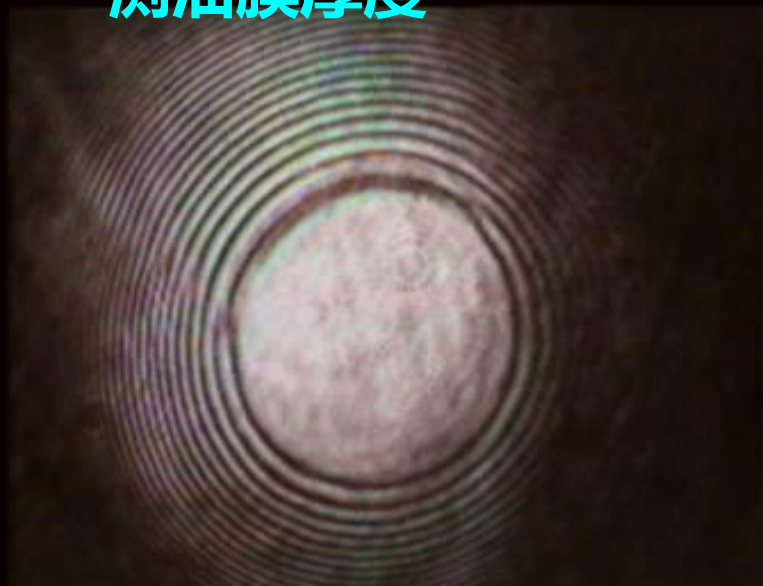


白光下的油膜

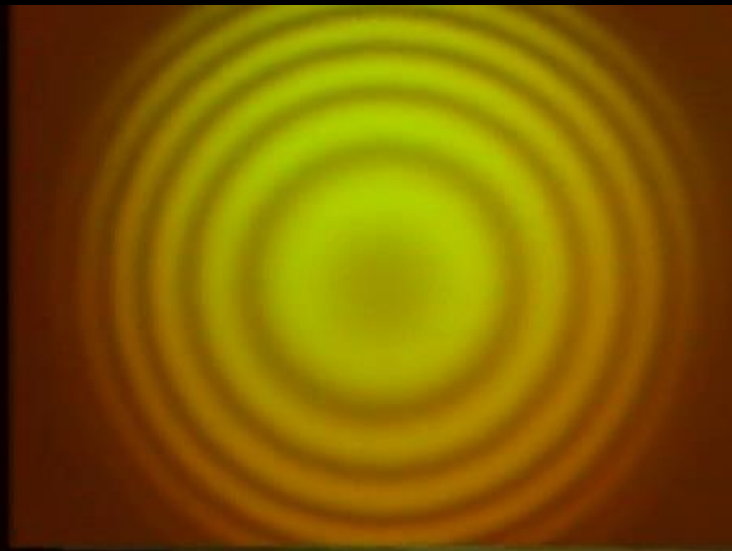


肥皂泡玩过吗？

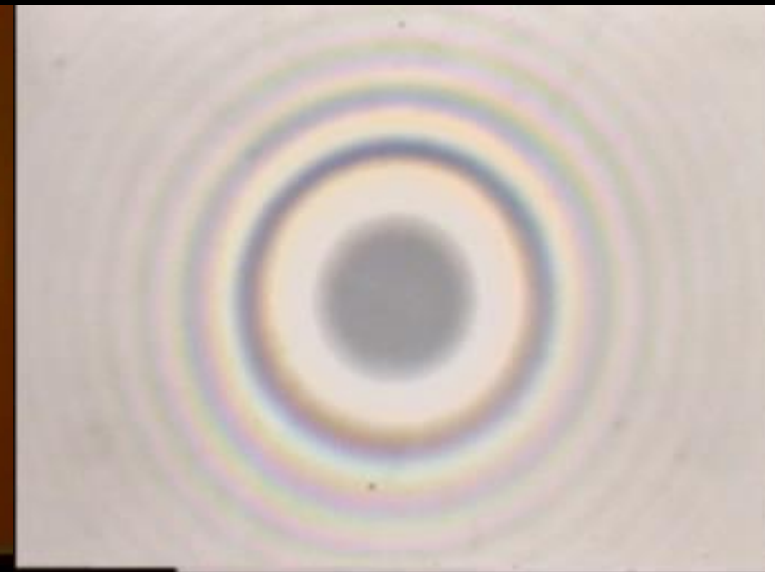
测油膜厚度



平晶间空气隙干涉条纹



等倾条纹

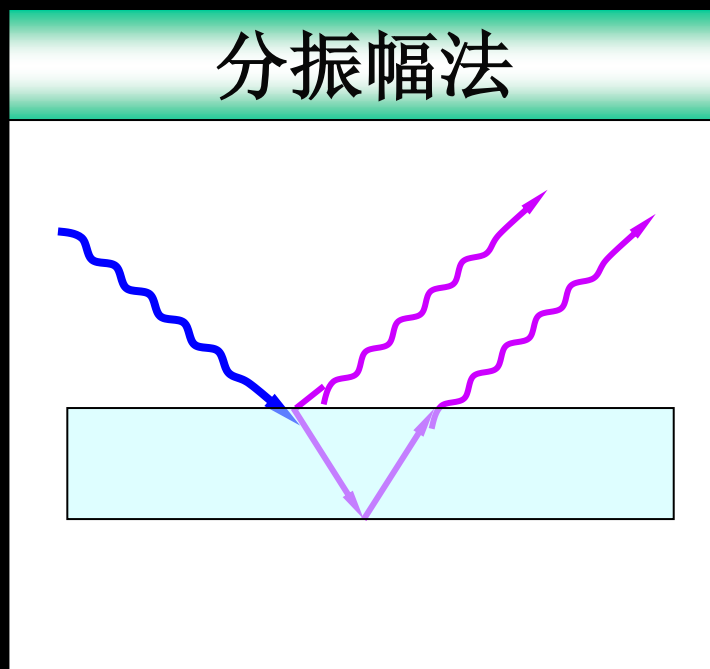
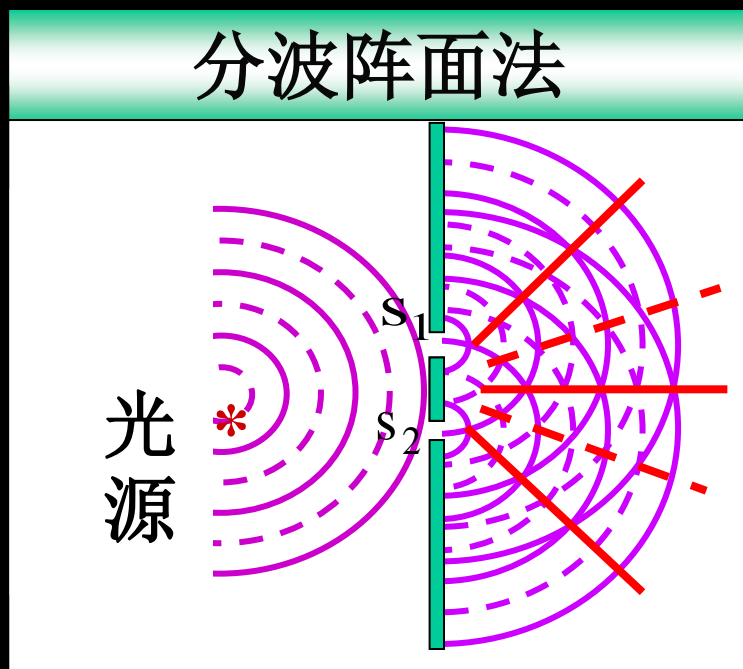


牛顿环(等厚条纹)

§14.3 获得相干光的方法 杨氏实验

原理：将同一光源上同一点或极小区域发出的一束光分成两束
这两束光满足相干条件，是相干光；让它们经过不同的传播路径后，再使它们相遇，发生干涉现象

获得相干光的方法 {
1. 分波阵面法（杨氏实验）
2. 分振幅法（薄膜干涉）



一. 杨氏双缝干涉实验



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

1801年，杨氏巧妙地设计了一种把单个波阵面分解为两个波阵面以锁定两个光源之间的相位差的方法来研究光的干涉现象。杨氏用**叠加原理**解释了干涉现象，在历史上**第一次测定了光的波长**，为光的**波动学说**的确立奠定了基础。



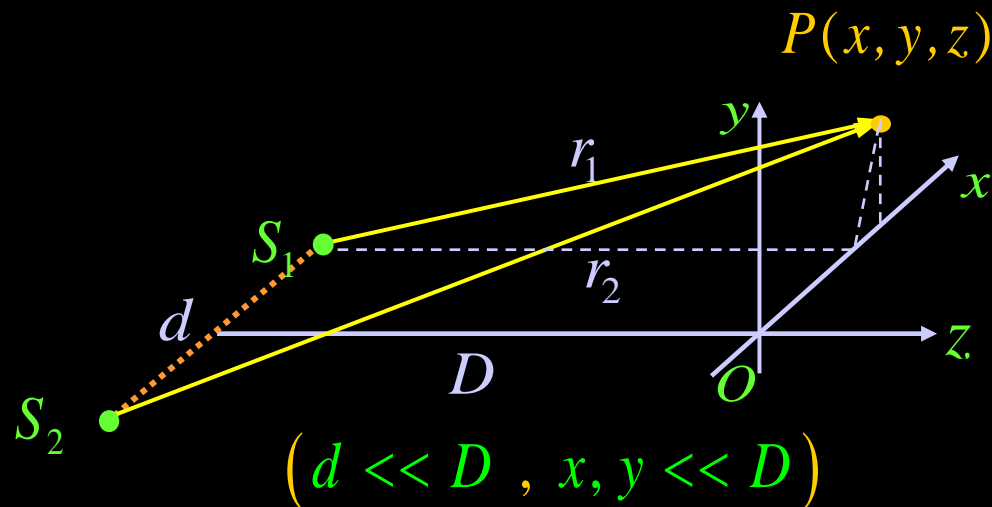
● 理论分析

$$\begin{cases} r_1^2 = D^2 + y^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \\ r_2^2 = D^2 + y^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \end{cases}$$

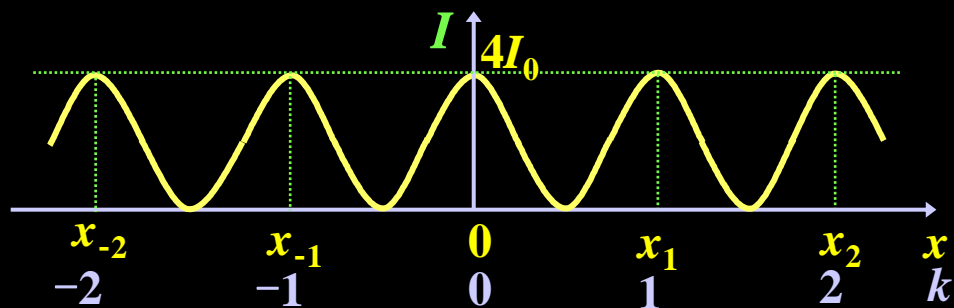
$$\delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_2 + r_1} = \frac{xd}{D}$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{xd}{D} = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \dots & \text{光强极大 —— 明纹} \\ \delta = \frac{xd}{D} = \pm (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \dots & \text{光强极小 —— 暗纹} \end{cases}$$

$$x = \pm 2k \frac{D\lambda}{2d} \quad (\text{光强极大位置}) \quad x = \pm (2k + 1) \frac{D\lambda}{2d} \quad (\text{光强极小位置})$$



● 光强分布



★ 讨论

(1) 屏上相邻明条纹中心或相邻暗条纹中心间距为

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



一系列相互平行等间距的明暗相间条纹

(2) 已知 d , D 及 Δx , 可测 λ

(3) Δx 正比 λ, D ; 反比 d



(4) 当用白光作为光源时



零级白色中央条纹，两边对称地排列着几条彩色条纹

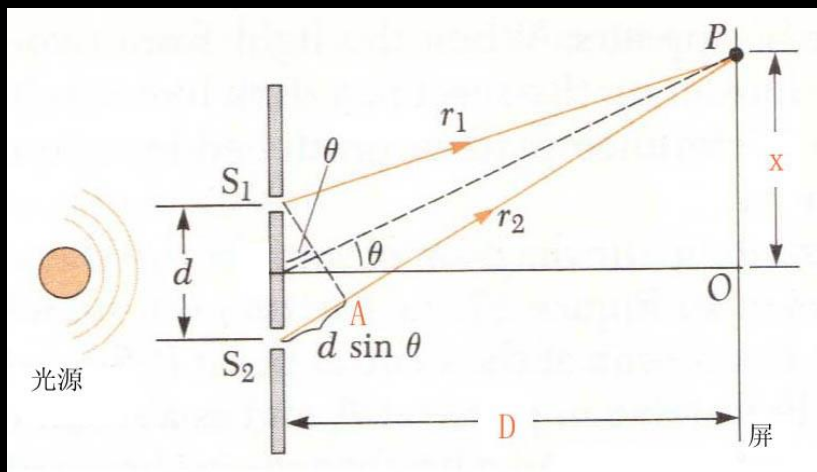
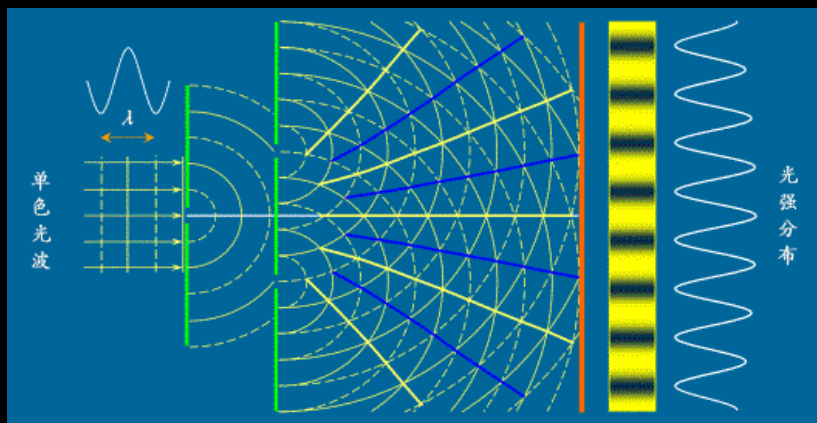
相干条件：频率相同、相位差恒定、光矢量振动方向平行

相干叠加 $I_P = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi$

普通光源 → 相干光：同一原子的同一次发光

获得相干光的方法 1. 分波阵面法 2. 分振幅法

杨氏双缝干涉实验



$$\delta = r_2 - r_1 = \frac{xd}{D}$$
$$= \begin{cases} \pm 2k \frac{\lambda}{2}, & \text{明条纹} \\ \pm (2k+1) \frac{\lambda}{2}, & \text{暗条纹} \end{cases}$$
$$\Delta x = \frac{D\lambda}{d}$$

例 用白光作光源观察杨氏双缝干涉。设缝间距为 d ，缝面与屏距离为 D

求 能观察到的清晰可见光谱的级次

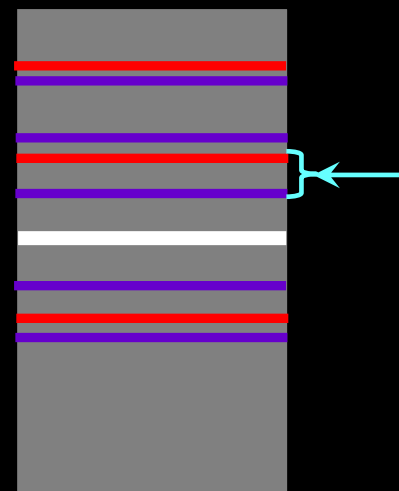
解 在 $400 \sim 760 \text{ nm}$ 范围内，明纹条件为 $\delta = \frac{xd}{D} = \pm k\lambda$

最先发生重叠的是某一级次的红光和高一级次的紫光

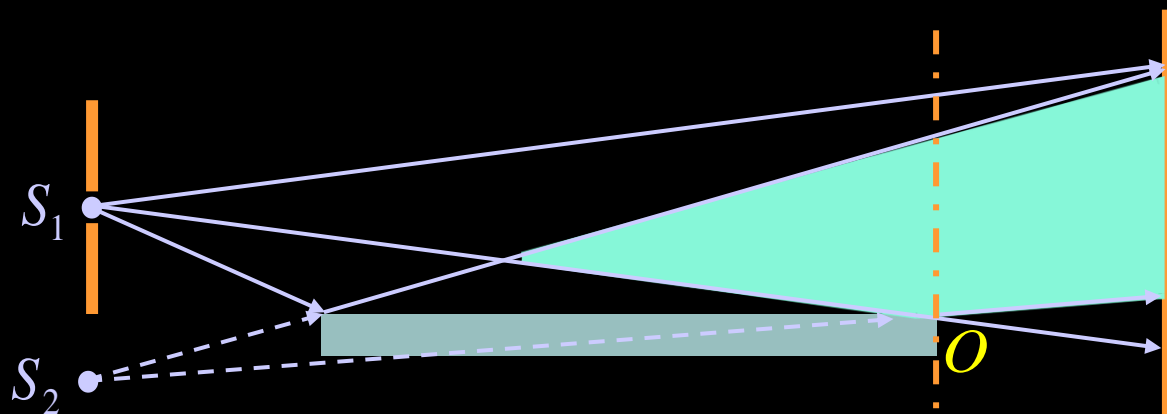
$$k \lambda_{\text{红}} = (k+1) \lambda_{\text{紫}}$$

$$k = \frac{\lambda_{\text{紫}}}{\lambda_{\text{红}} - \lambda_{\text{紫}}} = \frac{400}{760 - 400} = 1.1$$

清晰的可见光谱只有一级



洛埃镜



(洛埃镜实验结果与杨氏双缝干涉相似)

- 接触处，屏上 O 点出现暗条纹

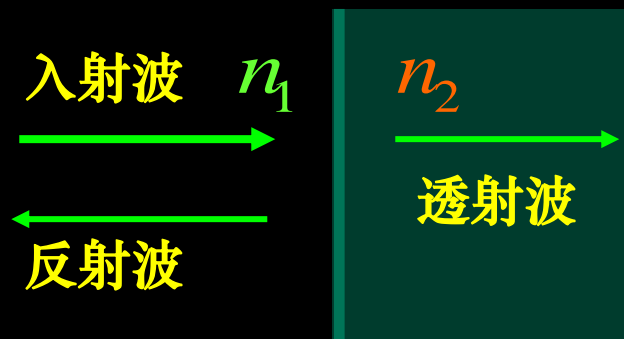
半波损失

相当于入射波与反射波之间附加了一个半波长的波程差

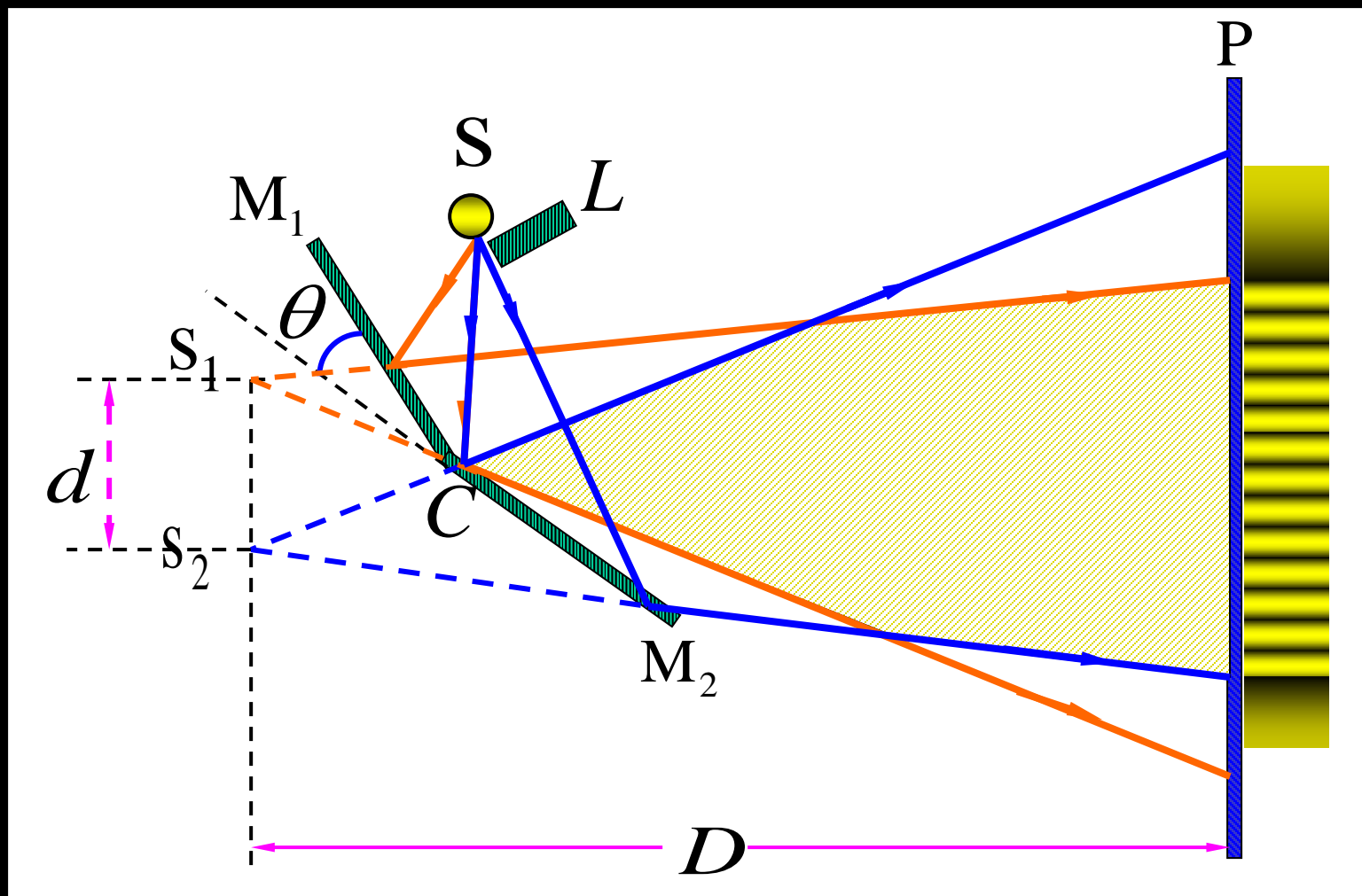
$n_1 < n_2$ 有半波损失

$n_1 > n_2$ 无半波损失

- 透射波没有半波损失



菲涅耳双面镜



§14.4 光程与光程差

在介质中传播的路程 $r \Leftrightarrow$ 在真空中传播的路程 x

在相同时间 t 内

$$x = ct, r = ut \quad u = \frac{c}{n} \Rightarrow x = nr$$

改变相同相位的条件下

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{r}{\lambda} = 2\pi \frac{x}{\lambda_0}$$

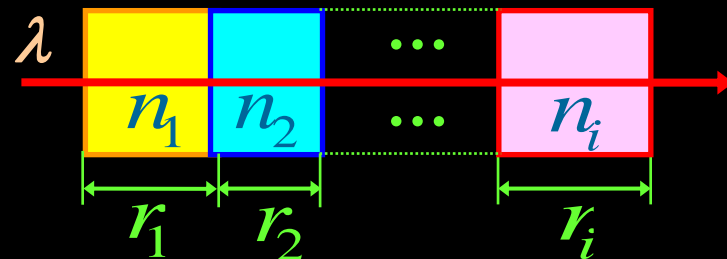
真空中
光波长

$$\lambda = \frac{u}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$x = \frac{\lambda_0 r}{\lambda} = nr \quad \text{—— 光程}$$

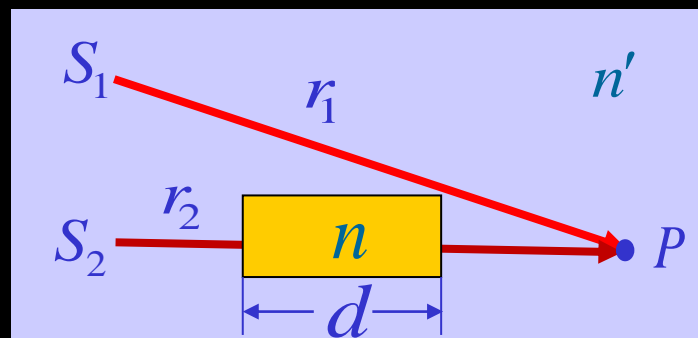
光程是一个折含量，在传播时间相同或相位改变相同条件下，把光在介质中传播的路程折合为光在真空中传播的路程

多种介质 \rightarrow 光程 $= \sum_i n_i r_i$

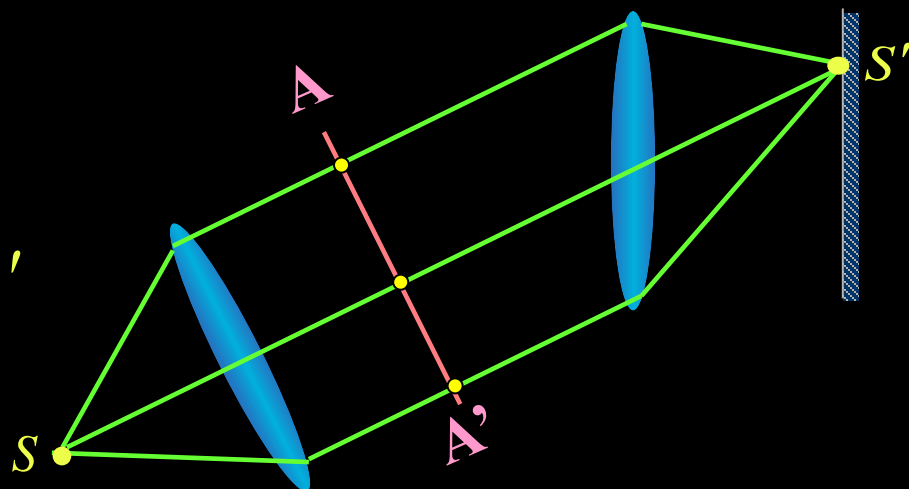
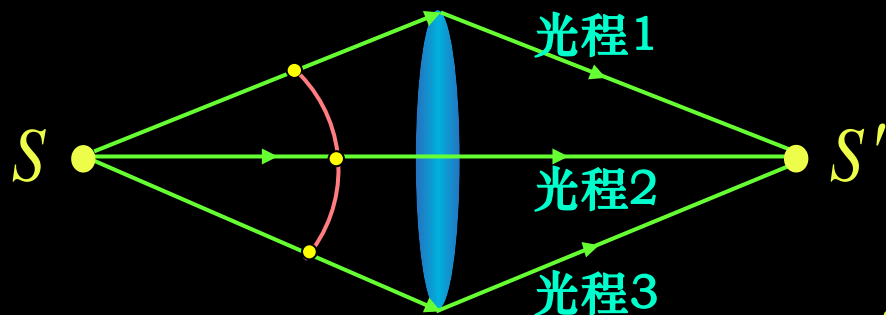


由光程差计算相位差

$$\left[n'(r_2 - d) + nd - n'r_1 \right] \frac{2\pi}{\lambda_0}$$



物象之间等光程原理



例 用折射率 $n=1.58$ 的很薄的云母片覆盖在双缝实验中的一条缝上，这时屏上的第七级亮条纹移到原来的零级亮条纹的位置上。如果入射光波长为 550 nm

求 此云母片的厚度是多少？

解 设云母片厚度为 d 。无云母片时，零级亮纹在屏上 P 点，则到达 P 点的两束光的光程差为零。加上云母片后，到达 P 点的两光束的光程差为

$$\delta = (n-1)d$$

当 P 点为第七级明纹位置时

$$\delta = 7\lambda$$

$$d = \frac{7\lambda}{n-1} = \frac{7 \times 550 \times 10^{-6}}{1.58-1} = 6.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

