

波动光学

一、光的干涉

- 几何光学 (*Geometrical optics*)
- 波动光学 (*Wave optics*)
- 量子光学 (*Quantum optics*)

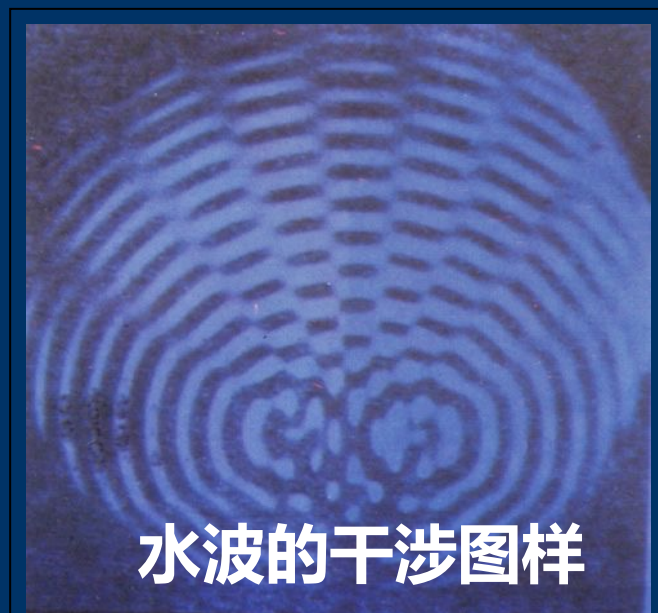
思考：

1、干涉现象是波动特有的特征，如果光真的是一种波，就必然会观察到光的干涉现象。你看见过光的干涉现象吗？如果真的存在光的干涉现象，那么，光的干涉现象的干涉图样又是怎么样？

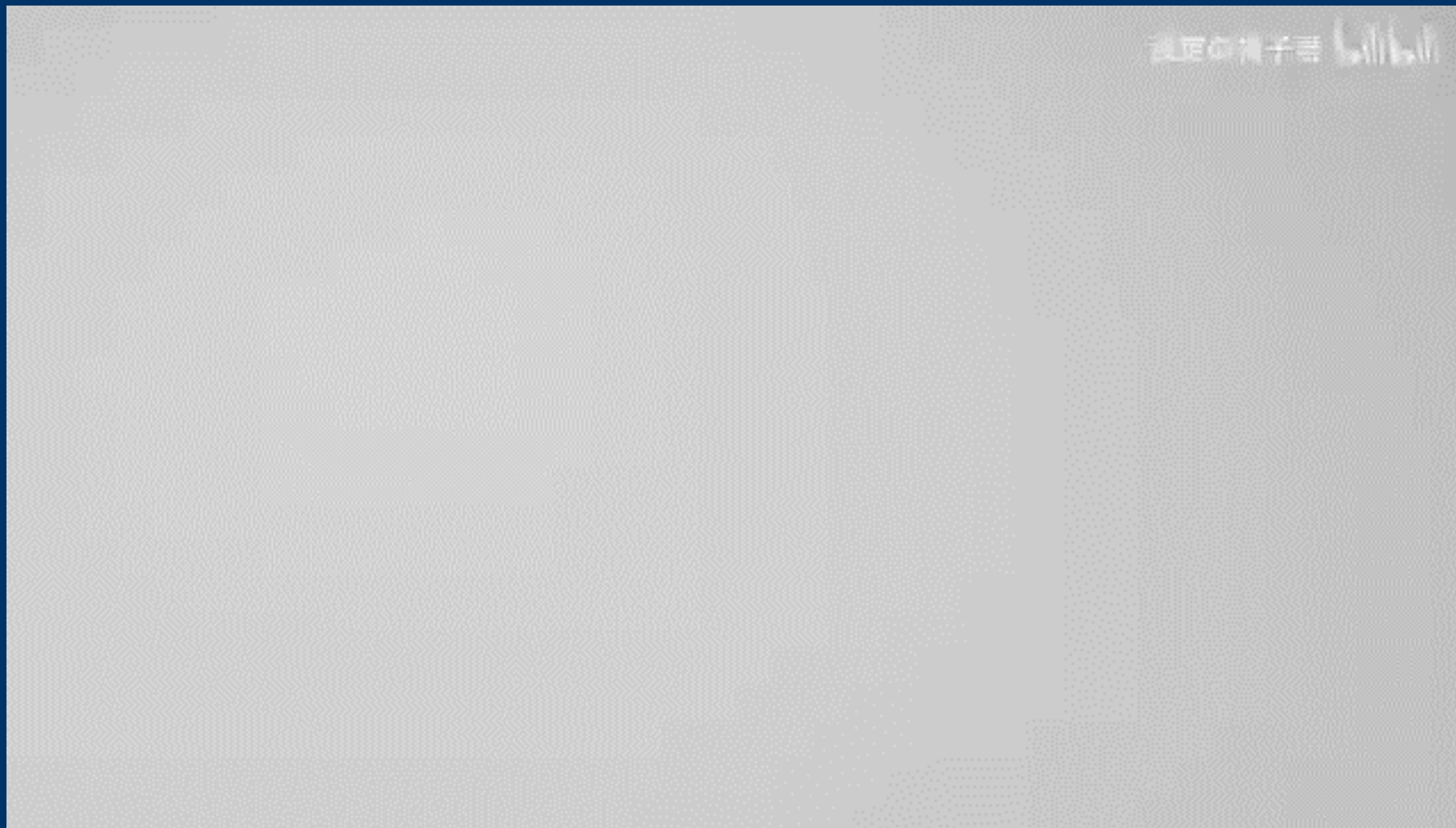
光的干涉：两列相干光波相叠加，某些区域的光被加强，某些区域的光被减弱，且加强区与减弱区互相间隔的现象叫光的干涉现象。

2、为什么我们在日常生活中观察不到光的干涉现象？

产生干涉现象的条件之一是两列光必须是频率相同的相干光源。



水波的干涉图样



百度中清子言 bilibili



这只美丽的蜂鸟，它颈部羽毛上那漂亮的彩色光泽是如何产生的呢？

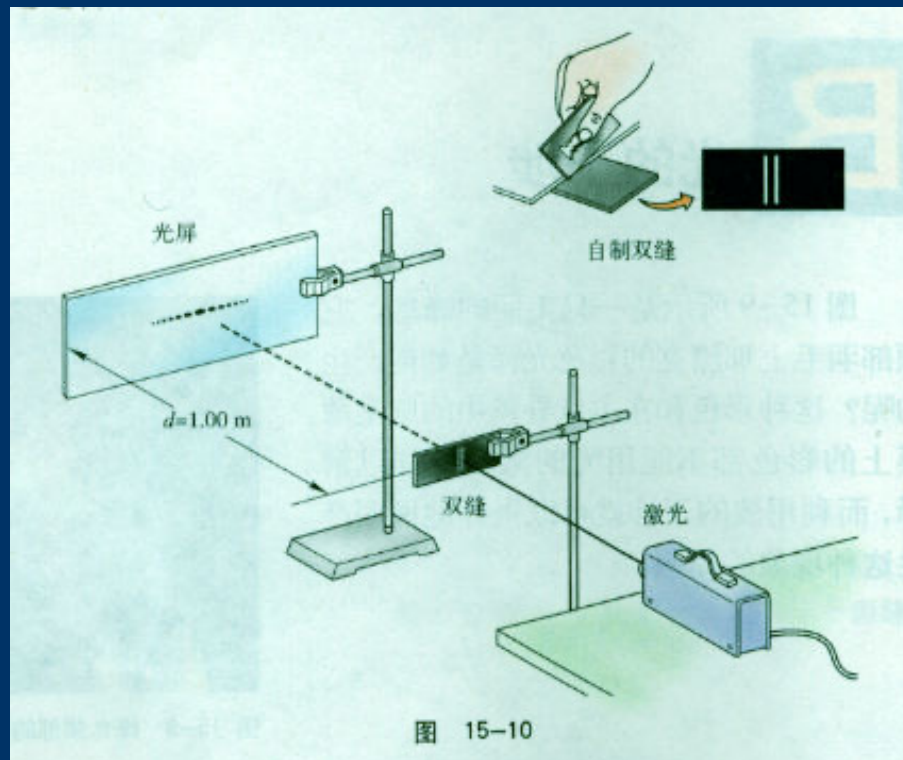
颈部羽毛上有一层漂亮的彩色光泽

这种彩色和并不能用光的微粒说加以解释，而利用波的干涉就可以很好地说明产生这种现象的原因。

光有干涉现象吗？

干涉现象是波的主要特征之一。所以光如果是一种波，我们就必然会观察到光的干涉现象。

将两片刀片合在一起，在玻璃片的墨汁涂层上划出有很小间隙（约0.1mm）的双缝。按图所示的方法，使激光束通过自制的双缝，观察光屏上出现的象。



屏上有明暗相间的条纹

什么是光的干涉现象？

(1)我们需要研究什么？

(2)你使用语言描述下你观看到的现象

定性描述

(3)从物理本质上去分析产生现象的原因

并定量描述

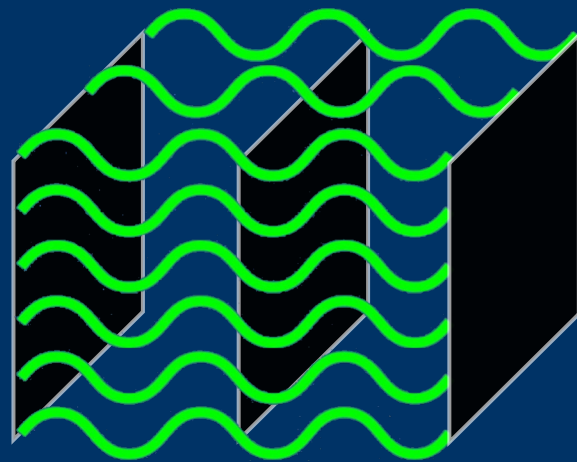
一. 光是电磁波

简谐波 简谐振动在介质中的传播 (介质中各质点作同频率的简谐振动)

平面简谐波 波面为平面的简谐波

★ 说明

- 复杂的波可分解一系列简谐波
- 平面简谐波各处振幅相同



平面简谐波

关于机械波传播特征，下列说法中正确的是

1

- ☐ A 波动中的各质点不随波前进，都在各自的平衡位置做振动
- ☐ B 波动是振动状态的传播，即振动相位的传播
- ☐ C 振动质点的相位前进方向与波的传播方向相反
- ☐ D 沿着波的传播方向，后面质点在重复前面质点的运动状态
- ☐ E 横波可以观察到波峰、波谷，纵波可以观察到疏密

提交

2

关于机械波的概念，下列说法中正确的是

- ☐ A 质点振动方向总是垂直于波传播的方向
- ☐ B 简谐波沿绳传播，绳上相距半个波长的两个质点振动位移的大小总相等
- ☐ C 任一振动质点每经过一个周期沿波的传播方向移动一个波长
- ☐ D 相隔一个周期的两时刻，简谐波的图像相同

提交

下列说法中正确的是

3

- ☐ A 机械波的频率取决于波源
- ☐ B 一般情况下，机械波的传播速度取决于介质的性质
- ☐ C 液体、气体中可以传播横波、纵波
- ☐ D 固体中传播横波和纵波的速度大小不相等，且纵波的传播速率大于横波的传播速率

提交

4

平面简谐波(机械波)具有以下特征

- ☐ A 在波传播的区域, 每个质点都做简谐振动
- ☐ B 每个质点所做简谐振动的频率相等
- ☐ C 每个质点都做简谐振动的振幅相等
- ☐ D 某一个时刻, 振动状态相同的点构成的面为平面

提交

波的描述:

简谐振动 — 又称为简谐运动, 其特征是振动的物理量随时间 t 的变化具有周期性, 而且在每个周期中都按正弦或余弦规律变化, 即振动物理量是时间 t 的正弦或余弦函数。

相位

$$\Psi(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

振幅

φ_0 — 初相位, 即 $t = 0$ 时刻的相位

— 简谐振动在 t 时刻的相位, 它描写振动的状态

T — 时间周期

ω — 时间圆 (角) 频率

ν — 时间频率

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

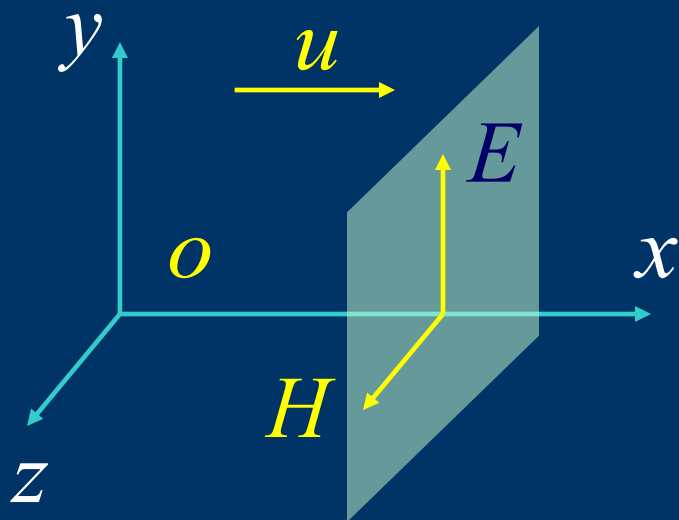
引言

- (1) 微粒学说 (*Corpuscular theory*)
- (2) 波动学说 (*Undulatory theory*)
- (3) 光波 —— 具有波粒二象性的物质

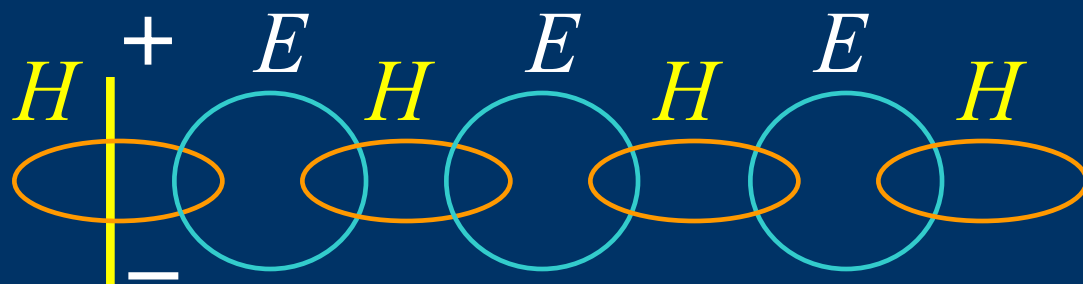
一. 电磁波是空间矢量波

1. 真空中的电磁波

设一平面简谐电磁波

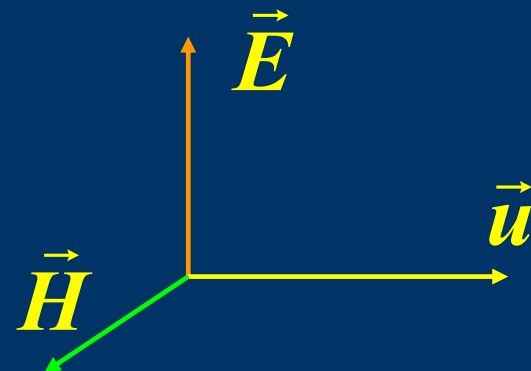


电磁波 = 交变电磁状态的传播



(1) 电磁波是横波

振动量 E, H 与波速 u 构成相互垂直的
—— 右手螺旋关系。



(2) 电磁波的偏振性

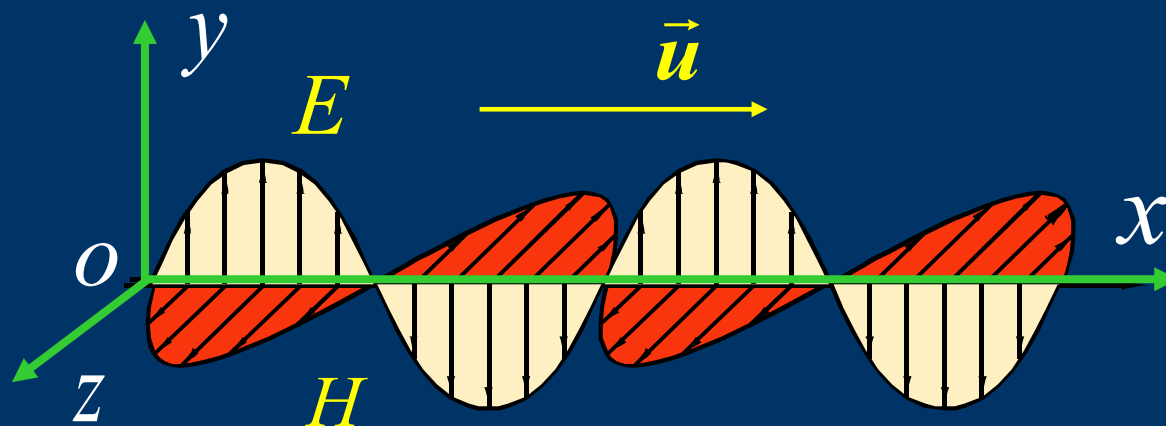
E, H 分别在各自的平面上振动。

(3) 电场与磁场同相变化

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

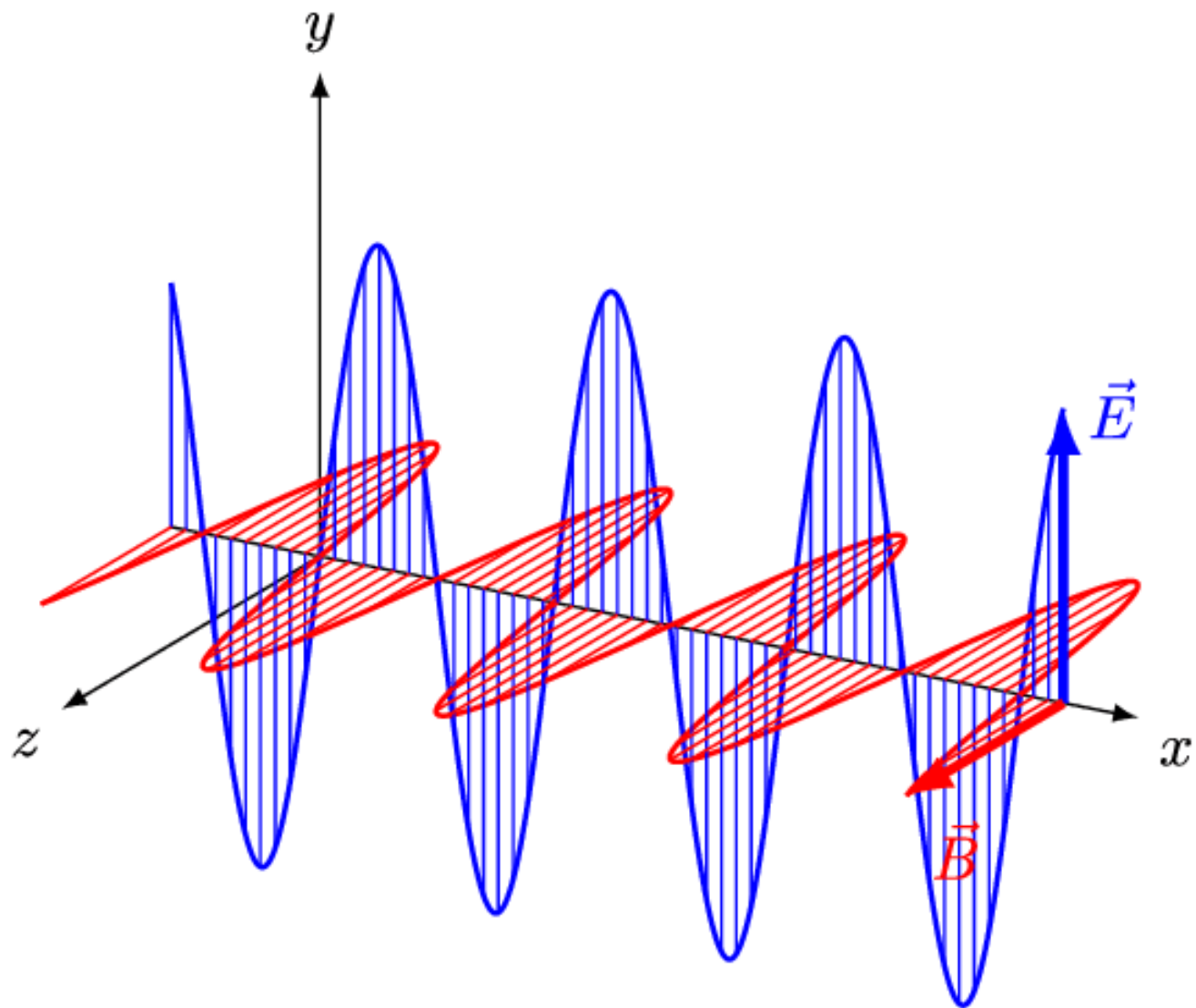
振幅之间满足：

$$\sqrt{\epsilon_0}E_0 = \sqrt{\mu_0}H_0$$



• μ_0 真空磁导率： $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 亨利/米

ϵ_0 真空介电常数： $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 法拉/米



当电场振动沿 x 轴正向传播时，
反映该振动的平面简谐波：

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

用麦氏电磁场方程组可推出

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

- 真空中： $u = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s} = c$
- 介质中： $u = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r} = c / \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = c / n < c$

折射率 (*Refractive index*)

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

$$7.60 \times 10^{-7} \sim 3.90 \times 10^{-7} \text{ m} \quad \Rightarrow \quad 760 \sim 390 \text{ nm}$$

✚ 光波中参与与物质相互作用（感光作用、生理作用）的是 E 矢量，称为光矢量。

E 矢量的振动称为光振动。

✚ 光强：在光学中，通常把平均能流密度称为光强，用 I 表示。

平面简谐电磁波：

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} |E|^2 dt$$

✚ 在波动光学中，主要讨论的是相对光强，因此在同一介质中直接把光强定义为：

$$I = E_0^2 = A^2$$

二. 简谐振动的合成

一. 同方向同频率的简谐振动的合成

1. 两个分振动

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

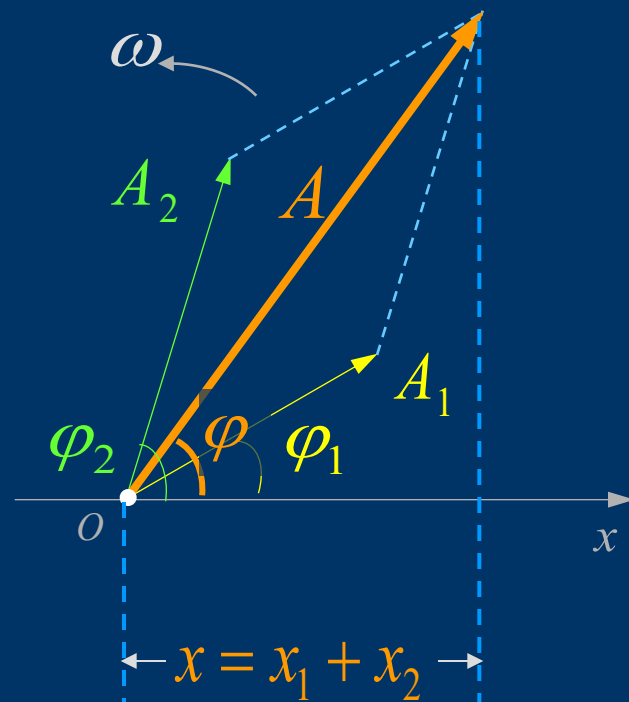
2. 合振动

场强叠加原理

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_2 \\ &= A \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$



$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

★ 讨论

(1) 若两分振动同相, 即 $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm 2k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)

则 $A = A_1 + A_2$, 两分振动相互加强。

(2) 若两分振动反相, 即 $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm(2k+1)\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)

则 $A = |A_1 - A_2|$, 两分振动相互减弱, 当 $A_1 = A_2$ 时, $A = 0$

思考：

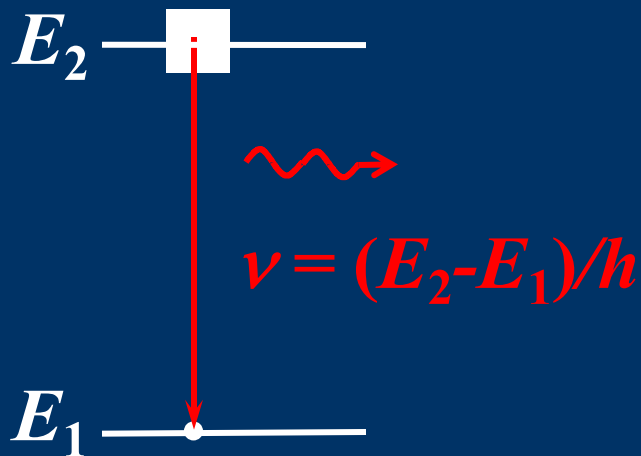
两个普通光源产生的光能不能产生干涉现象？什么情况下才能看到干涉现象？

三. 波的干涉

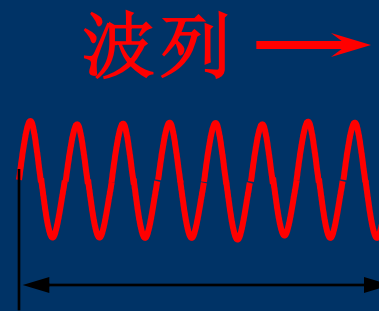
一. 光源 (light source)

光源的最基本发光单元是分子、原子。

能级跃迁辐射



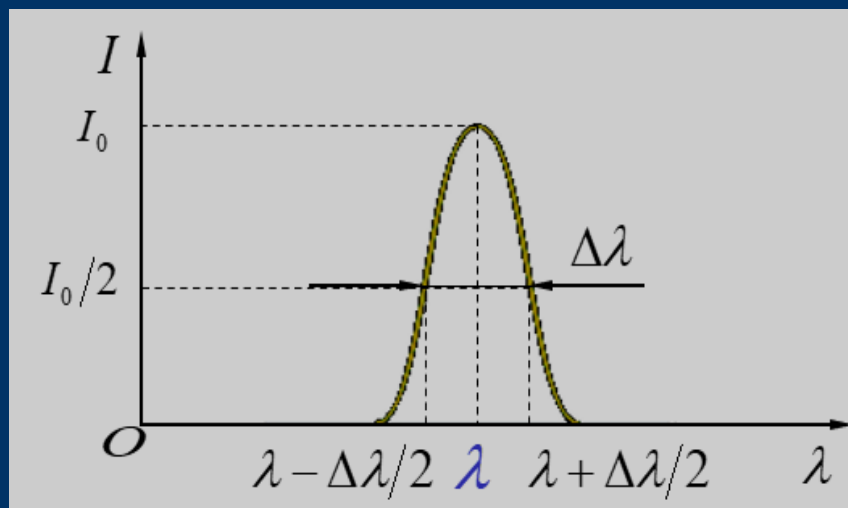
光源中每个原子每次发射的电磁波为持续时间很短、长度有限的波列。



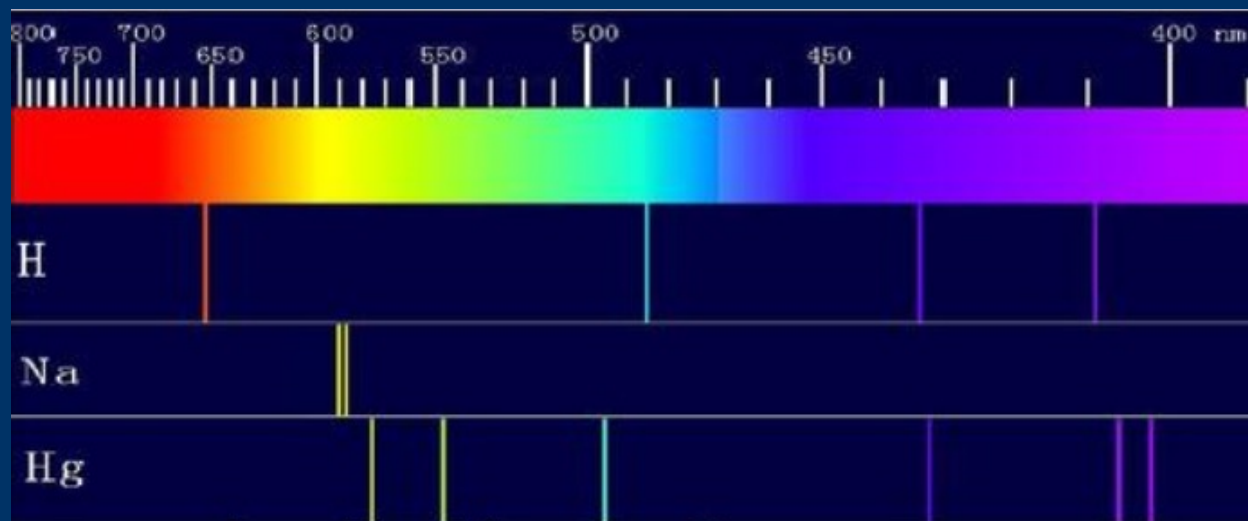
(1) 光波列长度

$$L = \tau c$$

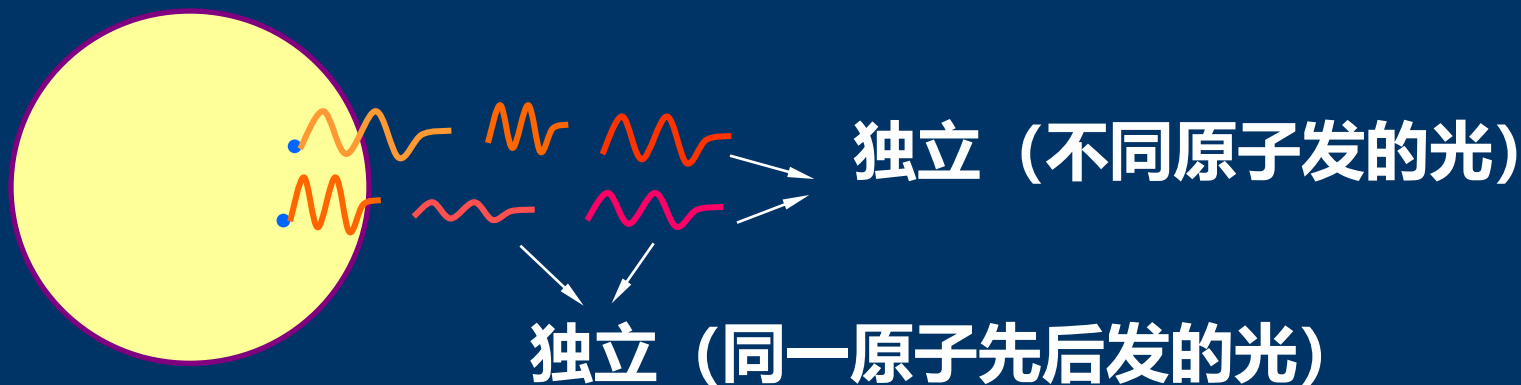
(2) 光波列长度与其单色性关系



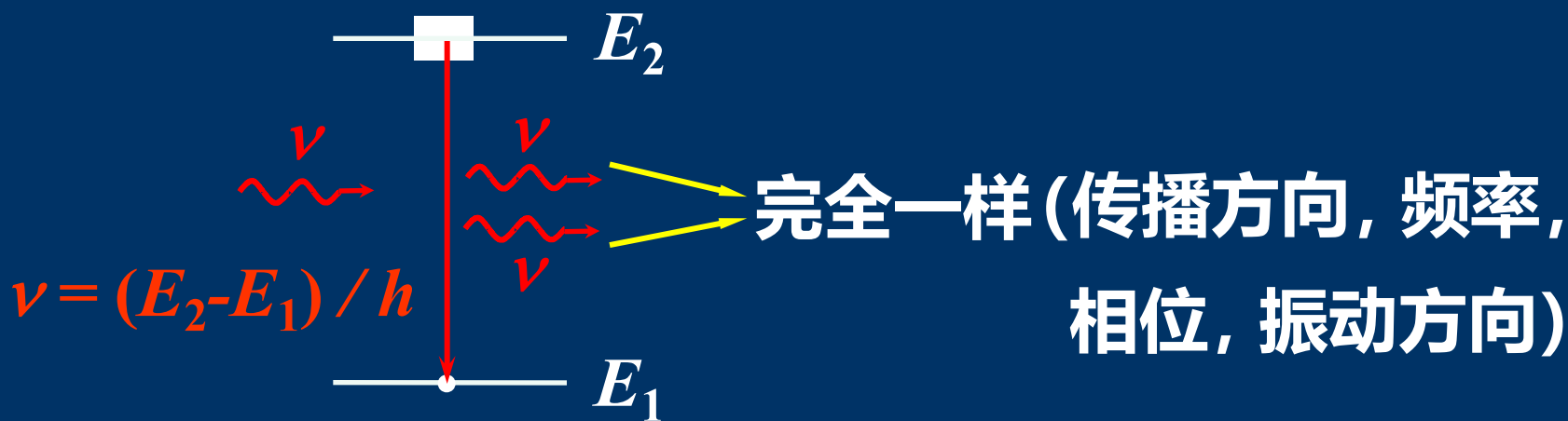
不同原子的特征谱线



1. 普通光源：自发辐射



2. 激光光源：受激辐射



二. 相干波与相干条件

- 干涉现象

一般情况下，各个波的振动方向和频率均不同，相位关系不确定，叠加的合成波较为复杂。

当两列(或多列)相干波叠加的结果，其合振幅 A 和合强度 I 将在空间形成一种稳定的分布，即某些点上的振动始终加强，某些点上的振动始终减弱。 —— 波的干涉

- 相干条件 频率相同、振动方向不垂直、相位差恒定。
- 相干波 满足相干条件的波
- 相干波源 产生相干波的波源

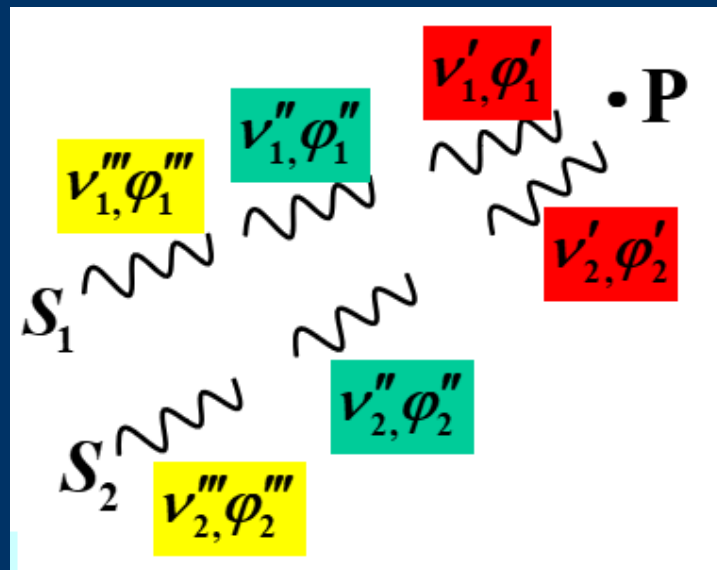
为什么通常看不到光的相干现象？

光源发光机理： 发光基本单元的原子能量是分立的

① 辐射过程短： $\Delta t = 10^{-9} \sim 10^{-8}$ 秒，每次辐射出的波的长度有限，即： $l = c\Delta t \approx 1m$ (波列长度)

② 各个原子辐射---独立性、随机性即：
各波列频率不同,振向不同,相位差不恒定

$\therefore$ 一般光源为非相干光源



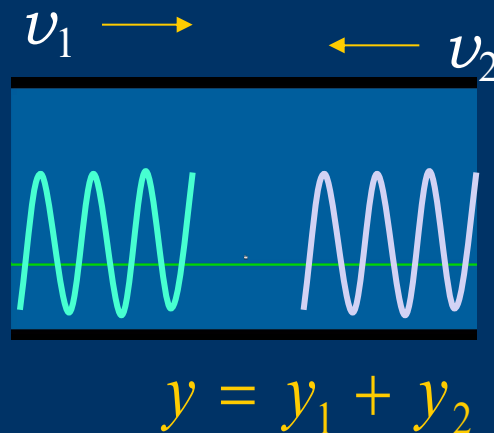
三．波的叠加原理

1. 波传播的独立性

当几列波相遇后再行分开时，各波的传播情况与未相遇一样，仍保持它们各自的频率、波长、振动方向等特性。

2. 叠加原理

在波相遇区域内，任一质点的振动，为各波单独存在时所引起的振动的合振动。

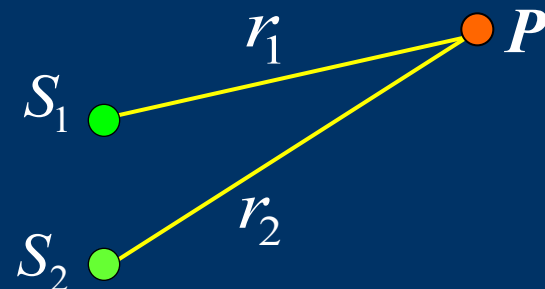


注意 波的叠加原理仅适用于线性波的问题

四. 干涉规律

S_1 波源 $y_{01} = A_{01} \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$

S_2 波源 $y_{02} = A_{02} \cos(\omega_1 t + \varphi_2)$



S_1 波在 P 点的振动方程 $y_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 - 2\pi \frac{r_1}{\lambda})$

S_2 波在 P 点的振动方程 $y_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 - 2\pi \frac{r_2}{\lambda})$

P 点处合振动方程为 $y = y_1 + y_2 = A \cos(\omega t + \varphi)$

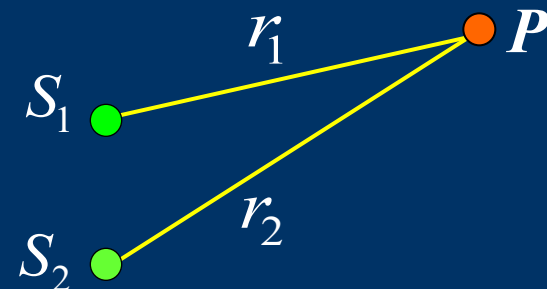
合振动的振幅 $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos \Delta \varphi$

其中 $\Delta \varphi = (\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$

空间位置的函数

P 点处波的强度 $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi$

四. 干涉规律



P 点处波的强度 $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$

干涉项(interference term)

$$2\sqrt{I_1 I_2} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos \Delta\varphi dt$$

非相干光源: $2\sqrt{I_1 I_2} \overline{\cos \Delta\varphi} = 0$

$$I = I_1 + I_2 \text{ — 非相干叠加}$$

完全相干光源: $2\sqrt{I_1 I_2} \overline{\cos \Delta\varphi} \text{ ?????}$

四. 干涉规律

$$2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$$

$$= 2A_1 \cdot A_2 \cos\left[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}\right]$$

怎样才能产生稳定的干涉呢？

$$A_1 \cdot A_2 \neq 0$$

□ 振动方向不垂直

$\cos \Delta\varphi$ 在观察时间内不随时间变化

$$\omega_1 - \omega_2 = 0$$

□ 频率相同、相位差恒定。

$$\varphi_1 - \varphi_2 = C$$

P 点处波的强度

$$I \neq I_1 + I_2$$

四. 干涉规律

- $\Delta\varphi$ 只与空间位置有关，即不同的空间点具有不同的位相差，因而有不同的数值。
- 即两列波在空间不同的地点有不同的位相差，叠加后有不同的强度，出现干涉现象。

3

波的干涉，其实质为相干波“在相遇点，振动的叠加”

A

对的

B

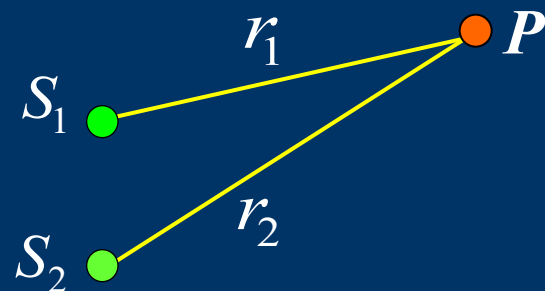
不对

提交

P 点处波的强度 同频率的两个光源

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

$$\Delta \varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$$



1. 强度分布

- 干涉相长

若 $\Delta \varphi = \pm 2k\pi$, 强度有极大值

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

- 干涉相消

若 $\Delta \varphi = \pm (2k + 1)\pi$, 强度有极小值

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

若 $I_1 = I_2$

$$I_{\max} = 4I_1$$

$$I_{\min} = 0$$



2. 条纹形状 若两波源初相相同 $\varphi_1 = \varphi_2$ ，条纹形状？

干涉相长条纹

$$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = \pm 2k\pi$$

波程差 $\delta = r_2 - r_1 = k\lambda$

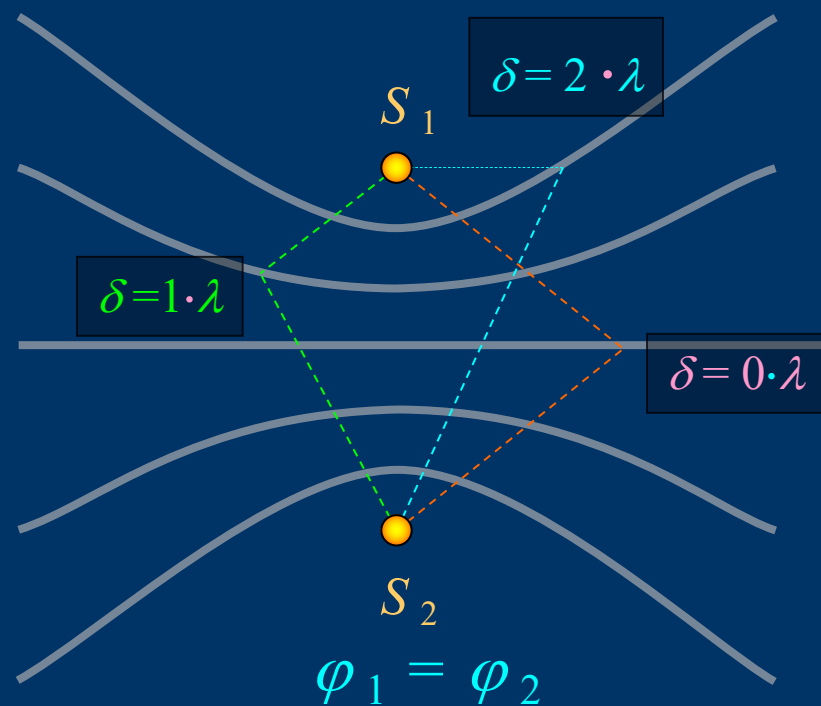
$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

干涉相消条纹

$$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = \pm(2k+1)\pi$$

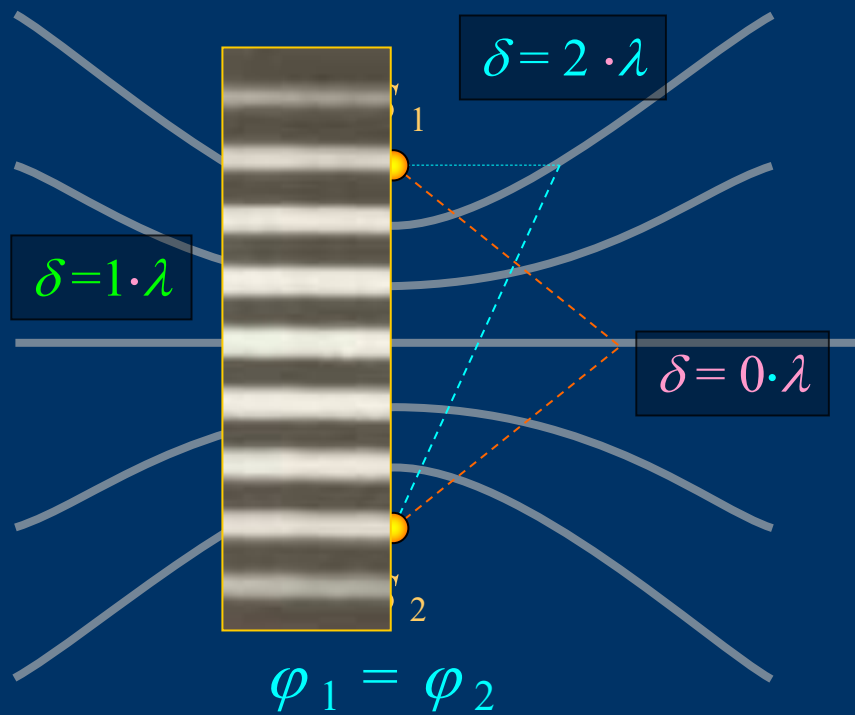
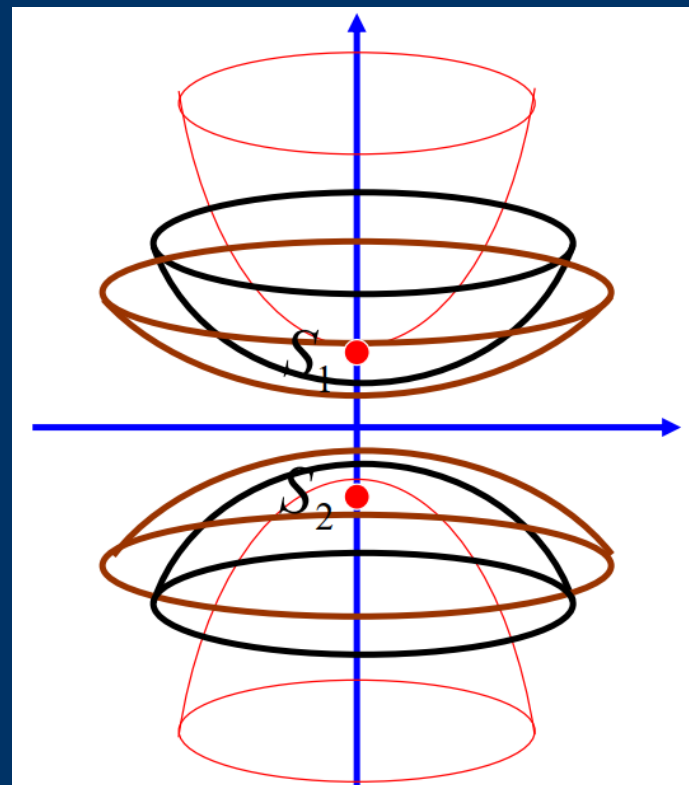
波程差 $\delta = r_2 - r_1 = (k+1/2)\lambda$

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



双曲线

双曲线



明条纹中

心
明条纹中

心



明条纹

暗条纹

讨论：(1) 视觉上这些明条纹有区别吗？

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

(2) 每个明条纹中心对应的什么不同？

波程差

$$\delta = r_2 - r_1 = k\lambda$$

3

一条条纹上所有点的共同特征

A

相位差相等

B

波程差相等

C

k 相等

3

两条相邻明条纹（暗条纹）之间的关系

A

K相差 $1/2$

B

相邻明条纹（暗条纹）的相位差等于 2π

C

相邻明条纹（暗条纹）的波程差等于 λ

3

相位差在 $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$ $\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi$ 之间的点，其干涉波的

强度介于 $I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ $I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ 之间

A

对的

B

不对

四.获得相干光的方法 杨氏实验

Coherent
condition:

1. 振动方向相同

2. 频率相同

3. 相差差恒定

▲ 干涉相长 (明纹) $\Delta \varphi = \pm 2k\pi$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$)

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

▲ 干涉相消 (暗纹) $\Delta \varphi = \pm (2k + 1)\pi$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$)

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

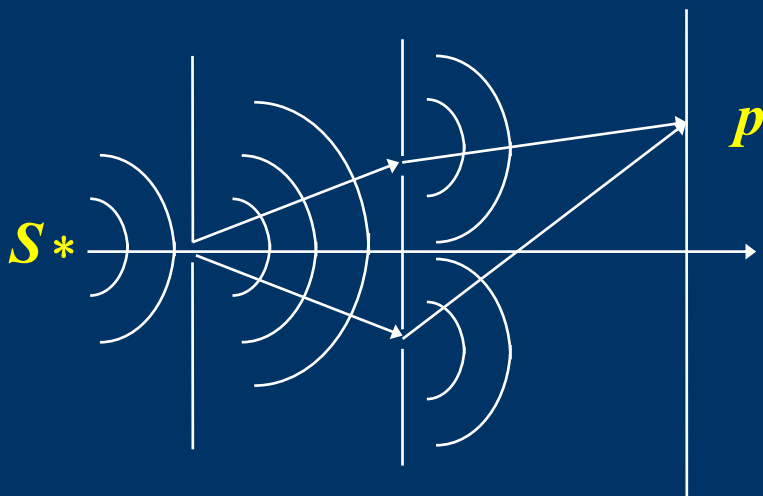
获得相干光的方法 {

- 1. 分波阵面法 (杨氏实验)
- 2. 分振幅法 (薄膜干涉)

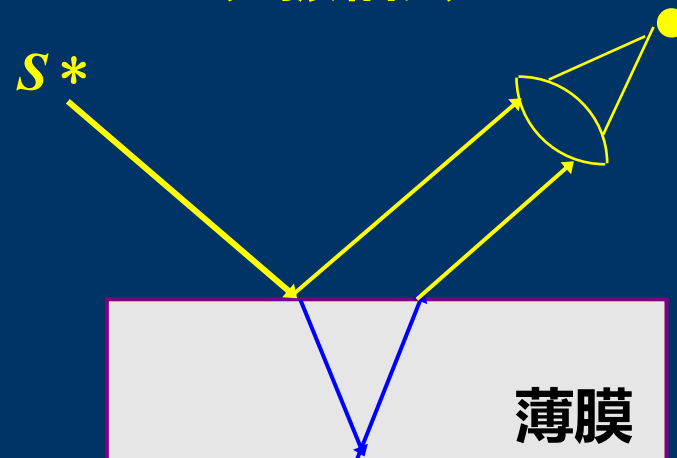
四. 获得相干光的方法 杨氏实验

普通光源获得相干光的途径:

分波面法



分振幅法



获取相干光的办法——“自己与自己相干”

2

如何由普通光源获得相干光？

方法为：由同一个波面获得两个相干光源

☒ A 正确

☐ B 不正确

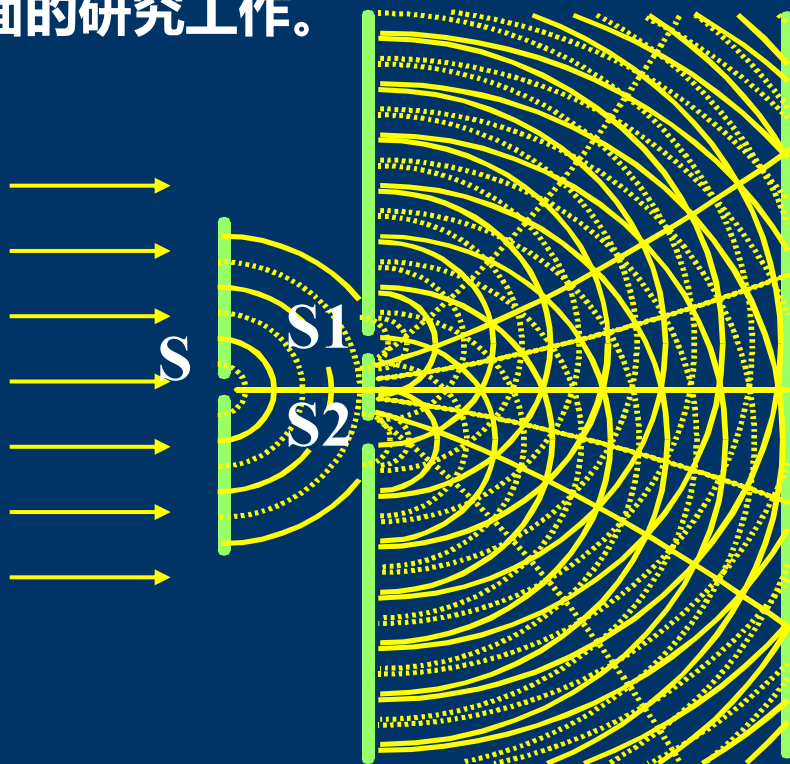
提交

§14.3 获得相干光的方法 杨氏实验

一. 杨氏双缝实验 (1801年, 著名的波动光学实验)

(Wave front - splitting interference)

1807年, 英国著名物理学家、医生、波动光学的奠基人之一, 托马斯·杨 (Thomas Young, 1773 — 1829) 出版了《自然哲学讲义》, 阐述了他在光学方面的研究工作。



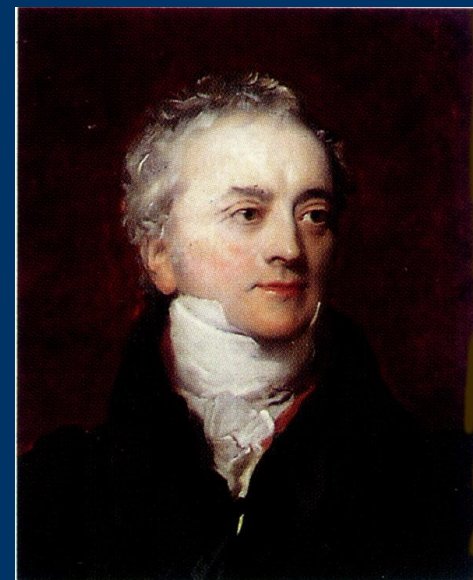
明条纹

暗条纹

明条纹

暗条纹

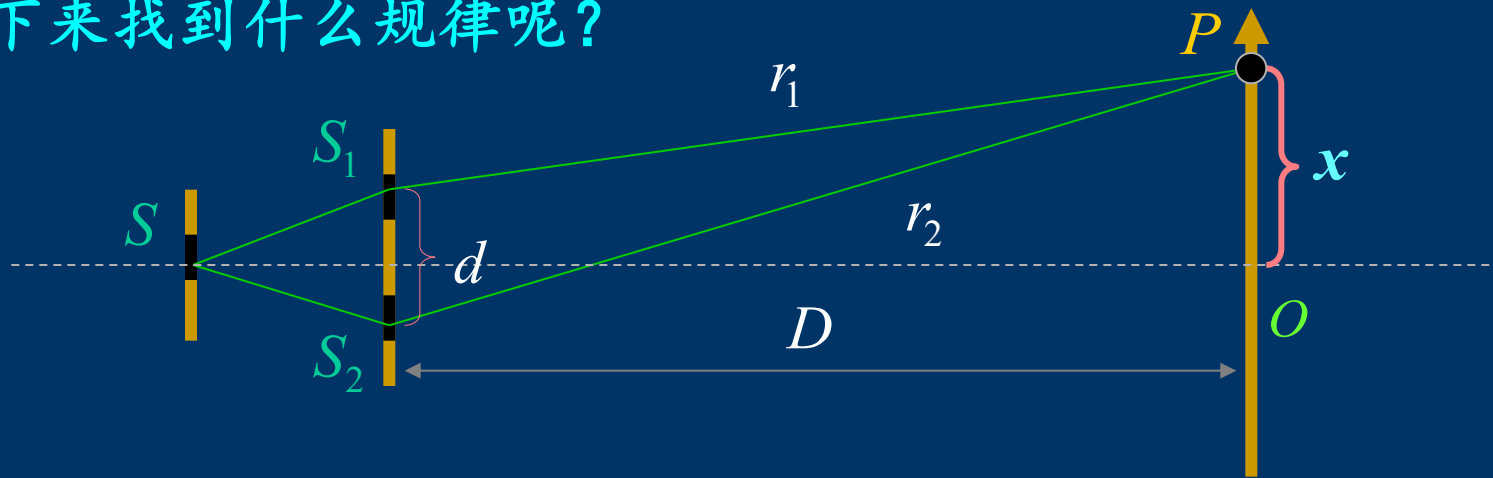
明条纹



Thomas Young
(1773–1829).

观测屏

接下来找到什么规律呢？

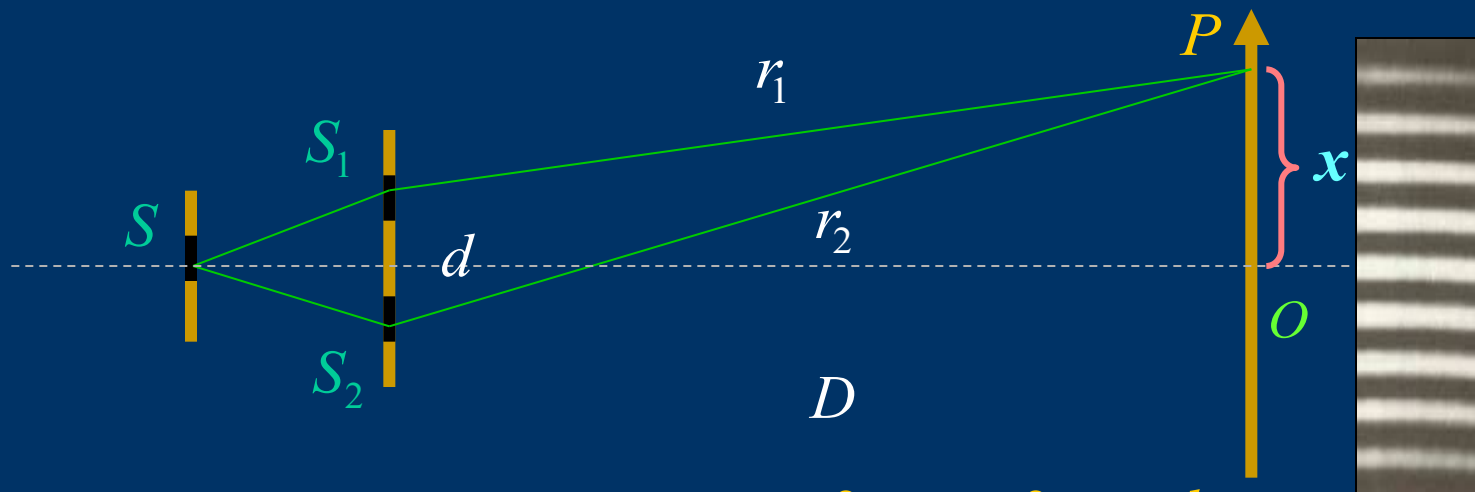


两波在 P 点的相位差恒定不变，为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} (\overline{S_1P} - \overline{S_2P}) = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1)$$
$$r_1^2 = D^2 + (x - d/2)^2 \quad r_2^2 = D^2 + (x + d/2)^2$$
$$(x, d \ll D)$$

波程差

$$\delta = r_2 - r_1 = \sqrt{D^2 + (x + d/2)^2} - \sqrt{D^2 + (x - d/2)^2}$$
$$= \frac{2xd}{\sqrt{D^2 + (x + d/2)^2} + \sqrt{D^2 + (x - d/2)^2}} \approx \frac{2xd}{2D} = \frac{xd}{D}$$



两波在 P 点的相位差恒定不变, 为 $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x d}{D}$

• 明纹 $\Delta\varphi = 2k\pi$ $x_k = k \frac{D\lambda}{d}$ $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

相邻明纹中心间距

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{D\lambda}{d}$$

• 暗纹 $\Delta\varphi = (2k + 1)\pi$ $x_k = (k + \frac{1}{2}) \frac{D\lambda}{d}$ $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

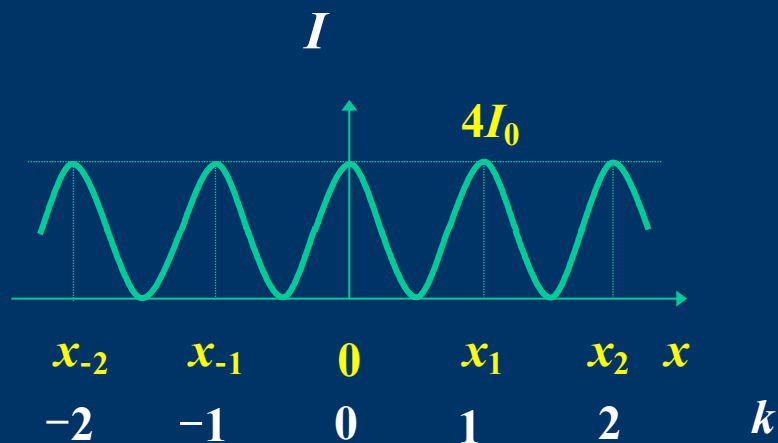
相邻暗条纹中心间距

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{D\lambda}{d}$$

◆光强分布图

$$\left\{ \begin{array}{l} I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \varphi \\ \Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \delta \end{array} \right.$$

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



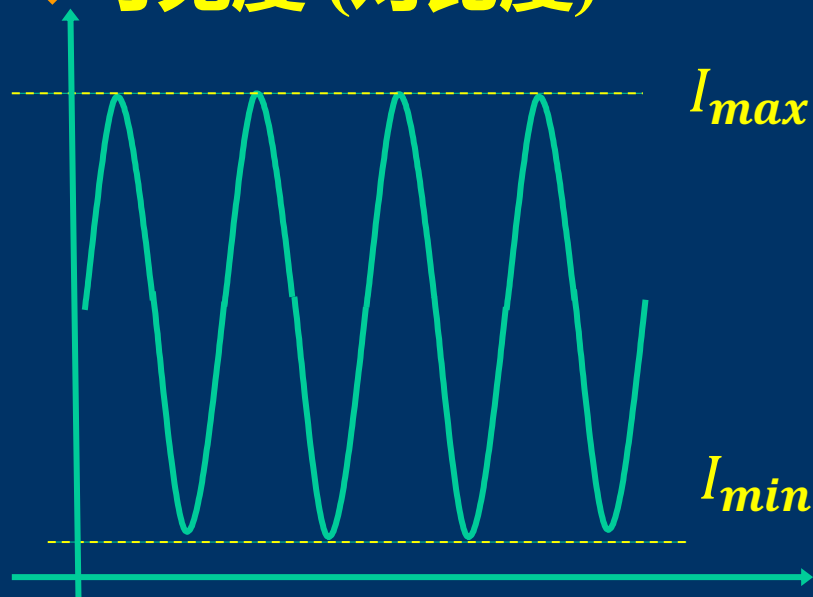
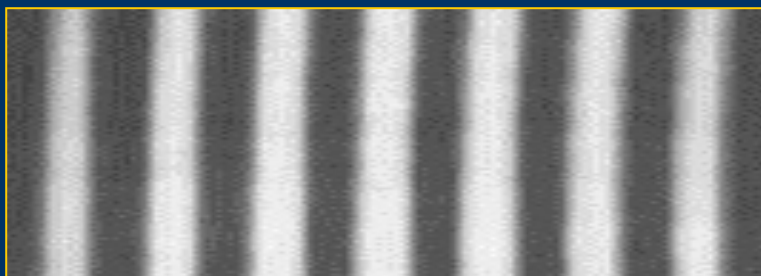
若

$$I_1 = I_2$$

$$I = 4I_0 \cos^2(\Delta \varphi / 2)$$

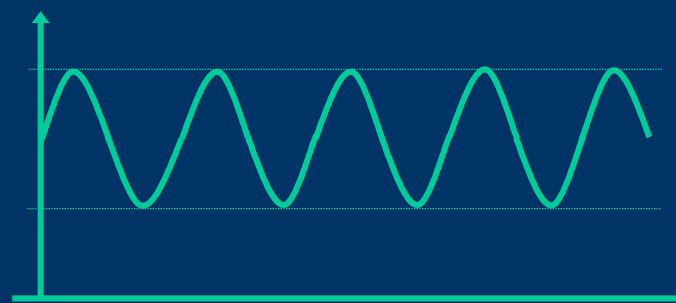


◆可见度 (对比度)



$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad 0 < V < 1$$

$$\begin{cases} I_{min} = 0 \rightarrow V = 1 \\ I_{min} = I_{max} \rightarrow V = 0 \end{cases}$$



◆杨氏双缝干涉对比度

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

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

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



$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = \frac{2\sqrt{I_1/I_2}}{I_1/I_2 + 1}$$



$$I_1 = I_2 \rightarrow V = 1$$

$$I_1 \gg I_2$$

or

$$I_2 \gg I_1$$



$$V = 0$$

所以，当两个狭缝进光量差距较大时也无法观测到干涉现象

对杨氏干涉的评价

★简单：只有一个分光波的装置。

★巧妙：自身之间相干叠加。

★深刻：1、找到了相干光；2、干涉是自身的一部分与另一部分的线性叠加；3、这是量子力学的基石之一。

★十大“最美的物理学实验”之首（双缝干涉应用于电子干涉实验，1961）、第五位（光干涉实验）。

WAVE PARTICLE DUALITY

All the animations and explanations on
www.toutestquantique.fr

例：HeNe激光（632.8 nm）照射间隔 0.5 mm 的双孔，求在离其 2 m 处平面上的干涉条纹间距，是波长的多少倍？

已知： $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $d = 0.5 \text{ mm}$, $D = 2 \text{ m}$

有： $\Delta x = \lambda D / d$ $\Delta x / \lambda = D / d \approx 4 \times 10^3$ 倍

研究干涉现象，首先要做的事情就是？

寻找始终加强位置或减弱位置满足的方程，即

$$(\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = 2k\pi$$

$$(\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = (2k+1)\pi$$

例：以单色光入射到相距为 **0.2 mm** 的双缝上，双缝与屏幕的垂直距离为 **1 m**。（1）从一级明条纹到同侧四级明条纹的距离为 **7.5 mm**，求单色光波长？（2）若入射光的波长为 **600 nm**，中央明条纹中心距离最近的暗纹中心距离是多少？

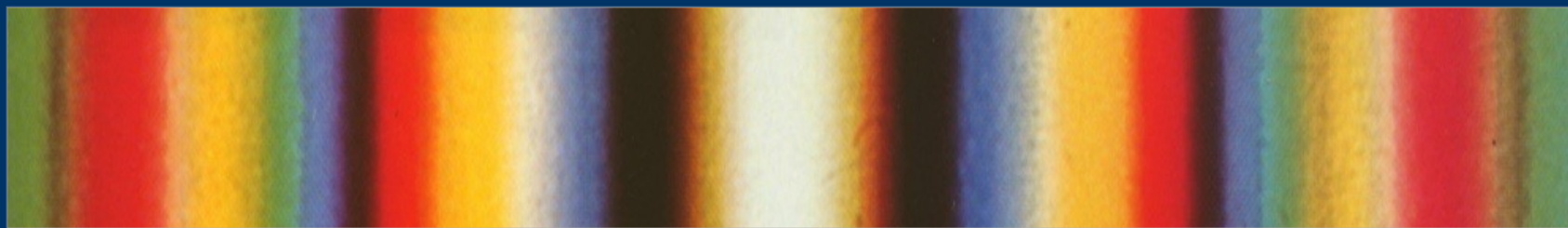
解：（1）
$$x_k = \pm k \frac{D\lambda}{d}, \quad k = 0, 1, 2$$

$$\Delta x_{1,4} = x_4 - x_1 = \frac{D\lambda}{d} (4 - 1) \quad \longrightarrow \quad \lambda = 500 \text{ nm}$$

$$\text{(2)} \quad \Delta x' = \frac{1}{2} \frac{D\lambda}{d} = 1.5 \text{ mm}$$

★讨论

- (1) 为了能分辨各级，得到干涉图像，要求 $d \ll D$
- (2) 当用白光作为光源时，在零级白色中央条纹两边对称地排列着几条彩色条纹



2
级
明
纹

1
级
明
纹

0
级
明
纹

★ 讨论

在双缝干涉实验中，以白光为光源，在屏上观察到了彩色干涉条纹．若在双缝中的一缝前放一红色滤光片（只能透过红光），另一缝前放一绿色滤光片（只能透过绿光），这时（ C ）

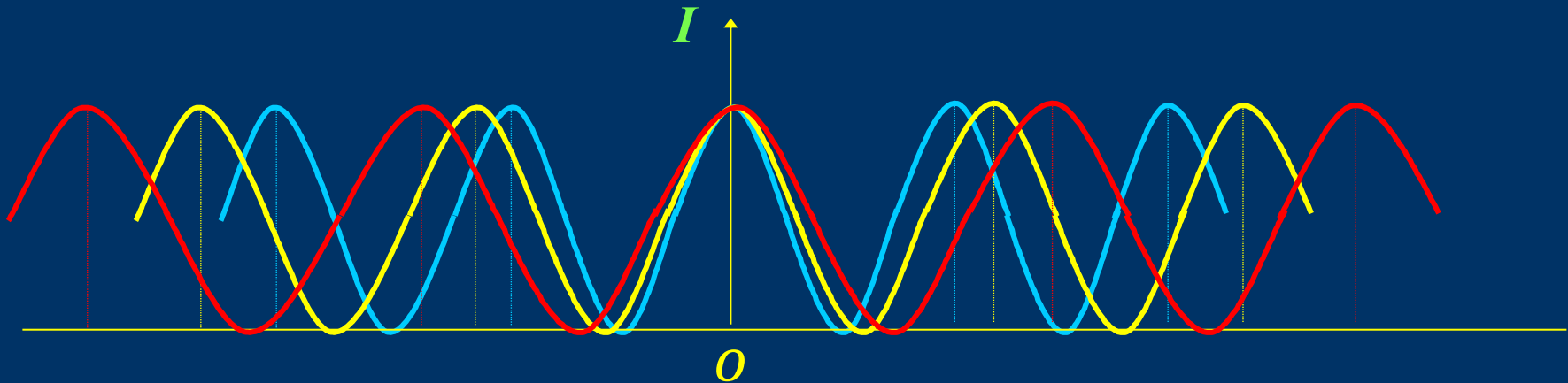
- A. 只有红色和绿色的双缝干涉条纹、其它颜色的双缝干涉条纹消失
- B. 红色和绿色的双缝干涉条纹消失，其它颜色的双缝干涉条纹依然存在
- C. 任何颜色的双缝干涉条纹都不存在、但屏上仍有光亮
- D. 屏上无任何光亮



讨论

(3) 间距与波长关系

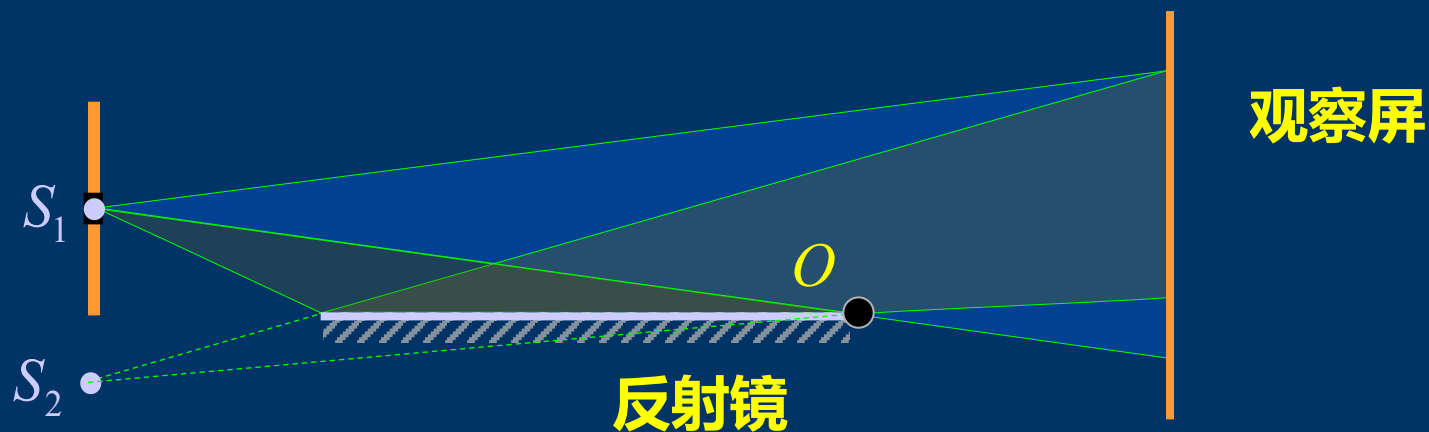
由于 $\Delta x = \frac{D\lambda}{d}$, 当 d 和 D 保持不变时, $\Delta x \propto \lambda$



(4) 间距 Δx 与两缝间距 d 关系

由于 $\Delta x = \frac{D\lambda}{d}$, 当 λ 和 D 保持不变时, $\Delta x \propto \frac{1}{d}$

二. 洛埃镜



(洛埃镜实验结果与杨氏双缝干涉相似)

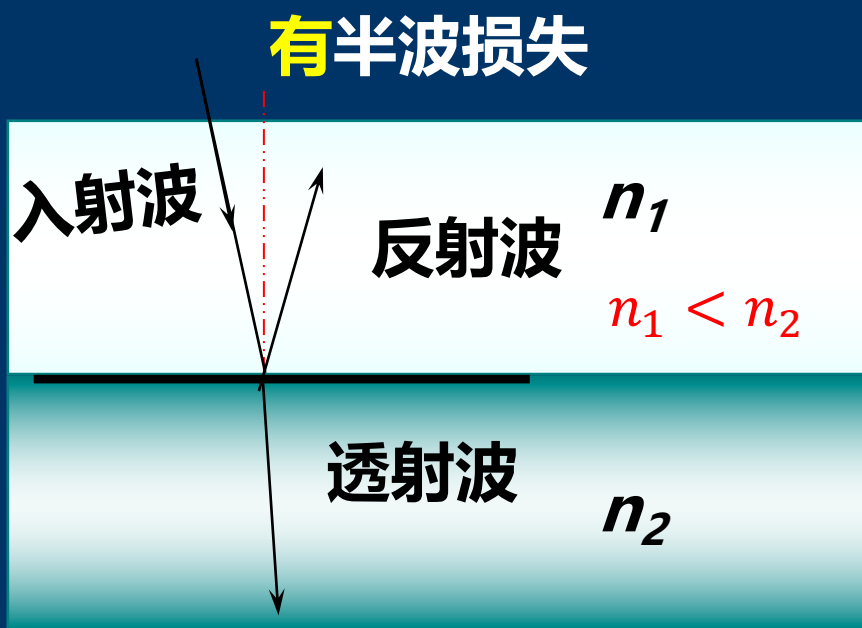
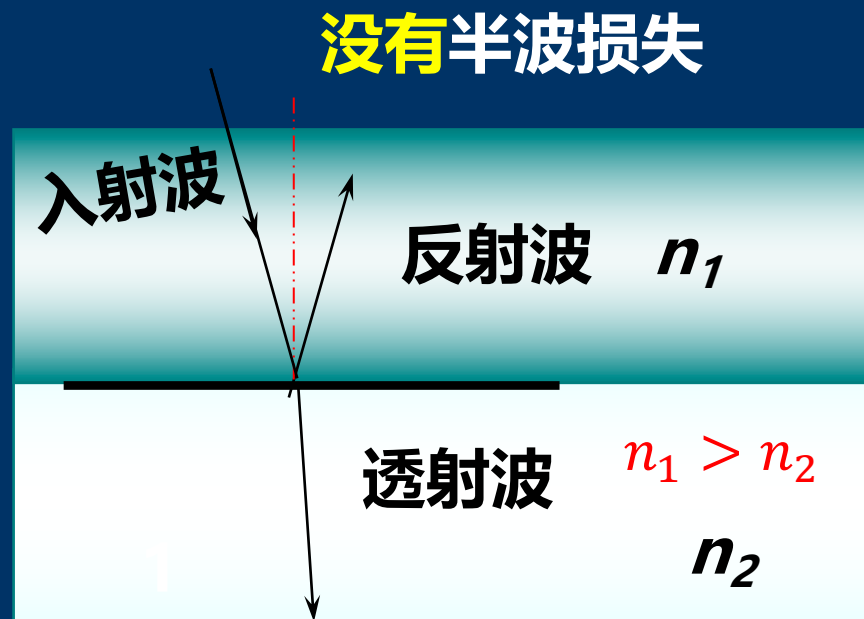
- 接触处, 屏上 O 点出现暗条纹



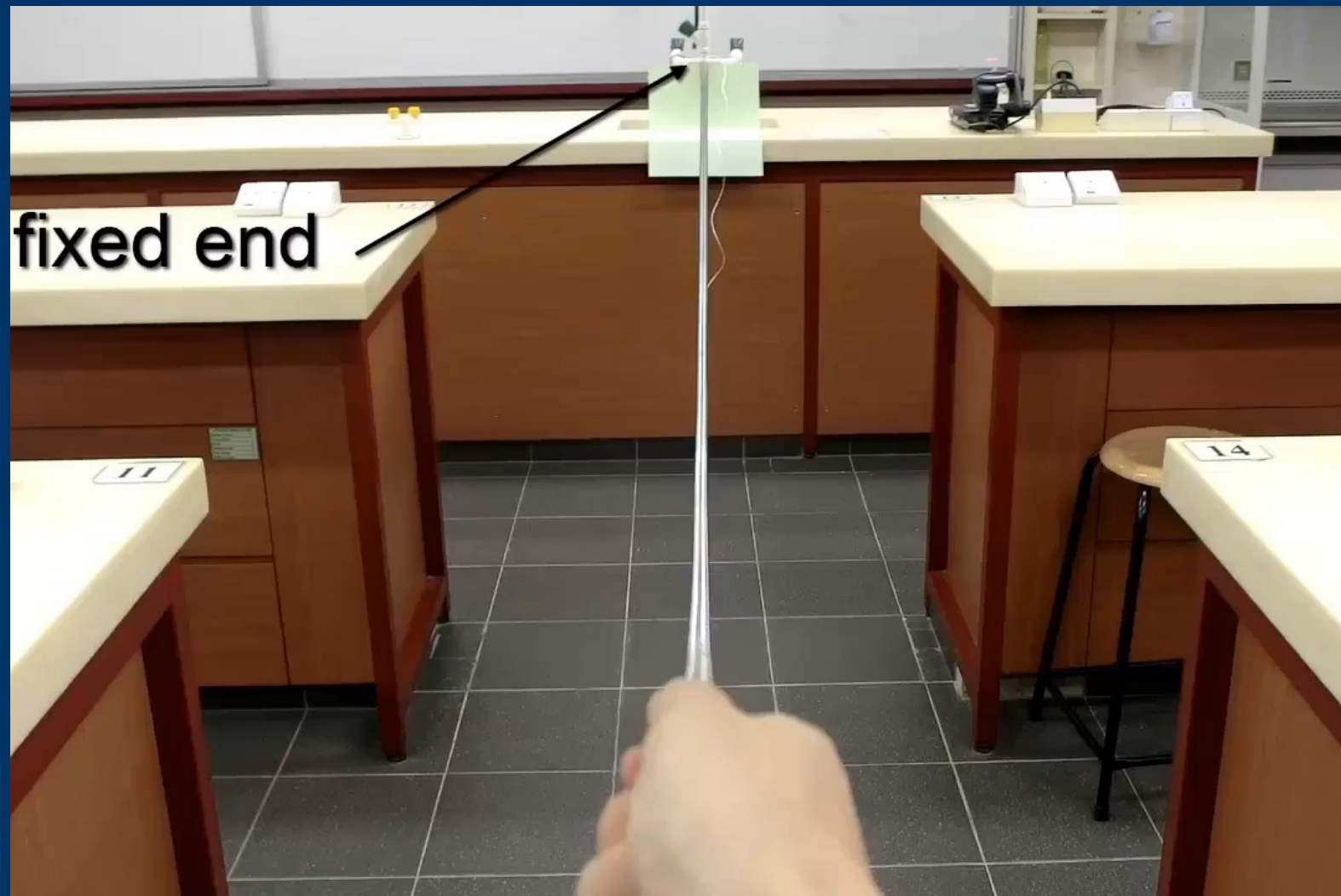
半波损失

半波损失

- 光波从折射率小的光疏介质向折射率大的光密介质入射时，反射光要产生数值为 π 的相位突变. 这相当于反射光波多走了(或少走了)半个波长.



- 透射波没有半波损失



fixed end

5

在双缝干涉实验中，两条缝的宽度原来是相等的，若其中一缝的宽度略变窄，但保持缝间距不变，则

- A 干涉条纹的间距变宽
- B 干涉条纹的间距变窄
- C 干涉条纹的间距不变，但原极小处的强度不再为零
- D 不再发生干涉现象

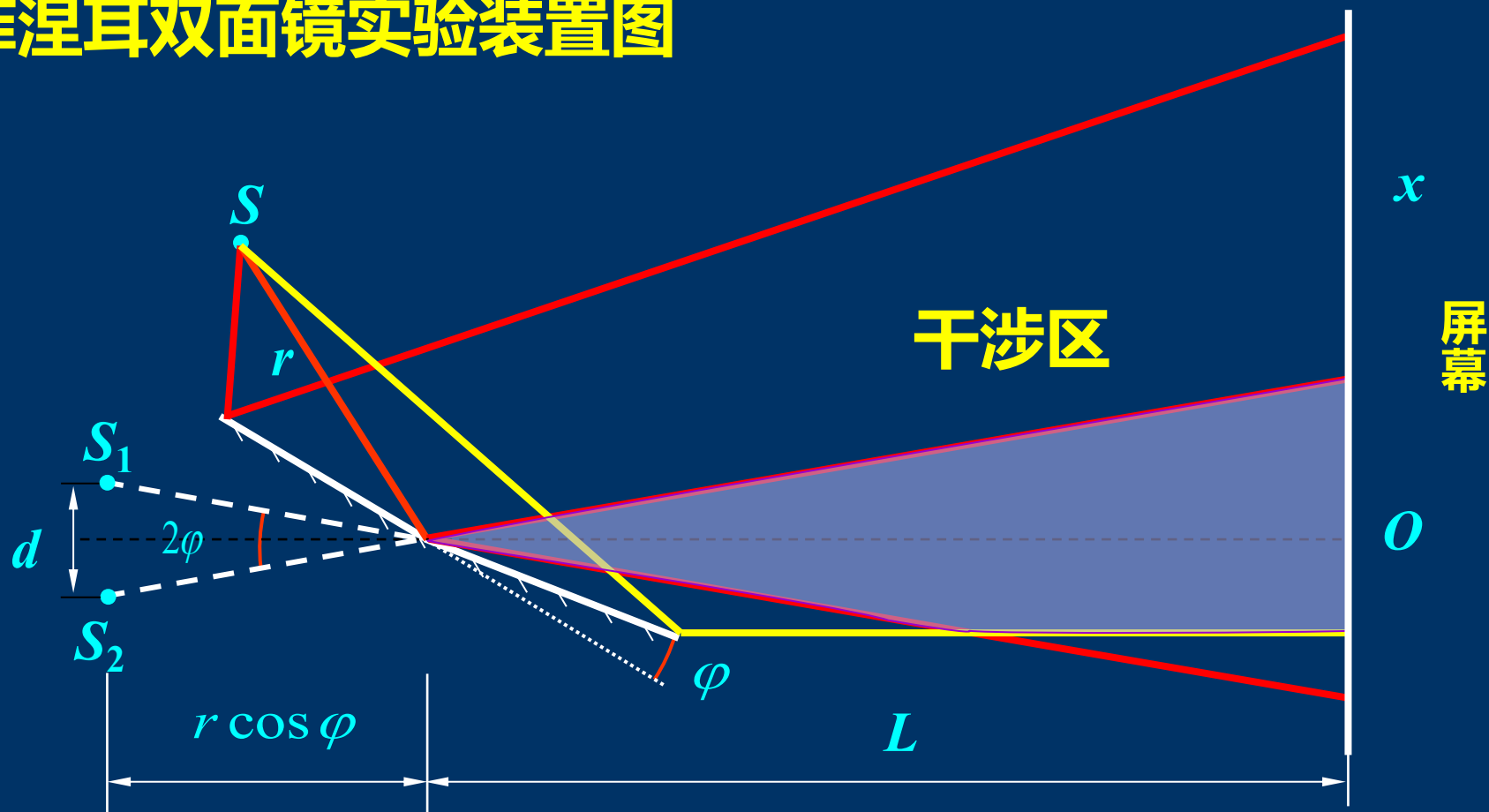
提交

三. 其他分波面干涉实验

杨氏实验装置中的小孔或狭缝都很小，他们的边缘往往对实验产生影响（衍射），而使问题复杂化。继杨氏实验之后，菲涅耳又做了两个新的实验。装置更为简单，分别称为**菲涅耳双面镜**和**菲涅尔双棱镜实验**。

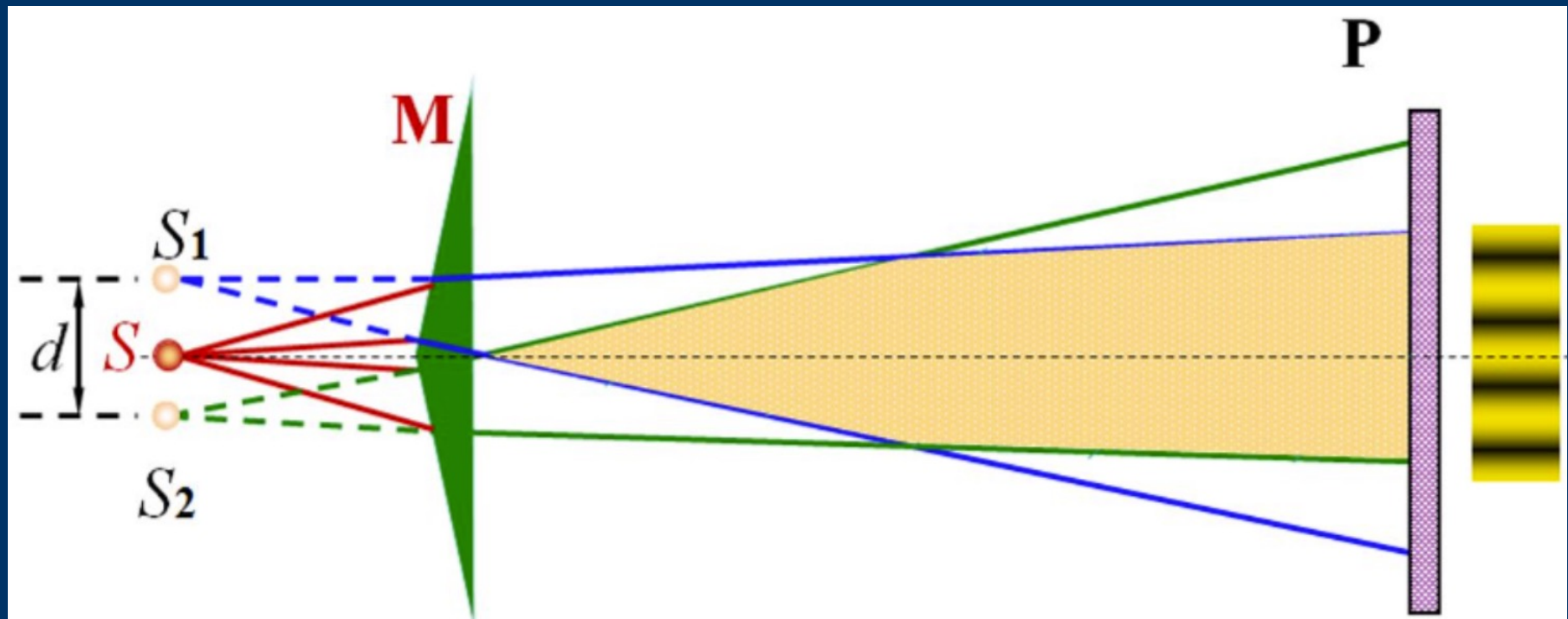


菲涅耳双面镜实验装置图



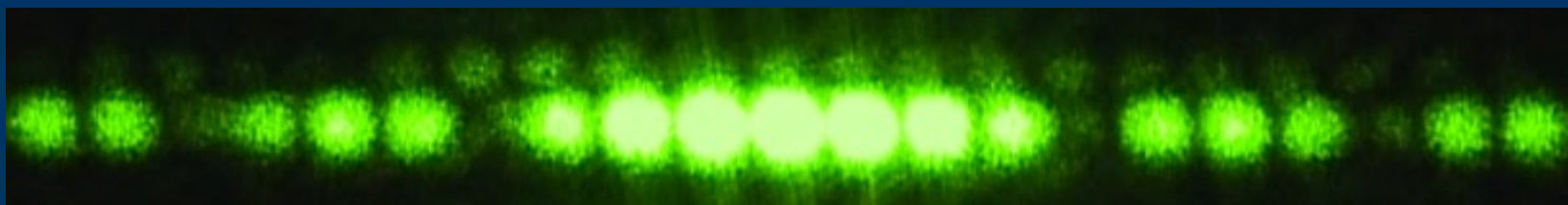
- (1) 调节两平面镜之间的夹角 φ ，可改变 S_1 和 S_2 间距，从而改变屏幕上干涉条纹的疏密程度.
- (2) φ 必须很小，否则干涉条纹过密，将观察不到明显的干涉现象.

菲涅耳双棱镜实验



讨论 如果光源 S 关于两个缝 S_1 和 S_2 不对称放置时,

(1) 与对称放置相比, 干涉图有变化吗?

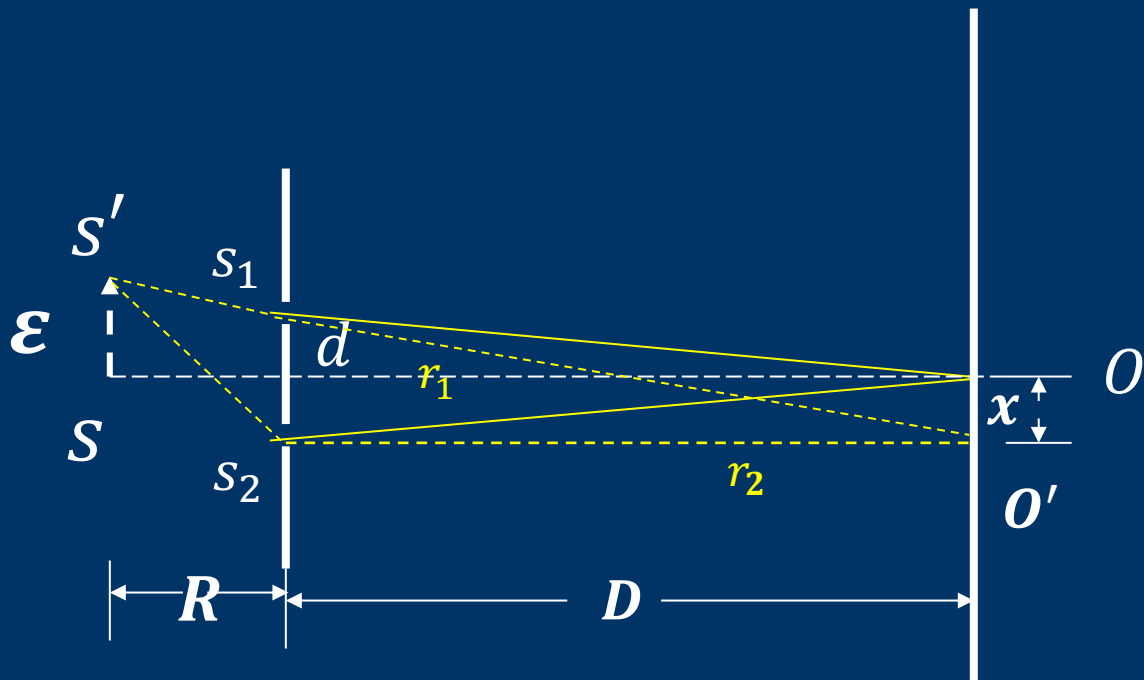


(2) 条纹是否移动? 判断的依据是什么?

(3) 如何移动? 判断的依据是什么?

光源 $S \rightarrow S'$, 偏移量为 ξ , 条纹何变动?

第一步: 波程差?



$$\begin{aligned}\delta &= (s_2 + r_2) - (s_1 + r_1) \\ &= (s_2 - s_1) - (r_2 - r_1) \approx d \frac{\epsilon}{R} + d \frac{x}{D}\end{aligned}$$

零级亮纹位置: $\delta = 0$

$$\therefore d \frac{\epsilon}{R} + d \frac{x}{D} = 0 \rightarrow x = -\frac{D}{R} \epsilon$$

新零级亮纹在 $x = -D \frac{\epsilon}{R}$ 处

当 $S \rightarrow S'$ 时, 条纹整体向下平移

条纹间距不变

★ 讨论

(1) 以白光入射于杨氏双缝干涉装置，条纹是否会重叠？或者说光谱是否会重叠？重叠的含义是？重叠满足的条件为？

(2) 以不同波长入射光于杨氏双缝干涉装置，条纹有什么不同？

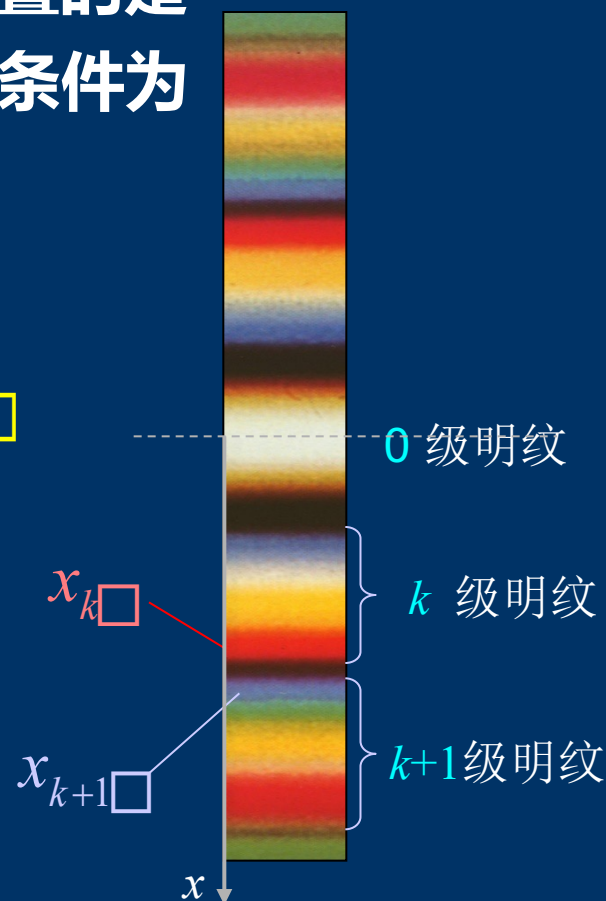
例 用白光作光源观察杨氏双缝干涉。设缝间距为 d ，缝面与屏距离为 D

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，最先发生重叠的是某一级次的红光和高一级次的紫光. 明纹条件为

$$\left. \begin{aligned} x_{k\lambda} &= k \frac{D\lambda_{\square}}{d} \\ x_{(k+1)\lambda} &\ll k + 1 \frac{D\lambda_{\square}}{d} \\ x_{(k+1)\lambda} &\geq x_{k\lambda} \end{aligned} \right\} \rightarrow k \lambda_{\square} \leq (k+1) \lambda_{\square}$$
$$k \leq \frac{\lambda_{\square}}{\lambda_{\square} - \lambda_{\square}} = \frac{400}{760 - 400} = 1.1$$

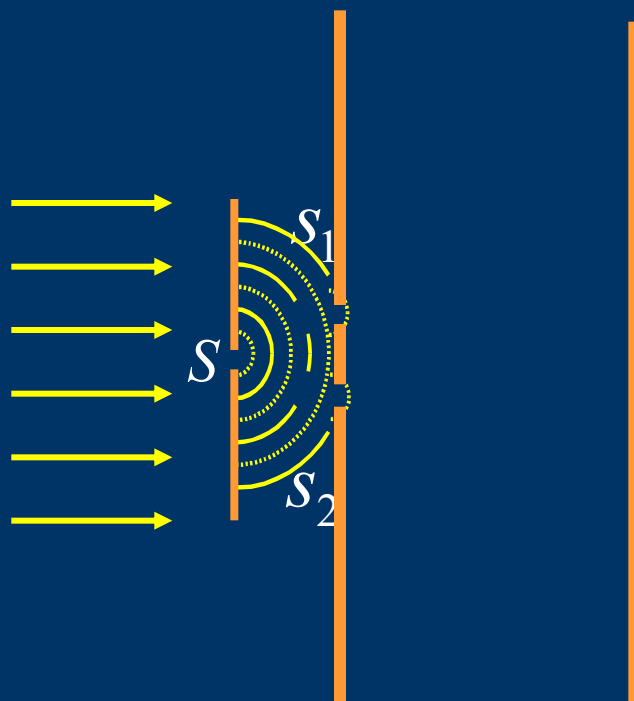
清晰的可见光谱只有一级



讨论

将杨氏双缝干涉放置于水中，原来波程差为 δ 保持不变，
相位差 $\Delta\varphi$ 是否变化？

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



§14.4 光程与光程差

真空中

$$c \quad \nu \quad \lambda$$

介质中

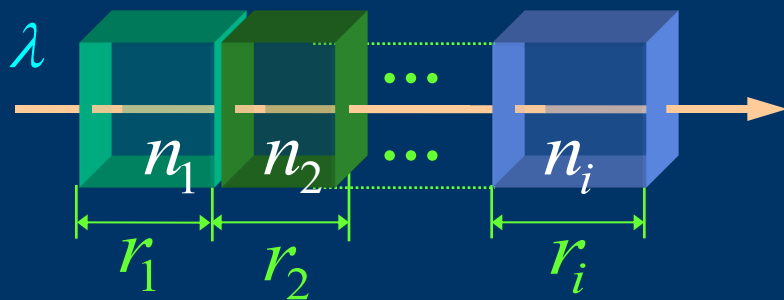
$$u = \frac{c}{n} \quad \nu \quad \lambda' = \frac{\lambda}{n}$$

在介质中传播距离 r 时，相位的改变为

光程

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda'} r = \frac{2\pi}{\lambda/n} r = \frac{2\pi}{\lambda} (nr)$$

在相位改变相同的条件下，把光在介质中传播的路程折合为光在真空中传播的相应路程



在多种介质中

$$\text{光程} = \sum_i n_i r_i$$

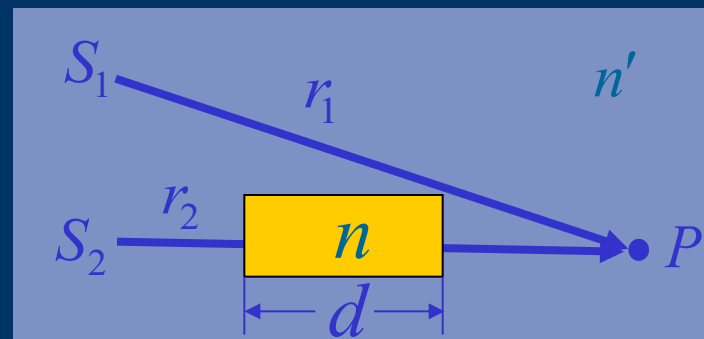
例 两光源 $\omega_1 = \omega_2$ ，初相分别为 φ_1 、 φ_2 。求两波在 **P** 点相位差

解 S_1P 光程 $n' r_1$

S_2P 光程 $n'(r_2 - d) + nd$

S_2 发出的波在 **P** 点的相位

S_1 发出的波在 **P** 点的相位



$$\omega_2 t + \varphi_2 - \frac{2\pi}{\lambda} [n'(r_2 - d) + nd]$$

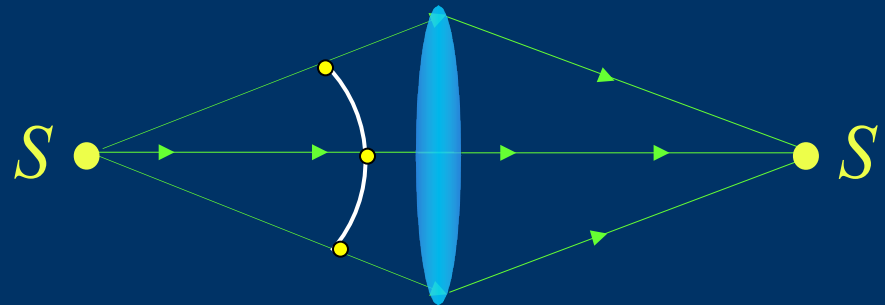
$$\omega_1 t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{\lambda} (n' r_1)$$

两波在 **P** 点相位差为

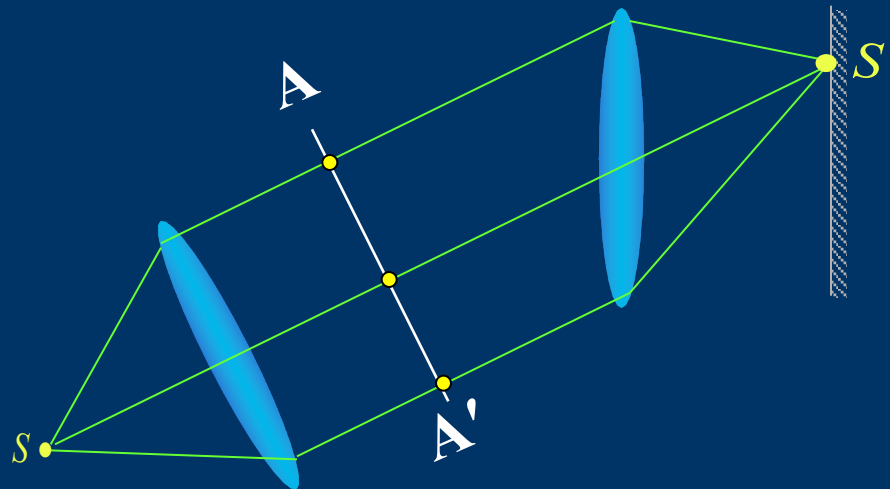
$$\varphi_1 - \varphi_2 + \frac{2\pi}{\lambda} \{ [n'(r_2 - d) + nd] - n' r_1 \}$$

初相差 光程差

例 物象之间等光程原理



物点象点间 所有光线的光程相等



AA' 波面上各点到象点的光线的光程相等

5

一双缝干涉装置，在空气中观察时干涉条纹间距为 1.0mm 。若整个装置放在水中，干涉条纹的间距将变为(设水的折射率为 1.33)

- ☐ A 0.75mm
- ☐ B 1.0mm
- ☐ C 1.33mm
- ☐ D 3.03mm

提交

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？

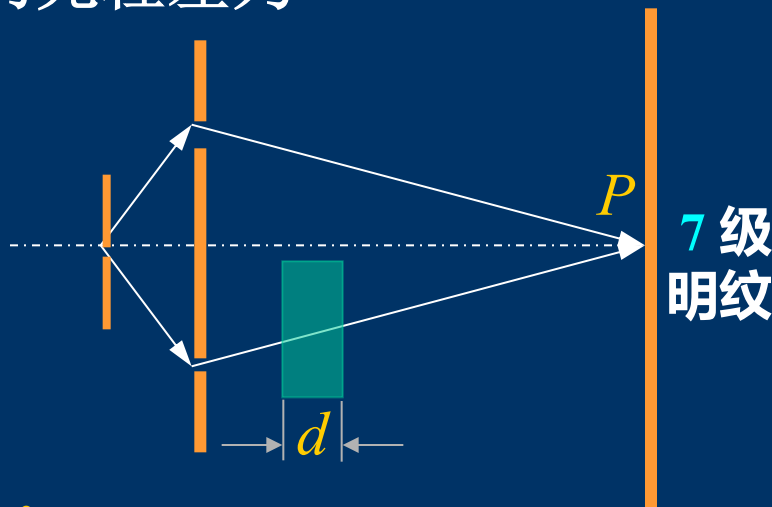
解 设云母片厚度为 d 。无云母片时，零级亮纹在屏上 P 点，则到 P 点的两束光的光程差为零；加上云母片后，光程变化 $(n - 1)d$ ，则到 P 点的两光束的光程差为

$$\delta = (r_2 - d + nd) - r_1 = (n - 1)d$$

当 P 点为第七级明纹位置时

$$\delta = 7\lambda$$

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



例 在杨氏双缝实验中，用折射率 $n=1.58$ 的透明薄膜盖在上缝上，并用 $6.32 \times 10^{-7} \text{ m}$ 的光照射，发现中央明纹向上移动了5条。 **求** 该薄膜厚度？

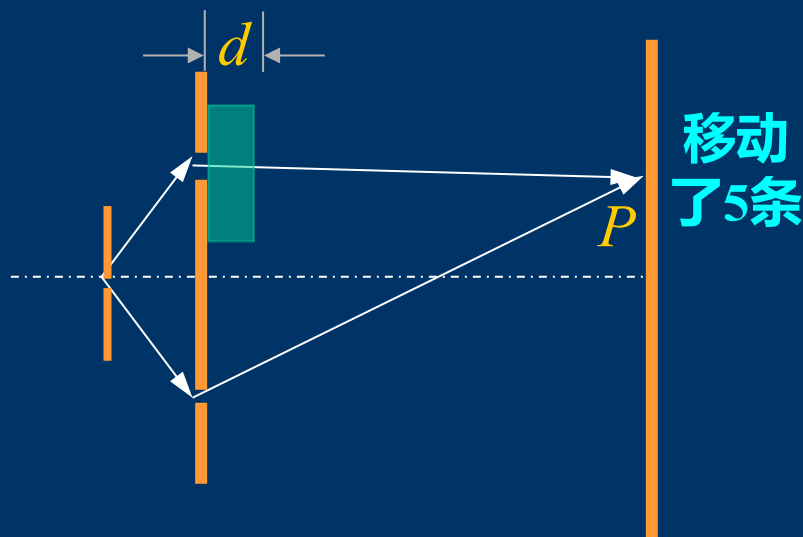
解 设P点为放入薄膜后中央明纹的位置，薄膜的厚度为 x

$$\therefore r_2 - (r_1 - d + nd) = 0$$

又因P点是未放薄膜时第N级的位置

$$\therefore r_2 - r_1 = \delta\lambda$$

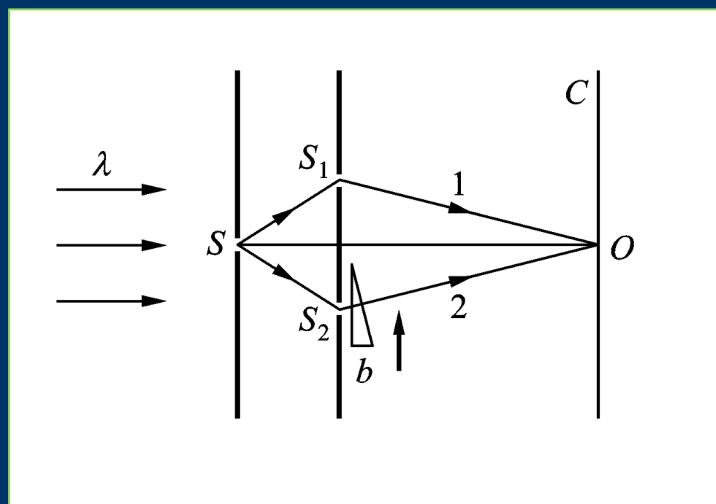
$$d = \frac{\delta\lambda}{n-1} = \frac{5 \times 6.328 \times 10^{-7}}{1.58-1} = 5.46 \times 10^{-6} \text{ m}$$



5

如图所示，用波长为 λ 的单色光照射双缝干涉实验装置，若将一折射率为 n ($n>1$)、劈角为 α 的透明劈尖 b 插入光线2中，则当劈尖 b 缓慢地向上移动时 (只遮住 S_2)，屏 C 上的干涉条纹

- A 间隔不变，向下移动
- B 间隔不变，向上移动
- C 间隔变大，向下移动
- D 间隔变小，向上移动



提交

例 波长为 600 nm 的平行光垂直入射在间距为 0.2 mm 的双缝上时，在缝后 1 m 处的像屏上形成干涉条纹，

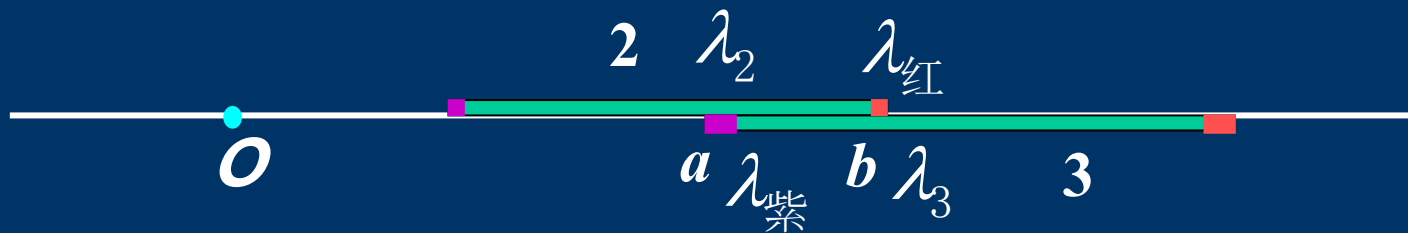
求 (1) 第十级明纹中心的位置和第十级明纹的宽度 (2) 波长改为 400~760 nm 的白光时，第二级谱线宽度、第二级谱线与第三级谱线重叠部分的宽度和重叠部分各波长范围。

解 (1) 明纹中心位置 $x = \pm k \frac{D}{d} \lambda$

$$x_{10} = 10 \frac{D}{d} \lambda = 10 \times \frac{1}{0.2 \times 10^{-3}} \times 600 \times 10^{-9} \text{ m} = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$$

第十级明纹的宽度

$$\Delta x = \frac{1}{0.2 \times 10^{-3}} \times 600 \times 10^{-9} \text{ m} = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$



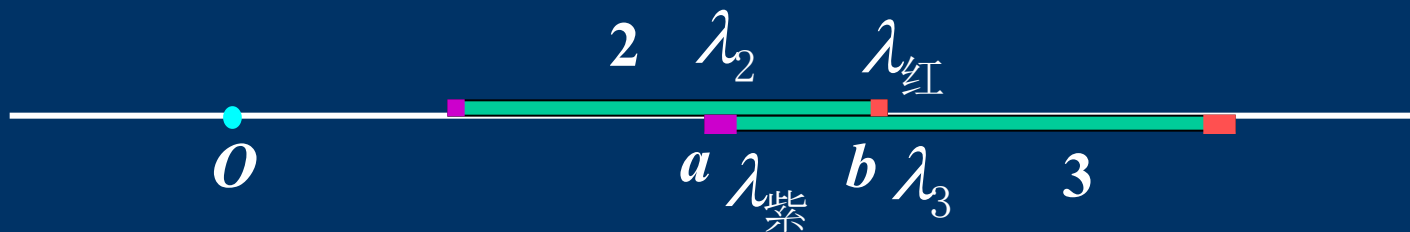
(2) 第二级谱线宽度

$$\begin{aligned}\Delta x_2 &= 2 \frac{D}{d} \Delta \lambda = 2 \times \frac{1}{0.2 \times 10^{-3}} \times (760 - 400) \times 10^{-9} \\ &= 3.6 \times 10^{-3} \text{ m}\end{aligned}$$

重叠: $x_2 = x_3$

$$a: \quad 2\lambda_2 = 3\lambda_{\square} \quad \lambda_2 = \frac{3}{2}\lambda_{\square} = \frac{3}{2} \times 400 = 600 \text{ nm}$$

$$b: \quad 2\lambda_{\square} = 3\lambda_3 \quad \lambda_3 = \frac{2}{3}\lambda_{\square} = \frac{2}{3} \times 760 = 507 \text{ nm}$$



第二级谱线与第三级谱线重叠部分各波长范围为

$$\Delta\lambda: k = 2: 600 \rightarrow 760\text{nm}; k = 3: 400 \rightarrow 507\text{nm}$$

第二级谱线与第三级谱线重叠部分的宽度为

$$\begin{aligned} \Delta x: \Delta x &= k \frac{D}{d} \Delta\lambda \\ &= 3 \times \frac{1}{0.2 \times 10^{-3}} \times (507 - 400) \times 10^{-9} = 1.6 \times 10^{-3} \text{m} \end{aligned}$$