

THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025



John
Clarke

Michel H.
Devoret

John M.
Martinis

“for the discovery of macroscopic quantum
mechanical tunnelling and energy quantisation
in an electric circuit”

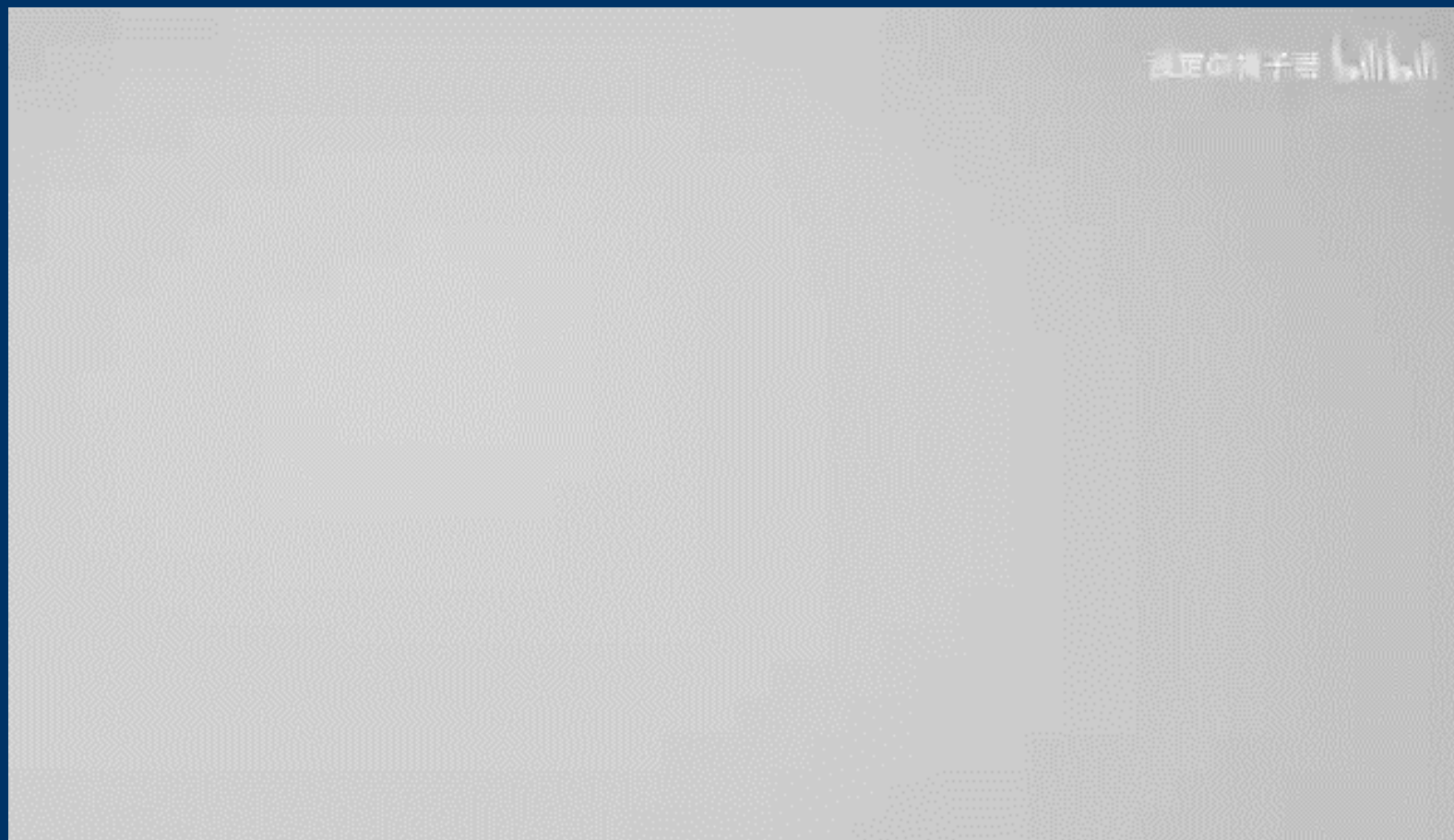
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

“在电路中发现宏观量子力学隧穿和能量量子化”

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*)



我定心清子言

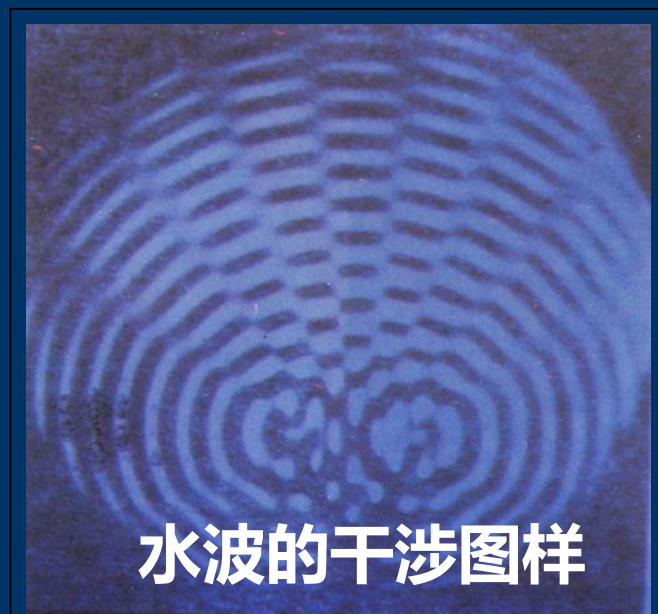
思考:

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？

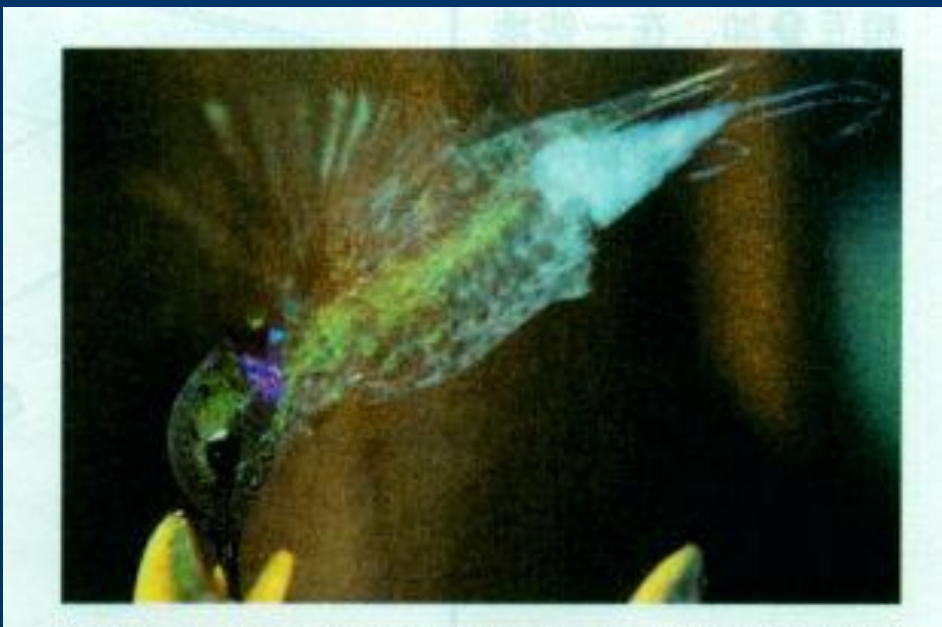
光的干涉：两列相干光波相叠加，某些区域的光被加强，某些区域的光被减弱，且加强区与减弱区互相间隔的现象叫光的干涉现象。

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



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？

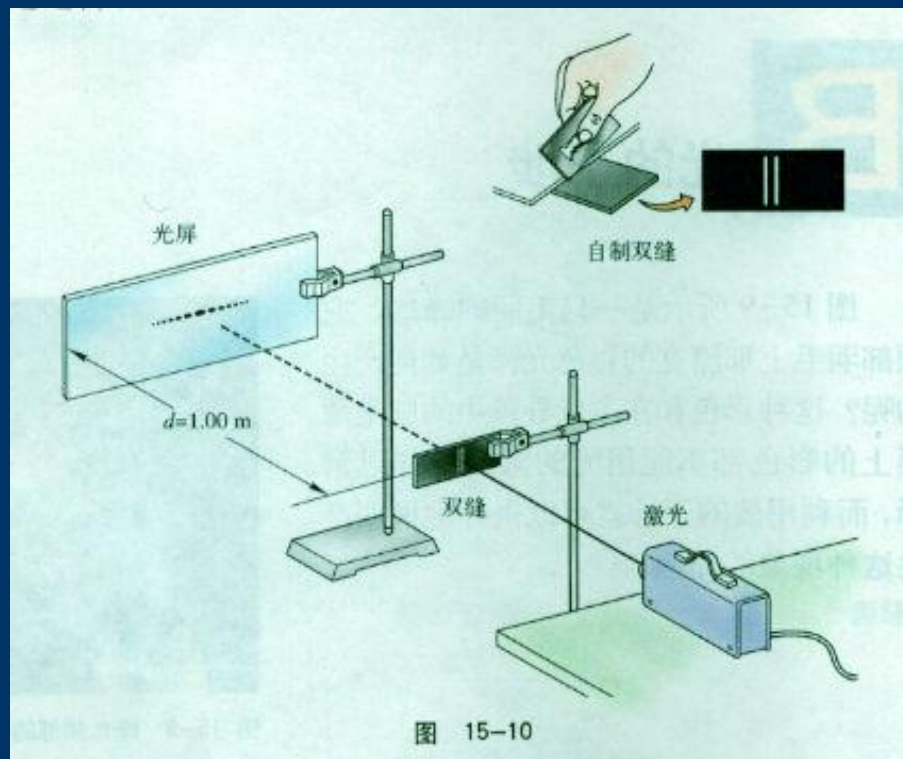
颈部羽毛上有一层漂亮的彩色光泽

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) 通过观察来描述干涉现象

定性描述

(3) 从物理本质上去分析产生现象的原因

定量描述

波的描述:

机械振动在介质中传播形成的波称为机械波，简称波。

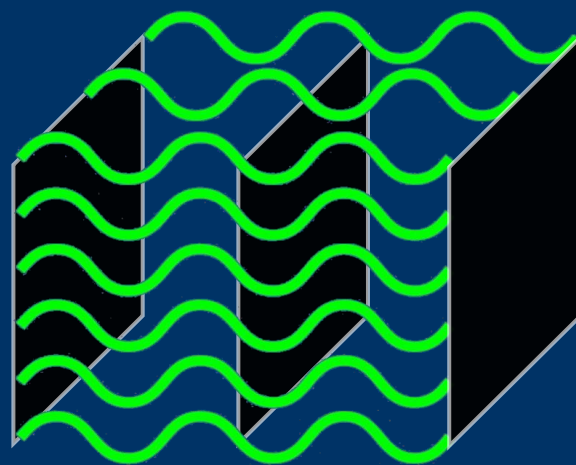
波源和介质是形成机械波的条件。

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

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 φ_0 — 初相位，即 $t = 0$ 时刻的相位

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

振幅 — 简谐振动在 t 时刻的相位，它描写振动的状态

T — 时间周期

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

ω — 时间圆（角）频率

ν — 时间频率

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

关于机械波传播特征，下列说法中正确的是

- 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

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

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

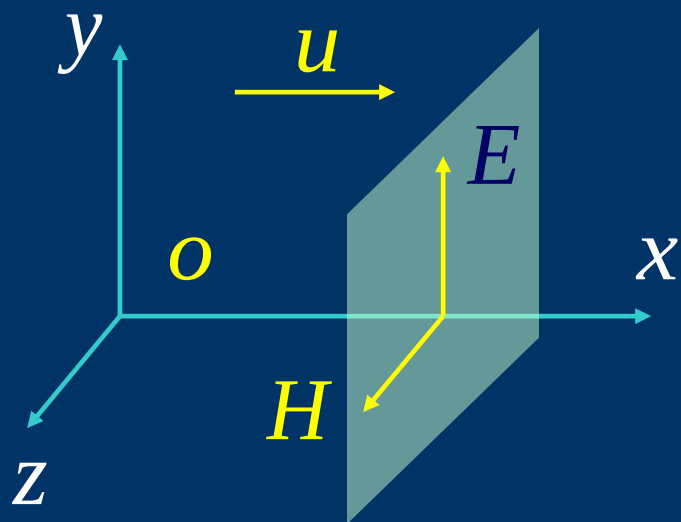
引言

- (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

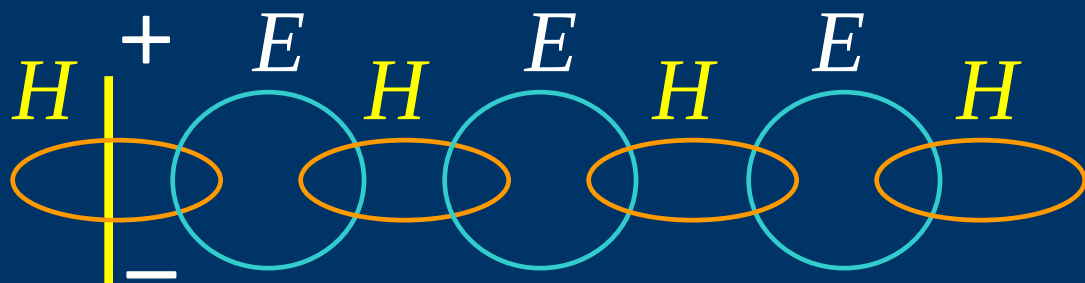
一. 光是电磁波

1. 真空中的电磁波

设一平面简谐电磁波

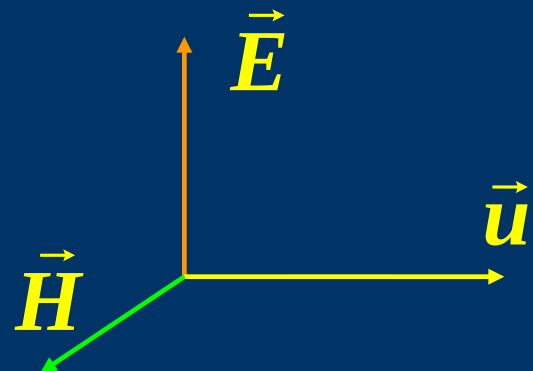


电磁波 = 交变电磁状态的传播



(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

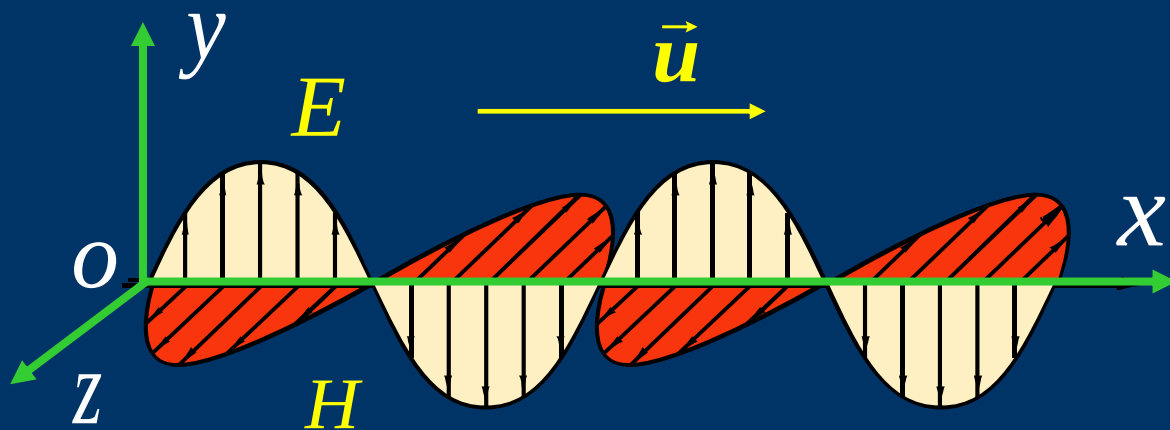
E, H 分别在各自的平面上振动。

(3) 电场与磁场同相变化

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

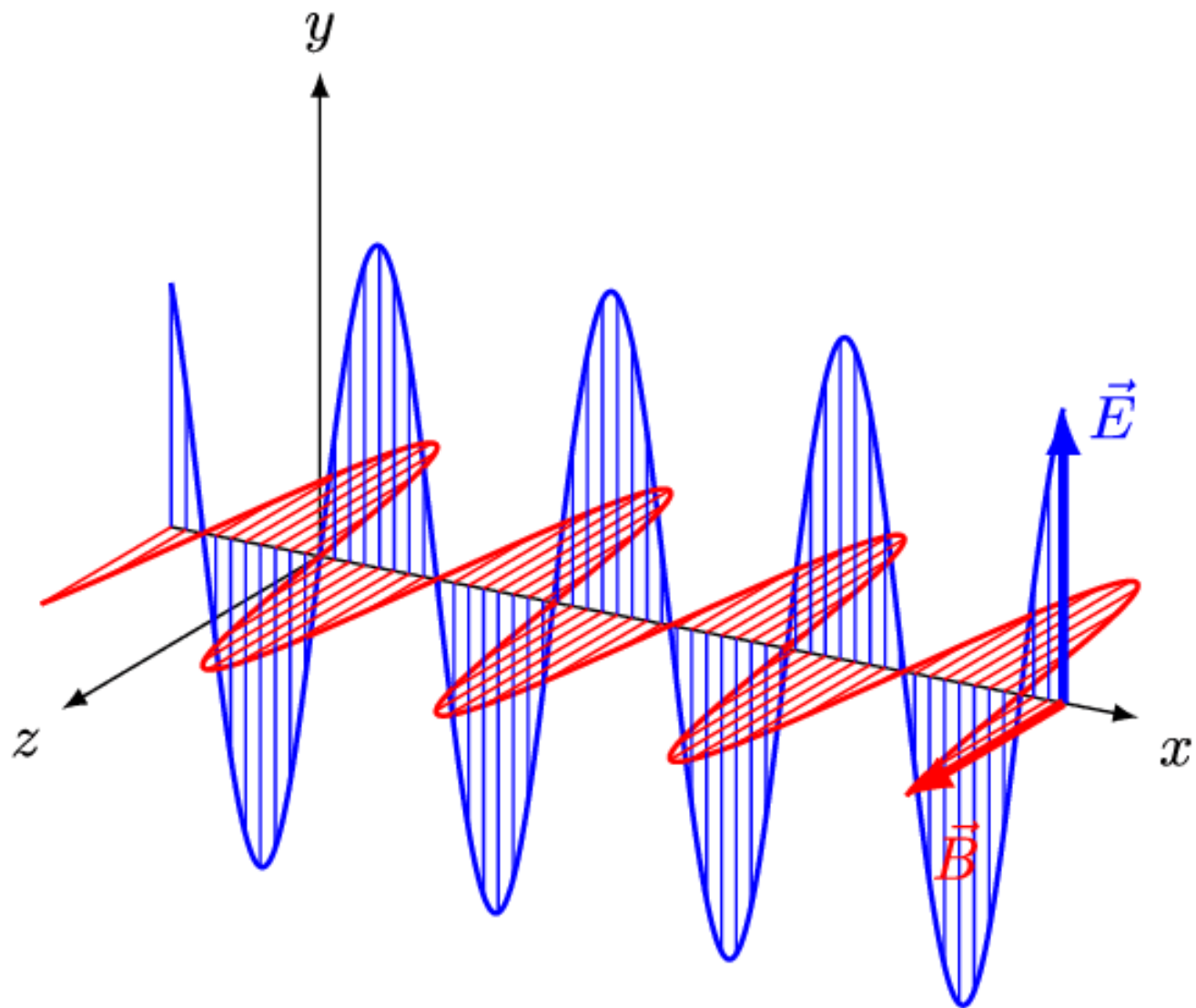
振幅之间满足：

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



• 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:

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

用麦氏电磁场方程组可推出

- 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

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

✎ 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：

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

✎ 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

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

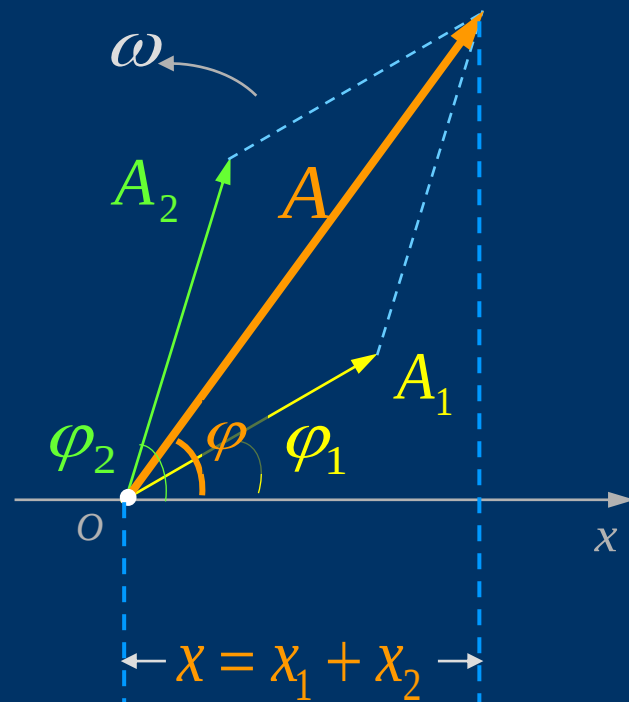
2. 合振动

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, $A = 0$

(3) 两个同方向同频率简谐运动合成仍为简谐运动。

问题:

既然简谐振动合成能相长和相消，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？

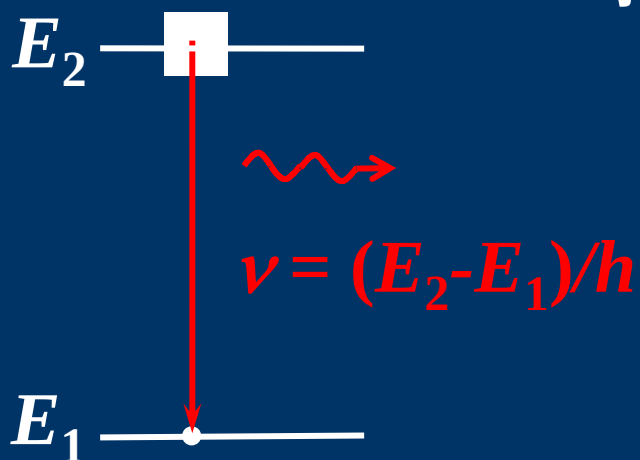
三. 波的干涉

一. 光源 (light source)

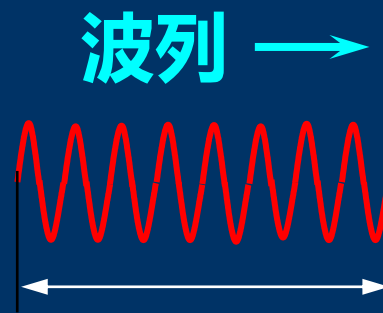
任何发光物体都可以称为光源。

光源的最基本发光单元是分子、原子。

能级跃迁辐射



光源中每个原子每次发射的电磁波为持续时间很短 (τ)、长度有限的波列。



(1) 光波列长度

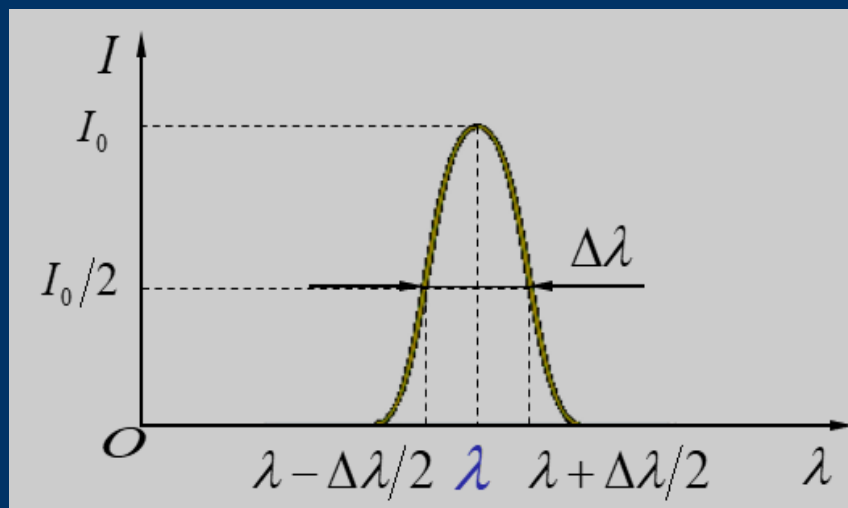
$$L = \tau c$$

(2) 单色性关系

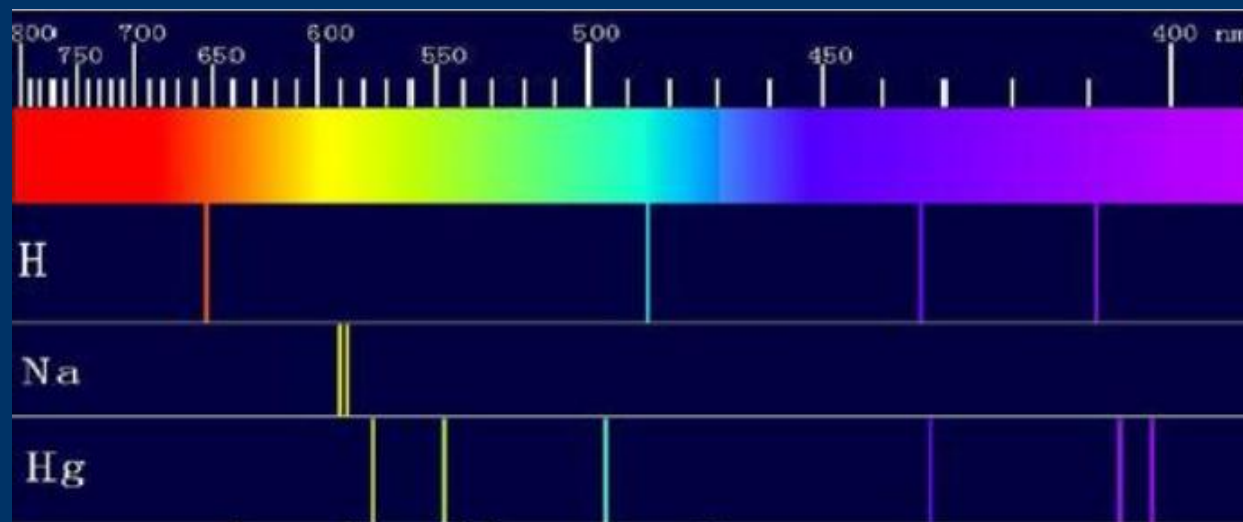
$$\Delta\lambda \sim 1/\tau$$

(3) 光波列长度与其单色性关系

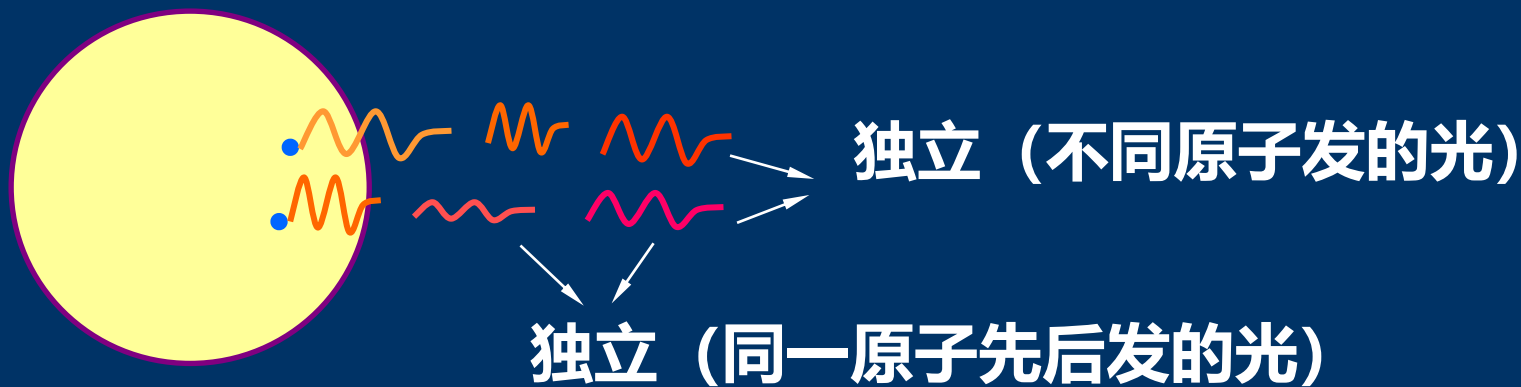
$$L = \lambda^2 / \Delta\lambda$$



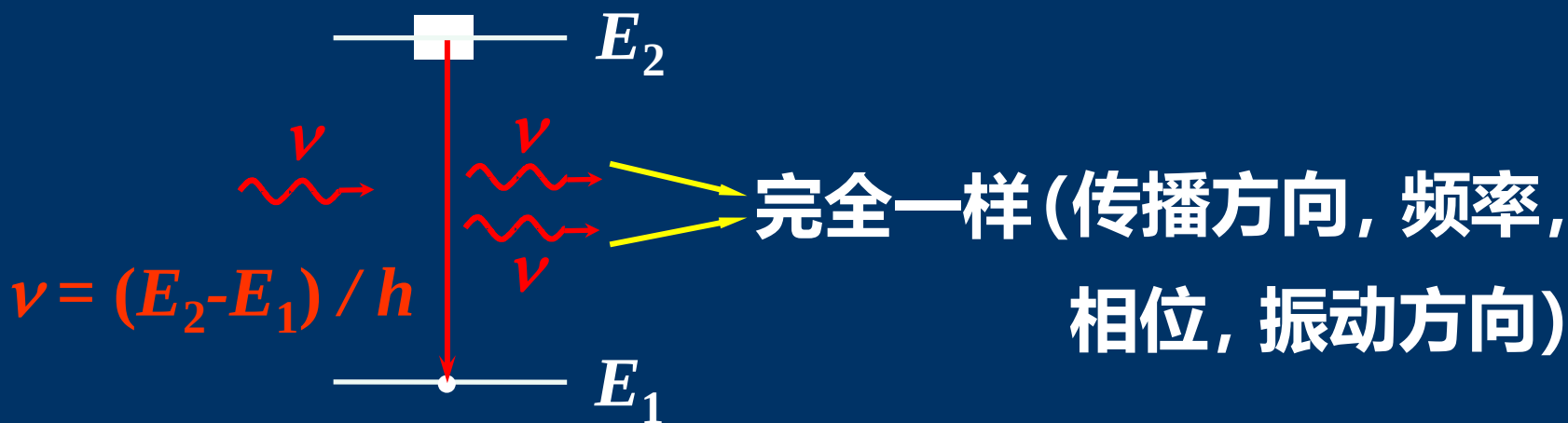
不同原子的特征谱线



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？

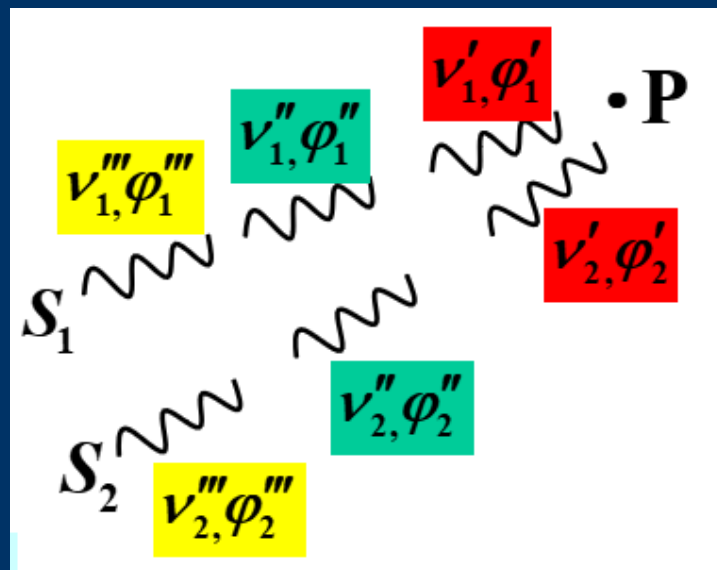
光源发光机理： 发光基本单元的原子能量是分立的

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： $l = c\Delta t$ （一般的波列长度约几微米）

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

∴ 一般光源为非相干光源



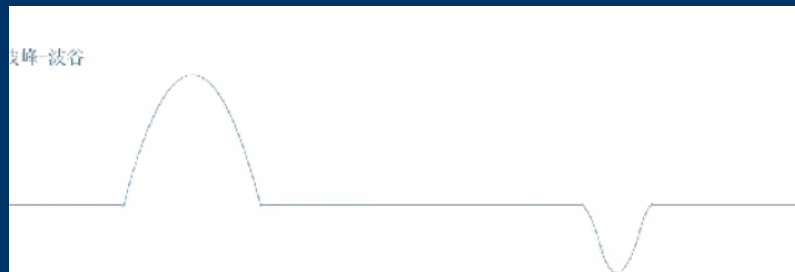
三．波的叠加原理

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。

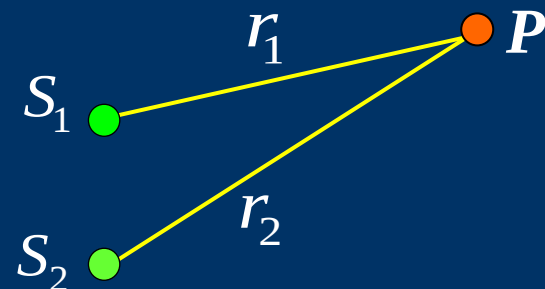


注意 波的叠加原理仅适用于线性波的问题

四. 干涉规律

S_1 波源 $y_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$

S_2 波源 $y_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$



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 $y = y_1 + y_2 = A \cos(\omega t + \phi)$

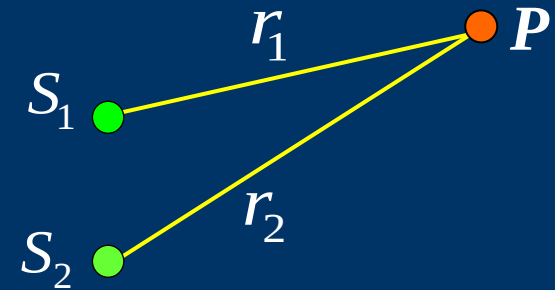
合振动的振幅 $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos \Delta \varphi$

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:

$$2\sqrt{I_1 I_2} \overline{\cos \Delta\varphi} = 0$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (\text{常数}) \quad \text{—— 非相干叠加}$$

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

$$I \neq I_1 + I_2$$

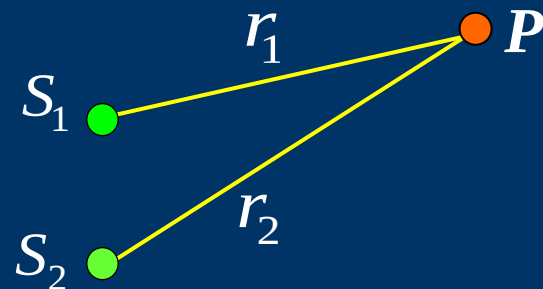
四. 干涉规律

- $\Delta\varphi$ 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。
- 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。
- 波的干涉，其实质为相干波“在相遇点，振动的叠加”

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

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

$$r_2 - r_1 = k\lambda = \delta \quad \text{波程差}$$

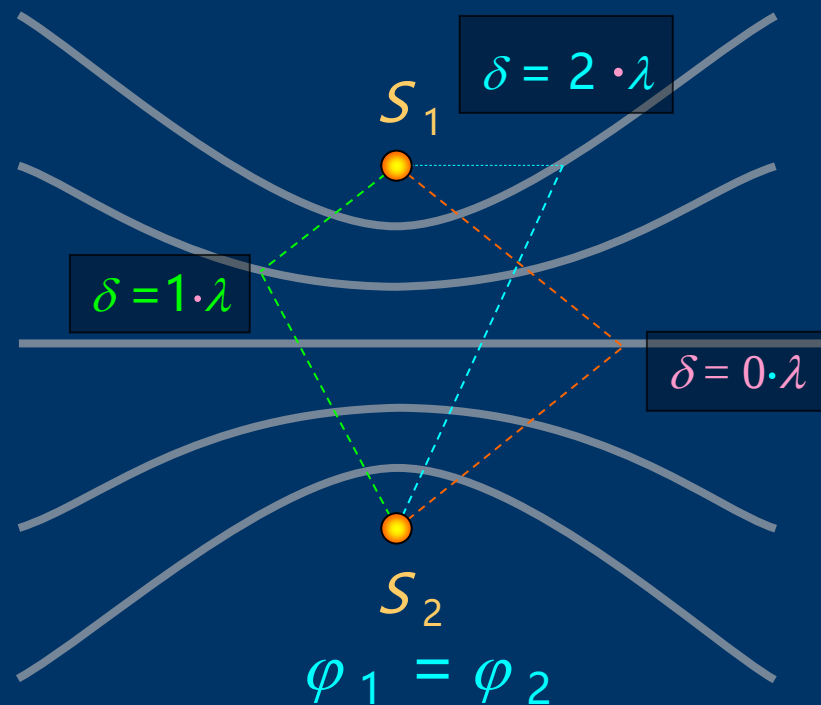
$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

干涉相消条纹

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

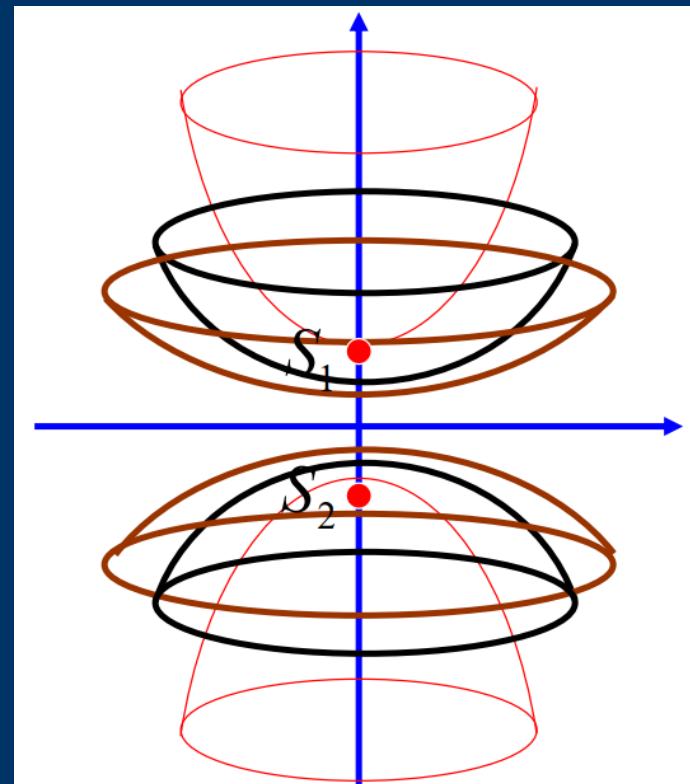
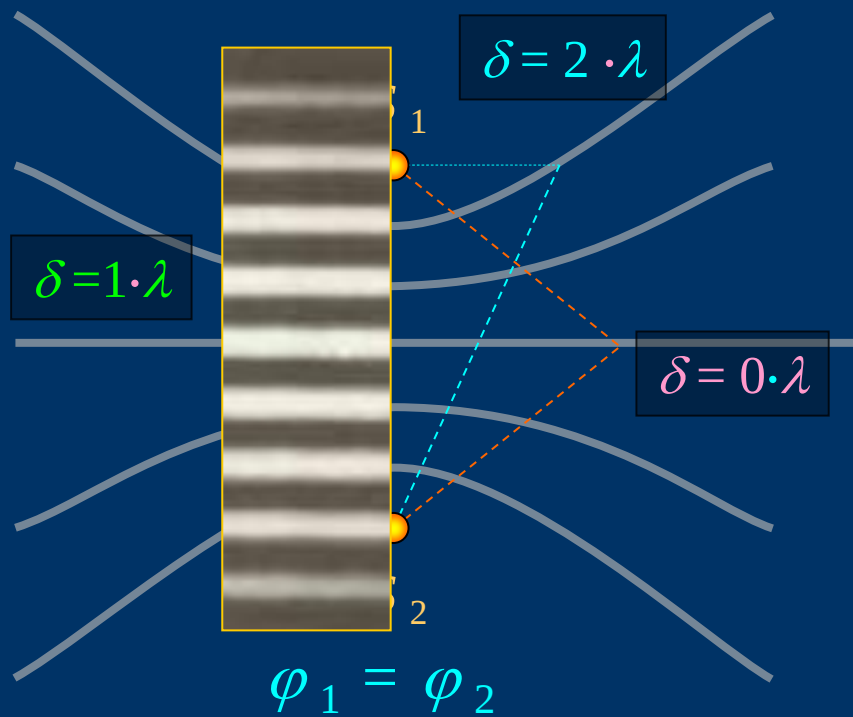
$$r_2 - r_1 = (k+1/2)\lambda = \delta \quad \text{波程差}$$

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



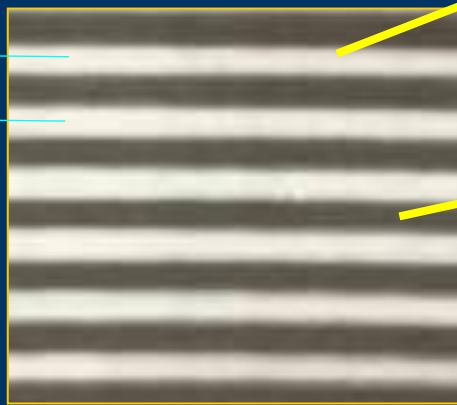
双曲线

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, 强度是多少?

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

(2) 每个明条纹、暗条纹中心对应的什么不同?

明条纹 波程差 $\delta = r_2 - r_1 = k\lambda$

(3) 一条条纹上所有点的 **相位差、波程差** 相等。

判断题：

- 两列不满足相干条件的波不能叠加； ×
- 两列波相遇区域中P点，某时刻位移值恰好等于两波振幅之和。这两列波为相干波。 ×
- 两振幅相等的相干波在空间某点相遇时某时刻该点合振动位移既不是两波振幅之和，又不是零，则该点既不是振动最强点，又不是振动最弱点。 ×
- 在两个点波源的干涉现象中，波动相长各点或波动相消各点的集合的形状为双曲面族 ✓

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

D

K相差1

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 $I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ 和 0 之间

A 对的

B 不对

§4.1 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) $\Delta \varphi = \pm (2k + 1)\pi$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$)

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

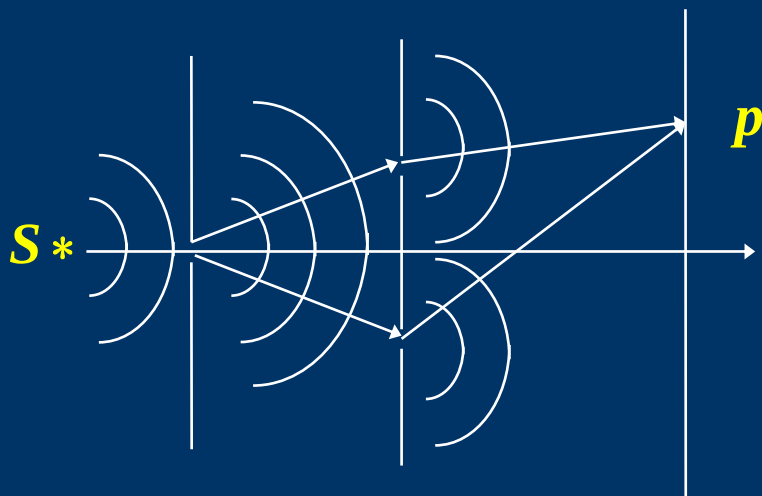
获得相干光的方法 {

- 1. 分波阵面法 (杨氏实验)
- 2. 分振幅法 (薄膜干涉)

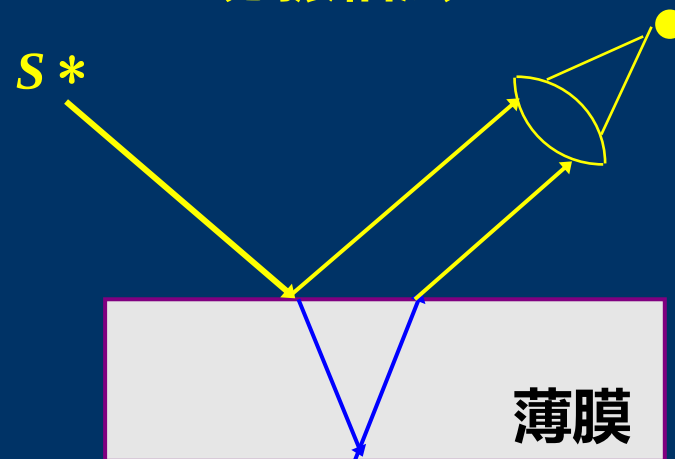
§4.1 获得相干光的方法 杨氏实验

普通光源获得相干光的途径:

分波面法



分振幅法

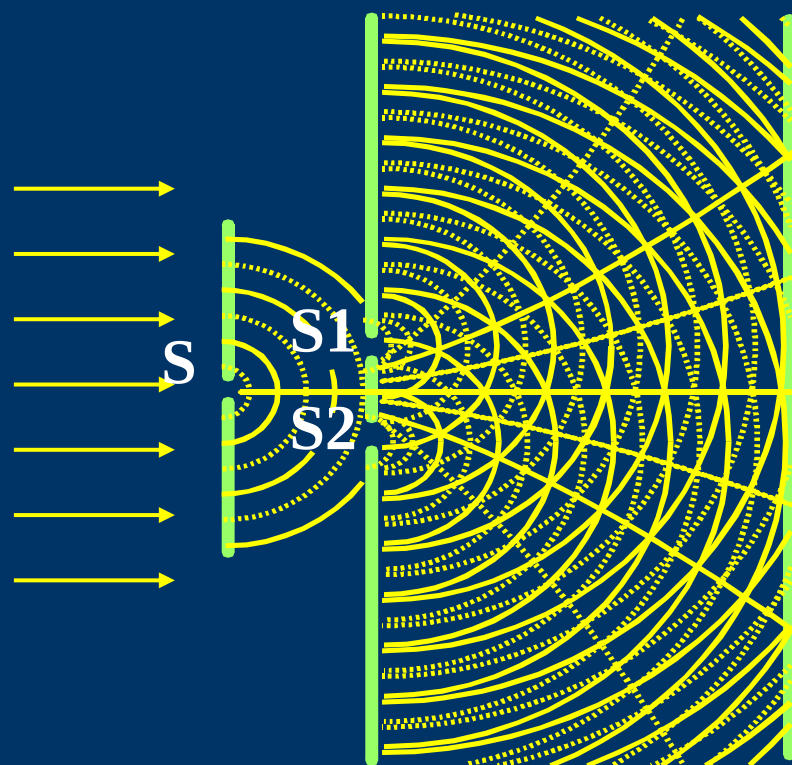


获取相干光的办法——“自己与自己相干”

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。



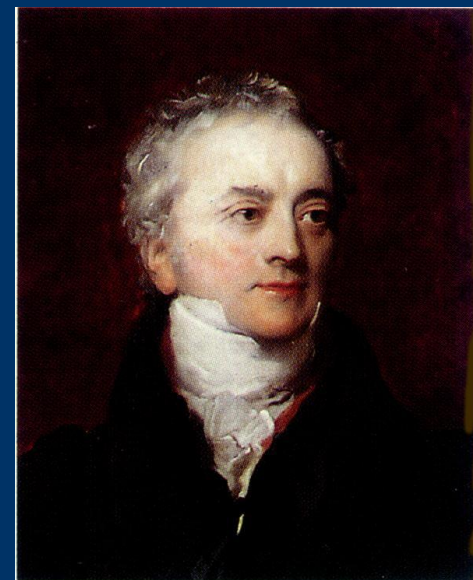
明条纹

暗条纹

明条纹

暗条纹

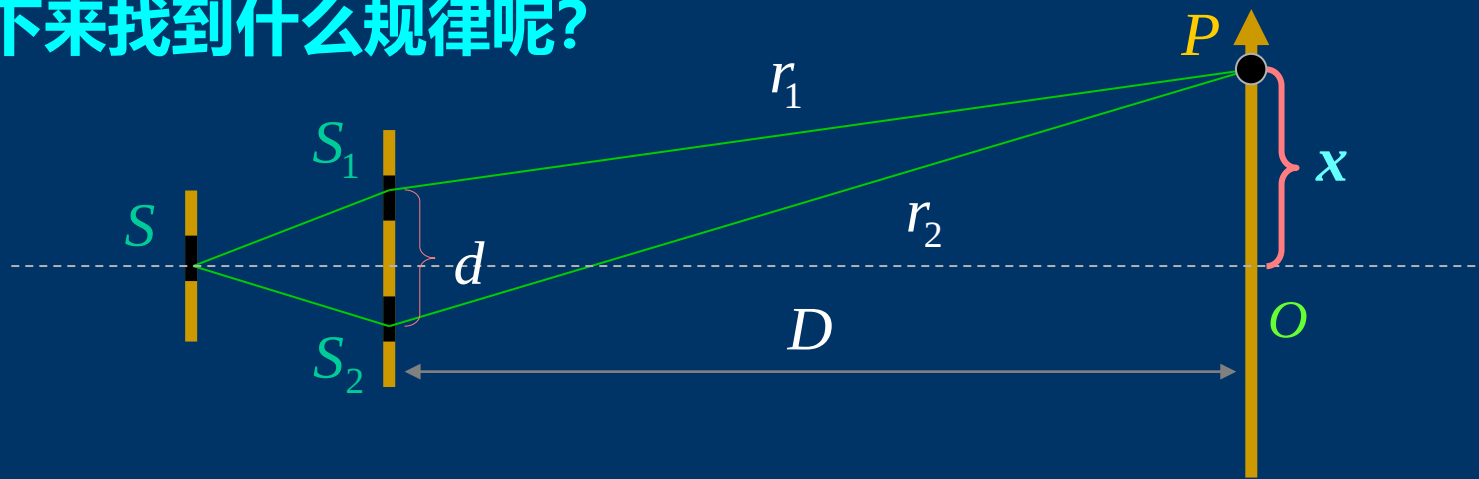
明条纹



Thomas Young
(1773–1829).

观测屏

接下来找到什么规律呢?

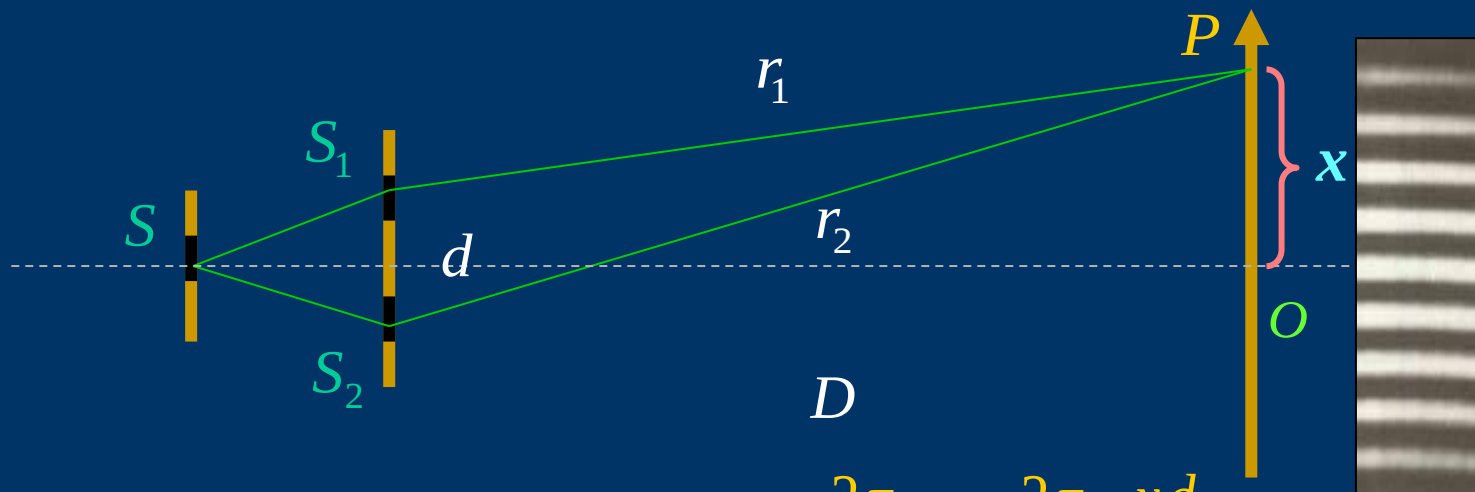


两波在 P 点的相位差恒定不变, 为

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

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

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

明暗的位置确定了，光强呢？

◆光强分布图

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

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

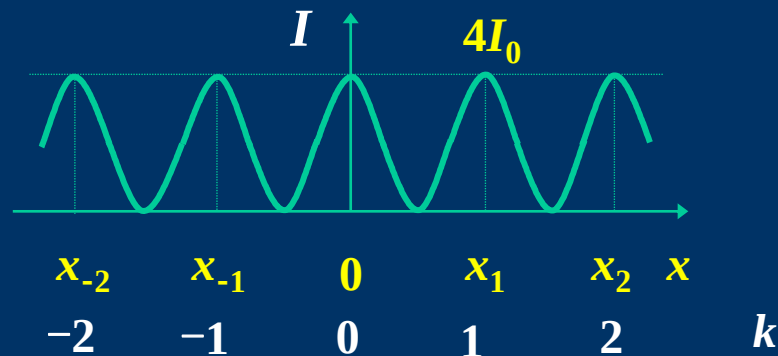


$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta \right)$$

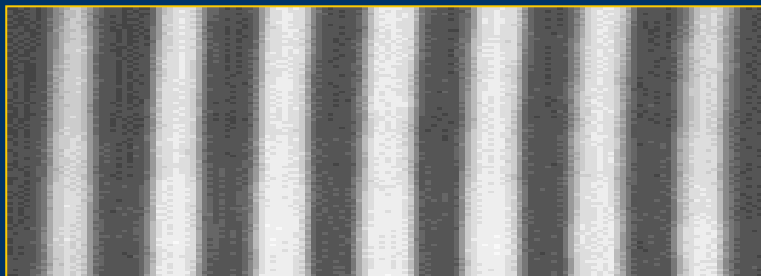
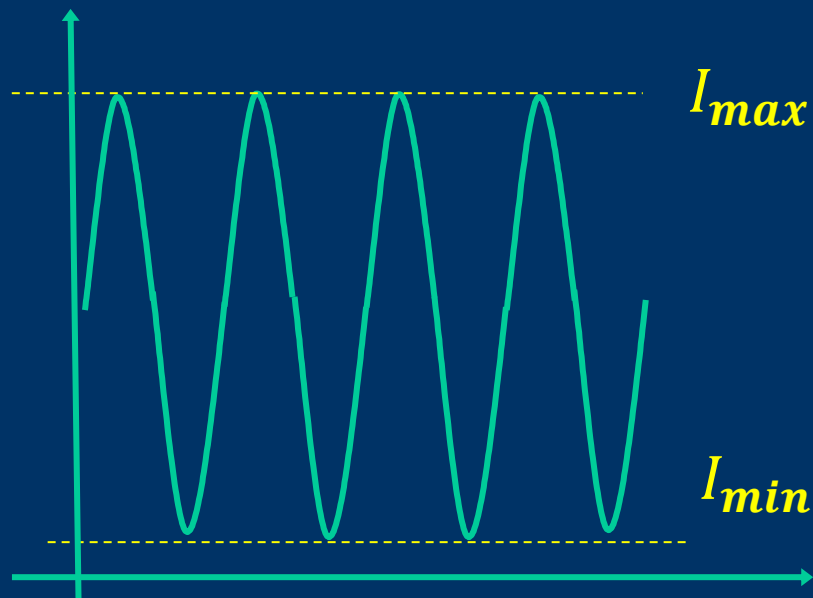
若 $I_1 = I_2 = I_0$

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

$$I_{\max} = 4I_0, \quad I_{\min} = 0$$

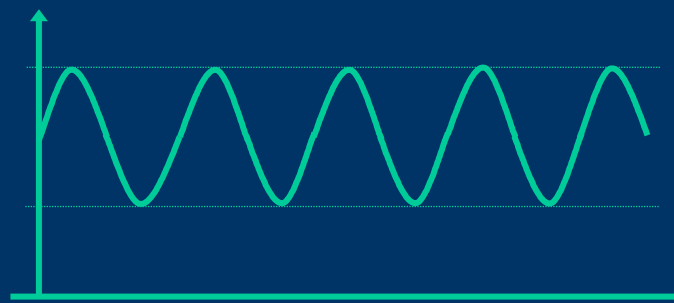


◆可见度 (对比度)



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

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



◆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**，与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。
- (3) 在实际的应用中，杨氏双缝干涉也被广泛运用于光学仪器的设计和制造。例如在激光技术中，通过光的干涉现象可以实现激光器的频率稳定和调谐，从而提高激光器的性能和精度。

★ 练习题

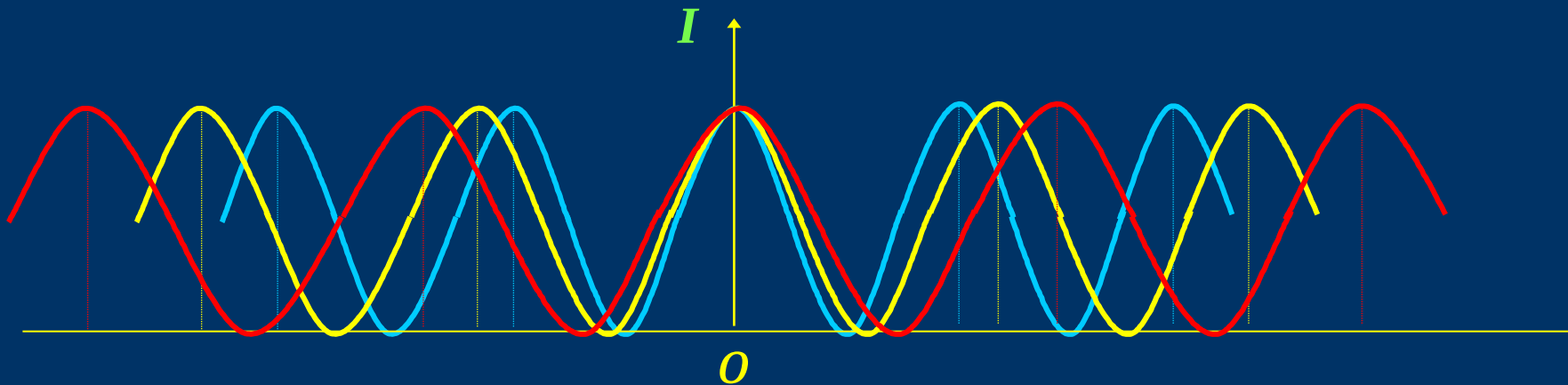
在双缝干涉实验中，以白光为光源，在屏上观察到了彩色干涉条纹．若在双缝中的一缝前放一红色滤光片（只能透过红光），另一缝前放一绿色滤光片（只能透过绿光），这时（ C ）

- 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

(4) 间距与波长关系

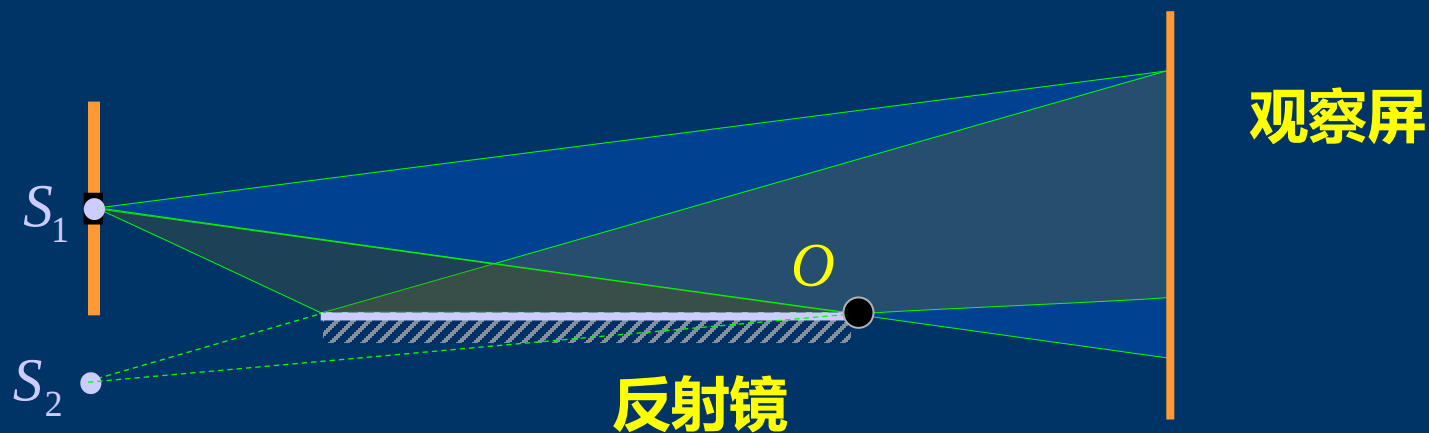
由于 $\Delta x = \frac{D\lambda}{d}$, 当 d 和 D 保持不变时, $\Delta x \propto \lambda$



(5) 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



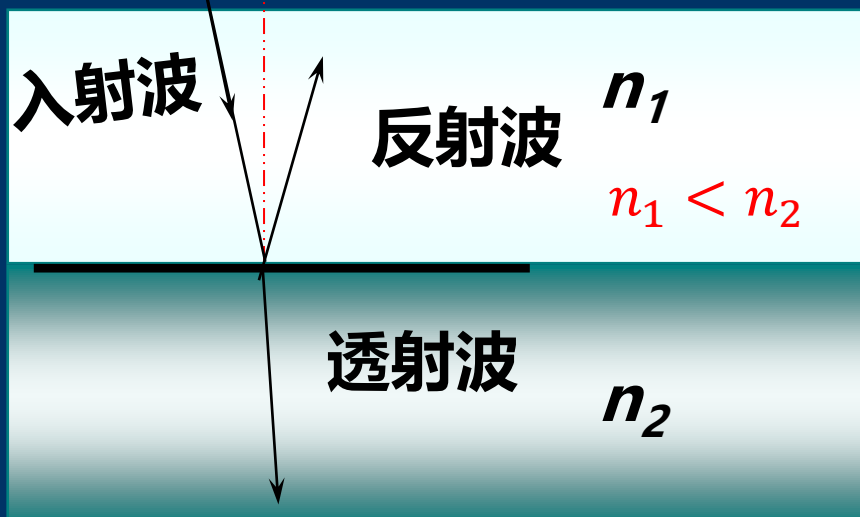
(洛埃镜实验结果与杨氏双缝干涉相似)

- 接触处, 屏上 O 点出现暗条纹 $\longrightarrow$ 半波损失

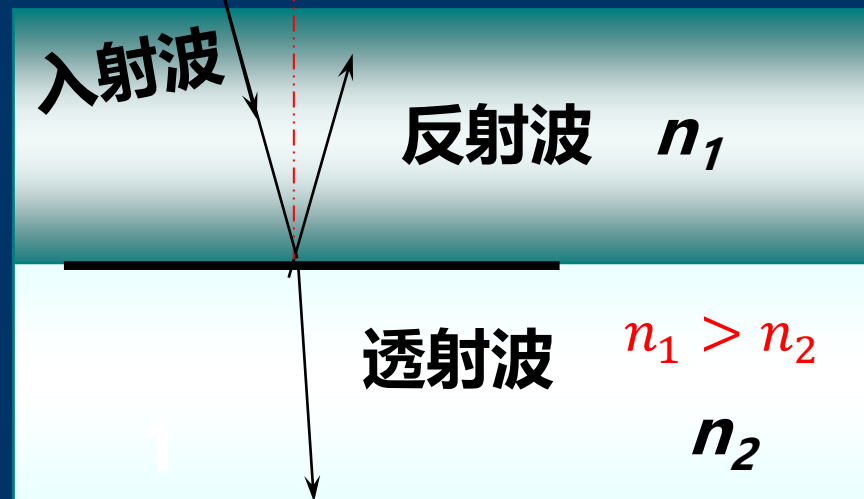
半波损失

- 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。

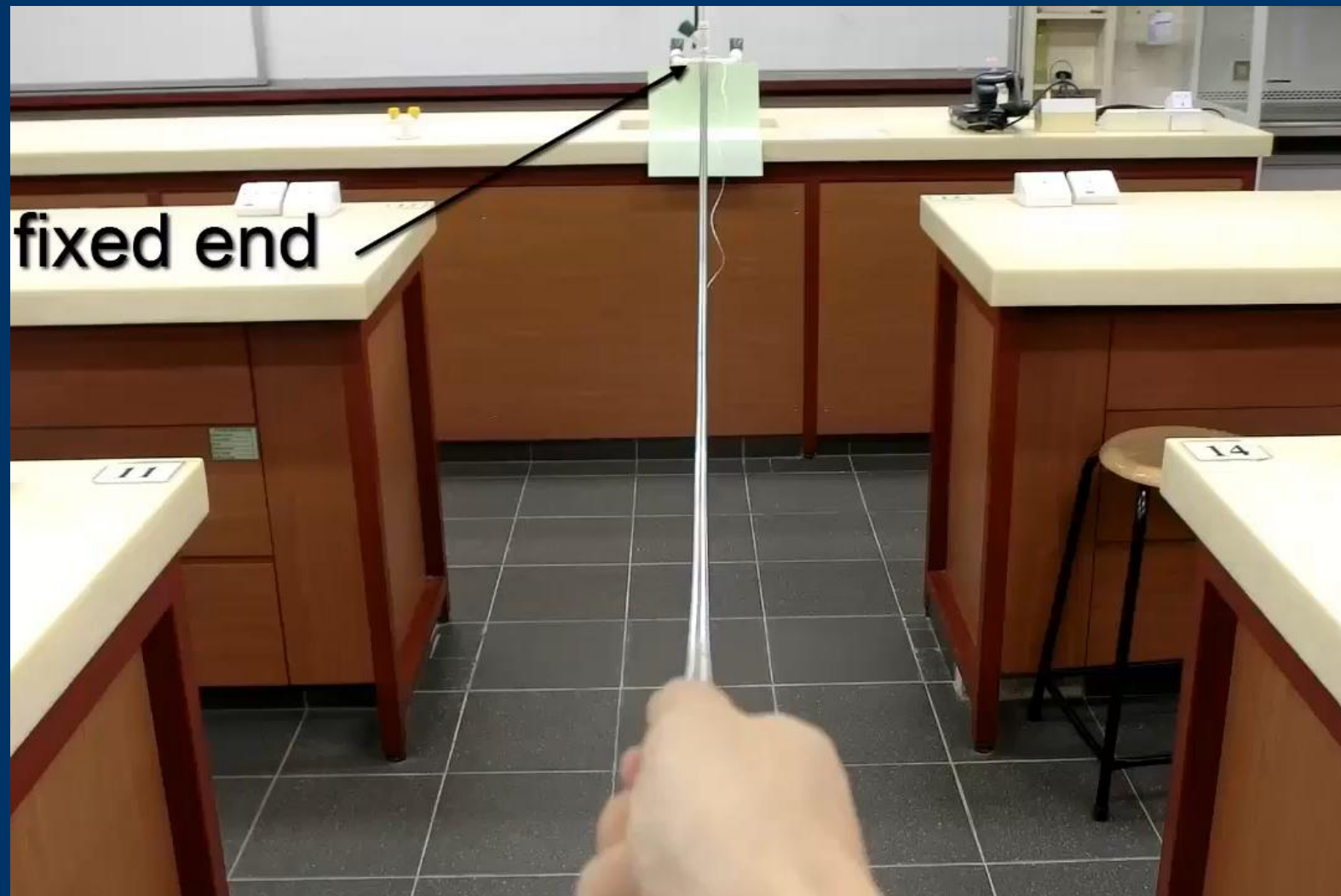
有半波损失



没有半波损失



- 透射波没有半波损失



fixed end

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

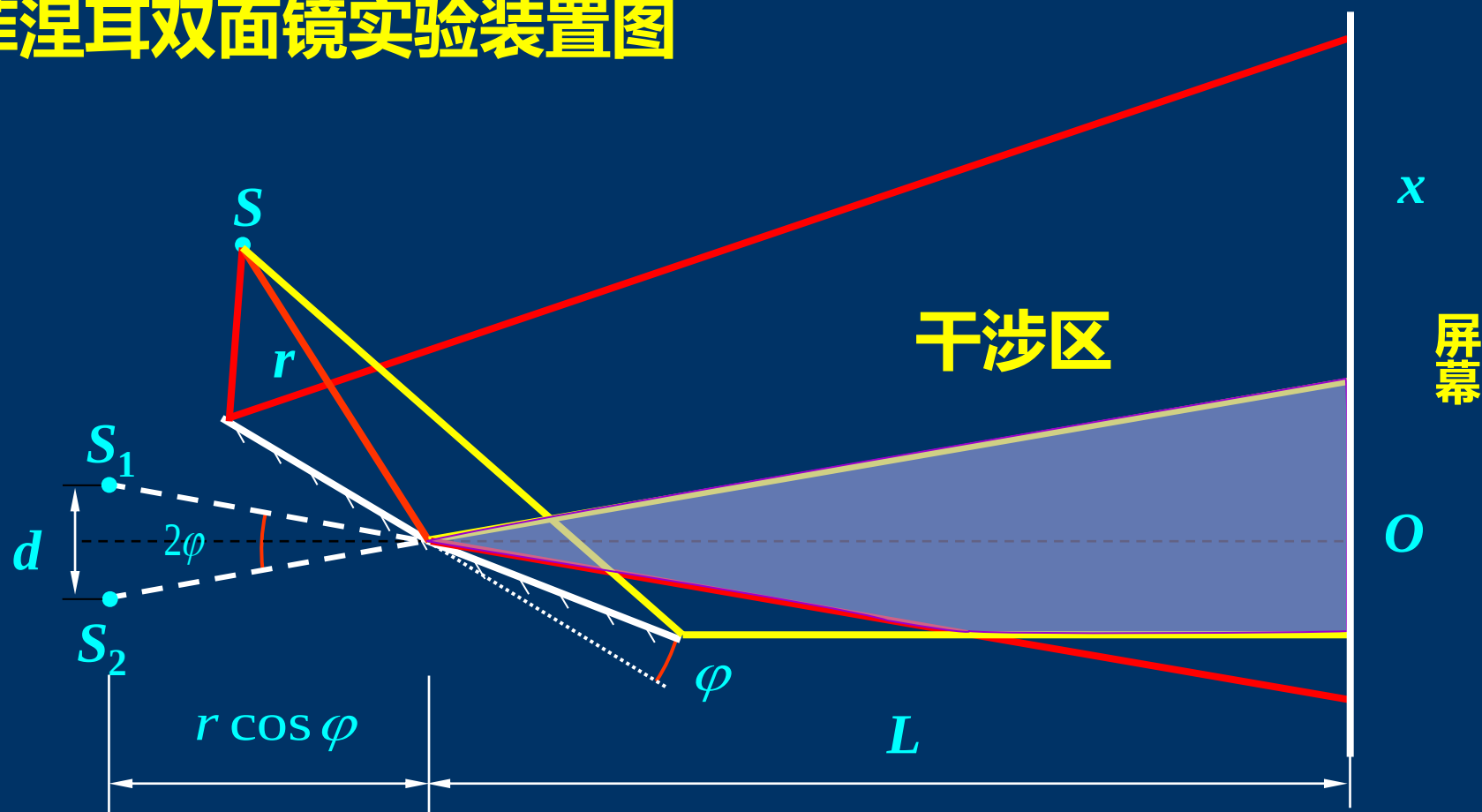
- A 干涉条纹的间距变宽，中心零级条纹向下移动
- B 干涉条纹的间距变窄，且原强度最大处的强度减弱
- C 干涉条纹的间距不变，但原极小处的强度不再为零
- D 不再发生干涉现象

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**。

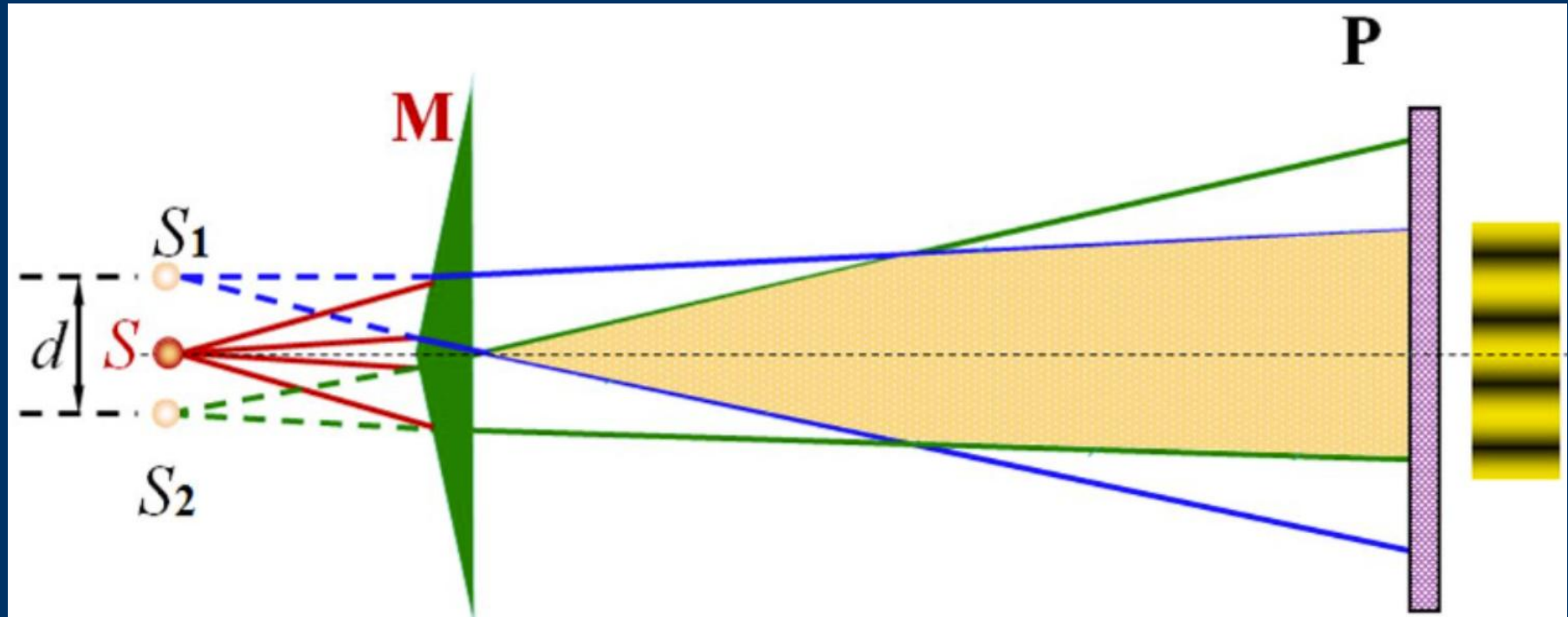


菲涅耳双面镜实验装置图



- (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?

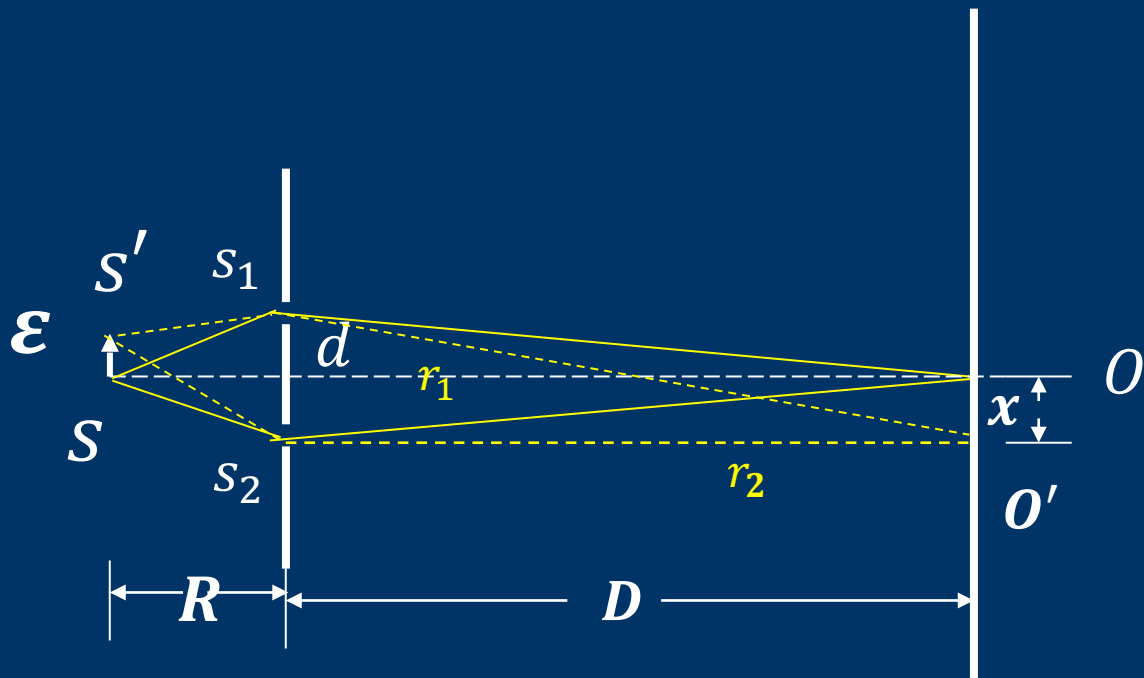


(2) 条纹是否移动? 判断的依据是什么?

(3) 如何移动? 判断的依据是什么?

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

第一步: 波程差增加还是减小?



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

零级亮纹位置: $\delta = 0$

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

新零级亮纹在 $x = -D \frac{\varepsilon}{R}$ 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
级
明
纹

1
级
明
纹

0
级
明
纹

(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？

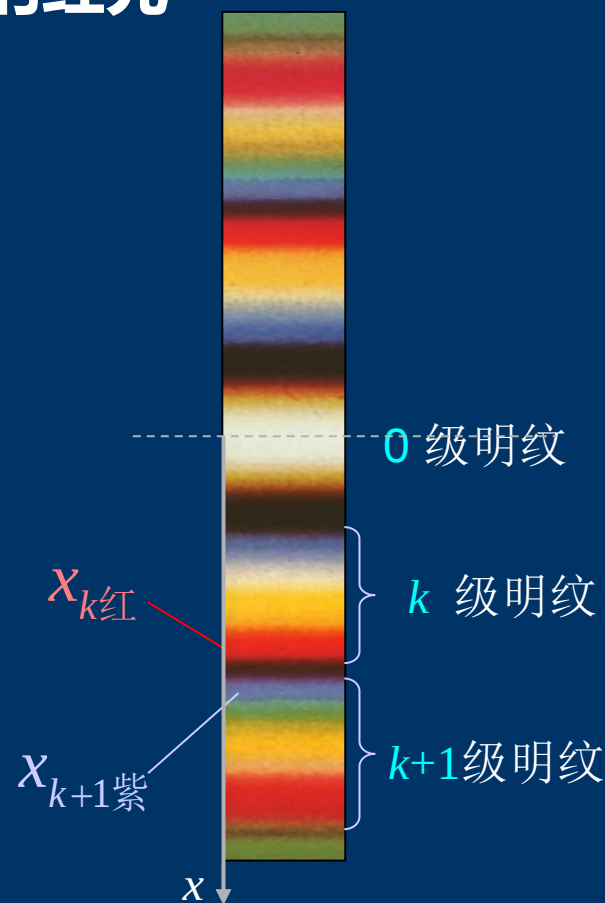
例 用白光作光源观察杨氏双缝干涉。设缝间距为 d ，缝面与屏距离为 D ，可见光范围 $400 \sim 760 \text{ nm}$ 。

求 能观察到的清晰可见光谱的级次

解 分析可知，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

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

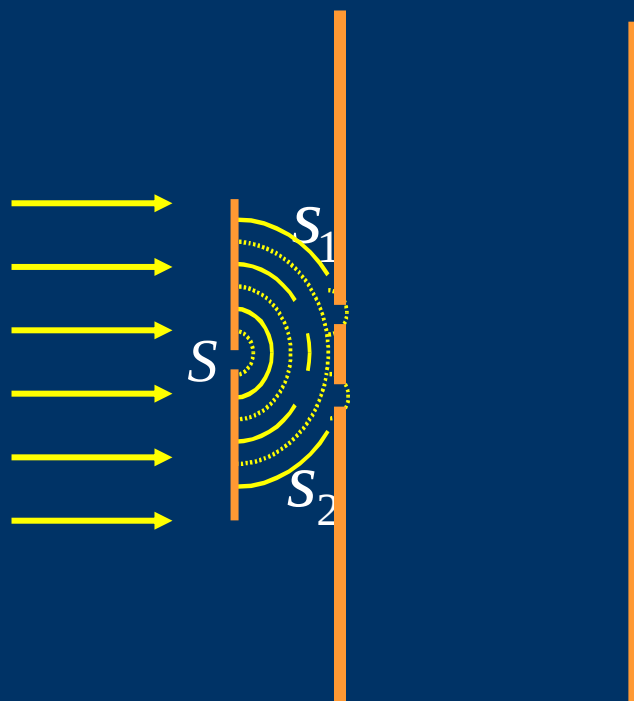
清晰的可见光谱只有一级



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

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

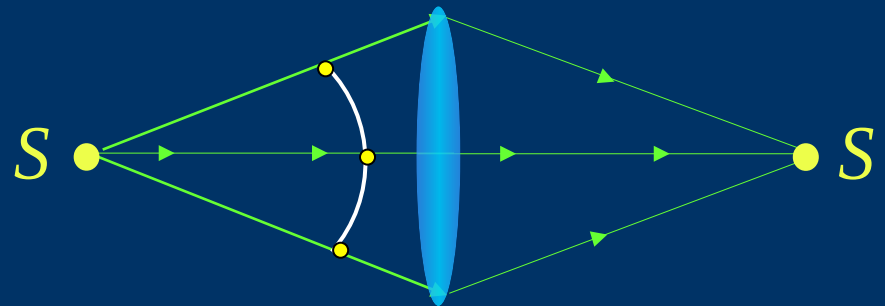
在介质中传播距离 r 时，相位的改变为

光程

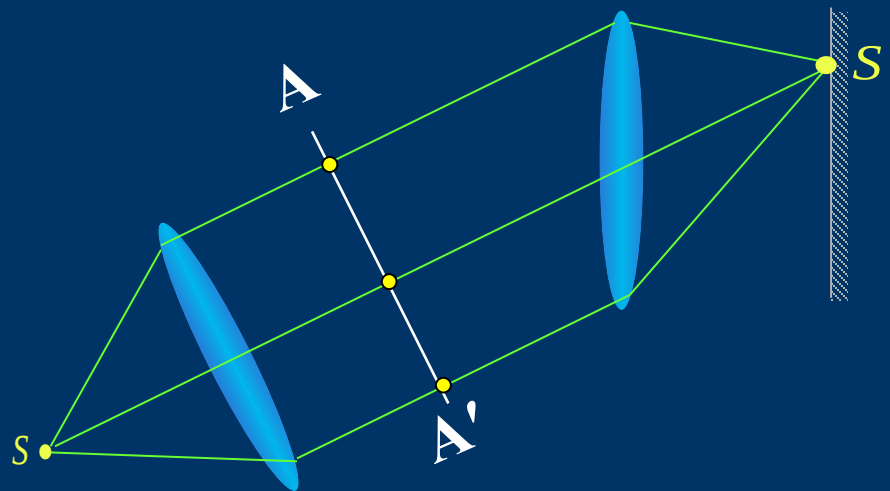
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda'} r = \frac{2\pi}{\lambda/n} r = \frac{2\pi}{\lambda} (nr)$$

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

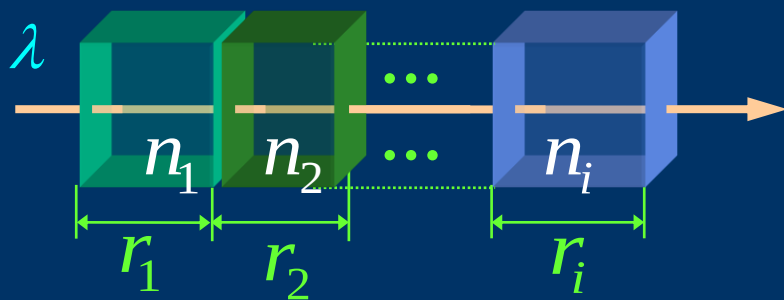
回顾：物象之间等光程原理



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



在多种介质中

$$\text{光程} = \sum_i n_i r_i$$

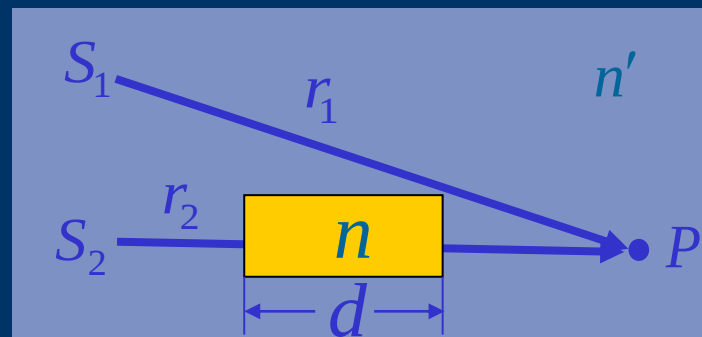
例 两光源 $\omega_1 = \omega_2$ ，初相分别为 φ_1 、 φ_2 。求两波在 P 点相位差

解 S_1P 光程 $n' r_1$

S_2P 光程 $n'(r_2 - d) + nd$

S_1 发出的波在 P 点的相位

S_2 发出的波在 P 点的相位



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

$$\omega_1 t + \varphi_2 - \frac{2\pi}{\lambda} [n'(r_2 - d) + nd]$$

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

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

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？

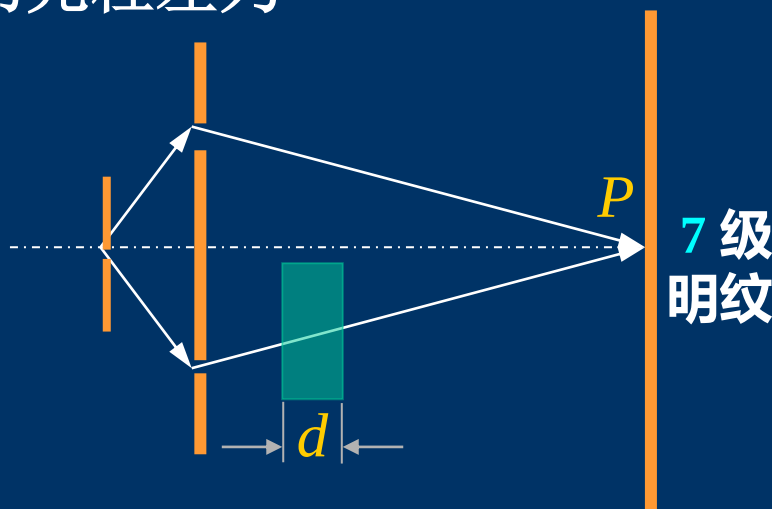
解 设云母片厚度为 d 。无云母片时，零级亮纹在屏上 P 点，则到 P 点的两束光的光程差为零；加上云母片后，光程变化 $(n-1)d$ ，则到 P 点的两光束的光程差为

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

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 $n=1.6$ 的透明薄膜盖在上缝上，并用 $6.3 \times 10^{-7} \text{ m}$ 的光照射，发现中央明纹向上移动了6条。

求 该薄膜厚度？

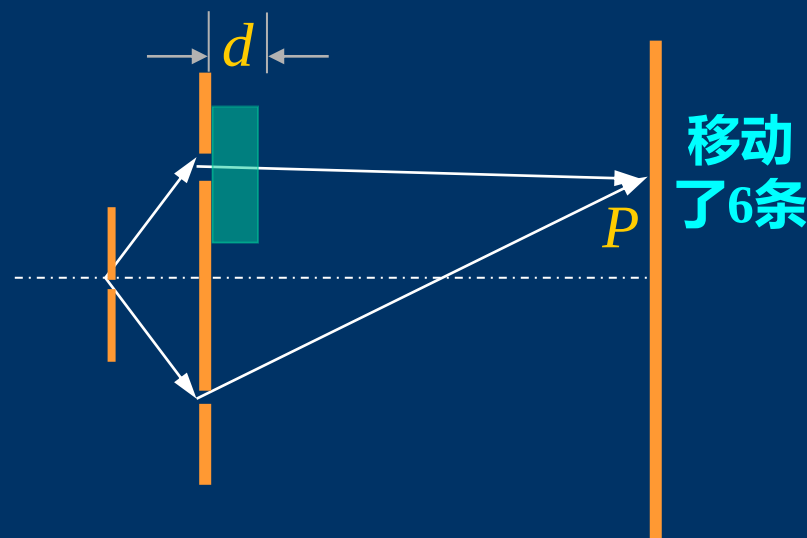
解 设P点为放入薄膜后中央明纹的位置，薄膜的厚度为 d

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

又因P点是未放薄膜时第6级的位置

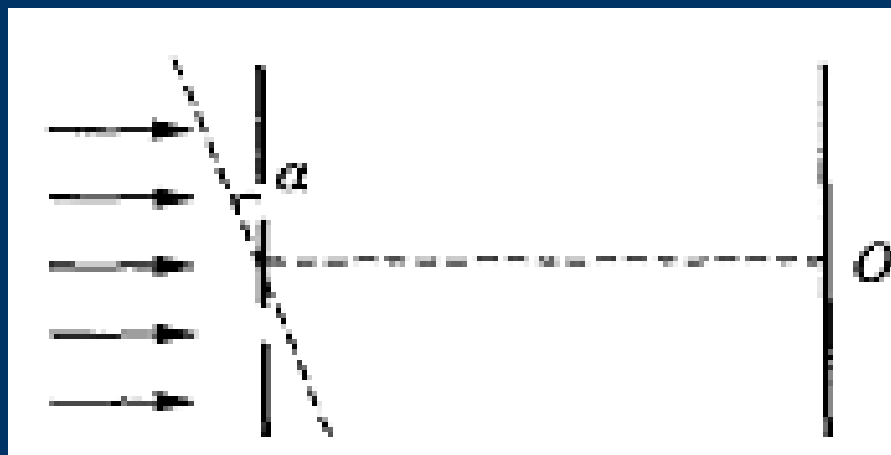
$$\therefore r_2 - r_1 = 6\lambda$$

$$d = \frac{6\lambda}{n - 1} = \frac{6 \times 6.3 \times 10^{-7}}{1.6 - 1} = 6.3 \times 10^{-6} \text{ m}$$



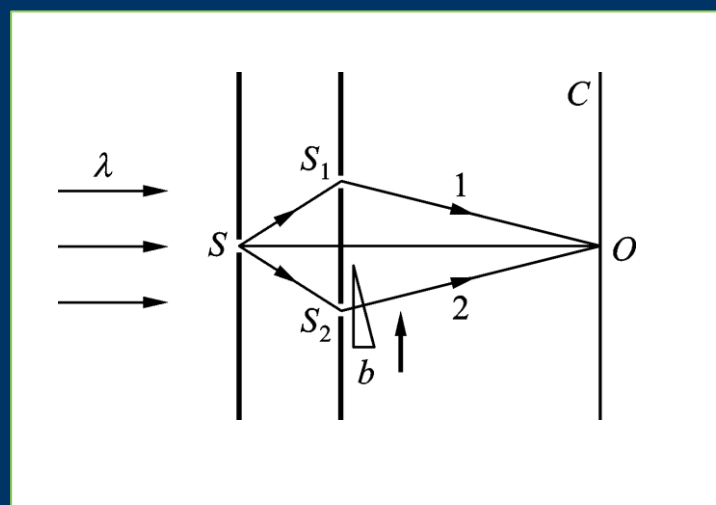
在杨氏双缝实验中，如以过双缝中点垂直的直线为轴，将缝转过一个微小的角度 α ，转动方向如图所示，则在屏幕上干涉的中央明纹将()

- A 向上移动
- B 向下移动
- C 不动
- D 消失



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



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，

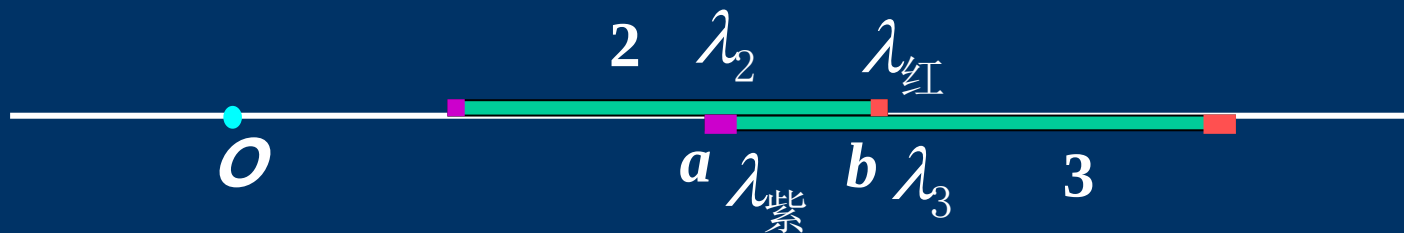
求 (1) 第十级明纹中心的位置和第十级明纹的宽度 (2) 波长改为 400~760 nm 的白光时，第二级谱线宽度、第二级谱线与第三级谱线重叠部分的宽度和重叠部分各波长范围。

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

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



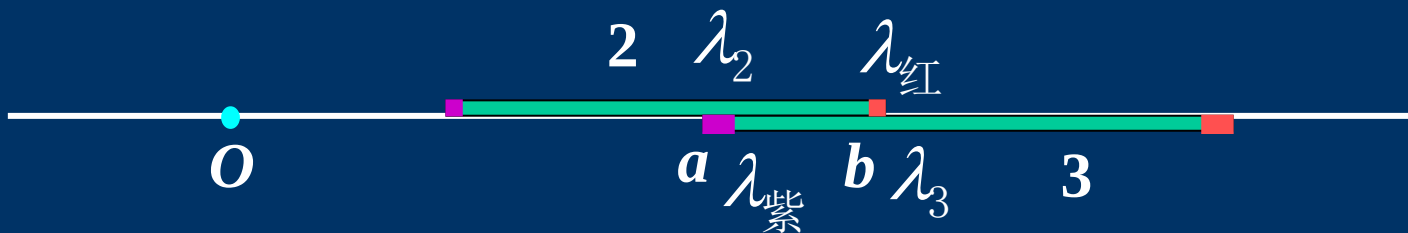
(2) 第二级谱线宽度

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

重叠: $x_2 = x_3$

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

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



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

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

例：用一定波长的光照射杨氏双缝，已知 $d = 1.0 \text{ mm}$ ， $D = 1.0 \text{ m}$ ，设屏无限大。求：(1) 波长为 500nm 的光的第四级明纹位置及明纹间距；(2) 求可能看见的最高级数干涉条纹；(3) 波长分别为 500nm 和 600nm 的光在屏上什么位置开始发生重叠？