



中原工学院

Zhongyuan University of Technology

14 波动光学

任课教师 [曾灏宪](#)

中原工学院 理学院

光的本质

➤ 历史上的争论（17世纪~20世纪初）

— 微粒学说

- 牛顿等
- 可以说明光的反射和折射规律，但不能解释两束光相遇后不受干扰仍保持原有的运动方向，并认为光在水中的传播速度比空气中的速度大。

— 波动学说

- 惠更斯等
- 能解释光的反射和折射规律，并能说明双折射现象，但不能解释黑体辐射和光电效应等现象，认为光在水中的传播速度比空气中的速度小。

➤ 波粒二象性

– 最后的证明

- 1850年傅科从实验中测定：光在水中的传播速度比空气中的速度小
- 法拉第、麦克斯韦证明了光是电磁波
- 爱因斯坦用光量子理论解释了光电效应实验

– 含义

- 粒子性——量子性（不是牛顿所说的“粒子”）
- 波动性——电磁波

光学的研究内容

➤ 光学研究光的传播和光与物质的相互作用

– 几何光学（射线光学）

- 当光的波动效应不明显时，可以忽略光的波长
- 研究光的直线传播及光学仪器的制造

– 波动光学（物理光学）

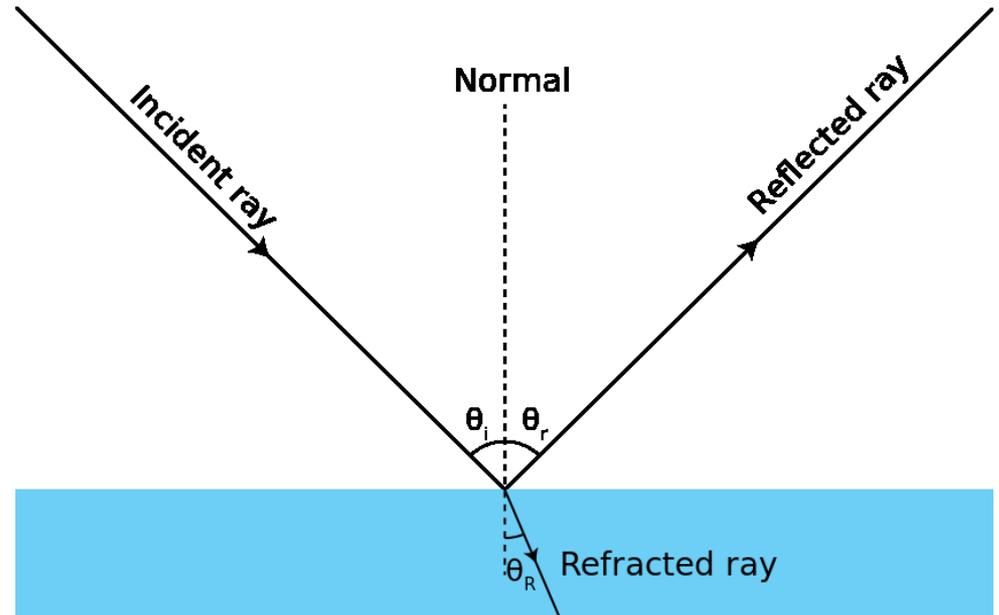
- 以波动理论为基础研究光在传播过程中显示出的干涉、衍射和偏振等波动现象和特点

– 量子光学

- 深入到微观领域研究光与物质的相互作用规律
- 是1960年激光器发明后迅速发展起来的光学新分支，主要研究激光光谱学、信息光学、光纤通讯、非线性光学等方面的问题

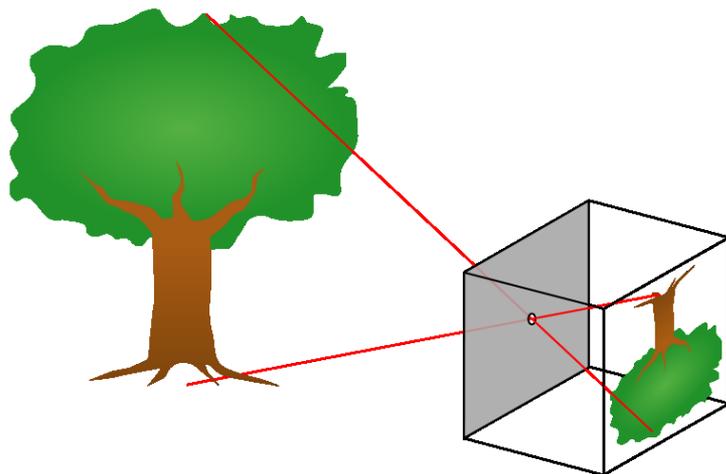
几何光学简介

- 直线传播
- 反射、折射与全反射
- 色散
- 成像



➤ 直线传播

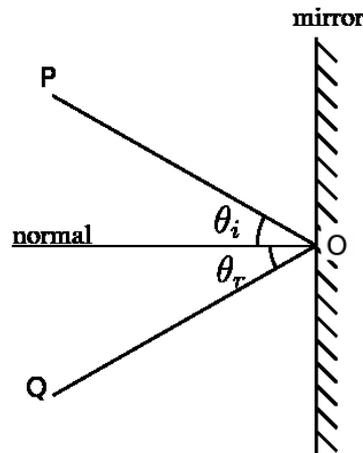
- 光在同一均匀介质中总是沿直线传播。例，小孔成像。



- 光线(light ray): 描述光的传播方向的有向曲线（一般是直线、折线），用来确定光的传播方向和光路。有平行、发散和会聚等类型。【费马原理：最小光程原理，光波在两点之间传播时自动选取费时最少的路径。】
- 光路是可逆的。

➤ 反射

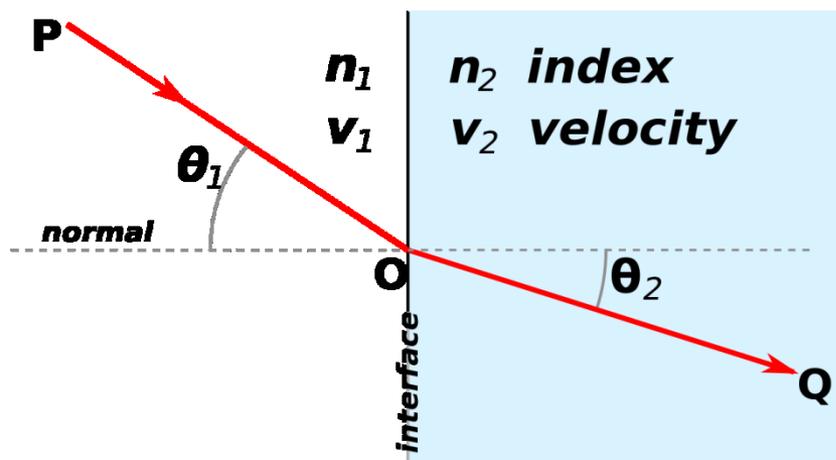
- 光从一种介质射向另一种介质时，在两种介质的分界面上，光将改变其传播方向，一部分光被反射回原来的介质中，这种现象称为光的反射。



- 光的反射定律：反射光线、入射光线和法线在同一平面上；反射光和入射光线分居法线的两侧；反射角等于入射角。
- 反射的分类：漫反射（如黑板面反射）、镜面反射。

➤ 折射

- 光射到两种介质的界面处，一部分光进入到另一种介质中，并且改变原来的传播方向的现象叫做光的折射。(光路依然是可逆的)



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Snell's Law

- 光的折射定律(Snell's Law): 折射光线跟法线在同一平面内，折射光线和入射光线分居法线两侧，入射角和折射角的正弦成正比。
- 折射率: 当光从真空中射入某种介质中并发生折射时，入射角的正弦与折射角的正弦的比值，叫做这种介质的折射率。相比较而言，折射率大的物体叫光密介质，折射率小的物体叫光疏介质。

➤ 全反射

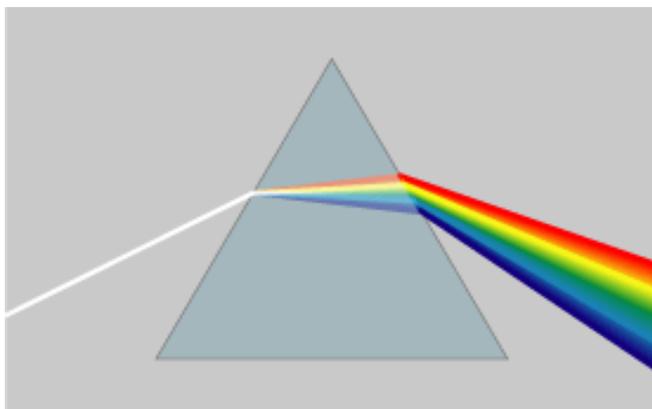
- 全反射：光从光密介质射入光疏介质时，在界面处一部分光被反射，另一部分光被折射到另一介质中，随着入射角的增大，折射角逐渐增大，且折射光线越来越弱，反射光线越来越强，当入射角增大到某一角度时，使折射角达到 90° 时，折射光线完全消失，只剩下反射光线，这种现象叫做全反射。(例，光纤。)
- 全反射产生的条件：①光从光密介质进入光疏介质；②入射角大于或等于临界角。
- 临界角：折射角等于 90° 时的入射角，光从某种介质射向真空或空气时的临界角的公式为 $\sin\theta_c = \frac{1}{n}$ 。

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

Snell's Law

➤ 色散

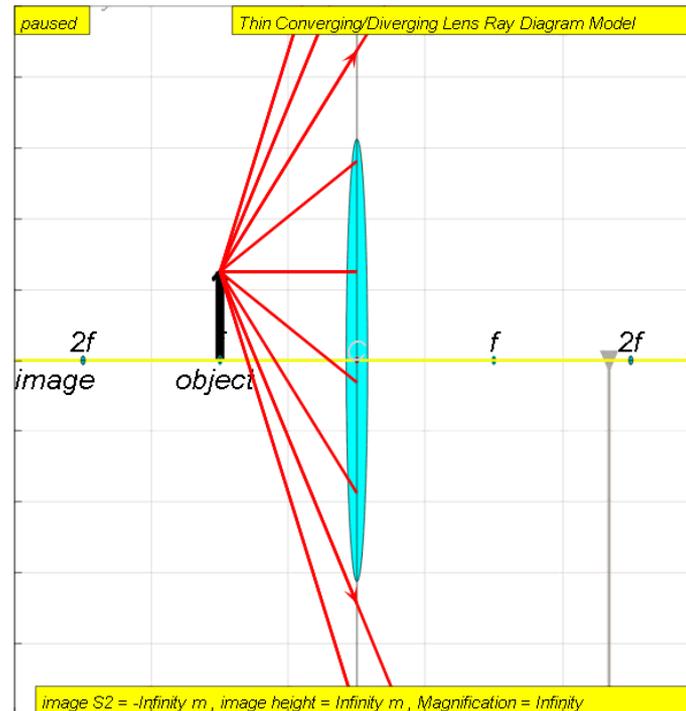
- 一束白光通过棱镜后在光屏上形成各种色光组成的光带的现象叫光的色散。

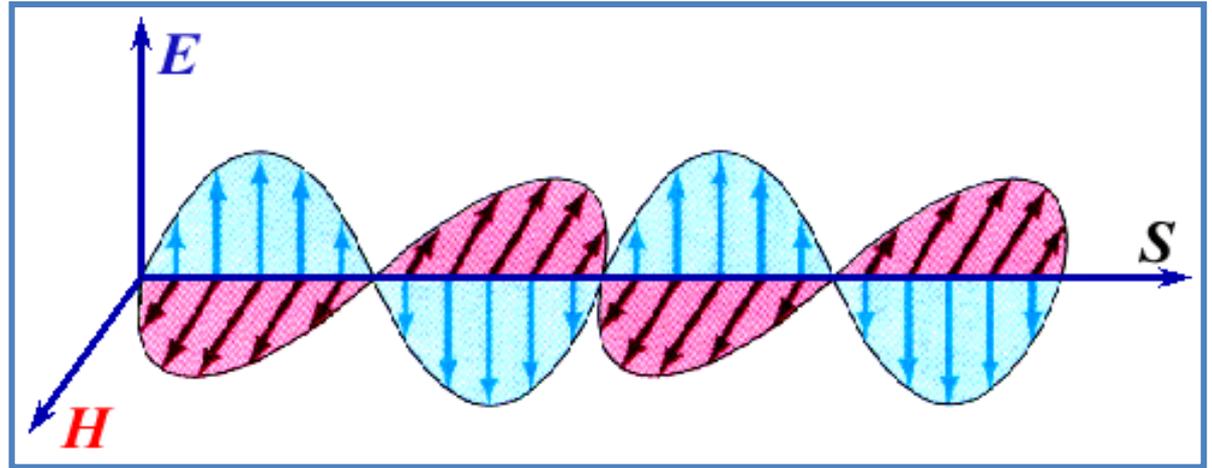


- 光的色散现象表明同样的介质对不同色光的折射率不同（折射角不同），频率大的光（如紫光）折射率大，频率小的光（如红光）折射率小。
- 同一介质对不同频率的光来说光速不同， $n = \frac{c}{v}$ ，在同一介质中，频率大的光光速小，频率小的光光速大。

► 成像

- 平面的反射成像和折射成像（例，梳妆镜等）
- 球面的反射和折射成像（例，金属汤勺表面、哈哈镜等）
- 透镜成像（例，放大镜、相机镜头、望远镜、显微镜等）





大学物理（下）

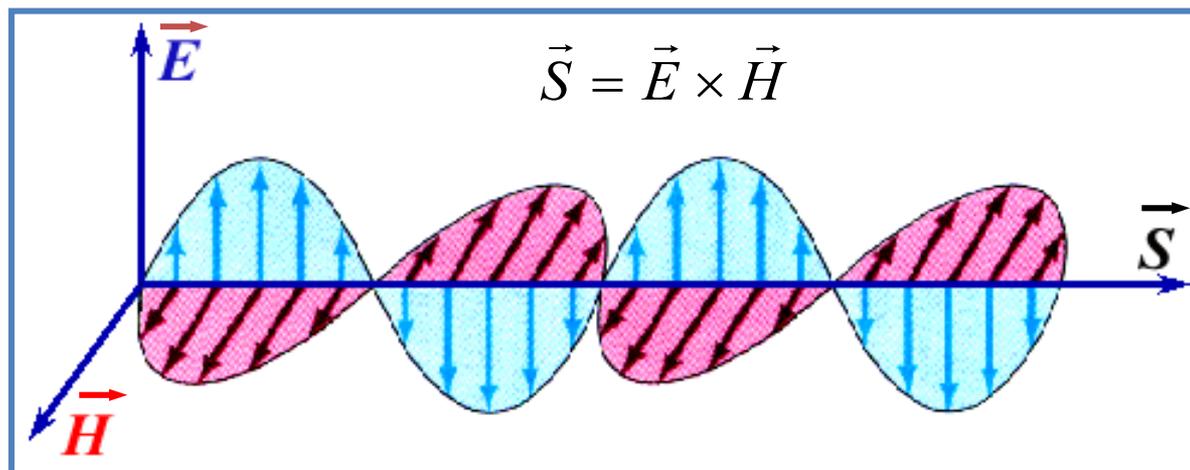
14 波动光学

14.1 相干光

与光的波动性本质相关的一些基本概念，光源等

一 有关光波、光源的基本概念

1. 光波：在空间传播的交变电磁场



由变化的电场、磁场相互激发，由近及远传播形成的波
光波依靠自身传播，不需要传播媒质，光波是横波

在真空中的传播速率为 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

与物质相互作用主要体现在其电场矢量上

2. 光的颜色和光谱

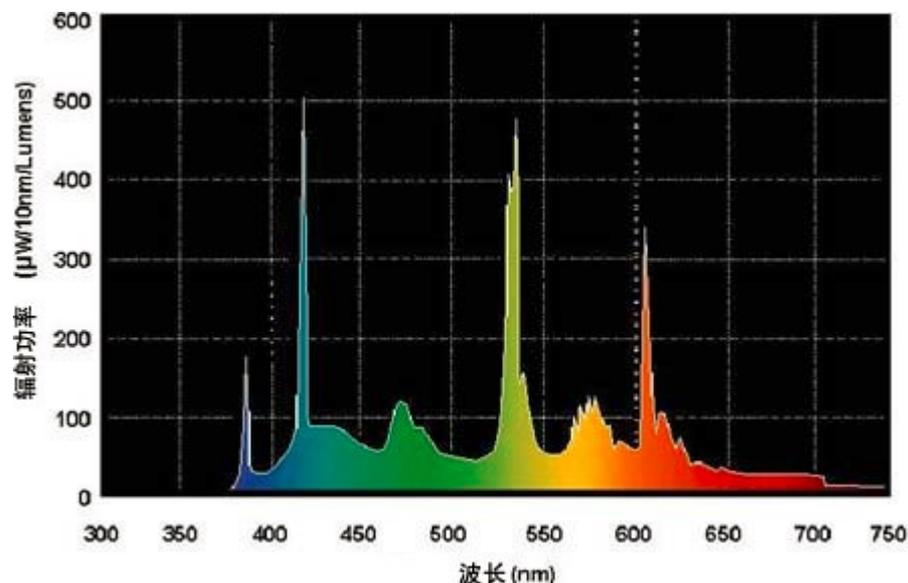
光波的颜色：不同频率的光波能引起人视觉的不同颜色

单色光——只含单一波长的光。

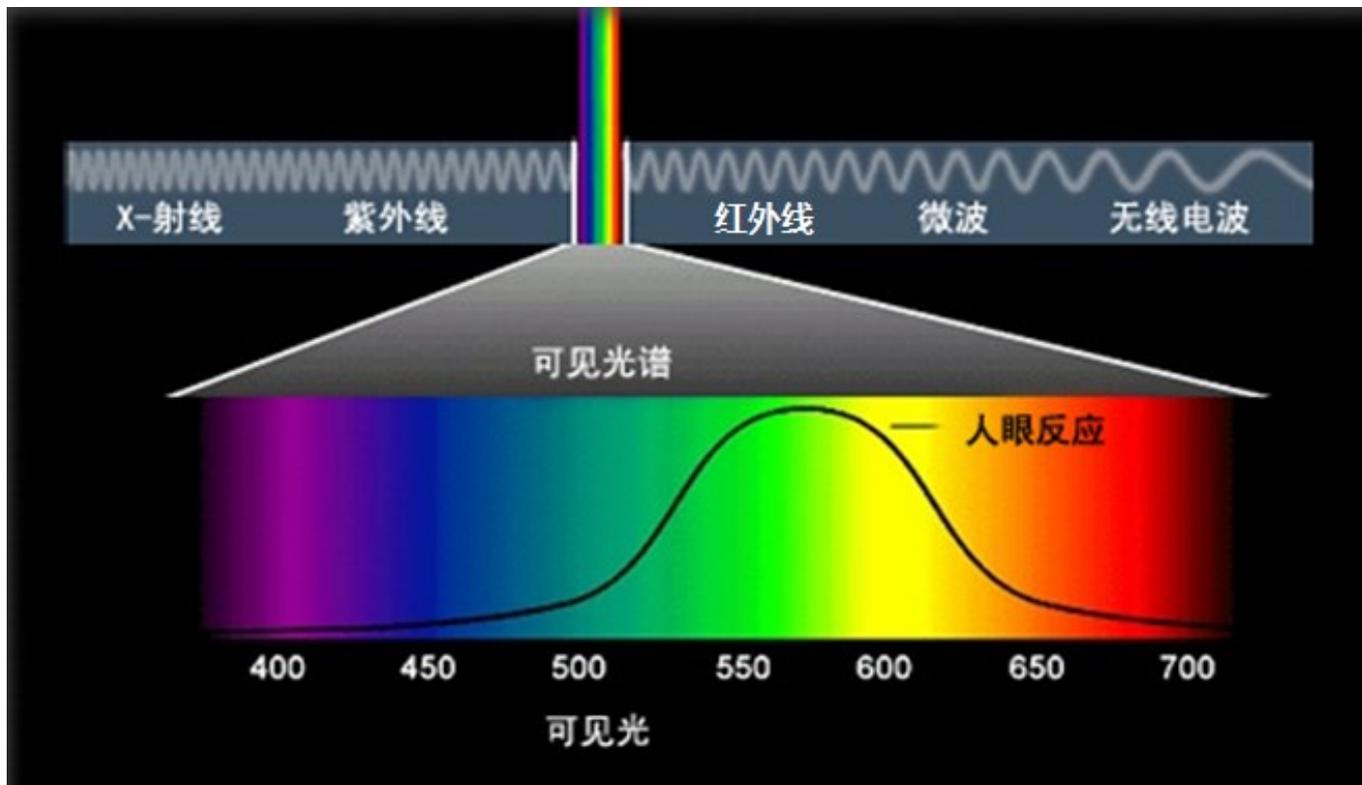
复色光——含多种波长的光。

准单色光——光波中包含很窄波长范围的复色光。

光的频谱：按光的波长(或频率)顺序排列而成的频率分布图



光 { 广义：电磁波
狭义：可见光，电磁波中的狭窄波段



1. 无线电波： $>1\text{mm}$ ；
2. 红外线： $0.6\text{mm}\sim 760\text{nm}$ ；
3. 可见光： $400\text{nm}\sim 760\text{nm}$ ；
4. 紫外线： $5\text{nm}\sim 400\text{nm}$ ；
5. X射线： $0.04\text{nm}\sim 5\text{nm}$ ；
6. γ 射线： $< 0.04\text{nm}$ 。

光是频率或波长在一定范围内的电磁波

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

($1nm = 10^{-9} m$)

3. 光强

光波是电磁波（磁场、电场）。

光波中参与与物质相互作用（底片感光、视觉作用）的是 E 矢量，称为光矢量。

E 矢量的振动称为光振动。

$$E = E_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

光强：在光学中，通常把**平均能流密度**称为光强，用 I 表示。 $I \propto E_0^2$

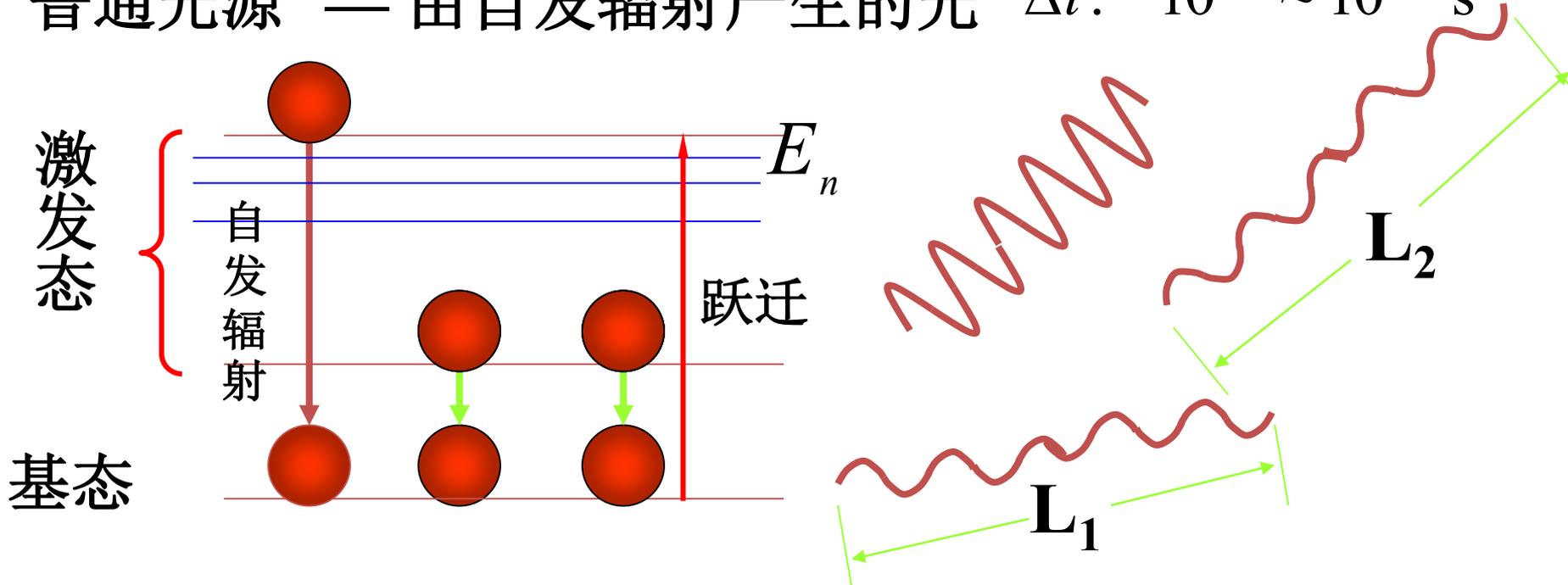
在波动光学中，主要讨论的是相对光强，因此在**同一介质**中直接把光强定义为： $I = E_0^2$

二 光源

1. 光源：发光的物体
2. 分类：

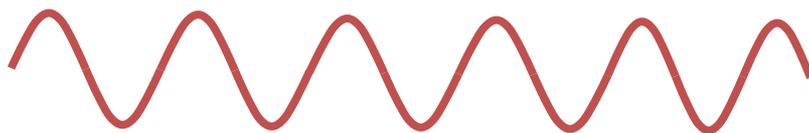
一般光源的发光机制：被激发到较高能级的原子自发辐射到较低能级，并以发光的形式辐射出多余能量。

普通光源 — 由自发辐射产生的光 $\Delta t: 10^{-8} \sim 10^{-10} \text{ s}$



普通光源发光的特点：

- ①在同一时间有大批原子发光；（不是全部）
- ②就单个原子而言，每个原子都是断断续续发光，每次发光时间极短（ $\sim 10^{-8}\text{s}$ ），且一次只能发出一个有限长、具有偏振性的的波列。

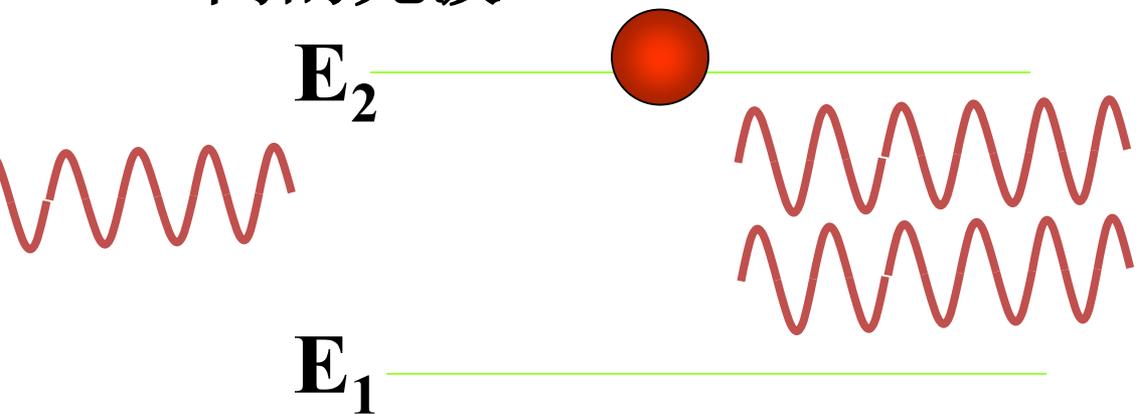


- ③同一原子先后发出的光，以及同一瞬间不同原子发出的光的频率、振动方向、初相位、发光时间均是随机的。

- A) 普通光源
- ①冷光源：如日光灯、钠光灯、水银灯
 - ②热光源：由热能激发 如白炽灯、太阳光

B) 激光光源 由受激辐射产生的光

激光光源的发光机制：在外光子(入射光)作用下，较高能级的原子辐射到低能级时，发出与入射光相同的光波。

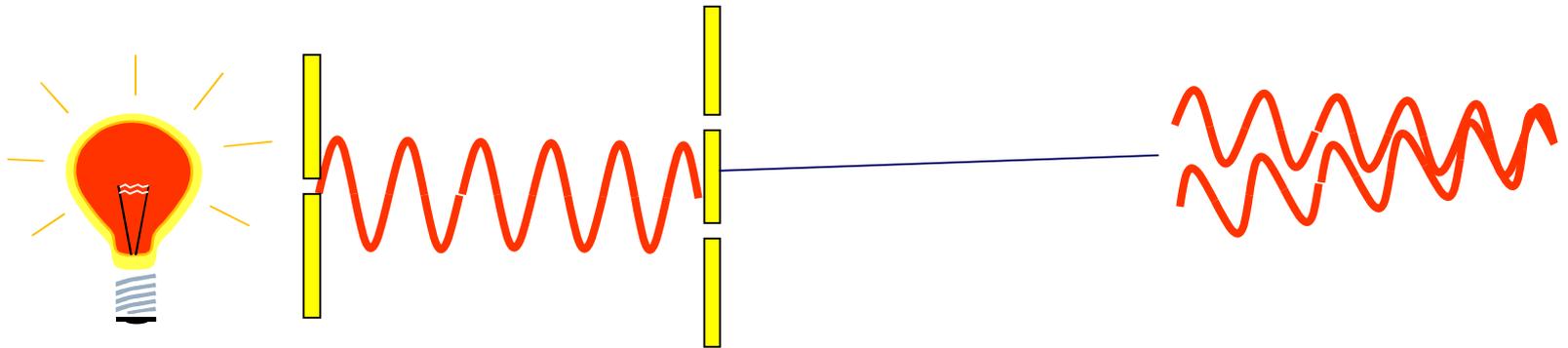


结论：

- ✓ 一般而言普通光源发出的光为非相干光。且同一光源上不同点发出的光也是非相干光。
- ✓ 若要产生干涉须将非相干光变为相干光。
- ✓ 激光光源为相干光源。

将非相干光变为相干光的方法是：

“同出一源，分之为二”

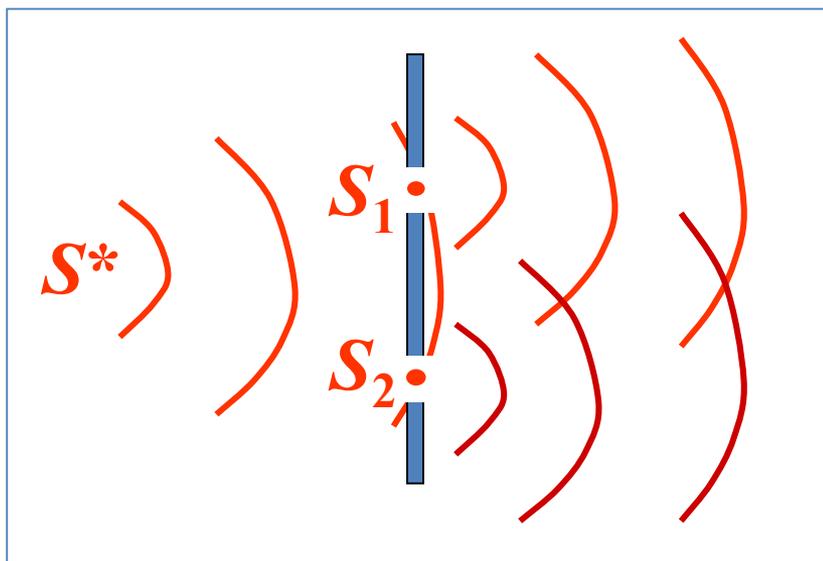


三 从普通光源获得相干光

思路：将同一点光源、某一时刻发出的光分成两束

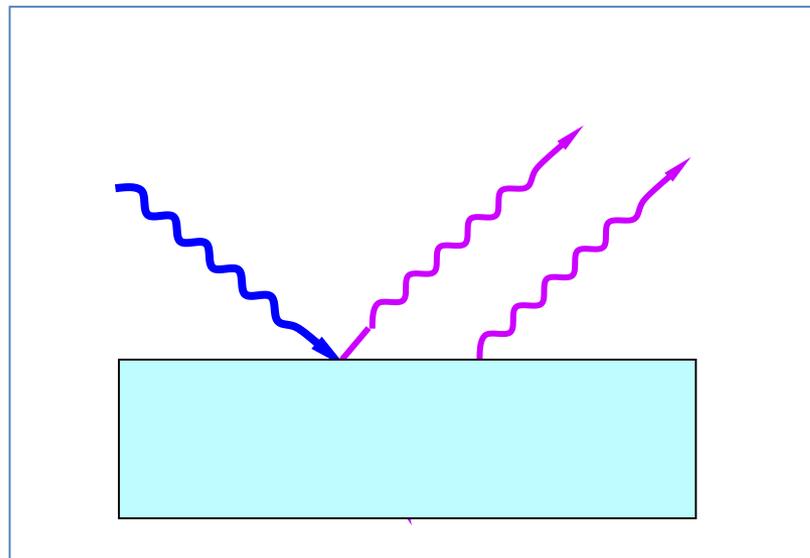
① 分波阵面法

将同一波面上两不同部分作为相干光源



② 分振幅法(分振幅~分能量)

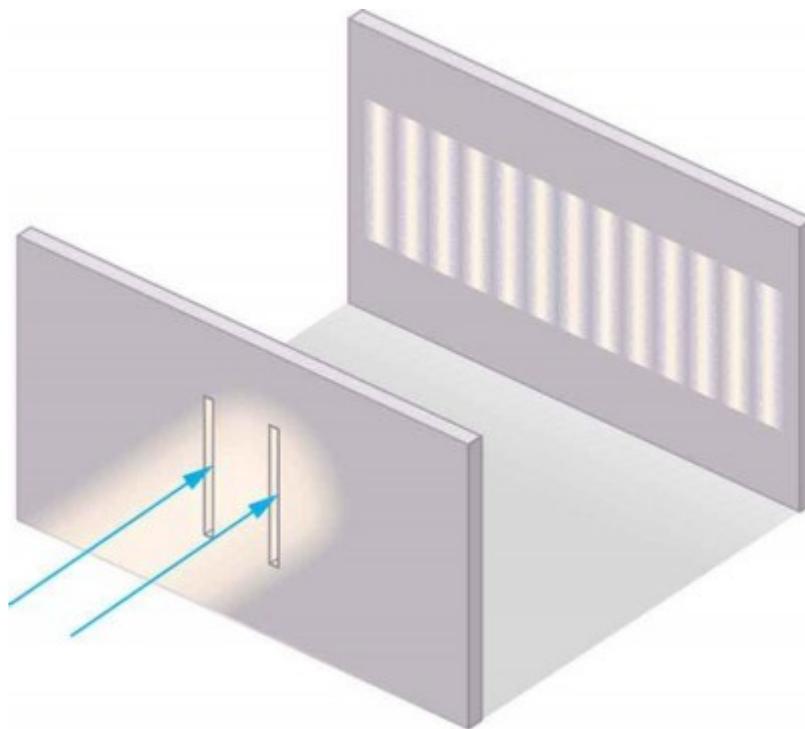
将透明薄膜两个面的反射(透射)光作为相干光源



大学物理（下）

14 波动光学

14.2 杨氏双缝干涉实验 光程 光程差



via [lumenlearning](https://www.lumenlearning.com)

目标

- ❖ 认识杨氏双缝干涉及其干涉条纹特征
- ❖ 会使用波（光）程差来分析条纹明暗分布

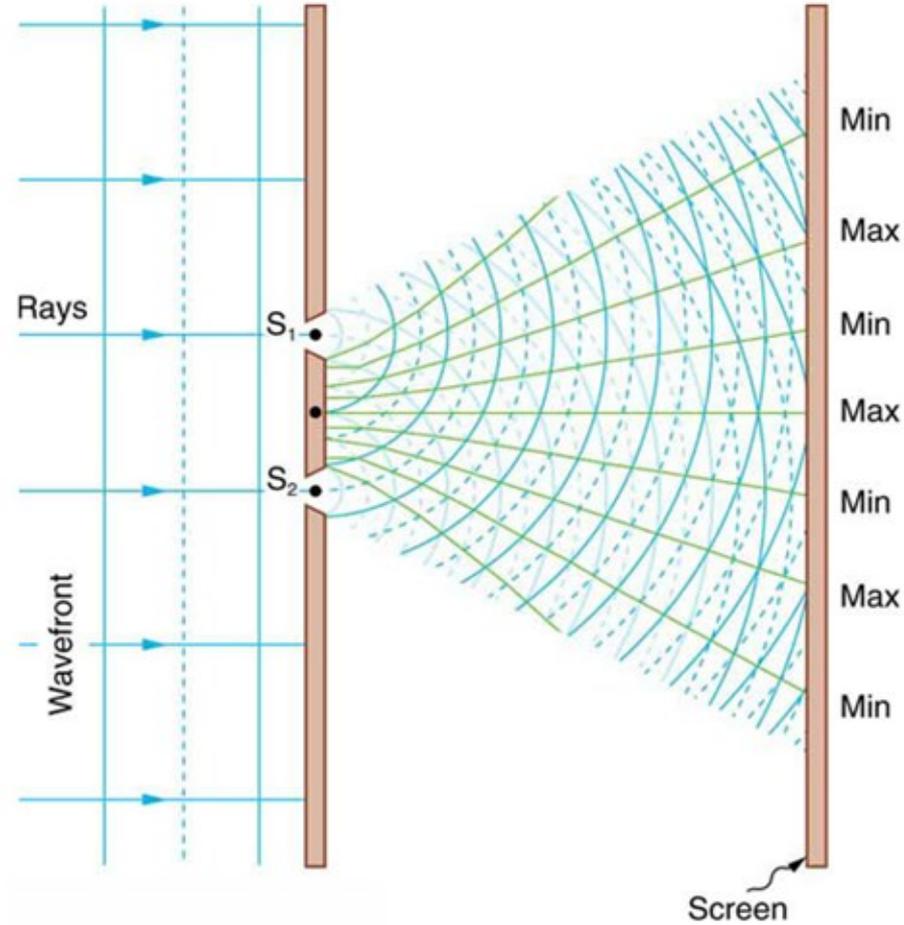
引子

- 杨氏双缝干涉是什么样的？请画图示。
- 为什么会发生干涉？条件是什么？
- 干涉条纹是什么样子的？有什么规律？
 - 怎么知道接收屏上某一位置的光强是强（干涉相长）还是弱（干涉相消）？
 - 条纹分布与波长有什么关系？
 - 条纹分布与双缝间距有什么关系？
 - 如果将整个装置放到水里，条纹会有变化吗？
 - 如果换成白光，会有干涉条纹吗？
 -

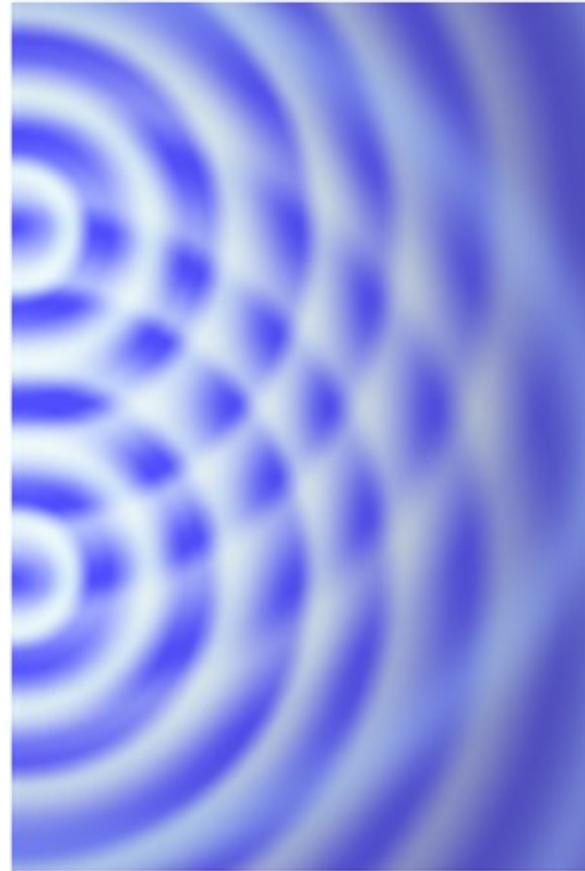
光波穿过狭缝时的衍射（散开）

水波双缝干涉

光的双缝干涉条纹



(a)



(b)



(c)

Double slit interference

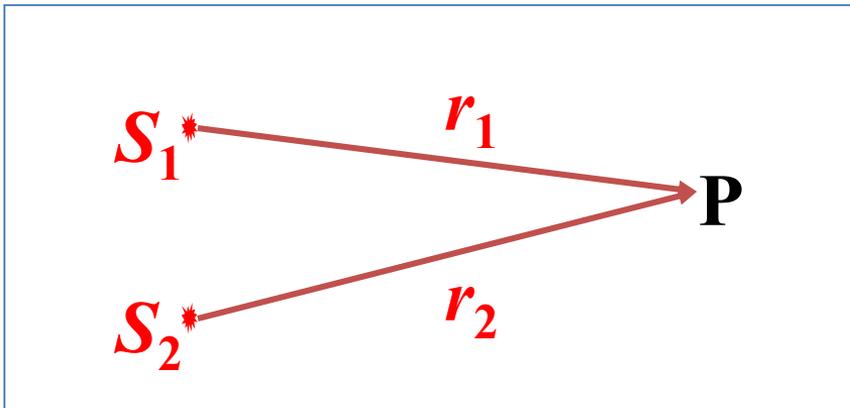
回顾机械波的干涉

- 机械波的干涉条件
- 两列波在某点相遇时，干涉增强/减弱的条件
- 相位差
- 相位变化与波长和距离的关系

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi} \\ \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \end{array} \right.$$

对于光波之间以及光波与物质的相互作用，我们通常考虑其电场强度矢量 \vec{E}

$$S_1 : E_1(t) = E_1(\cos \omega t + \varphi_{10}) \quad S_2 : E_2(t) = E_2(\cos \omega t + \varphi_{20})$$



在P点相遇而干涉时，振幅

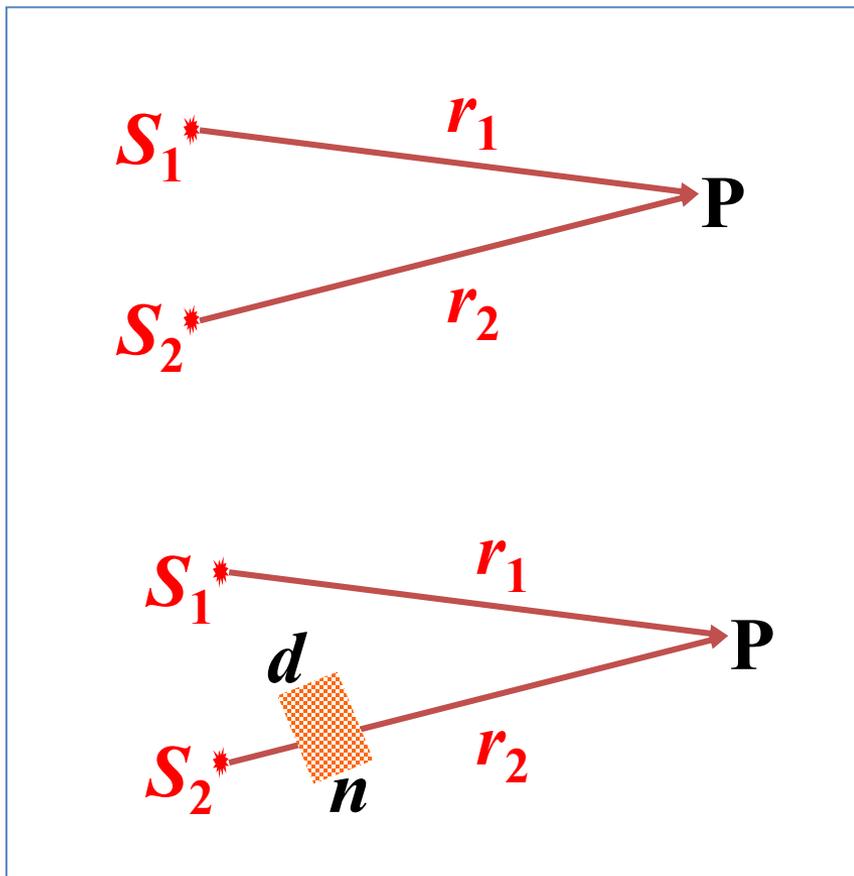
$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \Delta\varphi}$$

相干光在相遇点 P 叠加的合振动强度（振幅）
取决于两分振动的相位差

$$\Delta\varphi = ?$$

相干光在相遇点 **P** 叠加的合振动强度取决于两分振动的相位差

$$\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$$



↓ 当 $\varphi_{20} = \varphi_{10}$ 时

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{r_1 - r_2}{\lambda}$$

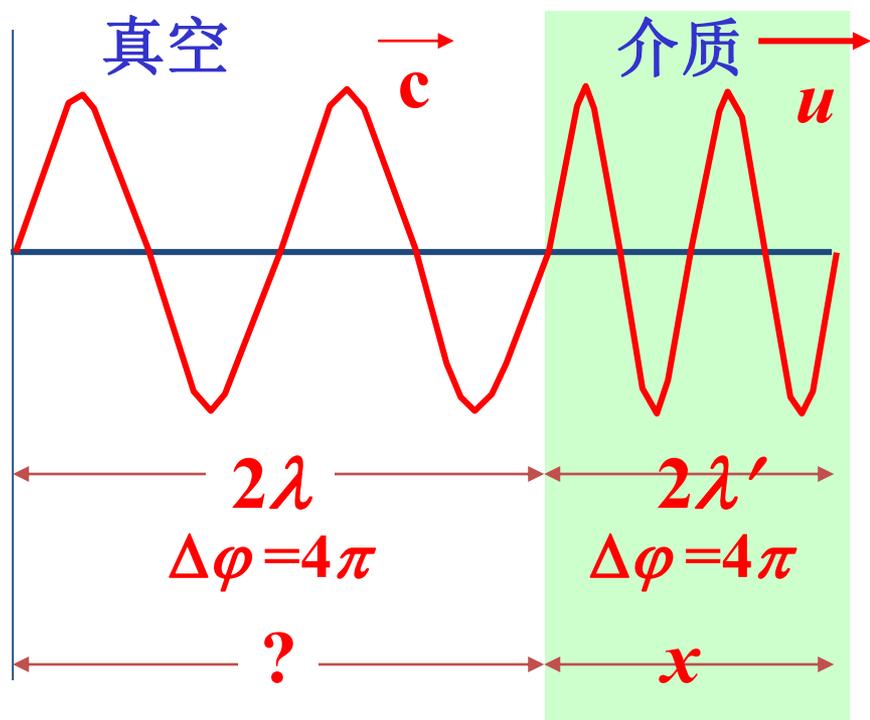
如果光路中有其它物质

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{r_1}{\lambda} - 2\pi \left(\frac{r_2 - d}{\lambda} + \frac{d}{\lambda'} \right)$$

如何简化？

思路：设法将光在介质中传播的距离折合成光在真空中的距离，统一使用 $\lambda_{\text{真空}}$ 计算。

折合原则：在引起光波相位的改变上等效。



介质中 x 距离内波数: $k = \frac{x}{\lambda'}$

真空中同样波数占据的距离

$$\frac{x}{\lambda'} \cdot \lambda = \frac{x \cdot cT}{uT} = x \cdot \frac{c}{u} = x \cdot \underline{n}$$

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n}$$

介质相对真空的折射率

一 光程、光程差

- 光线在多种介质中穿行时计算相位差 $\Delta\varphi$ 不方便
- 改为计算光程差 δ
 - 光程：光在介质中前进的距离折合成光在真空中前进的距离
 - 光程 = 几何路径 r \times 介质折射率 n
 - 光程差 δ ：两路光线光程的差值
- 合振动的相位差条件 \rightarrow 光程差条件

即：

光在折射率为 n 的介质中前进 x 距离引起的相位改变与在真空中前进 nx 距离引起的相位改变相同

定义：光程 = 几何路径 \times 介质折射率

↓
等效光在真空中传播的路程

光程是一个折合量，在相位改变相同(波数相等)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

光程差： (两光程之差) $\delta = n(r_2 - r_1)$

相位差： $\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_2} - \frac{r_1}{\lambda_1}\right) = 2\pi\frac{\delta}{\lambda}$
→ 光程差
→ 真空中波长

干涉时合振幅 $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \Delta\varphi}$

合成光强 $I = I_1^2 + I_2^2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\varphi$

初相位相同时:

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

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$

$\delta \rightarrow$ 光程差
 $\lambda \rightarrow$ 真空中波长

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \pm 2k \cdot \pi \\ \pm (2k + 1) \cdot \pi \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

相长 \sim 明

相消 \sim 暗

若 $\varphi_1 = \varphi_2$ $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$

$$\delta = \begin{cases} \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \\ \pm (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

明纹

(Constructive Interference)

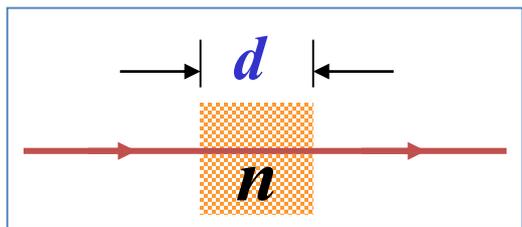
暗纹

(Destructive Interference)

振动始终加强或始终减弱的条件由相位差条件转换为直观的**光程差**条件

常见情况:

- ①真空中加入厚度 d 的介质、增加 $(n-1)d$ 光程差



$$nd - d = (n - 1)d$$

- ②光由光疏介质射到光密介质界面上反射时附加 $\lambda/2$ 光程差

折射率 n 较小

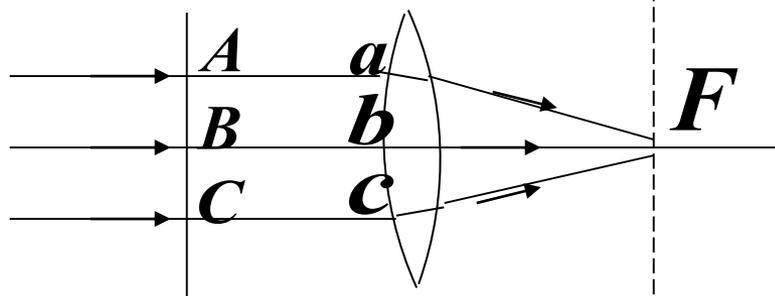
n 较大

(半波损失)

- ③薄透镜不引起附加光程差

光通过透镜

不同光线通过**透镜**要改变传播方向，
不会引起附加光程差！



A 、 B 、 C 的位相
相同，在 F 点会聚，
互相加强

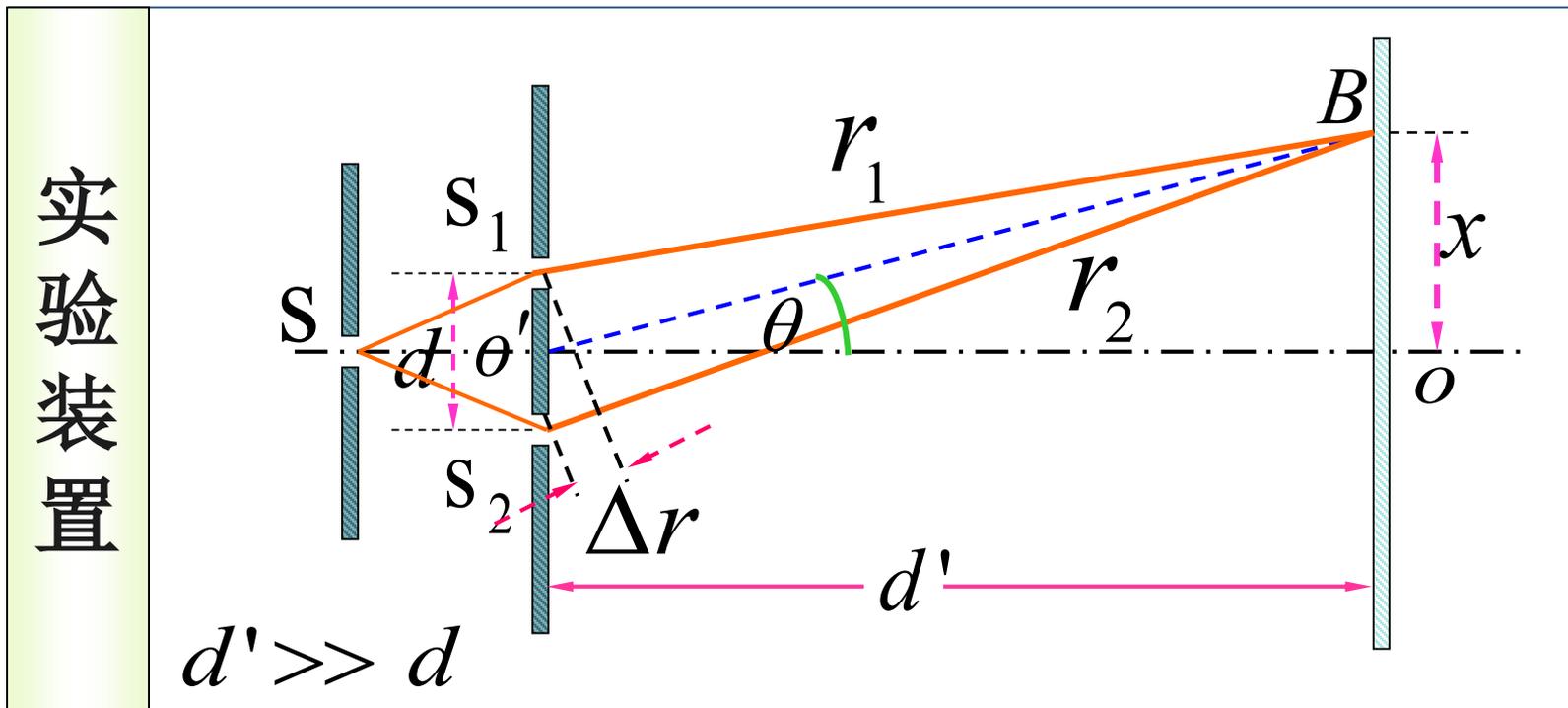
A 、 B 、 C 各点到 F 点的光程都相等。

解释

AaF 比 BbF 经过的几何路程长，但 BbF 在透镜中经过的路程比 AaF 长，透镜折射率大于 1，折算成光程， AaF 的光程与 BbF 的光程相等。

使用透镜不会引起各相干光之间的附加光程差。

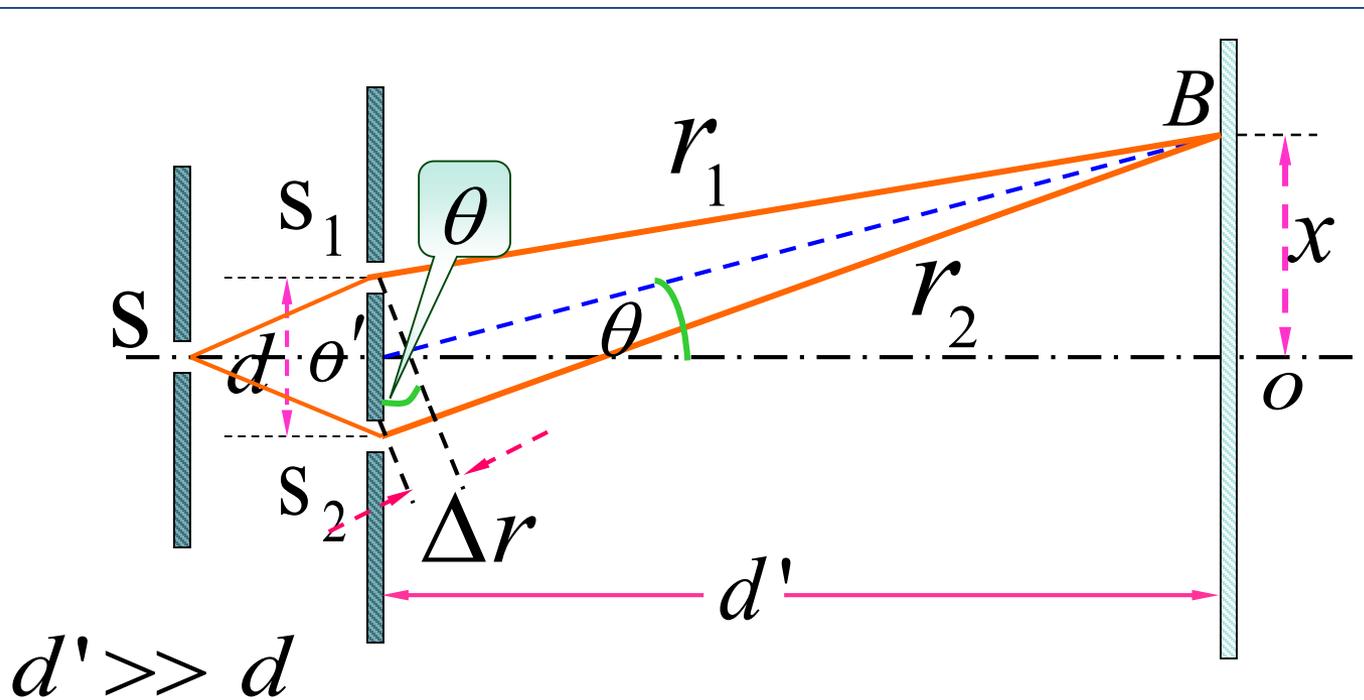
一 杨氏双缝干涉实验



计算光程差并根据条件判断屏上不同位置的干涉情况。

$$\delta = \begin{cases} \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2} & \text{明纹} \\ \pm (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

实验装置

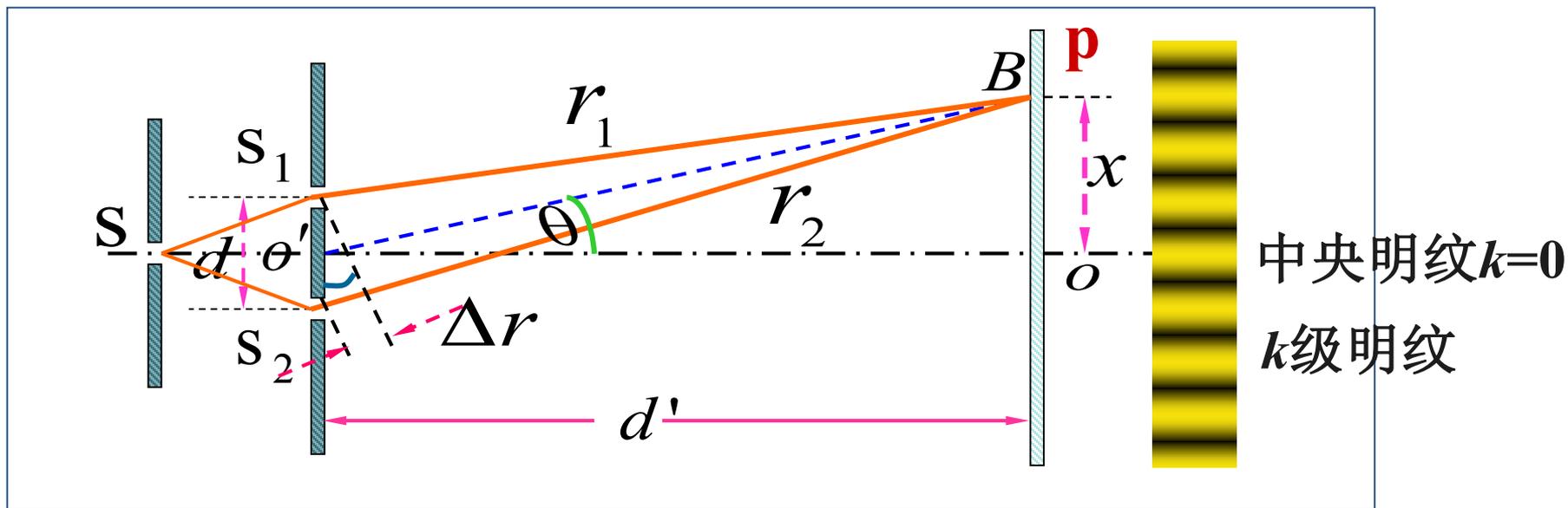


波程差 $\Delta r = r_2 - r_1 = d \sin \theta$

折射率近似为 1
波程差=光程差

$$\sin \theta \approx \tan \theta = x/d'$$

$$\delta = n \cdot \Delta r \approx d \frac{x}{d'}$$



$$\Delta r = d \frac{x}{d'} = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{加强} \\ \pm (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{减弱} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

k 取值与条纹级次一致

$$x = \begin{cases} \pm k \frac{d'}{d} \lambda & \text{明纹} \\ \pm \frac{d'}{d} (2k+1) \frac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

讨论 1:

1. 条纹间距

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{d' \lambda}{d} \quad (\Delta k = 1)$$

条纹间距与干涉条纹级数无关 → 条纹等间距

扩展:

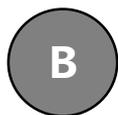
条纹间距与 λ 、 d 、 d' 的关系?

λ 一定: 要想使明暗纹清晰可见 $d' \gg d$

λ 、 d' 一定时，条纹间距 Δx 与 d 的关系。双缝间距越小，则条纹（ ）。



越宽



越窄



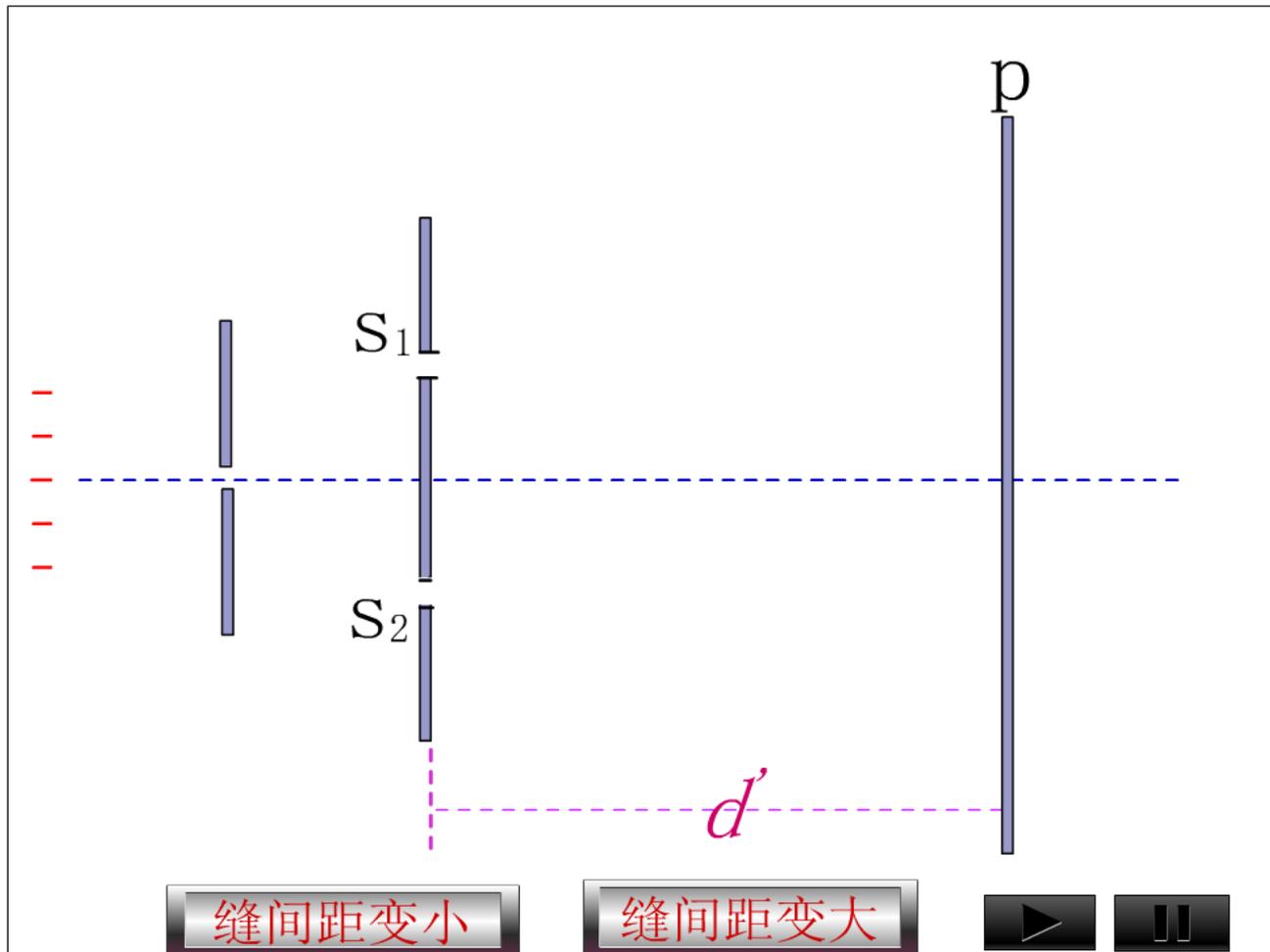
没有变化



不能确定

λ 、 d' 一定时，条纹间距 Δx 与 d 的关系？

双缝间距越小，条纹越宽

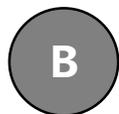


$$\Delta x = \frac{d'}{d} \lambda$$

d 、 d' 一定时，若光源由绿色变成红色，则条纹间距将（ ）。



变宽



变窄



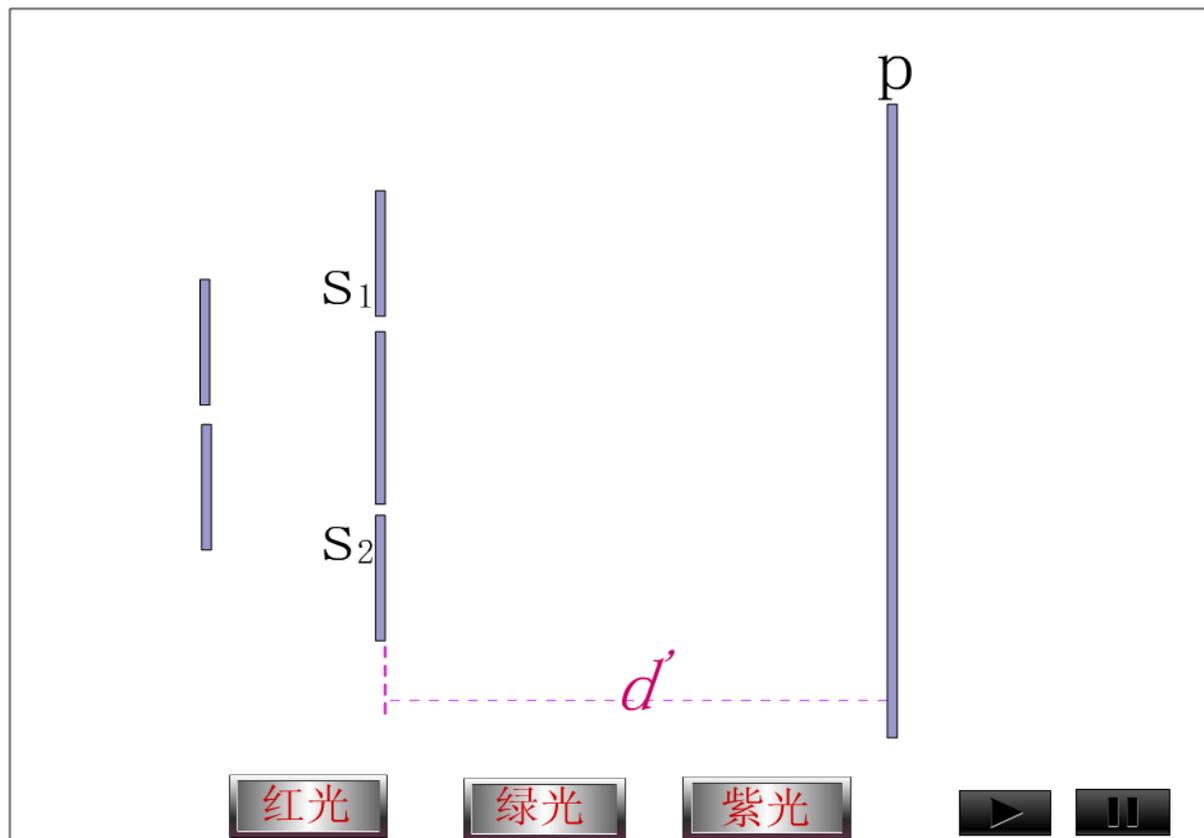
没有变化



不能确定

d 、 d' 一定时，若 λ 变化， Δx 将怎样变化？

$$\Delta x = \frac{d'}{d} \lambda \quad d、d' \text{一定} : \Delta x \propto \lambda \quad \Delta x_{\text{红}} > \Delta x_{\text{紫}}$$



d 、 d' 确定时，通过测量 Δx ，可以测定 λ

讨论 2:

2. 白光照射时，有没有干涉条纹？

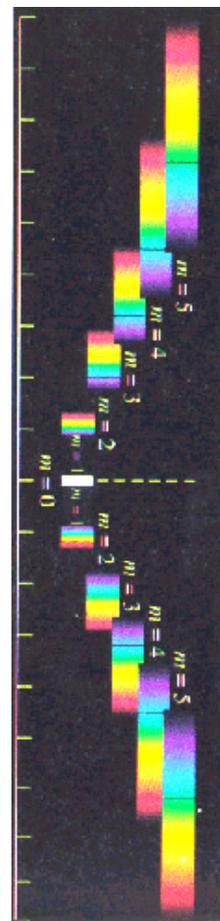
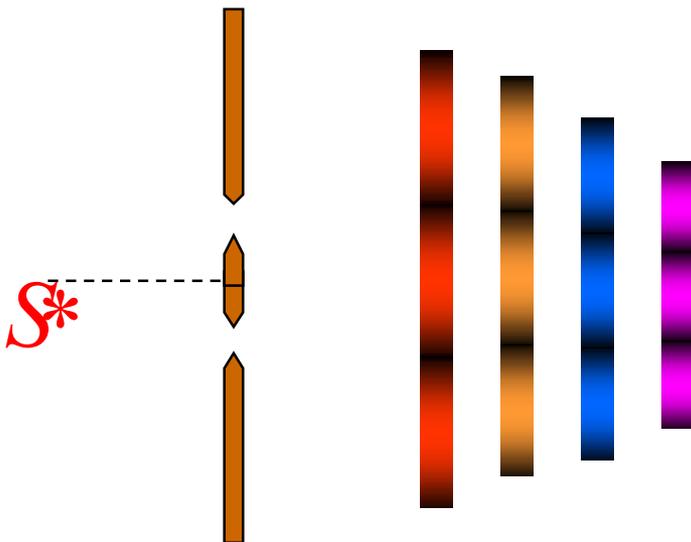
白光照射时，出现彩色条纹

白光照射双缝：

零级明纹：白色

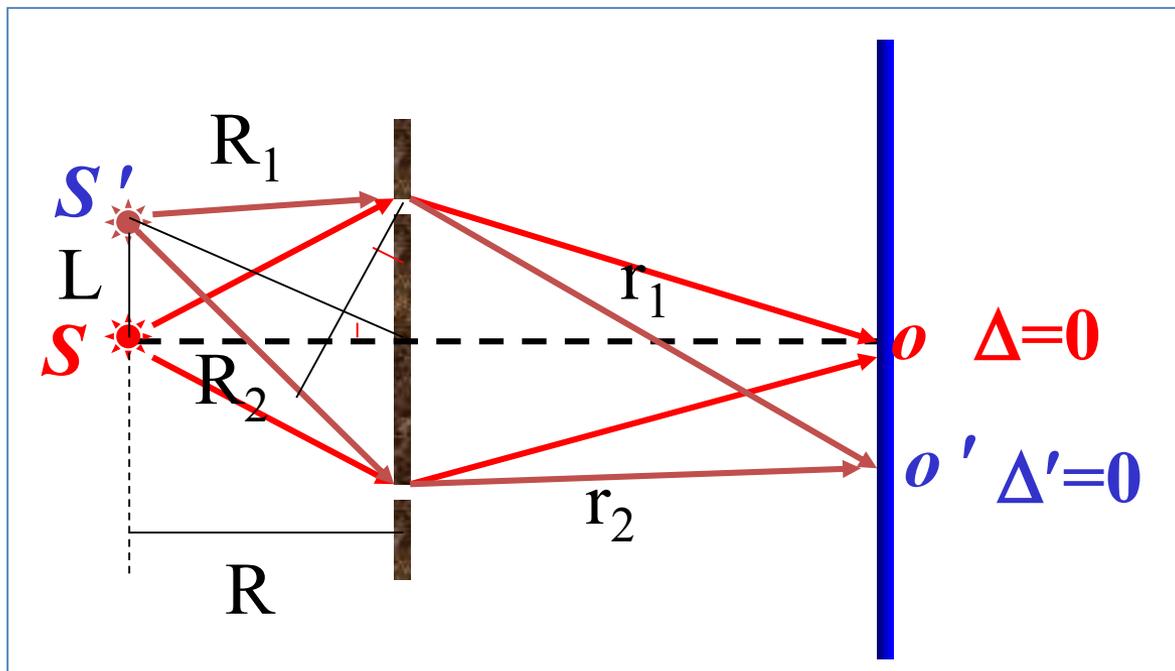
其余明纹：彩色光谱

高级次重叠。



讨论 3:

3. 将缝源垂直于轴上、下移动对干涉条纹的影响。



$$\delta = 0$$

$$x = -\frac{d'}{R}L$$

\$S\$ 上移至 \$S'\$

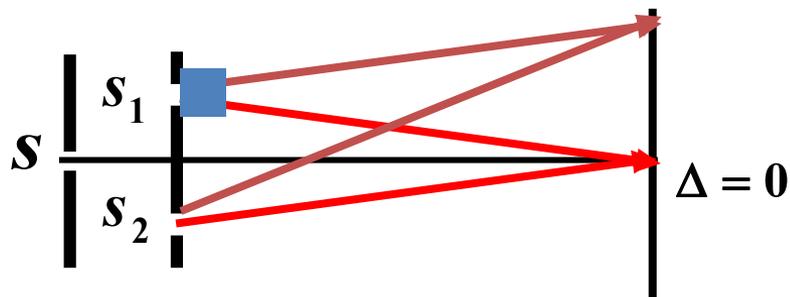
条纹向下平移

$$\delta = R_2 - R_1 + r_2 - r_1 = \Delta R + \Delta r \approx d \frac{L}{R} + d \frac{x}{d'}$$

$$\Delta R \approx d \sin \theta \approx d \frac{L}{R}$$

讨论 4:

4. 当一个狭缝盖上厚度为 t 的薄膜。



被盖住的光路要增加 $(nt - t)$ 的光程。

设盖住上方的 s_1 缝，则零级中央明纹应上移；

盖住下方的 s_2 缝，则零级中央明纹向下平移。

杨氏双缝干涉实验装置放入透明液体中（折射率为 n ）。条纹怎么变化？（ ）

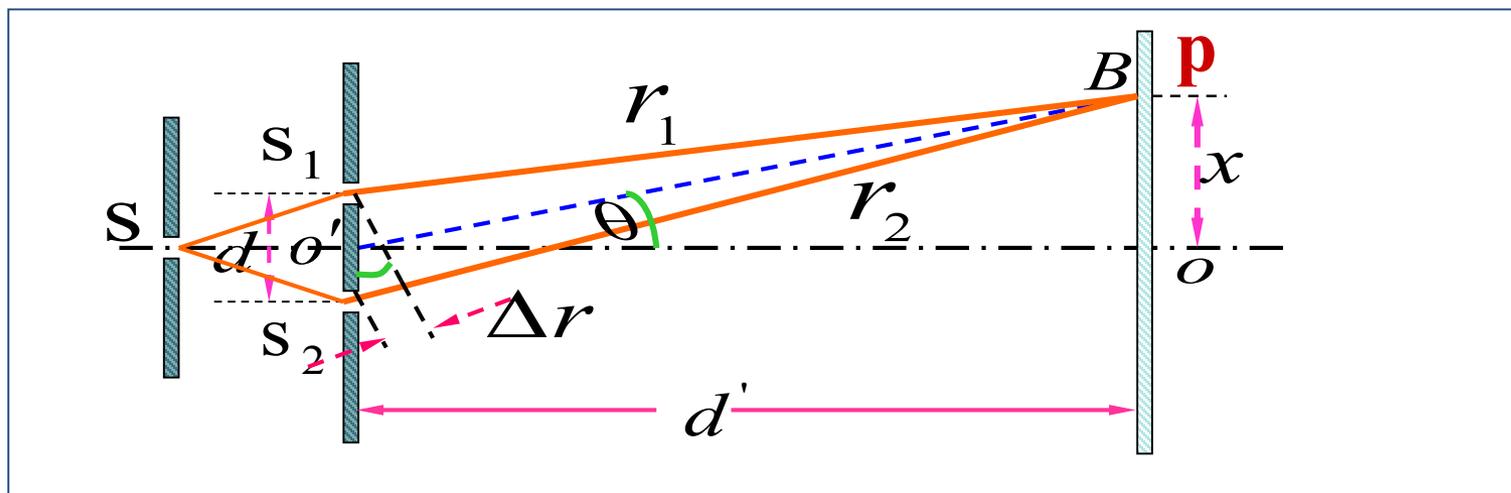
A 不变

B 变密

C 变疏

讨论 5:

5. 杨氏双缝干涉实验装置放入透明液体中（折射率为 n ）。



$$\Delta x = \frac{d'}{d} \lambda' = \frac{d' \lambda}{d n}$$

条纹间距变小，条纹变密

讨论 6:

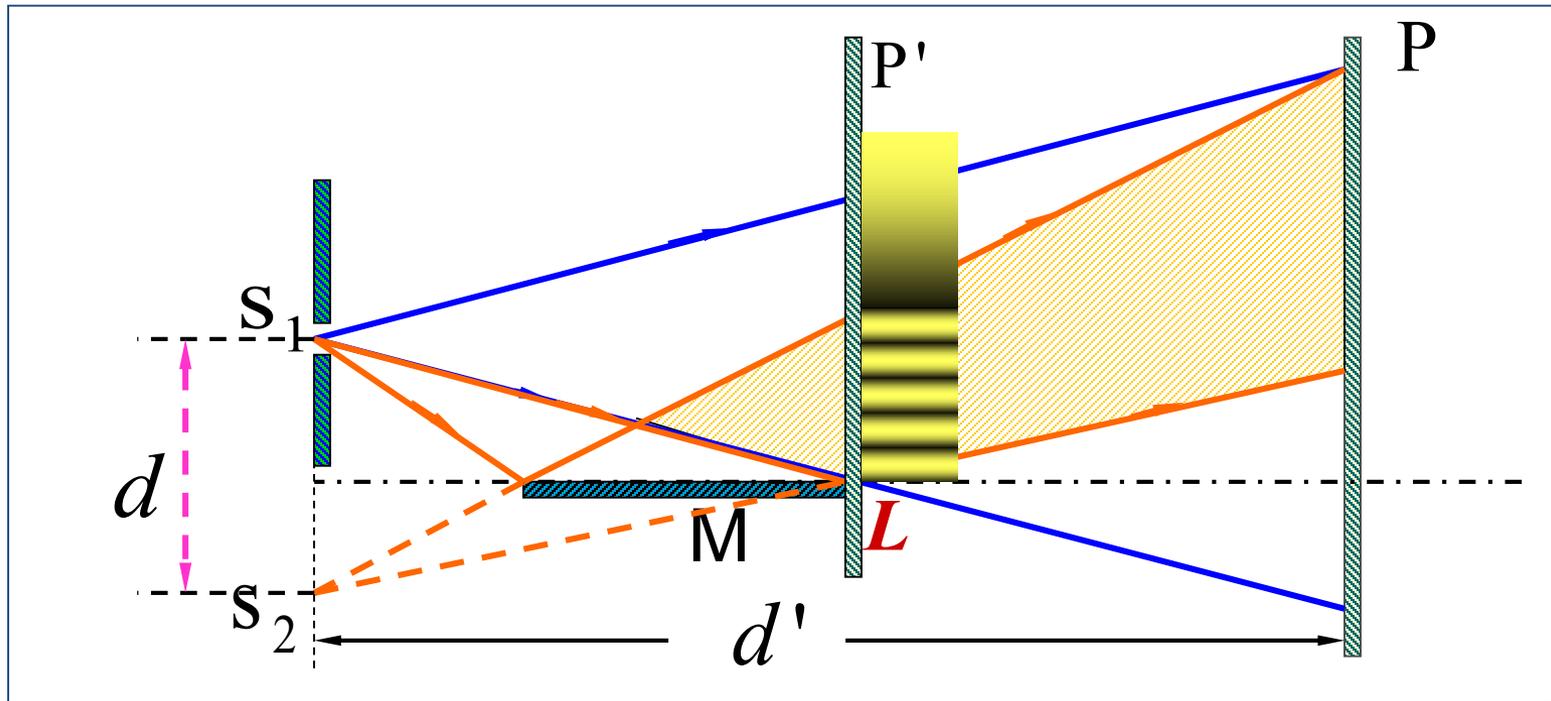
6. 理论上，屏幕上最高能出现的最高级次。

$$\Delta r \approx d \sin \theta = \pm k \lambda$$

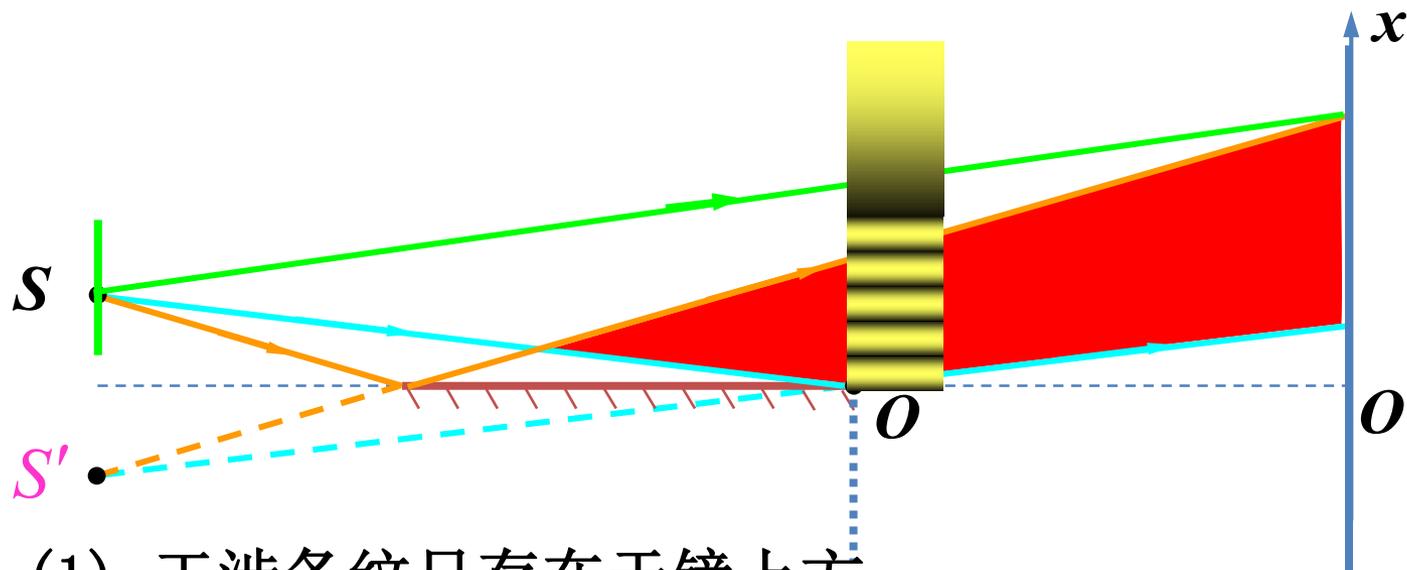
$$\sin \theta = 1 \quad k_{\max} = \pm \frac{d}{\lambda}$$

k 只取整数部分

三 劳埃德镜



单缝与其平面镜成的像构成双缝干涉



注：(1) 干涉条纹只存在于镜上方

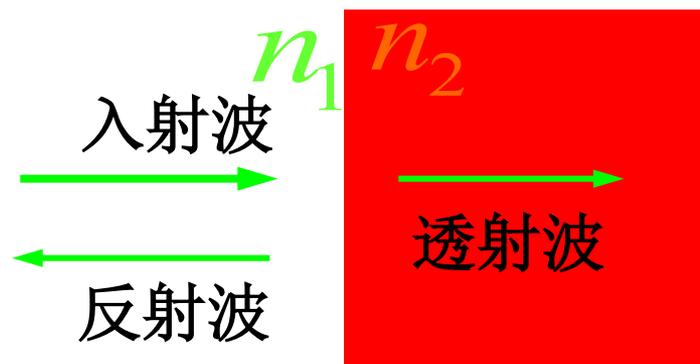
(2) 当屏移到镜边缘时，屏于镜接触点出现暗条纹 — 光在镜子表面反射时有相位突变 π 。

$$\delta = \frac{xd}{d'} + \frac{\lambda}{2}$$

接触处，屏上O点出现暗条纹 \longrightarrow 半波损失

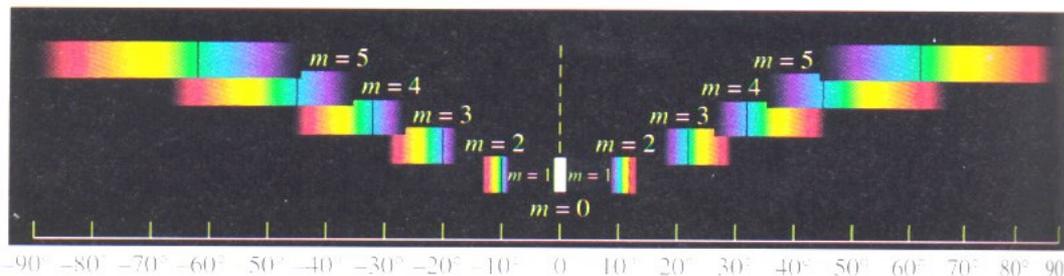
半波损失：光从光速较大的介质射向光速较小的介质时反射光的相位较之入射光的相位跃变了 π ，相当于反射光与入射光之间附加了半个波长的波程差，称为半波损失。

由光疏入射到光密介质时，**反射波**有半波损失，
透射波没有半波损失



例1 用白光光源进行双缝干涉实验，求清晰可辨光谱的级次

$$\lambda: 4000 \sim 7000 \text{ \AA}$$



零级

一级

二级

三级

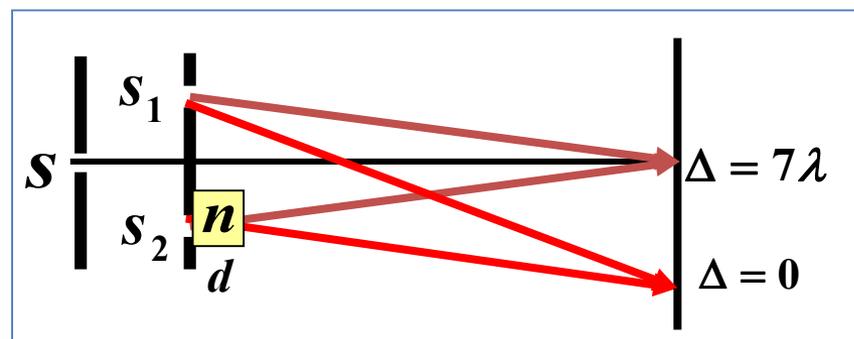
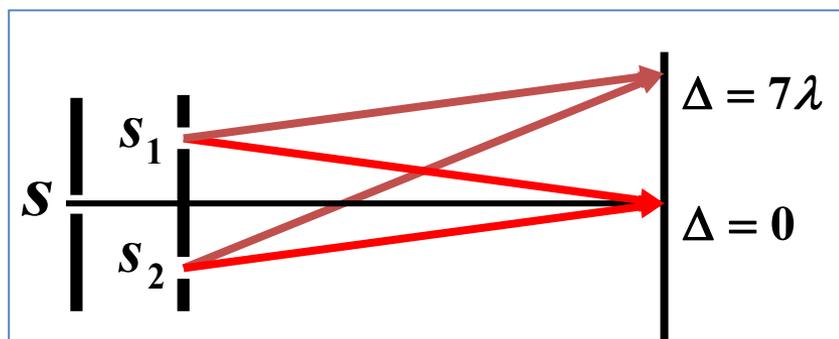
最先重叠： 某一级条纹的红光与高一级条纹的紫光在同一位置 (x 相同) $\rightarrow \Delta$ 相同

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

$$k = \frac{\lambda_{\text{紫}}}{\lambda_{\text{红}} - \lambda_{\text{紫}}} = \frac{4000}{7000 - 4000} \approx 1.3$$

未重叠的清晰光谱只有一级。

例2 已知波长为550nm，用折射率为1.58玻璃片覆盖缝2，将使屏上原来未放玻璃片时的中央明纹所在处0变为第7级明纹，求玻璃片厚度。



$$[r_2 + (nd - d)] - r_1 = 0$$

条纹下移

$$(n - 1)d = 7\lambda$$

$$d = \frac{7\lambda}{n - 1} = \frac{7 \times 550 \times 10^{-9}}{1.58 - 1} = 6.64 \times 10^{-6} \text{ m}$$

例3 以单色光照射到相距为0.2mm的双缝上,双缝与屏幕的垂直距离为1m.

(1) 从第一级明纹到同侧的第四级明纹的距离为7.5mm, 求单色光的波长;

(2) 若入射光的波长为600nm,求相邻两明纹间的距离.

解析 **(1)**
$$x_k = \pm \frac{d'}{d} k \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\Delta x_{14} = x_4 - x_1 = \frac{d'}{d} (k_4 - k_1) \lambda$$

$$\lambda = \frac{d}{d'} \frac{\Delta x_{14}}{(k_4 - k_1)} = 500 \text{nm} \quad \text{(2)} \quad \Delta x = \frac{d'}{d} \lambda = 3.0 \text{mm}$$

例4: 如图双缝, 已知入射光波长为 λ , 将折射率为 n 的劈尖缓慢插入光线 2 中, 在劈尖移动过程中, 问 1) 干涉条纹间距是否变化? 2) 条纹如何移动?

解: 1)

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

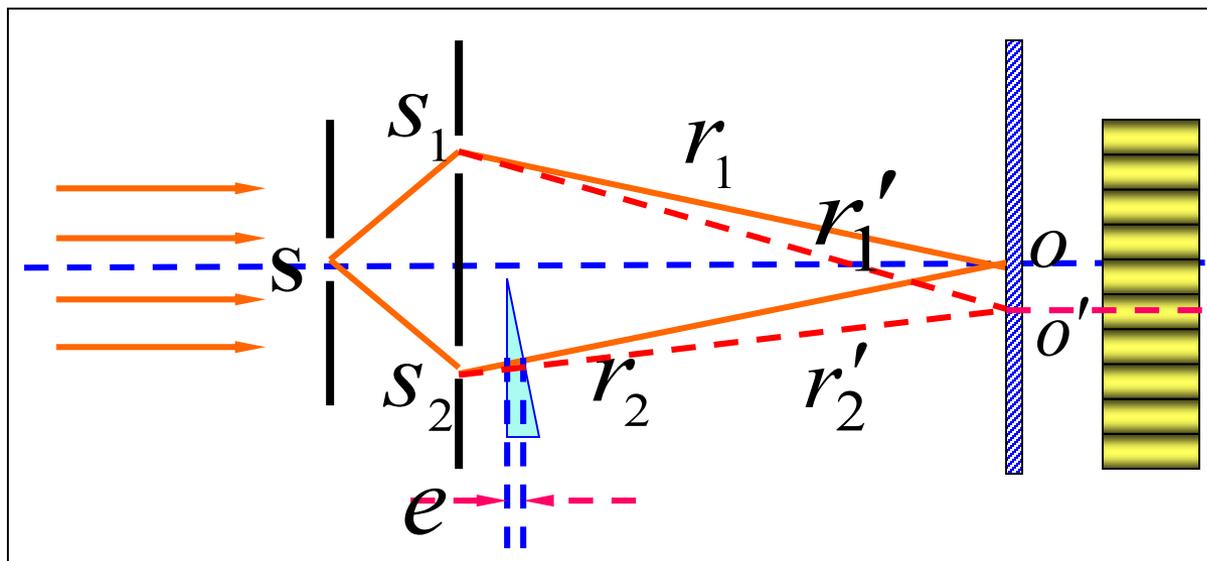
条纹间距不变.

2) 无劈尖时

$$r_1 = r_2$$

$$\Delta = r_2 - r_1 = 0$$

有劈尖时 $r_1 < (r_2 - e) + ne$



O 点为**零**级明纹位置

零级明纹位置下移

作业

➤ **P207: 10; 11; 13**

版权声明

本课件根据高等教育出版社《物理学教程（第二版）下册》（马文蔚 周雨青 编）配套课件制作。课件中的图片和动画版权属于原作者所有；部分例题来源于清华大学编著的“大学物理题库”。由 [Haoxian Zeng](#) 设计和编写的内容采用 [知识共享 署名-相同方式共享 3.0 未本地化版本 许可协议](#) 进行许可。详细信息请查看 [课件发布页面](#)。