

第十三章 光

学



光学发展概述

光的波粒之争

牛顿



惠更斯



微粒说

波动说

1704, 牛顿在《光学》一书中指出, 光是从发光体发出的以一定速度向空间直线传播的微粒.

1678年, 惠更斯在《光论》一书中, 从光与声的某些相似性出发, 认为光是在“以太”中传播的球面纵波.

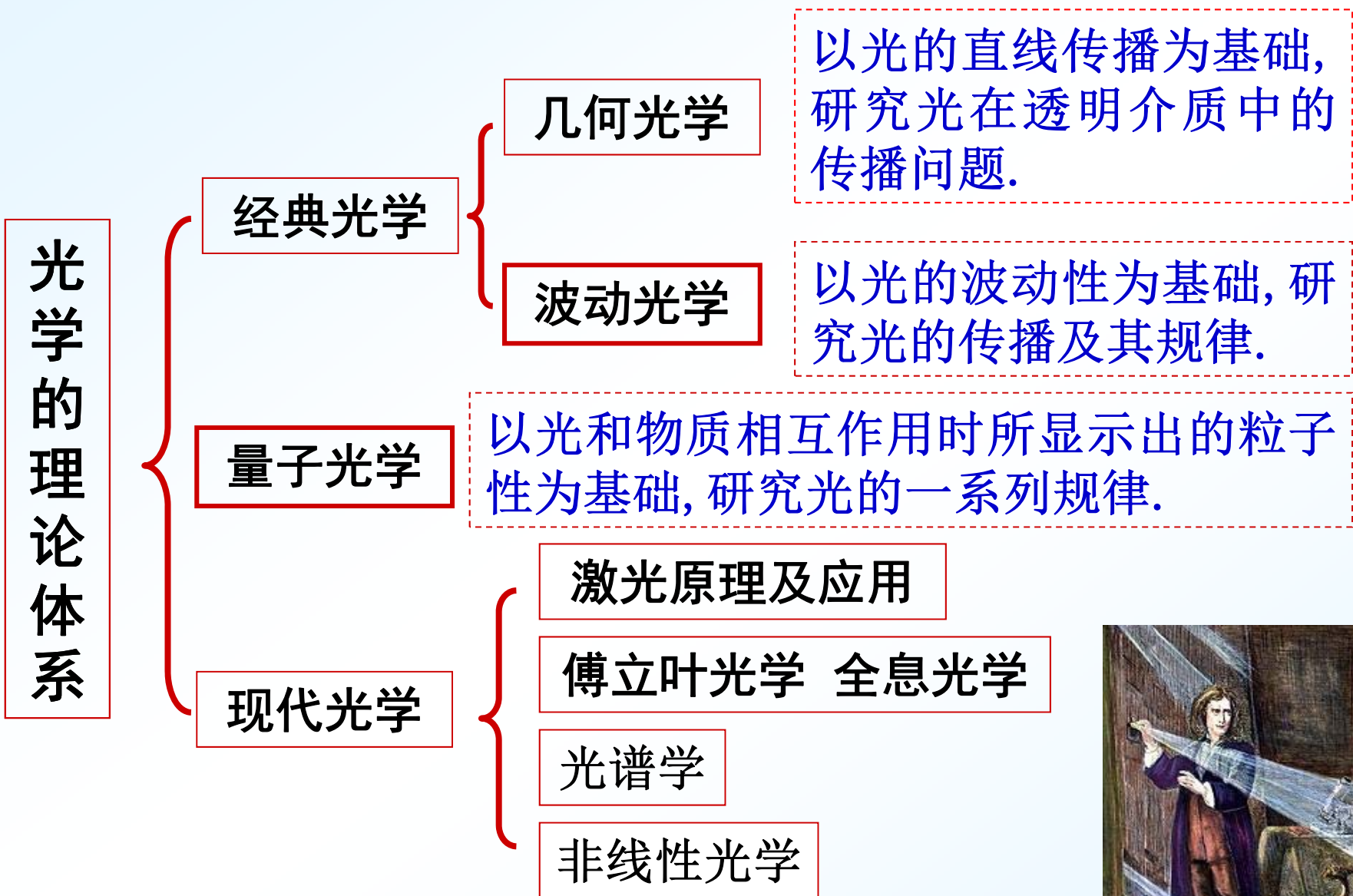
波动说与微粒说的对立在于：

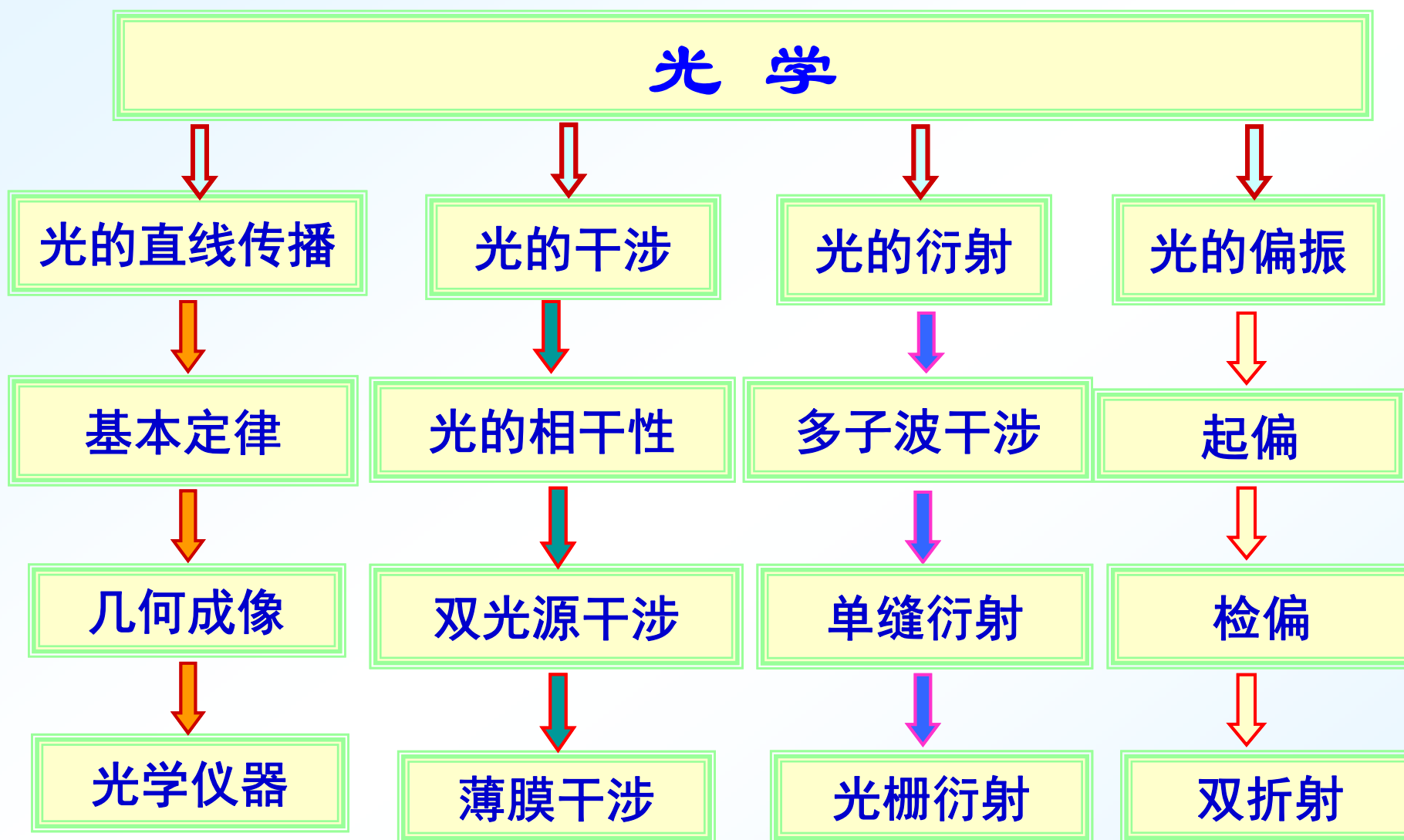
微粒说(corpuscular theory)认为伴随着光信号的传播有某种物质——光微粒的输送；

波动说(undulatory theory)认为光信号的传播只不过是光引起的效应的传播,并不伴随着物质的输送.

从历史上两种学说的争论,到当代光本性的研究,构成了光学发展史中的一根红线.

- 牛顿：光的直线传播说明光是粒子流.
- 惠更斯、托马斯·杨、菲涅耳：光具有干涉和衍射现象,所以光是一种波.
- 麦克斯韦：光是一种电磁波,真空中传播速率为 c .
- 爱因斯坦：用普朗克的“能量子”解释了光电效应.
光具有粒子性.
- 德布罗意：所有物体都具有波动性与粒子性.

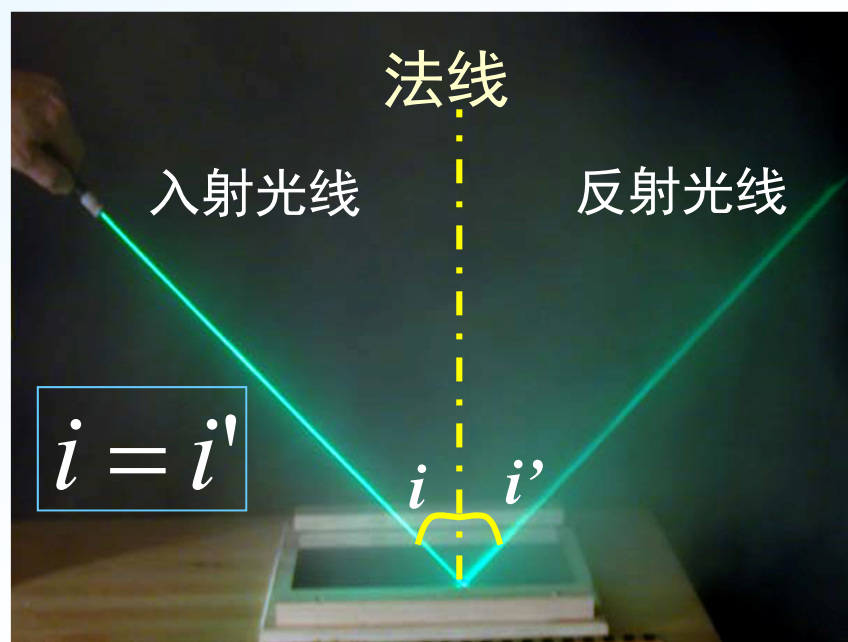




几何光学的基本原理、定律

1. 光的直线传播定律

2. 光的反射定律



3. 光的折射定律

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{12}$$



$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{12}$$

其中 n_{12} 称为介质2相对于介质1的折射率

相对于真空的折射率称为**绝对折射率**, 其定义为:

$$n = \frac{c}{v}$$

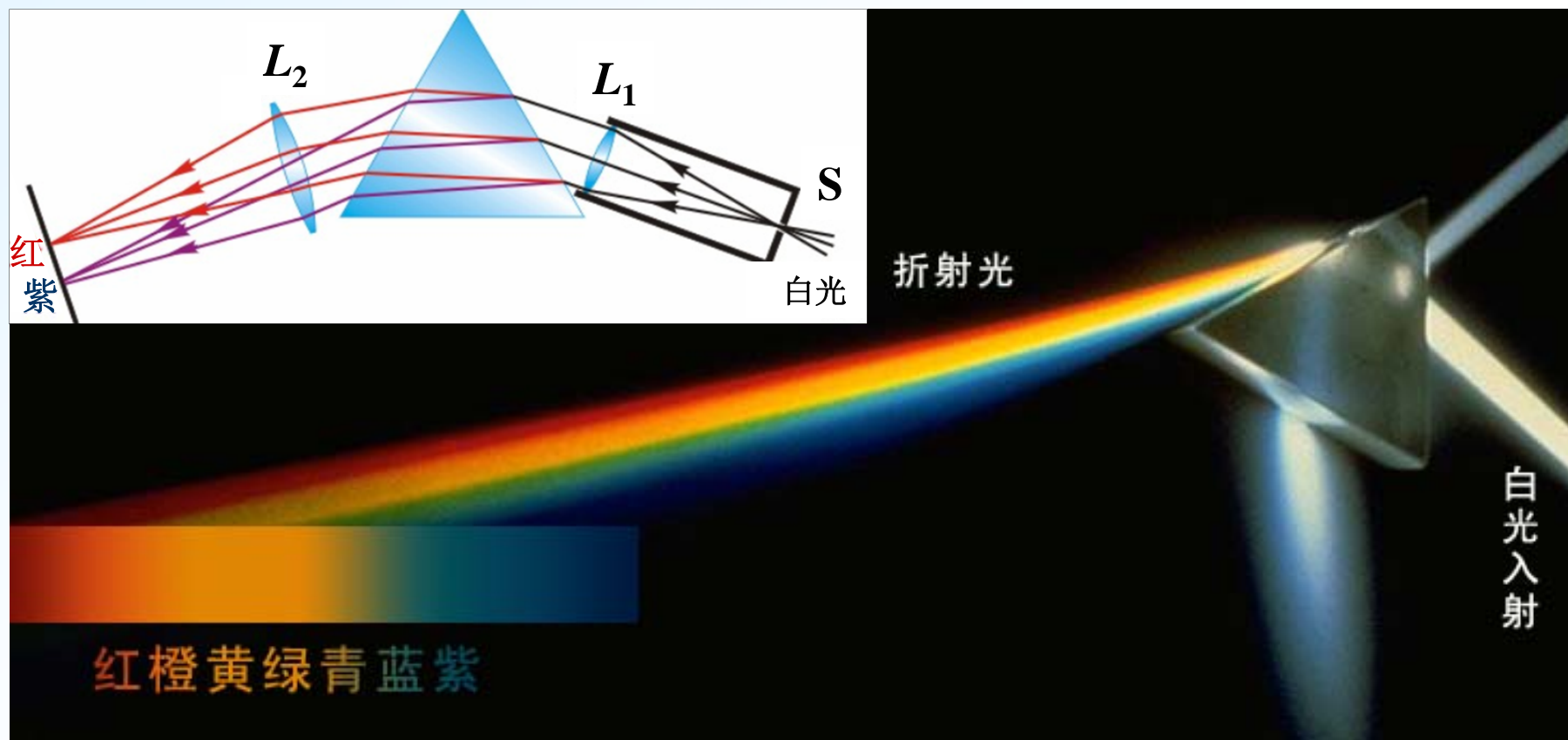
← 光在真空中的传播速度

← 光在介质中的传播速度

两种介质相比较, 折射率大的介质, 光在其中的传播速度小, 称为光密介质(optically denser medium); 折射率小的介质, 光在其中的传播速度大, 称为光疏介质(optical thinner medium).

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

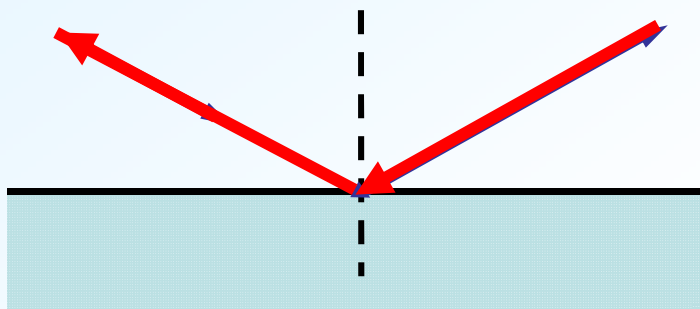
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$



白光通过三棱镜折射时, 将各波长的光分散形成光谱, 称**色散(dispersion)**.

4. 光的独立传播定律

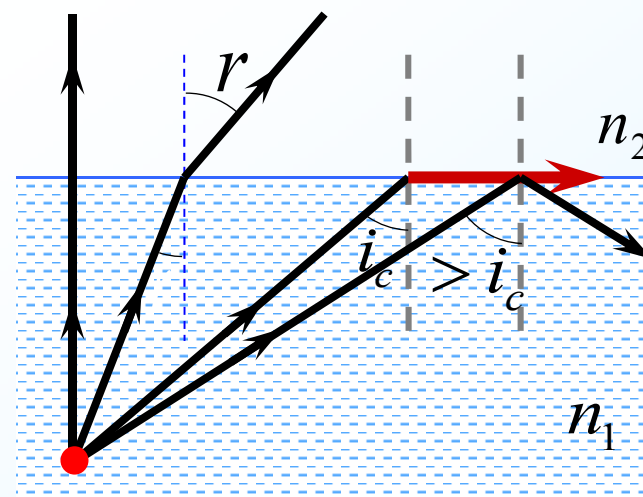
5. 光路可逆性原理



6. 全反射

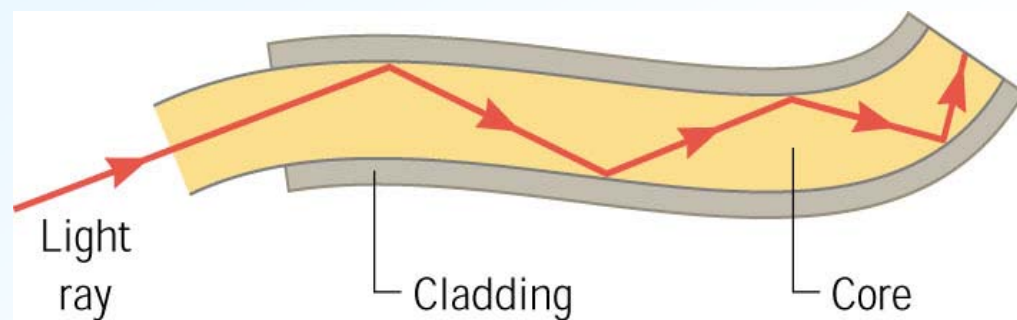
全反射(total reflection): 当入射角 i 大于临界角 i_c 时, 将不会出现折射光, 入射光的能量全部反射回原来介质.

$$i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2)$$

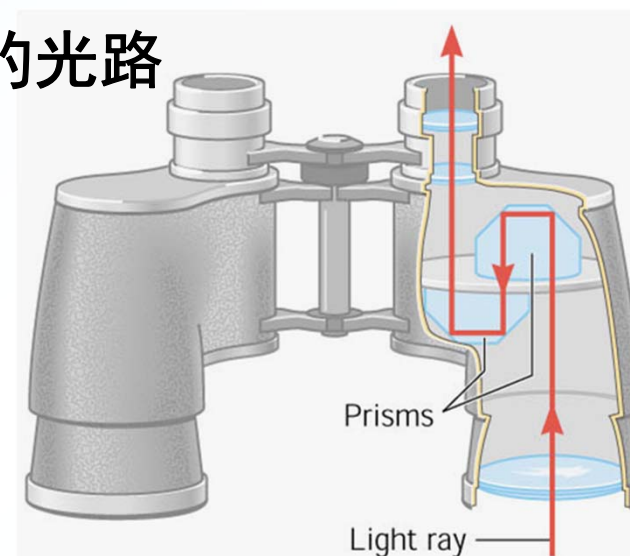


全反射的应用

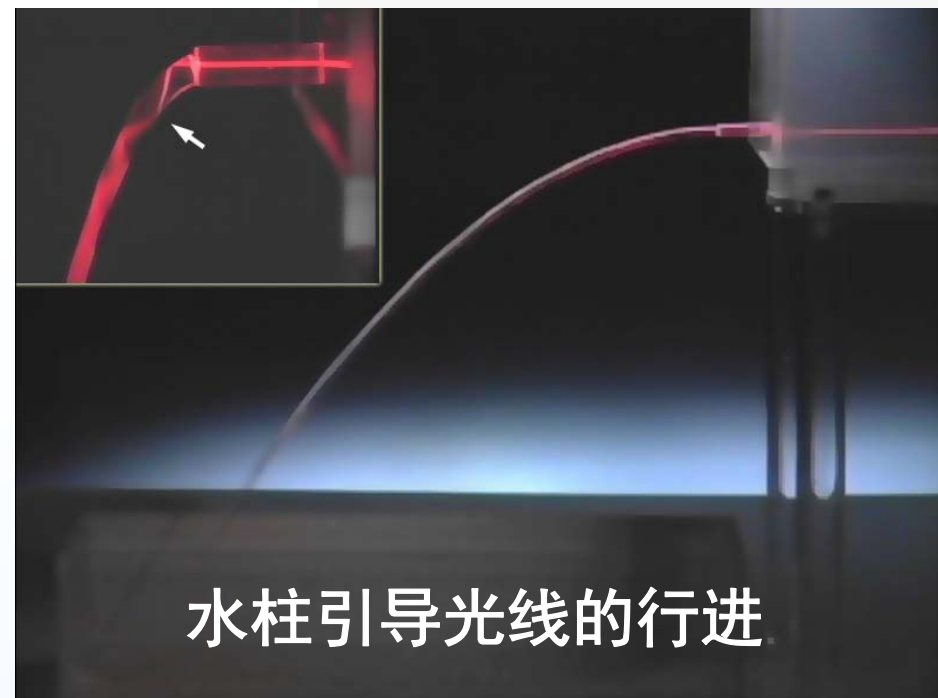
光导纤维的光路



望远镜的光路



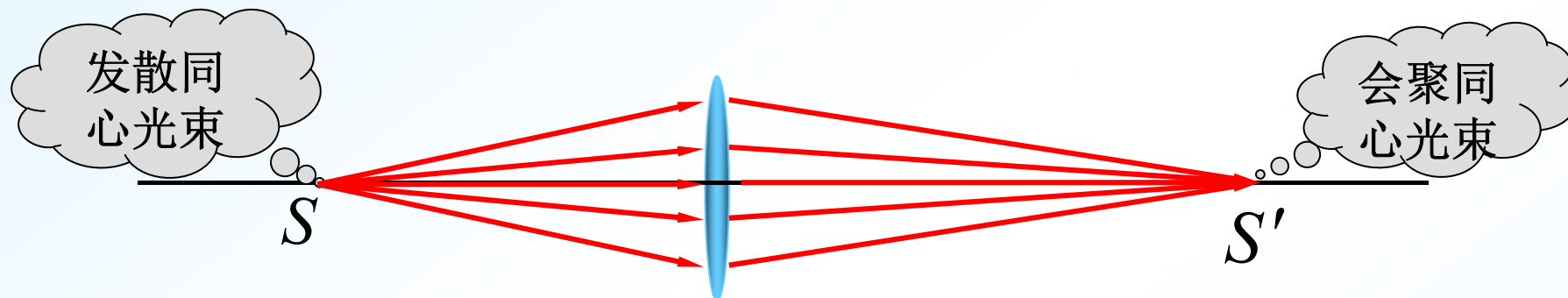
内窥镜



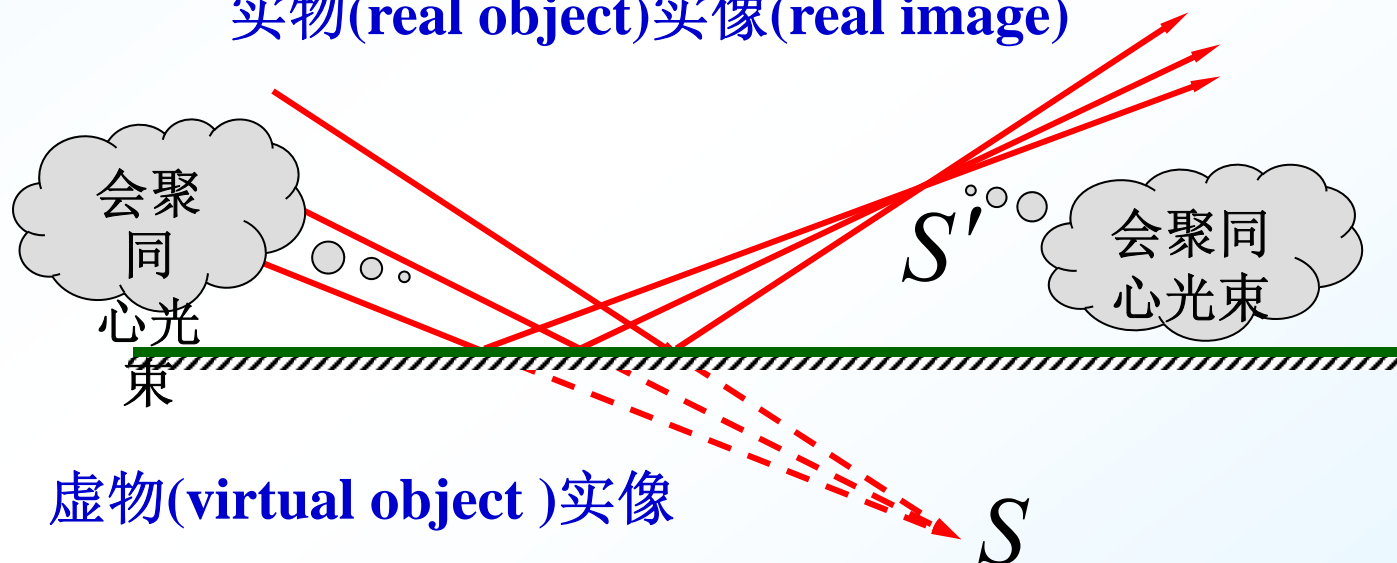
水柱引导光线的行进

7. 物(object)和象(image)

实物, 虚物, 实像, 虚像



实物(real object)实像(real image)

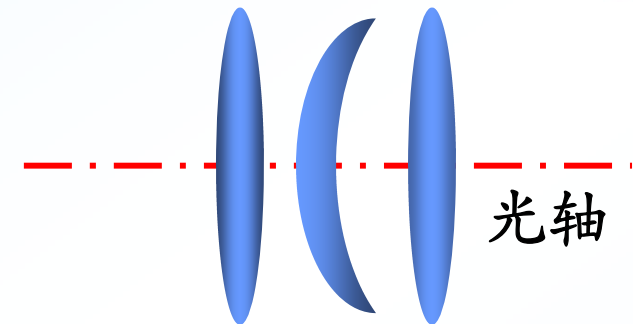


虚物(virtual object)实像

8. 物空间和像空间

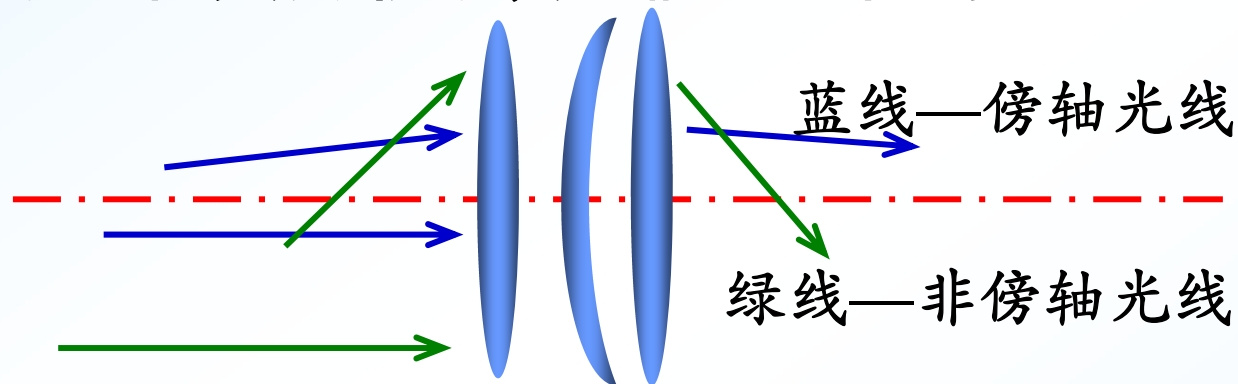
9. 光轴(optical axis)

---- 光学系统的对称轴



10. 傍轴光线(paraxial ray)

---- 与光轴夹角较小, 并靠近光轴的光线



11. 薄透镜(thin lens): 两个侧面的中心靠得很近的透镜

12. 薄透镜成像的作图法的三条特殊光线:

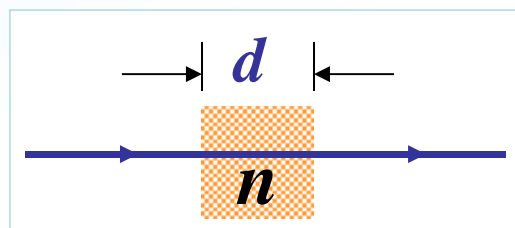
- 与主光轴平行的入射光线, 折射后通过像方焦点.
- 通过物方焦点的光线, 折射后平行于主光轴.
- 通过光心的光线, 按原方向传播不发生偏折.

13. 光程和光程差 光在介质中的光程为介质的折射率与光在介质中所走的几何路程之积, 数值上等于以相同的时间在真空中走过的距离.

等效真空程 \rightarrow **光程 = 几何路程 \times 介质折射率**

光程差: 等效真空程之差 $\Delta = n_1 r_1 - n_2 r_2$

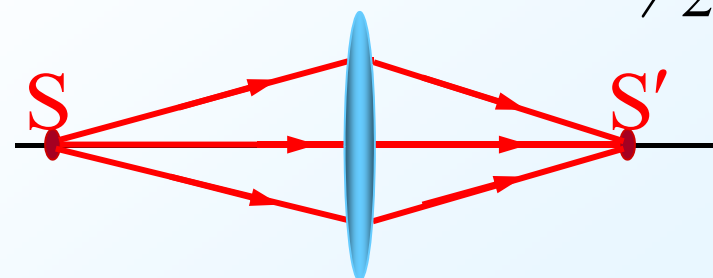
① 真空中加入厚 d 的介质, 光程增加量为 $(n-1)d$



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

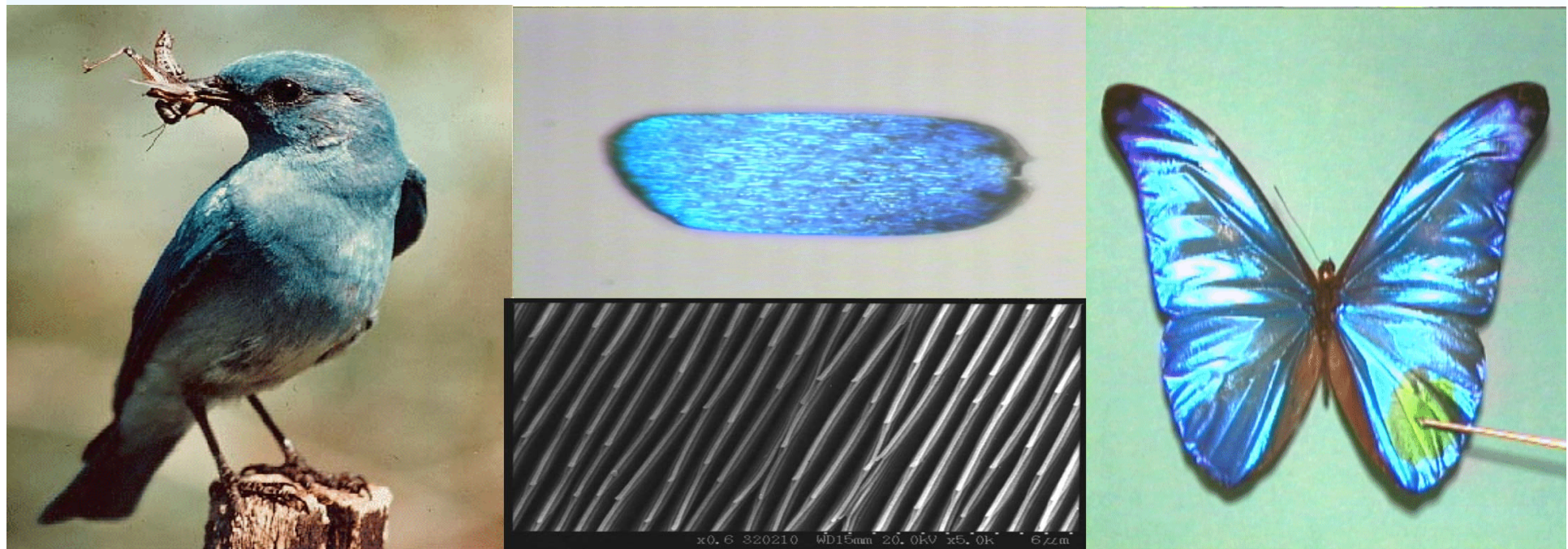
② 光由光疏介质射到光密介质界面上反射时附加 $\lambda/2$ 光程

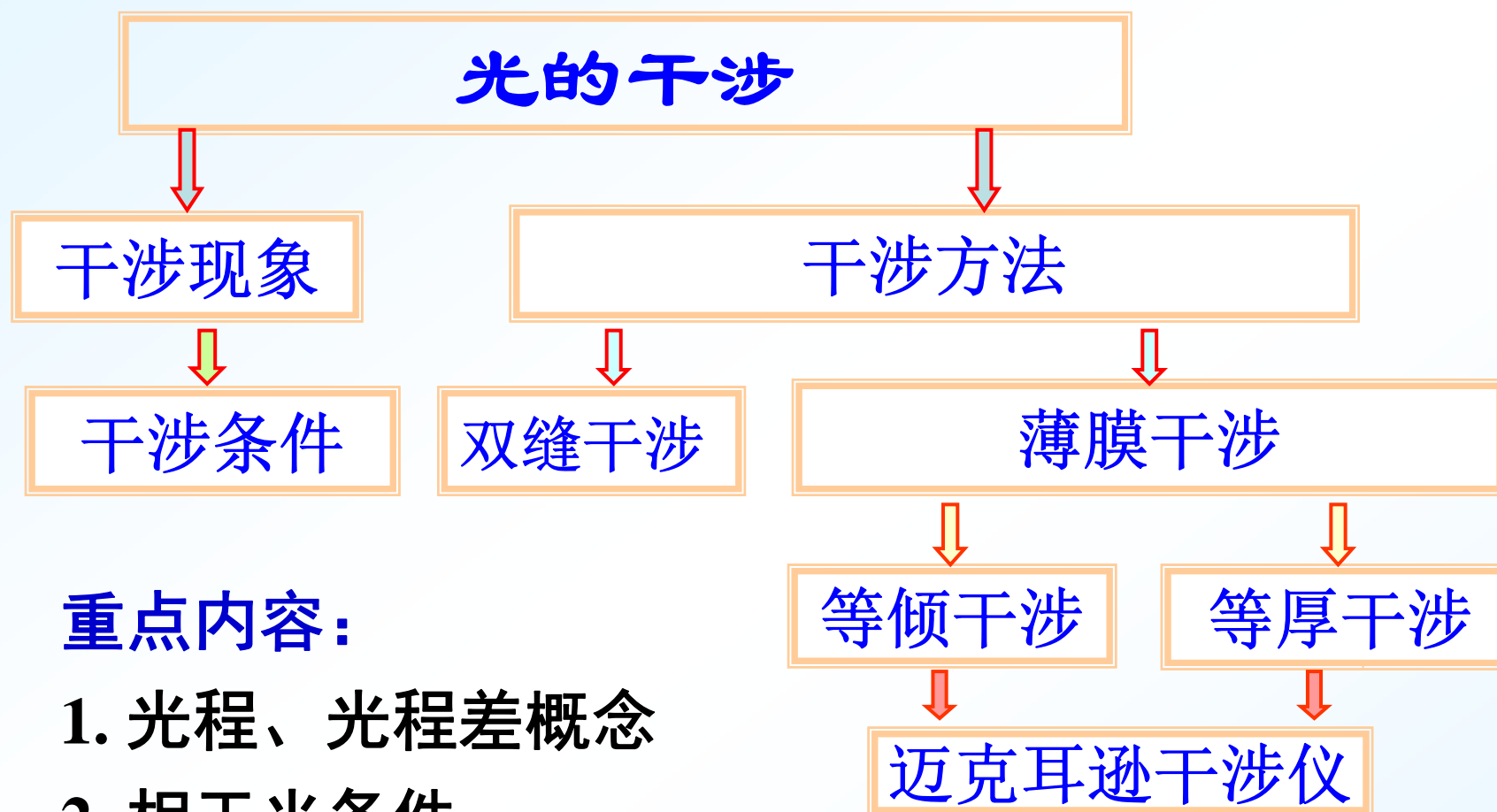
③ 薄透镜不引起附加光程
(物点与象点间各光线等光程)



植物和动物中的颜色结构

蓝鸲 (bluebird)、蝴蝶(butterflies) 和飞蛾 (moths)
飞动时呈现多彩的颜色----不是化学原因, 而是物理
原因(干涉的效果)!!





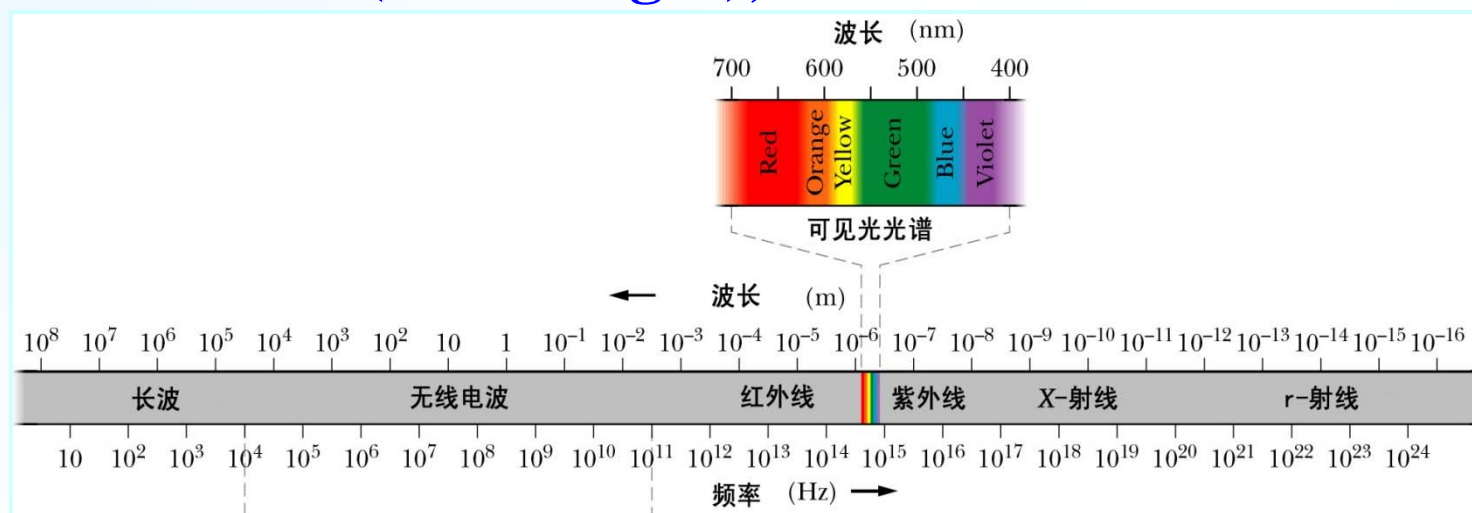
重点内容:

1. 光程、光程差概念
2. 相干光条件
3. 获得相干光的方法
4. 干涉加强、减弱条件

光的相干性

一、光波

1. 光: 可见光(visible light), 电磁波中的狭窄波段



波长 λ : 400nm ~ 700nm (390nm ~ 760nm)

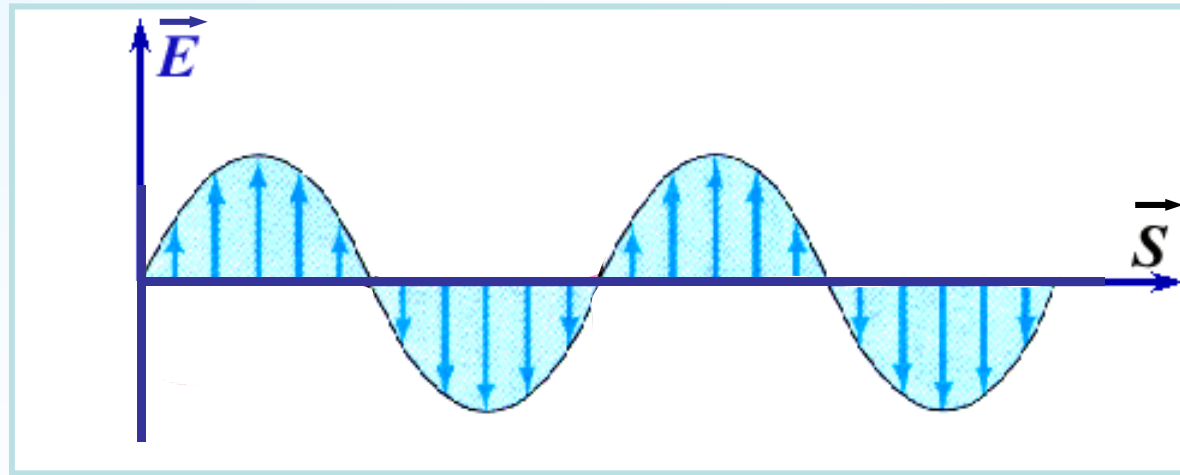
频率 ν : 7.69×10^{14} Hz ~ 3.95×10^{14} Hz

颜色: 紫 ~ 红

具有一定频率的光称为单色光

各种频率不同的光复合起来称为复合光

2. 光波：交变电磁场在空间传播



光矢量(light vector) \vec{E} : 引起视觉和感光作用

光振动 $\vec{E}(t)$: 大小、方向随 t 周期性变化

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

光强(intensity of light): $I \propto E_0^2$

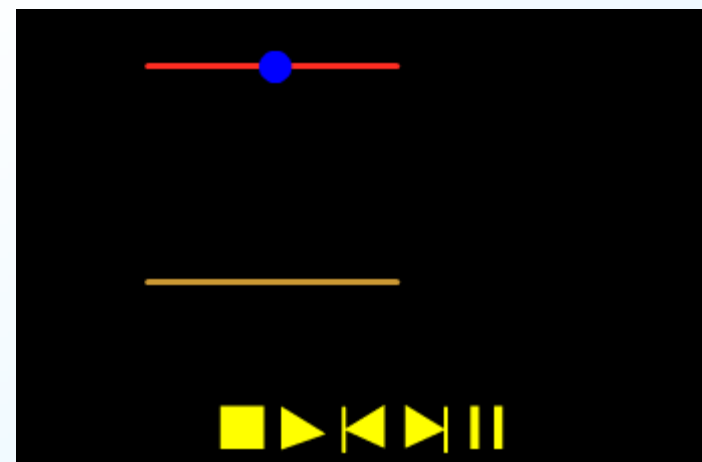
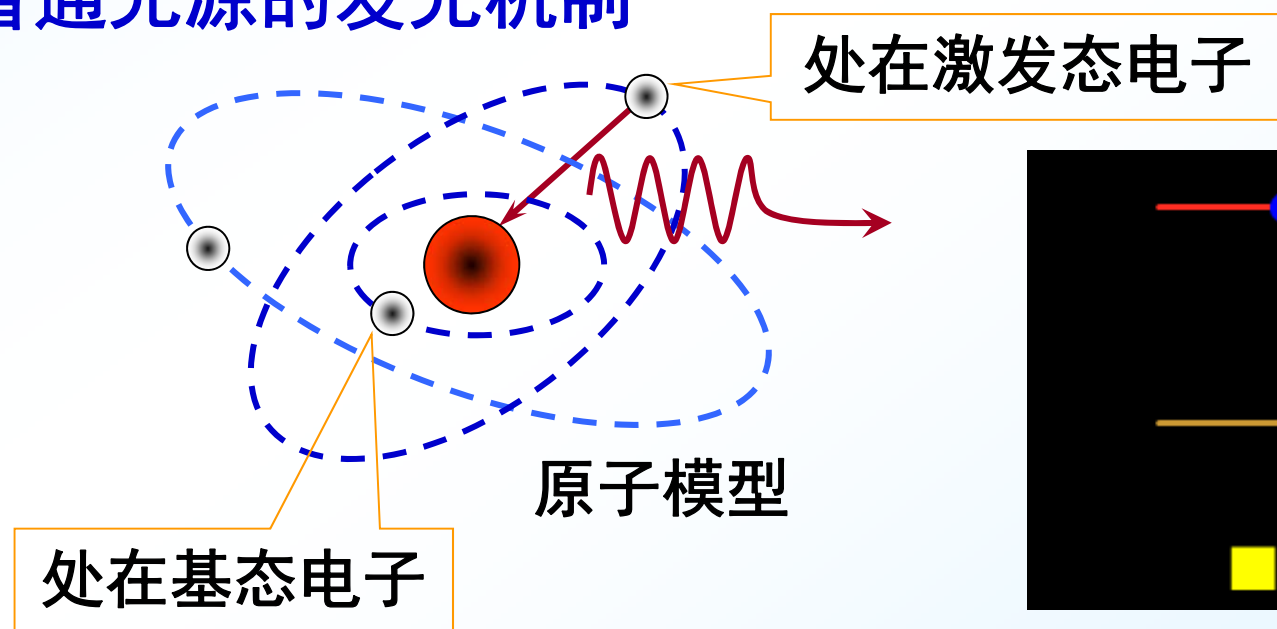
$$\text{相对光强: } I = E_0^2$$

二、光源(light source)----发光的物体

两大类光源：普通光源 激光光源(laser)



普通光源的发光机制



普通光源按光的激发分为以下几种：

热光源：利用热能激发的光源—
（白炽灯）

电致发光(electroluminescence):

由电能直接转换为光能

光致发光(LED)(photoluminescence):

由光激发引起的发光现象（日光灯）

化学发光(chemiluminescence):

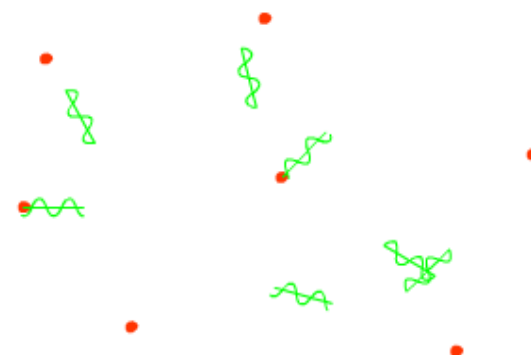
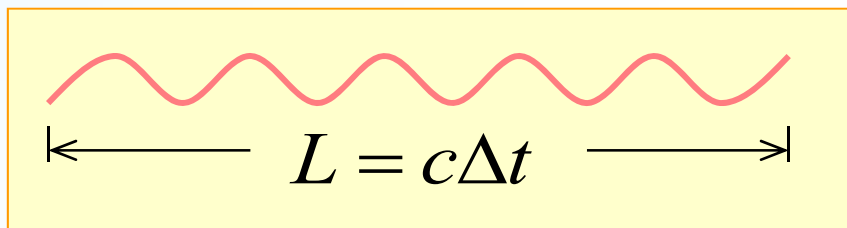
由化学反应引起的的发光现象
（萤火虫）



普通光源发光的两个特点

间歇性(intermittence)

各原子发光是间歇的, 平均发光时间 Δt 约为 $10^{-8} \sim 10^{-11}\text{s}$, 所发出的是一段长为 $L=c\Delta t$ 的光波列(light wave train)。



随机性(randomness)

每次发光是随机的, 所发出各波列的振动方向、频率和振动初相位都不相同.

- 两独立光源发出的光不可能产生干涉
- 来自同一光源两个部分的光也不可能产生干涉

三、光的干涉现象

1.干涉现象 满足相干条件的两列或两列以上的光波, 它们在空间的重叠区域内各点相遇时, 其光强重新分布.

2. 相干条件

频率相同

振动方向相同

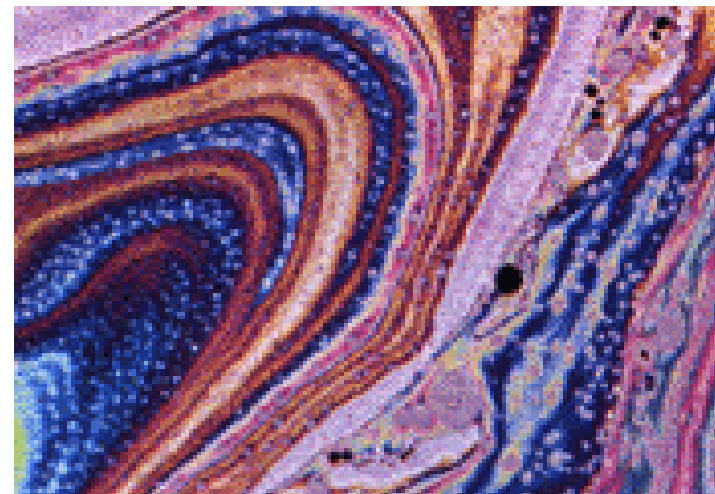
相遇点有恒定的相位差

相干光(coherent light):

能产生干涉现象的光

相干光源(coherent source):

能产生相干光的光源

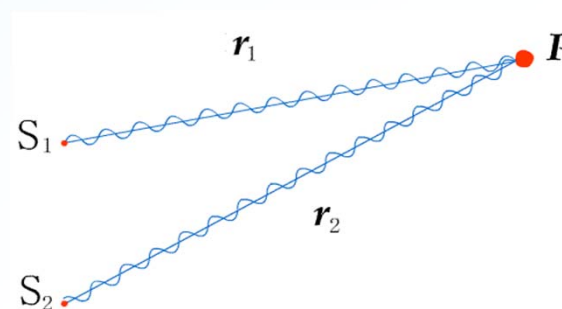


3. 干涉场中光强度的分布

$$S_1: E_1 = E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$S_2: E_2 = E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

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



合振幅:
$$E_0 = \sqrt{E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda})}$$

光强分布:
$$I = I_1 + I_2 + \underbrace{2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi}_{\text{干涉项}}$$

相位差:
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}$$

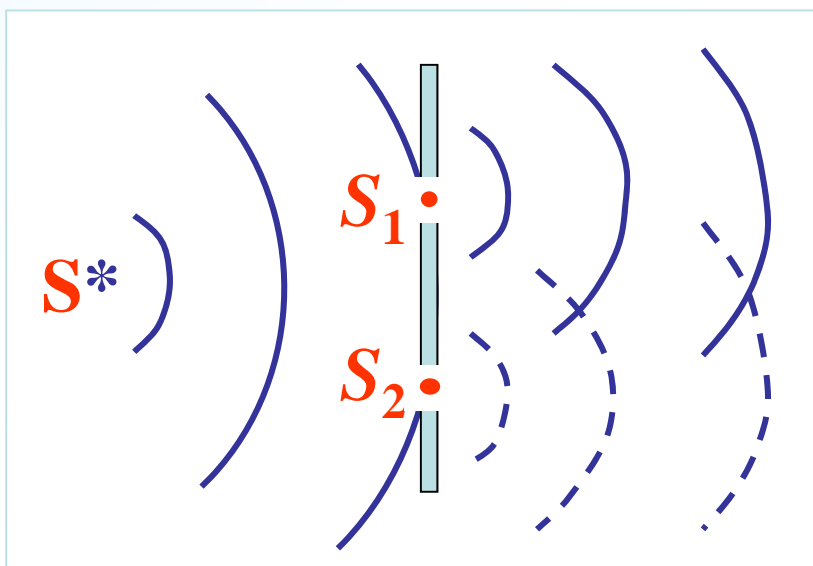
设 $\varphi_1 = \varphi_2$, 光程差 $\Delta = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda = \begin{cases} k\lambda & \text{光强极大} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{光强极小} \end{cases}$

光与机械波相干性比较：相干条件、强度分布同；
机械波波源与光波波源特征不同

4. 从普通光源获得相干光

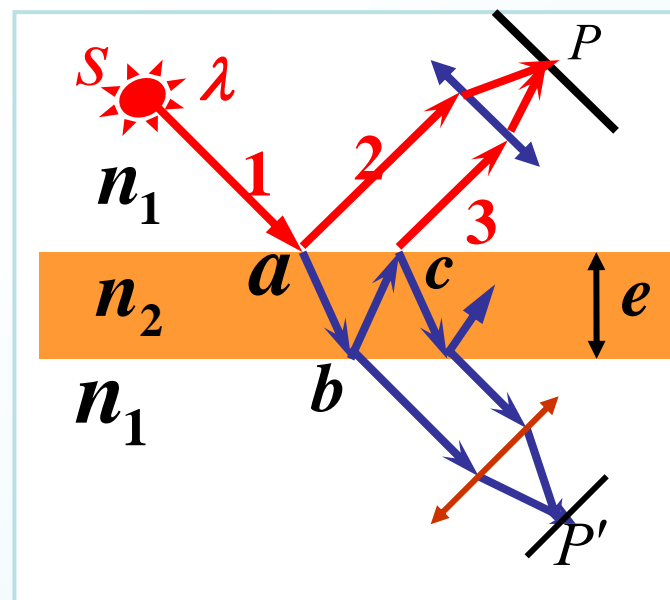
① 分波阵面法

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



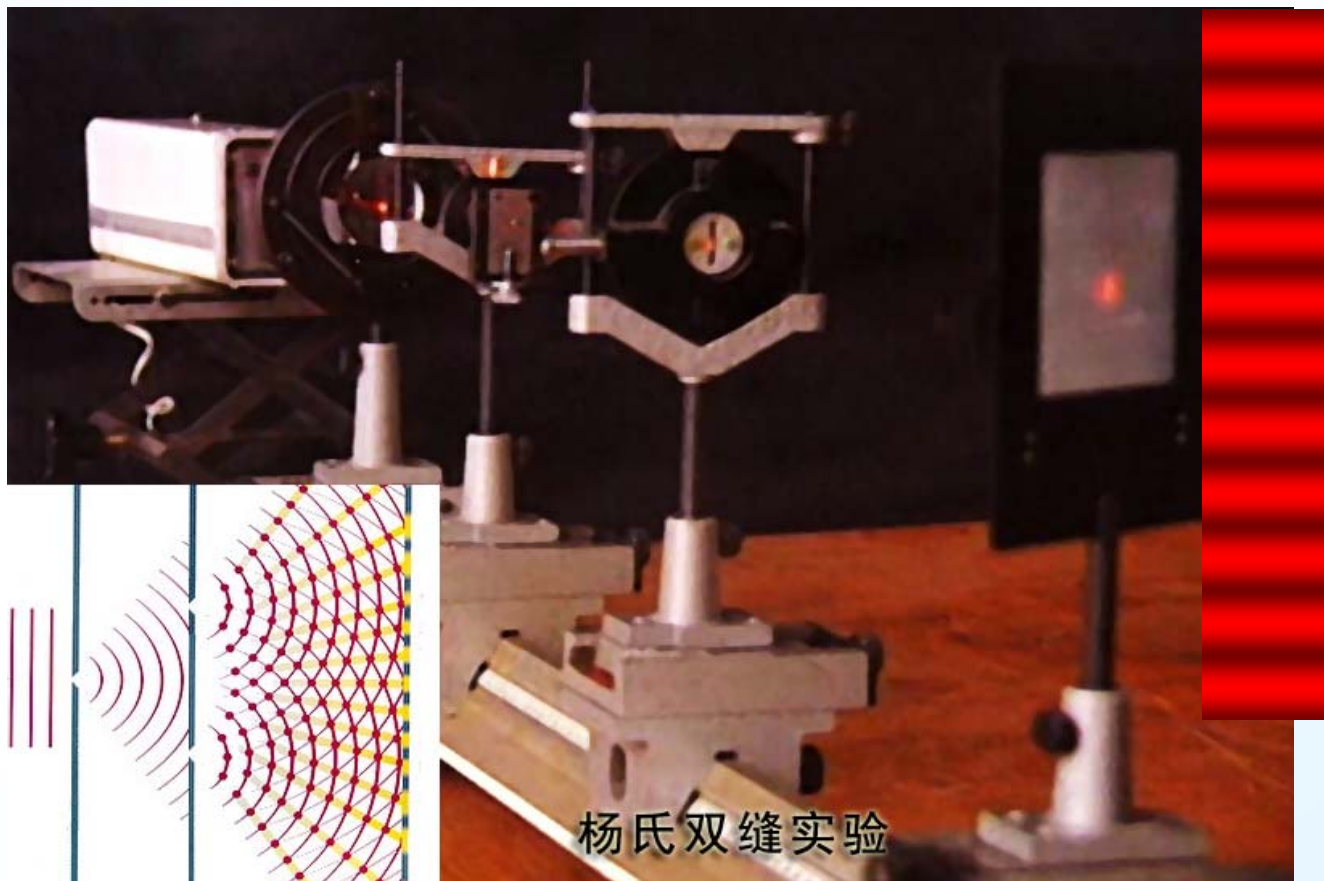
双缝干涉

一、杨氏双缝干涉



英国医生兼物理学家托马斯·杨(T.Young)于1801年首先成功地进行了光干涉实验,并看到了干涉条纹,使光的波动学说得到了证实.

实验装置 



物理学家评选的“十大经典物理实验”（2002年美国《物理世界》杂志）：

- 1、运用托马斯·杨双缝演示的电子干涉实验；
- 2、伽里略的自由落体实验；
- 3、密歇根的油滴实验；
- 4、牛顿的棱镜分解太阳光实验；
- 5、**托马斯·杨的光干涉实验**；
- 6、卡文迪许扭秤实验；
- 7、埃拉托塞尼测量地球周长实验；
- 8、伽里略的加速度实验；
- 9、卢瑟福发现原子核实验；
- 10、傅科单摆实验。

<http://baike.baidu.com>

1. 干涉条纹分析

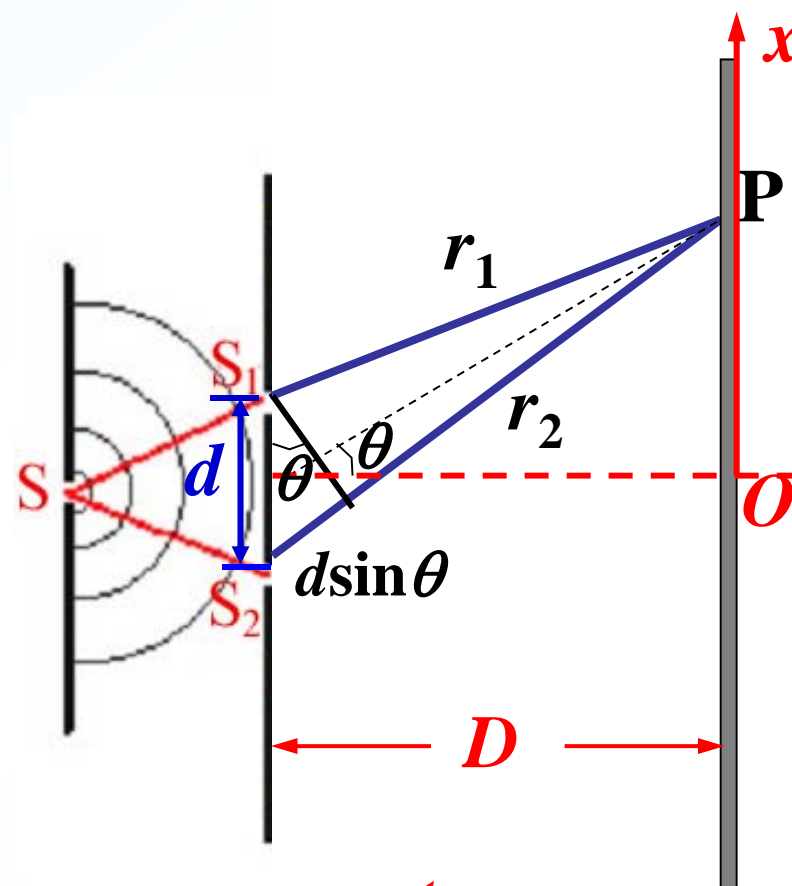
光源 $S \rightarrow S_1, S_2$ 光源发光干涉

2. 明暗纹条件

由于两列波由同一光束分解出来, 因此 $\varphi_1 = \varphi_2$. 光程差为

$$\Delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

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

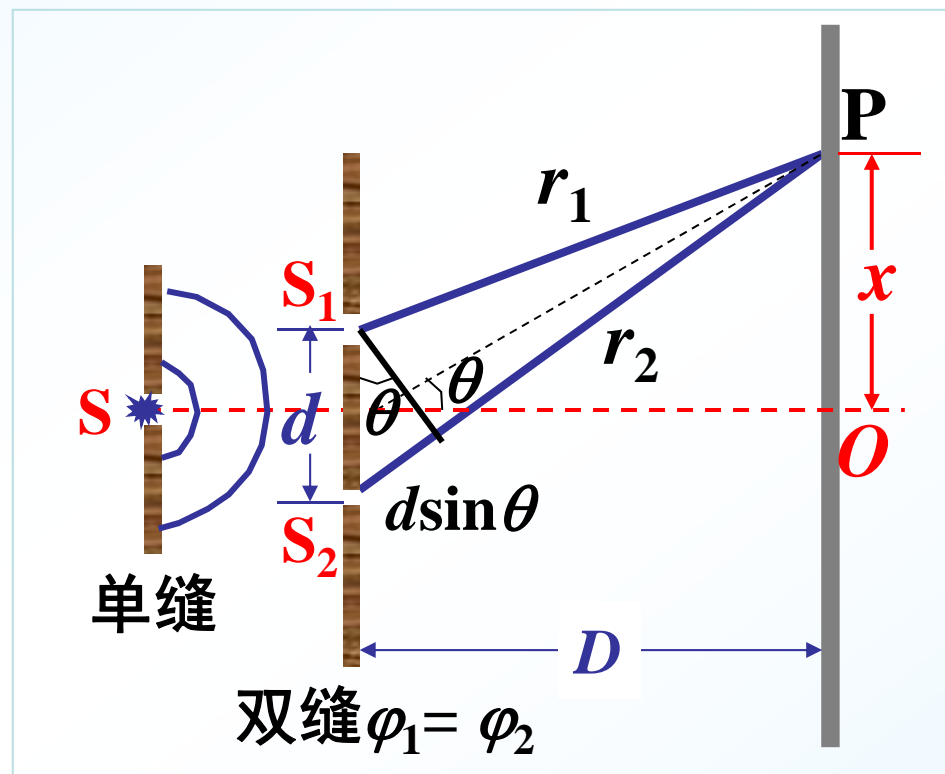


如何确定光程 r_1 和 r_2 ?

$\because D \gg d, \theta$ 角很小

$$\therefore \sin \theta \approx \tan \theta = \frac{x}{D}$$

$$\Delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \approx d \frac{x}{D}$$



$$x = \left\{ \begin{array}{l} \pm \frac{kD}{d} \lambda \end{array} \right.$$

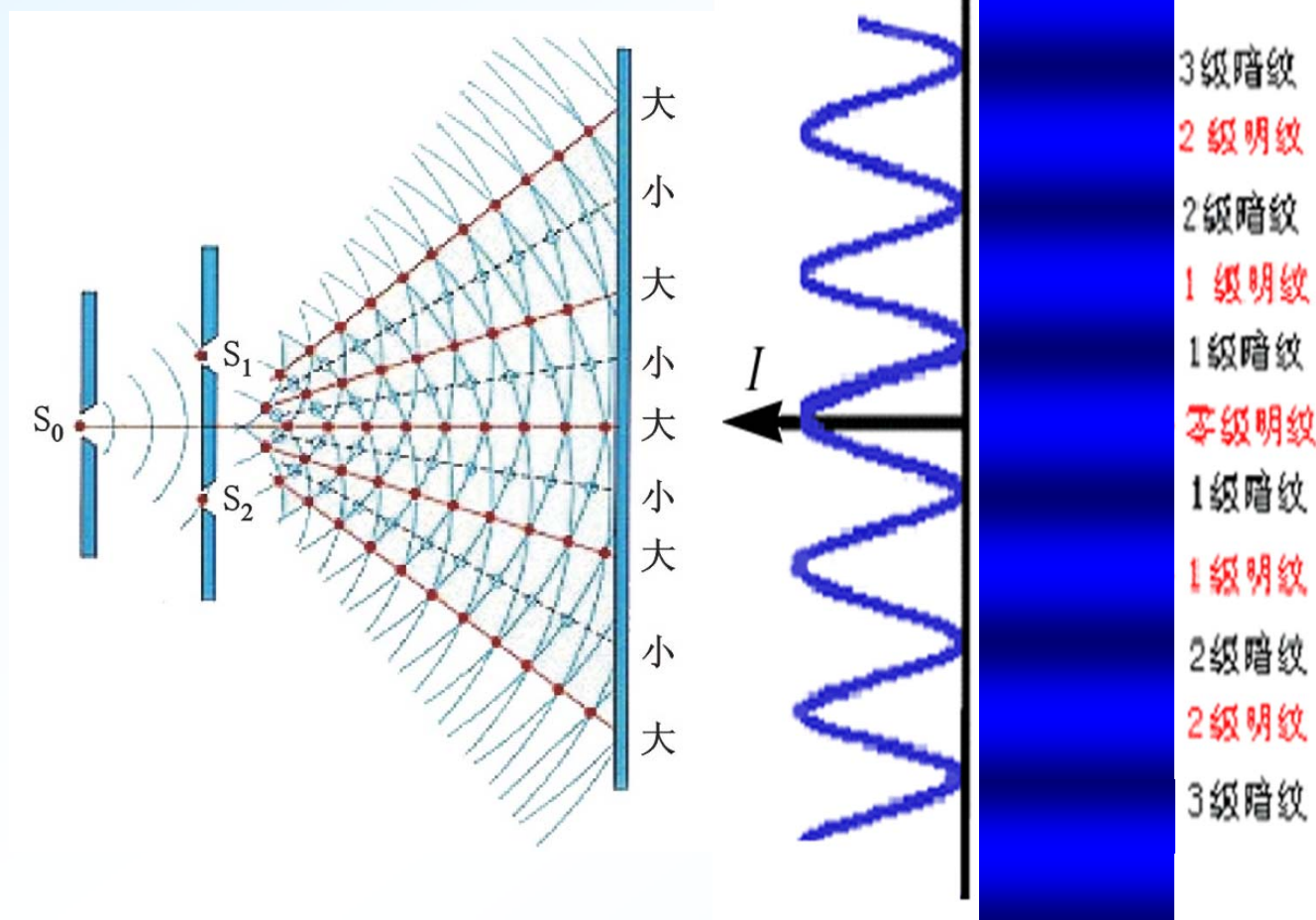
明 $k = 0, 1, 2, \dots$

$$\left\{ \begin{array}{l} \pm (2k-1) \frac{D}{d} \cdot \frac{\lambda}{2} \end{array} \right.$$

暗 $k = 1, 2, \dots$

k 取值与条纹级次一致

3. 条纹特点



条纹亮度: $I_{\max} = 4I_1$ $I_{\min} = 0$ 条纹宽度: $\Delta x = \frac{D}{d} \lambda$

形态: 平行于缝的等亮度、等间距、明暗相间条纹

4. 关于条纹的讨论

(1) 影响条纹宽度的因素

λ 一定: $\Delta x \propto D$

$\Delta x \propto \frac{1}{d}$ 双缝间距越
小,条纹越宽

d 、 D 一定: $\Delta x \propto \lambda$

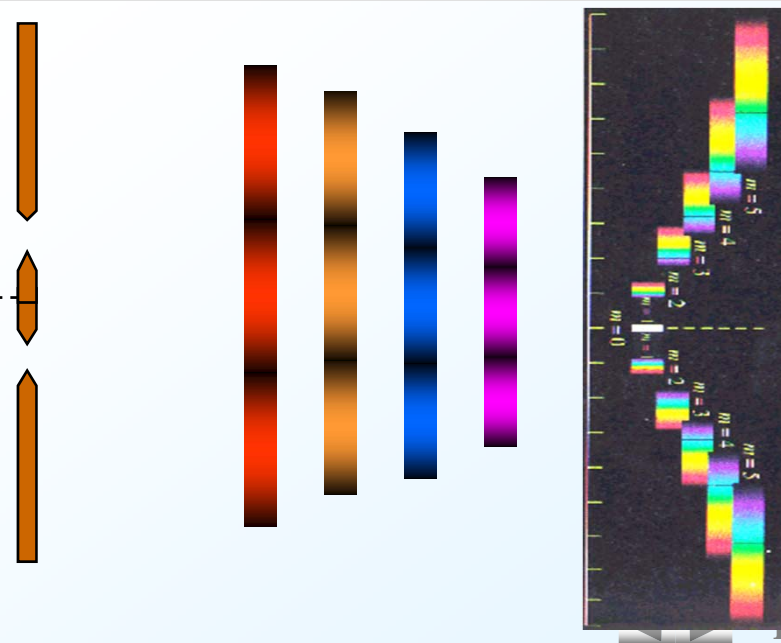
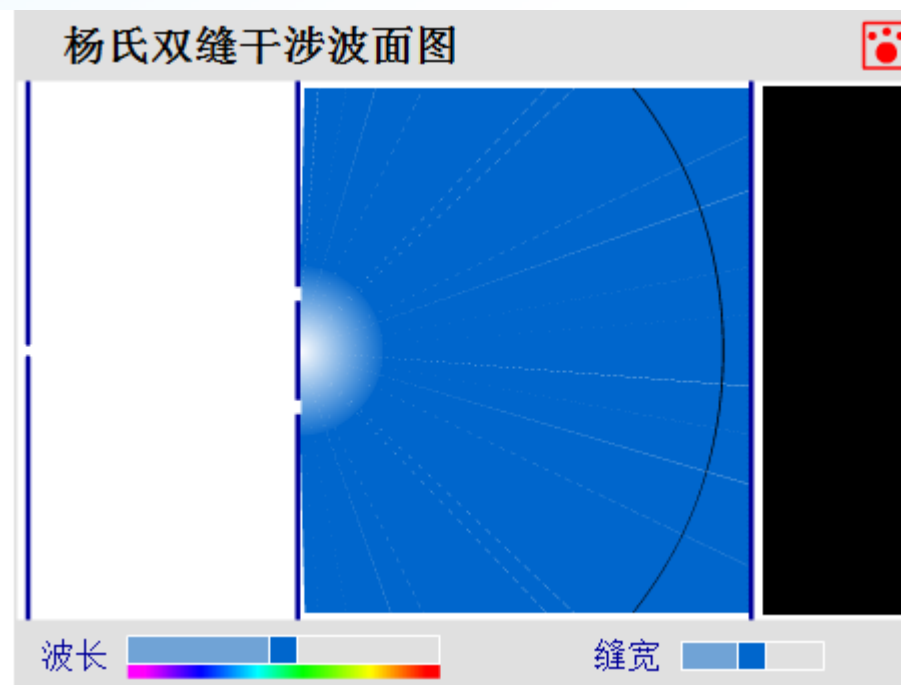
$\Delta x_{\text{红}} > \Delta x_{\text{紫}}$

白光照射双缝:

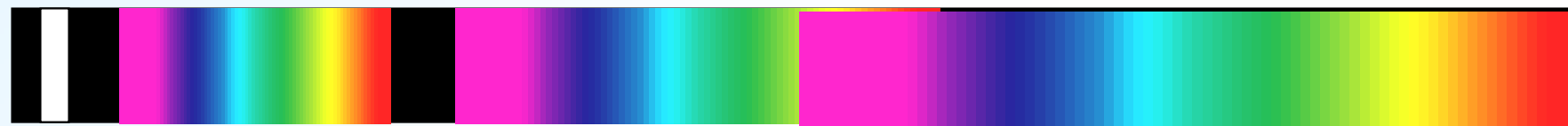
零级明纹: 白色

其余明纹: 彩色光谱 S^*

高级次重叠



例13-6 用白光(λ : 400~760nm)光源进行双缝干涉实验, 求清晰可辨光谱的级次.



零级 一级

二级

三级

最先重叠: 某级红光和高一级紫光 Δ 相同

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

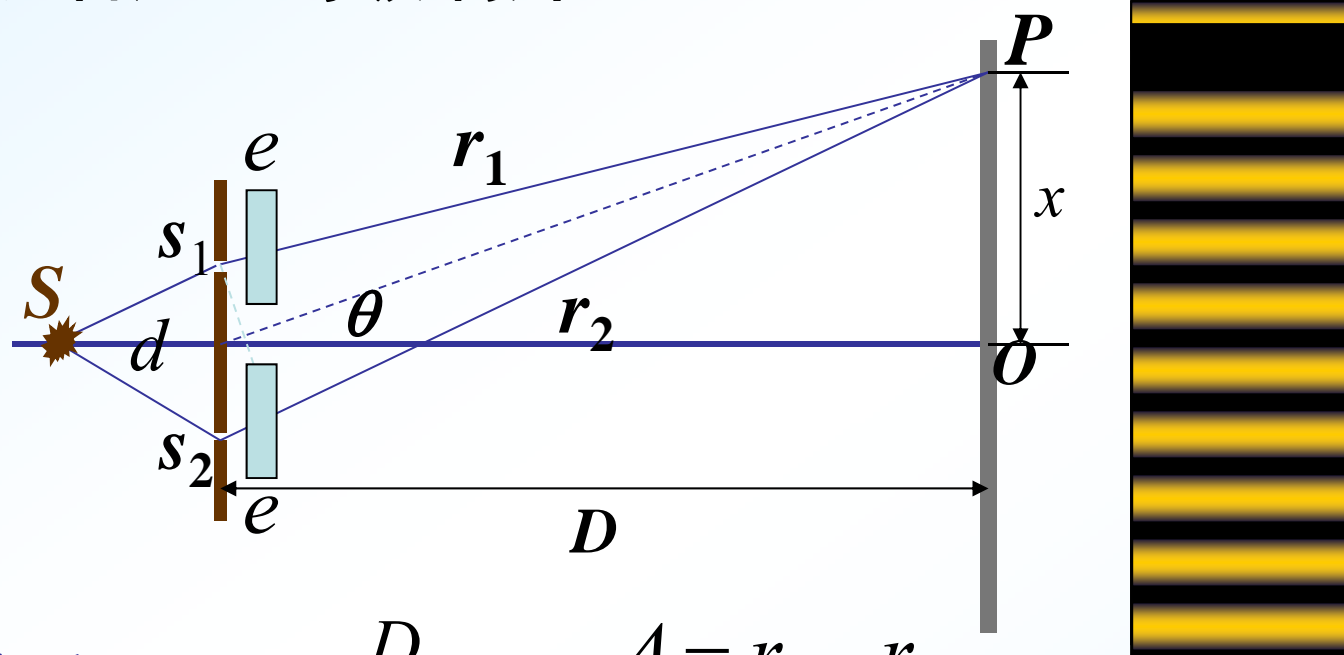
$$k = \frac{\lambda_{\text{紫}}}{\lambda_{\text{红}} - \lambda_{\text{紫}}} = \frac{4000}{7600 - 4000} \approx 1.1 \quad \text{只有一级清晰光谱}$$

例: 人眼对钠光($\lambda = 589.3\text{nm}$)最敏感, 能够分辨到 $\Delta x = 0.065\text{mm}$ (极限), 若屏幕距双缝的距离为 $D = 800\text{mm}$, 则两缝的间距必须为

$$d \leq \frac{D\lambda}{\Delta x} = 7.25(\text{mm})$$

4. 关于条纹的讨论

(2) 在缝后加一薄玻璃片



条纹宽度: $\Delta x = \frac{D}{d} \lambda$ $\Delta = r_2 - r_1$

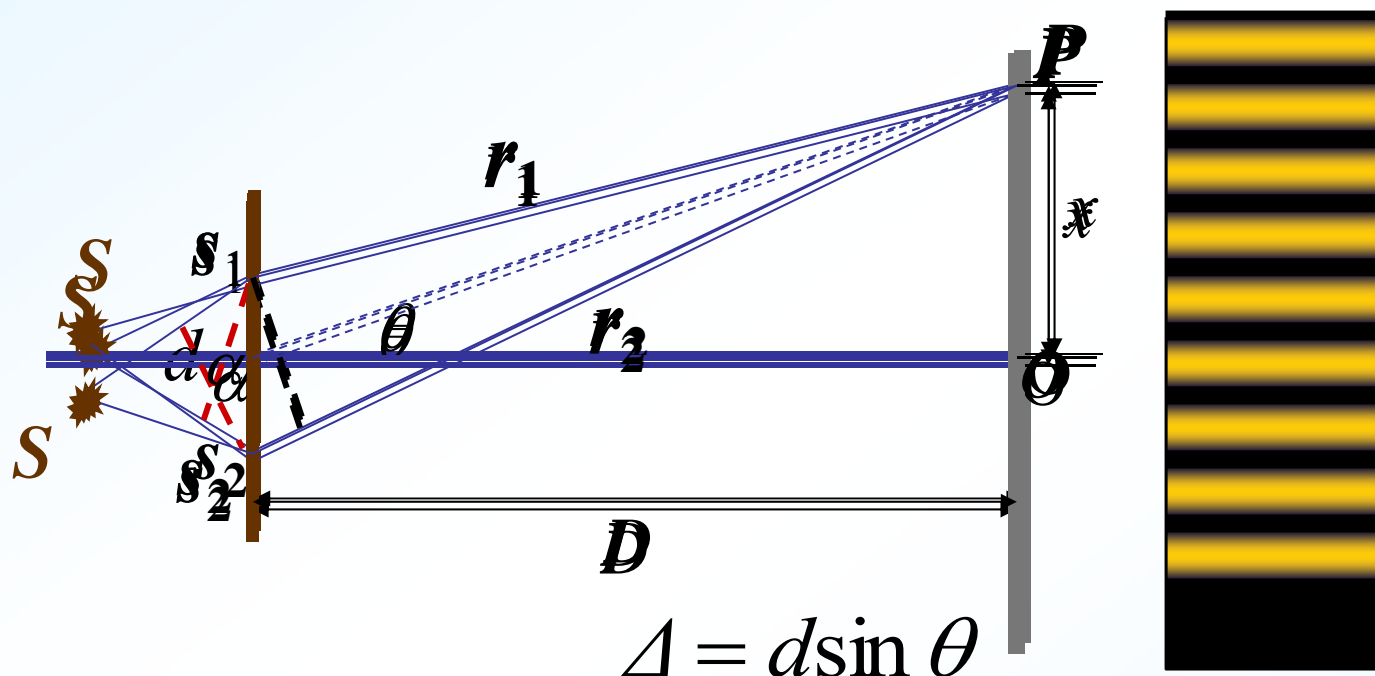
盖上缝时, $\Delta' = r_2 - (r_1 - e + ne)$ 条纹上移动

盖下缝时, $\Delta' = (r_2 - e + ne) - r_1$ 条纹下移动

宽度不变

4. 关于条纹的讨论

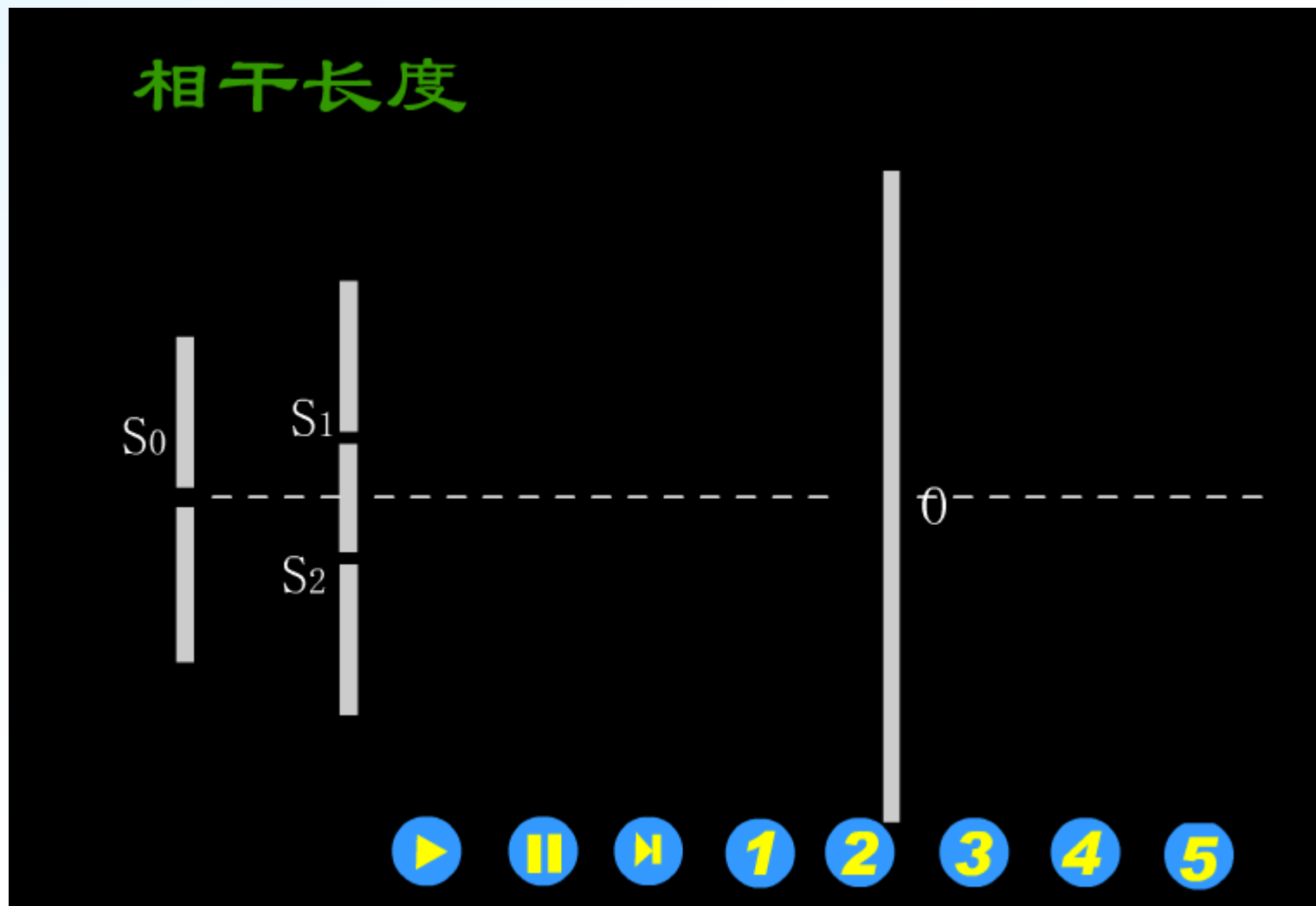
(3) 光源上下移动 条纹宽度: $\Delta x = \frac{D}{d} \lambda$



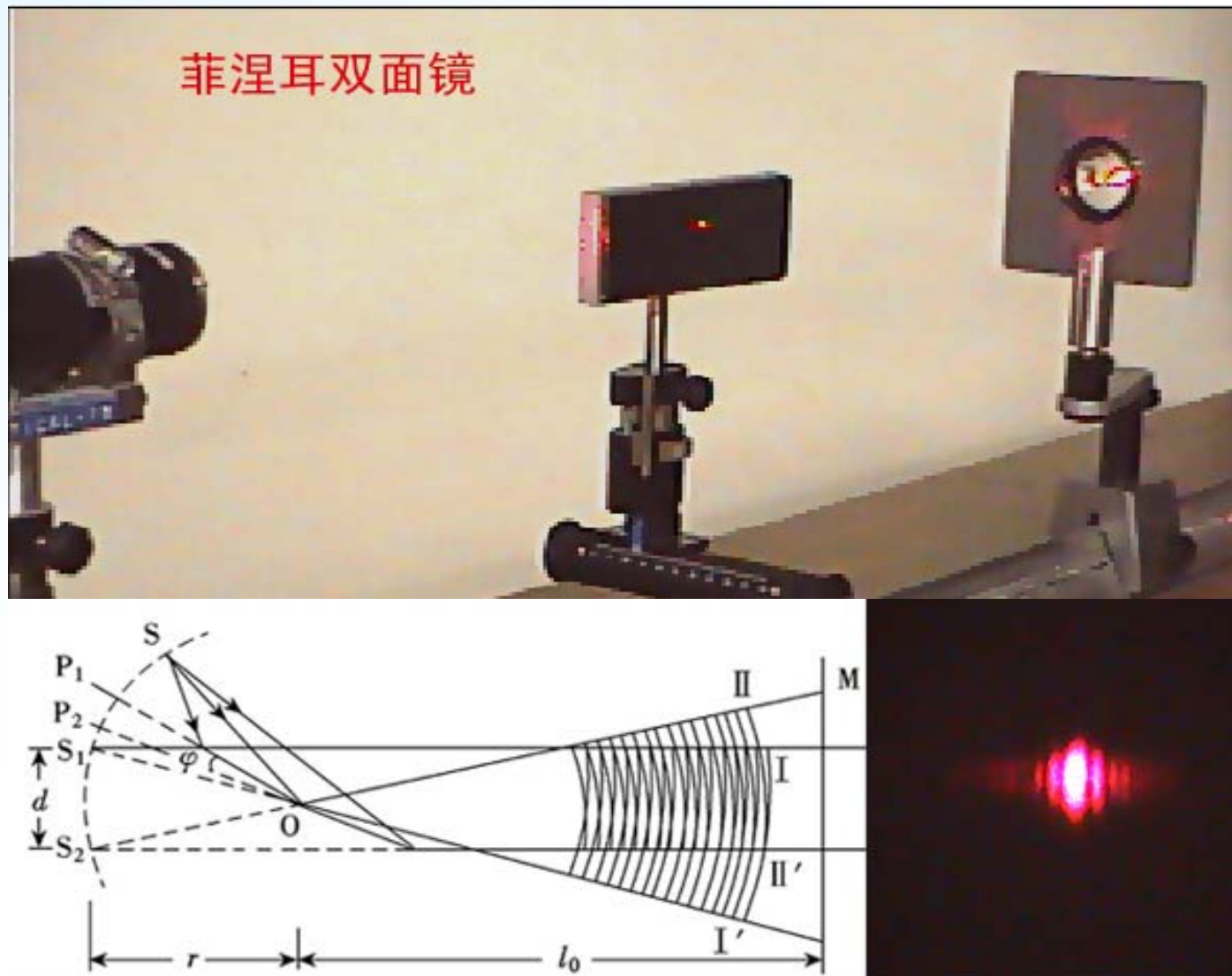
光源上移时, $\Delta = d \sin \alpha + d \sin \theta$ 条纹下移动 宽度不变

光源下移时, $\Delta = d \sin \alpha - d \sin \theta$ 条纹上移动 条纹移动

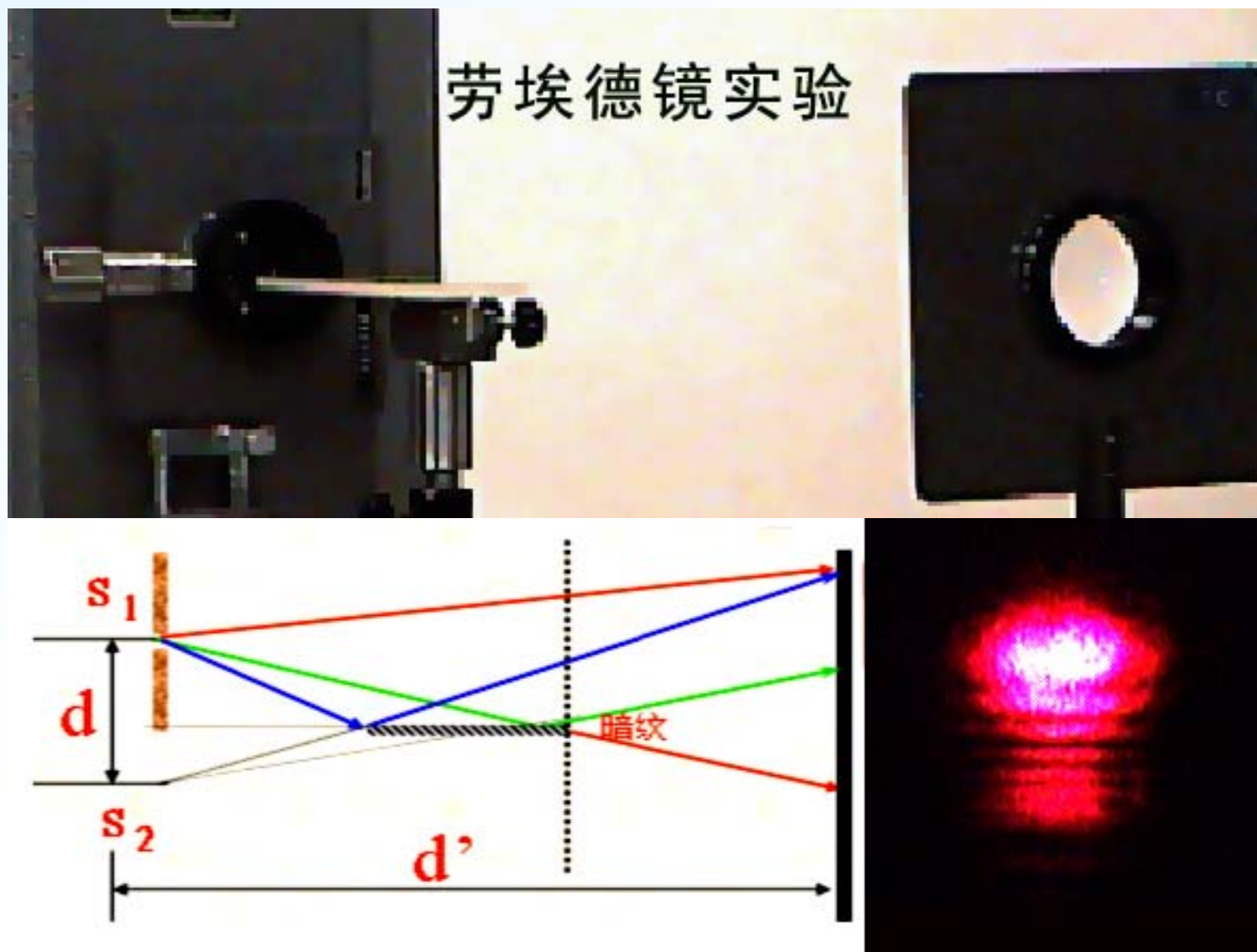
相干长度

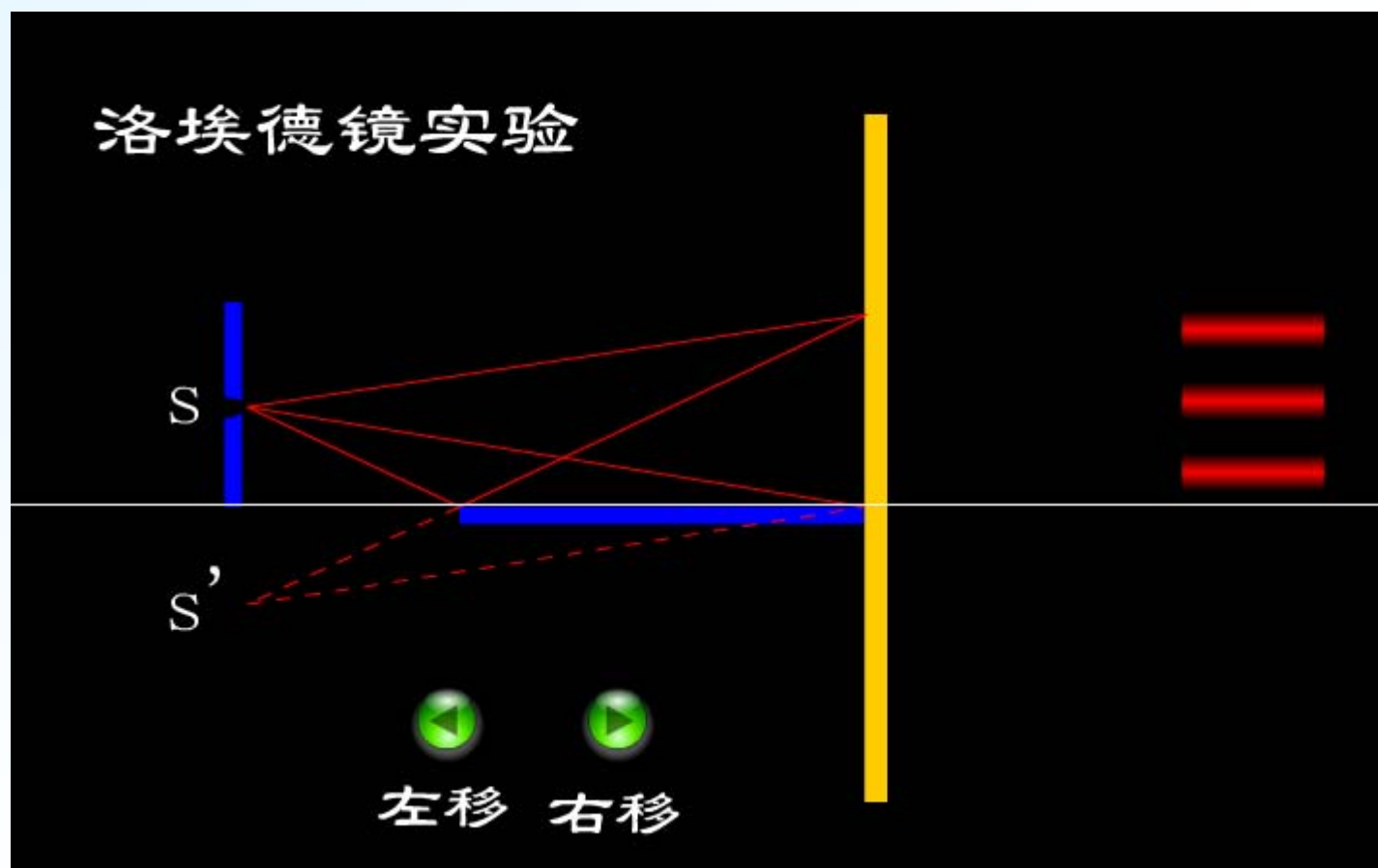


二、菲涅耳双面镜



三、劳埃德镜





注: (1) 干涉条纹只存在于镜上方

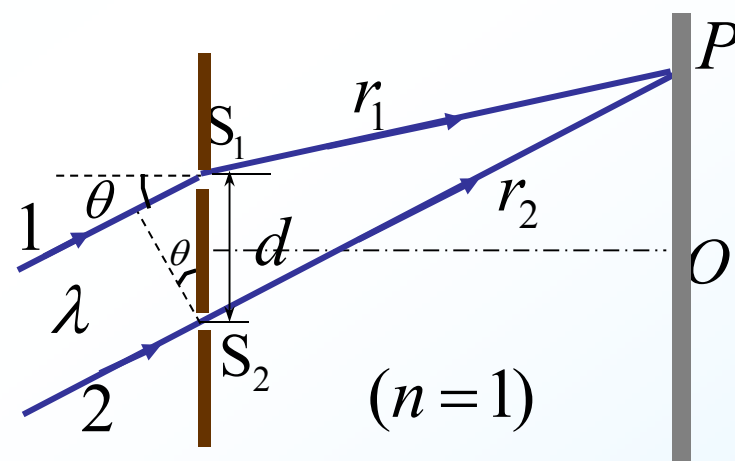
(2) 当屏移到镜边缘时, 屏于镜接触点出现暗条纹——光在镜子表面反射时有相位突变 π .

例1. 如图所示, 两缝 S_1 和 S_2 之间的距离为 d , 介质的折射率为 $n=1$. 现有一束平行单色光斜入射到双缝上, 入射角为 θ , 求屏幕上 P 点处两相干光的光程差.

解: 由 S_2 向光线边缘1引垂线
光程差发生在此垂线之后

光程1: $d \sin \theta + r_1$

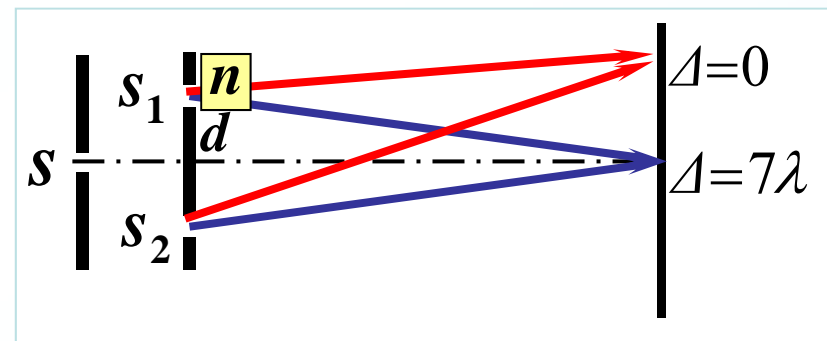
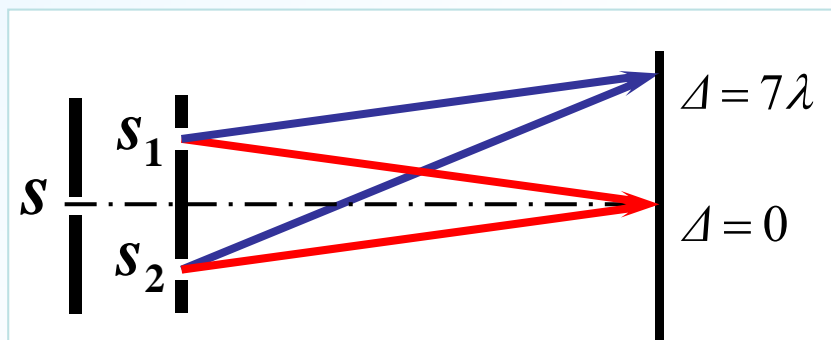
光程2: r_2



$$\begin{aligned}\Delta &= (d \sin \theta + r_1) - r_2 \\ &= d \sin \theta + (r_1 - r_2)\end{aligned}$$

例2. 用薄云母片($n=1.58$)覆盖在杨氏双缝的其中一条缝上, 这时屏上的零级明纹移到原来的第七级明纹处. 如果入射光波长为 550nm , 问云母片的厚度为多少?

解: 原第七级明纹处 $r_2 - r_1 = 7\lambda$



插入云母后, **条纹上移**原第七级明纹处为零级明纹

$$r_2 - (r_1 - d + nd) = 0 \quad (n - 1)d = 7\lambda$$

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

例3. 无线电发射台的工作频率为1500kHz, 两根相同的垂直偶极天线相距400m, 并以相同的相位作电振动. 试问: 在距离远大于400m的地方, 什么方向可以接受到比较强的无线电信号?

解:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 200 \text{ m}$$

明条纹 $\Delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta = \pm k \lambda$

$$\sin \theta = \pm \frac{k \lambda}{d} = \frac{\pm k \cdot 200}{400} = \pm \frac{k}{2}$$

取 $k = 0, 1, 2$, 得 $\theta = 0, \pm 30^\circ, \pm 90^\circ$

