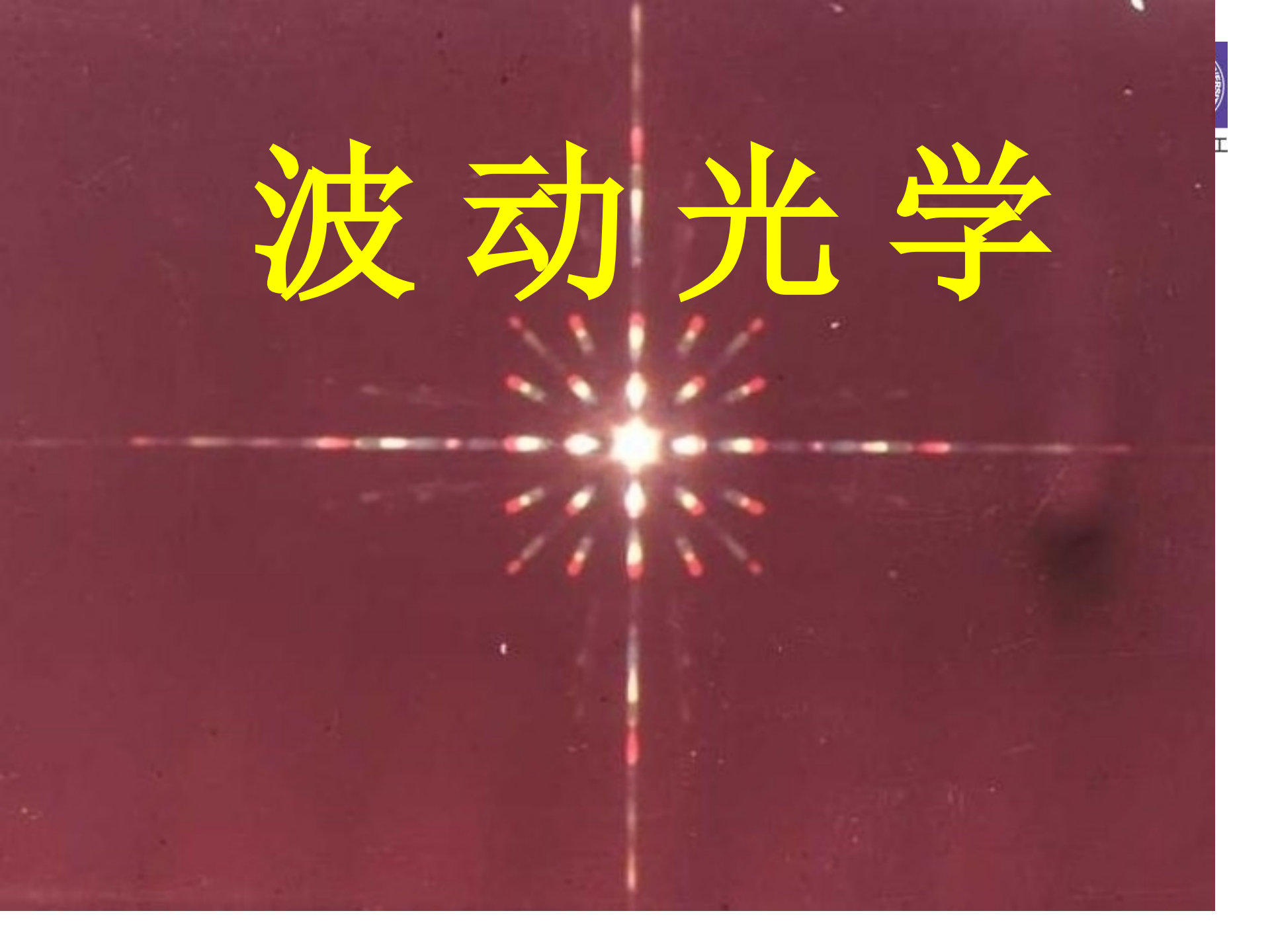


# 波动光学



光学是研究光的传播以及它和物质相互作用问题的学科。



光学一般分为下列三个部分：

- **几何光学：**以光的直线传播规律为基础，主要研究多种成象光学仪器的理论。
- **波动光学：**研究光的电磁性质和传播规律，尤其是干涉、衍射、偏振的理论和应用。
- **量子光学：**以光的量子理论为基础，研究光与物质相互作用的规律。

20世纪60年代激光问世后，光学有了飞速的发展，形成了**非线性光学**等当代光学。



第三章  
光的干涉  
(Interference of light)



# 本章目录

§3.1 光源的相干性

§3.2 双缝干涉及其他分波面干涉试验

§3.3 时间相干性

§3.4 空间相干性

§3.5 光程

§3.6 薄膜干涉（一）——等厚条纹

§3.7 薄膜干涉（二）——等倾条纹

§3.8 迈克耳孙干涉仪



## §3.1 光源的相干性

### 光的干涉现象

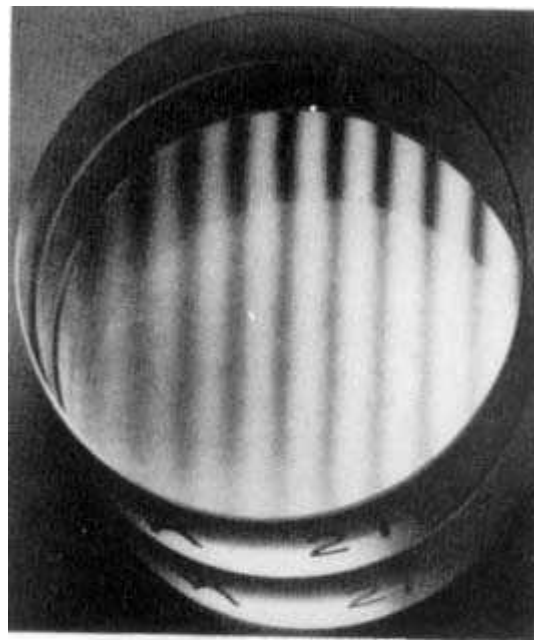
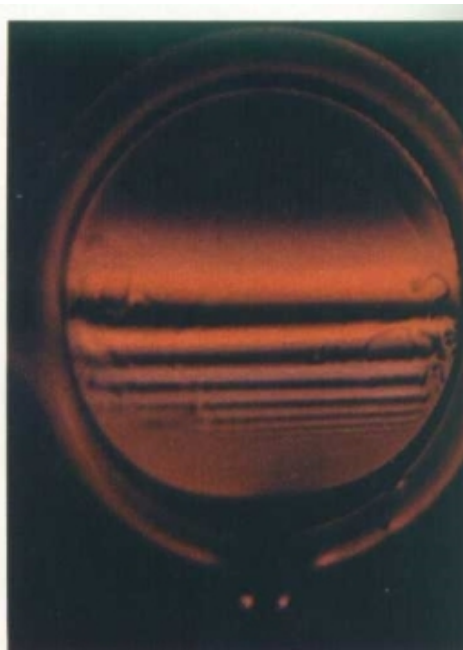
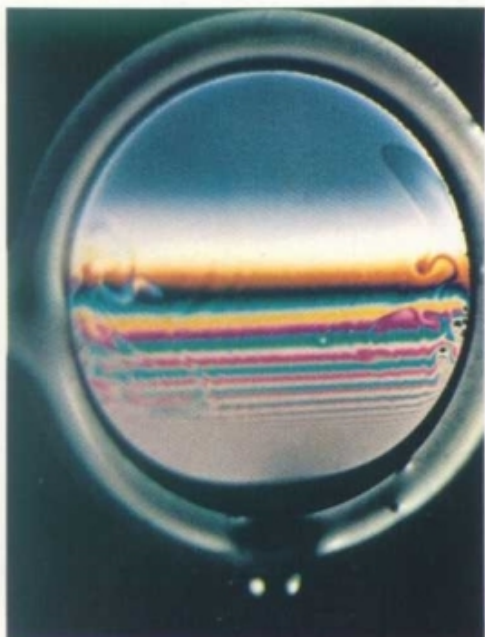
“当两列(或几列)满足**一定条件**的光波在某区域同步传播时,空间某些点的光振动 **一直加强**; 某些点的光振动 **一直减弱**, 在空间形成一幅稳定的光强分布图样”, 称为**光的干涉现象**。

**要产生干涉现象, 两波必须满足相干条件:**

- (1) 振动方向相同
- (2) 频率相同
- (3) 有恒定的位相差

要产生干涉现象, 在波的叠加区中任一定点都应满足相干条件。

# 光的干涉现象



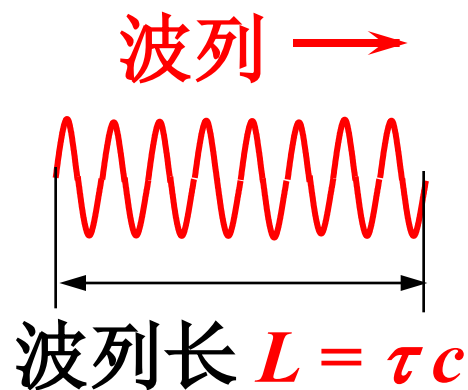
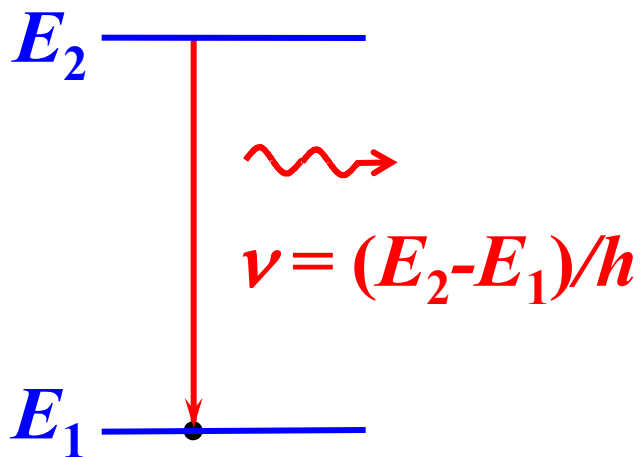
清华理工



# 一. 光源 (light source)

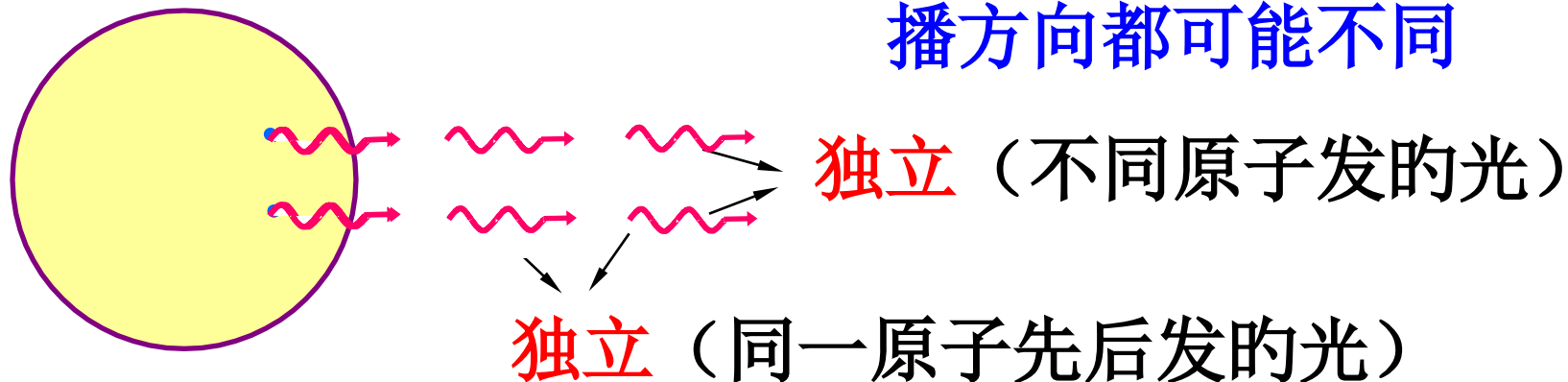
光源的最基本发光单元是分子、原子。

能级跃迁辐射

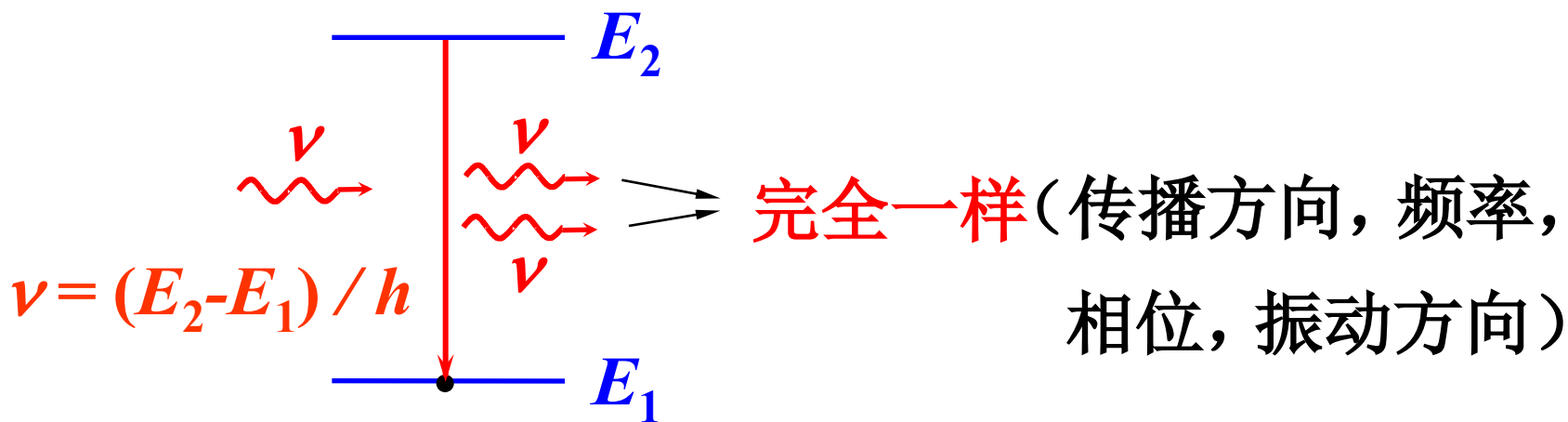


发光频率、振动方向、初位相以及传播方向都可能不同

# 1. 一般光源：自发辐射



# 2. 激光光源：受激辐射



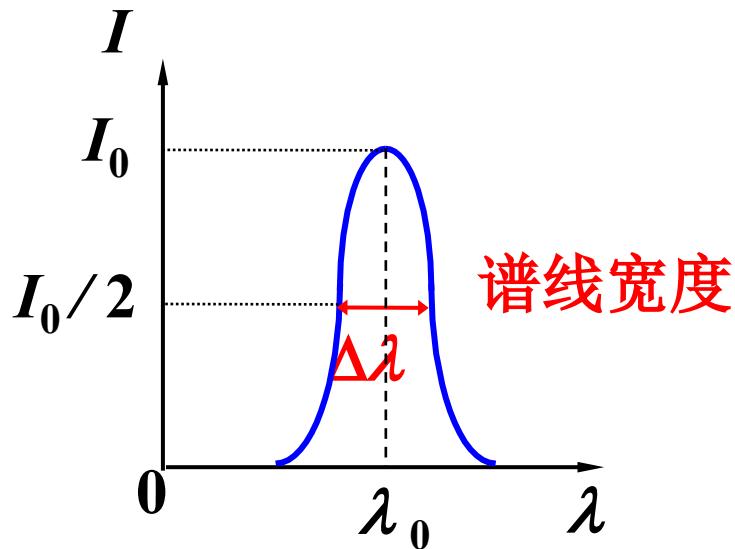


### 三. 光的单色性



**理想的单色光:** 具有恒定单一频率的简谐光波, 它是无限伸展的。

**实际原子的发光:** 是一种有限长的波列, 所以不是严格的余弦函数, 只能说是准单色光: 在某个中心频率 (波长) 附近有一定频率 (波长) 范围的光



衡量单色性好坏的物理量是谱线宽度  $\Delta\lambda$

例: 一般单色光

$$\Delta\lambda : 10^{-2} \rightarrow 10^0 \text{ \AA}^\circ$$

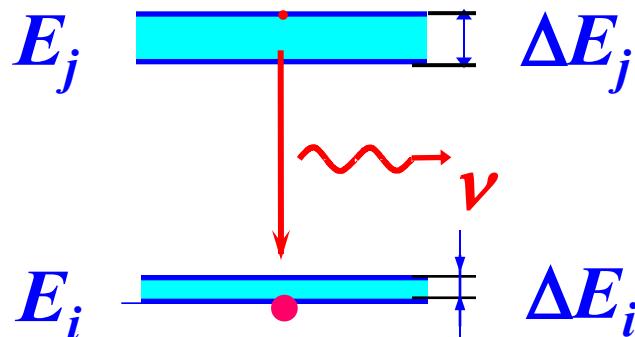
激光  $\Delta\lambda : 10^{-8} \rightarrow 10^{-5} \text{ \AA}^\circ$

## 造成谱线宽度的主要原因：

(1) 自然增宽：由能级自然宽度形成。

原子处于各激发态有一定的寿命  $\tau$ ，

存在不拟定关系：



$$\Delta E \cdot \tau \approx h$$

$$\Delta \nu = \frac{\Delta E_i + \Delta E_j}{h}$$

(2) 多普勒增宽：分子、原子的热运动引起。

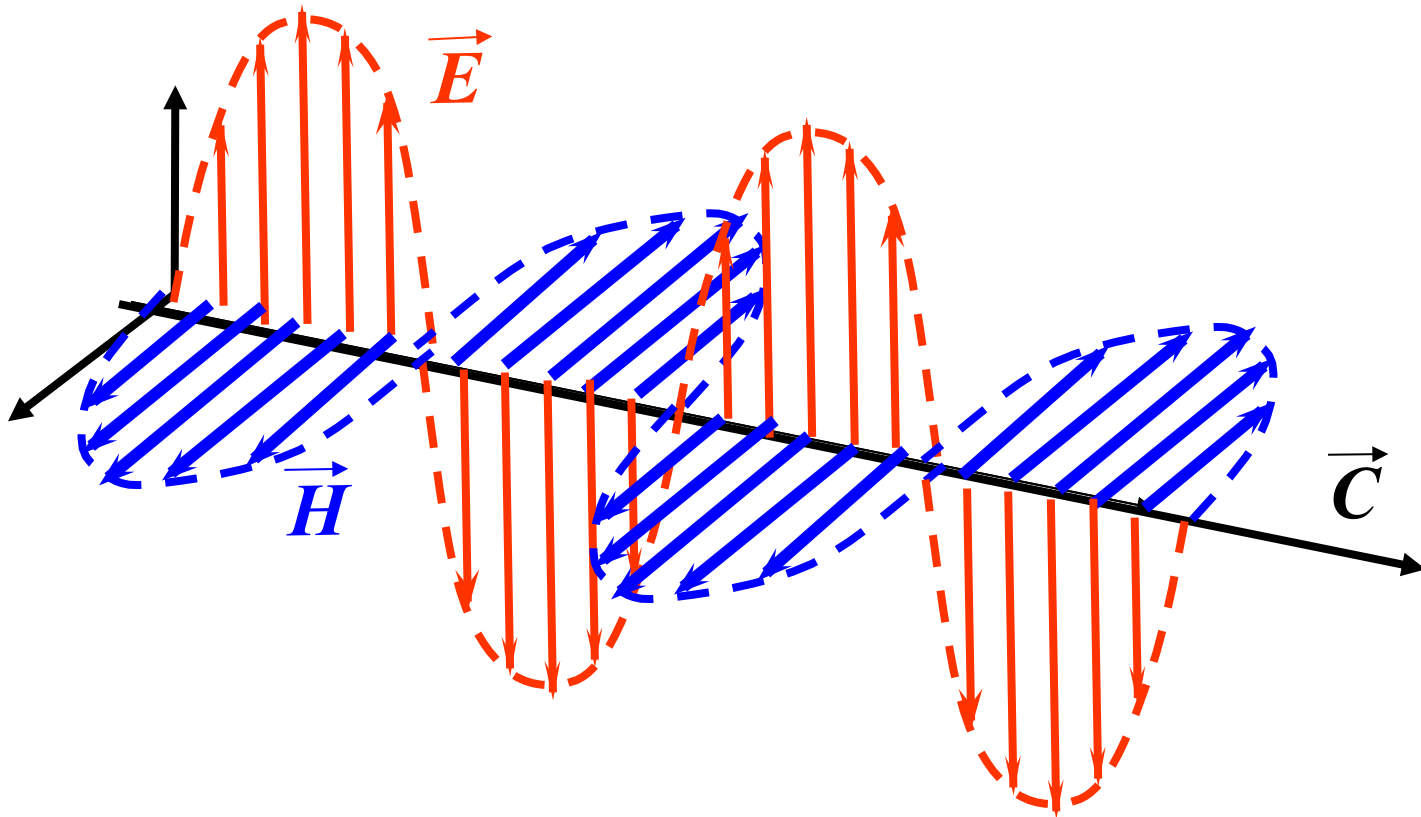
(3) 碰撞增宽：碰撞也可增长原子能级宽度。

因为谱线频率的展宽，使单色性更差，一般波列的长度只有几厘米或几毫米。



# 光波是电磁波

(只讨论电振动,  $\vec{E}$  ……称为光矢量)



### 三. 光的相干性

#### 1. 两列光波的叠加 (只讨论电振动)

$\vec{r}$  光午量 今  $\vec{r} \parallel \vec{r}$  ,  $\omega = \omega = \omega$

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

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

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

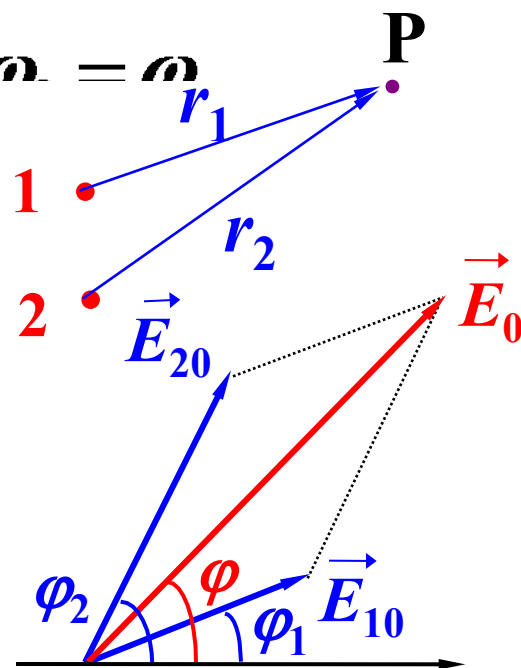
$$E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20} \cos \Delta\varphi$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

$$I \propto E_0^2, \text{ 又 } I_1 \propto E_{10}^2, I_2 \propto E_{20}^2$$

$$\therefore \text{光强 } I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos \Delta\varphi$$

干涉项



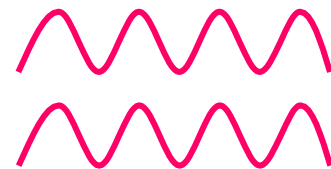
非相干光源:  $\overline{\cos \Delta\varphi} = 0$

$$I = I_1 + I_2 \text{ — 非相干叠加}$$

完全相干光源:  $\overline{\cos \Delta\varphi} = \cos \Delta\varphi$

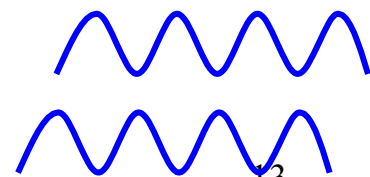
▲ 相长干涉 (明)  $\Delta\varphi = \pm 2k\pi, (k = 0, 1, 2, \dots)$

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



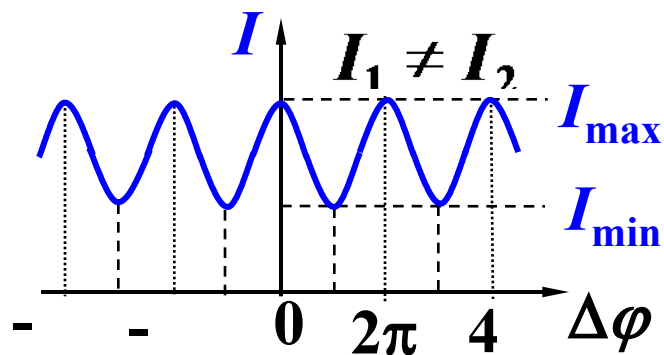
▲ 相消干涉 (暗)  $\Delta\varphi = \pm(2k + 1)\pi, (k = 0, 1, 2, \dots)$

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

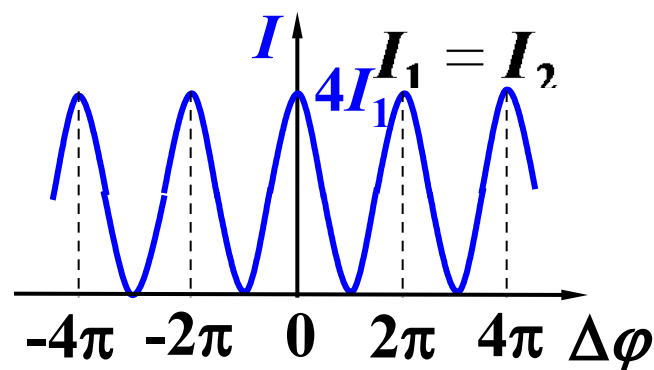


## 2. 条纹衬比度 (对比度, 反衬度) (contrast)

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



衬比度差 ( $V < 1$ )



衬比度好 ( $V = 1$ )

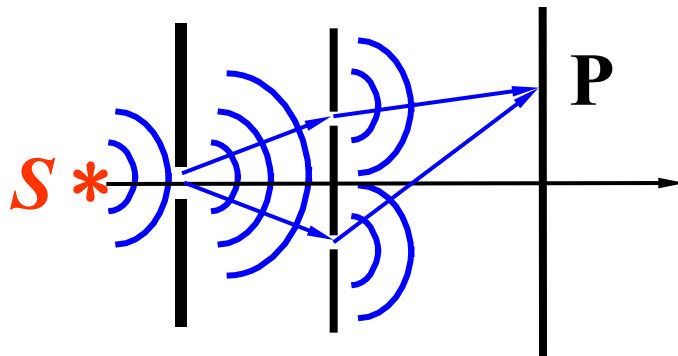
### ▲ 决定衬比度的原因:

振幅比, 光源的单色性, 光源的宽度

干涉条纹可反应光的全部信息 (强度, 相位)。

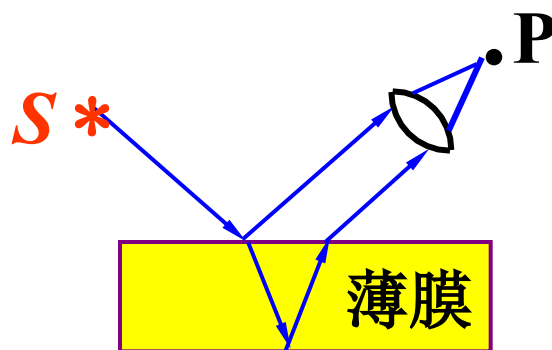
### 3. 一般光源取得相干光的途径

分波面法:



在  $P$  点处  
相干叠加

分振幅法:



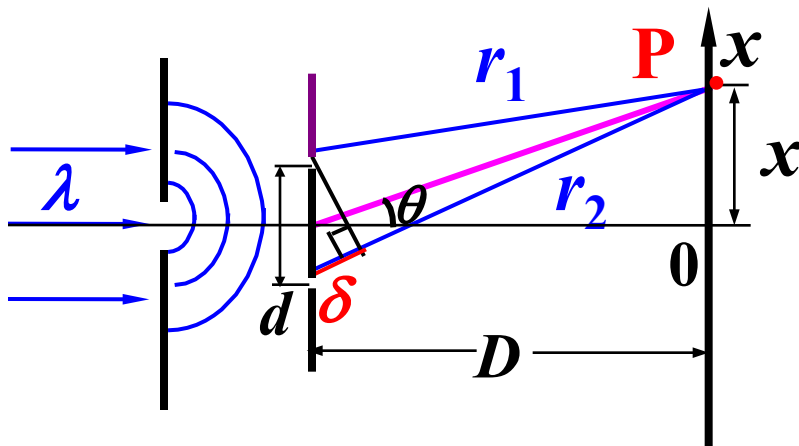


# §2 双缝干涉及其他分波面干涉试验

(书3.1和3.2节)

## 一. 双缝干涉

单色光入射

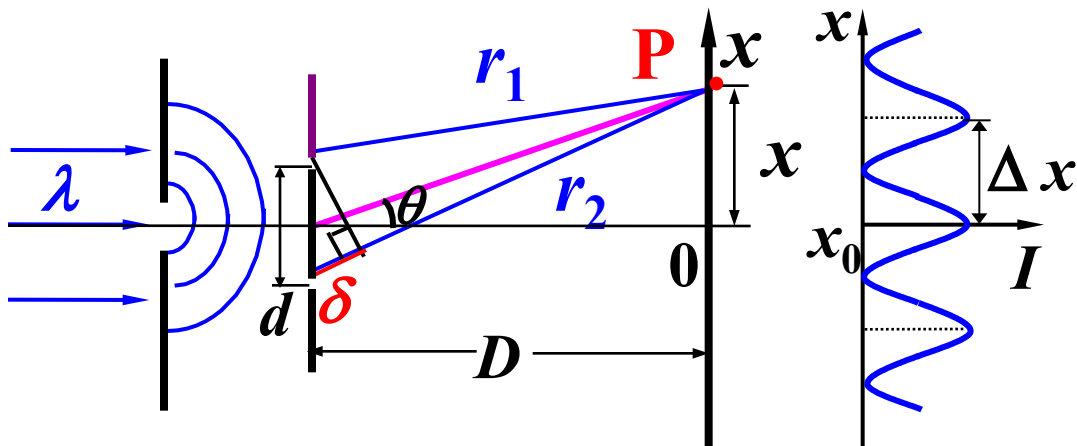


$$d \gg \lambda, \quad D \gg d \quad (d \sim 10^{-4} \text{m}, \quad D \sim \text{m})$$

波程差:  $\delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \approx d \operatorname{tg} \theta = d \cdot \frac{x}{D}$

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





**明纹**  $\delta = \pm k\lambda, x_{\pm k} = \pm k \frac{D}{d} \lambda, k = 0, 1, 2, \dots$

**暗纹**  $\delta = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}, x_{\pm(2k+1)} = \pm(2k + 1) \frac{D}{2d} \lambda$

**条纹间距:**  $\Delta x = \frac{D}{d} \lambda$



## 条纹特点:

- (1) 一系列平行的明暗相间的条纹;
- (2)  $\theta$  不太大时条纹等间距;
- (3) 中间级次低, 两边级次高;

(某条纹级次 = 该条纹相应的  $\frac{r_2 - r_1}{\lambda}$  之

明纹:  $\pm k$ ,  $k = 1, 2, \dots$  (整数级)

暗纹:  $\pm(2k+1)/2$  (半整数级)

- (4)  $\Delta x \propto \lambda$ , 白光入射时, 0级明纹中心为白色 (可用来定0级位置), 其他级明纹构成彩带, 第2级开始出现重叠

$$\delta = \pm k\lambda, x_{\pm k} = \pm k \frac{D}{d} \lambda, k = 0, 1, 2, \dots$$

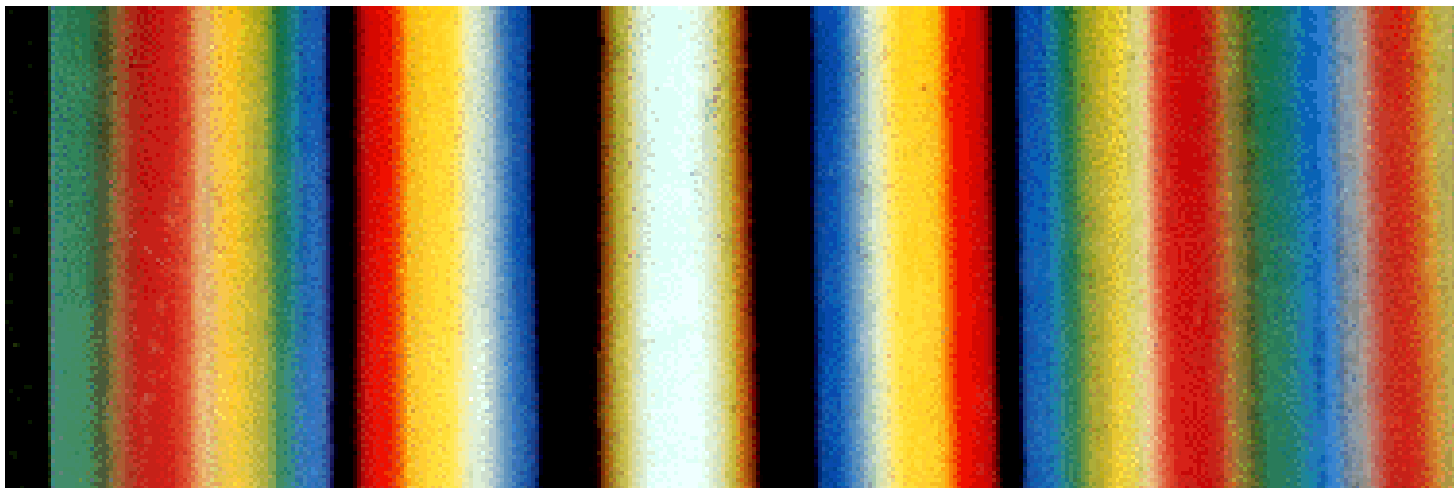
$$k\lambda_r = (k+1)\lambda_v$$

$$k = \frac{\lambda_v}{\lambda_r - \lambda_v} = \frac{390}{750 - 390} = 1.08$$

所以从紫到红能够看清楚光谱最多到正负一级



红光入射的杨氏双缝干涉照片



白光入射的杨氏双缝干涉照片



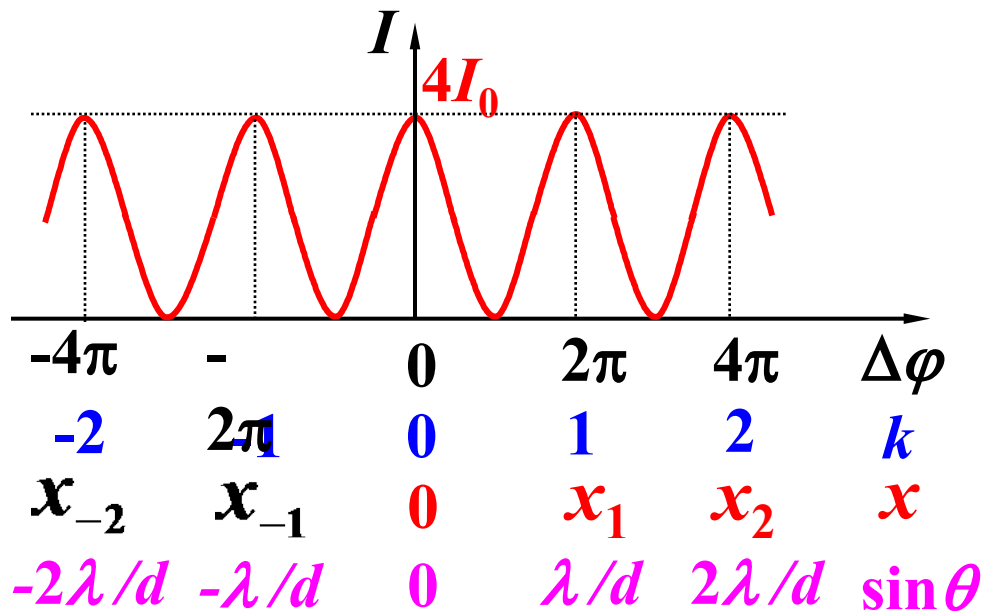
## 二 . 光强公式

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

若  $I_1 = I_2 = I_0 ,$

则  $I = 4I_0 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad \left( \Delta\varphi = \frac{d \sin \theta}{\lambda} 2\pi \right)$

光强曲线





### 三. 干涉问题分析的要点:

- (1) 搞清发生干涉的光束;
- (2) 计算波程差 (光程差);
- (3) 搞清条纹特点:

形状、位置、级次分布、条纹移动等;

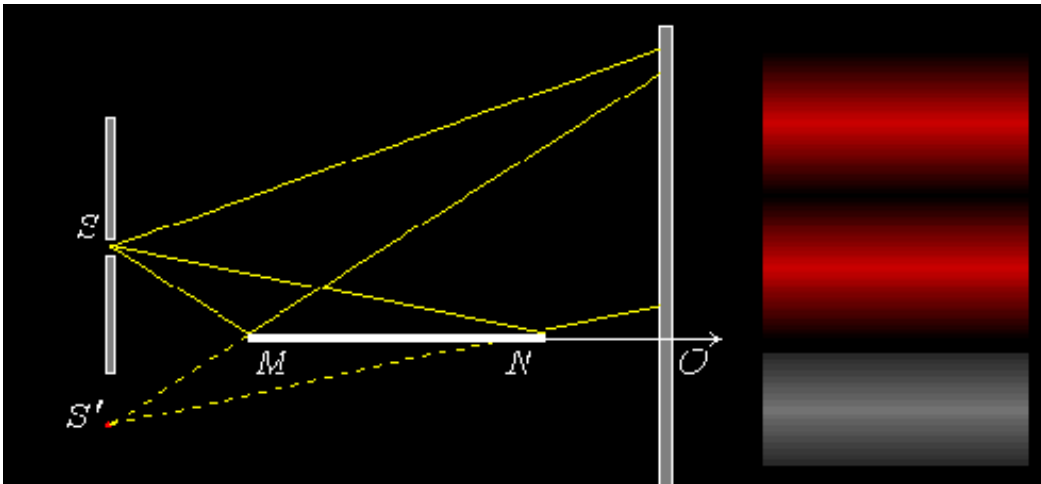
- (4) 求出光强公式、画出光强曲线。

# △ 四. 其他分波面干涉试验



清华理工

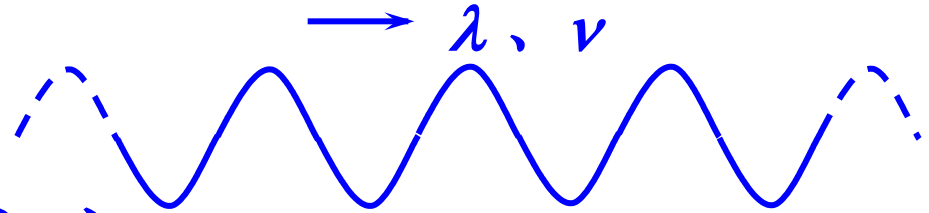
## 劳埃德镜试验



# §3.3 时间相干性 (temporal coherence)

## 一. 光的非单色性

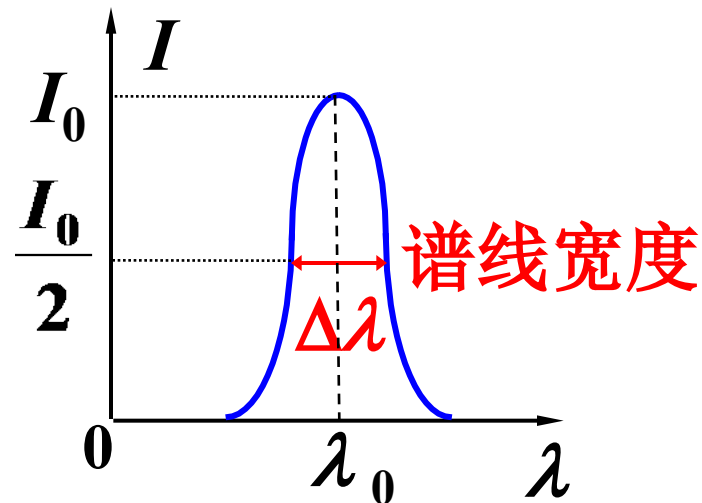
1. 理想的单色光



2. 准单色光、谱线宽度

准单色光：在某个**中心波长（频率）**附近有一定**波长（频率）范围**的光。

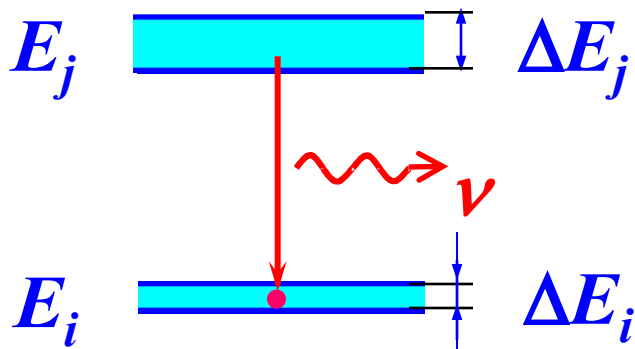
谱线宽度：





### 3.造成谱线宽度的原因:

#### (1) 自然宽度



$$\Delta \nu = \frac{\Delta E_i + \Delta E_j}{h}$$

#### (2) 多普勒增宽

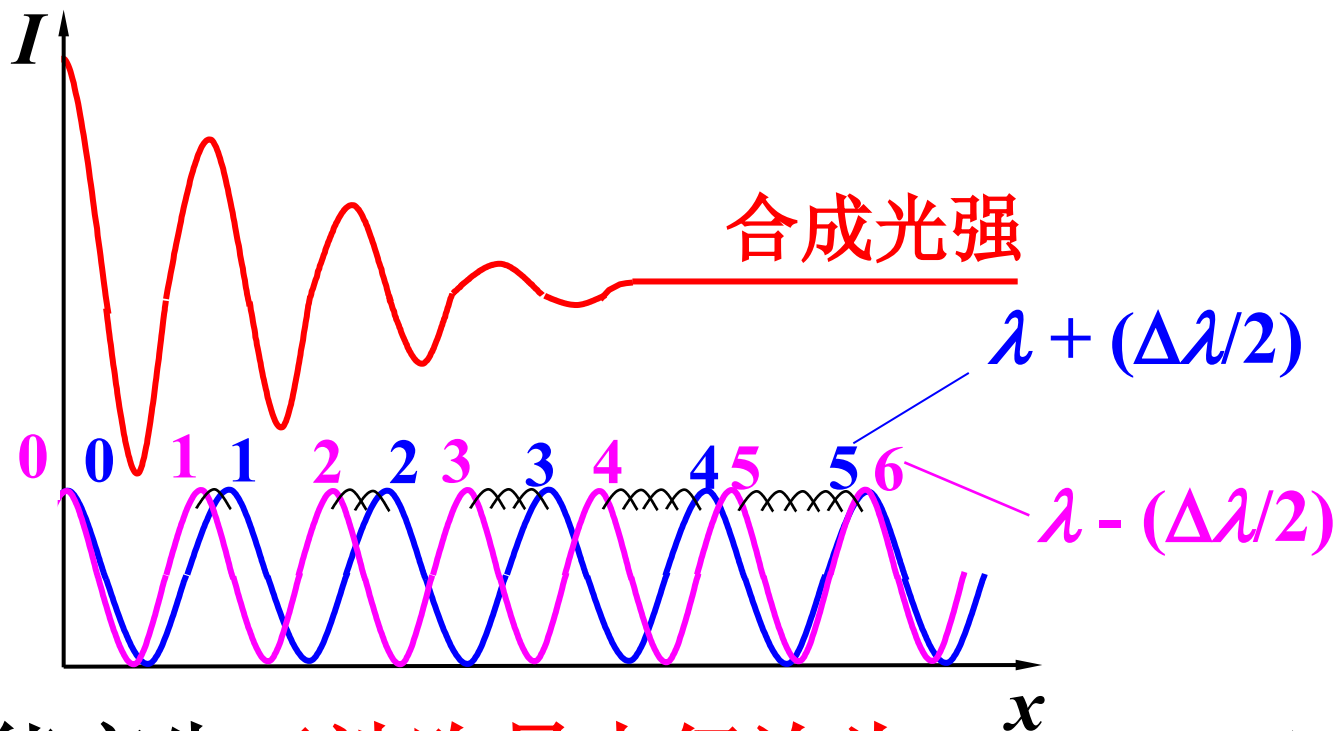
$$\Delta \nu \propto \bar{\nu} \propto \sqrt{T}, \quad T \rightarrow \Delta \nu$$

#### (3) 碰撞增宽

$$\Delta \nu \propto \bar{z} \propto p \quad (T \text{一定}), \quad p \rightarrow \Delta \nu$$



## 二. 非单色性对干涉条纹的影响



设能产生干涉的最大级次为 $k_M$ ，则应有：

$$k_M \left( \lambda + \frac{\Delta\lambda}{2} \right) = (k_M + 1) \left( \lambda - \frac{\Delta\lambda}{2} \right) \quad \left. \vphantom{k_M} \right\} \longrightarrow k_M = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

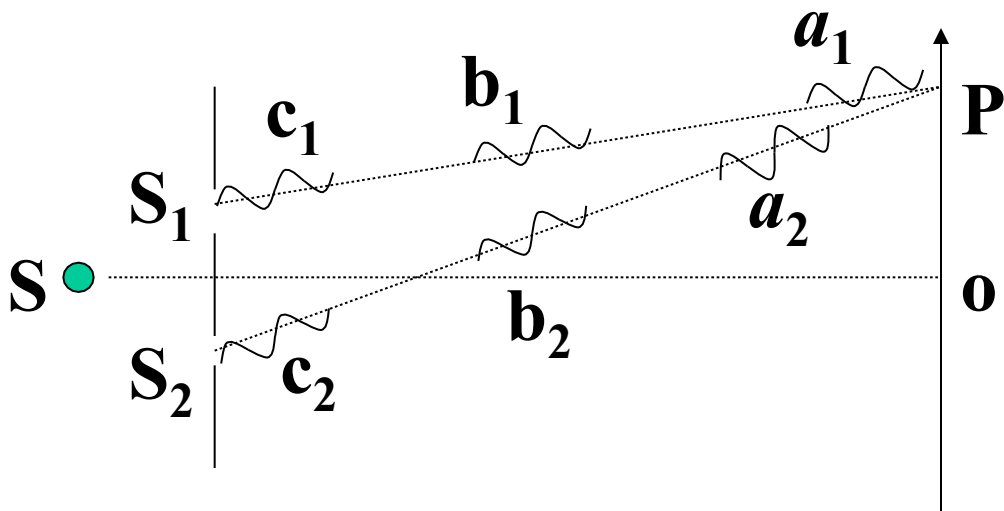
又  $\lambda \gg \Delta\lambda$

### 三 . 相干长度与相干时间

#### 1. 相干长度 (coherent length)

两列波能发生干涉的最大波程差叫相干长度。

相干长度  $\delta_M = k_M \lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$       $\lambda$  : 中心波长



只有**同一波列**提成的两部分，经过不同的旅程再**相遇**时，才干发生干涉。

干涉的最大波程差  $\delta_{\max}$  的直观了解：就是波列的长度



## 一般单色光:

$$\Delta\lambda : 10^{-3} \text{ — } 10^{-1} \text{ nm}$$

$$\delta_M : 10^{-3} \text{ — } 10^{-1} \text{ m}$$

## 激光:

$$\Delta\lambda : 10^{-9} \text{ — } 10^{-6} \text{ nm}$$

$$\delta_M : 10^1 \text{ — } 10^2 \text{ km} \quad (\text{理想情况})$$

(实际上, 一般为  $10^{-1} \text{ — } 10^1 \text{ m}$ )

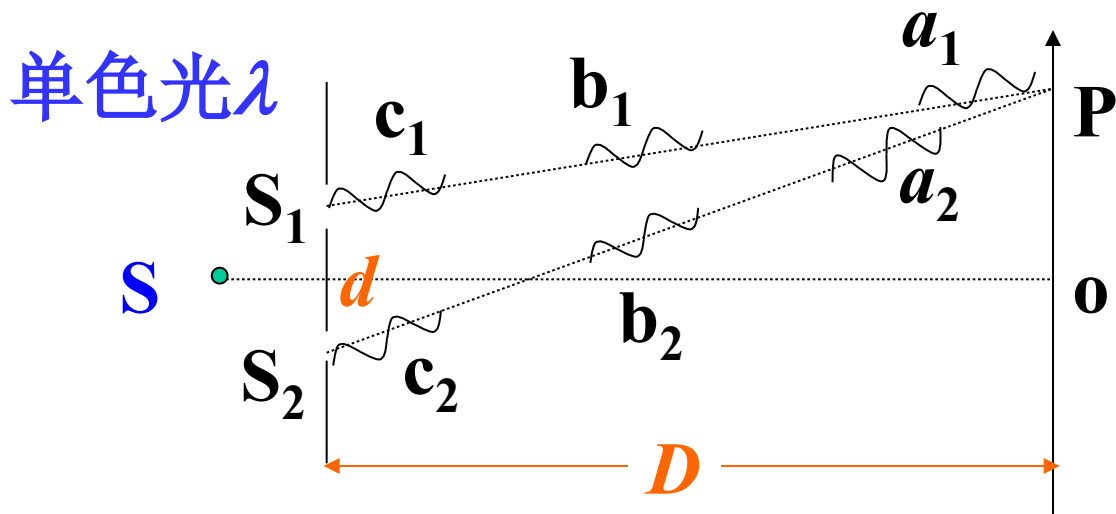
## 2.相干时间 (coherent length)

光经过相干长度所需时间叫相干时间。

相干时间  $\tau = \frac{\delta_M}{c}$        $\Delta\lambda \downarrow \rightarrow \delta_M \rightarrow \tau$

时间相干性的好坏，就是用相干长度 $\delta_M$ （波列长度）或相干时间 $\tau$ （波列延续时间）的长短来衡量的。

光的单色性好，相干长度和相干时间就长，时间相干性也就好。



## 讨论:

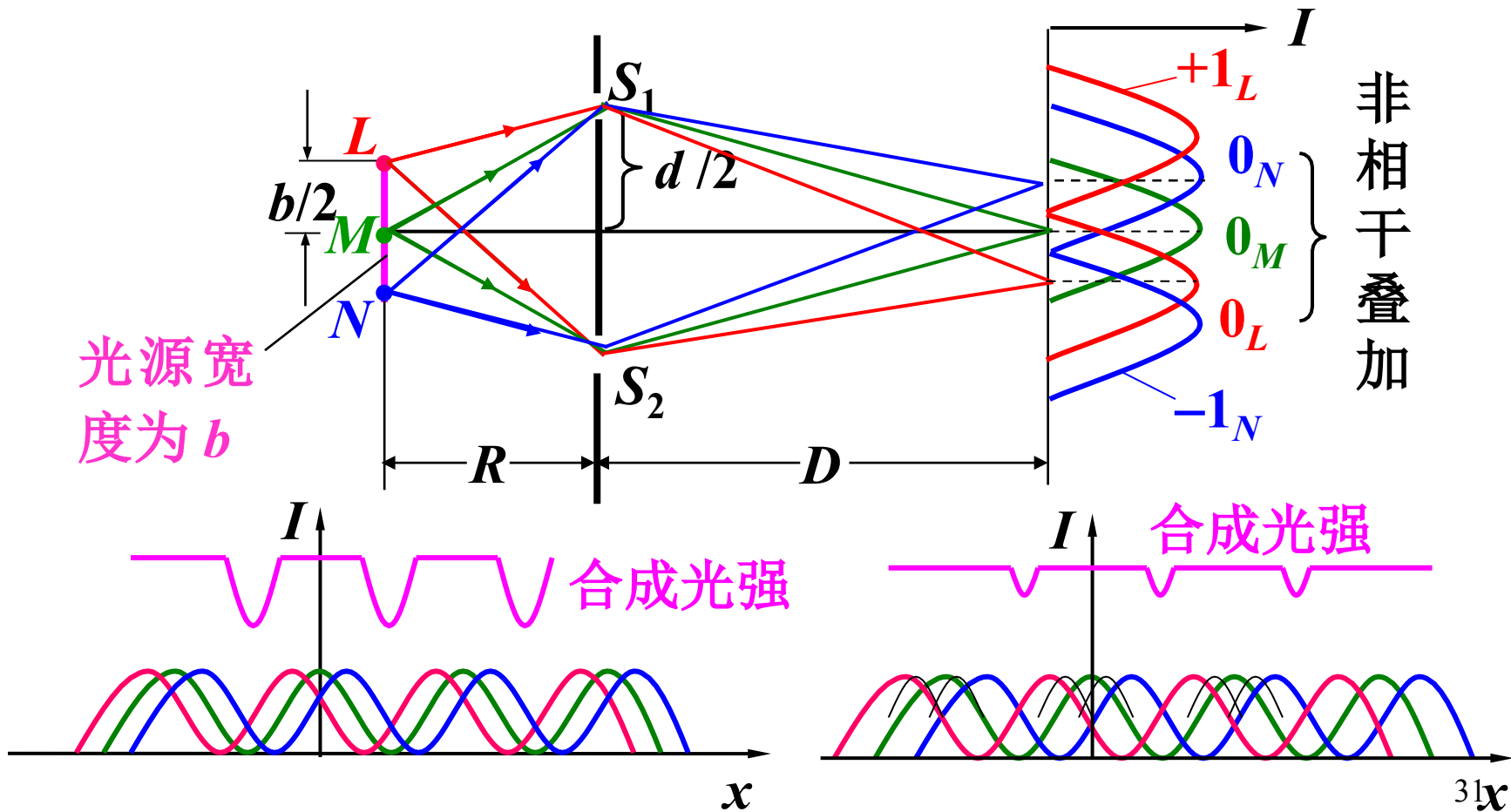
- 光波的振动方向与传播方向是不是一回事?
- 当  $P$  点离  $o$  点相当远时, 干涉条纹会消失, 你能否从相干长度 (或波列长度) 来解释?
- 当两缝间距  $d$  增大时, 能否解释条纹间距的变化?
- 当  $S$  向下移动时, 零级亮纹的位置变不变? 怎样变?
- 当  $S$  变宽时, 干涉条纹有何变化?



# §3.4 空间相干性 (spatial coherence)

## 一. 空间相干性的概念

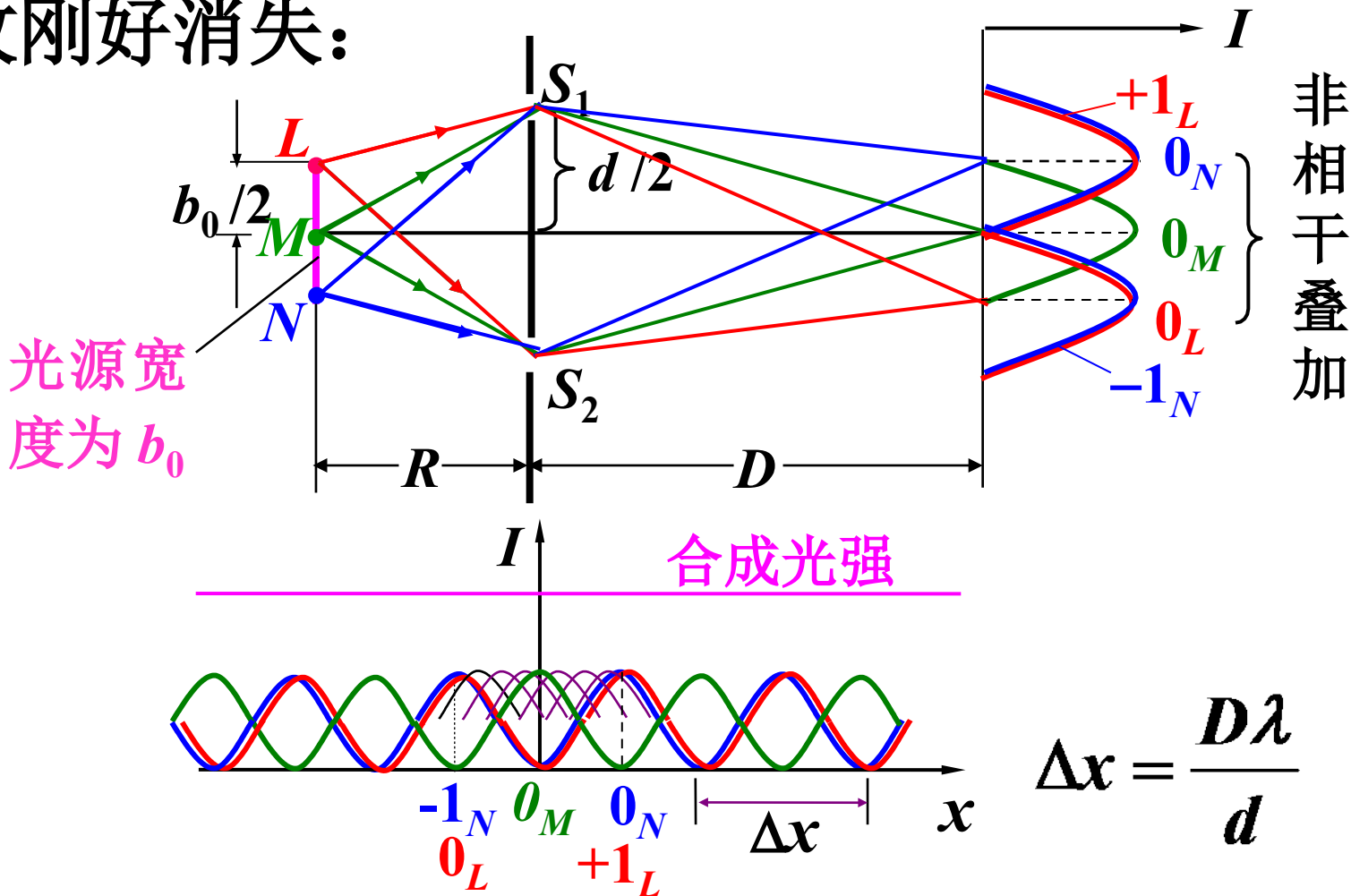
讨论光源宽度对干涉条纹衬比度的影响。





## 二. 极限宽度

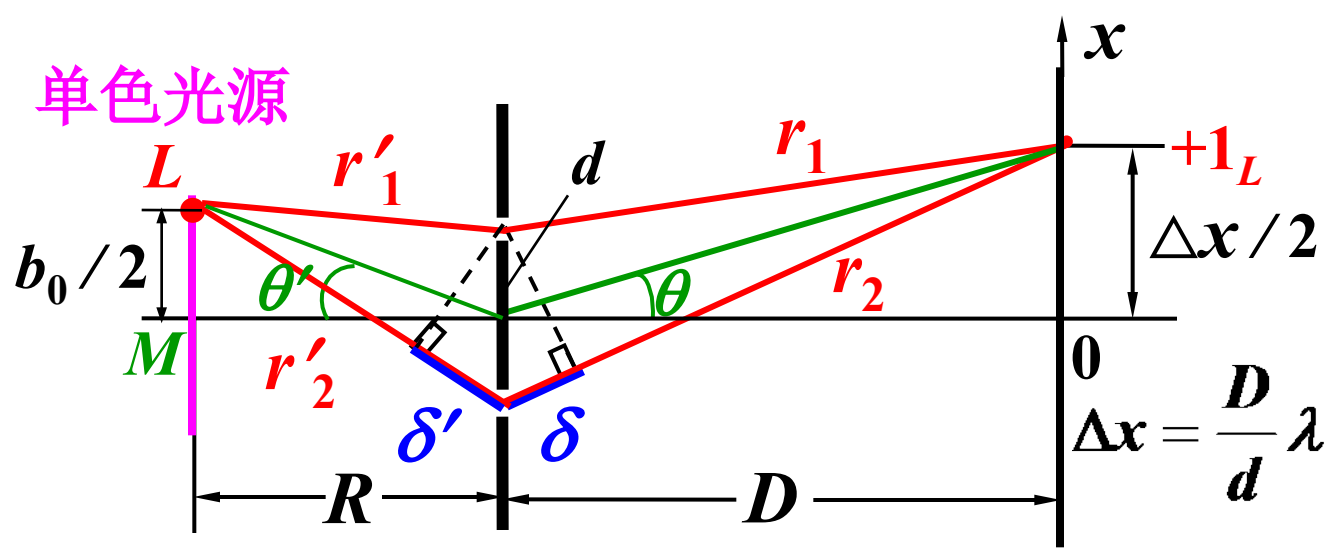
当光源宽度  $b$  增大到某个宽度  $b_0$  时，干涉条纹刚好消失：







$b_0$ 就称为光源的极限宽度，其计算如下：



此时  $L$  的一级明纹的极大在

$$x = \frac{\Delta x}{2} \text{ 处}$$

一级明纹:  $(r_2 + r'_2) - (r_1 + r'_1) = \delta + \delta' = \lambda$

$$D \gg d : \quad \delta \approx d \cdot \sin \theta \approx d \cdot \frac{\Delta x / 2}{D} = \frac{\lambda}{2}$$

$$R \gg b_0, d : \quad \delta' \approx d \cdot \sin \theta' \approx d \cdot \frac{b_0 / 2}{R}$$

$$\left. \begin{array}{l} \delta + \delta' = \lambda \\ \delta \approx \frac{\lambda}{2} \end{array} \right\} \frac{d \cdot b_0}{2R} = \frac{\lambda}{2}$$



由  $\frac{d \cdot b_0}{2R} = \frac{\lambda}{2}$  有:

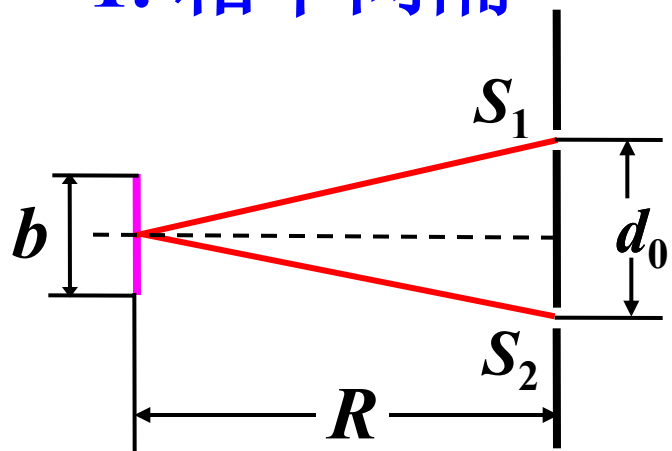
$$b_0 = \frac{R}{d} \lambda \quad \text{——光源的极限宽度}$$

$b < b_0$  时, 才干观察到干涉条纹。

为观察到较清楚的干涉条纹一般取  $b \leq b_0/4$

### 三. 相干间隔和相干孔径角

#### 1. 相干间隔



由  $b < b_0 = \frac{R}{d} \lambda$  ,

若  $b$  和  $R$  一定,

则要得到干涉条纹,

必须  $d < \frac{R}{b} \lambda$  。

令

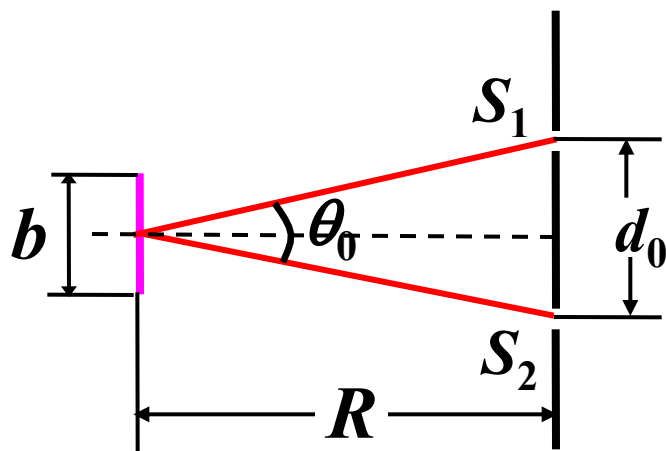
$$d_0 = \frac{R}{b} \lambda \quad \text{—— 相干间隔}$$

相干间隔  $d_0$  是光场中正对光源的平面上能够产生干涉的两个次波源间的最大距离。

$R$  一定时,  $d_0$  越大, 光场的空间相干性越好。

## 2. 相干孔径角

相干间隔也能够用相干孔径角来替代。



相干孔径角  $\theta_0 = \frac{d_0}{R} = \frac{\lambda}{b}$

—  $d_0$  对光源中心的张角。

在  $\theta_0$  范围内的光场中，正对光源的平面上的任意两点的光振动是相干的。

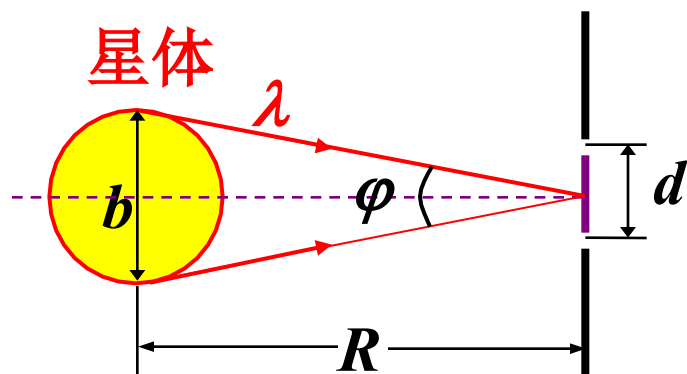
$\theta_0$  越大空间相干性越好。

★ 一般单色光源分波面干涉受到光源宽度的限制，存在条纹亮度和衬比度的矛盾。而激光光源则不受以上限制。

## 四. 相干间隔的应用举例

利用空间相干性能够

测遥远星体的角直径  $\varphi$



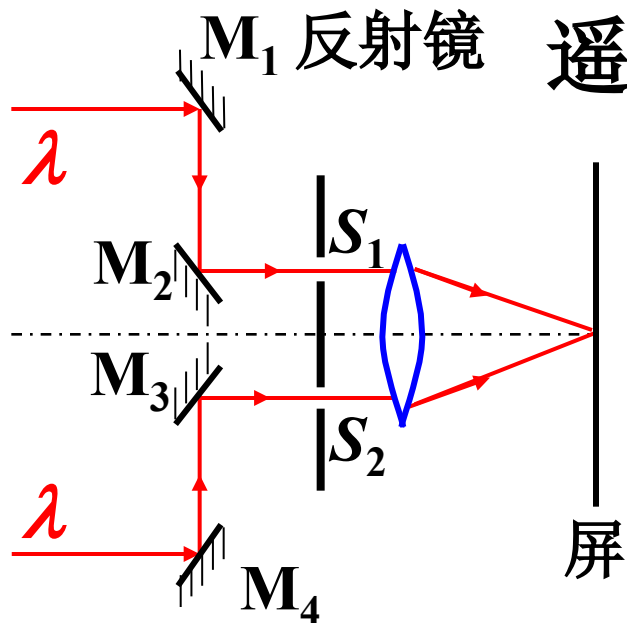
$$\varphi = \frac{b}{R}$$

使  $d = d_0$ ，则条纹消失。

由  $d_0 = \frac{R}{b} \lambda = \frac{\lambda}{\varphi}$ ，有  $\varphi = \frac{\lambda}{d_0}$

考虑到衍射的影响，有  $\varphi = 1.22 \frac{\lambda}{d_0}$

▲ **测星干涉仪**：利用干涉条纹消失测星体角直径  
 遥远星体相应的  $d_0 \sim$  几至十几米。



迈克耳孙巧妙地用四块反射镜增大了双缝的缝间距。

屏上条纹消失时， $M_1M_4$  间的距离就是  $d_0$ 。猎户座

**迈克耳孙测星干涉仪**

$\alpha$  星  $\lambda \approx 570 \text{ nm}$  (橙色)，

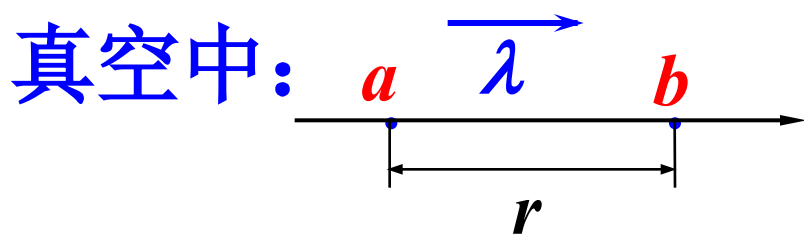
1923年12月测得： $d_0 \approx 3.07\text{m}$ 。由此得到：

$$\varphi = 1.22 \frac{\lambda}{d_0} = \frac{1.22 \times 570 \times 10^{-9}}{3.07} \approx 2.27 \times 10^{-7} \text{ rad} \approx 0.0467''$$

## §3.5 光程 (optical path)

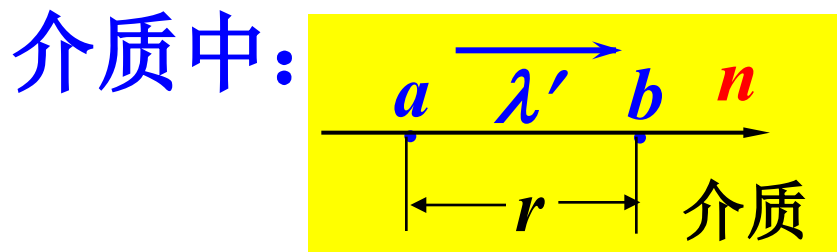
### 一. 光程

为以便计算光经过不同介质时引起的相差，引入光程的概念。



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

$\lambda$  — 真空中波长



$$\Delta\varphi = \varphi_b - \varphi_a = \frac{r}{\lambda'} 2\pi$$

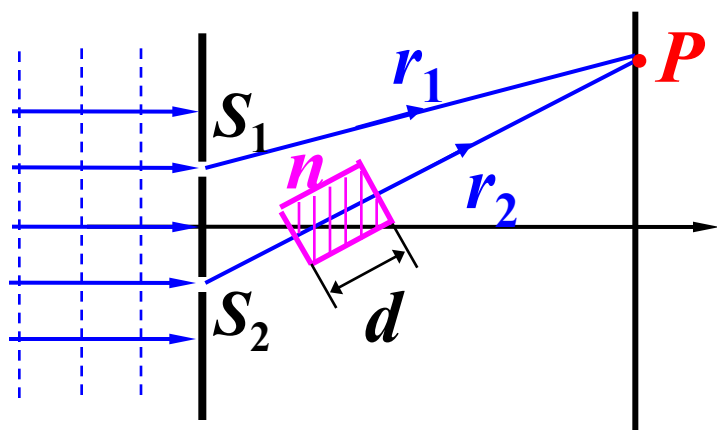
$\lambda'$  — 介质中波长

$$\lambda' = \frac{u}{\nu} = \frac{c/n}{\nu} = \frac{c/\nu}{n} = \frac{\lambda}{n} \quad \rightarrow \quad \Delta\varphi = \frac{nr}{\lambda} 2\pi$$

这表白，光在介质中传播旅程  $r$  和在真空中传播旅程  $nr$  引起的相位差相同。我们称  $nr$  为介质中与旅程  $r$  相应的光程。由此得到关系：

$$\text{相差} = \frac{\text{光程差}}{\lambda} 2\pi \quad \lambda \text{ — 真空中波长}$$

**[例]** 计算图中光经过旅程  $r_1$  和  $r_2$  在  $P$  点的相差。



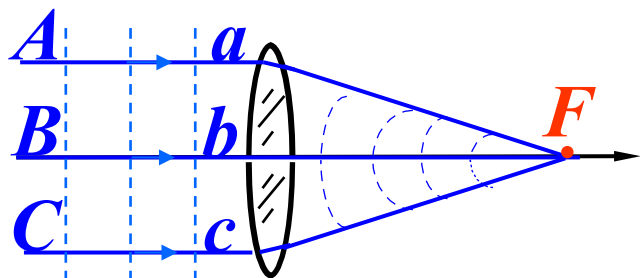
$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{2\pi}{\lambda} \{ [(r_2 - d) + nd] - r_1 \} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [(r_2 - r_1) + (n - 1)d] \end{aligned}$$





## 二 . 透镜不会产生附加光程差

在干涉和衍射装置中经常要用到透镜，  
光线经过透镜后并不附加光程差。



焦点  $F$ 、 $F'$  都是亮点，  
阐明各光线在此同相叠加。

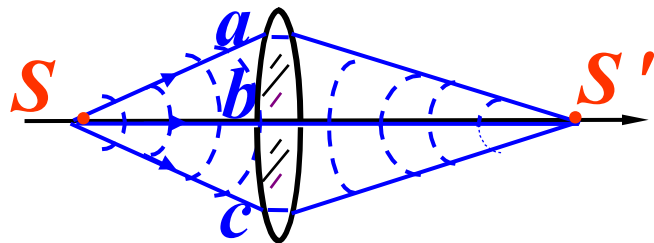
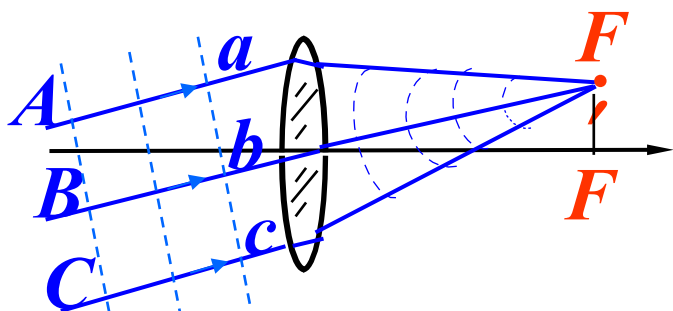
而  $A$ 、 $B$ 、 $C$  或  $a$ 、 $b$ 、 $c$

都在同相面上。阐明  $A \rightarrow F$ ，

$B \rightarrow F$ ， $C \rightarrow F$  或  $A \rightarrow F'$ ，

$B \rightarrow F'$ ， $C \rightarrow F'$  各光线等光程。

物点到象点（亮点）各  
光线之间的光程差为零。



## §3.6 薄膜干涉 (film interference) (一)

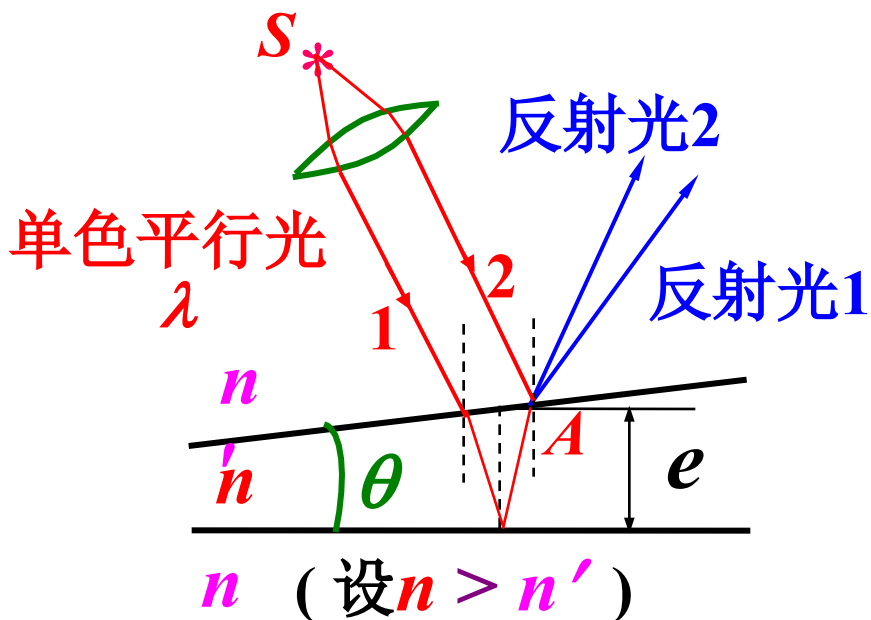
### —— 等厚条纹 (equal thickness fringes)

- ▲ 薄膜干涉是分振幅干涉。
- ▲ 日常中见到的薄膜干涉：肥皂泡上的彩色、雨天地面上油膜的彩色、昆虫翅膀的彩色...
- ▲ 膜为何要薄？—— 光的相干长度所限。  
膜的薄、厚是相正确，与光的单色性好坏有关。
- ▲ 普遍地讨论薄膜干涉是个极为复杂的问题。实际意义最大的是**厚度不均匀薄膜表面的等厚条纹**和**厚度均匀薄膜在无穷远处的等倾条纹**。

# 本节讨论不均匀薄膜表面的等厚条纹。

## 一. 劈尖 (wedge film) (劈形膜)

夹角很小的两个平面所构成的薄膜叫劈尖。



$$\theta : 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ rad}$$

1、2两束反射光来自同一束入射光，它们能够产生干涉。例如在膜面上 (A点)

1、2两束反射光相干叠加，就可形成明暗条纹。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/975030344230011334>