

# 波动光学

光学研究光的传播以及它和物质相互作用。

通常分为以下三个部分：

**几何光学：**以光的直线传播规律为基础，主要研究各种成像光学仪器的理论。

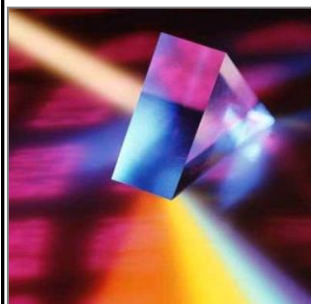
**波动光学：**研究光的电磁性质和传播规律，特别是干涉、衍射、偏振的理论和应用。

**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。

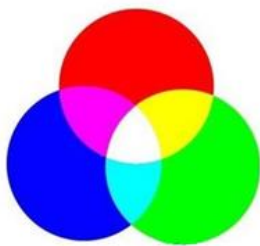
波动光学和量子光学，统称为物理光学。

2

光是电磁波（麦克斯韦的电磁波理论把光学和电磁学“统一”了起来）

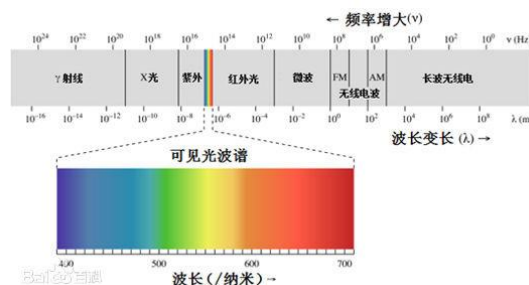


三棱镜使光色散



红绿蓝三基(原)色原理

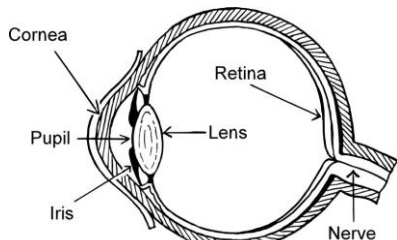
3



【演示】白光的三棱镜色散、红绿蓝三基(原)色实验

4

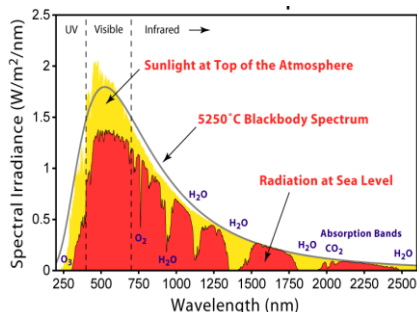
为什么可见光是“可见”光？



人眼的结构类似于架高精度的照相机，光线穿过透明的角膜（cornea）和虹膜（iris）包围的瞳孔（pupil），经过晶状体（lens）的折射在视网膜（retina）上形成空间分布的像。而视网膜上则分布着主要检测光强度的视杆细胞（rod cell）和主要检测颜色的视锥细胞（cone cell），它们是视觉形成的细胞基础。

5

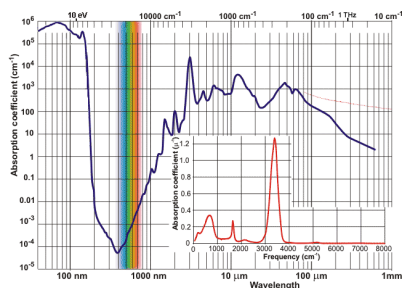
为什么可见光是“可见”光？



太阳辐射光谱（黄色为大气层顶层的光谱，红色为海平面处的光谱，实线为绝对黑体在 5250°C 时的光谱）

6

## 为什么可见光是“可见”光？



水的全波段吸收光谱（彩色示出可见光波段）

7

## 为什么可见光是“可见”光？

大气层中的气体分子（包括氮气、氧气、水蒸气、二氧化碳等）在红外区段有明显的吸收，但对于可见光区的吸收不明显，这使得到达地面时，太阳辐射光谱的强度峰值仍分布在可见光区。

生命起源于大海，海水能够透过的光谱范围对感光波段的进化也有着重要的影响。巧合的是，液态水恰恰在大约 800 nm 处有着吸收极小值，而对深紫外和红外都有强烈吸收，可见光波段在水中几乎是完全透明的。

8

可见光是能引起人的视觉的电磁波，主要是电场强度矢量  $\vec{E}$ 。

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
蓝	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

【五彩缤纷、五颜六色、红得发紫、青出于蓝胜于蓝】

9

## 长期社会分工导致男女识别颜色存在差异



Men and Women Really Do See Things Differently  
Differences may be rooted in hunting, gathering.

10

## 长期社会分工导致男女识别颜色存在差异

James Owen  
for National Geographic News  
Updated 1:11 p.m. ET, September 7, 2012

Men and women really don't see eye to eye.

Females are better at discriminating among colors, researchers say, while males excel at tracking fast-moving objects and discerning detail from a distance—evolutionary adaptations possibly linked to our hunter-gatherer past.

Across most of the visible spectrum males require a slightly longer wavelength than do females in order to experience the same hue.

Since longer wavelengths are associated with "warmer" colors, an orange, for example, may appear redder to a man than to a woman. Likewise, the grass is almost always greener to women than to men, to whom verdant objects appear a bit yellower.

Men are less adept at distinguishing among shades in the center of the color spectrum: blues, greens, and yellows.

11

## 化学色（色素色）与物理色（结构色）

在生物界，颜色的形成主要有两种来源，色素色与结构色。

色素色是植物、动物产生颜色的一种非常普遍的方式。其产生原因是某些化学物质对某些波段的可见光的吸收和反射，所以色素色也叫化学色。

结构色，又称为物理色，是指光和与光波长量级相当的结构相互作用（包括干涉、衍射、散射等），从而产生的颜色。

像孔雀羽毛以及某些美丽的蝴蝶翅膀产生的虹彩，便是经典的结构色。如果把翅膀上的鳞片结构破坏，它们就不能显现出原来的颜色了。

当蓝色的结构色与黄色的色素色结合，也就成了绿色。

12

## 变色龙的变色秘密根本不在色素而是在于结构



变色龙的皮肤中有两层致密重叠的虹色细胞。这种细胞不仅含有色素，也含有无数的纳米晶体结构（光子晶体），能反射光线并发出彩虹般闪耀色彩。光子晶体的尺寸、形状和排列方式的不同，都会使变色龙的体色改色。变色龙通过皮肤的放松和收紧来控制这些晶体的排列结构，从而实现体色变化。

*Laura Geggel, 'The Secret to Chameleons' Ability to Change Color', Scientific American, 2015.03.10*

*Jérôme Teyssie, Suzanne V. Sazdovitch, Dirk van der Marel & Michel C. Milinkovitch, 'Photonic crystals cause active colour change in chameleons', Nature Communications, 2015.1.22*

13

## 光的传播有几种重要的速度：

### 相速度、群速度和信息传播速度。

在真空中，这三个速度都等于光速，因为真空没有任何色散，折射率对于所有频率的光都是1。

在非真空介质中，信息传播速度永远不可能大于真空中的光速（在非真空介质中，物体的速度可以大于该介质中的光速。比如切伦科夫（Cherenkov）辐射），这是相对论的因果关系决定的，但是相速度和群速度并没有这个限制。相速度反映的是单色光的性质，而单色光只有一个频率，是无穷长的波列，是完全理想的情况；群速度反映的是多色光的性质，有不只一个频率，因而会形成拍频导致的波包。

14

单色光由  $A\cos(\omega t - kx)$  表示（省略了初始相位），相速度就是  $v_p = \omega/k = c/n(\omega)$ 。

两个频率不同的单色光（为了方便起见，假设它们的振幅相同，都是1）可以用  $\cos(\omega_1 t - k_1 x)$  和  $\cos(\omega_2 t - k_2 x)$ ，利用中学学过的三角函数关系，可以得到二者的和为

$$2\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t - \frac{k_1 - k_2}{2}x\right)\cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t - \frac{k_1 + k_2}{2}x\right)$$

包括低频变化（包络）和高频变化（振荡）的两个部分，二者的相速度分别是

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \quad \text{和} \quad \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2}$$

15

如果两个频率相差不大，折射率的变化不是特别剧烈，那么，高频振荡部分的相速度接近于单色光的相速度，然而，低频包络部分的相速度却可以显著偏离于单色光的相速度，这就是“群速度”。

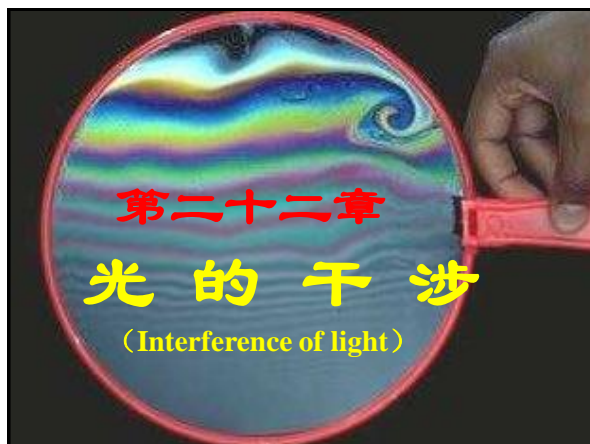
如果光的频率均匀地分布在一小段区间里，当然可以用积分来求和（结果是  $\text{sinc}$  函数），但同样可以用中学的三角函数关系来理解：以平均值为中心，两两对称地选出单色光的对子求和，高频振荡部分的相速度都等于平均频率处的相速度，而低频包络部分的相速度（“群速度”）等于  $\Delta\omega/\Delta k$ ，在很小的区间里，这个值其实就是平均频率处的斜率，并不依赖于  $\Delta\omega$  的大小。

如果考虑波矢  $k$  对  $\omega$  依赖关系的二阶导数，就会发现  $\text{sinc}$  函数变成了高斯波包，具体计算无法用中学数学来理解，但是对于高等数学来说，仍然是很简单的。

16

真空的折射率是1，非真空介质的折射率可以大于1（通常都是这样的），也可以小于1（比如在适当的原子气系统里），甚至还可能是负数（通常是针对一些特殊的频率波段，例如微波，这些研究大多属于最近二十年非常热的变换光学领域）。

17



## 本章目录

- § 22.1 光源的相干性
- § 22.2 双缝干涉及其他分波面干涉实验
- § 22.3 时间相干性
- § 22.4 空间相干性
- § 22.5 光程
- § 22.6 薄膜干涉（一）——等厚条纹
- § 22.7 薄膜干涉（二）——等倾条纹
- § 22.8 迈克耳孙干涉仪

19

## § 22.1 光源的相干性

### 一. 光源 (light source)

#### (1) 热辐射

太阳光, 白炽灯等



#### (2) 电致发光

闪电, 发光二极管等



#### (3) 光致发光

荧光物质 磷光物质



#### (4) 化学发光

燃烧, 萤火虫



20

光源发光, 是大量原子、分子的微观过程。

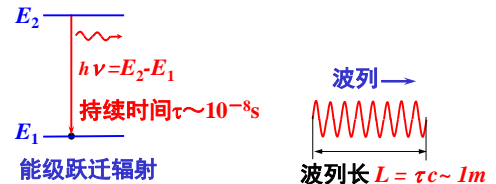
### 能级、跃迁、辐射、波列

$E_2$  ——— 微观粒子（电子、原子等）的能量是不连续的

$E_1$  ——— 根据玻耳兹曼分布律估算平衡态时粒子数分布（布居数）

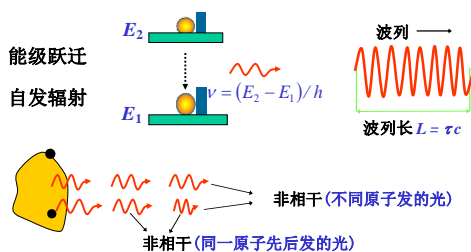
21

### 能级、跃迁、辐射、波列



22

### 1、普通光源：自发辐射

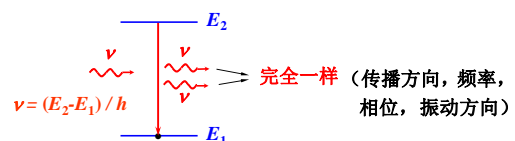


23

### 2、激光光源：受激辐射 布居数反转

1960年发明的激光器是一种性能优良的新光源。激光器的发光机理与普通光源不同。由于激光是受激辐射，加之特定的谐振腔结构，使激光具有很好的单色性和方向性，以及相干性和高亮度。

#### 激光光源：受激辐射



24

### 3. 光的强度

对各向同性介质:  $E = E_0 \cos(\omega t - kx)$

能流密度  $S = |\vec{E} \times \vec{H}| = \varepsilon E_0^2 u \cos^2(\omega t - kx)$

光的强度  $I = \bar{S} = \frac{1}{2} \varepsilon E_0^2 u$

在光频段  $\mu_r \approx 1$

$$u = \frac{c}{n} \quad n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} = \sqrt{\varepsilon_r} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

$$I = \bar{S} = \frac{1}{2} \varepsilon E_0^2 u = \frac{n}{2c\mu_0} E_0^2 \propto n E_0^2$$

25

## 二、光的相干性

1、两列光波的叠加 ( $B = \frac{E}{c}, B \ll E$ , 只讨论  $E$ )

$\vec{E}$ : 光矢量 令  $\vec{E}_1 \parallel \vec{E}_2$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$

两个平面波波源振动方程

$$E_1 = E_{10} \cos(\omega t + \varphi_{10})$$

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

频率相同, 振动方向相同

P点的振动方程  $E_1 = E_{10} \cos(\omega t - kr_1 + \varphi_{10})$

$$E_2 = E_{20} \cos(\omega t - kr_2 + \varphi_{20})$$

26

$$P \begin{cases} E_1 = E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) & \varphi_1 = -kr_1 + \varphi_{10} \\ E_2 = E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) & \varphi_2 = -kr_2 + \varphi_{20} \end{cases}$$

$$E = E_1 + E_2 = E_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

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

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

在同一介质内

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

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

干涉项

27

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos \Delta\varphi \quad \leftarrow \text{干涉项重要}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= -kr_1 + \varphi_{10} \\ \varphi_2 &= -kr_2 + \varphi_{20} \end{aligned}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - k(r_2 - r_1)$$



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

28

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

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

$$I = I_1 + I_2 \quad \text{非相干叠加}$$

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

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

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

29

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

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

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

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= -kr_1 + \varphi_{10} \\ \varphi_2 &= -kr_2 + \varphi_{20} \end{aligned}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - k(r_2 - r_1)$$

相干光的条件:

振动方向相同、频率相同、相位差恒定

30

## 2、条纹衬比度（对比度，反衬度，contrast）

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

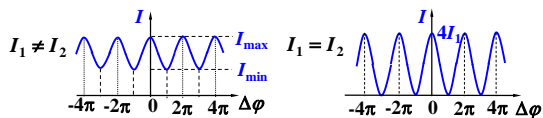
定义  $V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$

$$= \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}) \cos \Delta\varphi$$

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

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

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



衬比度差 ( $V < 1$ )

衬比度好 ( $V = 1$ )

31

## 决定衬比度的因素

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

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

$$= \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}) \cos \Delta\varphi$$

➤ 光源的相干性

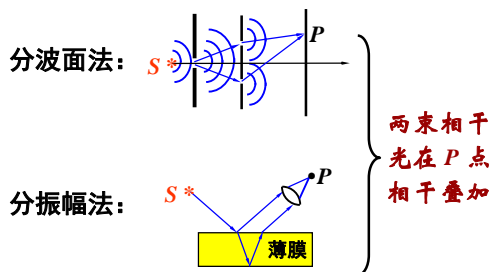
光源的单色性， 光源的宽度

➤ 振幅比

干涉条纹可反映光的全部信息（强度， 相位）

32

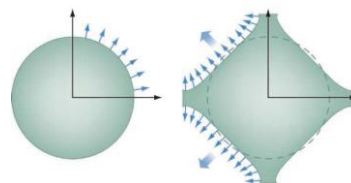
## 3、由普通光源获得相干光的途径



两束相干  
光在 P 点  
相干叠加

33

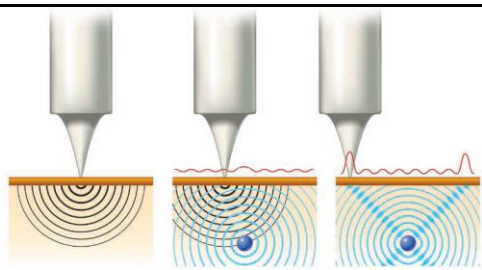
## 4、电子波的干涉



Scattered electrons. (A) A nearly-free-electron gas has a spherical Fermi surface. The blue arrows indicate the direction of electron propagation at the Fermi surface. (B) In the cartoon model of the Fermi surface of Cu, certain directions become preferred due to the nonspherical shape of the Fermi surface. The thick arrows indicate directions of electron focusing.

Science 323 (2009) 1178

34

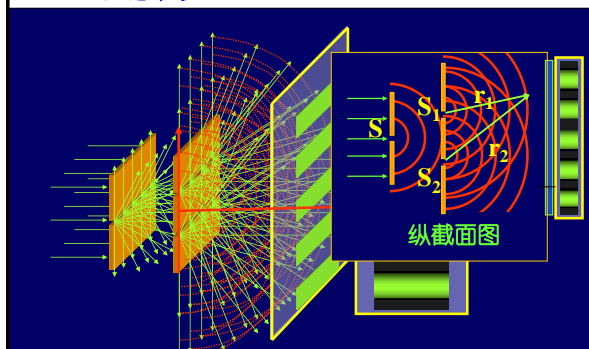


(C) In a typical STM experiment on a metal, an electron tunnels into the surface and becomes a bulk electron wave whose amplitude decays with distance. (D) When a scatterer is present under the surface, the electron wave can be reflected. For a spherical Fermi surface, this results in a weak interference pattern at the surface. (E) When the Fermi surface is not spherical, electron focusing is observed along certain directions, which can give rise to a pronounced interference pattern observable at the surface.

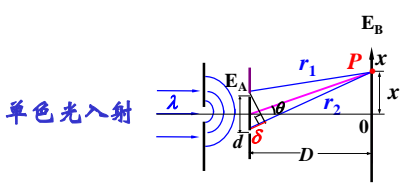
35

## § 22.2 双缝干涉及其他分波面干涉实验

### 一、双缝干涉







单色光入射

$d \gg \lambda, D \gg d$  ( $d \sim 10^{-4}\text{m}$ ,  $D \sim 1\text{m}$ )

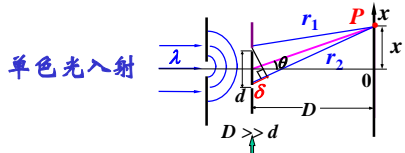
在双缝屏处  $E_{A1} = E_{A10} \cos \omega t$   $E_{A2} = E_{A20} \cos \omega t$

在观察屏处  $E_{B1} = E_{B10} \cos(\omega t - k r_1)$   $E_{B2} = E_{B20} \cos(\omega t - k r_2)$

叠加结果  $E_B = E_{B1} + E_{B2}$

37

在观察屏处  $E_{B1} = E_{B10} \cos(\omega t - k r_1)$   $E_{B2} = E_{B20} \cos(\omega t - k r_2)$



单色光入射

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

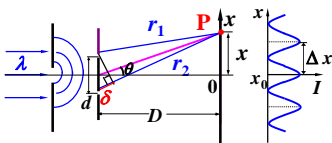
**相位差:**  $\Delta \varphi = \frac{\delta}{\lambda} 2\pi \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \tan \theta = \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{x}{D}$

$\vec{r}_1 = \vec{r} - \frac{1}{2}\vec{d}$   $r_1 = |\vec{r}_1| = (r^2 + \frac{1}{4}d^2 - \vec{r} \cdot \vec{d})^{1/2}$

$r_1 = r(1 - \frac{d}{2r} \sin \theta)$   $r_2 = r(1 + \frac{d}{2r} \sin \theta)$

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

38



$\delta = d \cdot \frac{x}{D}$

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

**明纹:**  $\Delta \varphi = \pm 2k\pi, k = 0, 1, 2, \dots$

$\delta = \pm k\lambda, x_{\pm k} = \pm k \frac{D}{d} \lambda$

**暗纹:**  $\Delta \varphi = \pm (2k+1)\pi, k = 0, 1, 2, \dots$

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

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

39

**例** 双缝干涉实验中, 用钠光灯作单色光源, 其波长为 **589.3 nm**, 屏与双缝的距离  $D=600\text{ mm}$ .

**求** (1)  $d=1.0\text{ mm}$  和  $d=10\text{ mm}$ , 两种情况相邻明条纹间距分别为多大? (2) 若相邻条纹的最小分辨距离为 **0.065 mm**, 能分清干涉条纹的双缝间距  $d$  最大是多少?

**解** (1) 明纹间距分别为

$\Delta x = \frac{D\lambda}{d} = \frac{600 \times 5.893 \times 10^{-4}}{1.0} = 0.35\text{mm}$

$\Delta x = \frac{D\lambda}{d} = \frac{600 \times 5.893 \times 10^{-4}}{10} = 0.035\text{mm}$

(2) 双缝间距  $d$  为

$d = \frac{D\lambda}{\Delta x} = \frac{600 \times 5.893 \times 10^{-4}}{0.065} = 5.4\text{mm}$

40

## 二、双缝干涉光强公式

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

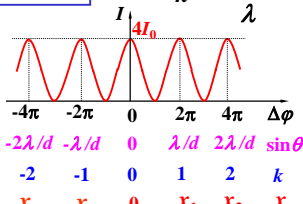
设  $I_1 = I_2 = I_0$ , 则光强为

$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\Delta \varphi}{2}$

$\Delta \varphi = \frac{d \sin \theta}{\lambda} 2\pi$

$k = \frac{d \sin \theta}{\lambda}$

**光强曲线**



$-4\pi$   $-2\pi$   $0$   $2\pi$   $4\pi$   $\Delta \varphi$

$-2\lambda/d$   $-\lambda/d$   $0$   $\lambda/d$   $2\lambda/d$   $\sin \theta$

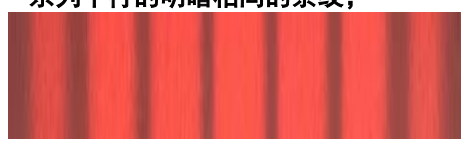
$-2$   $-1$   $0$   $1$   $2$   $k$

$x_{-2}$   $x_{-1}$   $0$   $x_1$   $x_2$   $x$

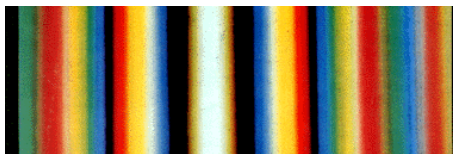
41

## 三、双缝干涉条纹的特点

(1) 一系列平行的明暗相间的条纹;



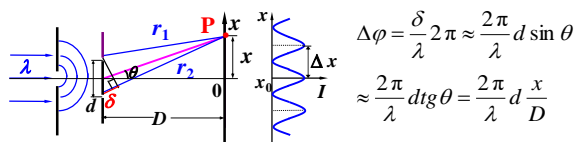
红光入射的杨氏双缝干涉照片



白光入射的杨氏双缝干涉照片

42

(2)  $\theta$ 不太大时条纹等间距;



**明纹:**  $\Delta\varphi = \pm 2k\pi, k=0,1,2,\dots$

$$\delta = \pm k\lambda, x_{\pm k} = \pm k \frac{D}{\lambda}$$

(3) 中间级次低, 两边级次高

43

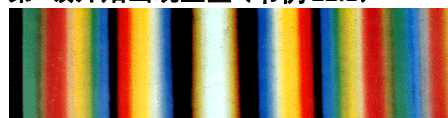
(3) 中间级次低, 两边级次高

**级次:**  $k = \frac{d \sin\theta}{\lambda} = \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$

**明纹:**  $\pm k, k=0,1,2,\dots$  (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), 其余级明纹构成彩带, 第2级开始出现重叠 (书例 22.1)



44

#### 四、干涉问题分析的要点

(1) 确定发生干涉的光束;

(2) 计算波程差 (光程差);

(3) 明确条纹特点:

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。

45

#### △ 五、其他分波面干涉实验

(自学)

要求明确以下问题:

1、如何获得的相干光;

2、明、暗纹条件;

3、干涉条纹特点:

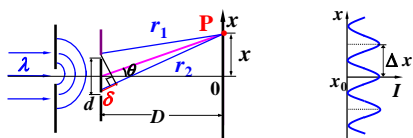
形状、间距、级次位置分布;

4、**劳埃镜实验, 半波损失。**

光疏媒质进入光密媒质

46

#### § 22.3 时间相干性 (temporal coherence)



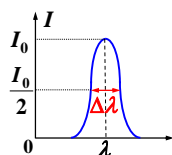
在观察屏上, 当  $x$  增大时, 干涉现象越来越不明显?

**相干长度**

**相干时间**

**光的非单色性**

**【演示】双缝干涉实验**



47

#### 一、相干长度与相干时间

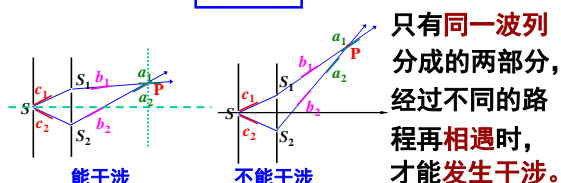
##### 1、相干长度 (coherent length)

两列波能发生干涉的**最大波程差**叫**相干长度**。

**相干长度**

$$\delta_M = k_M \lambda$$

$\lambda$ : 中心波长



**波列长度就是相干长度:  $L = \tau = \delta_M$**

48



普通单色光：

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

激光：

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

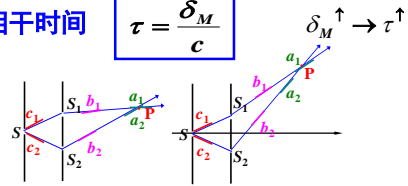
(实际上，一般为  $10^{-1} - 10^1 \text{ m}$ )

49

## 2、相干时间 (coherent length)

光通过相干长度所需时间叫相干时间。

$$\text{相干时间} \quad \tau = \frac{\delta_M}{c}$$



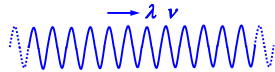
时间相干性的好坏，就是用相干长度  $\delta_M$  (波列长度) 或相干时间  $\tau$  (波列延续时间) 的长短来衡量的。

相干长度和相干时间越长，时间相干性就越好。

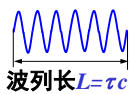
50

## 二、光的非单色性

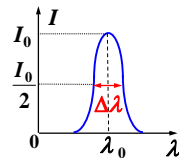
1、理想的单色光



2、实际光束：波列 准单色光



波列长  $L = \tau c$



$\Delta\lambda$ : 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。

51

wave function  $E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t - kx)$

波源在  $x = 0$ ,  $E(t) = E_0 \cos \omega_0 t$   $-\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2}$

$E(t) = 0$ , 其它时间

$$E(t) = E_0 \exp(-i\omega_0 t), -\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2}$$

$$\text{傅立叶变换:} \quad f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega$$

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(i\omega t) dt$$

52

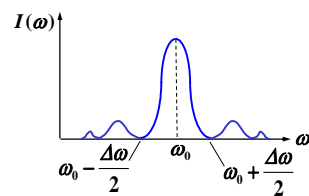
对波列  $E(t)$  作傅立叶变换，得频谱分布：

$$\begin{aligned} g(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} E(t) e^{i\omega t} dt = \frac{E_0}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-i\omega_0 t} e^{i\omega t} dt \\ &= \frac{E_0}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{i(\omega - \omega_0)t} dt \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{E_0 \sin[(\omega - \omega_0)\tau/2]}{\omega - \omega_0} \end{aligned}$$

53

波列的能谱：

$$I(\omega) = |g(\omega)|^2 = \frac{2 \sin^2[(\omega - \omega_0)\tau/2]}{\pi(\omega - \omega_0)^2}$$



$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{\tau}$$

$$\tau \rightarrow \infty, \Delta\omega \rightarrow 0$$

54

### 3、造成谱线宽度的原因

#### (1) 自然宽度

$$E_j \quad \Delta E_j \quad \tau \cdot \Delta E \sim \hbar$$

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

#### (2) 多普勒增宽

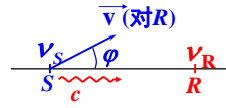
$$\Delta \nu \propto \bar{v} \propto \sqrt{T}, \quad T \uparrow \rightarrow \Delta \nu \uparrow$$

#### (3) 压致增宽（碰撞增宽，统计增宽）

谱线增宽与压强有关  $\Delta \nu \propto \bar{z} \propto p (T \text{一定}), \quad p \uparrow \rightarrow \Delta \nu \uparrow$

55

电磁波不同于机械波，不需要介质。可以证明，只是光源和观察者的**相对速度**  $\vec{v}$  决定接收的频率。由相对论可导出：



$$\nu_R = \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c - v \cos \varphi} \nu_S$$

$v$  为速率

56

②压致增宽。光源中众多的发光原子之间相互作用，干扰了原子的发光过程，造成谱线的增宽，或者是彼此碰撞阻碍原子发光，或者是带电离子的电场对发光原子的斯塔克效应，增宽与原子的数密度有关，或者说与压强有关，因而称为压致增宽。

压致增宽 在天体光谱和各种类型人造光源光谱的观测中，发现谱线随气体压强（或电流）的增大而增宽。谱线宽度随气体（包括电离气体）的压强的增大而增宽的现象叫做谱线的压致增宽。关于谱线压致增宽，历史上曾以两种不同的观点建立了两种不同的理论，即碰撞理论和统计理论。碰撞理论的创始人是H. A. 洛伦兹。他假设辐射原子受到干扰粒子碰撞时截断了波列，在相继两次碰撞的时间内辐射原子不受干扰。由辐射原子和干扰粒子碰撞产生的谱线增宽称为碰撞增宽。

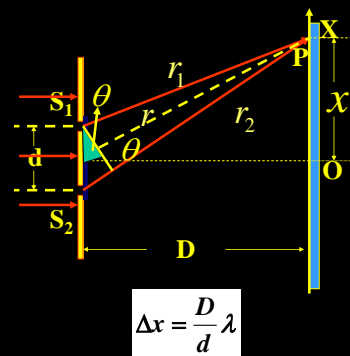
统计理论首先由J. 霍尔茨马克提出。他假设辐射原子始终处在干扰粒子场的作用下，这个作用场依赖于干扰粒子的空间统计分布。在空间统计分布的干扰粒子的作用下产生的谱线增宽称为统计增宽。碰撞理论和统计理论是一般理论的两个极端情况，前者描述了高温、低密度、较轻粒子的突然干扰，后者描述了低温、高密度、较重粒子的持续性干扰。

干扰粒子的扰动引起的辐射原子振动的角频率的变化与干扰粒子和辐射原子间的距离、干扰粒子的种类和相互作用的性质有关。

[http://www.chinabaike.com/article/baike/10022008/200805141\\_490167.html](http://www.chinabaike.com/article/baike/10022008/200805141_490167.html)

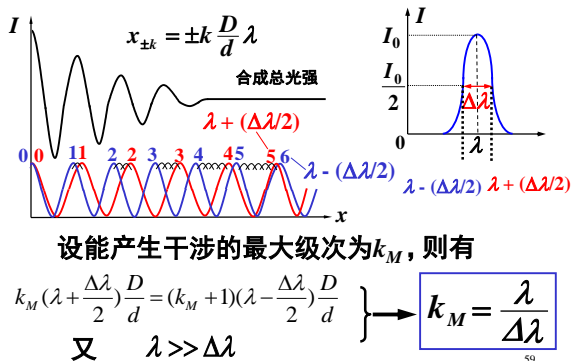
57

### 三、非单色性对干涉条纹的影响

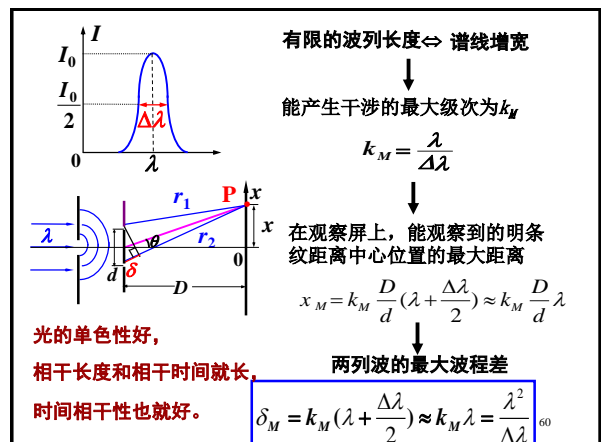


高干涉级的条纹看不清了

### 最大相干级次



59



60

普通单色光：

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

$$\text{相干长度 } \delta_M: 10^{-3} - 10^{-1} \text{ m}$$

激光：

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

$$\delta_M: 10^1 - 10^2 \text{ km}$$

(理想情况)

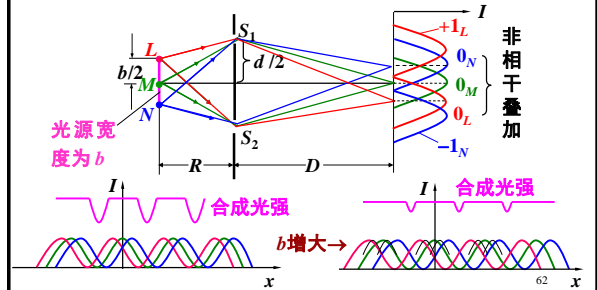
(实际上，一般为  $10^{-1} - 10^1 \text{ m}$ )

61

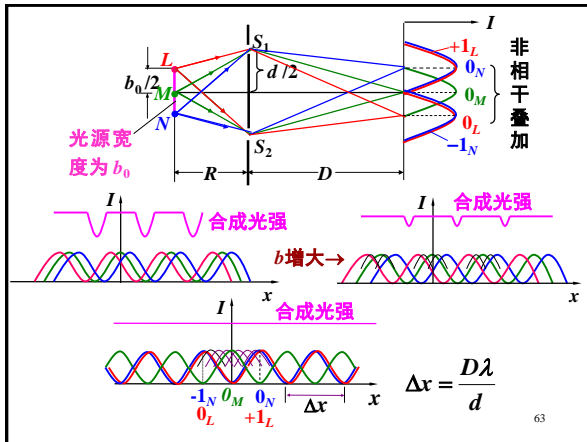
## § 22.4 空间相干性 (spatial coherence)

### 一、空间相干性的概念

—光源宽度对干涉条纹对比度的影响



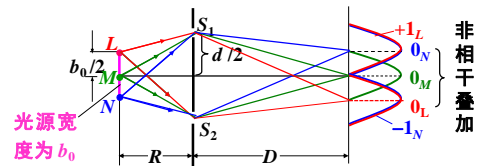
62



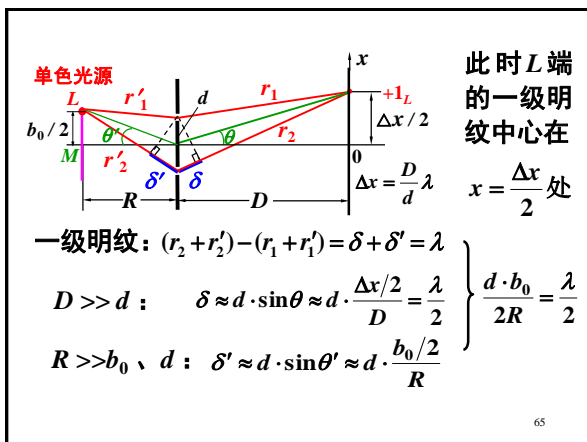
63

### 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  $b_0$  称为光源的极限宽度



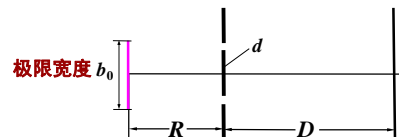
64



65

由  $\frac{d \cdot b_0}{2R} = \frac{\lambda}{2}$ ，得光源的极限宽度：

$$b_0 = \frac{R}{d} \lambda$$



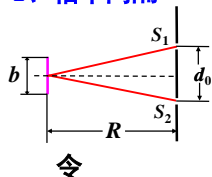
当光源宽度  $b < b_0$  时，才能观察到干涉条纹。

为观察到较清晰的干涉条纹通常取  $b \leq b_0/4$

66

### 三、相干间隔和相干孔径角

#### 1、相干间隔



令

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

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。

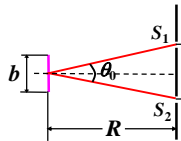
$R$  一定时,  $d_0$  越大, 光场的空间相干性越好。

同屏空间相干性的判断可以理解相干性与  $d$  有关

67

#### 2、相干孔径角

相干间隔也可以用相干孔径角来代替。



$$\theta_0 = \frac{d_0}{R} = \frac{\lambda}{b}$$

—  $d_0$  正对光源中心的张角。

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。

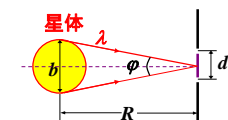
$\theta_0$  越大空间相干性越好。

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

68

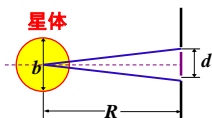
### 四、相干间隔的应用举例

利用空间相干性可以测遥远星体的角直径  $\varphi$



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

使  $d = d_0$ , 则条纹消失。

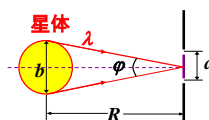


$$\text{由 } d_0 = \frac{R}{b} \lambda = \frac{\lambda}{\varphi}, \text{ 有 } \varphi = \frac{\lambda}{d_0}$$

考虑到衍射的影响, 有

$$\varphi = 1.22 \frac{\lambda}{d_0}$$

69



相干间隔

$$d_0 = \frac{R}{b} \lambda$$

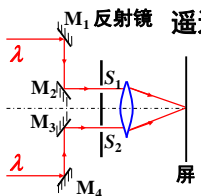
遥远星体相应的  $d_0$  ~ 几至十几米。

测量不方便

迈克耳孙测星干涉仪

70

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  $d_0$  ~ 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),

1920年12月测得:  $d_0 \approx 3.07 \text{ m}$ 。由此得到:

$$\varphi = 1.22 \frac{\lambda}{d_0} = \frac{570 \times 10^{-9}}{3.07} \approx 2 \times 10^{-3} \text{ rad} \approx 0.047''$$

71

### § 22.5 光程 (optical path)

#### 一、光程

为方便计算光经过不同介质时引起的相差, 引入光程的概念。

$$\text{真空中: } \overline{a \xrightarrow{\lambda} b} \quad \Delta\varphi = \varphi_b - \varphi_a = \frac{r}{\lambda} 2\pi$$

$$\text{介质中: } \overline{a \xrightarrow{\lambda' n} b} \quad \Delta\varphi = \varphi_b - \varphi_a = \frac{r}{\lambda'} 2\pi$$

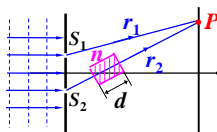
$$\lambda' = \frac{u}{\nu} = \frac{c/n}{\nu} = \frac{c}{\nu n} = \frac{\lambda}{n} \rightarrow \Delta\varphi = \frac{nr}{\lambda} 2\pi$$

72

这表明，光在介质中传播路程  $r$  和在真空中传播路程  $nr$  引起的相位差相同。我们称  $nr$  为介质中与路程  $r$  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] 计算图中光通过路程  $r_1$  和  $r_2$  在  $P$  点的相差。



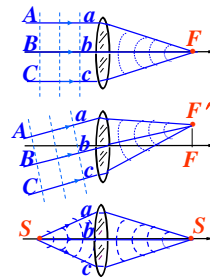
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \{ [(r_2 - d) + nd] - r_1 \}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} [(r_2 - r_1) + (n-1)d]$$

73

## 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，说明各光线在此同相叠加。而  $A$ 、 $B$ 、 $C$  或  $a$ 、 $b$ 、 $c$  都在同相面上。说明  $A \rightarrow F$ ， $B \rightarrow F$ ， $C \rightarrow F$  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。

74

## § 22.6 薄膜干涉 (film interference) (一) —— 等厚条纹 (equal thickness fringes)

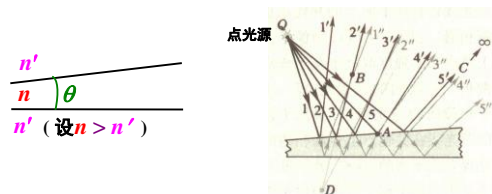
- ▲ 薄膜干涉是分振幅干涉。
- ▲ 日常中见到的薄膜干涉：肥皂泡上的彩色、雨天地面上油膜的彩色、昆虫翅膀的彩色....
- ▲ 膜为何要薄？— 光的相干长度所限。  
膜的薄、厚是相对的，与光的单色性好坏有关。
- ▲ 普遍地讨论薄膜干涉是个极为复杂的问题。实际意义最大的是 **厚度不均匀薄膜表面的等厚条纹** 和 **厚度均匀薄膜在无穷远处的等倾条纹**。

75

## 一、劈尖 (wedge film) 干涉

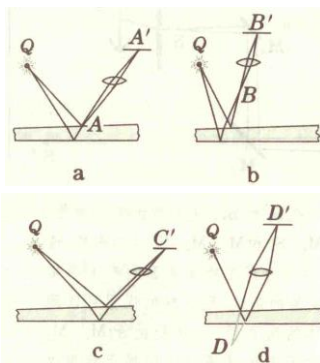
夹角很小的两个平面所构成的薄膜叫**劈尖**。

$$\theta: 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ rad} \approx 57 \times (10^{-4} \sim 10^{-5}) \text{ degree}$$



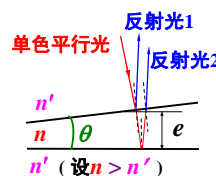
在两个反射光束交叠区域里每个点上都有一对相干光线在那里相交

76



77

本节讨论不均匀薄膜表面的**等厚条纹**。



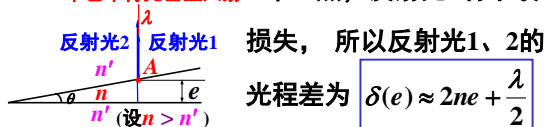
1、2两束反射光来自同一束入射光，它们可以产生干涉。

1、2两束反射光相干叠加，就可形成明暗条纹。

78

实际应用中大多是平行光垂直入射到劈尖上,观察薄膜表面的干涉条纹。考虑到劈尖夹角极小, 反射光1、2在膜面的光程差可简化计算。

单色平行光垂直入射 在A点, 反射光1有半波

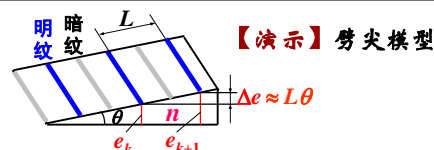


明纹:  $\delta(e) = k\lambda, k = 1, 2, 3 \dots$

暗纹:  $\delta(e) = (2k' + 1)\frac{\lambda}{2}, k' = 0, 1, 2, 3 \dots$

同一厚度e对应同一级条纹——等厚条纹

79



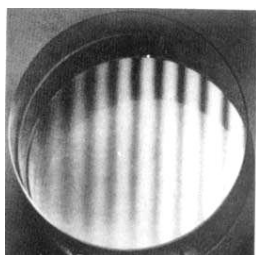
条纹间距:  $L \approx \frac{\Delta e}{\theta}$

$$\delta(e) \approx 2ne + \frac{\lambda}{2}, \Delta\delta = 2n\Delta e = \lambda \quad 2n\Delta e = \lambda$$

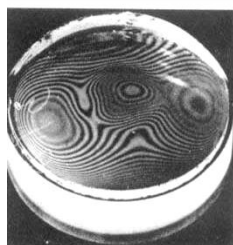
$$2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \quad 2ne_{k+1} + \frac{\lambda}{2} = (k+1)\lambda$$

因此  $L \approx \frac{\lambda}{2n\theta}$   $\theta \downarrow \rightarrow L \uparrow$

80



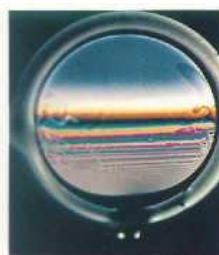
劈尖



不规则表面

等厚干涉条纹

81



白光入射



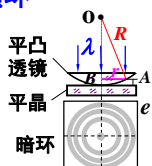
单色光入射

肥皂膜的等厚干涉条纹

【演示】白光经肥皂膜的干涉、空气薄膜干涉

82

## 二、牛顿环



R 很大

1 ~ 2m

为什么?

平行光垂直入射 对称性分析条纹特点

光程差:  $\delta = 2e + \frac{\lambda}{2}$

$$r^2 = R^2 - (R - e)^2 \approx 2Re$$

$$e = \frac{r^2}{2R} \quad (1)$$

83

$$e = \frac{r^2}{2R} \quad (1)$$

暗环:

$$\delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2 \dots) \quad (2)$$

(1)、(2) → 第k个暗环半径:  $r_k = \sqrt{kR\lambda} \propto \sqrt{k}$

$$\therefore r_k \propto \sqrt{k} \rightarrow r_1 : r_2 : r_3 = 1 : \sqrt{2} : \sqrt{3}$$

$$r_{k+1} - r_k = (\sqrt{k+1} - \sqrt{k})\sqrt{R\lambda} = \frac{1}{\sqrt{k+1} + \sqrt{k}}\sqrt{R\lambda}$$

$k \uparrow \rightarrow r_k \uparrow \rightarrow$  条纹间距 $\downarrow$ , 内圈的条纹级次低。

84



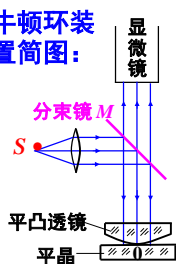
## 明环半径公式

$$r_k = \sqrt{\frac{(2k-1)R\lambda}{2}}$$

(自己推导)

$$k = 1, 2, 3 \dots$$

## 牛顿环装置简图:

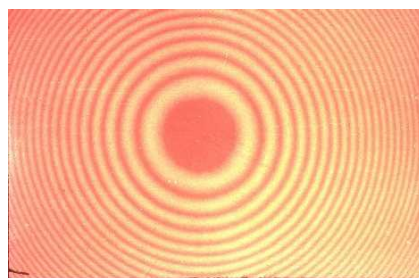


## 【思考】

$R$  很大  $1 \sim 2\text{m}$

- 平凸透镜向上移, 条纹怎样移动?
- 白光入射条纹情况如何?
- 透射光条纹情况如何?

85



牛顿环照片

【演示】白光牛顿环

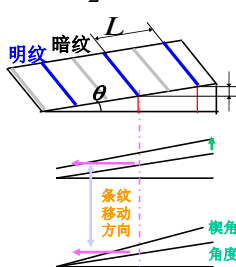
油膜扩散牛顿环收缩

86

## • 条纹的移动

(主体反映膜的厚度变化)(主体反映楔角的改变)

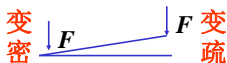
$$2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (k=1,2,3,\dots)$$



## • 条纹疏密的变化

(主体反映楔角的改变)

$$L \approx \frac{\lambda}{2n\theta}$$



怎么看条纹移动? 盯住某一级  
看这一级对应的厚度在哪? 移动的方向就知道了

87

## 小结:

- 条纹形状: 反映了膜的等厚线
- 条纹移动: 反映了膜厚的变化

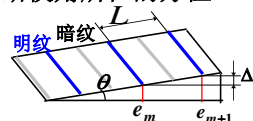
可以判断楔角的方向

- 条纹间距: 反映了楔角大小

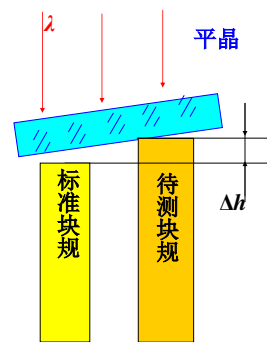
$$L \approx \frac{\lambda}{2n\theta}$$

- 条纹的疏密(间距)变化: 反映了楔角的变化

可以判断楔角所在的方向



88



思考: 怎么判断楔角的位置?

89

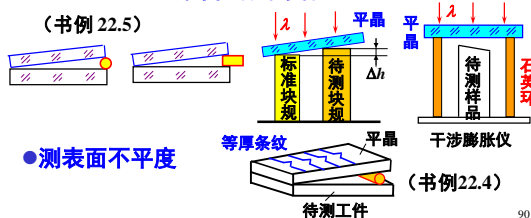
## 三、等厚条纹的应用

### 1、劈尖的应用

依据公式  $L = \frac{\lambda}{2n\theta}$

- 测波长: 已知  $\theta$ 、 $n$ , 测  $L$  可得  $\lambda$
- 测折射率: 已知  $\theta$ 、 $\lambda$ , 测  $L$  可得  $n$
- 测细小直径、厚度、微小变化:

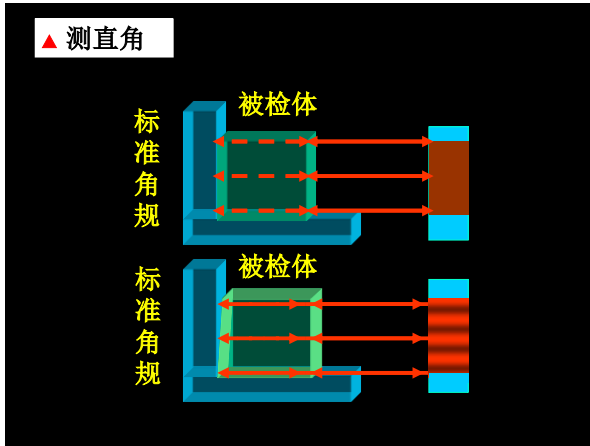
(书例 22.5)



- 测表面不平度

(书例 22.4)

90



2、牛顿环的应用：依据公式  $r_k = \sqrt{kR\lambda} \propto \sqrt{k}$

$r_{k+m}^2 - r_k^2 = mR\lambda$

- 测透镜球面的半径  $R$   
已知  $\lambda$ , 测  $m$ ,  $r_{k+m}$ ,  $r_k$ , 可得  $R$ 。
- 测波长  $\lambda$   
已知  $R$ , 测出  $m$ ,  $r_{k+m}$ ,  $r_k$ , 可得  $\lambda$ 。

92

●检验透镜球表面质量

若条纹如图，说明待测透镜球表面不规则，且半径有误差。  
一圈条纹对应  $\frac{\lambda}{2}$  的球面误差。

93

【思考】如何区分如下两种情况？

94

§ 22.7 薄膜干涉（二）— 等倾条纹  
(equal inclination fringes)

一. 点光源照明时的干涉条纹分析

光束1、2的光程差：

$$\delta = n(\overline{AB} + \overline{BC}) - n' \overline{AD} + \frac{\lambda}{2}$$

$$\overline{AB} = \overline{BC} = \frac{e}{\cos r}$$

$$\overline{AD} = \overline{AC} \cdot \sin i = 2e \cdot \tan r \cdot \sin i$$

$$\therefore \delta = \frac{2ne}{\cos r} - \frac{2n' e \cdot \sin r \cdot \sin i}{\cos r} + \frac{\lambda}{2}$$

又  $n' \sin i = n \sin r$  得  $\delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2}$

膜厚均匀 ( $e$  不变)

95

$\delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2}$  或  $\delta = 2e \sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \delta(i)$

光程差只与折射角 (入射角) 有关

明纹  $\delta(i) = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots (No 0)$

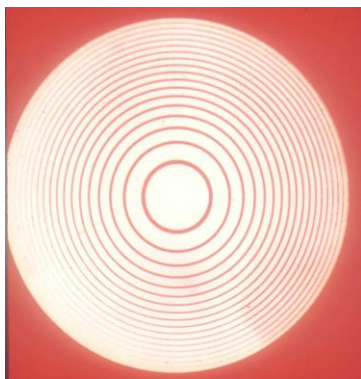
暗纹  $\delta(i) = (2k' + 1) \frac{\lambda}{2}, k' = 0, 1, 2, \dots$

当  $k$  ( $k'$ ) 一定时,  $i$  也一定, 即倾角

$i$  相同的光线对应同一条干涉条纹 — 等倾条纹

【演示】等倾干涉模型

96



用迈克耳孙干涉仪观察的等倾干涉条纹

97

$$\delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2} \quad \text{或} \quad \delta = 2e\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \delta(i)$$

**明纹**  $\delta(i) = k\lambda, k = 1, 2, 3, \dots$

**条纹的特点:**

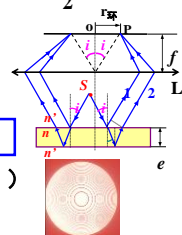
**形状:** 一系列同心圆环  $r_{\text{环}} = f \tan i$

**条纹间隔分布:** 内疏外密 (为什么?)

**条纹级次分布:** 内高外低  $r_k \downarrow \rightarrow i \downarrow \rightarrow \delta \uparrow \rightarrow k \uparrow$

**膜变厚, 环纹扩大:**  $k$  一定,  $e \uparrow \rightarrow i \uparrow \rightarrow r_k \uparrow$

**波长对条纹的影响:**  $k, e$  一定,  $\lambda \uparrow \rightarrow i \downarrow \rightarrow r_k \downarrow$



98

$$\delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2} \quad \text{或} \quad \delta = 2e\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \delta(i)$$

**条纹间隔分布:** 内疏外密 (为什么?)



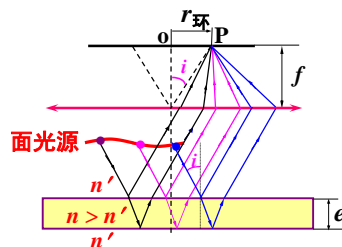
$$\delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$-2ne \sin r \Delta r = \Delta k \lambda$$

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2ne \sin r}$$

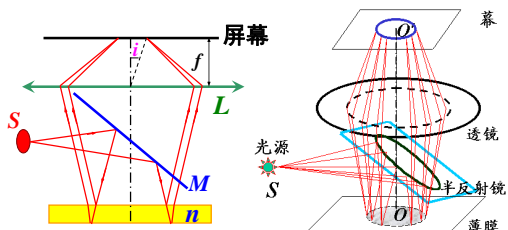
99

## 二、面光源照明时, 干涉条纹的分析



只要  $i$  相同, 都将汇聚在同一个干涉环上 (非相干叠加), 因而明暗对比更鲜明。

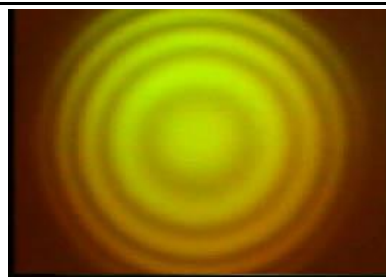
100



观察等倾条纹的实验装置和光路

**对于观察等倾条纹, 没有光源宽度和条纹衬比度的矛盾!**

101



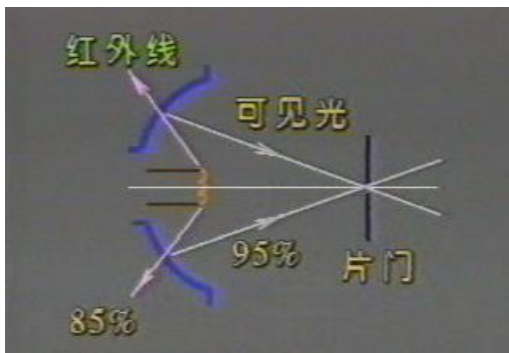
等倾条纹照片

**演示** 等倾干涉条纹 (激光、钠光F-P标准具)

**△三. 应用:** 增透射膜和增反射膜 (书例题22.6)

增透和增反膜 (截选).mpg

102



冷光镜原理图

103

## § 22.8 迈克耳孙干涉仪 (Michelson interferometer)

### 一. 仪器结构、光路

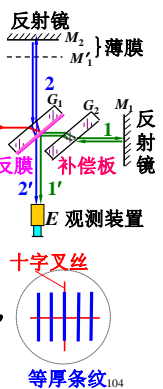
### 二. 工作原理

光束2'和1'发生干涉

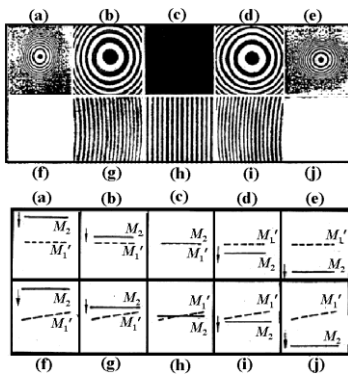
- 若  $M_1$ 、 $M_2$  平行  $\Rightarrow$  等倾条纹
  - 若  $M_1$ 、 $M_2$  有小夹角  $\Rightarrow$  等厚条纹
- 补偿板可补偿两臂的附加光程差。  
若  $M_1$  平移  $\Delta d$  时，干涉条移过  $N$  条，

则有：

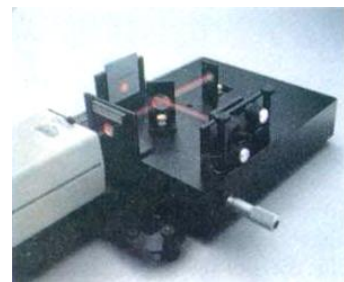
$$\Delta d = N \cdot \frac{\lambda}{2}$$



等厚条纹<sup>104</sup>



105

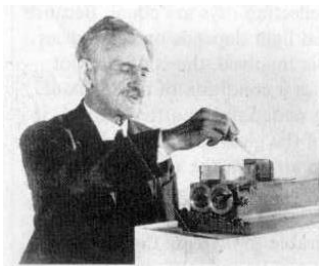


迈克耳孙干涉仪

演示 迈克耳孙干涉仪的等倾条纹

迈克耳孙干涉条纹 (截选).mpg

106



迈克耳孙在工作

## 迈克耳孙 (A.A. Michelson)

美籍德国人  
因创造精密光  
学仪器，用以  
进行光谱学和  
度量学的研究，  
并精确测出光  
速，获1907年  
诺贝尔物理奖。

107

迈克耳孙干涉仪至今仍是许多光学仪器的核心。

爱因斯坦赞誉道：

“我总认为迈克耳孙是科学中的艺术家，他的最大乐趣似乎来自实验本身的优美和所使用方法的精湛，他从来不认为自己在科学上是个严格的‘专家’，事实上的确不是，但始终是个艺术家。”

许多著名的实验都堪称科学中的艺术，如：

全息照相实验、吴健雄实验、施—盖实验等等。

重要的物理思想 + 巧妙的实验构思  
+ 精湛的实验技术  $\rightarrow$  科学中的艺术

108

### 三. 迈克耳孙干涉仪的应用

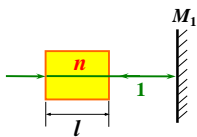
#### ▲测量微小位移

以波长 $\lambda$ 为尺度, 可精确到 $\frac{\lambda}{20}$

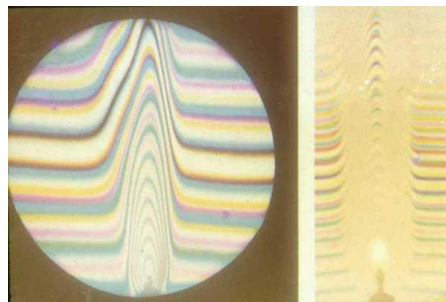
#### ▲测介质折射率

光路1中插入待测介质, 产生附加光程差:  

$$\delta = 2(n-1)l$$
  
 若相应移过 $N$ 个条纹, 则应有  $\delta = 2(n-1)l = N\lambda$   
 由此可测折射率 $n$ 。



109



用迈克耳孙干涉仪测气流

110

### ▲\*光学相干CT—断层扫描成像新技术 (Optical Coherence Tomography, 简称OCT) 计算机断层成像

(CT-Computed Tomography)

第一代: X射线 CT

$\gamma$ 射线 CT—工业CT

第二代: NMR CT—核磁共振成像

第三代: 光学相干CT—OCT

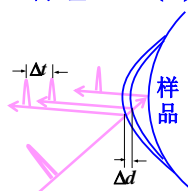
空间分辨率达微米的量级

111

#### 1. 原理

##### (1) 样品反射光脉冲的延迟时间

样品中不同位置处反射的光脉冲延迟时间也不同:



$$\Delta t \approx \frac{2n\Delta d}{c} = \frac{2n\Delta d}{3 \times 10^8 \text{ m/s}}$$

数量级估计:  $\Delta t \approx 10^{-8} \Delta d \cdot \text{s/m} = 10^{-14} \Delta d \cdot \text{s}/\mu\text{m}$

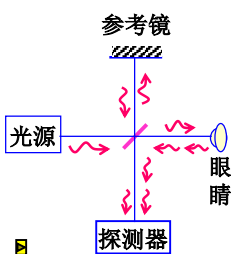
要实现微米量级的空间分辨率 (即 $\Delta d \sim \mu\text{m}$ ), 就要求能测量  $\Delta t \leq 10^{-14}$  秒的时间延迟。

激光器的脉冲宽度要很小 $\sim 10^{-15}$ 秒——飞秒

112

时间延迟短至 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ s, 电子设备难以直接测量, 可利用迈克耳孙干涉仪原理测量。

当参考光脉冲和信号光脉冲序列中的某一个脉冲同时到达探测器表面时, 就会产生光学干涉现象。这种情形, 只有当参考光与信号光的这个脉冲经过相等光程时才会产生。



因为 $10^{-15}$ 秒的光脉冲大约只有一个波长。

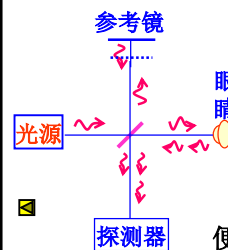
113

测量不同结构层面返回的光延迟, 只须移动参考镜, 使参考光分别与不同的信号光产生干涉。

分别记录下相应的参考镜的空间位置, 这些位置便反映了眼球内不同结构的相对空间位置。

参考臂扫描可得到样品深度方向的一维测量数据。光束在平行于样品表面的方向进行扫描测量, 可得到横向的数据。

将得到的信号经计算机处理, 便可得到样品的立体断层图像。



### (2) 样品反射光脉冲强度的处理

不同材料或结构的样品反射光的强度不同。根据反射光信号的强弱，赋予其相应的色彩，这样便得到样品的**假彩色图**。

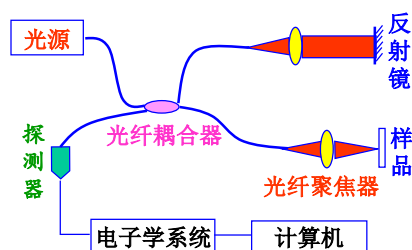
### (3) OCT成像的特点：

- 对光程较长的多次反射光有极强的抑制作用。即使透明度很差的样品，仍可得到清晰的图像。
- 图象的断层分辨率由光的脉宽决定
- 图象的横向分辨率由光束的直径决定

115

## 2. 实验装置（示意图）

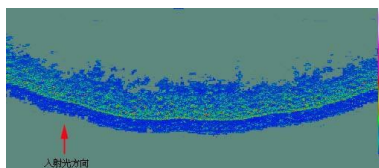
——**光纤化的迈克耳孙干涉仪**



116

## 3. 应用

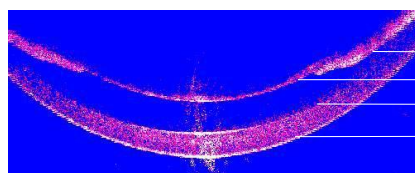
生物 医学 材料科学 ·····



**大葱表皮的光学相干断层扫描 (OCT) 图像**

实际样品大小为 $10\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，图中**横向分辨率**约为 $20\mu\text{m}$ ，**纵向分辨率**约为 $25\mu\text{m}$ 。

117



**兔子眼球前部的OCT图像**



**第二十二章结束**

118