

## ➤上次课内容回顾

### § 5.1 像差概述

球差，色差

### § 5.2 人的眼睛

人眼结构，简化眼，人眼的调节功能，人眼成像，人眼防护

### § 5.3 助视仪器的放大本领

放大本领： $M = \frac{l'}{l} \approx \frac{U'}{U}$

放大镜的放大本领： $M = \frac{U'}{U} = \frac{25}{f'}$  ( $f'$  以cm 为单位)

## 本次课内容提要：

§ 5.3 目镜（了解）

§ 5.4 显微镜的放大本领（掌握）

§ 5.5 望远镜的放大本领（掌握）

§ 5.6 光阑 光瞳（了解+自学）

§ 5.8 物镜的聚光本领（自学）

§ 5.10 助视仪器的分辨本领（掌握）

§ 5.11 分光仪器的分辨本领（掌握）

## § 5.4 目 镜

### 一、目镜

**1、定义：**用于放大其它光具组（e.g., 物镜）所成像的助视仪器。

要求：A、放大本领高；

B、能校正像差、色差。

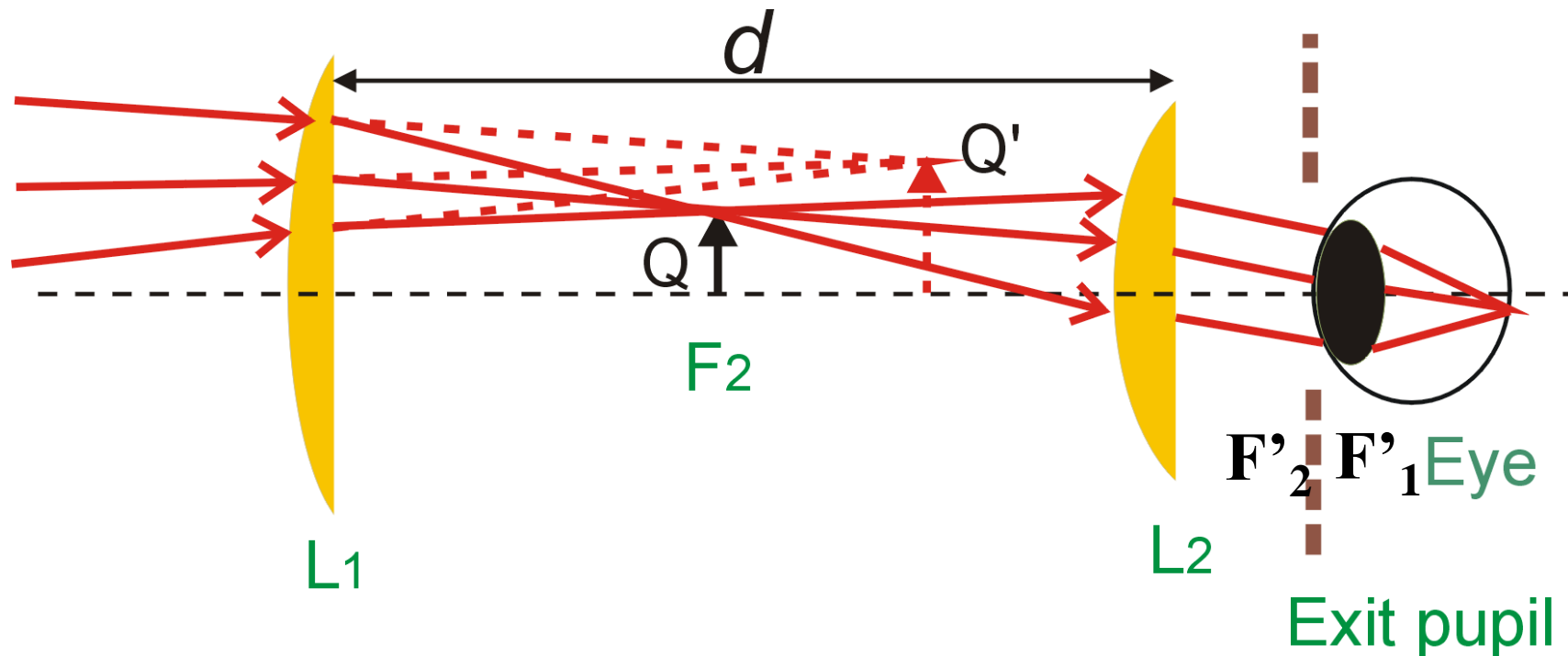
**2、结构：**场镜+视镜+分划板（刻度尺）

- 场镜： 面向物体的透镜（或透镜组）
- 视镜： 接近人眼的透镜（或透镜组）
- 分划板： 包含透明刻度尺，用于提高测量精度。



## 二、两种目镜

### 1) 惠更斯 (Huygens) 目镜

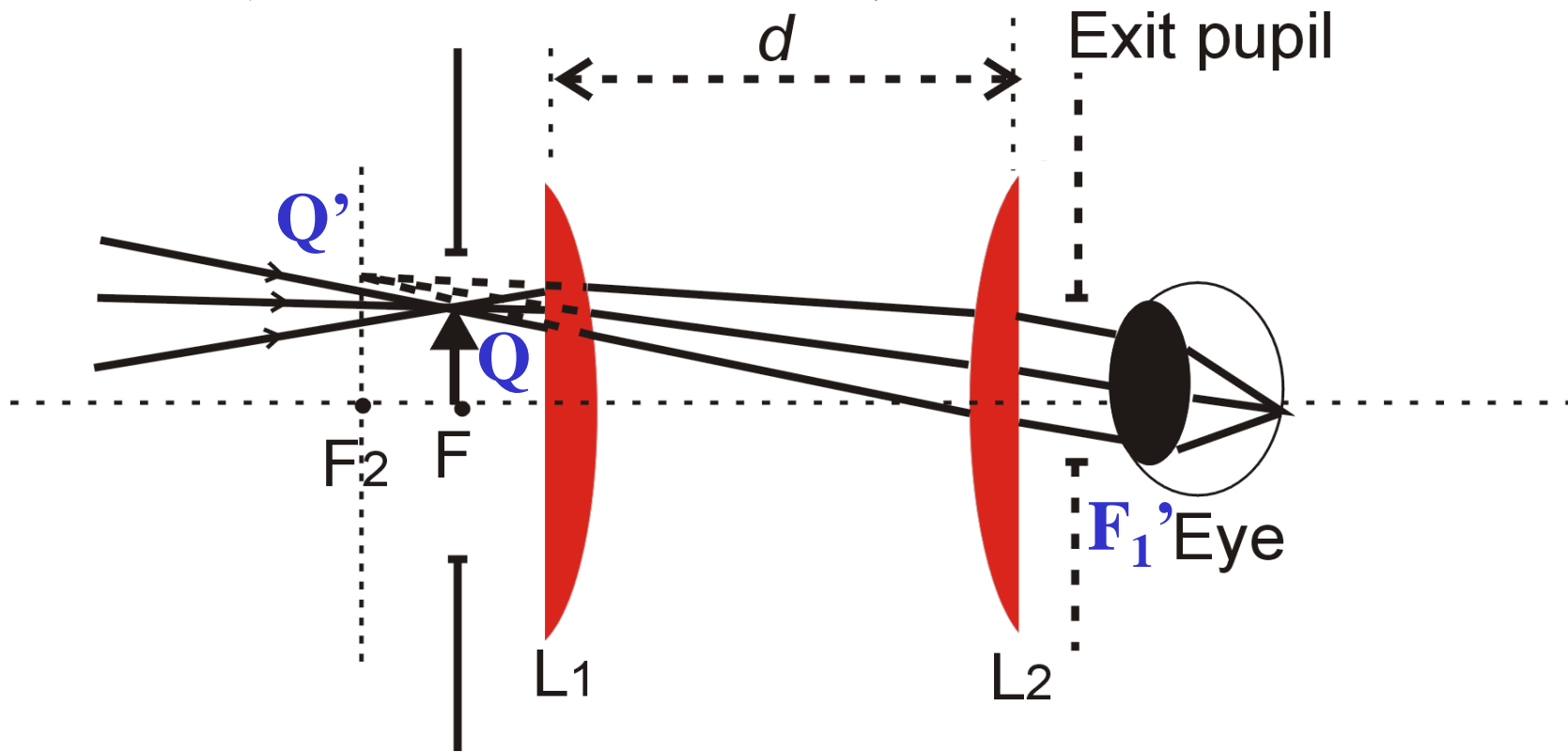


二镜凸面向物镜  $f'_1 : f'_2 : d = 3 : 1 : 2$

视角大（可达 $40^\circ$ ），结构紧凑，适用于生物显微镜。

观察像

## 2) 冉斯登 (Ramsden) 目镜



### 二镜凸面相向

冉镜可用于直接观察实物，配上分划板可精确测量实物和物镜所成的像的长度。

# ➤ 光学前沿：显微镜(Microscope)

**显微镜**是由一个透镜或几个透镜的组合构成的一种光学仪器，是人类进入原子时代的标志。主要用于放大微小物体成为人的肉眼所能看到的仪器。

显微镜分**光学显微镜**和**电子显微镜(电镜)**



生物显微镜



偏振光显微镜



倒置电脑型显微镜



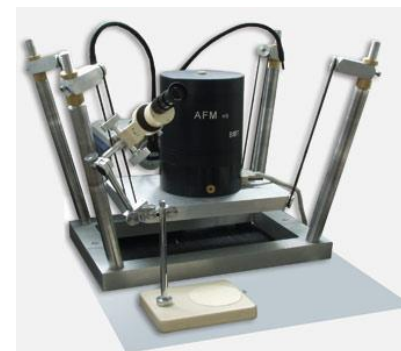
激光扫描共聚焦显微镜



透射电子显微镜(TEM)



扫描电子显微镜(SEM)



原子力显微镜(AFM)

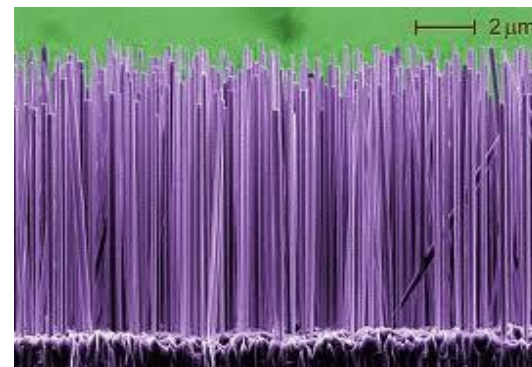
# 电子显微镜拍摄的照片



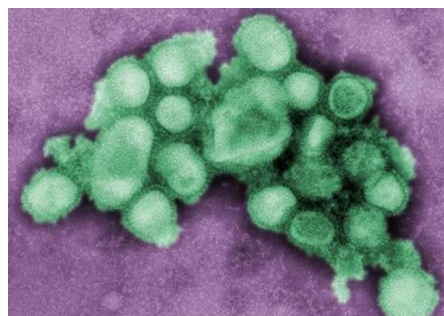
家蝇的复眼



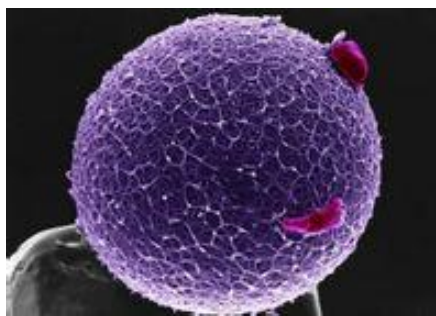
放大100万倍的螨虫



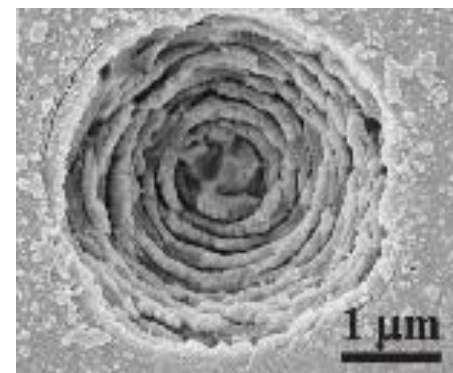
纳米线



H1N1病毒



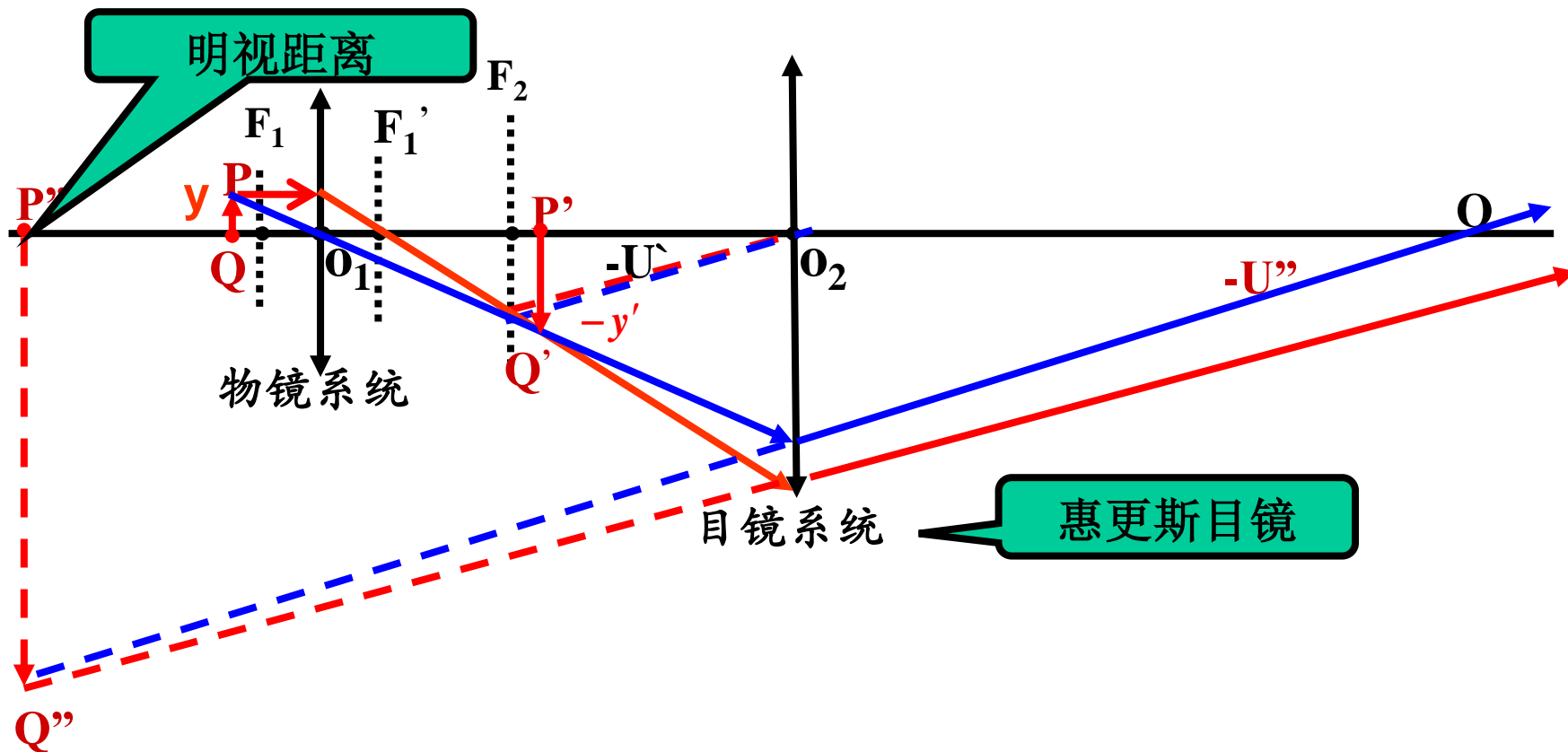
红色冠细胞



硅表面的微结构

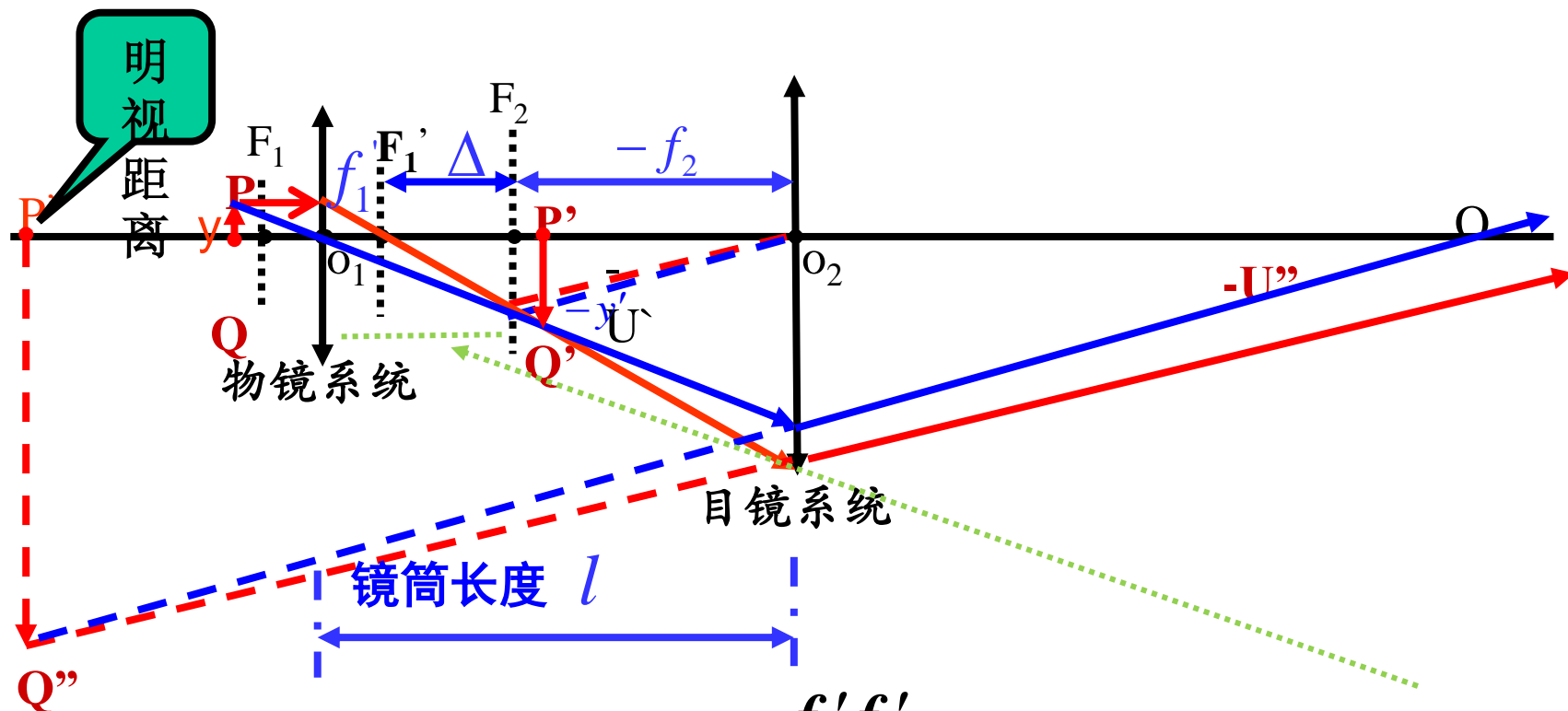
## § 5.5 显微镜的放大本领

### 一、光路图





## 二、放大本领



整个系统像方焦距为:  $f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta}$   $\Delta \approx l \approx s_1'$

$$\therefore M = \frac{25 \text{ cm}}{f'} = -\frac{25 \text{ cm} \Delta}{f_1' f_2'} \approx \left( -\frac{l}{f_1'} \right) \cdot \left( \frac{25 \text{ cm}}{f_2'} \right)$$

负号表示像是倒立的

物镜的横向放大率 目镜的放大本领<sup>9</sup>

## ➤ 知识窗：望远镜(Telescope)

**望远镜**是一种利用凹透镜和凸透镜观测遥远物体的光学仪器。利用通过透镜的光线折射或光线被凹镜反射使之进入小孔并会聚成像，再经过一个放大目镜而被看到。



双筒望远镜



单筒望远镜



军用望远镜

望远镜主要指**光学望远镜**。

**天文望远镜**包括了射电望远镜，红外望远镜，X射线和伽马射线望远镜。



40m射电望远镜



红外望远镜



哈勃空间望远镜

## ➤ 知识窗：哈勃空间望远镜（P178）

**哈勃空间望远镜**（Hubble Space Telescope，缩写为HST），是以天文学家爱德温·哈勃（Edwin Powell Hubble）为名，在轨道上环绕着地球的望远镜。哈勃望远镜可看到宇宙中97%的天体。



哈勃空间望远镜



地面观测



用哈勃望远镜观测



哈勃望远镜观察到新星的诞生

## § 5.6 望远镜的放大本领

### 一、定义：

帮助人眼观察远处物体的放大镜。

像并不比原物大，只相当把远物移近，增大对人眼的视角。

1、结构：物镜系统+目镜系统

2、分类： ① 按物镜的种类分：

A、反射式望远镜    B、折射式望远镜

② 按目镜种类分：

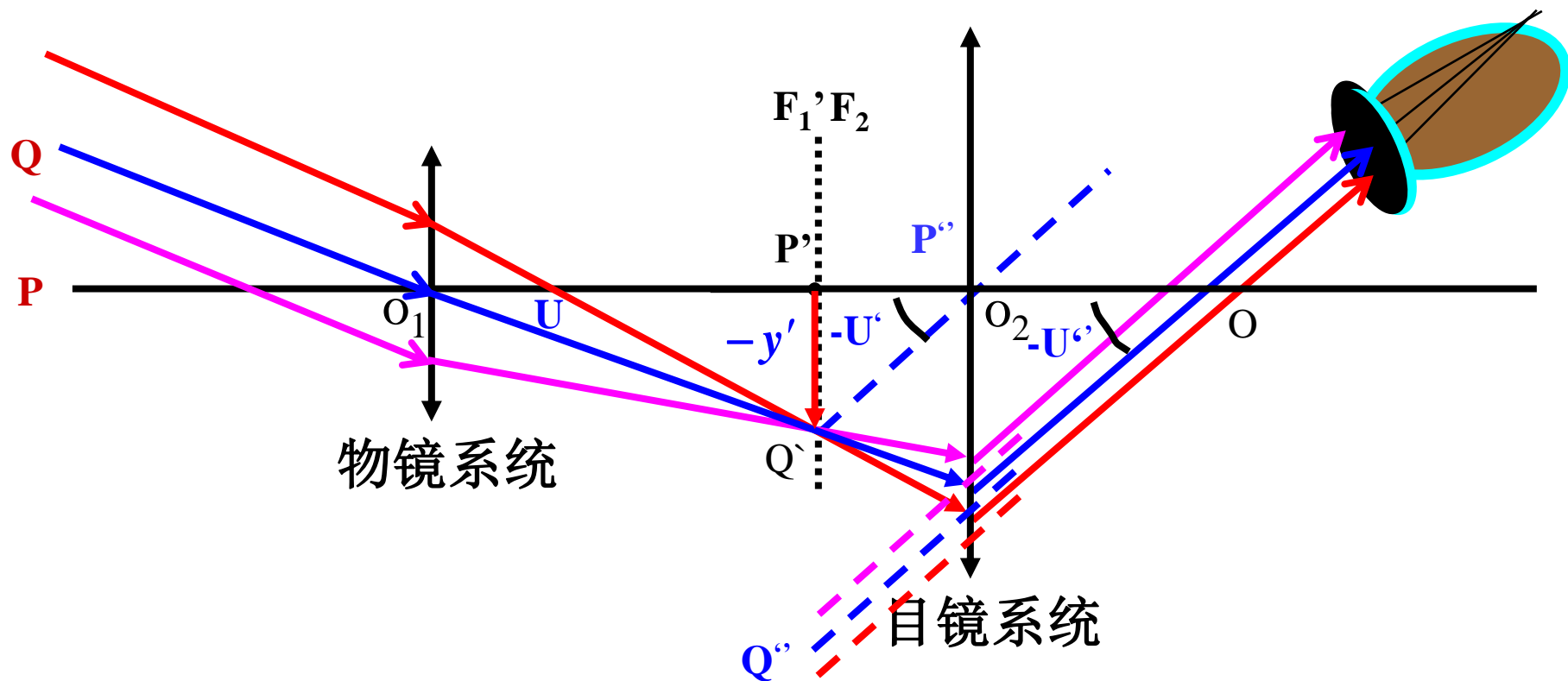
A、开普勒望远镜：目镜为会聚透镜；

B、伽利略望远镜：目镜为发散透镜。

## 二、开普勒望远镜

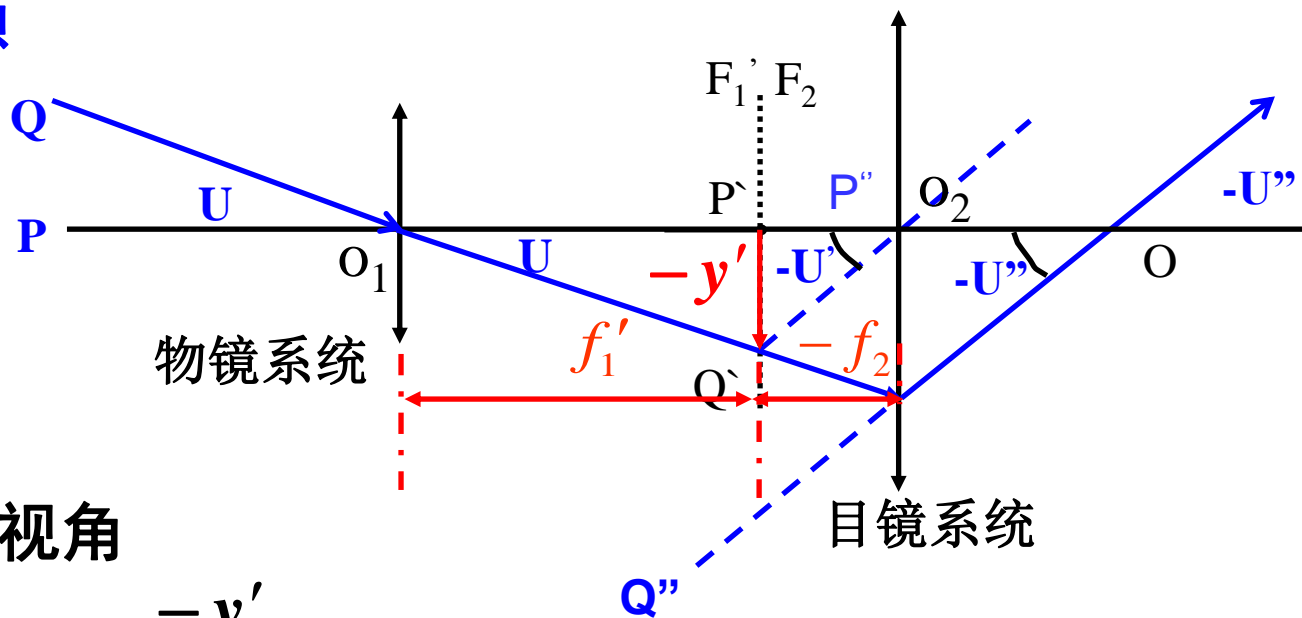
### 1. 结构特点：

物镜目镜均为会聚透镜，物镜像方焦点与目镜物方焦点重合。



像  $Q''$  位于无穷远处

## 2、放大本领



Q''对人眼的视角

$$-U'' = -U' = \frac{-y'}{-f_2}$$

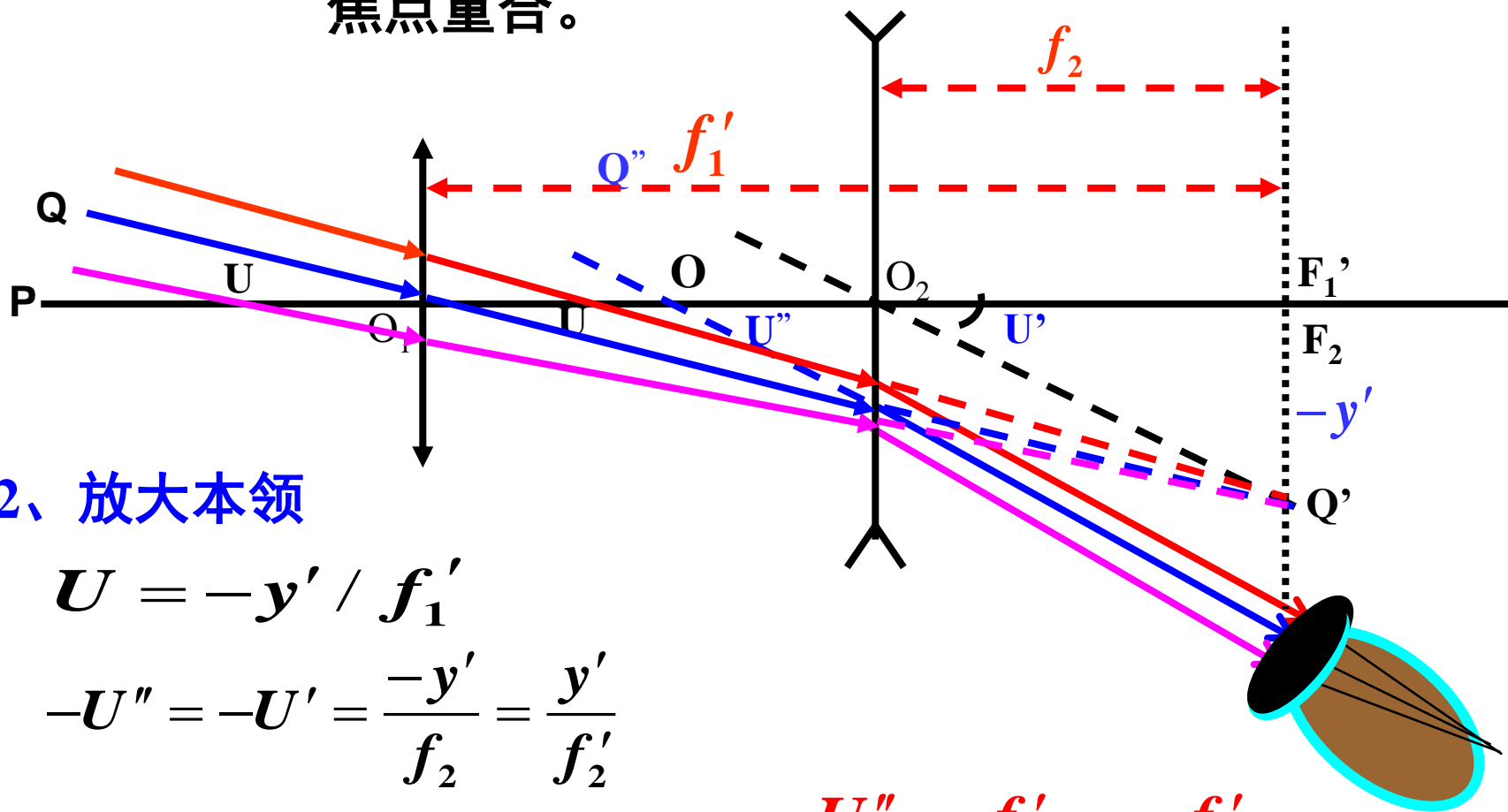
Q对人眼的视角  $U = \frac{-y'}{f_1'}$

观察物较远，眼睛前后移动距离不大时，视角几乎不变

开普勒望远镜的放大本领： $M = \frac{U''}{U} = \frac{f_1'}{f_2} = -\frac{f_1'}{f_2'}$

### 三、伽利略望远镜

1、结构特点：物镜会聚，目镜发散，物镜像方焦点与目镜物方焦点重合。



2、放大本领

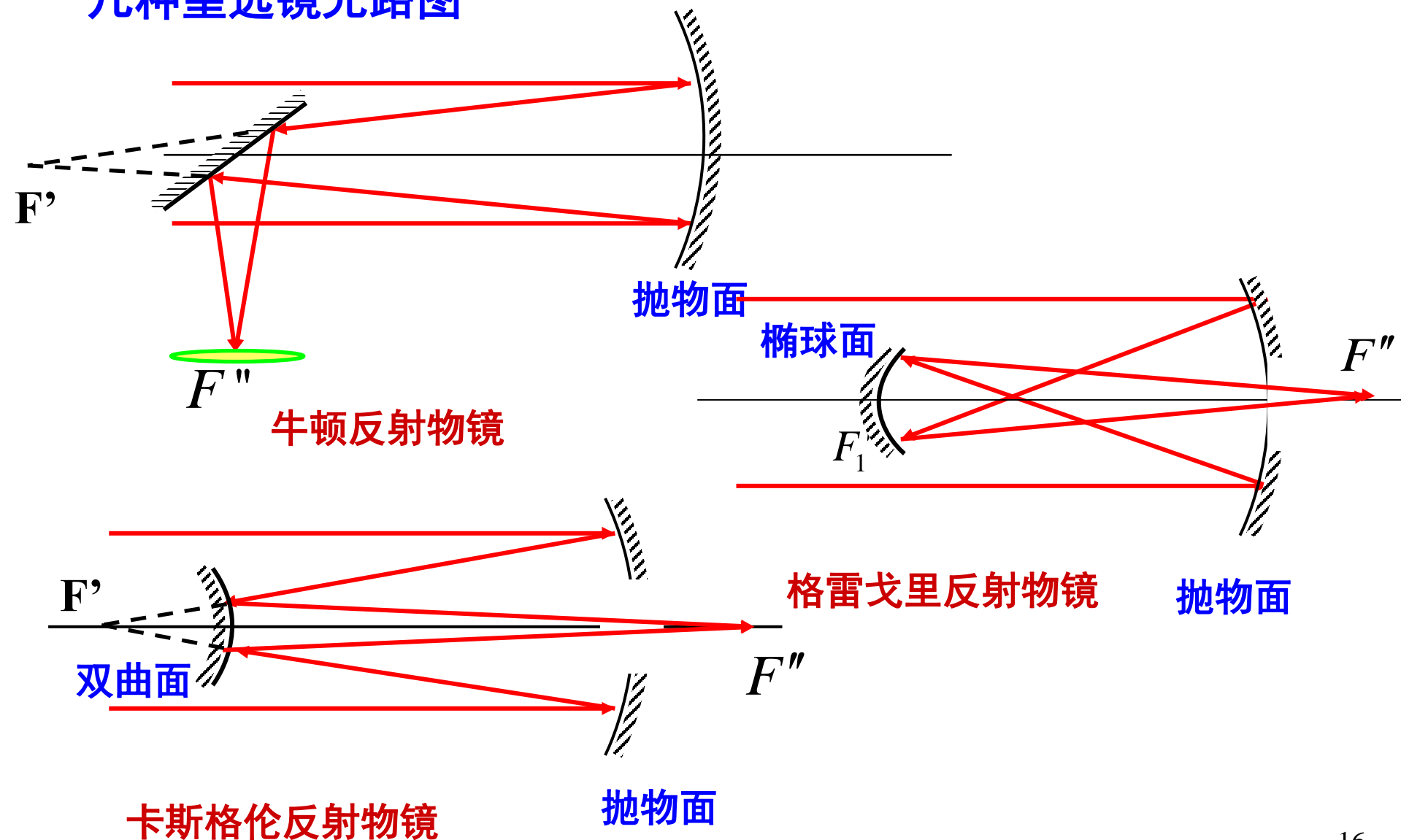
$$U = -y' / f_1'$$

$$-U'' = -U' = \frac{-y'}{f_2} = \frac{y'}{f_2'}$$

伽利略望远镜的放大本领： $M = \frac{U''}{U} = \frac{f_1'}{f_2} = -\frac{f_1'}{f_2'}$

# 四、反射式望远镜

## 几种望远镜光路图

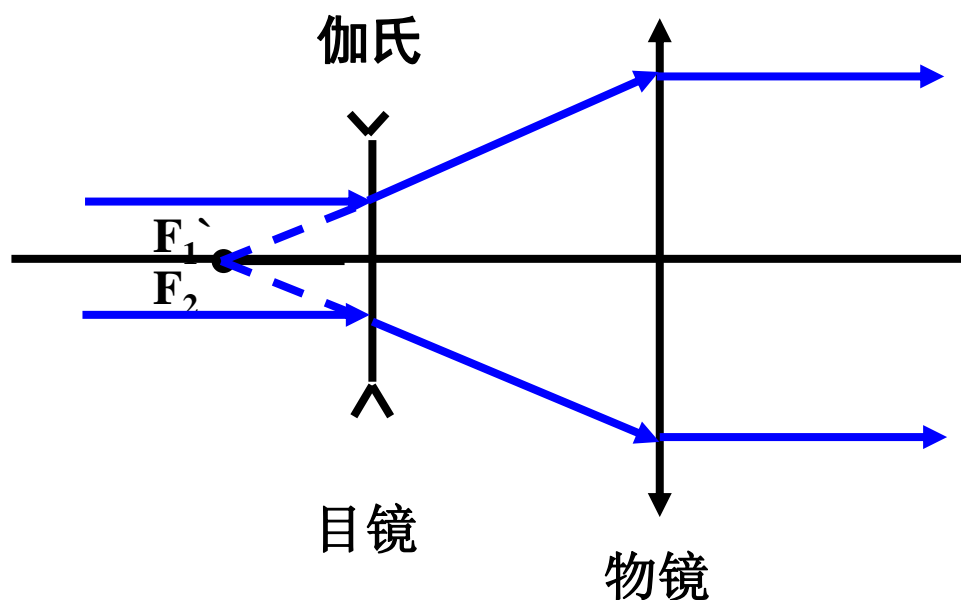
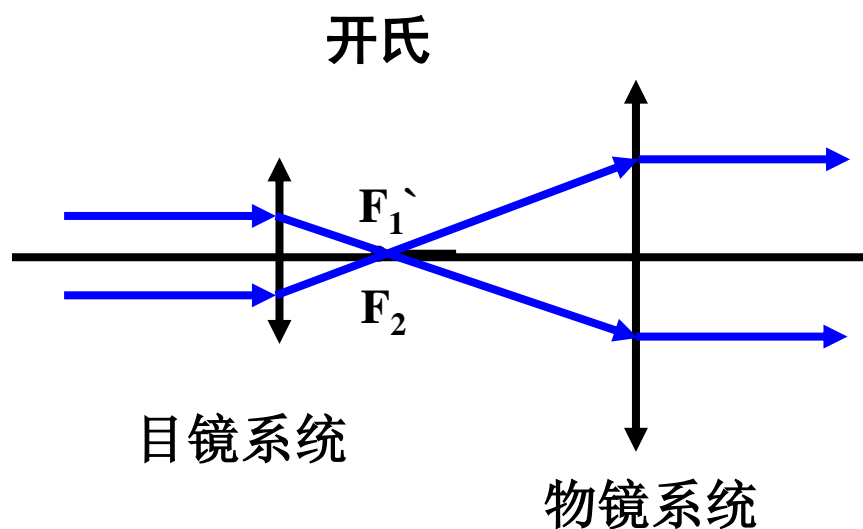




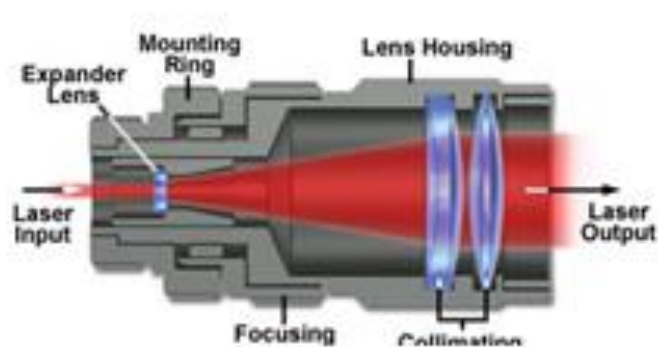
## 五、激光扩束器

1、**定义**:激光扩束器——将激光束横截面扩大的光学仪器。

2、**装置** —倒用的折射式望远镜是很好的激光扩束器。



$$\text{扩束倍数} = f_o' / f_e$$



连续变焦扩束镜头

**练习** 一照相机对准远物时，底片距物镜18 cm，当镜头拉至最大长度时，底片与物镜相距20 cm，求目的物在镜头前的最近距离？(P208 习题4-3)

**解：**  $f' = 0.18 \text{ m}, s' = 0.20 \text{ m}$

照相机（薄透镜）的成像公式：
$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$$

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{f'} = \frac{1}{0.20} - \frac{1}{0.18}$$

$$s = -1.8 \text{ m}$$

目的物在镜前的最近距离为 1.8 m

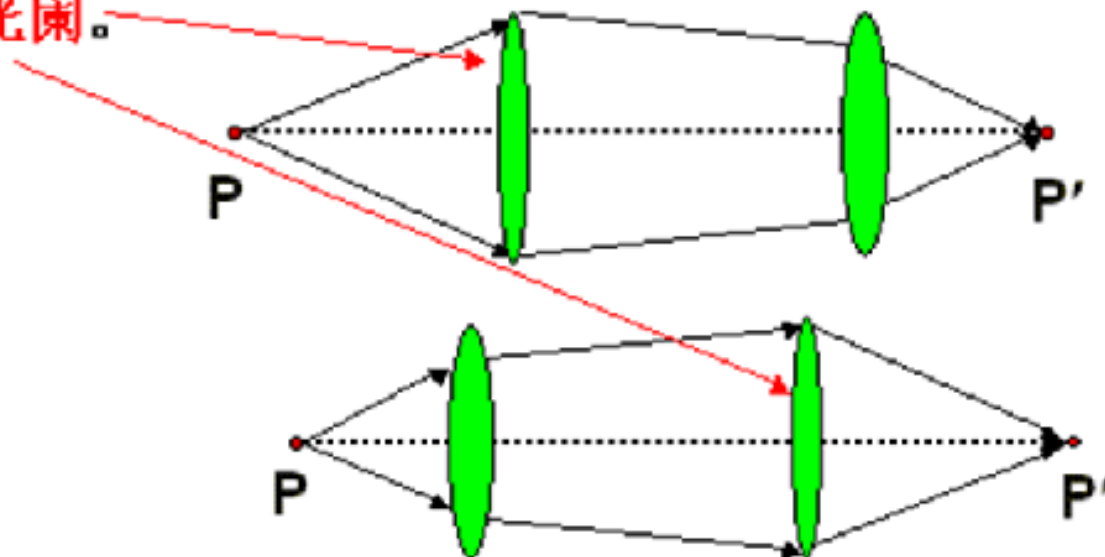
## § 5.7 光阑 光瞳 (略讲)

### 一、光阑的概念

所有光学元件的边缘和特加的有一定形状的开孔的屏统称为光阑，它们在光学系统中起限制光束的作用。

### 二、有效光阑和光瞳

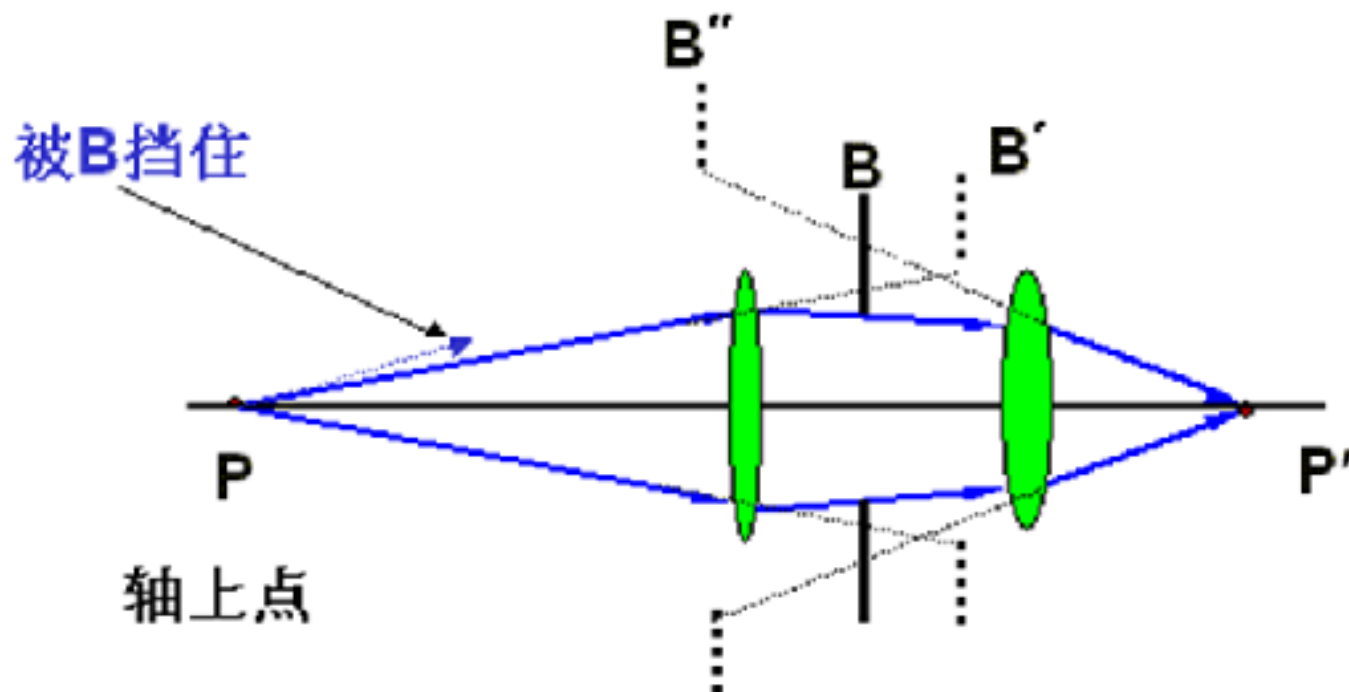
在所有各光阑中，限制入射光束最起作用的光阑称为**有效光阑**。



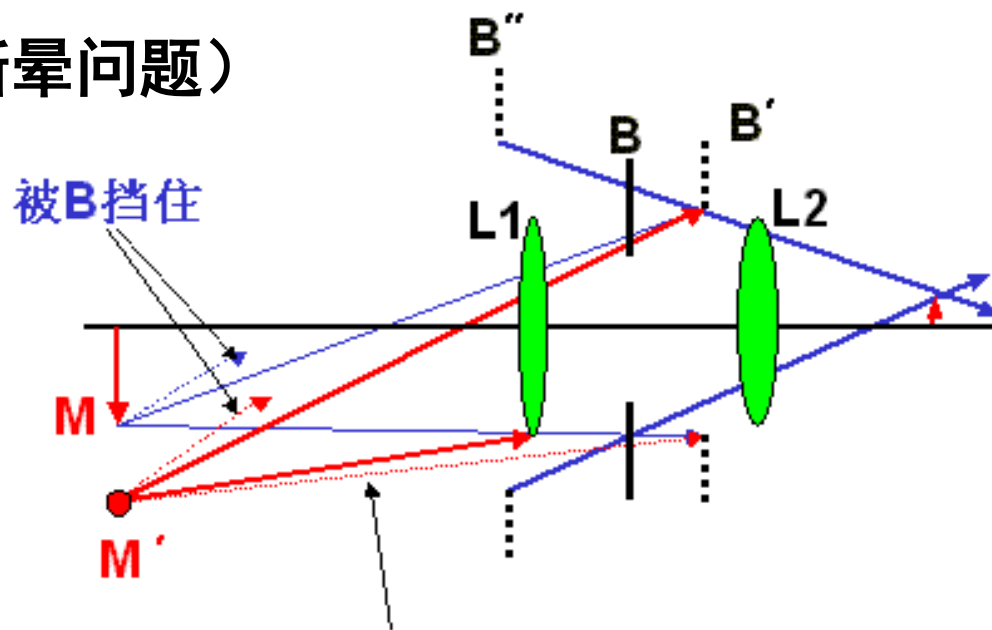
## 有效光阑 (B)

■入射光瞳 ( $B'$ )：有效光阑被它自己前面部分的光具组所成的像。

■出射光瞳 ( $B''$ )：有效光阑被它自己后面部分的光具组所成的像。



## 轴外点成像（渐晕问题）



被L1挡住→M'点成像光束变小→暗

### ➤ 商用光阑



圆形光阑



矩形光阑



狭缝光阑

## ➤ 商用光阑

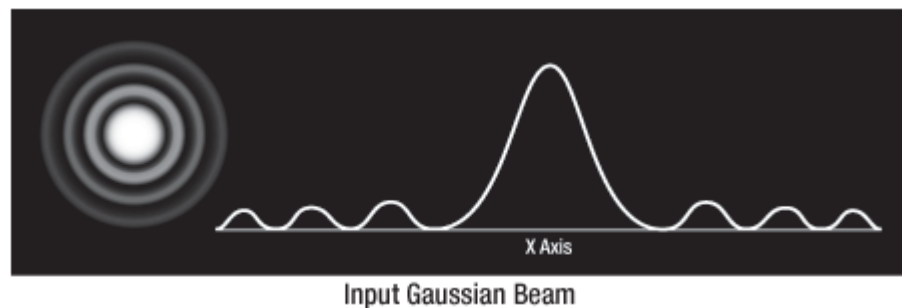
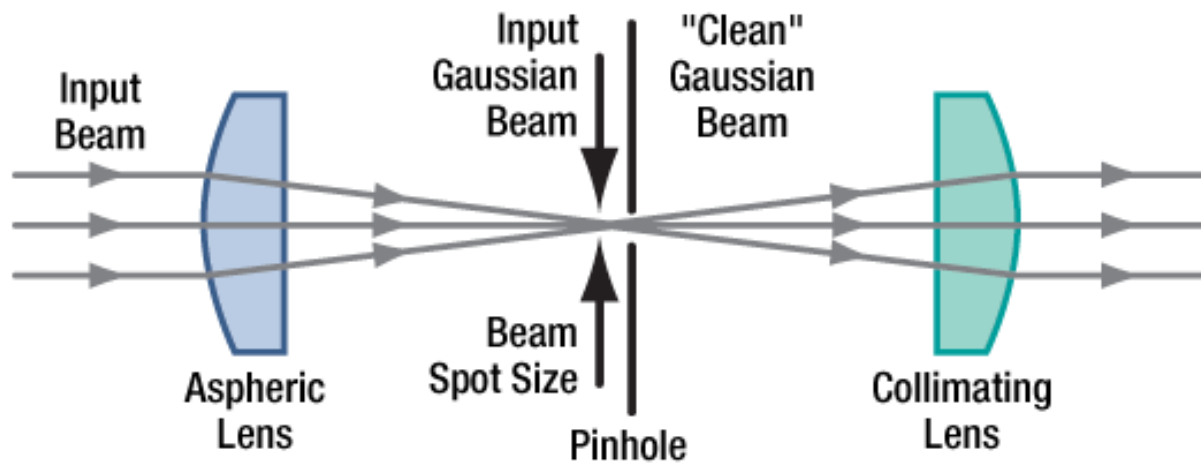
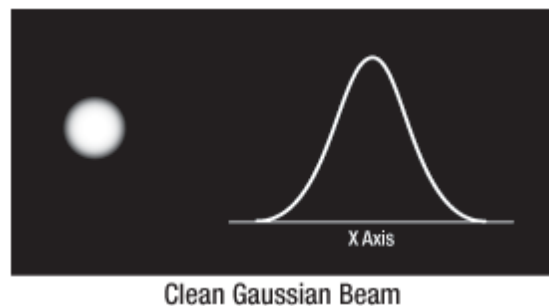


图2

在高斯光斑中心加个针孔可以通过清洁的光束部分但是阻挡噪声条纹(见图3)。



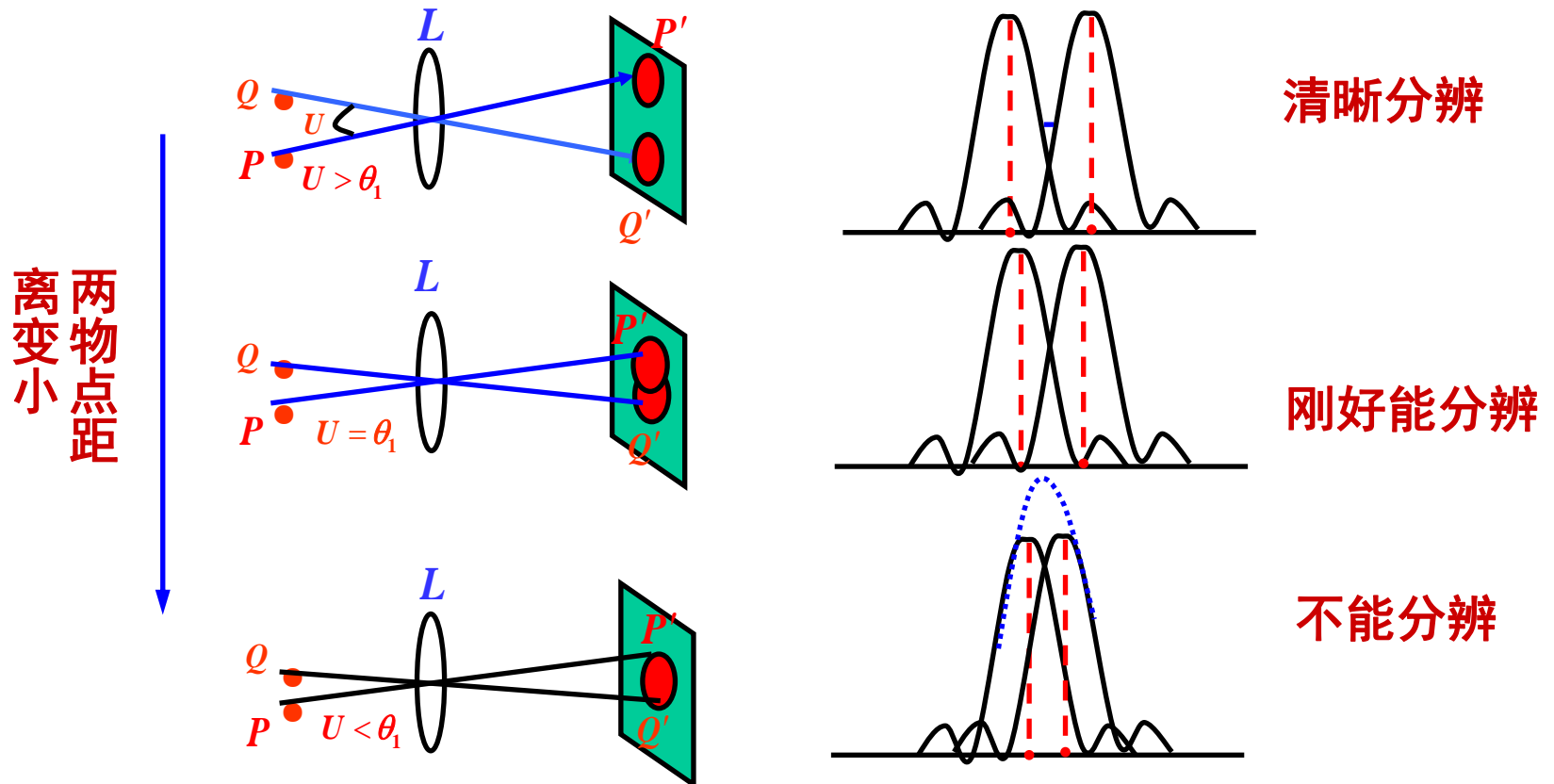
## § 5.8 助视仪器的分辨本领

### 一、分辨本领

**几何光学**(经理想光学成像): 物点→像点, 物(物点集合)→像(像点集合)

**波动光学**(经透镜成像): 物点→像斑(**艾里斑**), 物(物点集合)→像(像斑集合)

物点所成像点就是衍射图样中的中央条纹或爱里斑。



## 1、瑞利据判

当一个中央亮斑的最大值恰和另一个中央亮斑的最小值位置重合时，两个像点刚好能分辨开。

## 2、分辨极限角

刚好能分辨时，两物点对光具组入瞳中心的夹角(或两像点对出瞳的夹角)为夫琅和费圆孔衍射中中央亮斑的角半径：

$$U = \theta_1 = 0.610 \frac{\lambda}{R} \quad \begin{array}{l} R \text{ 入瞳半径, } \lambda \text{ 入射光波长} \\ \theta_1 \cdots \text{分辨极限角} \end{array}$$

## 3、分辨本领

分辨极限角的倒数，称为分辨本领： $\frac{1}{\theta_1} = \frac{R}{0.61\lambda}$

分析： $U > \theta_1$ ，两点的像分辨得开；

$U < \theta_1$ ，则分辨不开。

$U = \theta_1$ ，这个极限角成为光具组的分辨极限。



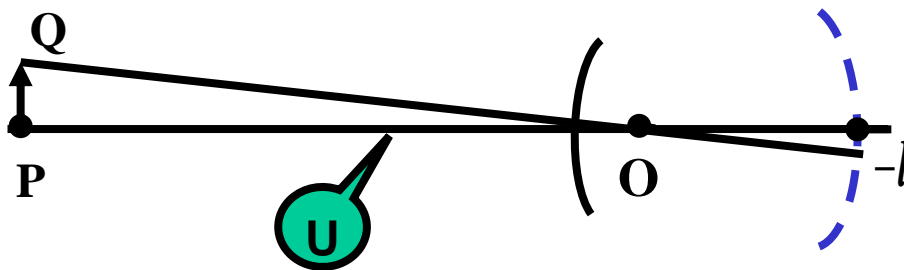
## 二、人眼的分辨本领

**定义：**人眼刚能分开靠近的两物点的能力

### 1、分辨极限角 ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ 最灵敏)

$$U_0 = \theta_1 = 0.61 \frac{\lambda}{R} \text{ (物间距)}$$

$$\theta'_1 = 0.61 \frac{\lambda}{n'R} \text{ (像间距)}$$



瞳孔半径在1~4 mm可调, 取 $R \approx 1 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 550 \text{ nm}$ 得:

$$U_0 = 0.610 \frac{\lambda}{R} \approx 1'$$

### 2、极限间距

$$l = (25 \text{ cm}) \cdot U_0 = 0.1 \text{ mm}$$

$$l' = f' \cdot \theta'_1 = (2.2 \text{ cm}) \theta'_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

视网膜衍射图样  
中央亮斑半径。

视网膜与瞳孔距离2.2 cm, 人眼玻璃状液内的折射率为1.337

## 例题

人眼在正常照度下的瞳孔直径约为3mm，而在可见光中，人眼最灵敏的波长为550nm，问

- (1) 人眼的最小分辨角有多大？
- (2) 若物体放在距人眼25cm(明视距离)处，则两物点间距为多大时才能被分辨。

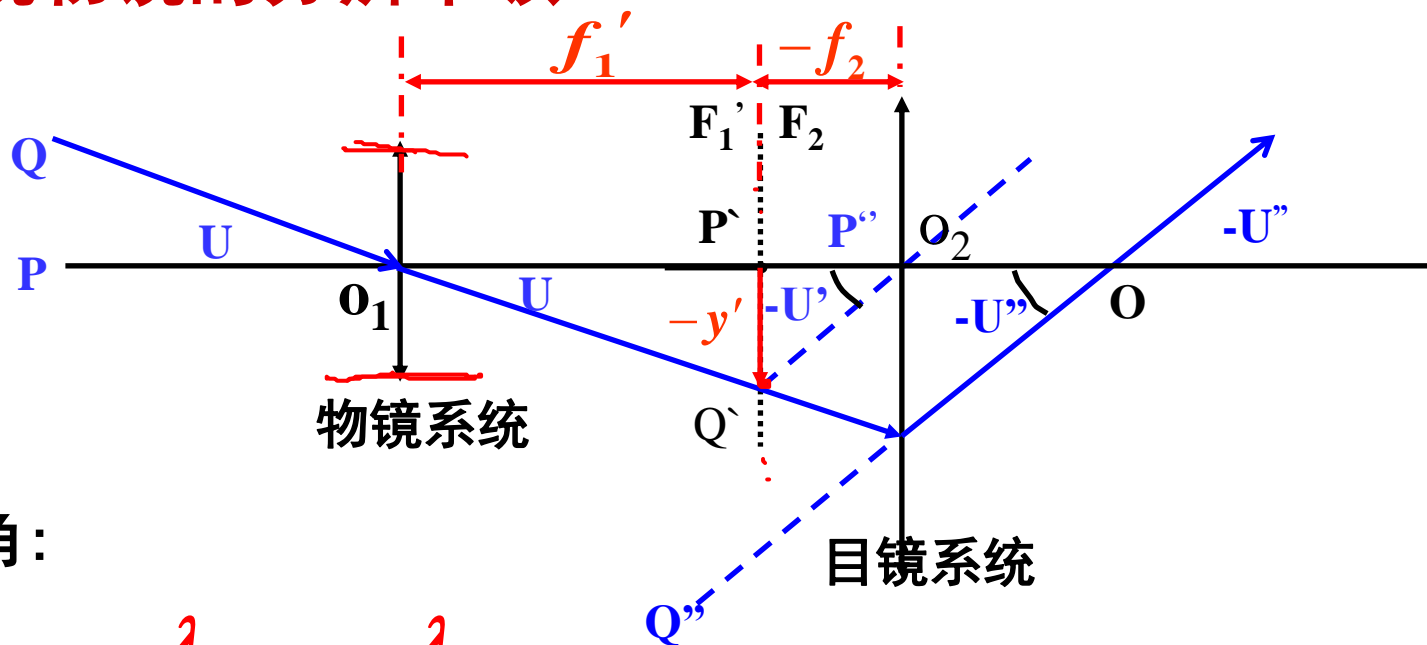
解 (1) 人眼的最小分辨角为

$$\theta_0 = \underline{1.22\lambda/D} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 1'$$

(2) 设两物点间的距离为 $d$ ，它们与人眼的距离  $l=25\text{cm}$ ，此时恰能被分辨。人眼的最小分辨角

$$\theta_0 = d / l$$
$$d = l \theta_0 = 25 \text{ cm} \times 2.2 \times 10^{-4} = 0.055 \text{ mm}$$


### 三、望远镜物镜的分辨本领



极限分辨角：

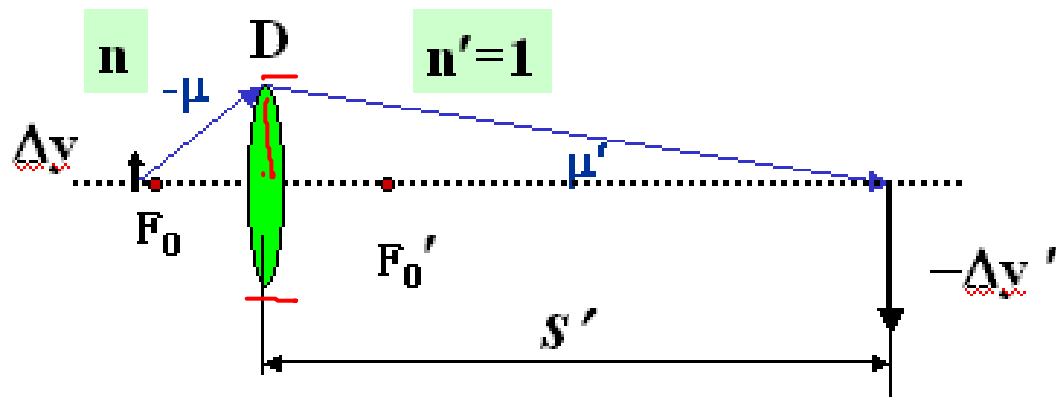
$$U = \theta_1 = 0.61 \frac{\lambda}{R} = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad \text{---} d \text{ 为物镜的直径.}$$

两个像点极限间距：  $\Delta y = f_1' \cdot \theta_1 = 1.22 \frac{\lambda}{d / f_1'}$

➤ 要增大望远镜的分辨本领，要求：

- ① 增大相对孔径 ( $d / f'$ ) 或 ② 用短波光束。

## 五、显微镜的分辨本领



设能分辨的最小间距为

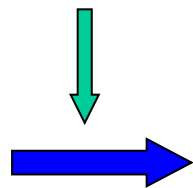
$$\Delta y' = 1.22\lambda s' / D$$

$$n' = 1, \sin u' \approx (D/2)/s'$$

数值孔径  $n \sin u$

由正弦定理：

$$n \sin u \cdot \Delta y = n' \sin u' \cdot \Delta y'$$



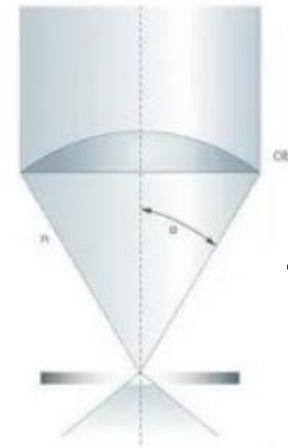
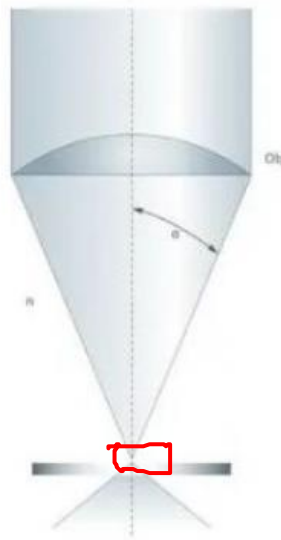
$$\Delta y = \frac{0.61\lambda}{n \cdot \sin u}$$

式中  $u$  是物镜半径对物点的张角

一般：  $\Delta y \geq \lambda/2$

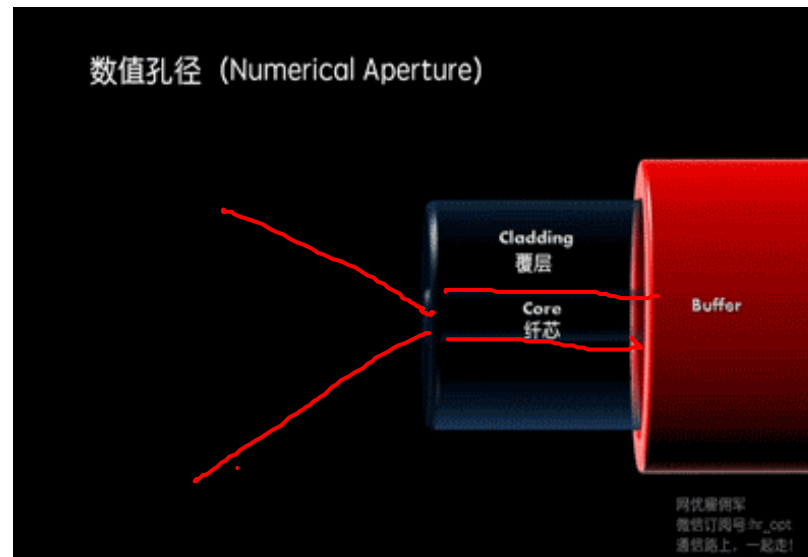
- 提高分辨本领的方法：
- ① 增大数值孔径 ( $n \sin u$ ) 。
  - ② 用短波光束 (如电子显微镜) 。

油浸显微镜、紫外显微镜和电子显微镜具有更高的分辨本领就是因为所用物方折射率高或光波波长短的缘故。



## 显微镜聚光本领

理论上，物镜前透镜收集的光锥的最大孔径角为 $180^\circ$ ， $\alpha$  值为 $90^\circ$ 。由于 $90^\circ$ 的正弦值为1，因此能够在空气介质中从样本上收集 $180^\circ$  合成光的物镜的理论NA值也为1。显然，折射率是实现物镜最高NA的限制因素。水的折射率为1.3，用于光学显微镜的一些浸油的折射率可以高达1.52。



**练习** 夜间自远处驶来轿车的两前灯相距1.5 m。如将眼睛的瞳孔看成产生衍射的圆孔，试估计视力正常的人在多远处才能分辨出光源是两个灯。设眼睛瞳孔的直径为3 mm，设光源发出的光的波长 $\lambda$ 为550 nm。(P194 习题4-18)

**解：**  $\theta_0 = \frac{1.22\lambda}{D}$   $\theta_0 \approx \tan\theta_0 = \frac{\Delta y}{l}$

所以： 
$$l = \frac{D\Delta y}{1.22\lambda}$$
$$= \frac{3 \text{ mm} \times 1.5 \text{ m}}{1.22 \times 550 \text{ nm}} = 6.7 \text{ km}$$

**练习** 电子显微镜的孔径角 $2u=8^\circ$ , 电子束的波长为 $0.1\text{ nm}$ , 试求它的最小分辨距离。若人眼能分辨在明视距离处相距 $6.7\times 10^{-2}\text{ mm}$ 的两点, 则此显微镜的放大倍数是多少? (**P209 习题4-20**)

**解:** 根据

$$\Delta y = \frac{0.61\lambda}{n \cdot \sin u} \quad \text{其中 } \lambda = 0.1\text{ nm}, n = 1, u = 4^\circ$$

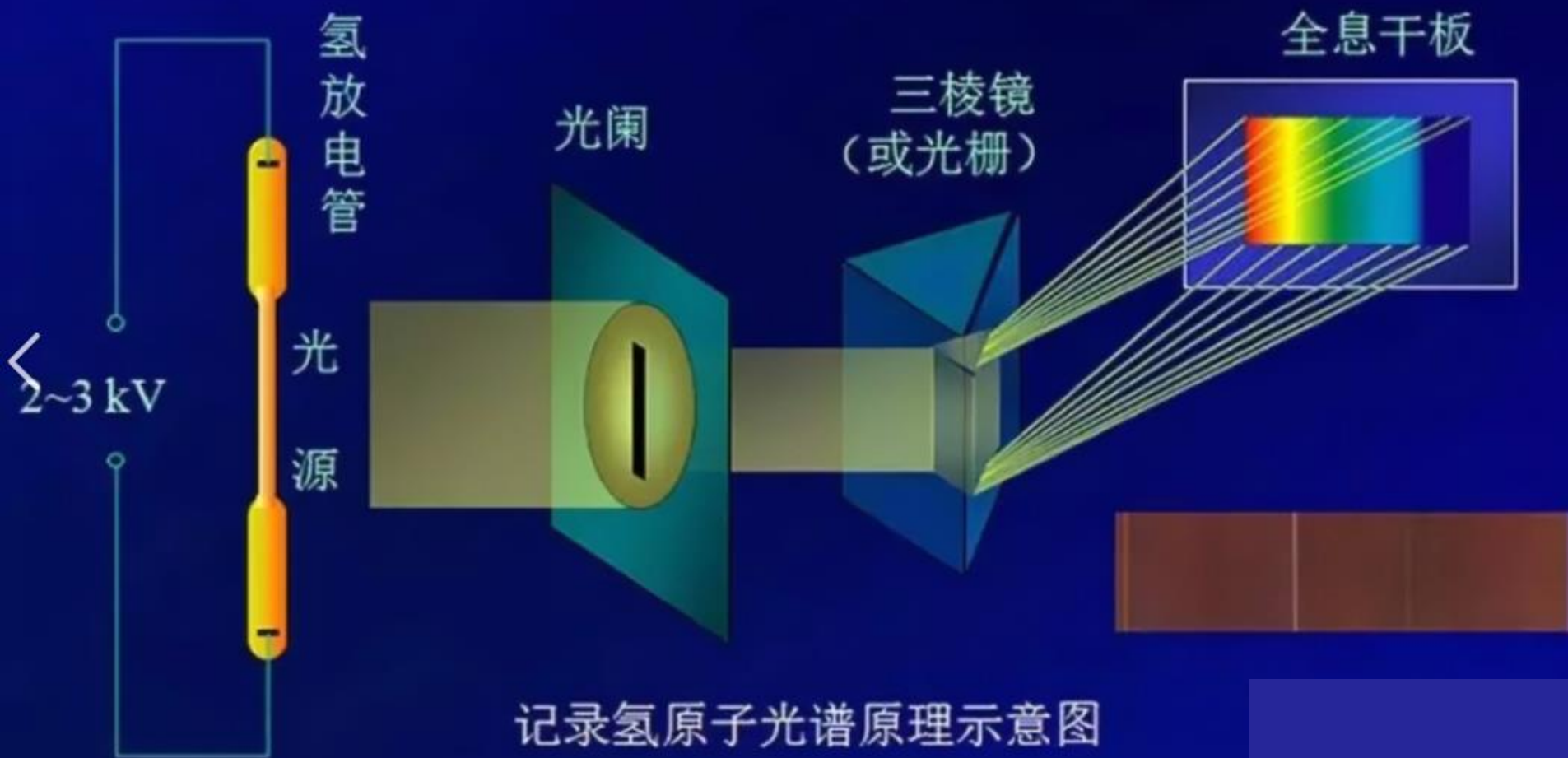
代入数据得:  $\Delta y = 0.87\text{ nm}$

显微镜的放大倍数:

$$M = \frac{6.7 \times 10^{-2} \times 10^{-3}\text{ m}}{0.87 \times 10^{-9}\text{ m}} = 7.66 \times 10^4$$

## § 5.9 分光仪器的分辨本领

### 一、棱镜光谱仪





## § 5.9 分光仪器的分辨本领

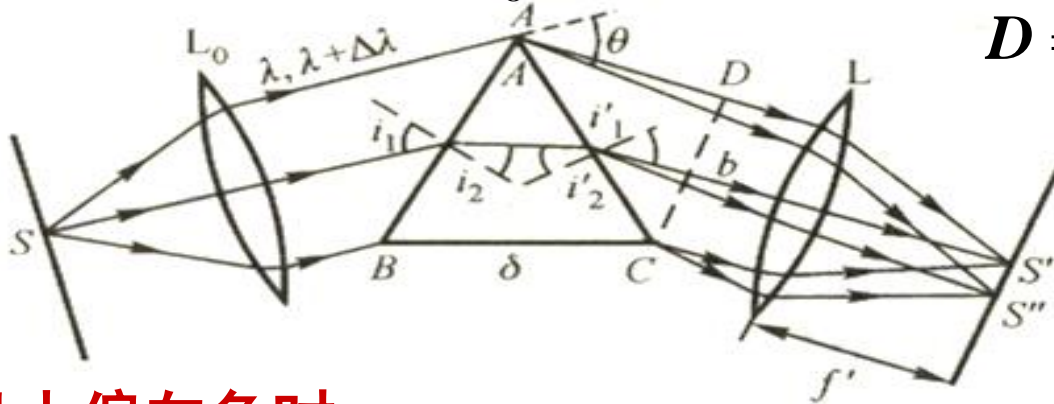
### 一、棱镜光谱仪

1. 角色散率:  $D = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda}$ ,  $\Delta\theta = D\Delta\lambda$

$\theta_0 \propto n$

在最小偏向角  $\theta_0$  附近的角色散率为:

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d\theta_0}{d\lambda} = \left[ \frac{d\theta_0}{dn} \right] \left[ \frac{dn}{d\lambda} \right]$$

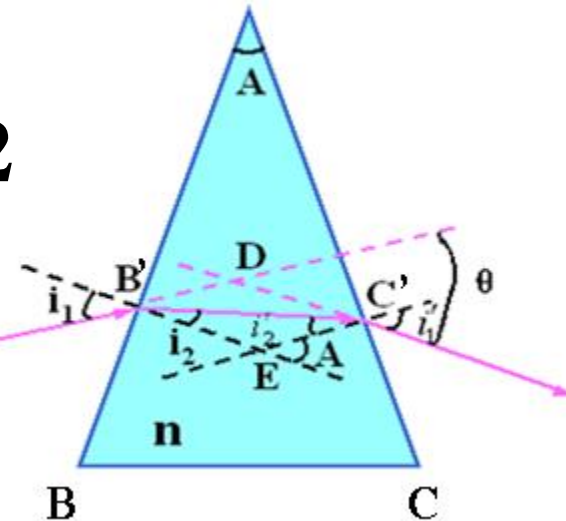


最小偏向角时:

$$i'_1 = i_1 = (\theta_0 + A) / 2 \longrightarrow i_2 = i'_2 = A / 2$$

若棱镜放在空气中:

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{\theta_0 + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$



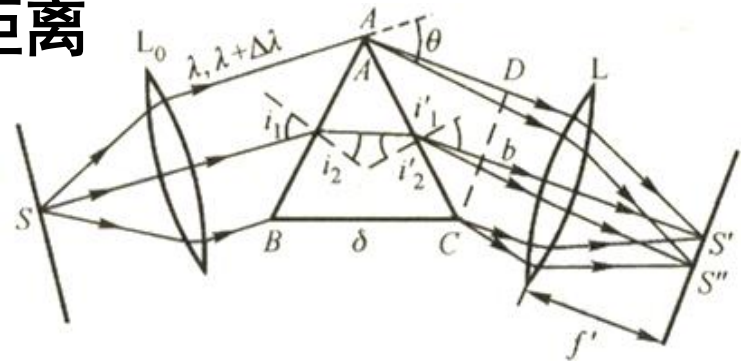
$$\text{而 } n = \frac{\sin \frac{\theta_0 + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \left[ \theta_0 = 2i_1 - A, i_1 = \frac{\theta_0 + A}{2}, i_2 = \frac{A}{2} \right] \quad \frac{dn}{dn}$$

$$\begin{aligned} \text{即: } \frac{dn}{d\theta_0} &= \frac{1}{\sin \frac{A}{2}} \cdot \cos \frac{\theta_0 + A}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2 \sin \frac{A}{2}} \cdot \cos \frac{\theta_0 + A}{2} = \frac{1}{2 \sin \frac{A}{2}} \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\theta_0 + A}{2}} \\ &= \frac{1}{2 \sin \frac{A}{2}} \cdot \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}} \\ \therefore D &= \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \end{aligned}$$

$\therefore$  波长相差为  $\Delta\lambda$  的两谱线间的角距离

$$\Delta\theta = D\Delta\lambda = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

$\Delta\theta \propto \Delta\lambda$



## 2. 色分辨本领

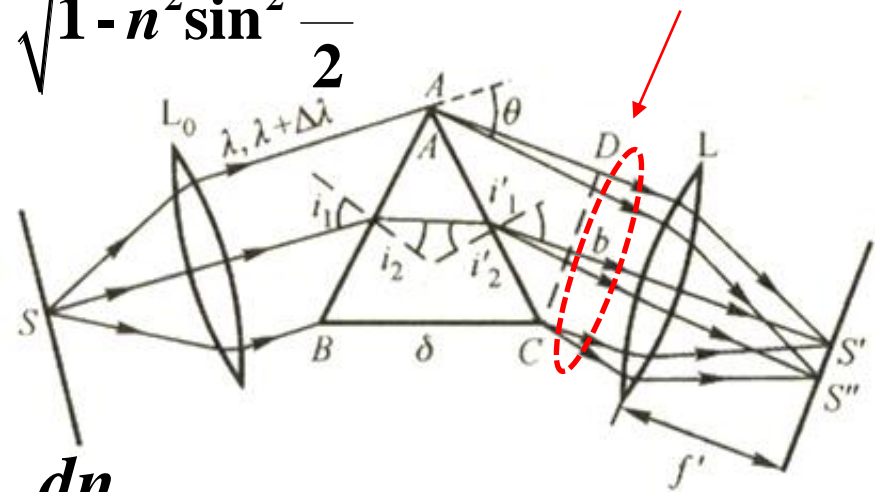
$$\Delta\theta = \theta_1 \approx \sin\theta_1 = \frac{\lambda}{b}$$

即 
$$\frac{2\sin\frac{A}{2}}{\sqrt{1-n^2\sin^2\frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda = \frac{\lambda}{b}$$

又 
$$\because \frac{2b\sin\frac{A}{2}}{\sqrt{1-n^2\sin^2\frac{A}{2}}} = \delta$$

棱镜底面的宽度  $\delta = \overline{BC}$

$\therefore$  色分辨本领为: 
$$p = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \delta \frac{dn}{d\lambda}$$



## 3. 线色散率

$$\therefore L = Df' = \frac{d\theta}{d\lambda} f' \quad \therefore L = \frac{\delta}{b} f' \frac{dn}{d\lambda}$$

$$L \propto \frac{dn}{d\lambda}$$

$$\therefore D = \frac{2\sin\frac{A}{2}}{\sqrt{1-n^2\sin^2\frac{A}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = \frac{\delta}{b} \frac{dn}{d\lambda}$$

## 二、光栅光谱仪

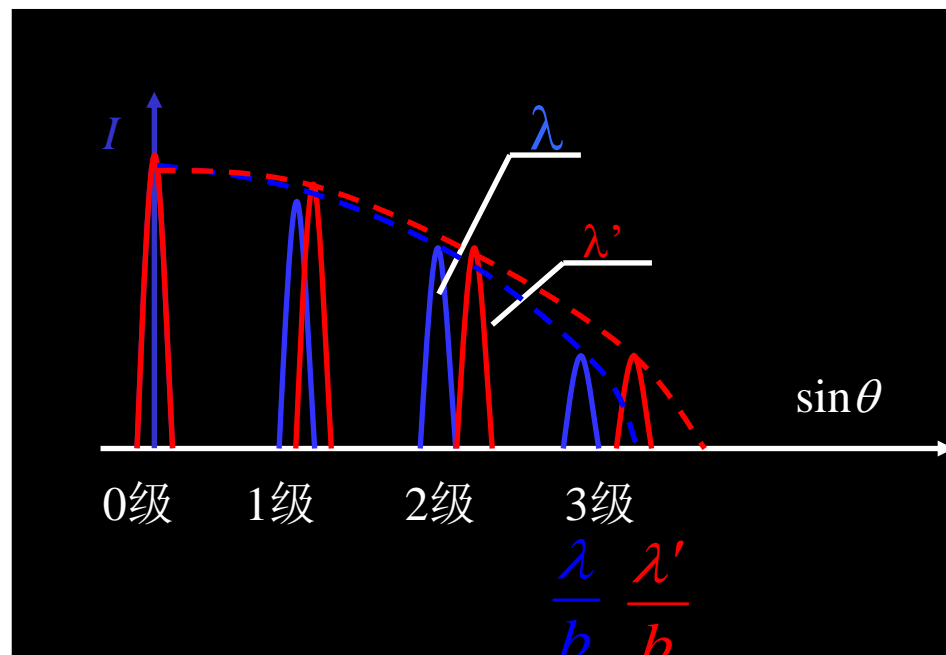
### 1、角色散率 $d\sin\theta = j\lambda$

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{j}{d\cos\theta}$$

$$\Delta\theta = \frac{j}{d \cdot \cos\theta} \Delta\lambda$$

### 2、线色散率

$$L = Df' = \frac{d\theta}{d\lambda} f' = \frac{j}{d\cos\theta} f'$$



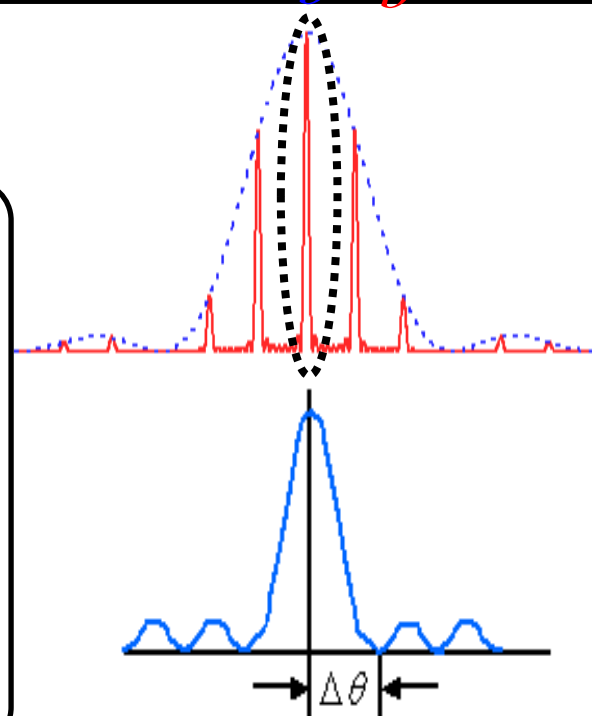
谱线的半角宽度（多缝干涉主极大亮条纹）

$$\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta = \lambda / (Nd)$$

$$\Delta(\sin\theta) = \cos\theta \cdot \Delta\theta = \lambda / (Nd)$$

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd \cdot \cos\theta}$$

$Nd$ 愈大,  $\Delta\theta$ 愈小, 谱线愈窄, 锐度愈好。



### 3. 光栅的色分辨本领

由Rayleigh判据，分辨率极限：



$$\text{半角宽度 } \Delta\theta_1 = \frac{\lambda}{Nd \cdot \cos\theta}$$

$$\text{角分辨率 } \Delta\theta = \frac{j}{d \cos\theta} \Delta\lambda$$

$$\Delta\theta = \Delta\theta_1 \quad \longrightarrow \quad \frac{j}{d \cdot \cos\theta} \cdot \Delta\lambda = \frac{\lambda}{Nd \cdot \cos\theta}$$

$$\text{色分辨本领 } P = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = jN$$

光栅光谱仪的分辨本领正比于狭缝总数  $N$ ，且随着光谱级数的增加而增加，但与光栅常数  $d$  无关。

**例题【P191 4.4】** 一个棱角为  $50^\circ$  的棱镜由某种玻璃制成，它的色散特性由  $n(\lambda) = a + b / \lambda^2$  确定。其中  $a = 1.53974$ ,  $b = 4562.8 \text{ nm}^2$ 。当其对  $550\text{nm}$  的光处于最小偏向角位置时，试求：

- (1) 这棱镜的角色散率为多少？
- (2) 若该棱镜的底面宽度为  $2.7\text{cm}$  时，对该波长的光的色分辨本领为多少？
- (3) 若该棱镜的焦距为  $50\text{cm}$ ，该系统的线色散率为多少？

**解：** (1) 最小偏向角附近的角色散率为

$$\frac{d\theta_0}{d\lambda} = \frac{2\sin(A/2)}{\sqrt{1 - n^2\sin^2(A/2)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

$$\text{其中 } n = 1.53974 + \frac{4562.8}{550^2} = 1.55482$$

$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2b}{\lambda^3} = -5.48496 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$$

$$\frac{d\theta_0}{d\lambda} = \frac{2\sin(50^\circ / 2)}{\sqrt{1 - 1.55482^2 \sin^2(50^\circ / 2)}} \times (-5.48496 \times 10^{-5})$$

$$= -6.1502 \times 10^{-5} \text{ rad / nm}$$

(2) 色分辨本领为  $P = \delta \frac{dn}{d\lambda} = 27 \text{ mm} \times (-5.48496 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1})$

$$= 1.480 \times 10^{-3} \text{ mm/nm}$$

(3) 线色散率为

$$L = f' \frac{d\theta_0}{d\lambda} = 500 \text{ mm} \times (-6.1502 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1})$$

$$= 3.075 \times 10^{-2} \text{ mm/nm}$$

**例题【P191 4.5】** 用一个宽度为 5cm 的平面透射光栅分析钠光谱，钠光垂直投射在光栅上。若需要在第一级分辨波长为 589nm 和 589.6nm 的钠双线，试求：

(1) 平面光栅所需的最少缝数为多少？

$$P = \frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda} = jN$$

(2) 钠双线第一级最大之间的角距离为多少？

$$\Delta\theta = \frac{j}{d\cos\theta} \Delta\lambda, \quad d\sin\theta = j\lambda$$

(3) 若会聚透镜焦距为 1m，其第一级线色散率为多少？

$$L = Df' = \frac{d\theta}{d\lambda} f' = \frac{j}{d\cos\theta} f'$$



## ➤本章重点内容:

### 放大本领

### 分辨本领

#### 放大镜

$$M = \frac{25 \text{ cm}}{-s} \approx \frac{25 \text{ cm}}{f'}$$

#### 显微镜

$$M \approx -\frac{L}{f'_o} \frac{25 \text{ cm}}{f'_e}$$

$$\Delta y = \frac{0.61\lambda}{n \cdot \sin u}$$

#### 望远镜

$$M = \frac{U'}{U} = -\frac{f'_o}{f'_e}$$

$$\Delta y' \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} f'_o$$

### 角色散率

### 色分辨本领

#### 光栅光谱仪

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta \lambda} = \frac{j}{d \cdot \cos \theta}$$

$$P = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = jN$$

## ➤第5章小结：

5.2 助视仪器的放大本领（掌握）

5.4 显微镜的放大本领（掌握）

5.5 望远镜的放大本领（掌握）

5.10 助视仪器的分辨本领（掌握）

5.11 分光仪器的分辨本领（掌握）

第5章 作业 4-1、2、5、17、18、19、23、25