

第一章 几何光学

第八节 光学仪器

(含第九节—光阑和第十节—像差)

第八节 光学仪器

8.1 投影仪

8.2 照相机

8.3 眼睛

8.4 放大镜和目镜

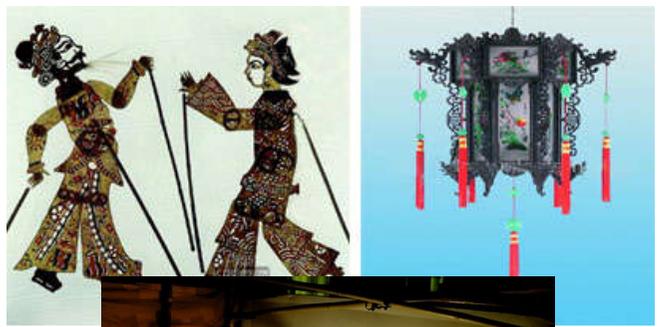
8.5 显微镜

8.6 望远镜

8.7 像差

8.1 投影仪

投影仪的发展历程



皮影戏、走马灯



幻灯机



投影仪

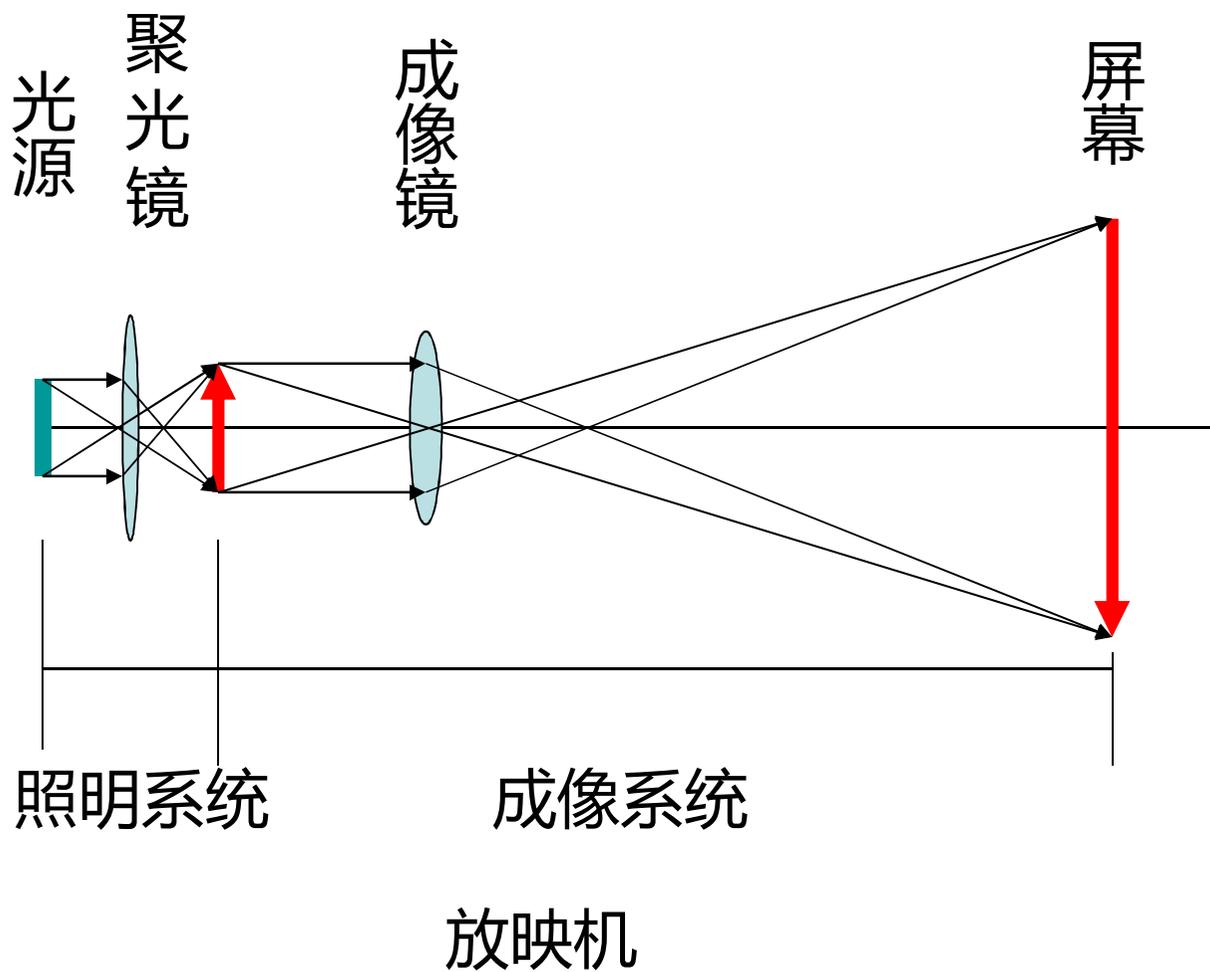


小身



8.1 投影仪

投影仪的结构



光学特点: 物距 $s \approx f$

8.1 投影仪

投影仪的关键参数

- 亮度：家用一般 2000-3000 ANSI 流明（辐射光学部分细讲）；
- 标准分辨率（真实分辨率或物理分辨率）：

规格	SVGA	XGA	WXGA	WUXGA	UW-UXGA	4k-UHD
分辨率	800 × 600	1024 × 768	1280 × 720 (HD,720p) 1280 × 800 1366 × 768	1920 × 1200 *1920 × 1080 (FHD, 1080p)	2560 × 1080	3840 × 2160

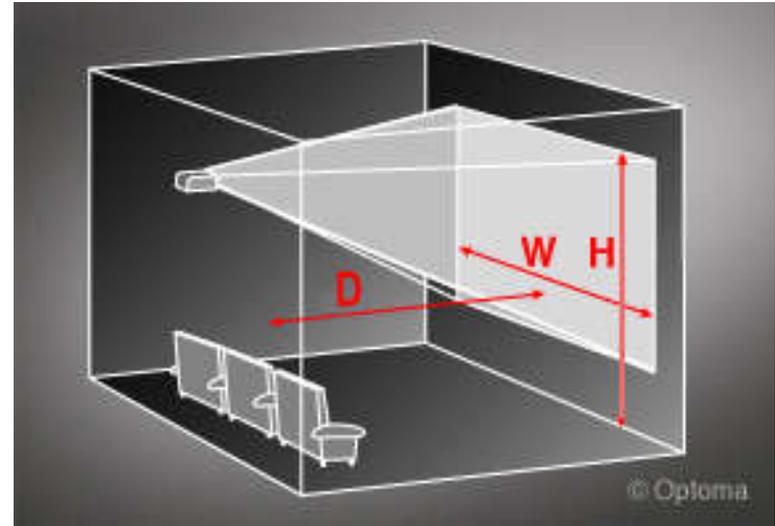
- 对比度：明暗区域最亮的白色和最暗的黑色之间的不同亮度层级的测量（人眼一般接近2000:1）

8.1 投影仪

投影仪的关键参数

- **投射比**：投影距离 D / 画面宽度 W 。
(越小说明在相同距离下，投射的画面越大)

计算投影和幕布大小、距离之间的最佳关系。



投射比一般在1.5-1.9之间，小于1时一般称为短焦镜头，小于0.6称为超短焦。

投影幕布一般用对角线的英寸数来标识，需要根据长宽比进行折算。

例：投影距离 1.5m（展示厅），要投100英寸4:3幕布做展示，需要什么样的投影？

解答：画面宽度 $W=100 \times 0.0254 \times 4/5=2\text{m}$ ，投射比为 $1.5/2=0.75$ ，需要短焦投影。

- **变焦比**：最长焦距 f_{\max} / 最短焦距 f_{\min}

思考：投影变焦的作用是什么？是不是变焦比越大越好？变焦比说明镜头变焦水平吗？怎样区分变焦或定焦投影？

8.1 投影仪

投影仪的一个例子

家里的客厅够大吗？我应该选择什么样的投影仪？

例如：Epson EMP-820投影的焦距为28.3~37.98mm，液晶片的尺寸是0.9英寸LCD，需要投100寸画面，最小的透射距离和最大的透射距离是多少？

物距 $s \approx f$ ，因而放大率 $V = -s' / s \approx -s' / f \Rightarrow s' \approx -Vf$

最小投射距离= $0.0283 \times 100 / 0.9 = 3.14$ 米

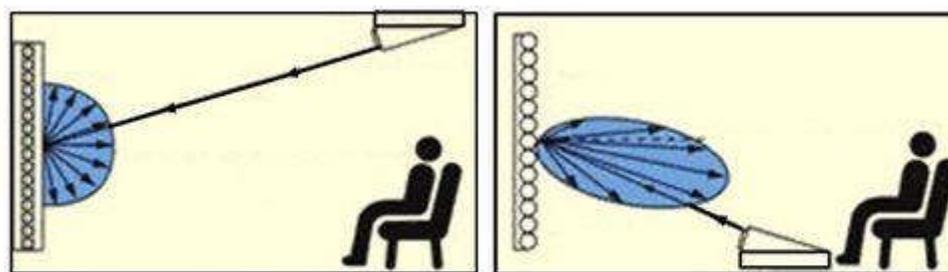
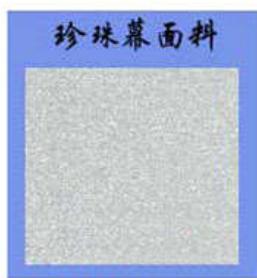
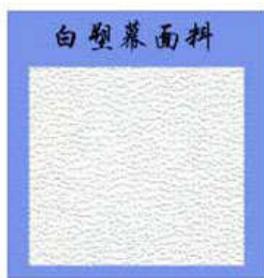
最大投射距离= $0.03789 \times 100 / 0.9 = 4.21$ 米

投射比也可用如 75" @ 3m的形式表示，意味着在3m距离下可以投射出75英寸画面。

8.1 投影仪

关于投影的幕布选择

思考：家用投影在吊装时，适合选用什么幕布？



白塑幕-光线漫射型
(适合投影机吊装时使用)

玻璃幕-光线回归型
(不适合投影机吊装时使用)



涂有反光膜的路标

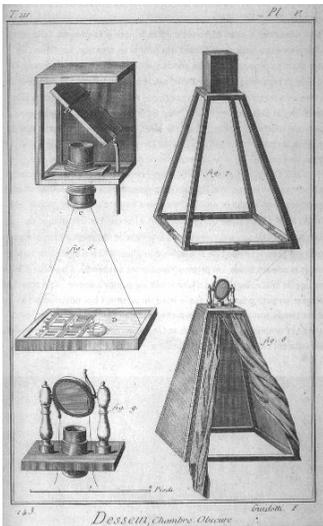
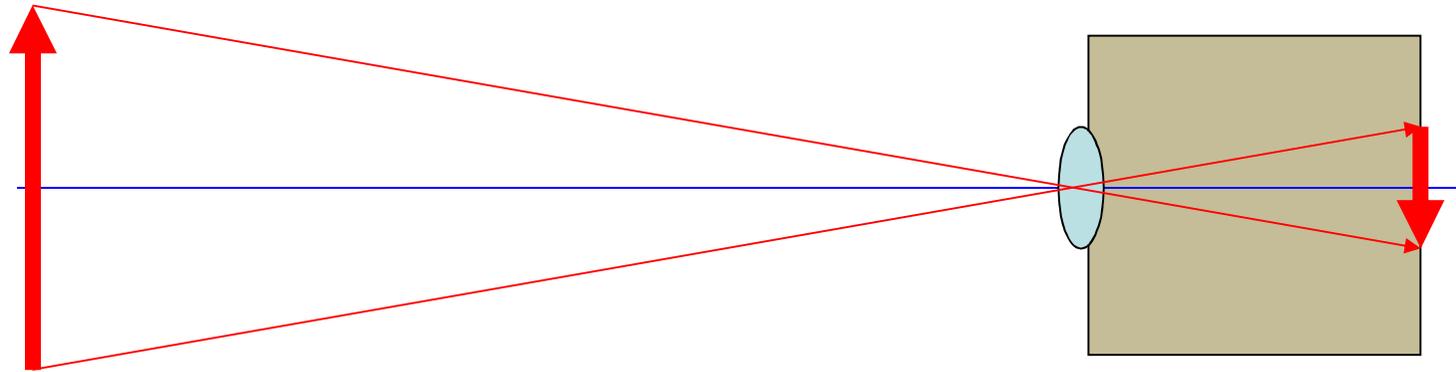
未涂反光膜的路标

玻璃幕，表面增加了光学晶体玻璃球的涂层。特点是画面有鲜明的焦点感和活力，增益高、视角小。而最大的特点是“**光线回归性**”，即反射光线沿入射光线的方向返回，这也是增益高的一个原因，对光线有一定的“收集”效果。

白塑幕，直接采用粗白纹面料，不做表面处理。特点是能把投影机的性能，原原本本的表现出来，不加修饰，增益低、视角很大、颜色自然。

8.2 照相机

照相机的最简结构—箱式照相机



特点：无反光镜，直接取景对焦。

缺点：早先对焦慢，现代数码无反相机（微单）对焦速度可达0.06秒以内（sony a6000）！

8.2 照相机

照相机的最简结构—箱式照相机

Nicéphore Niépce第一台相机（复制品）

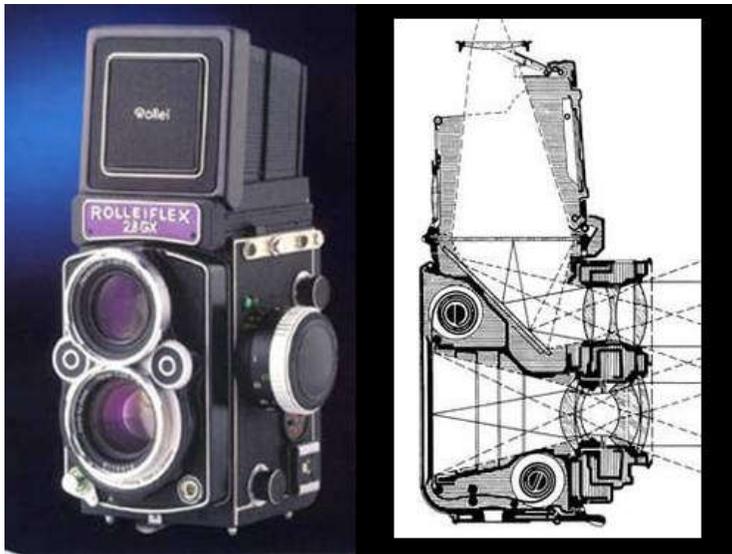
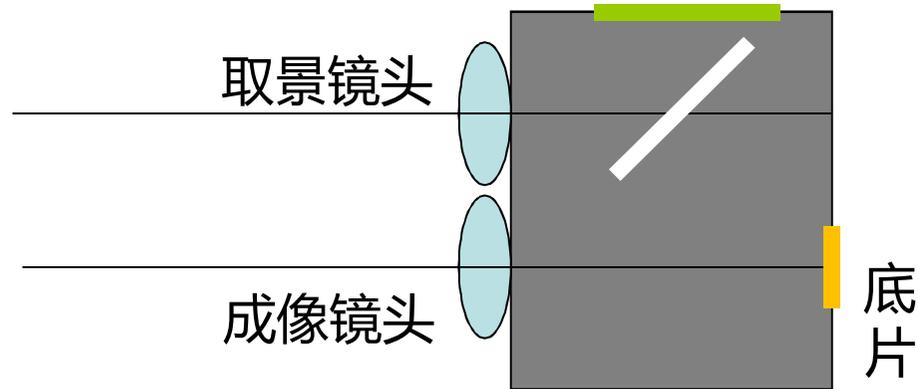




One of the two earliest photos, made by Nicéphore Niépce in 1825.

8.2 照相机

双镜头反光照相机（“双反” Twin-Lens Reflex-TLR）



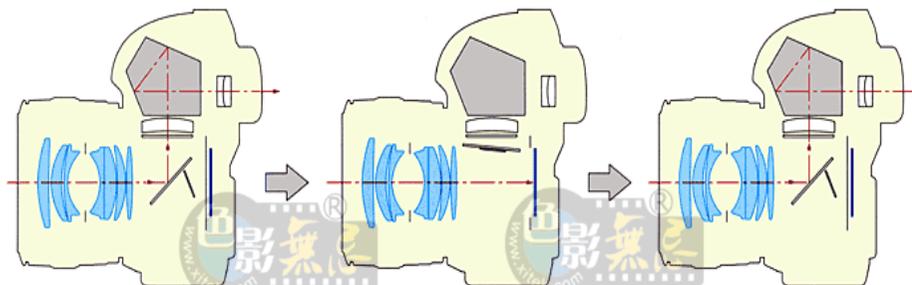
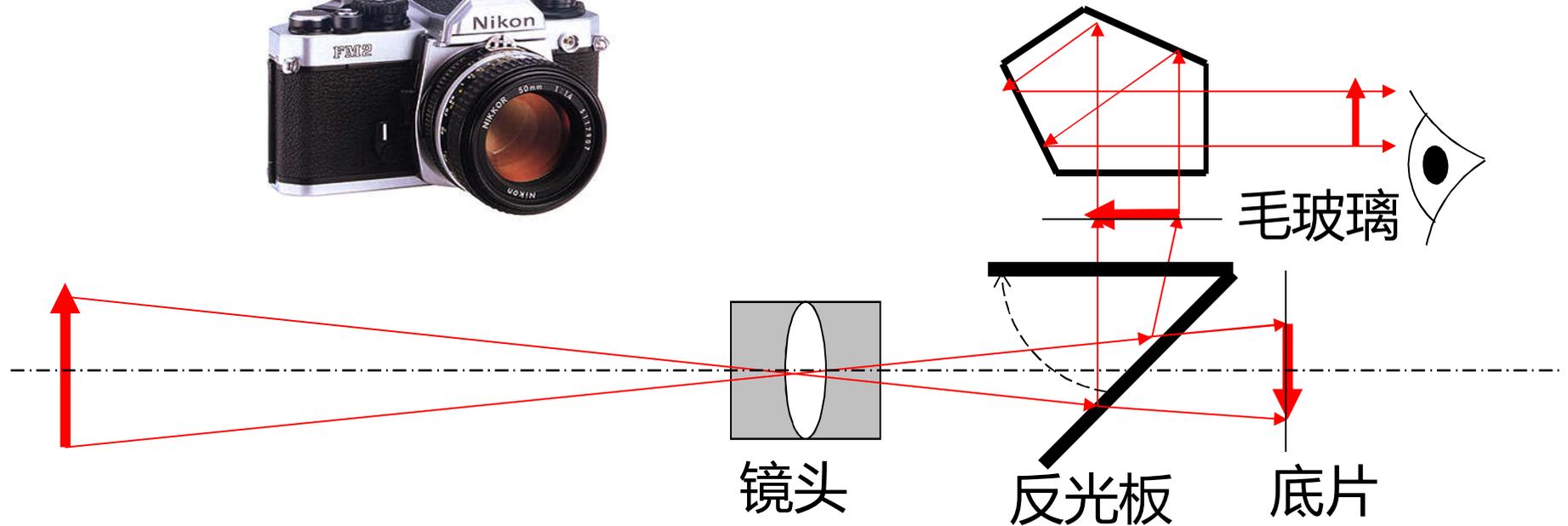
特点：两个镜头，上面的镜头通过固定的反光镜负责取景聚焦，与下面镜头联动；下面的镜头负责将影像传送到胶片上。

缺点：体积较大，操作不便，更换镜头时需要两个一起更换。

8.2 照相机

单镜头反光照相机

单反相机的取景成像机制



取景和对焦的状态

反光镜上翻，快门打开，光线到达感光部件
单镜头反光照相机工作原理

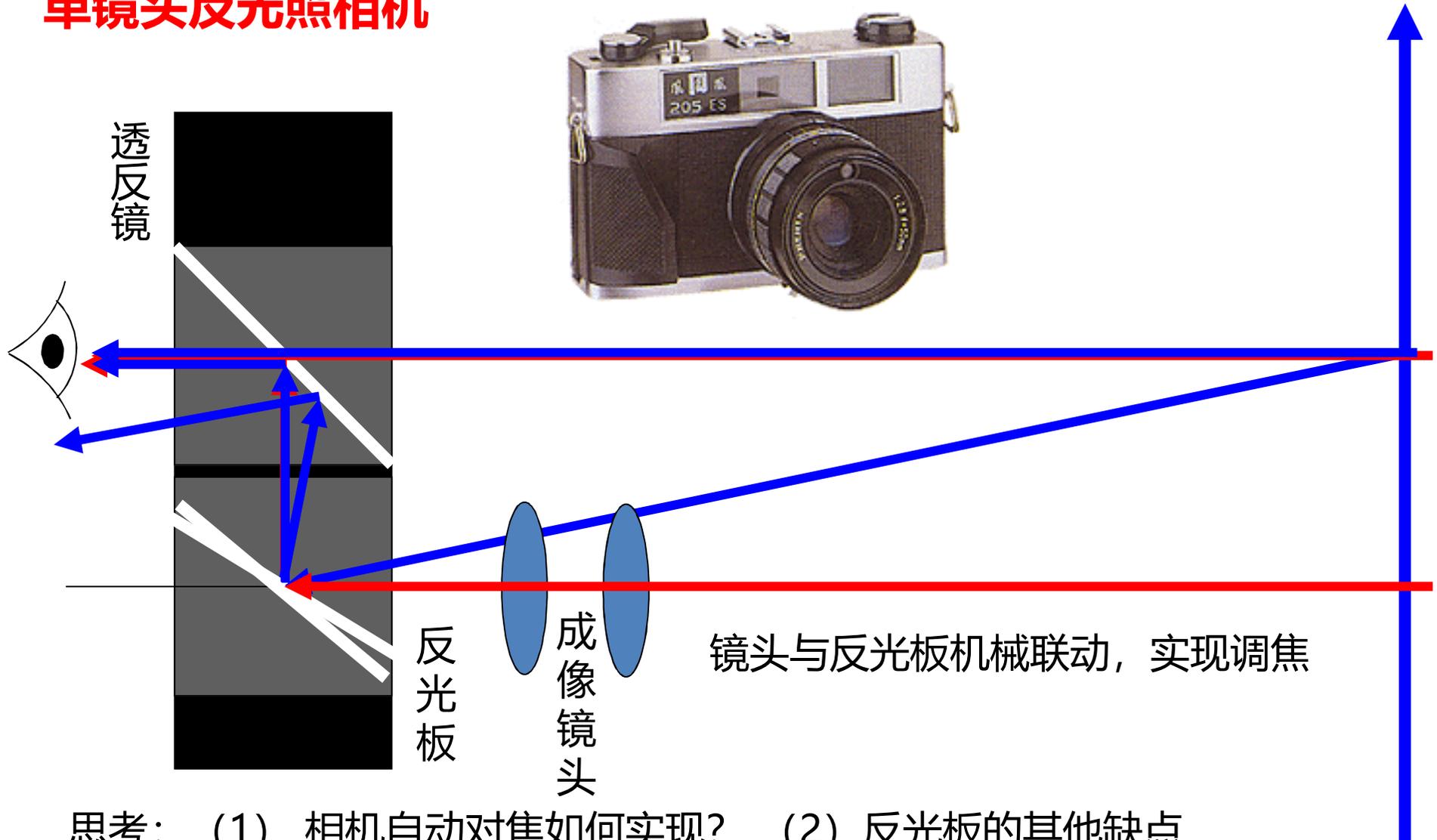
快门关闭，反光镜复位

特点： (1) 五棱镜、 (2) 反光板。几乎完美解决了“所见即所得”的问题。

缺点： (1) 活动式反光板使相机体积增大；
(2) 反光板开启的振动、机械切换时间等影响相机的性能。

8.2 照相机

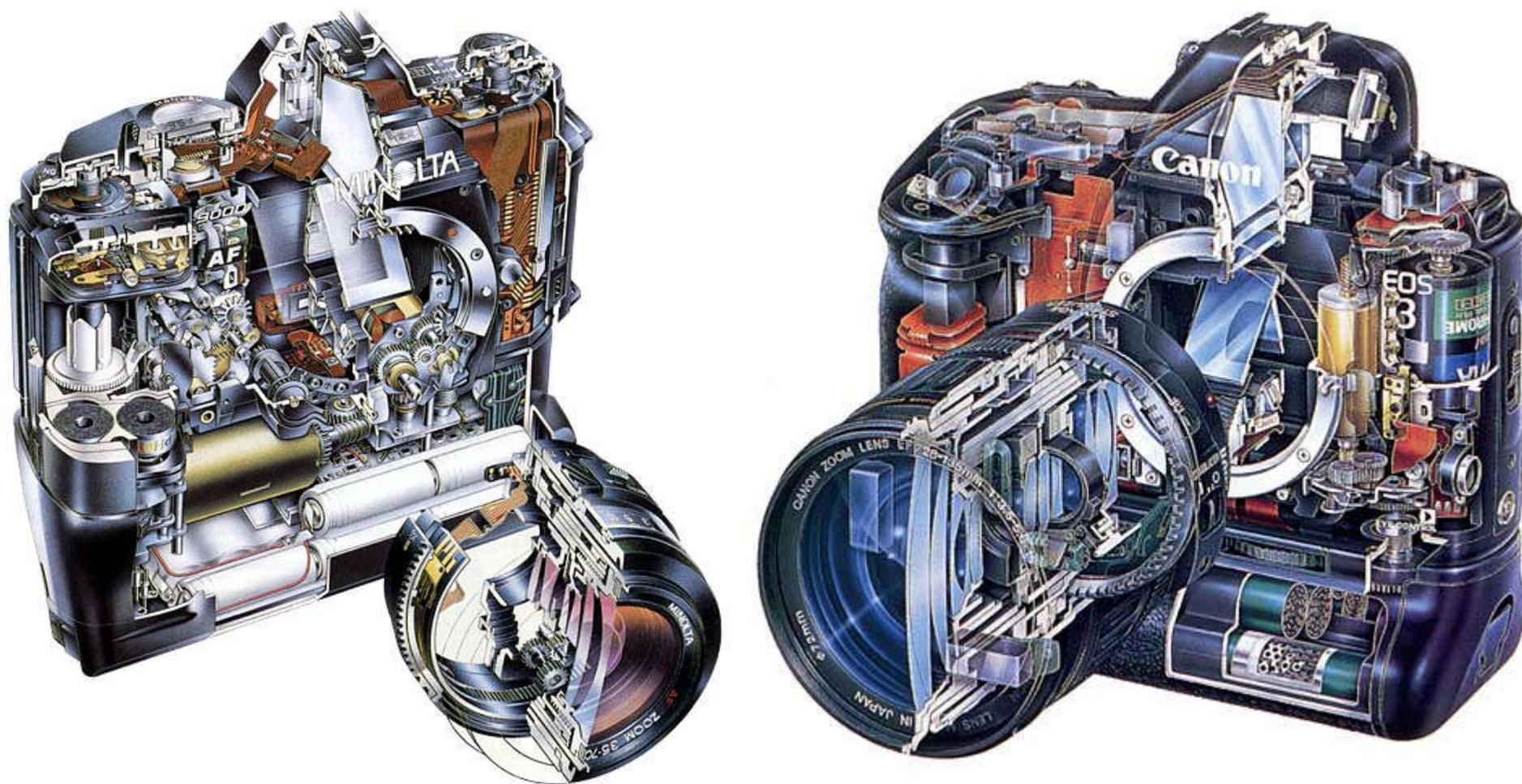
单镜头反光照相机



思考：（1）相机自动对焦如何实现？ （2）反光板的其他缺点

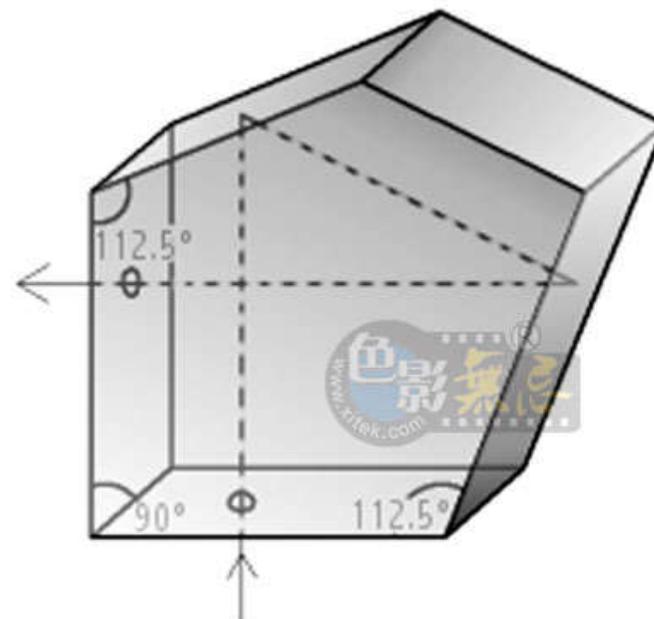
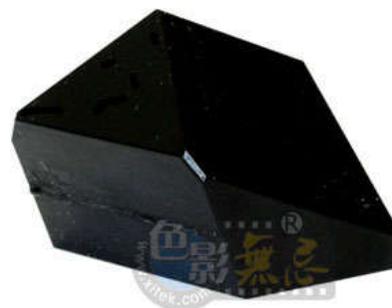
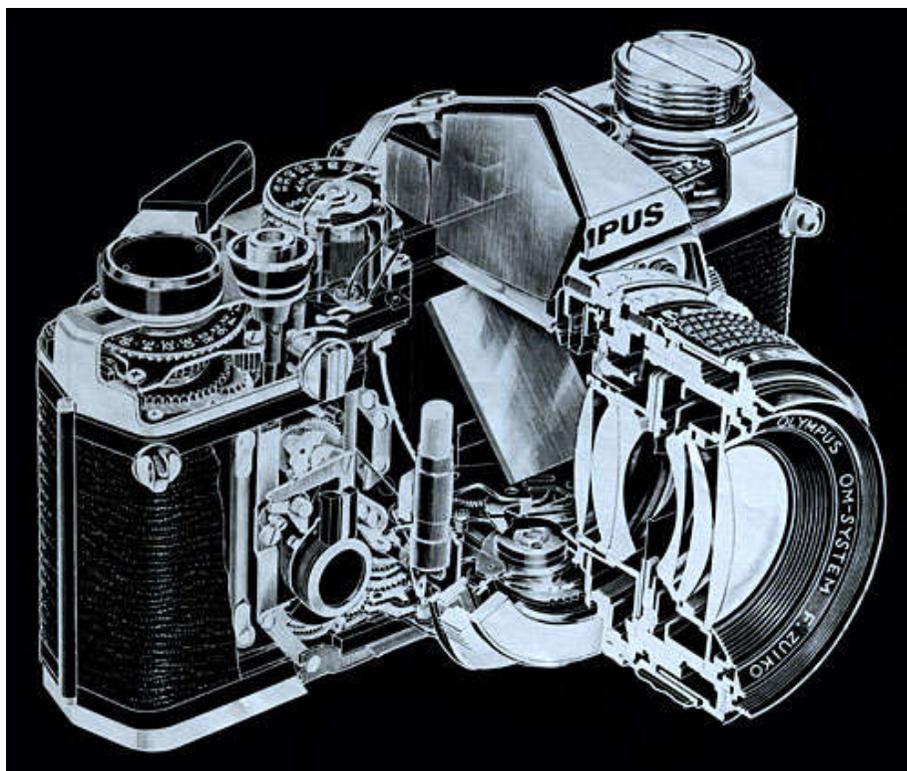
8.2 照相机

单镜头反光照相机



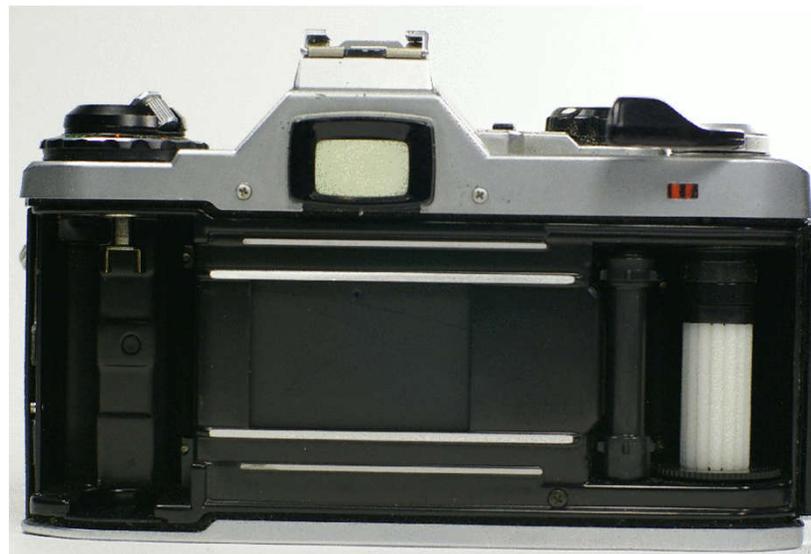
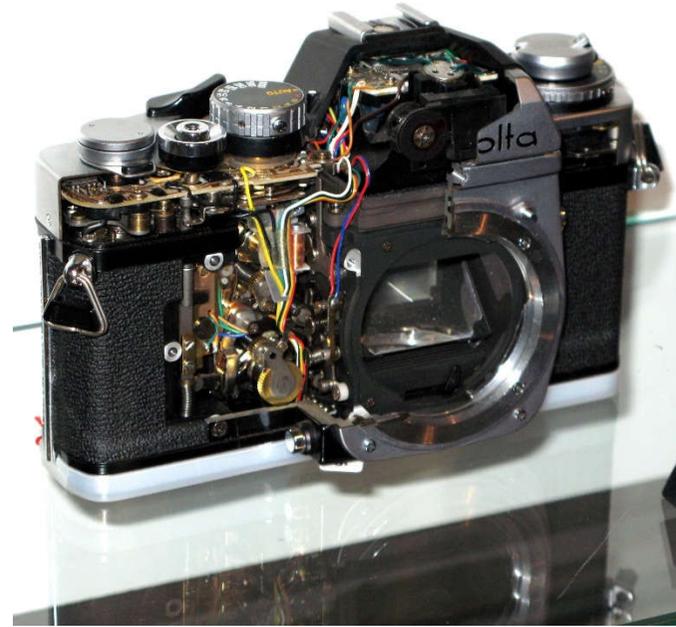
8.2 照相机

单镜头反光照相机



8.2 照相机

单镜头反光照相机



8.2 照相机

单反到无反的轮回



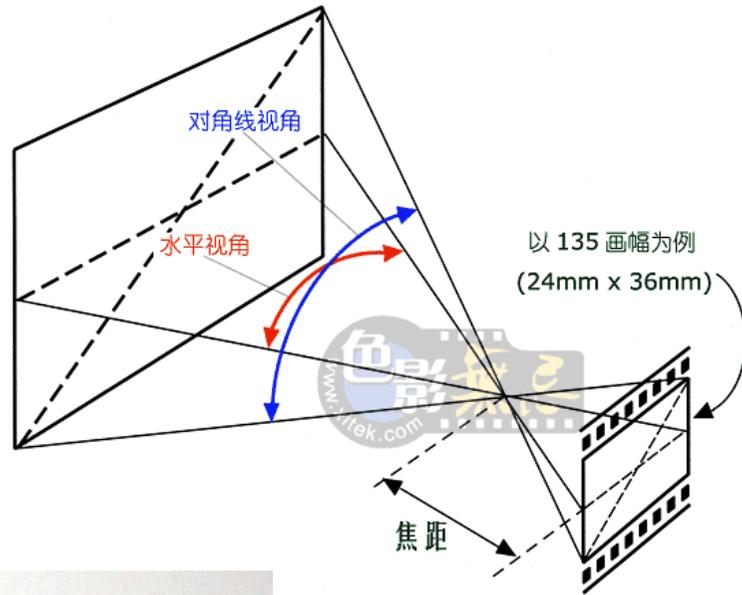
电子取景器 (EVF) 取代光学取景器 (OVF)，逐渐取消五棱镜和反光板，与传统的单反相距甚远。



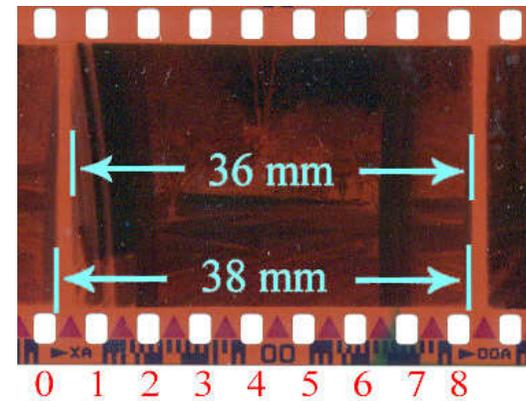
单电相机（索尼称微单），是指可换镜头但无反光板的相机，由于没有反光板和五棱镜，因此尺寸更小巧。反光镜将约三成的光线反射到顶部的自动对焦系统，而将七成光线投射到成像元件上，所以曝光度比其他机型要低1/2EV左右。

8.2 照相机

照相机的幅面与视角



135相机底片：24×36



120相机底片：60×60等

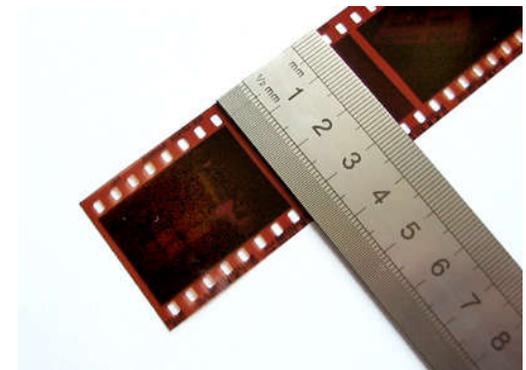
220相机底片：120×60等



120胶卷

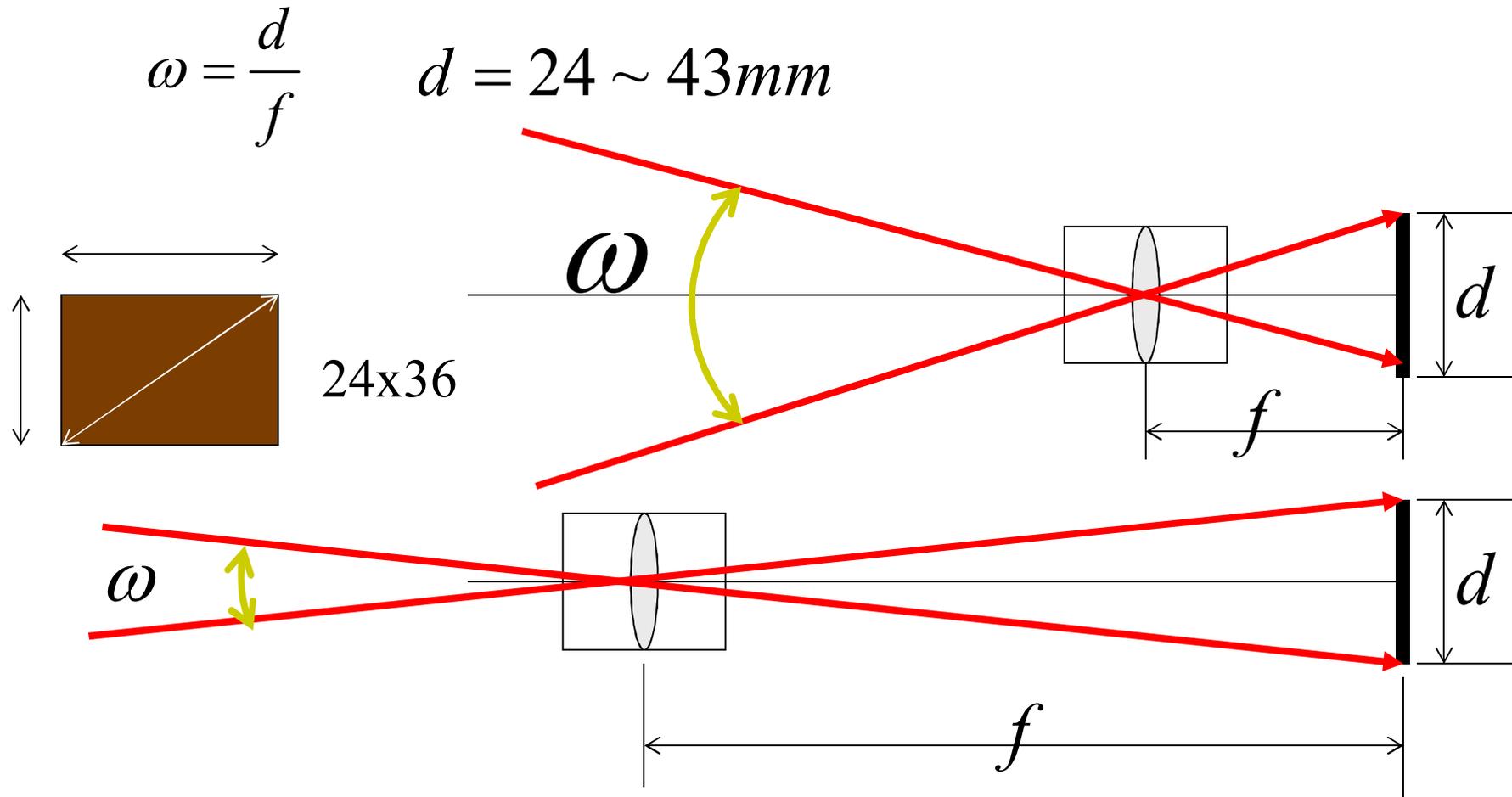


135胶卷 (宽度为35mm, 也称35mm胶卷)



8.2 照相机

照相机镜头的焦距与视场角

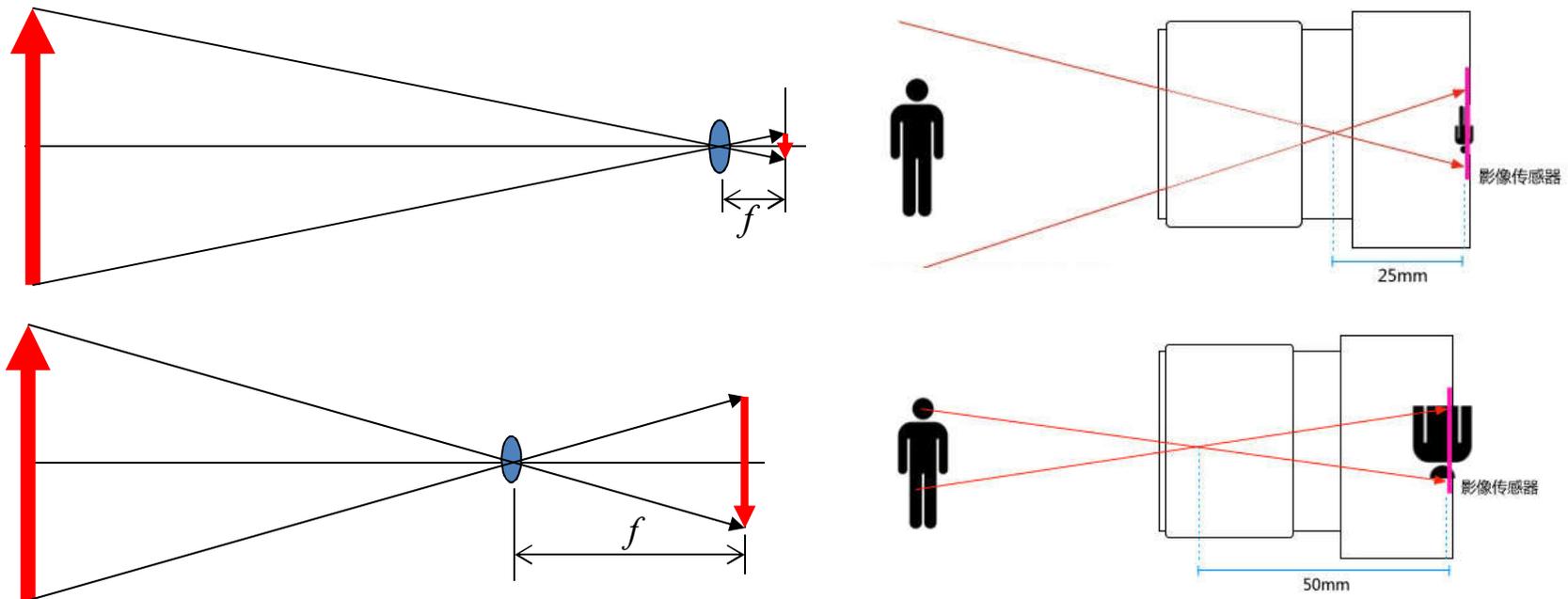


焦距越长，视角越小

8.2 照相机

照相机镜头的焦距与像的大小

焦距越长，像越大（在固定大小的底片上所能收集的图像比例越小，与视场角的缩小相对应）



镜头的焦距决定了视场，也就是镜头能够拍到多“宽”的画面。如果光线的交点离传感器比较近的情况。这会让被摄体的成像较小，反之则会较大。因此，短焦距会产生较宽的视场——这就是短焦距镜头被称作“广角”镜头的原因。反之也成立：长焦距产生较窄的视场，这类镜头被称作“长焦”镜头。

8.2 照相机

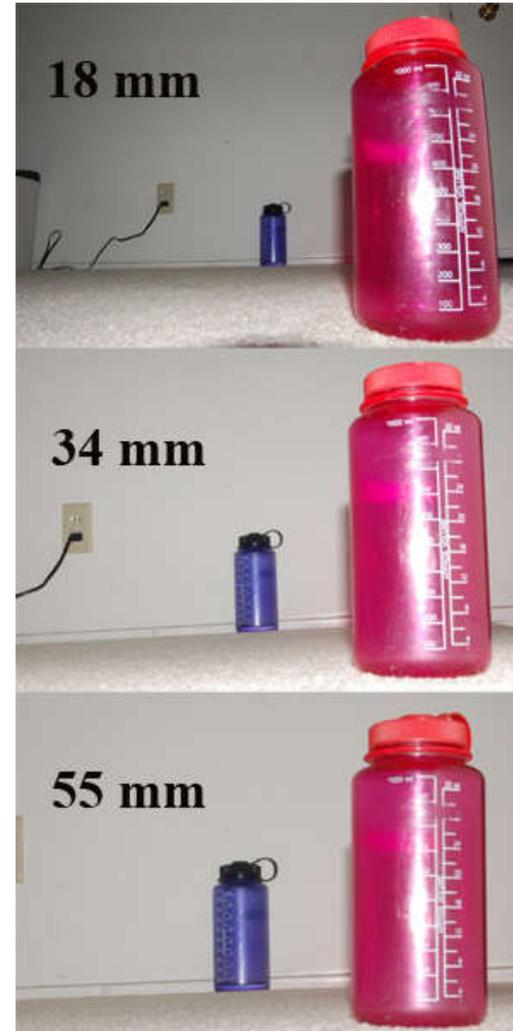
照相机镜头的焦距与纵向间隔

- 短焦距，纵向间隔大
- 长焦距，纵向间隔小

影响空间透视感！

思考：

1. 是否感觉手机拍照的空间效果比人眼看上更深，为什么？



8.2 照相机

照相机镜头的焦距与纵向间隔

2. 电影中背景迅速拉近的拍摄手法是怎么操作的？



图片来源：[ABEL苏](#) 的微博

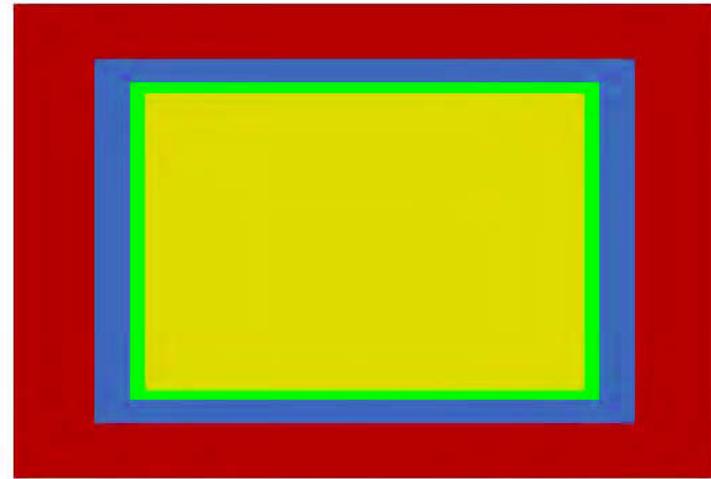
8.2 照相机

数码相机的等效尺寸

数码单反相机的传感器有许多不同的尺寸。例如：“全画幅”和APS画幅之分。全画幅的视角与对应关系可以参照135相机。感光尺寸不同将会对视角产生影响，也会带来“等效焦距”的问题。即：APS画幅等效于将原镜头产生的像场进行了裁切，因此视角会比原规格窄，等效于加长了焦距（等效焦距倍率）。

规格	尺寸	等效倍率
APS-C	24mm×16mm	1.5
APS-H	28.1mm×18.7mm	1.3

因此，需要选择与CMOS尺寸相配合的镜头，或按照等效倍率计算，选择标准镜头。



红色为全画幅尺寸。
蓝色为APS-H画幅尺寸。
绿色为尼康索尼宾得APS-C画幅尺寸。
黄色为佳能APS-C画幅尺寸。

36mm×24mm
28.1mm×18.7mm
24mm×16mm
22.5mm×15mm



红线框是36×24mm传感器能捕捉的画面，
蓝线框是15×23mm传感器拍摄的画面

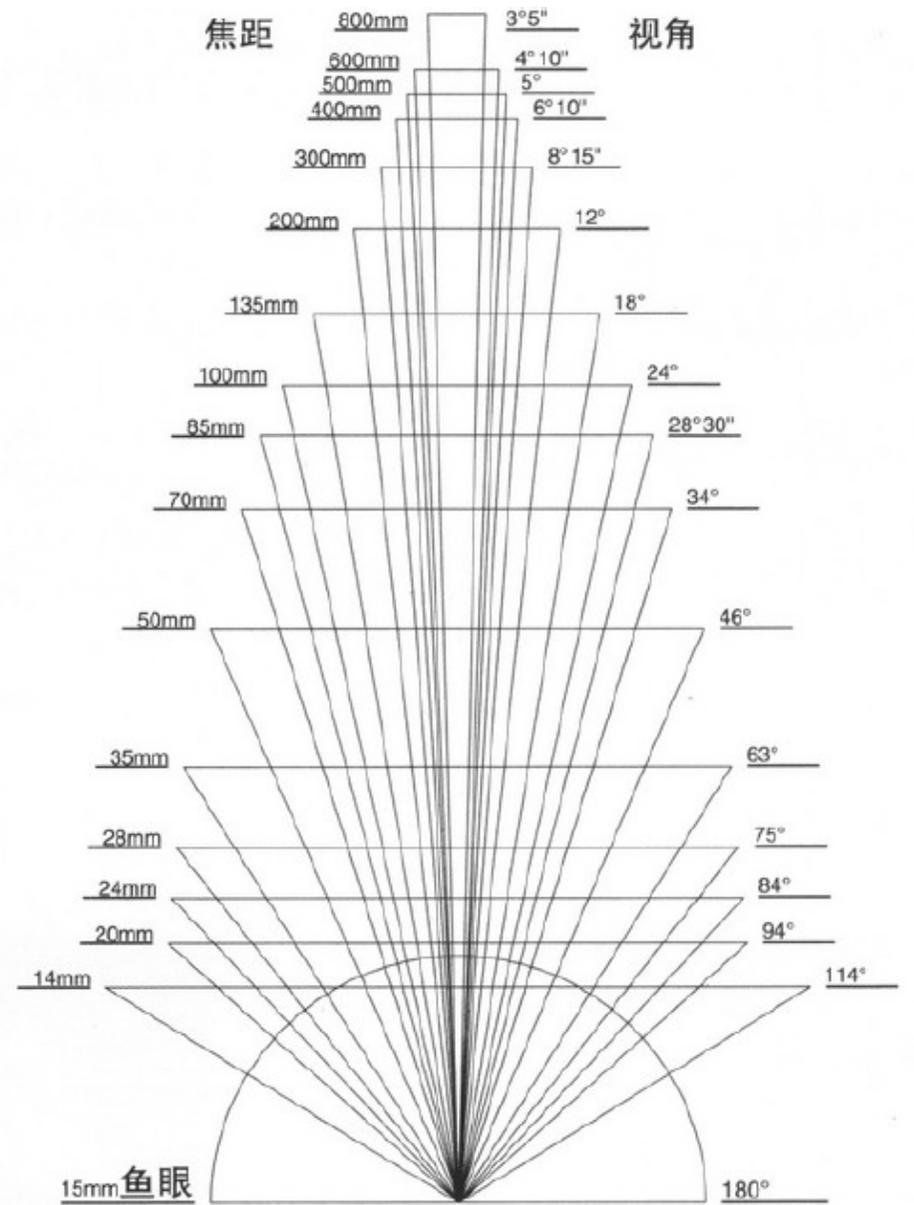
8.2 照相机

镜头的视场与像场

标准镜头

标准镜头的焦距以相机成像面的画幅对角线长度为准，当镜头焦距接近某类相机成像面的画幅对角线长度时被称为该类相机的标准焦距镜头，简称标准镜头或标头。

标准焦距镜头的视角约50°，焦距通常为45-55mm，画面透视关系类似于人眼所感觉到的透视关系，拍摄效果比较平实。是最基本的摄影镜头。



135镜头焦距和视角的对应关系

8.2 照相机

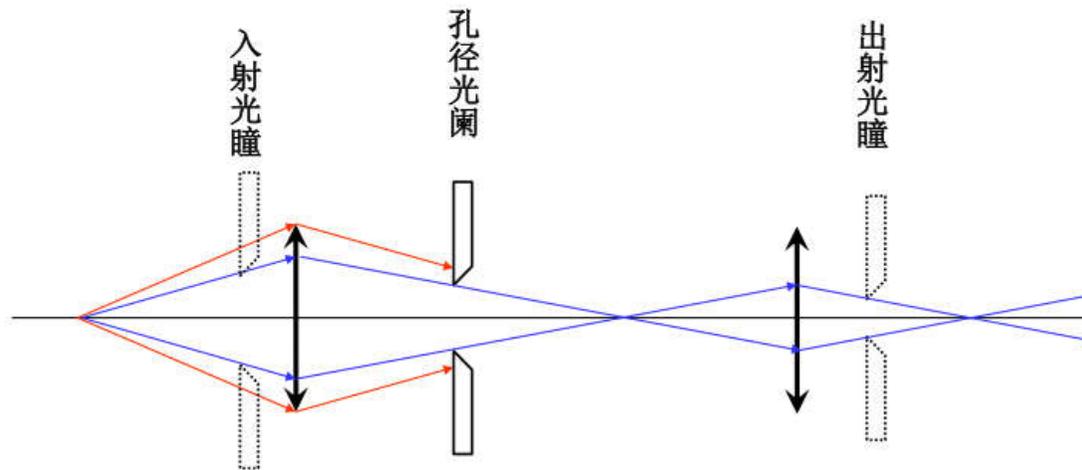
照相机的快门—光阑 (参考《光学》上册1.9节)

光阑的定义：对光具组成像时的光束孔径、成像点偏离光轴的范围加以限制的透镜边框、框架或特别设置的带孔屏障。光阑是球面光具组近似成像的必然要求。

光阑的作用：限制光束孔径、限制视场。

孔径光阑(aperture diaphragm)：决定轴上物点通过光具组光束孔径的光阑称为孔径光阑或有效光阑。被孔径光阑所限制的物、像方成像光束的张角分别叫做入射孔径角和出射孔径角。孔径光阑是轴上物点傍轴条件的要求。

入射光瞳(pupil)和**出射光瞳**：孔径光阑在物方和像方的共轭。



孔径光阑和光瞳是对特定共轭物、像点而言的，不同的共轭点可以有不同的孔径光阑和光瞳

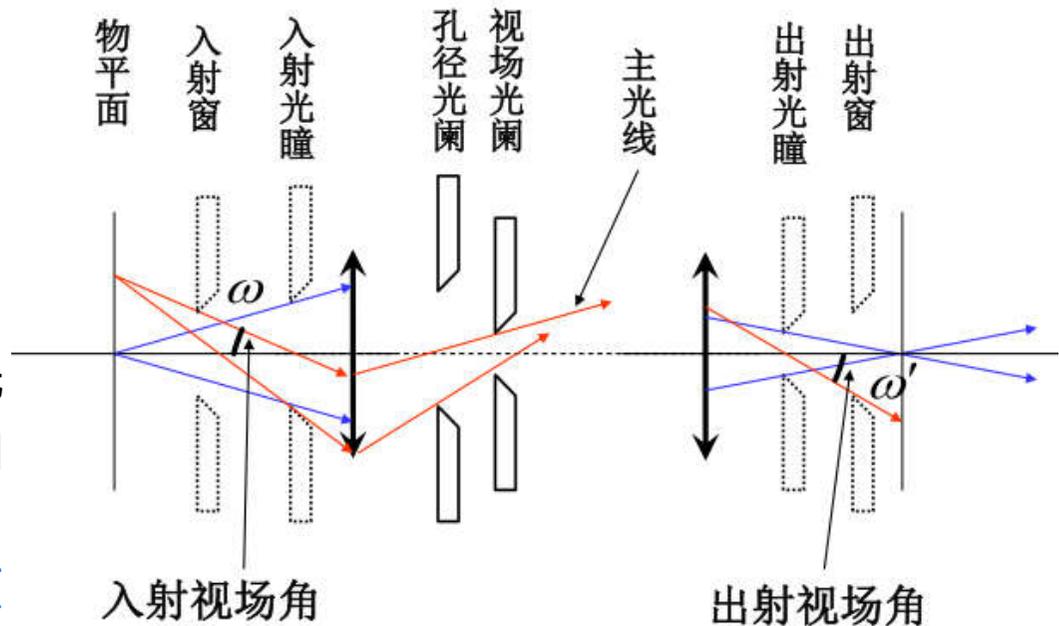
8.2 照相机

照相机的快门—光阑 (参考《光学》上册1.9节)

视场光阑, 入射窗和出射窗

主光线: 物、像共轭光束中, 与通过入射光瞳和出射光瞳中心光线共轭的光线。

视场光阑(field diaphragm): 决定**轴外物点**的主光线能否通过光具组的光阑。恰好能通过光具组主光线与光轴在物方和像方的夹角叫做入射视场角和出射视场角。**视场光阑是轴外物点傍轴条件的要求。**

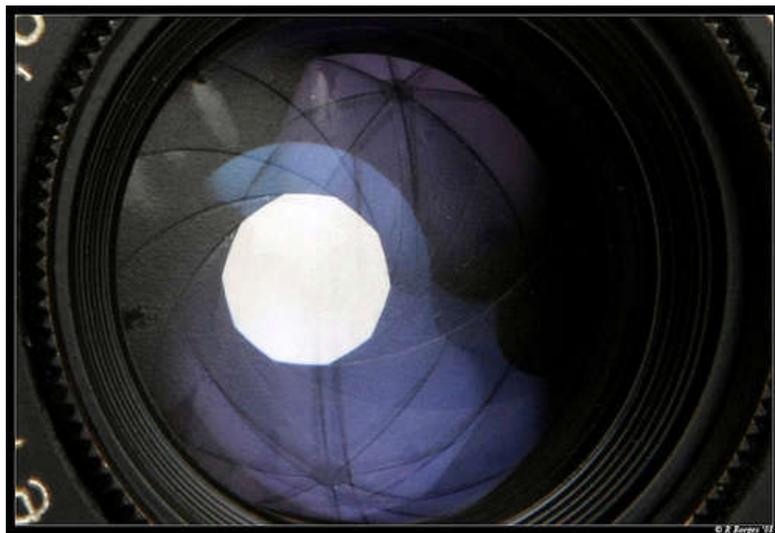
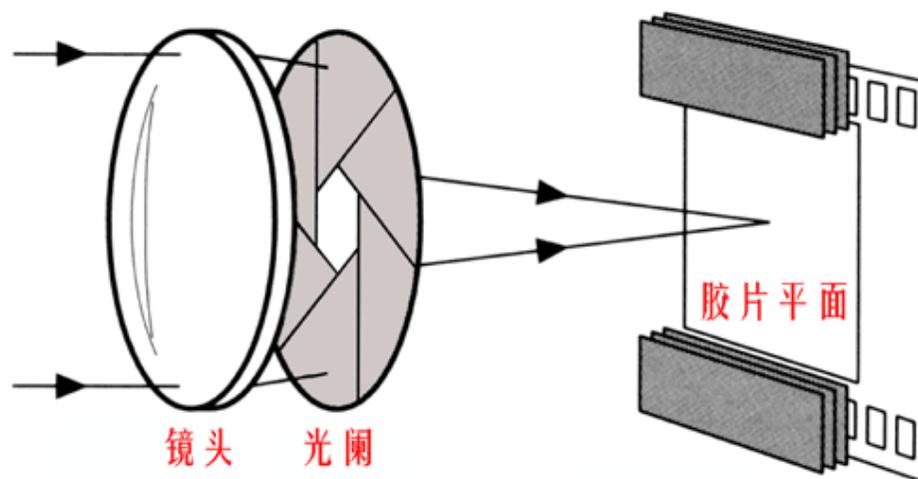


入射窗(window)和出射窗: 视场光阑在物方像方的共轭。

渐晕: 当物点逐渐远离光轴时, 参与成像的光线逐渐减少, 导致图像逐渐昏暗, 称作渐晕。当入射窗就在物平面上时, 渐晕将不出现。

8.2 照相机

照相机的光圈



8.2 照相机

照相机的光圈

$$\text{相对孔径} = \frac{D}{f}$$

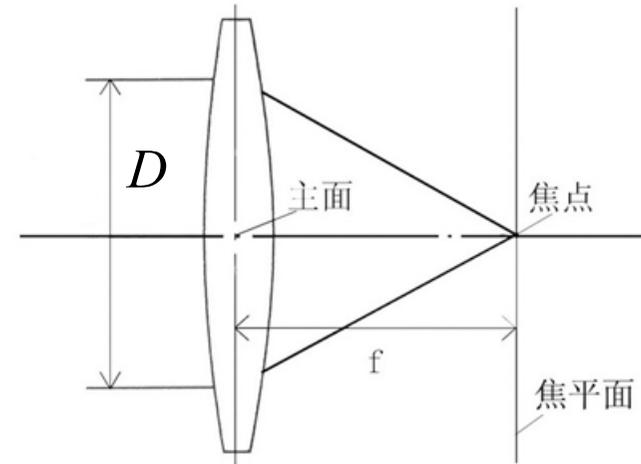
f : 镜头焦距

D : 镜头的有效孔径 (入瞳直径)

国标光圈数常表示为 f/n 表示, 如 $f/8$, 更常用光圈数或称F数, 表示为 F_n 。其中

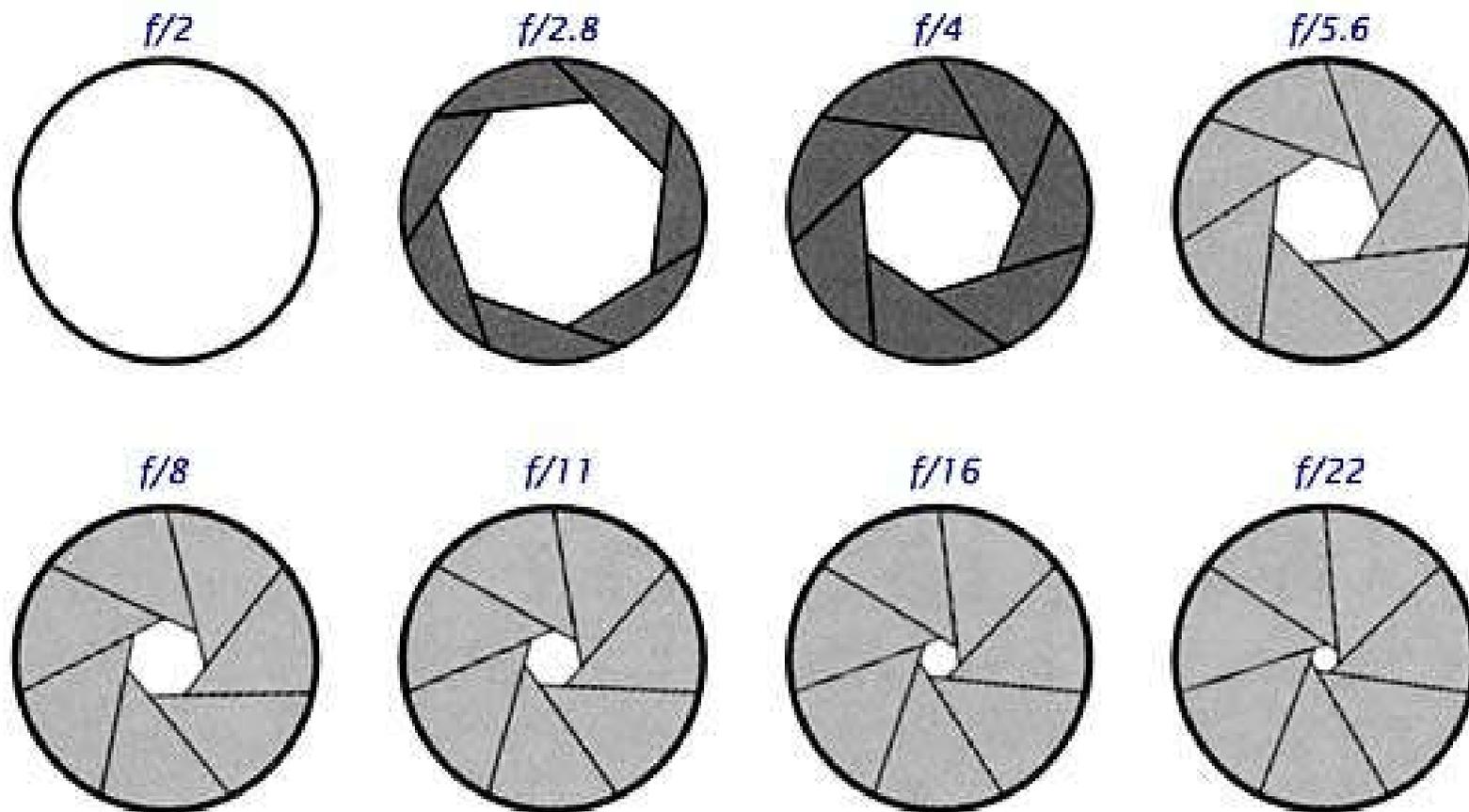
$$n = \frac{f}{D}$$

进入镜头的光通量 \propto 光阑面积 $\propto D^2 \propto \frac{1}{n^2}$



8.2 照相机

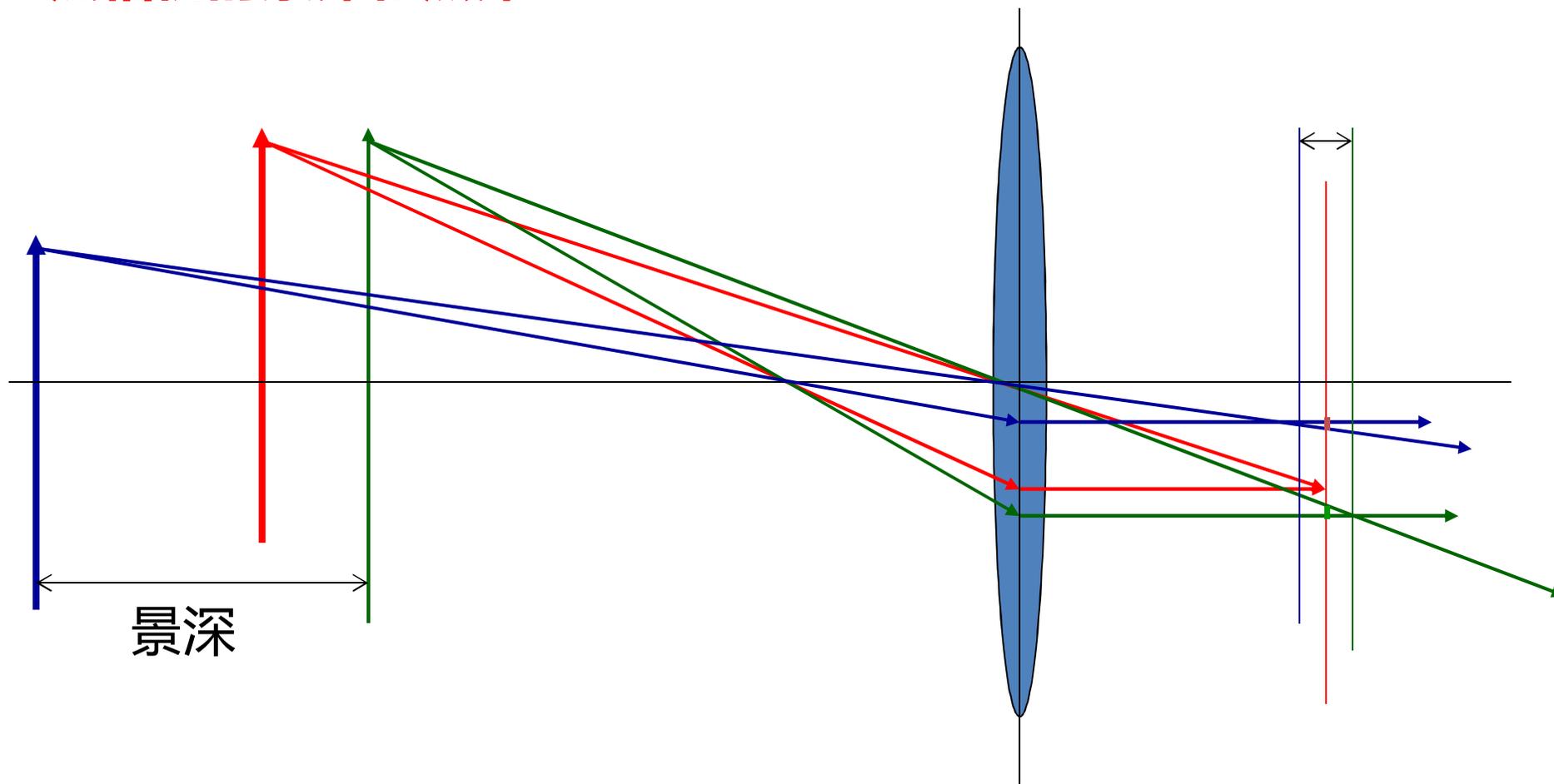
照相机的光圈



各级通光量之间相差两倍

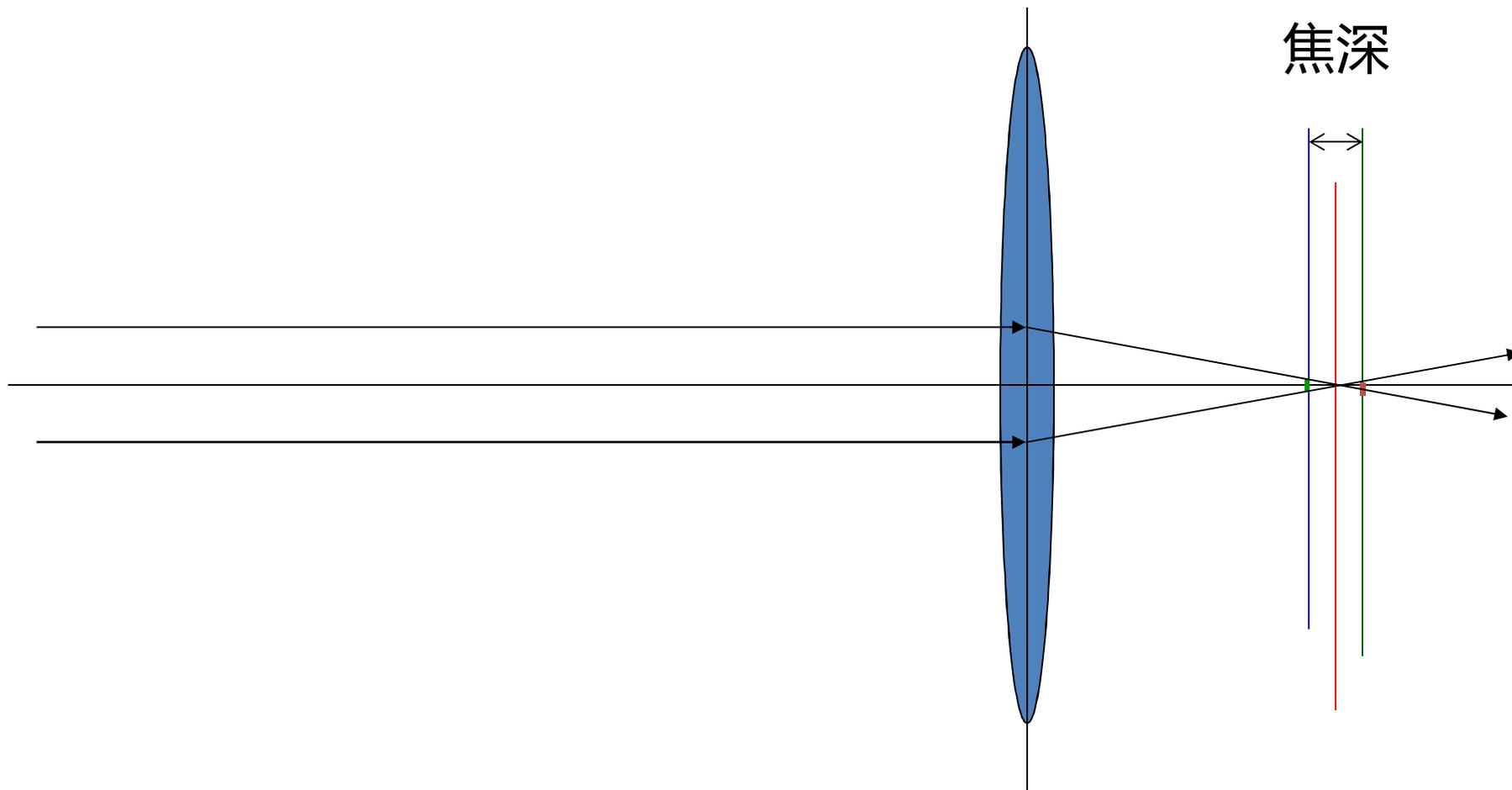
8.2 照相机

照相机的景深和焦深



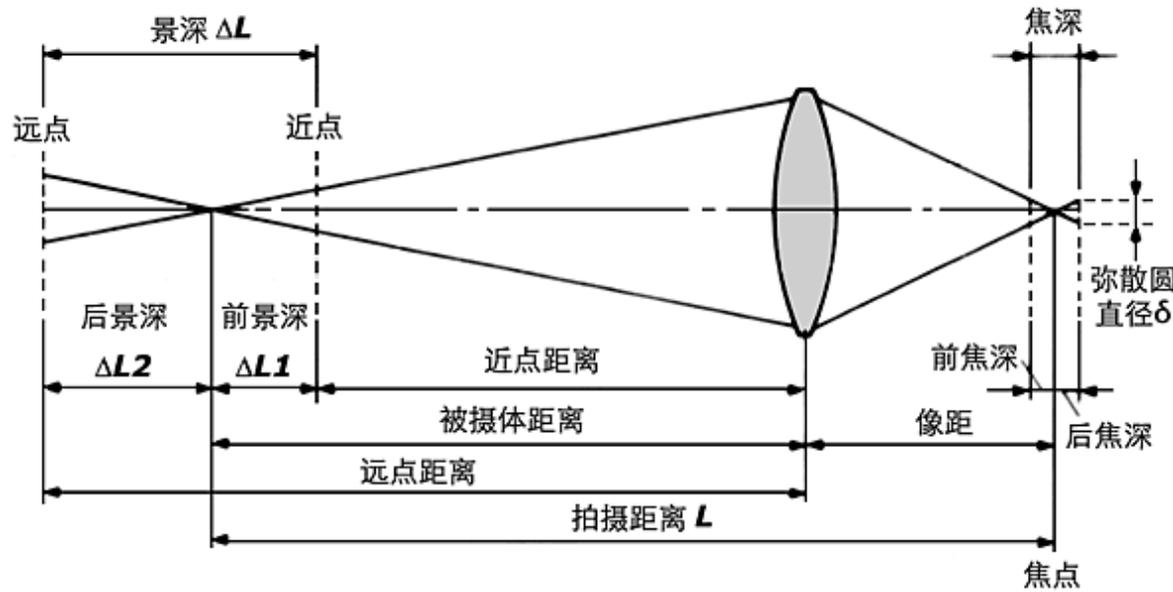
8.2 照相机

照相机的景深和焦深

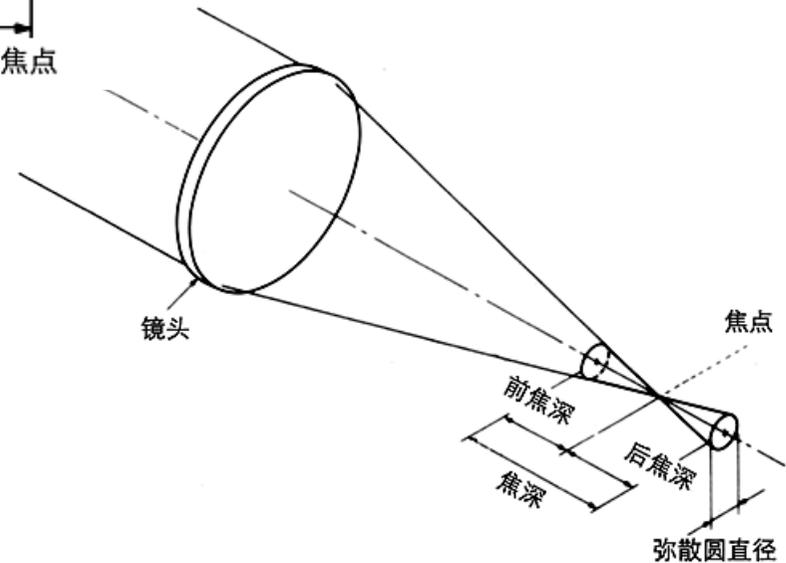


8.2 照相机

照相机的景深和焦深



成像是否清晰的判据：弥散圆的直径
小于底片的最小分辨距离。



8.2 照相机

照相机的景深和焦深

景深的作用：前景、背景均被虚化

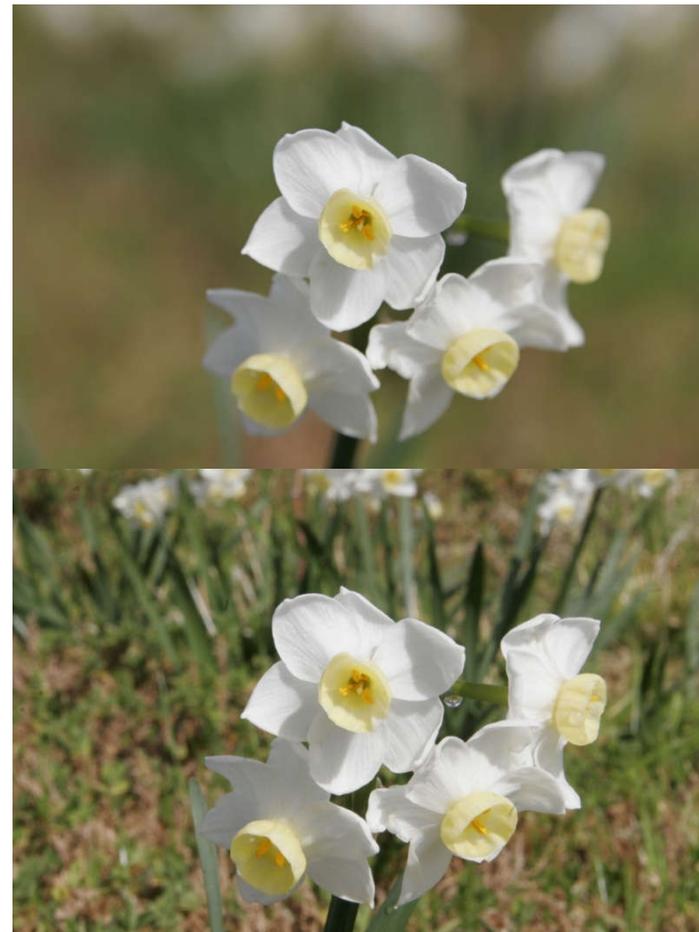


猫Q:85881886 2011/06/11 F2.8 1/320 NIKON D7000 尼康 AF 105/2D DC

8.2 照相机

照相机的景深和焦深

大光圈小景深



8.2 照相机

影响景深的因素

由高斯公式推导 $\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} \implies s = \frac{s'f}{s' - f}$

$$ds = \frac{f(s' - f)ds' - s'f ds'}{(s' - f)^2} = -\frac{f^2 ds'}{f^2 \left(\frac{s'}{f} - 1\right)^2} = -\frac{ds'}{\left(\frac{s'}{f} - 1\right)^2} \quad \frac{s'}{f} \geq 1$$

$$\Delta s = \frac{\Delta s'}{\left(\frac{s'}{f} - 1\right)^2}$$

- 对于固定的 $\Delta s'$ 和 f , s 变大, 则 s' 变小, 使 Δs 增大, 即景深增大

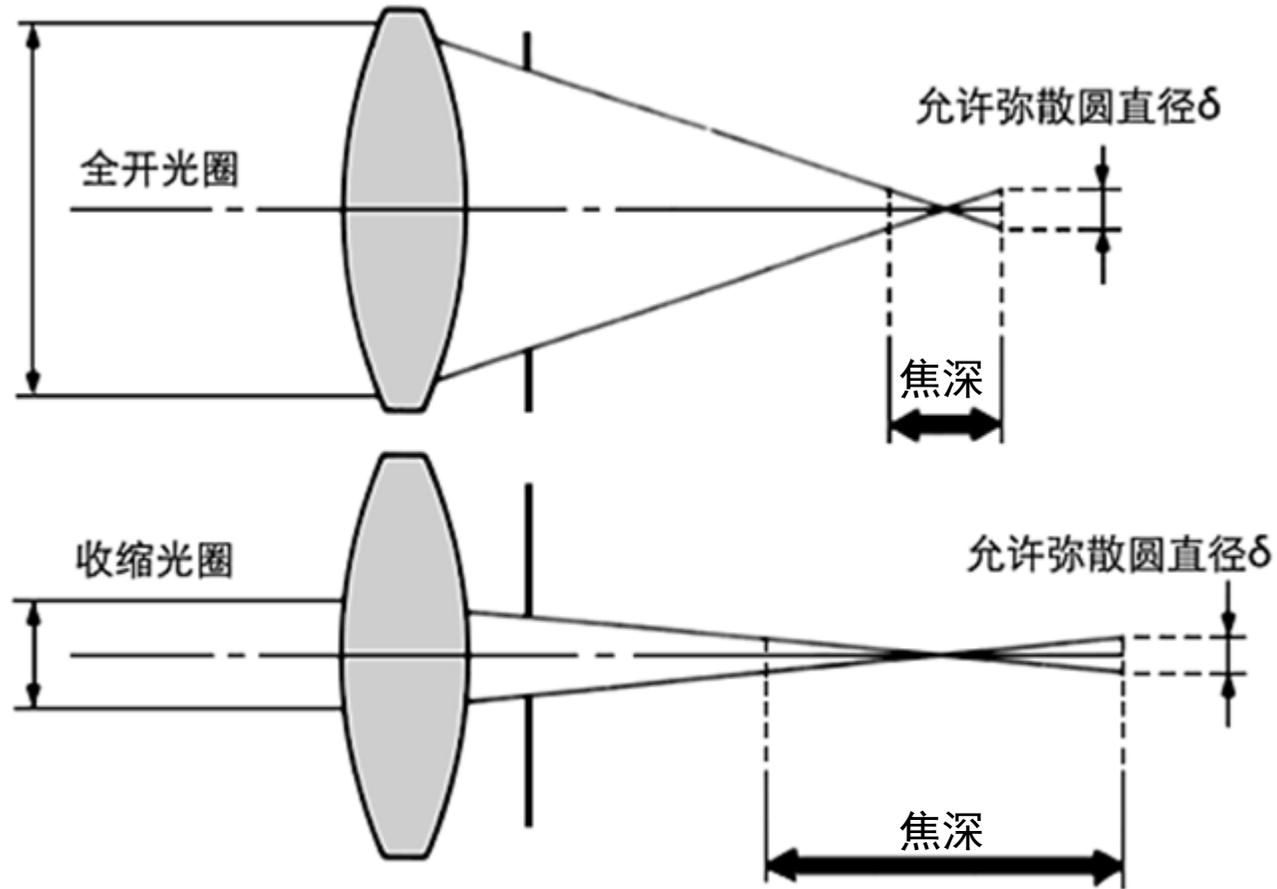
$$\Delta s' = \frac{\Delta s}{\left(\frac{s}{f} - 1\right)^2}$$

- 在 Δs 和 s 相同时, 对于大 f , 使 $\Delta s'$ 增大, 相同物距下, 像距增大, 即景深减小

由牛顿公式也可以得到相似的结论 $x' = \frac{f^2}{x} \implies \frac{\delta x'}{\delta x} = -\frac{f^2}{x^2}$

8.2 照相机

景深与光圈的关系



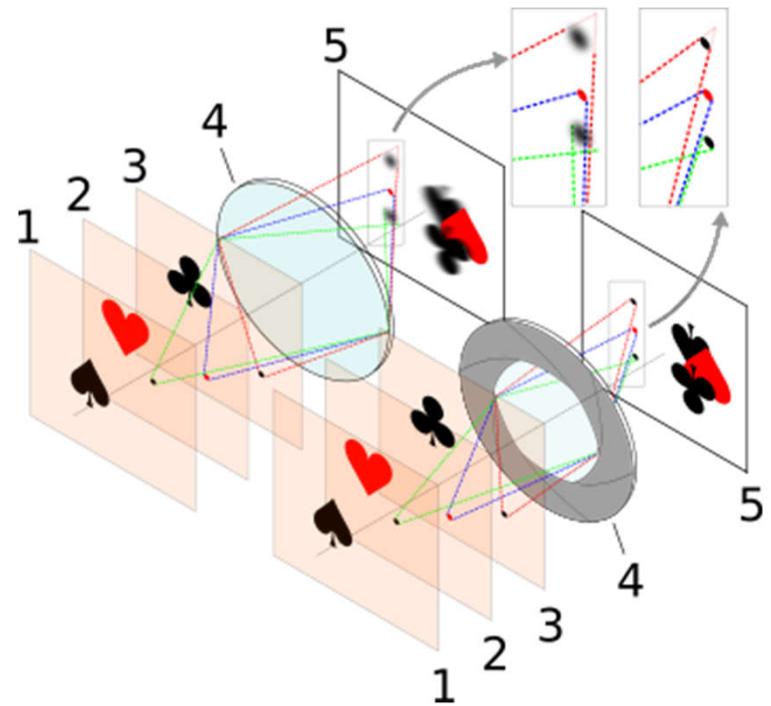
光圈小景深大

8.2 照相机

影响景深的因素总结

影响景深的三个因素

1. 景深与景物拍摄的距离成正比。
2. 景深与焦距的长短成反比。
3. 景深与光圈级数成正比：镜头焦距和物体被拍摄距离维持不变时，光圈越大，景深越浅，景深之外的物体成像就更加模糊—虚化。



光圈对景深的影响

大光圈+长焦镜头+近距离 \longrightarrow 小景深
小光圈+短焦镜头+远距离 \longrightarrow 大景深

8.2 照相机



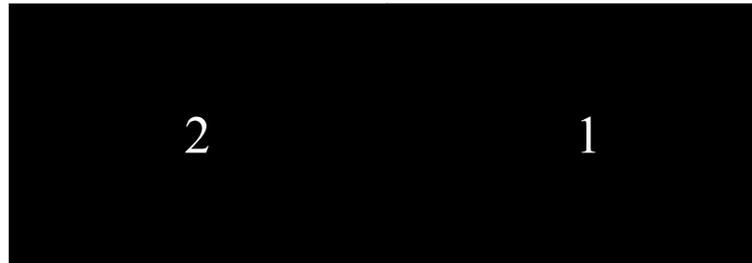
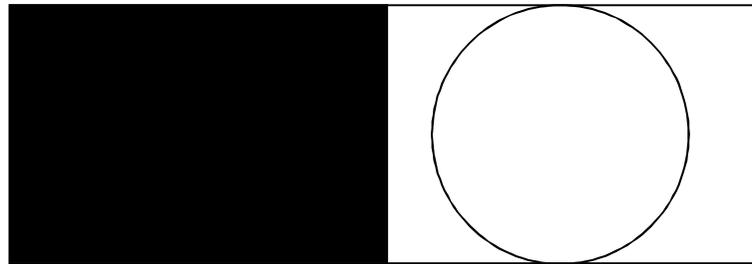
思考：数码相机的画幅是否会对景深产生影响？

8.2 照相机

照相机的快门 (Shutter)

快门：控制曝光量

(1) 帘幕快门：布帘，钢片；横向、纵向



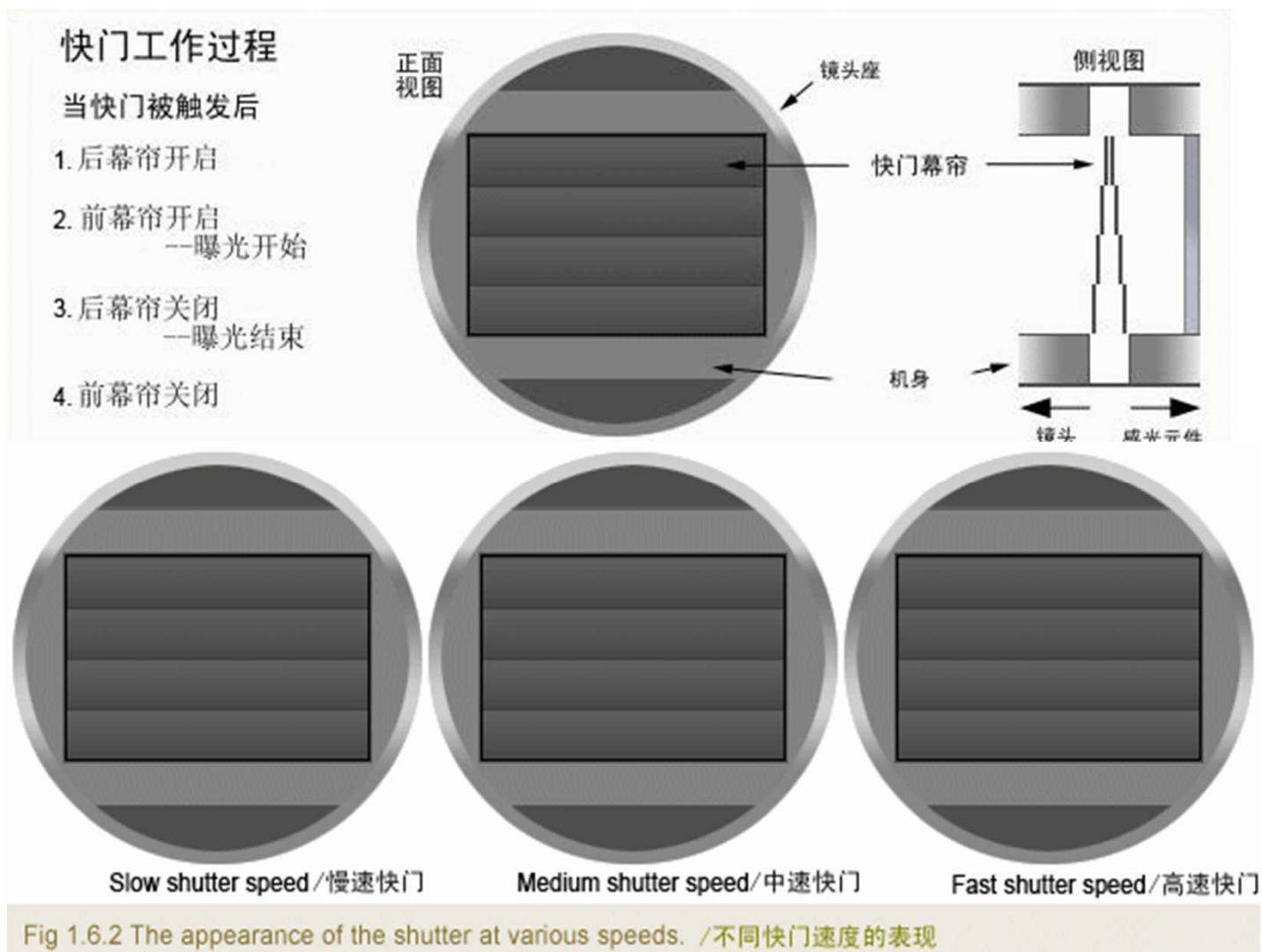
高速时，是一条光缝扫过底片

速度 $1/t(s)$: $1/30$, $1/125$, $1/250$ (300) , $1/500$,
 $1/1000$, $1/2000$



8.2 照相机

照相机的快门



8.2 照相机

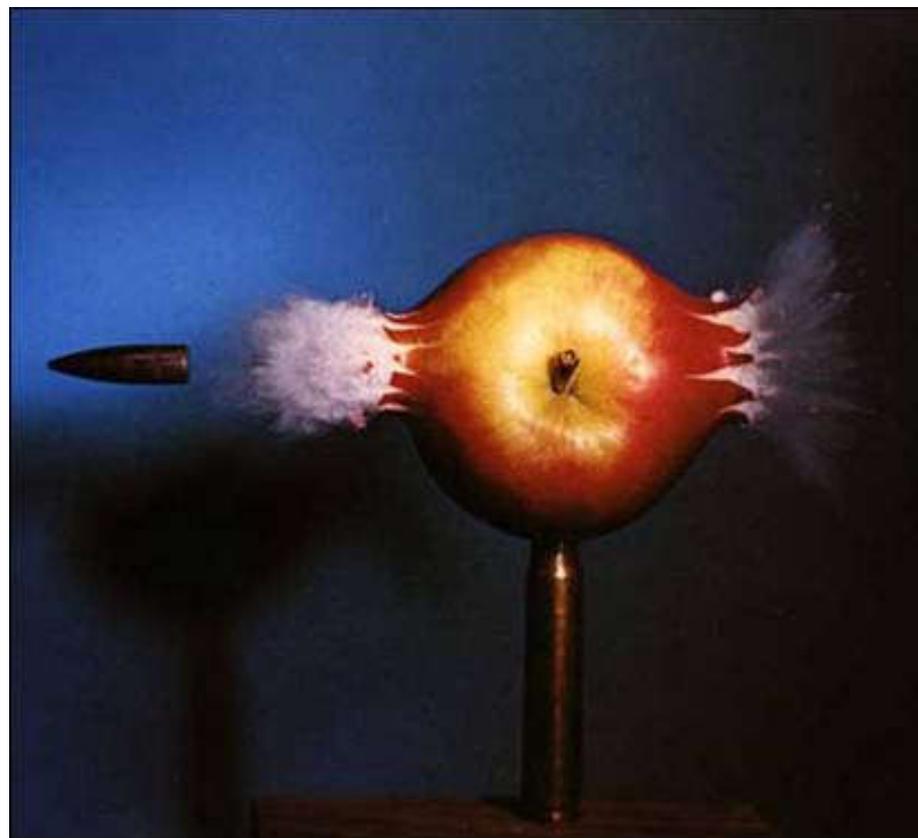
照相机的快门



钢片帘幕快门控制机构



纵向高速钢片快门



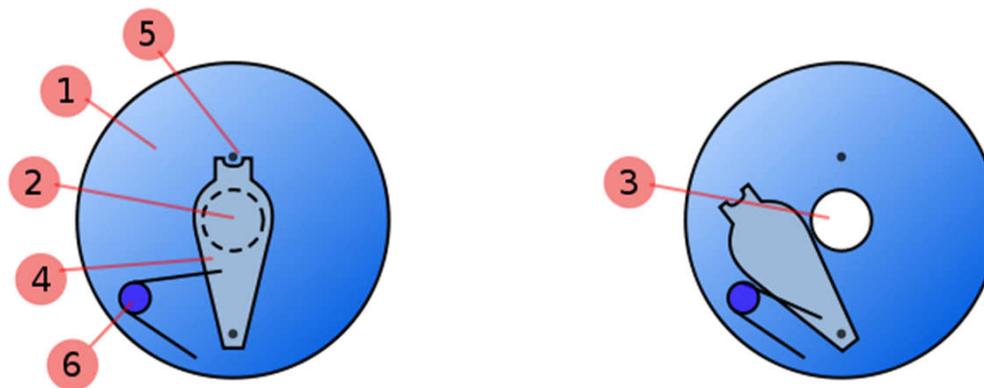
高速摄影

8.2 照相机

照相机的快门

快门：控制曝光量

(2) 中心收缩式快门



镜间快门与焦平面快门



8.2 照相机

照相机的感光度 (ISO)

ISO描述了光传感器的灵敏程度，ISO越高，光传感器越敏感，在相同快门速度和光圈值的条件下，图像就越亮，但是过高的感光度会增加图像的噪点。



8.2 照相机

照相机的曝光

曝光决定于光圈、快门速度和传感器或胶片的 ISO 灵敏度。



+1EV



无曝光补偿



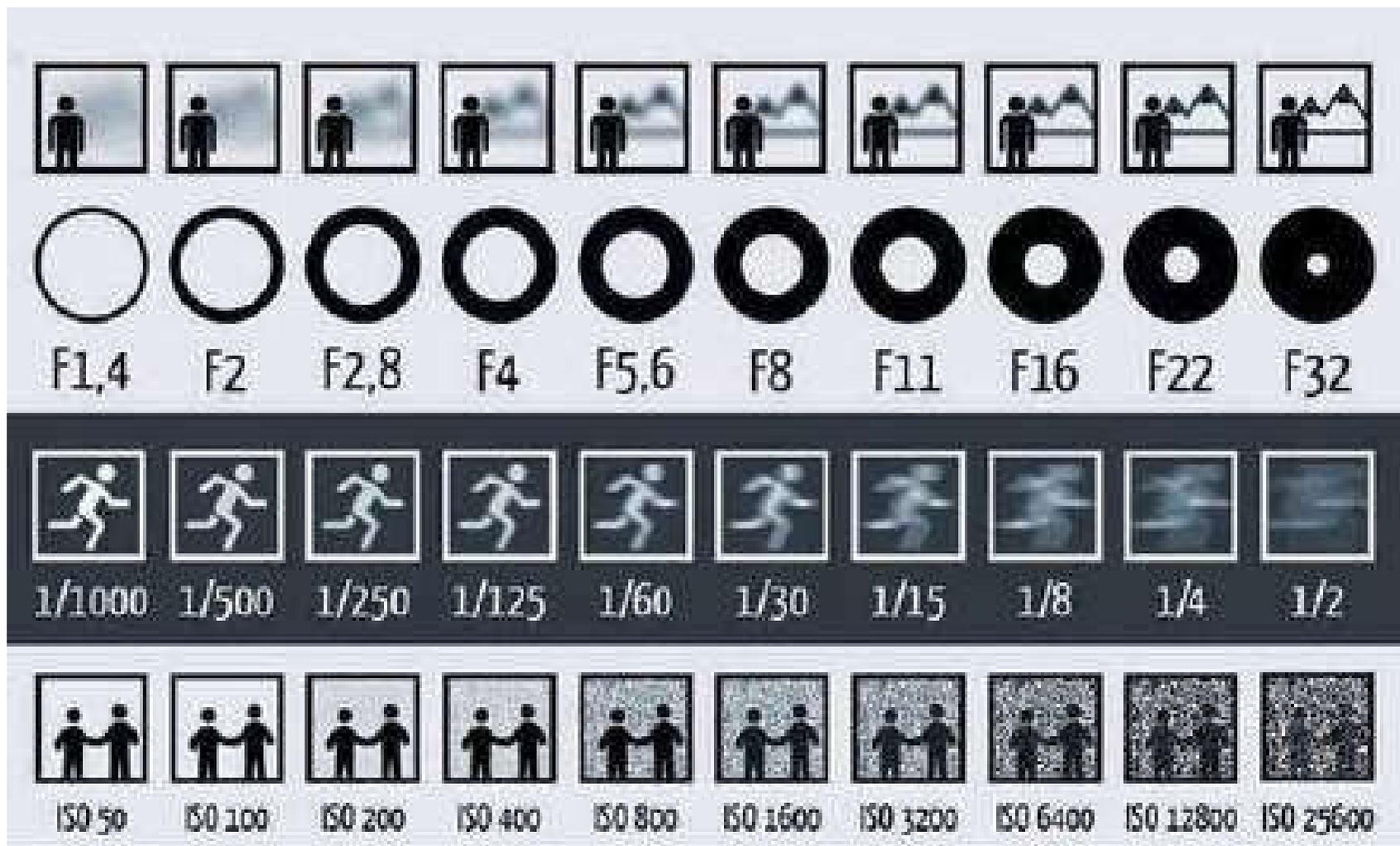
-1EV

可进一步参考：

<https://www.autodesk.com/cn/3dsmax/2012help/index.html?url=files/GUID-A8174FDC-FA6A-4EA8-8F26-EDDB7066994-1815.htm,topicNumber=d28e354270>

8.2 照相机

照相机的感光度、快门和光圈的综合效果



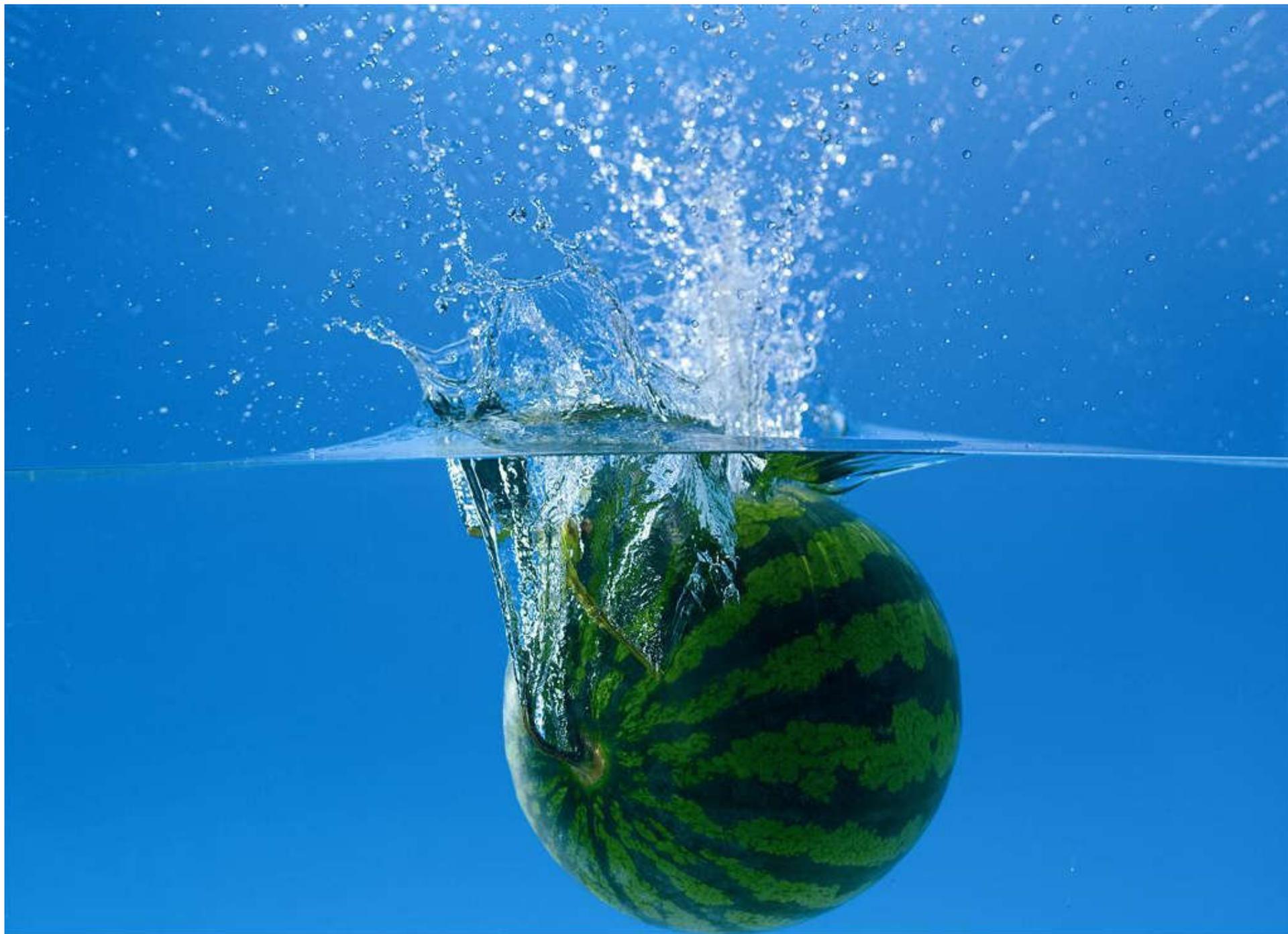
8.2 照相机



8.2 照相机









www.31ari.com







8.2 照相机

镜头参数

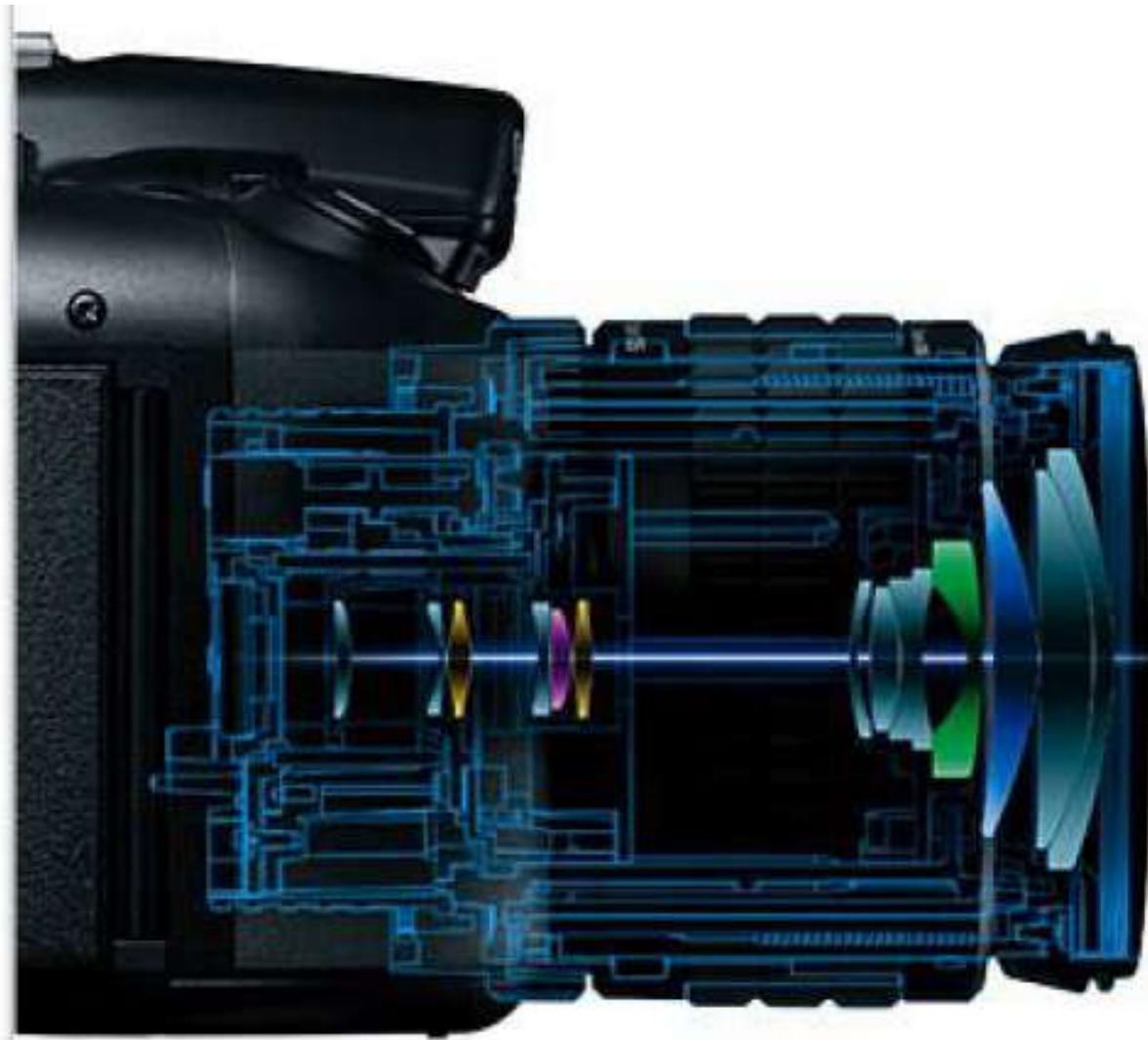


景深标尺

对应光圈数之间的距离为景深 (相同光圈数的标尺一个表示前景深, 一个表示后景深)

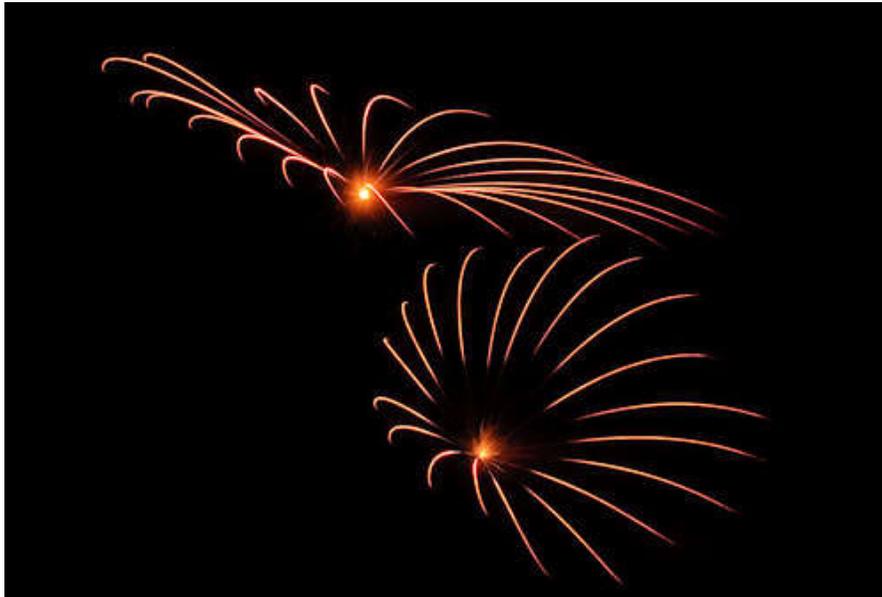
8.2 照相机

照相机的镜头



8.2 照相机

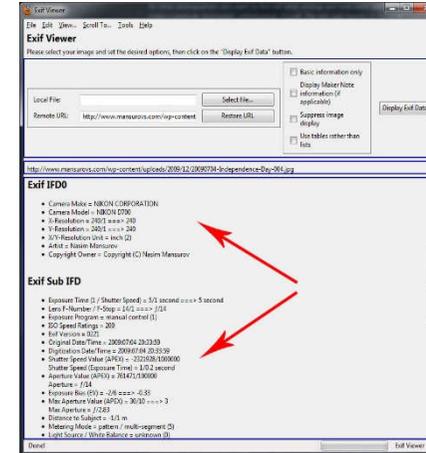
如何从照片上获取拍摄参数—EXIF



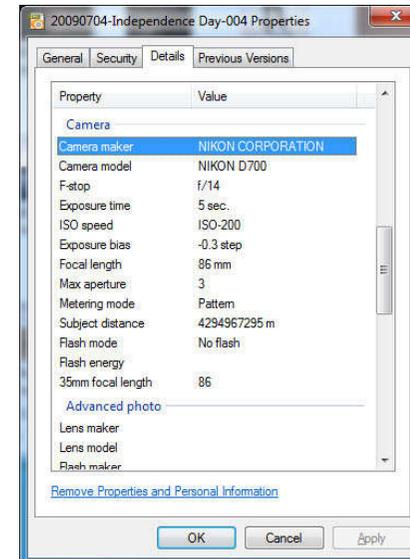
NIKON D700 @ 86mm, ISO 200, 5/1, f/14.0

EXIF查看工具:

1. EXIF viewer

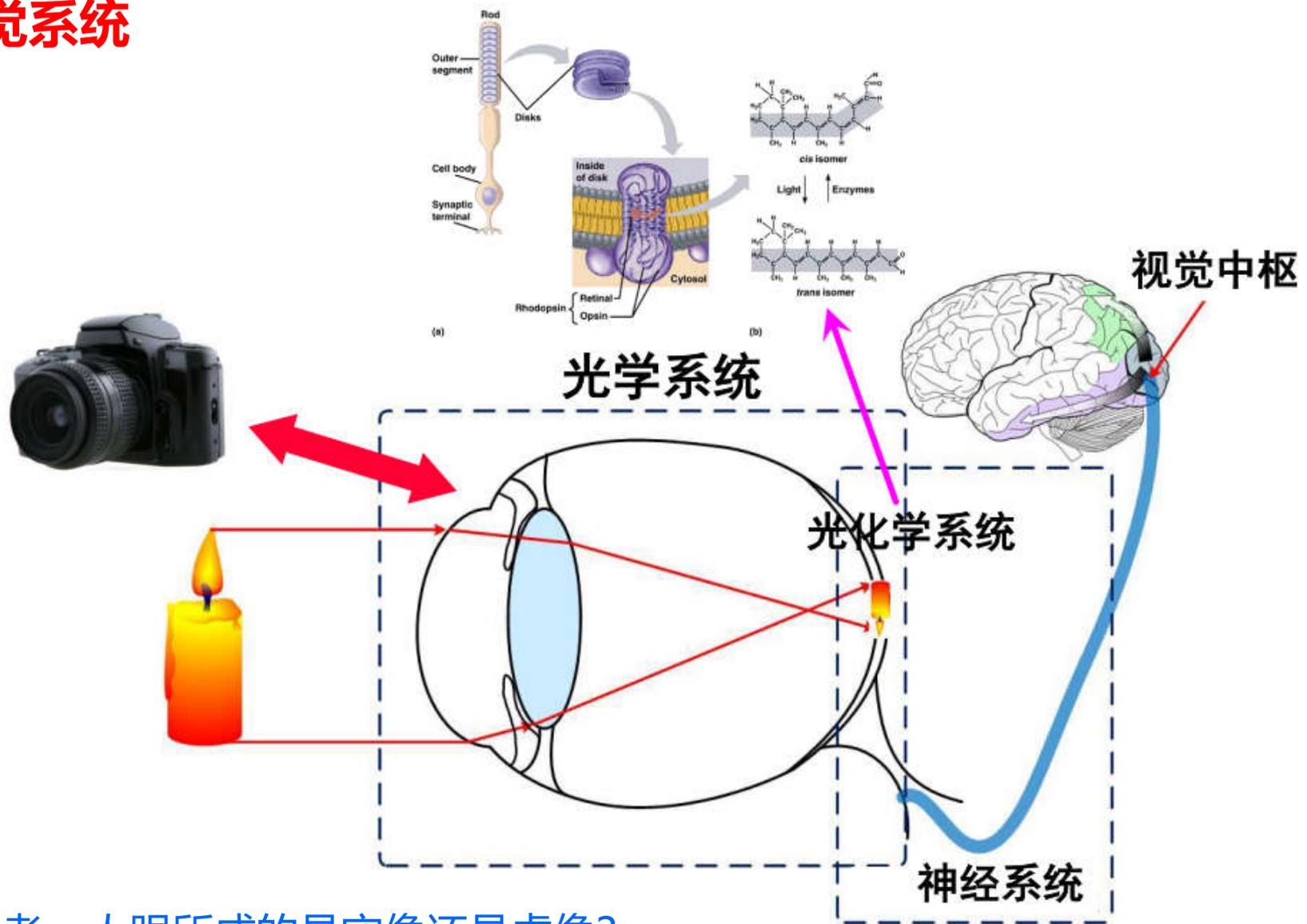


2. ACDSEE等图像查看器



8.3 眼睛

视觉系统



8.3 眼睛

眼睛的剖面图

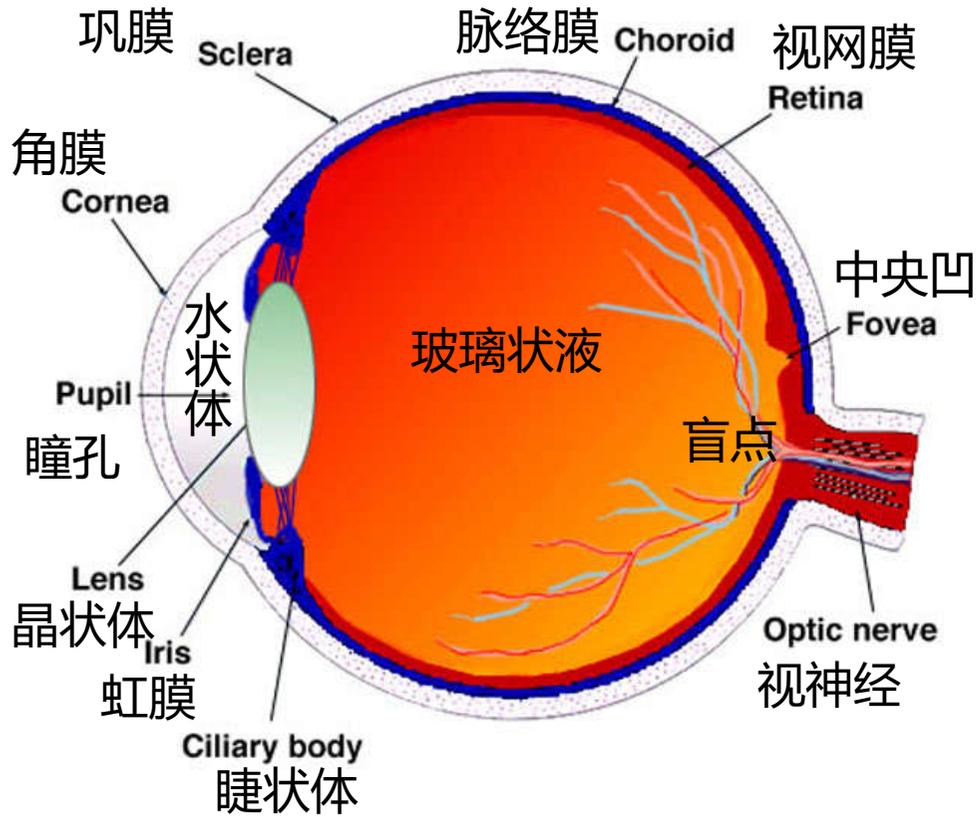
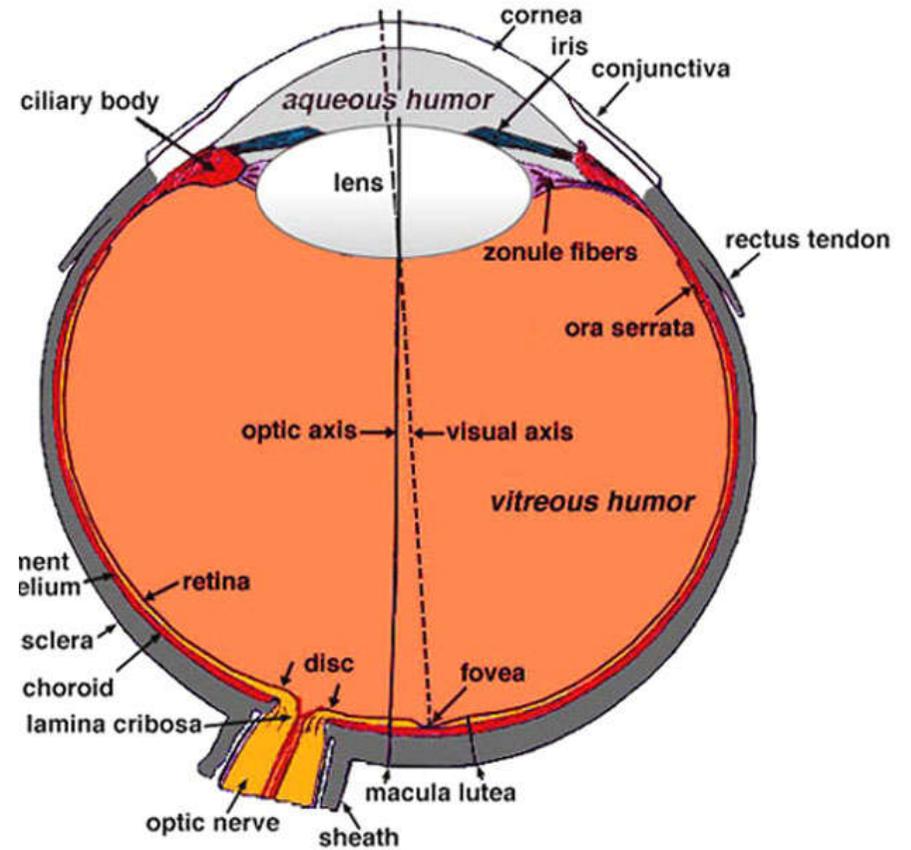


Fig. 6. Vertical sagittal section of the adult human eye.

垂直剖面图



Sagittal horizontal section of the adult human eye.

水平剖面图

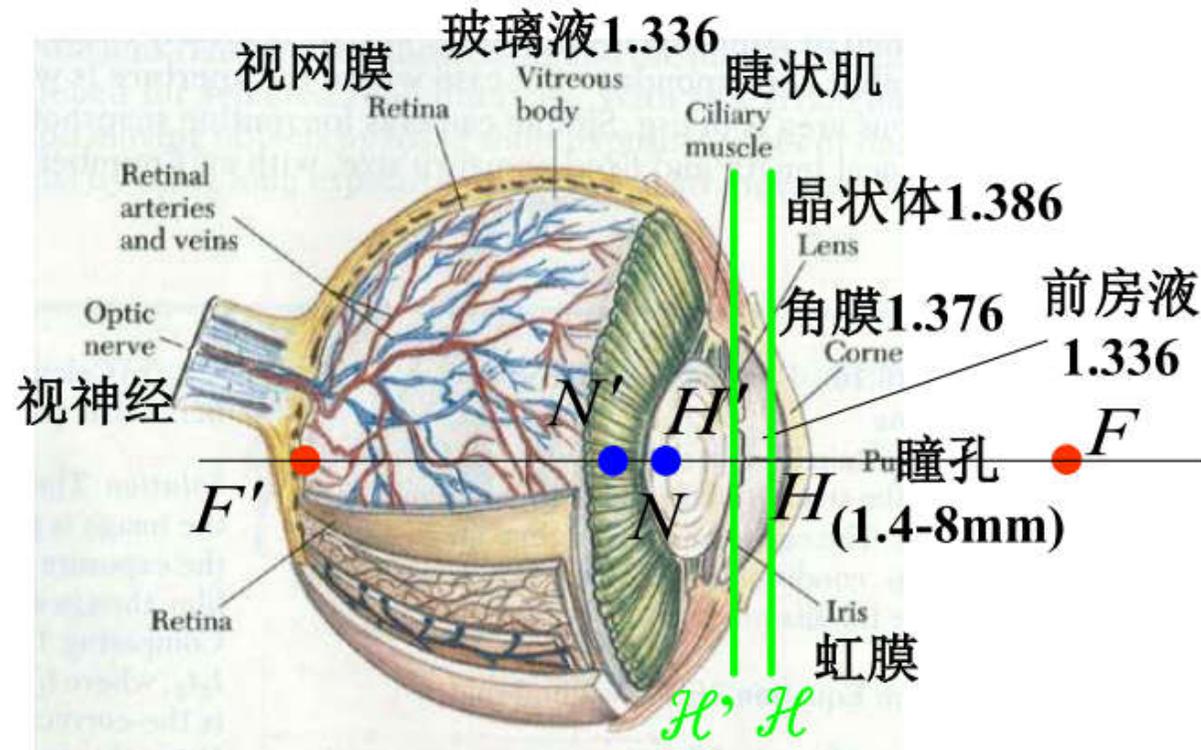
8.3 眼睛

眼睛的光学等效

第一主点: 1.348mm; 第二主点: 1.602mm

明视距离: $s_0 \approx 25\text{cm}$

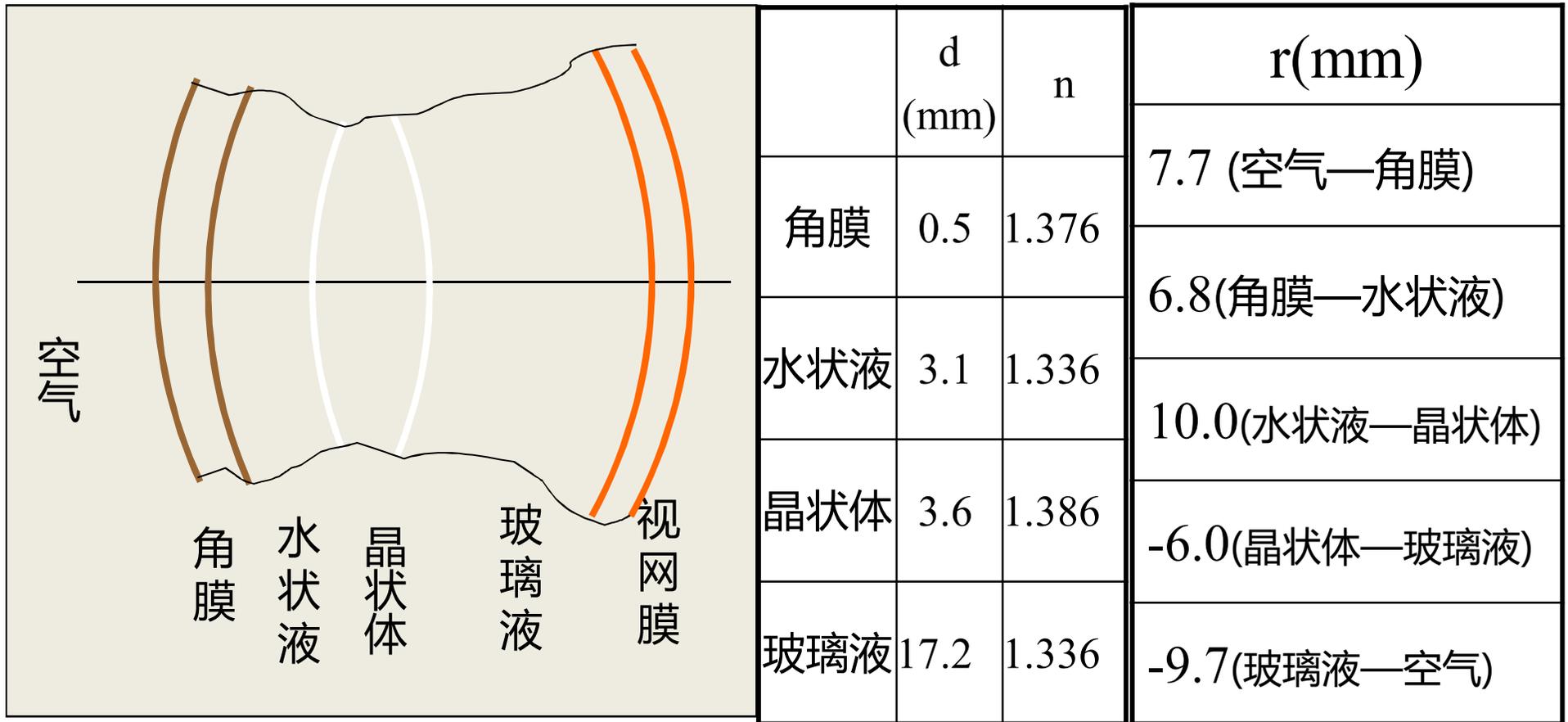
物方焦距: 17.05mm; 像方焦距: 22.785mm



8.3 眼睛

眼睛的光学等效

示意眼

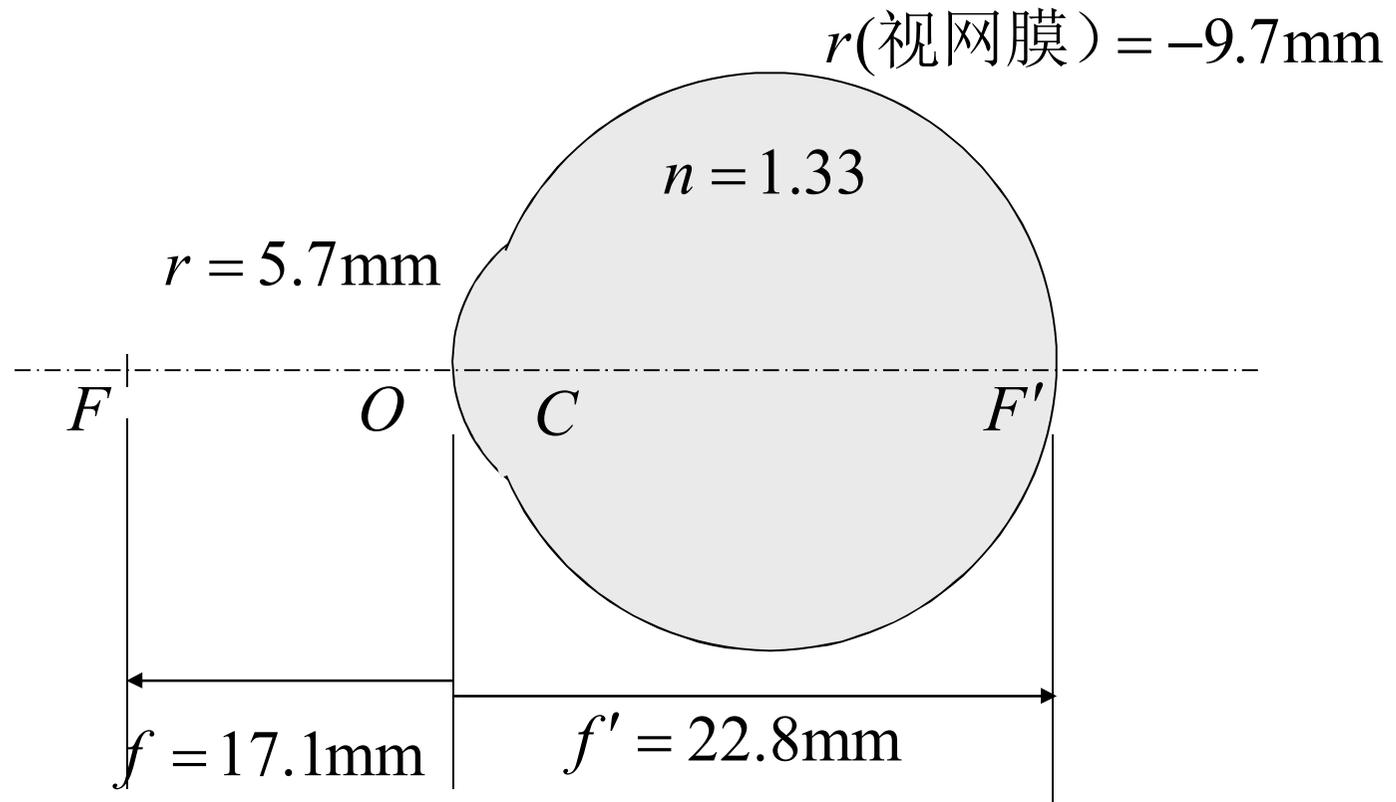


8.3 眼睛

眼睛的光学等效

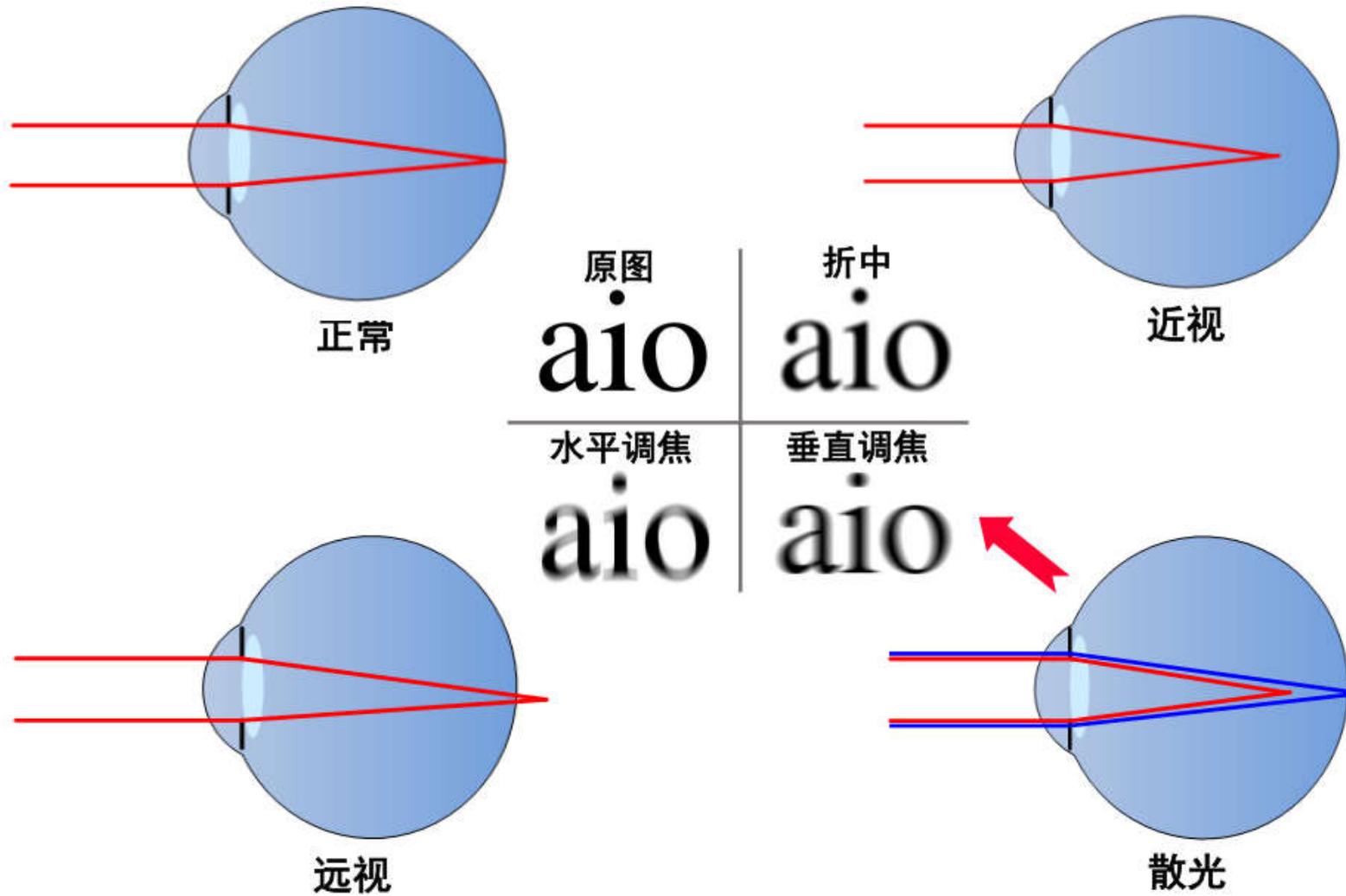
简化眼

等效于一个可变焦距的凸透镜。视网膜到光心的距离等于眼睛对无穷远处聚焦时的像方焦距。



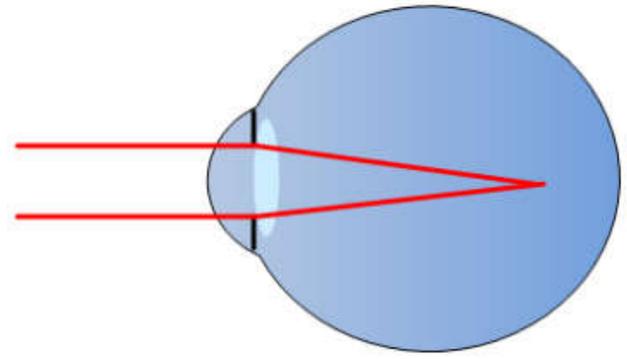
8.3 眼睛

近视、远视和散光

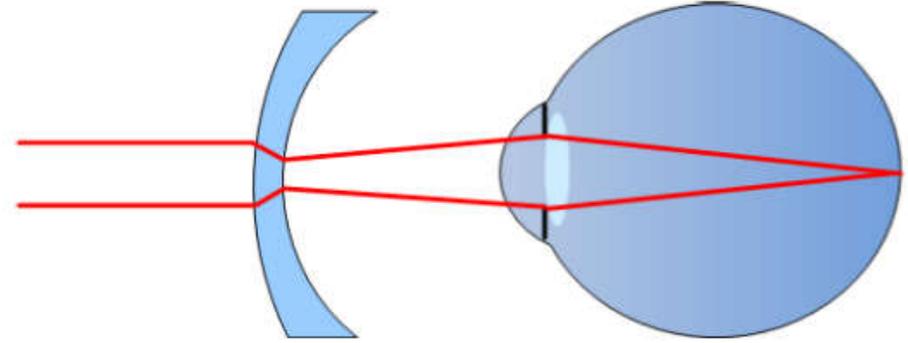


8.3 眼睛

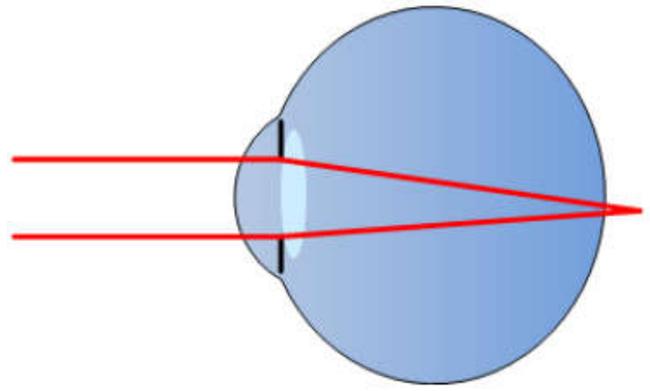
视力的矫正



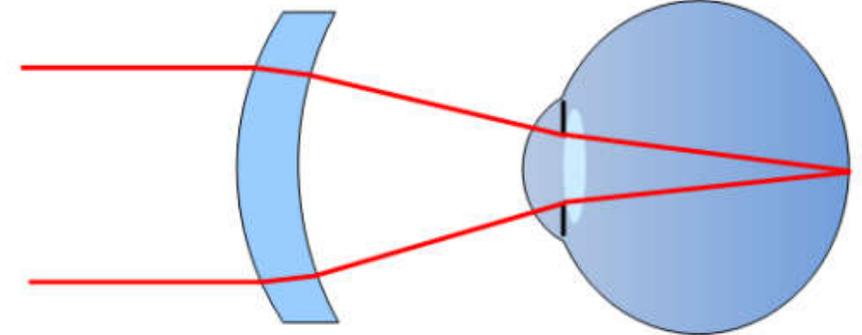
近视矫正前



近视矫正后



远视矫正前



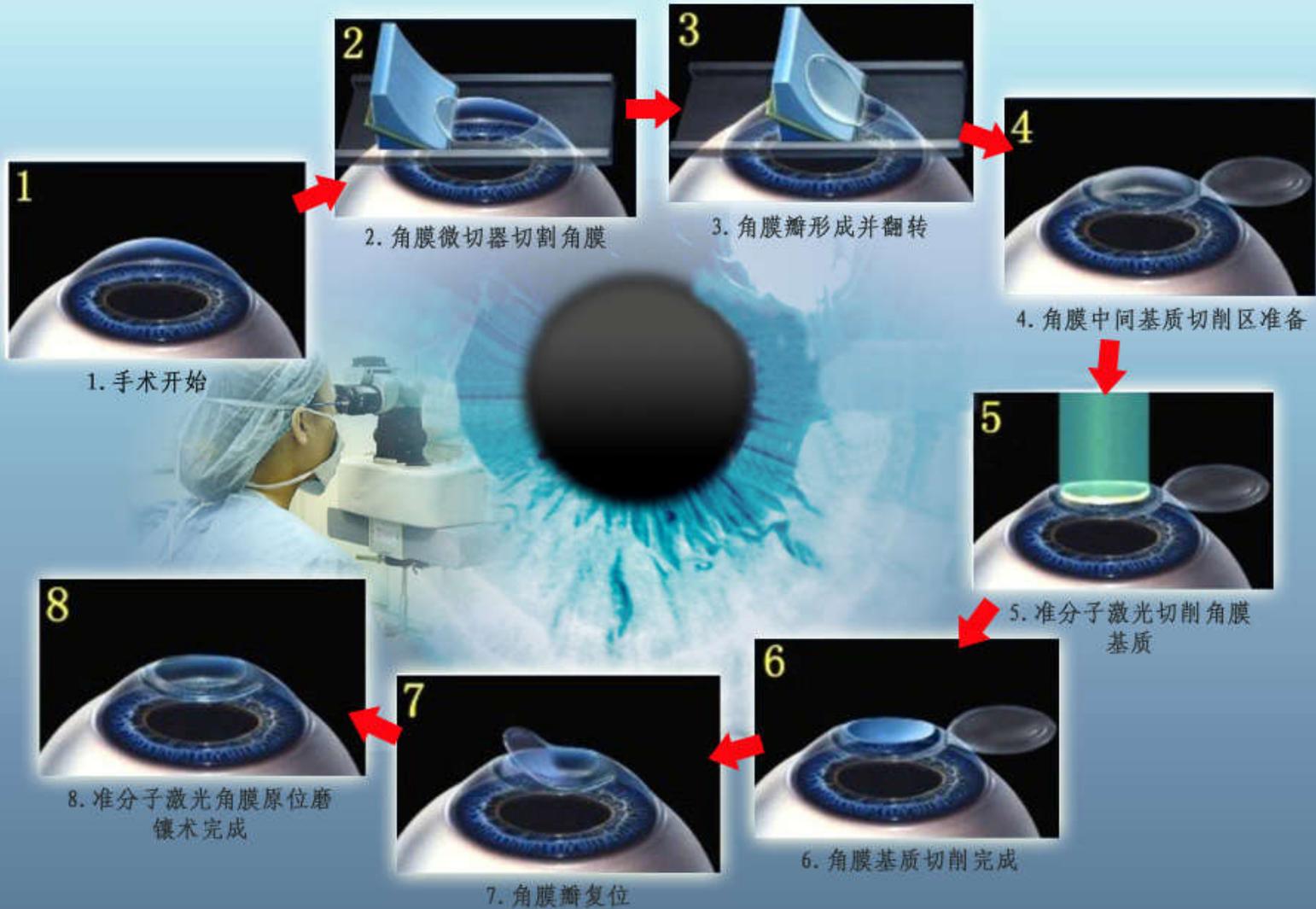
远视矫正后

8.3 眼睛

视力的 矫正

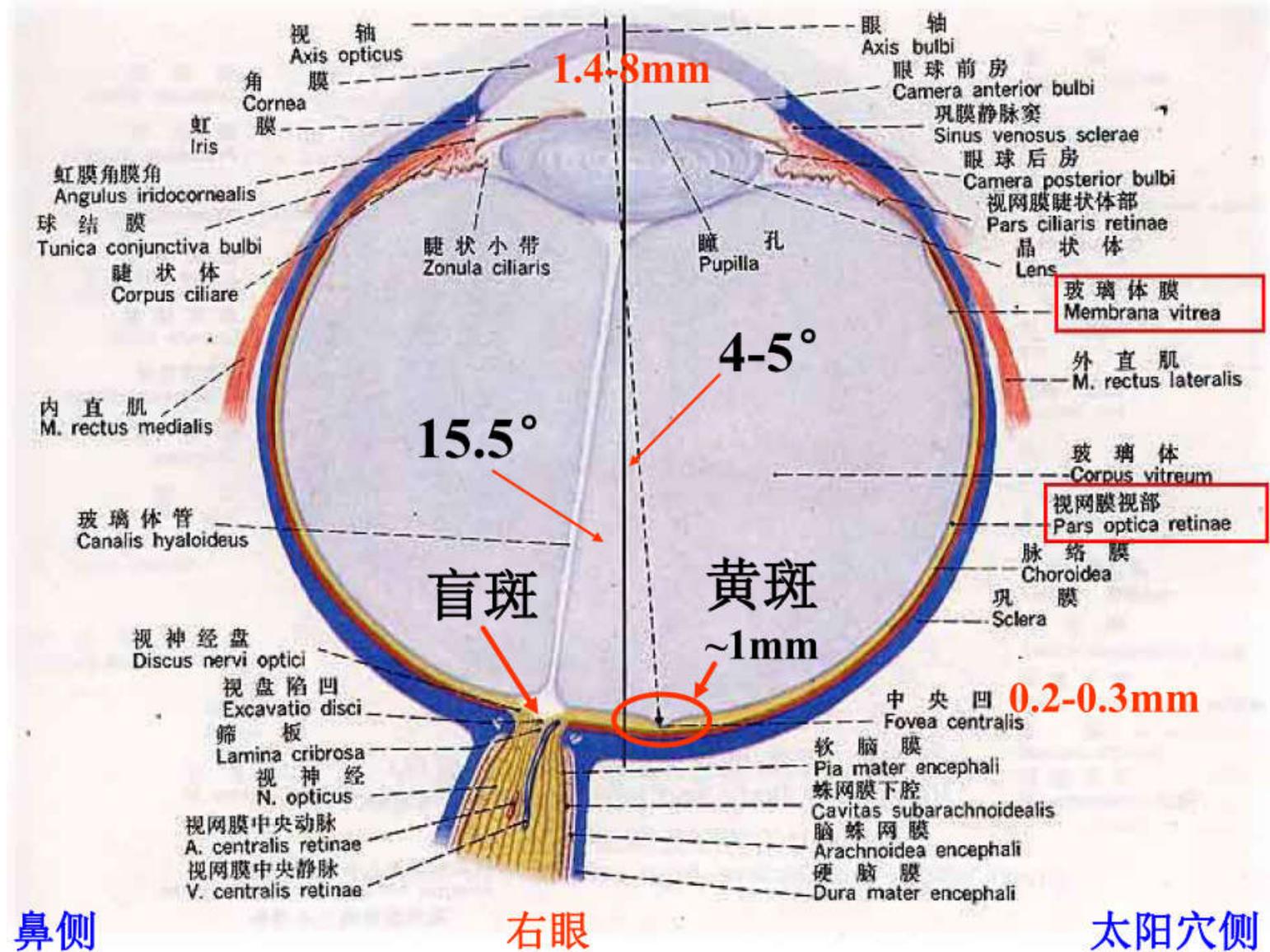
手术过程图解

所谓LASIK手术，全称是“准分子激光原位角膜磨镶术”（Laser in Situ Keratomileusis）。它利用激光刀将近视病患的角膜环切约四分三圈，掀起上层角膜后，接着以雷射刀切去下层角膜，再将上层角膜覆盖回去。由于角膜变薄，焦距变短，从外进来的光线就可精准对焦在视网膜上，达到矫正近视的目的。



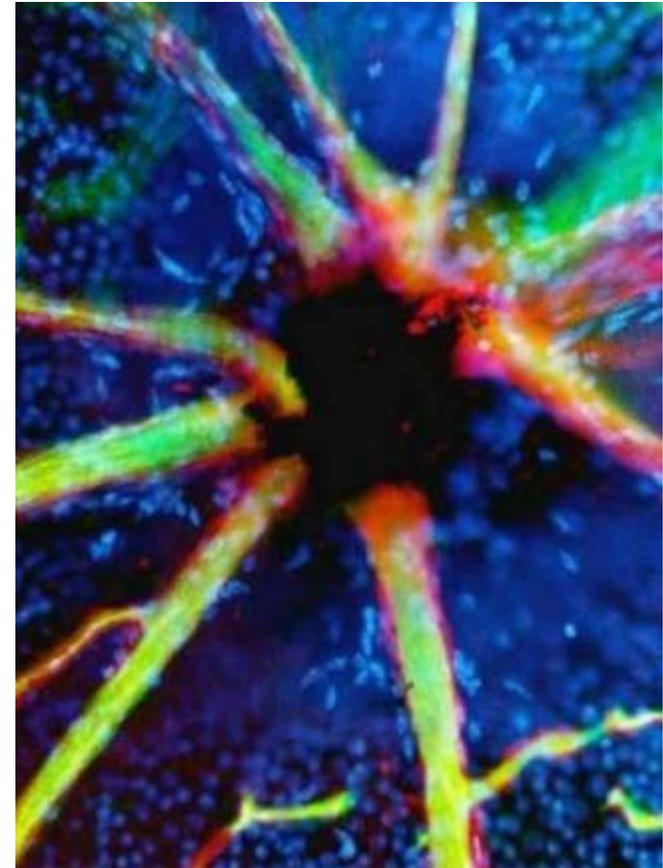
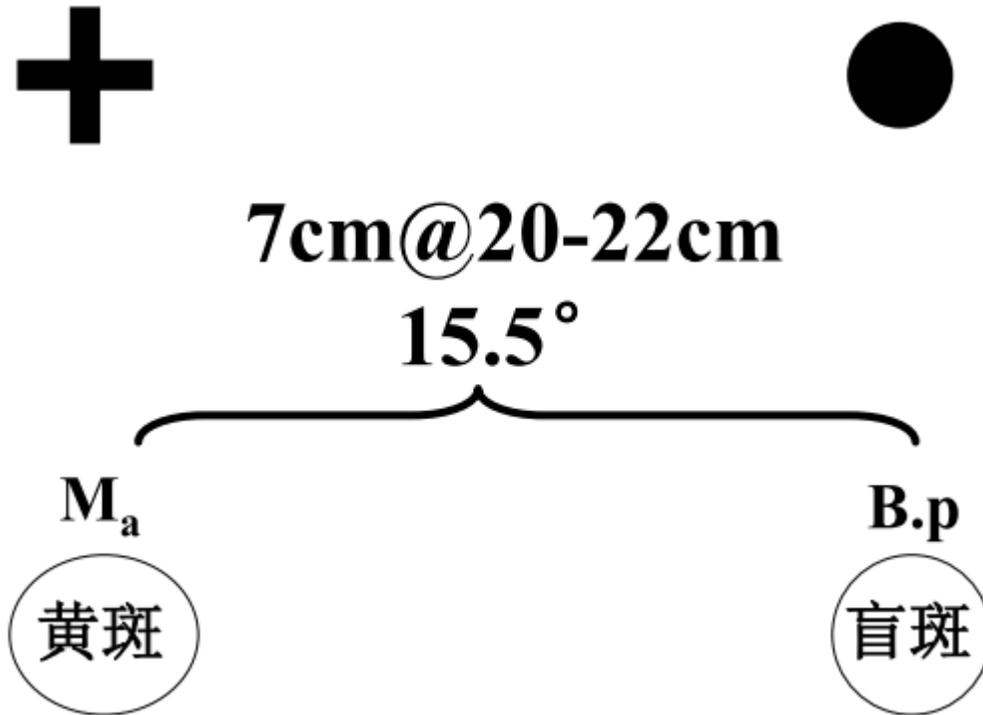
8.3 眼睛

视力的生理结构与视觉



8.3 眼睛

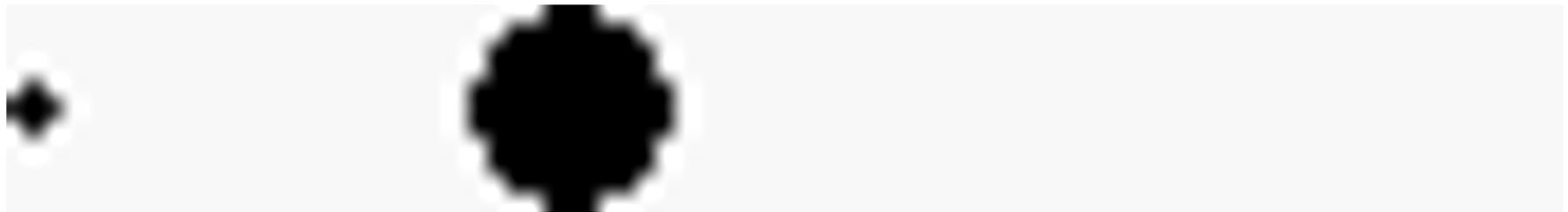
视力的生理结构与视觉



头、眼会转，平时感觉不到黄斑和盲斑的存在！

8.3 眼睛

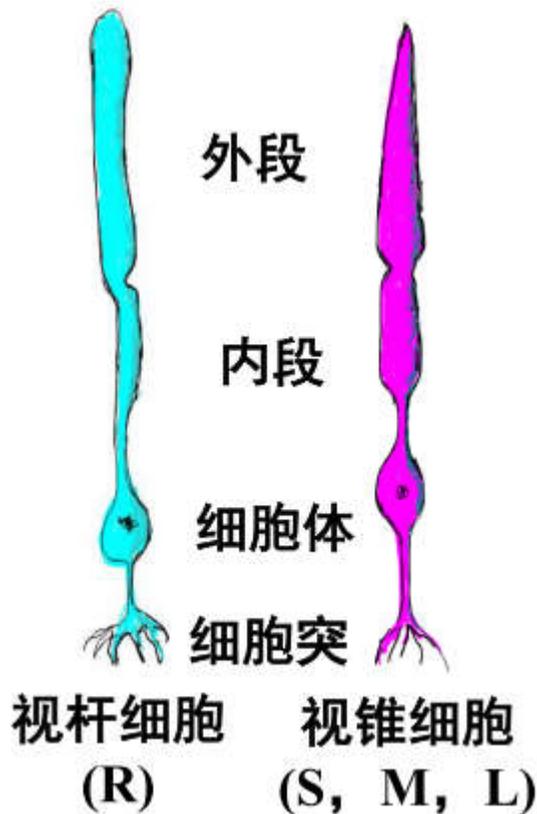
视力的生理结构与视觉



8.3 眼睛

视细胞

视细胞：直径 $2\ \mu\text{m}$ 、高 $50\ \mu\text{m}$



视锥细胞：明视觉，~4百万个，~1.3万在黄斑中，~4000在中心凹有色彩。

色彩并不存在，我们所感受到的不过是能级，是我们的心灵创造了色彩！

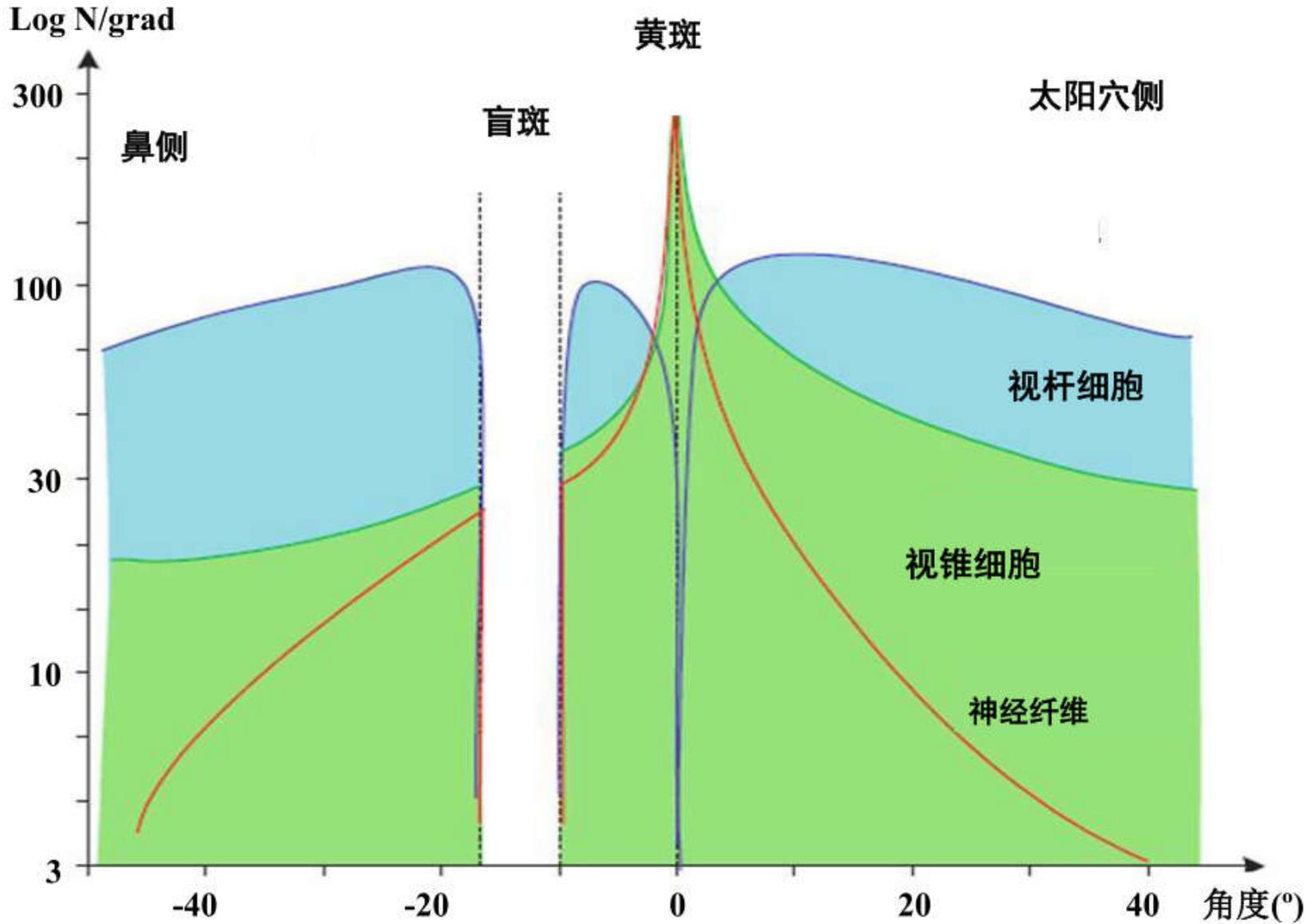
$160^\circ(\text{H}) \times 130^\circ(\text{V})$ 总视角， $6-7^\circ$ 黄斑视角，最小分辨角： $1'$

视杆细胞：暗视觉，1.25亿，无色彩

明、暗切换需要瞳孔配合，并需要时间！

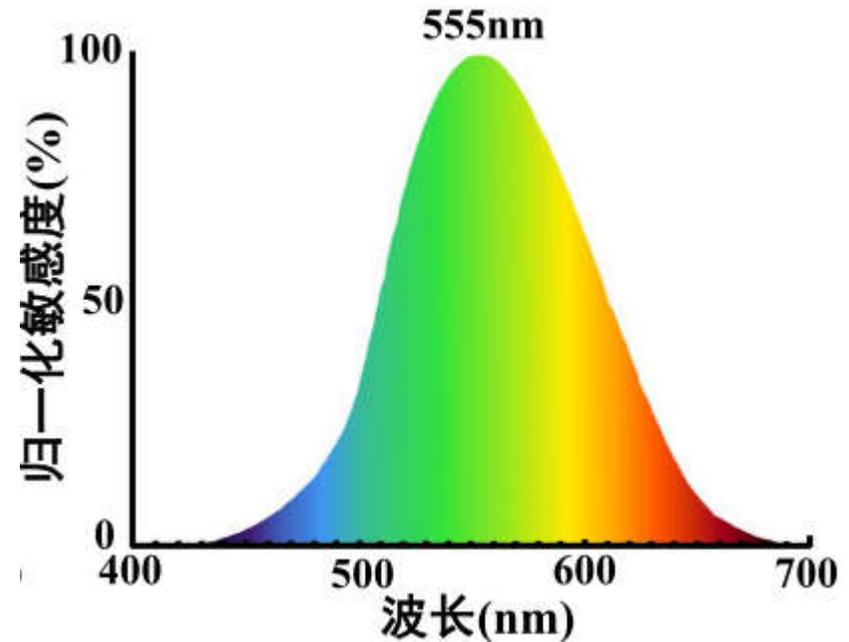
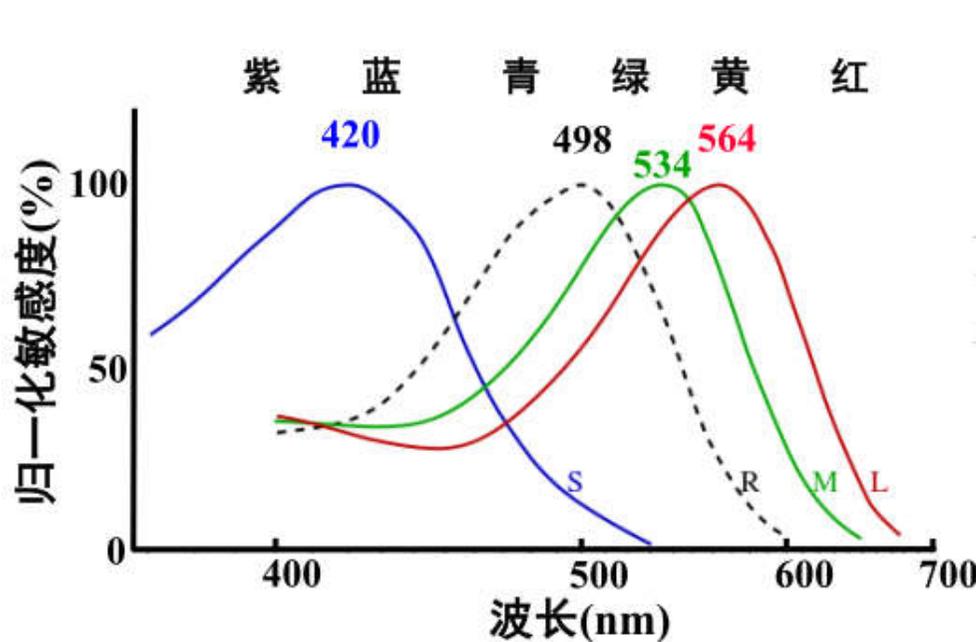
8.3 眼睛

视觉细胞的角度分布



8.3 眼睛

视觉对色彩的响应



色盲：某类视锥细胞缺失。

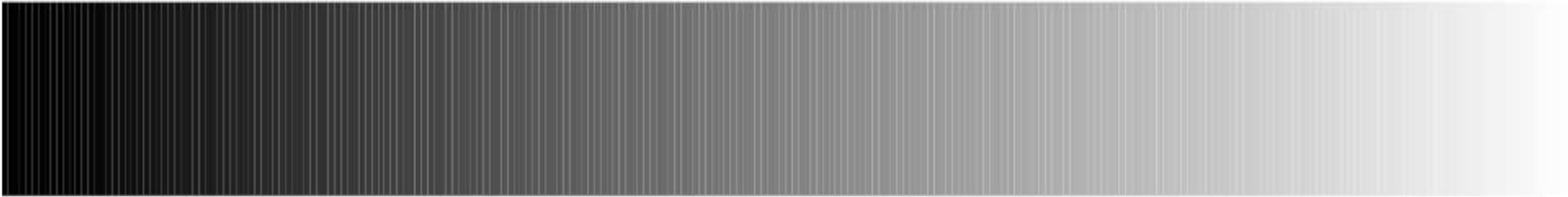
色弱：视觉细胞并未缺失，但响应能力较弱。

8.3 眼睛

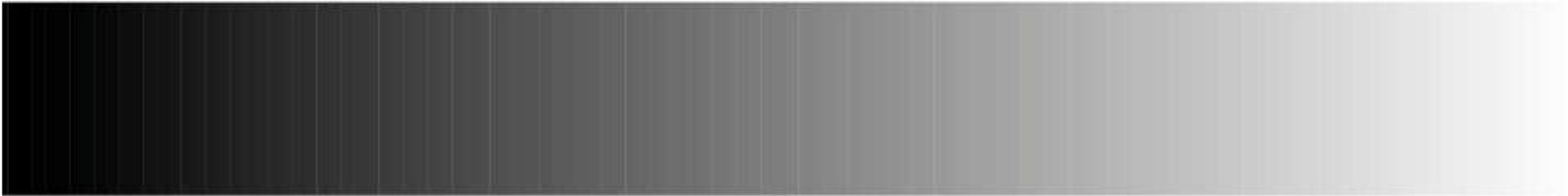
人类视觉系统的特点

成像的自适应调节能力	<ul style="list-style-type: none">★ 自适应调节的亮度阈值：0.01熙提★ 约在1s内完成调节
亮度敏感性和的自适应调节能力	<ul style="list-style-type: none">★ 动态范围可达$10^{12}:1$★ 绝对暗阈值：人眼能感知的最低照度，约10^{-9}勒克斯
空间分辨能力	<ul style="list-style-type: none">★ 角分辨极限：约$1'$，或★ 明视距离25cm处约0.1mm
时间、频率感知能力	<ul style="list-style-type: none">★ 强光下，15~20Hz最敏感，对75Hz以上响应为0★ 暗环境下（如电影院），5Hz信号最敏感，大于25Hz闪烁消失
光谱感知能力	<ul style="list-style-type: none">★ 380~700nm，最敏感波长在555nm
随从运动能力	<ul style="list-style-type: none">★ 眼球跟随运动物体的能力，降低相对速度，提高辨认能力★ 极限大约为$4\sim 5^\circ/s$

静视觉、色觉、运动视觉、立体视觉



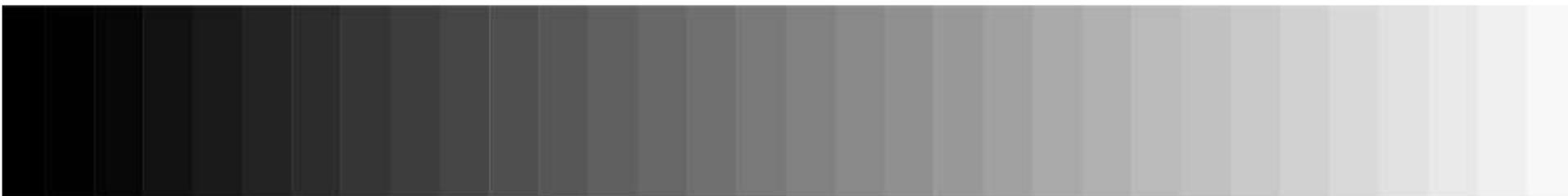
256灰度等级



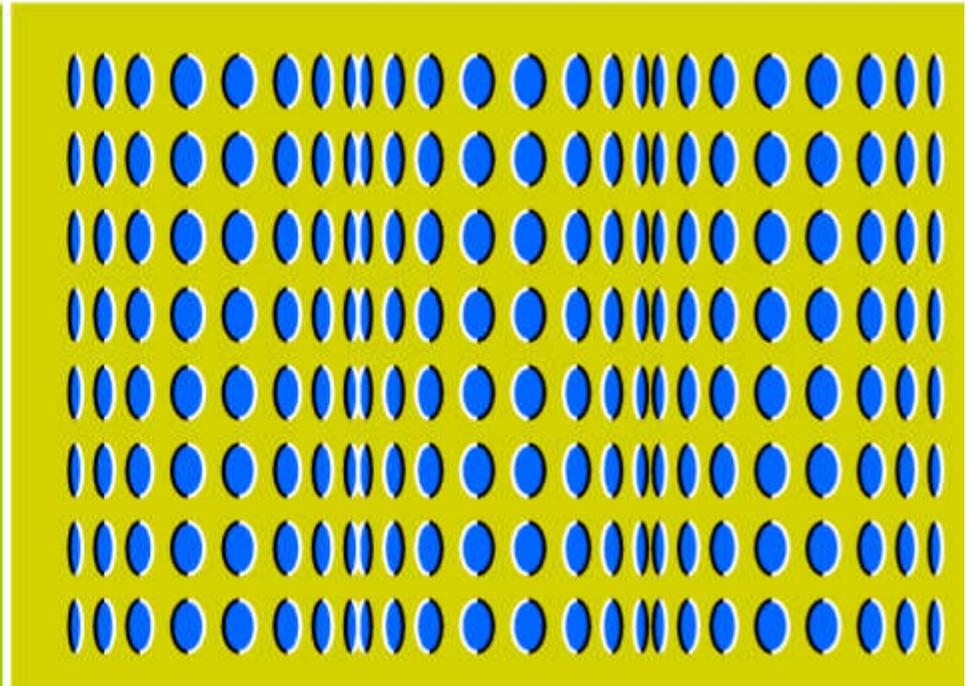
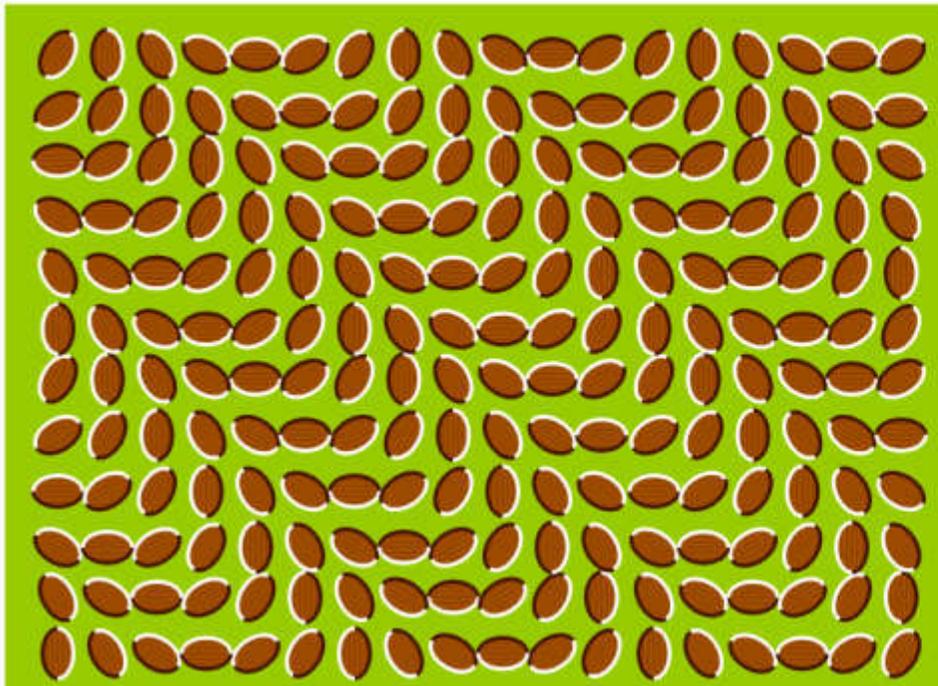
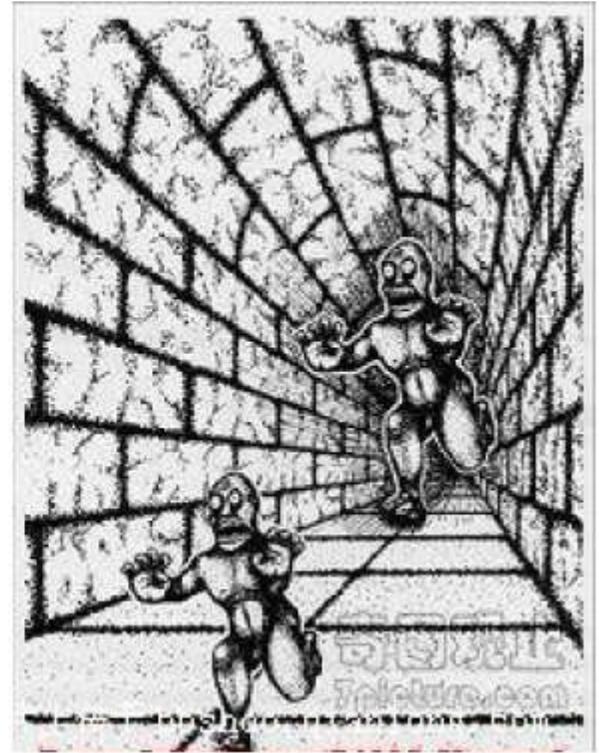
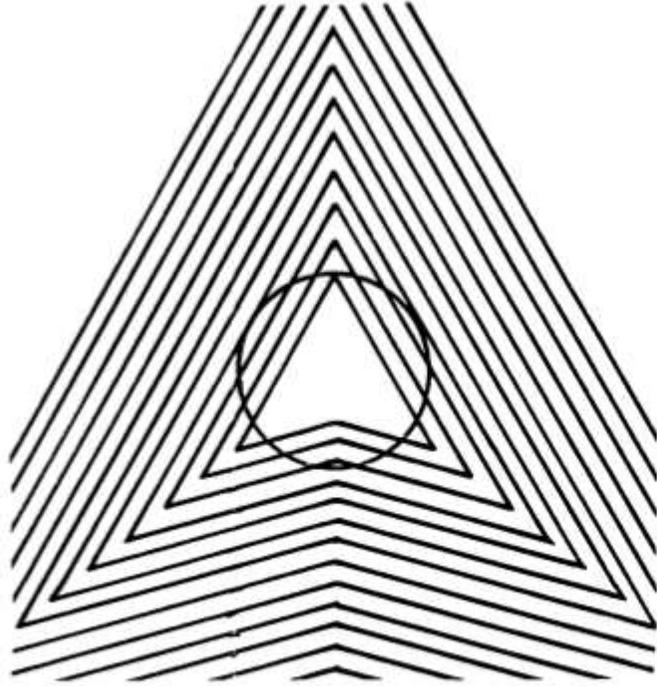
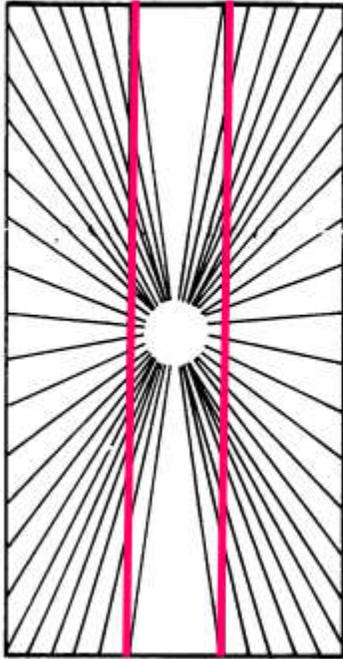
128灰度等级



64灰度等级



32灰度等级



8.3 眼睛

食肉动物和食草动物的眼睛



8.3 眼睛

食肉动物和食草动物的眼睛



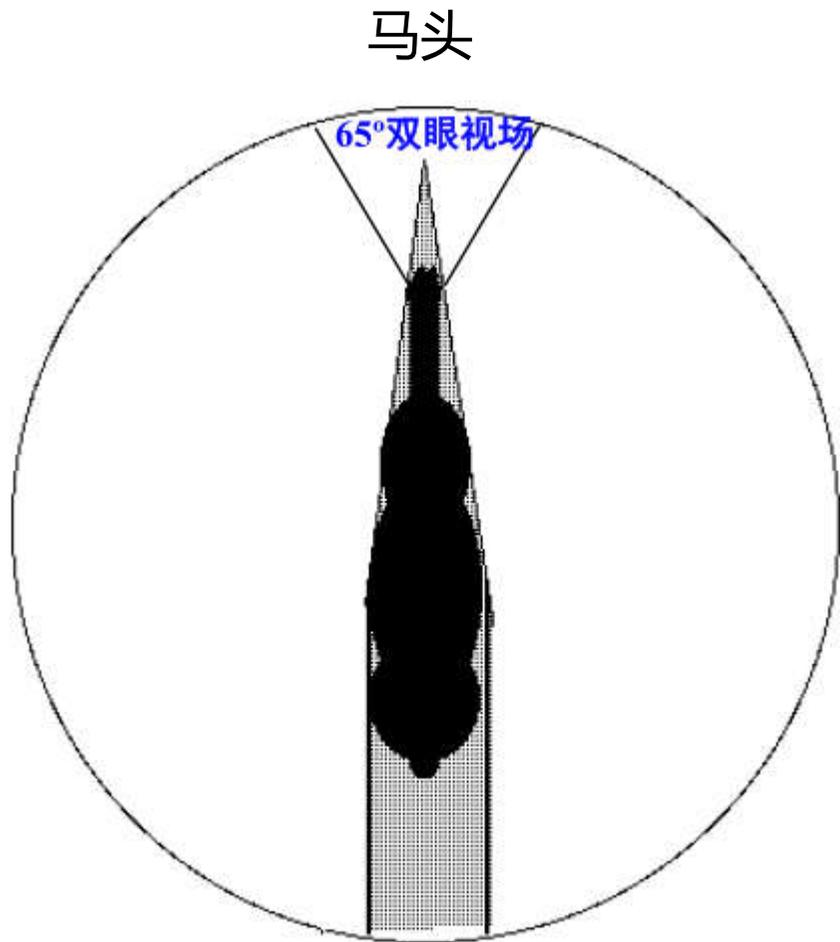
食肉动物的眼睛一般长在面部前方，有较大的双眼交叠视觉，有利于形成立体视觉来有效判断猎物的距离。



食草动物的眼睛一般长在头部两侧，有更大的视觉范围，有利于更早地发现天敌。大部分食草动物对于颜色的分辨能力较弱。

8.3 眼睛

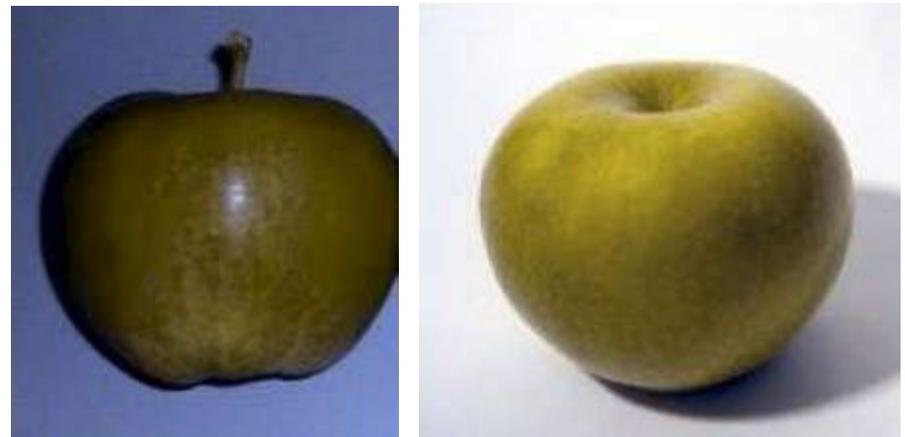
食肉动物和食草动物的眼睛



马眼视场：约350° (双眼约65°)



人眼



马眼

8.3 眼睛

鸟和鱼的眼睛



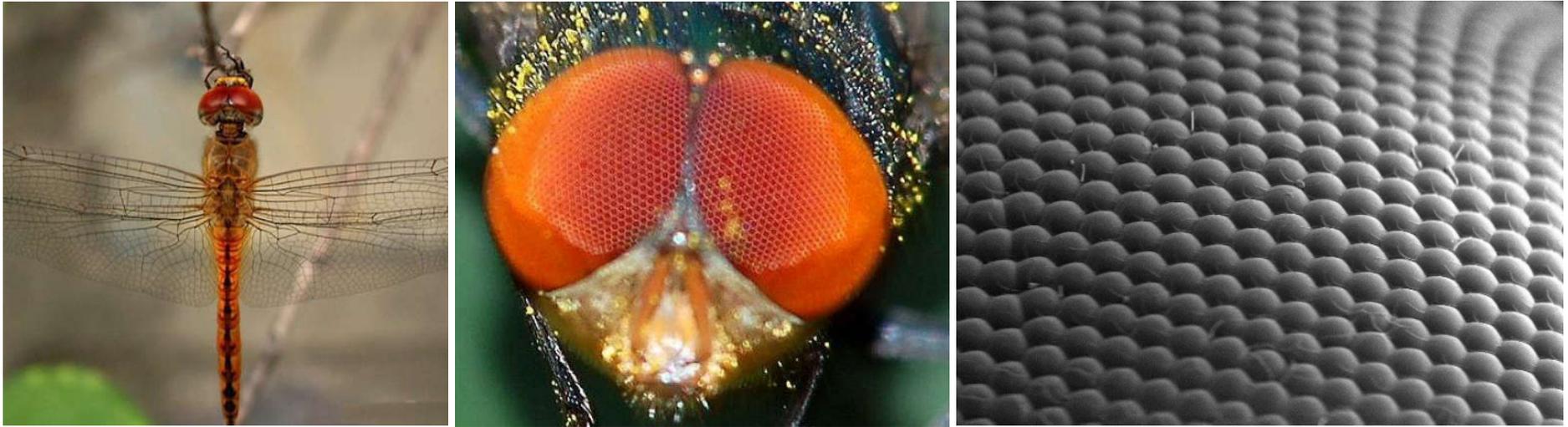
视觉是鸟类安全飞行的保障。鸟类的眼睛与体型之比是所有动物最大的。相比哺乳动物，鸟类的睫状肌能更快地调节晶状体，调节的范围也更大。鸟类具有更多更密的视觉细胞，视觉分辨率更高。



水的折射率较高，鱼类主要靠晶状体屈光，晶状体的密度更大，曲率也更大。另外，和陆生动物不同，鱼类主要靠调节视网膜与晶状体间的距离，而不是晶状体的曲率来调整焦点。

8.3 眼睛

昆虫的复眼(compound eye)

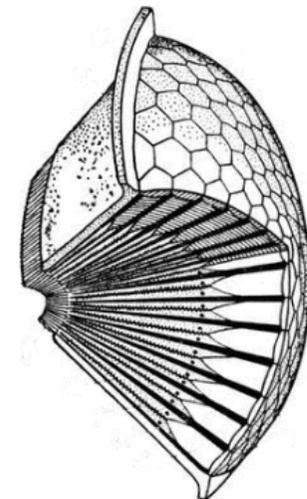


家蝇复眼的扫描电镜照片

复眼由多个单元组成，单个单元无法成像。复眼提供了很大的视觉范围，其空间分辨率低于人眼，但其时间分辨率高于人眼约10倍。

高琛老师视频公开课：

<http://www.icourses.cn/viewVCourse.action?courseCode=10358V010>



8.4 放大镜和目镜 (eyepiece)

放大镜是一种短焦距汇聚目镜，作用是成一放大的虚像，便于眼睛观察。

特点：物在物方焦面内侧，通常在明视距离附近，像距在明视距离和无穷远之间。

$$s \approx f, s' \approx 25\text{cm}$$



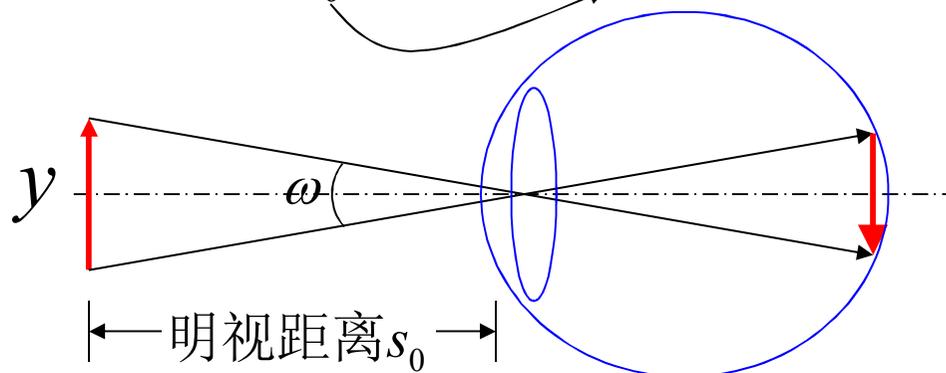
可以通过比较 y' 与 y 得到放大镜对物体的**横向放大率**，也可以比较它们对眼睛张角的变化得到**角放大率**

视角放大率

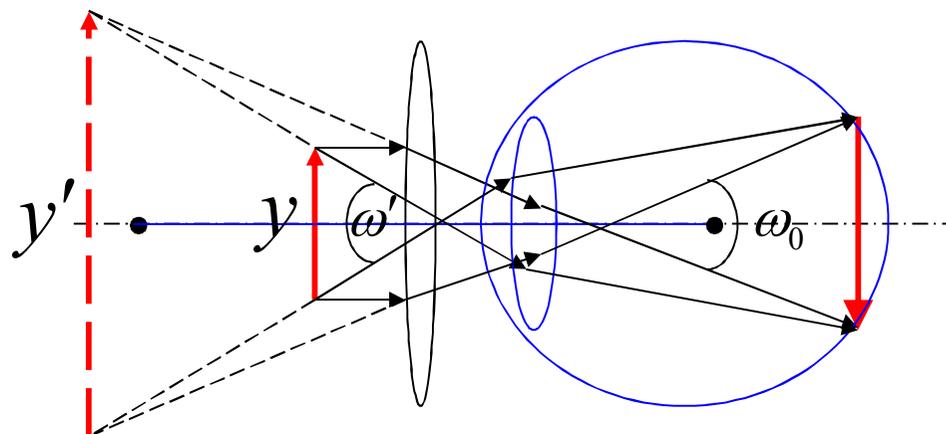
$$M = \frac{\omega'}{\omega} \approx \frac{y/f}{y/s_0} = \frac{s_0}{f}$$

明视距离决定的肉眼观察最大视角

直接观察

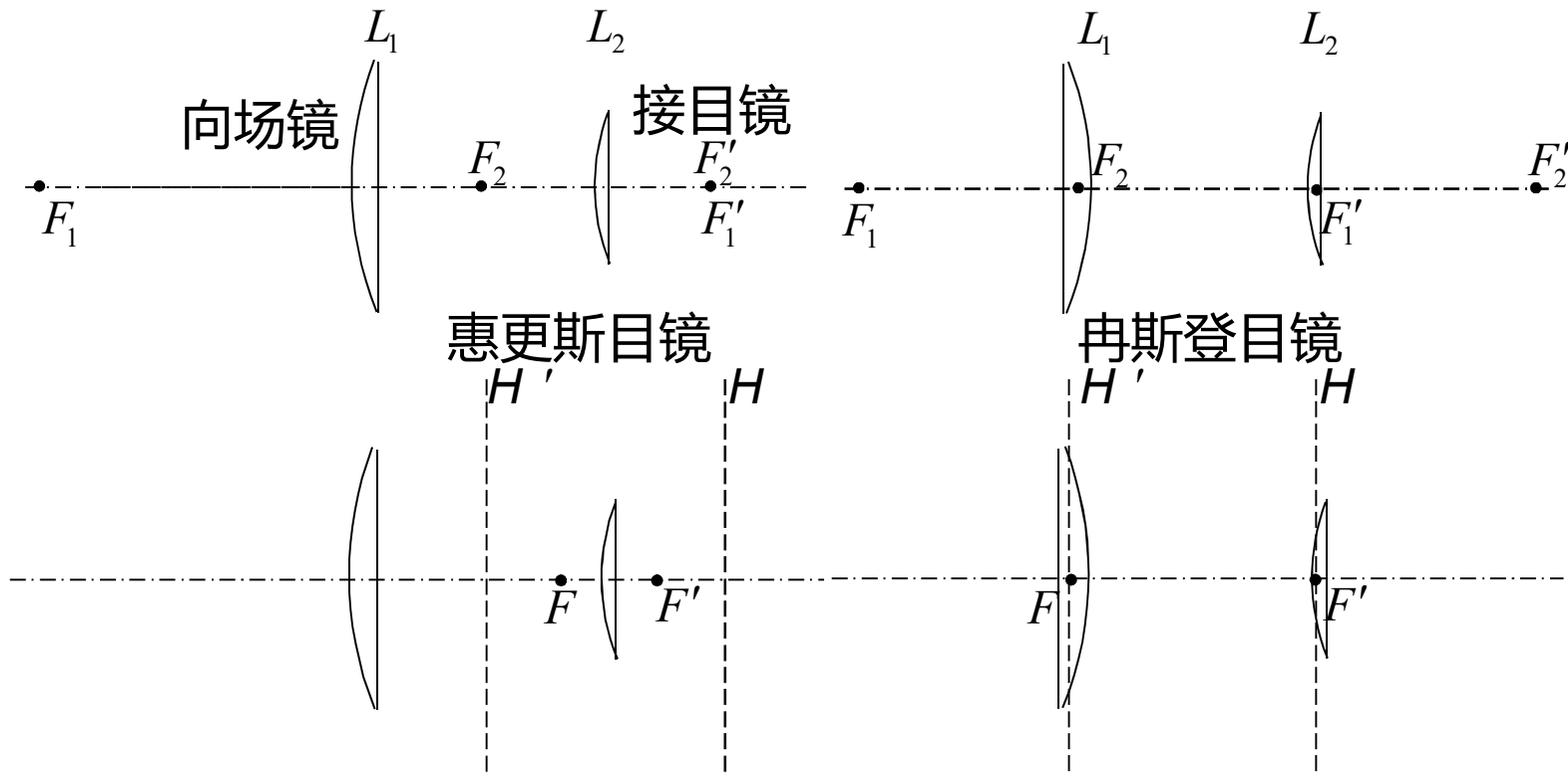


放大观察



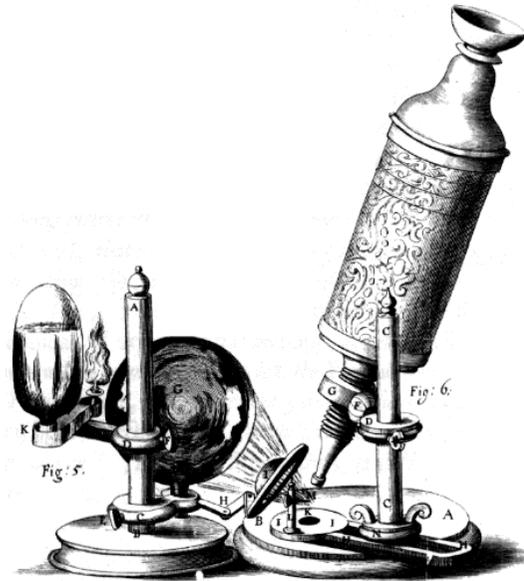
8.4 放大镜和目镜 (eyepiece)

- 目镜用在光学仪器上，作用与放大镜相似，都是在明视距离附近成一个眼睛可直接观察的放大虚像。
- 通常都与物镜结合使用，观察物镜所成的实像。
- 目镜设计的重点之一是消除视觉色差。

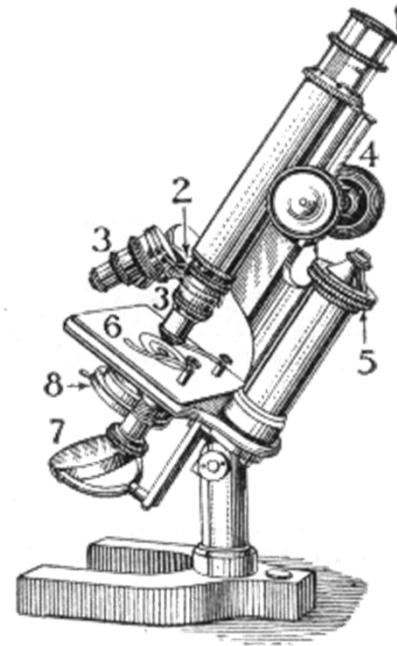


8.5 显微镜 (microscope)

- 具有高放大倍数的光学仪器，由物镜组和目镜组构成



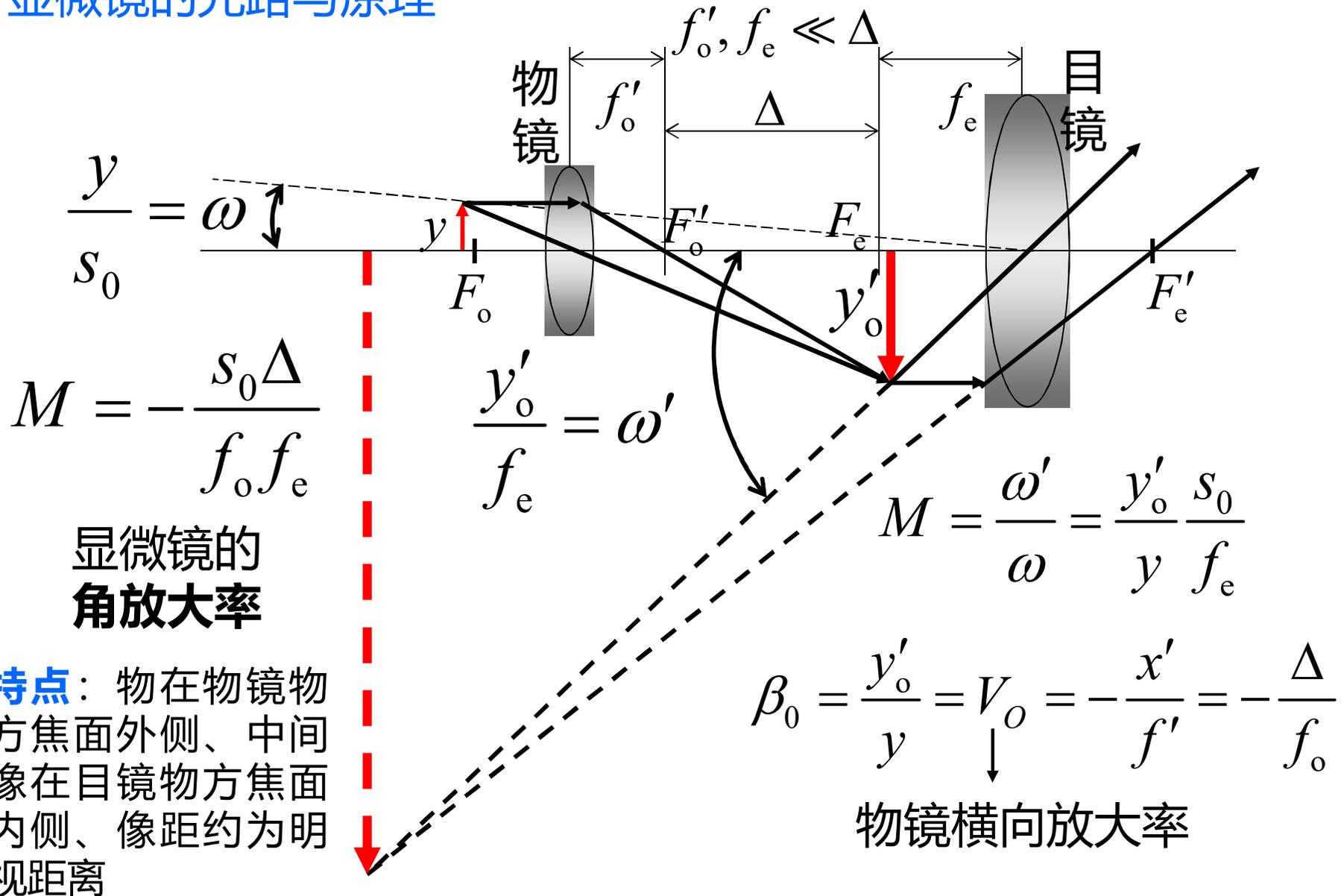
Robert Hooke's microscope



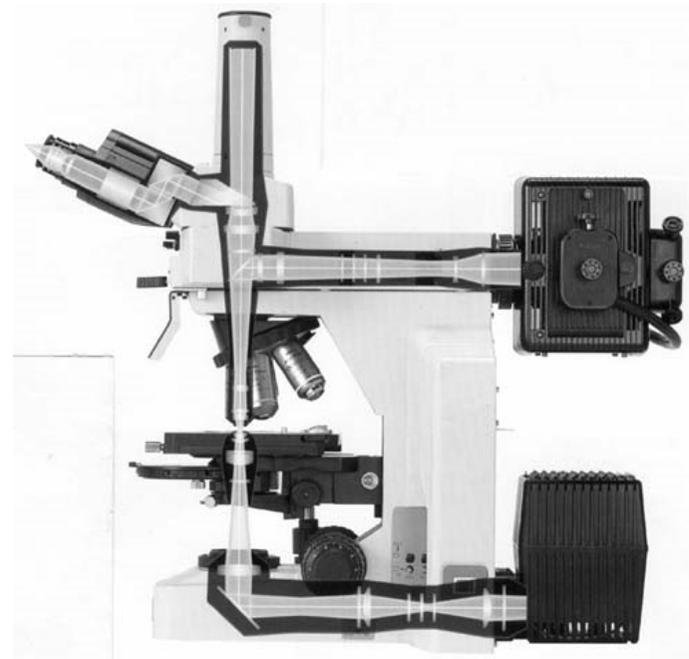
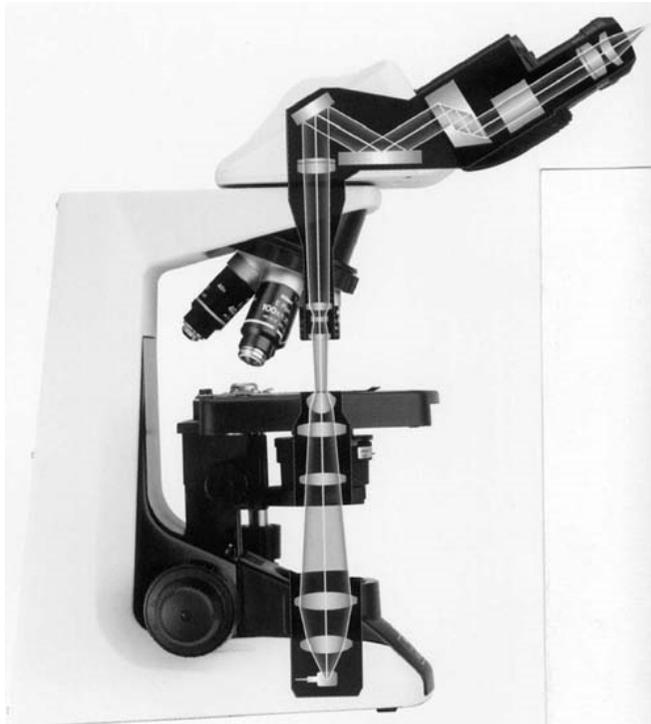
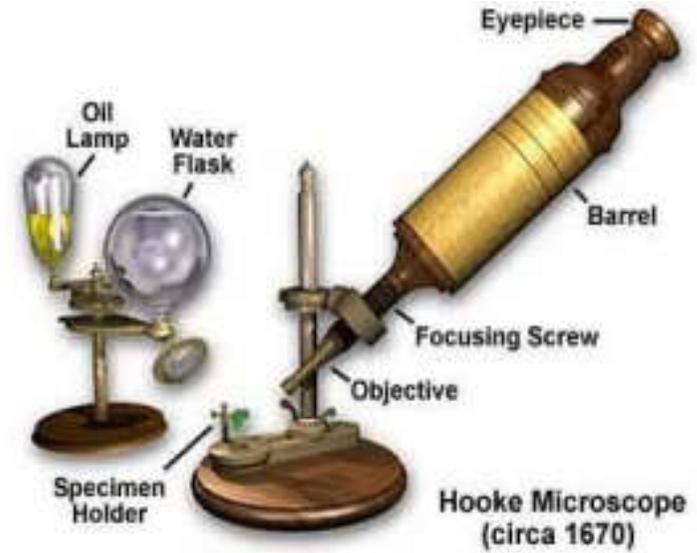
microscope

8.5 显微镜 (microscope)

显微镜的光路与原理



8.5 显微镜 (microscope)



8.5 显微镜 (microscope)



An 1879 Carl Zeiss
Jena Optical
microscope



Stereo microscope

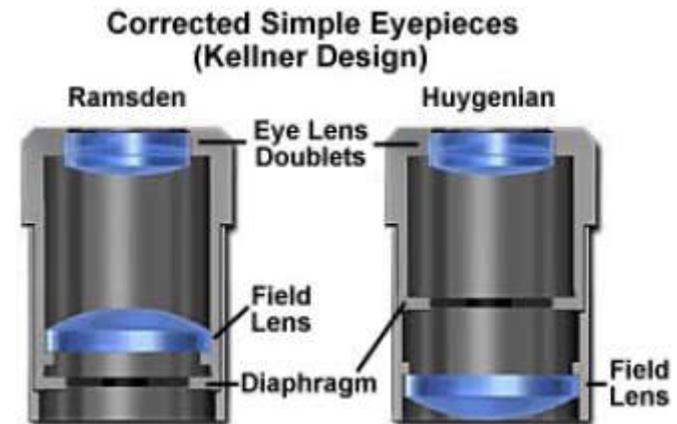
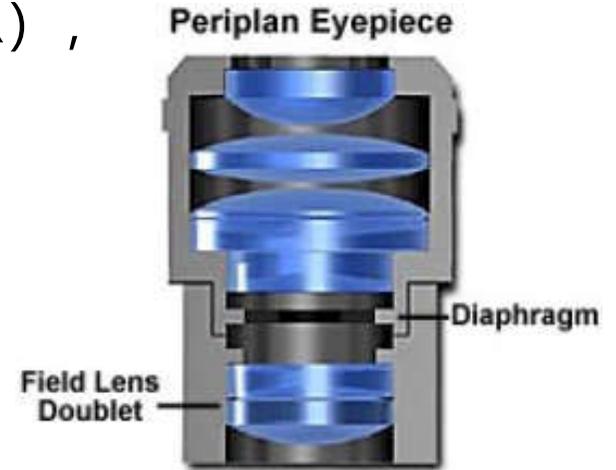


Scientist using a stereo
microscope outfitted with
a digital imaging pick-up

8.5 显微镜 (microscope)

显微目镜的参数及标识

- 目镜类别：惠更斯目镜 (H)、冉斯登目镜 (R)，凯尔纳目镜(K)，等
- 放大倍数， $5\times$ ， $10\times$ ，.....
- 目视场直径 (mm) $\Phi 20$ ，.....
- $10\times/18$ ，表示放大倍率10倍，视场18mm



8.5 显微镜 (microscope)

显微物镜的参数及标识

- 放大倍数 β ; 机械筒长 L (mm) , 透射光160, 反射光190, 数值孔径N.A.; 工作距离WD; 盖玻片厚度 d

Apo 40/0.95 复消色差物镜, 放大倍数40, 数值孔径0.95,
160 / 0.17 机械筒长160mm, 盖玻片厚度0.17mm

Plan 10/0.25 Ph 平场消色差物镜, 放大倍数10, 数值孔径0.25,
 ∞ /0.17 机械筒长 ∞ , 盖玻片厚度0.17mm

倍率	1×	2×	4×	10×	20×	40×	60×	100×
色环	黑	茶	红	黄	绿	浅蓝	深蓝	白

8.5 显微镜 (microscope)

显微物镜的色环和数值孔径



Figure 1



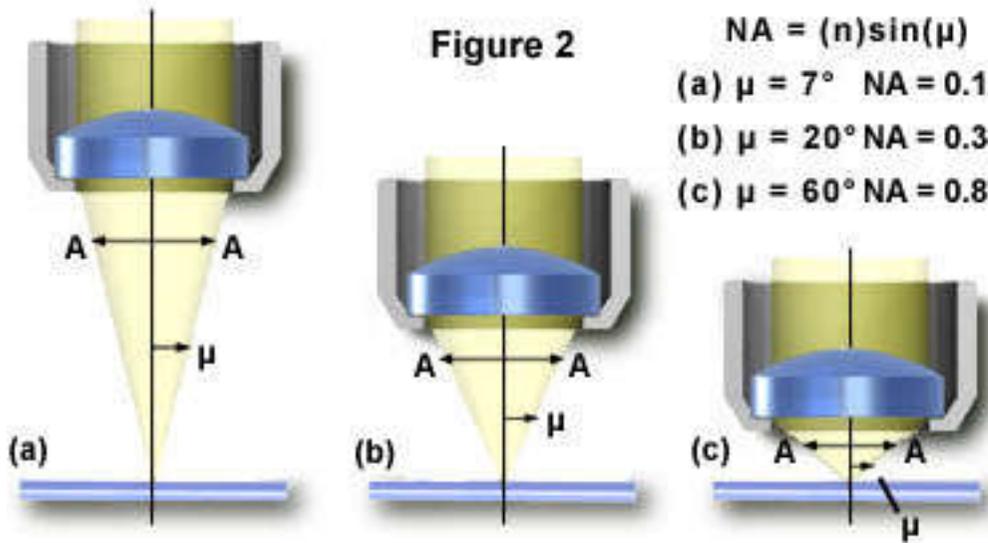
Figure 2

$$NA = (n) \sin(\mu)$$

(a) $\mu = 7^\circ$ NA = 0.12

(b) $\mu = 20^\circ$ NA = 0.34

(c) $\mu = 60^\circ$ NA = 0.87



8.6 望远镜 (telescope)

用于观察远处物体，将物体对眼睛的张角扩大，相当于在近处成一缩小的实像，再通过目镜观察。



The Hubble Space Telescope as seen from Space Shuttle *Discovery* during its second servicing mission



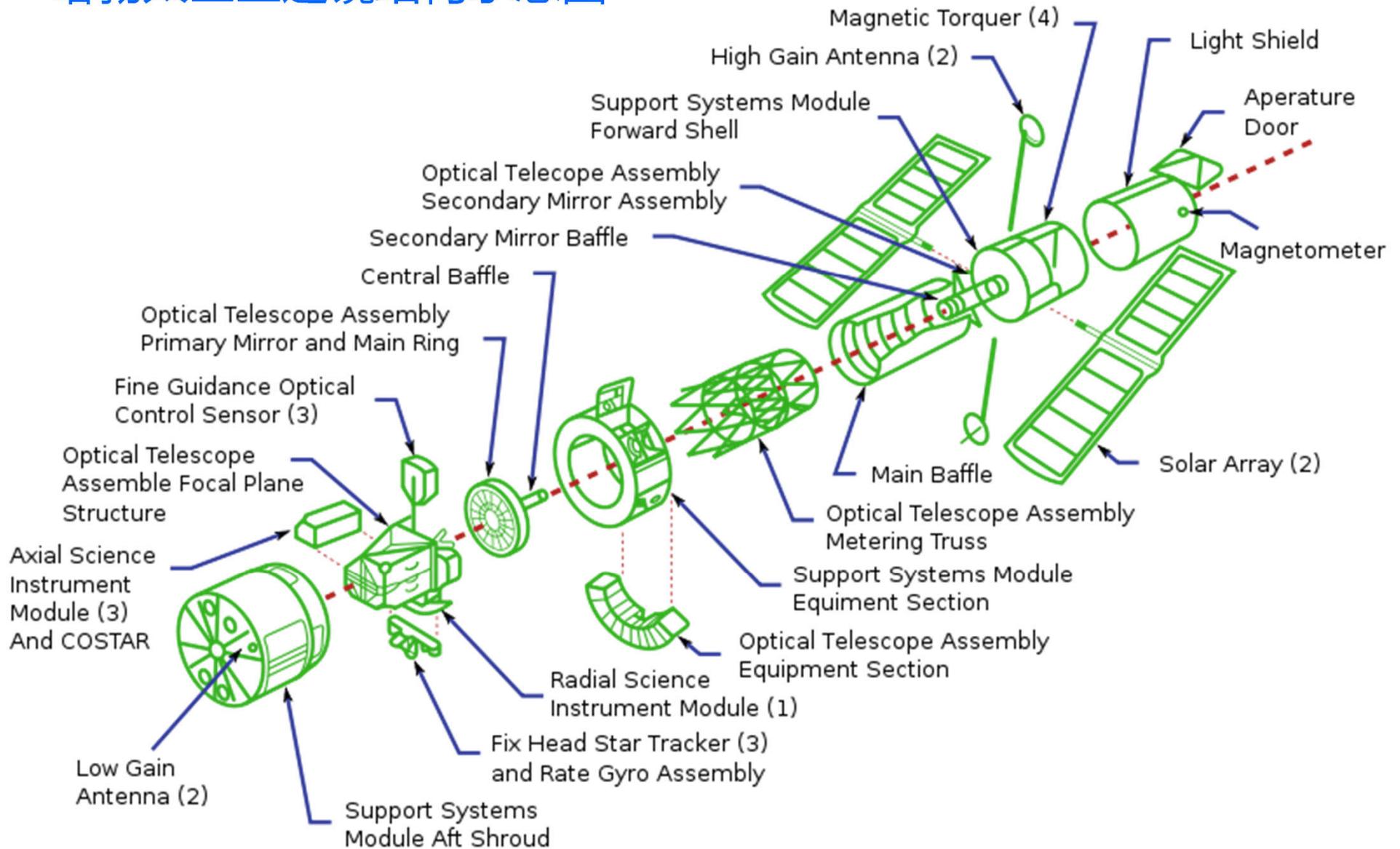
Soviet-made miniature 2.5×17.5 monocular.



The 100 inch (2.5 m) Hooker reflecting telescope at Mount Wilson Observatory near Los Angeles, California. 89

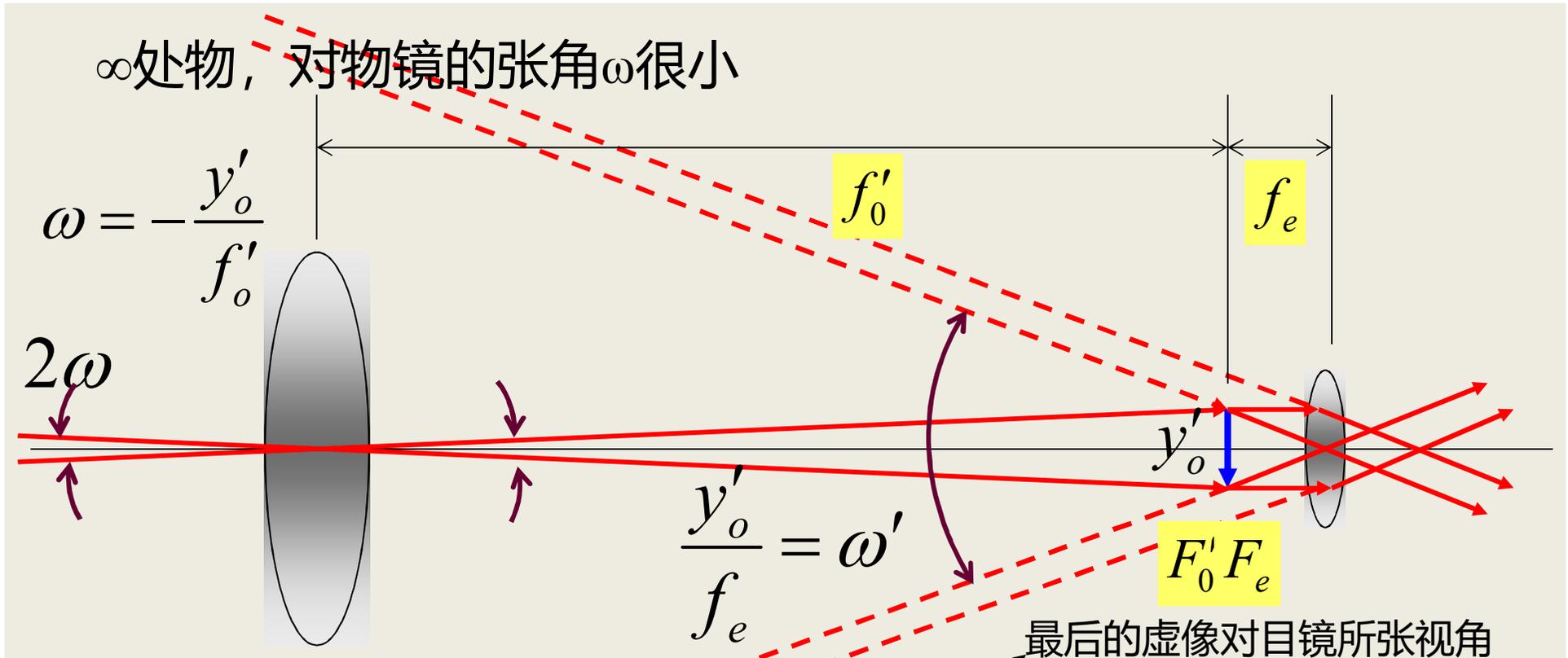
8.6 望远镜 (telescope)

哈勃太空望远镜结构示意图



8.6 望远镜 (telescope)

Kepler望远镜



特点：物镜像方焦点和目镜物方焦点重合，物在无穷远，像也在无穷远

物体实际位置所张视角 ω

$$M = \frac{\omega'}{\omega} = -\frac{f'_0}{f_e}$$

望远镜的参数标识为 $M \times D$, D : 物镜的孔径

8.6 望远镜 (telescope)

Galileo望远镜



8.6 望远镜 (telescope)

Newton反射式望远镜



8.6 望远镜 (telescope)



Parameters listed on the prism cover plate describing a 7 power magnification binocular with a 50 mm Objective diameter and a 372 feet Field of view at 1000 yards.

8.7 像差

像差

单色像差：球差
慧差
像散
像场弯曲
畸变

轴上 }
轴外 } 大孔径

}
} 大视场

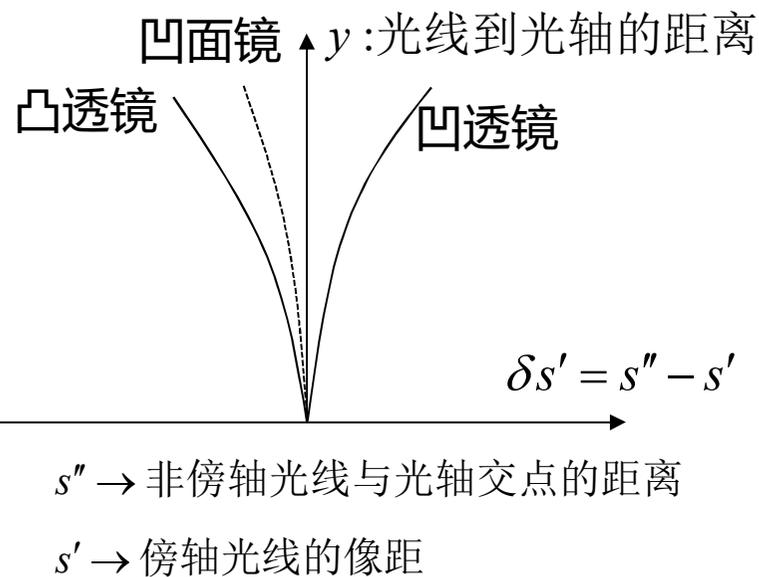
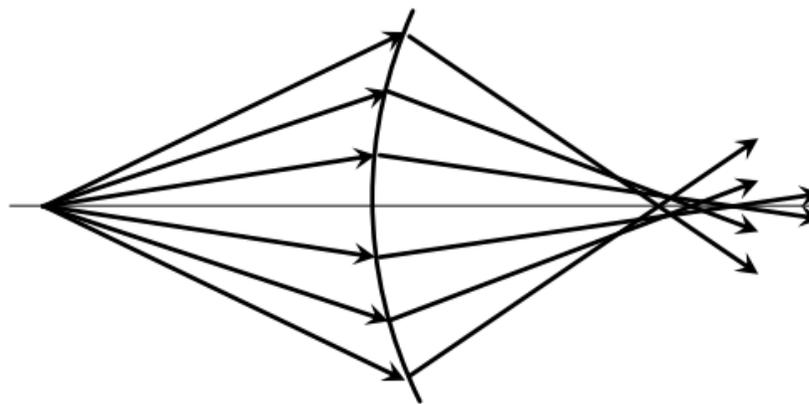
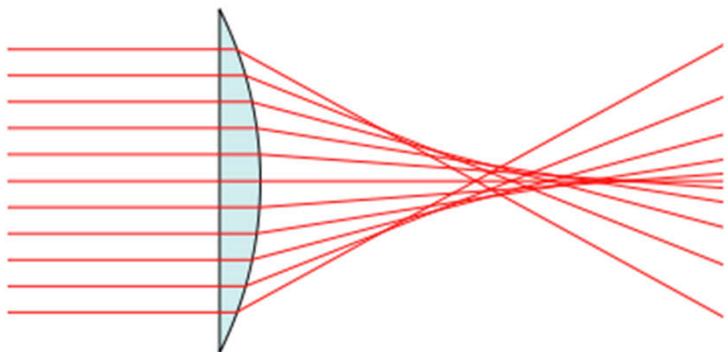
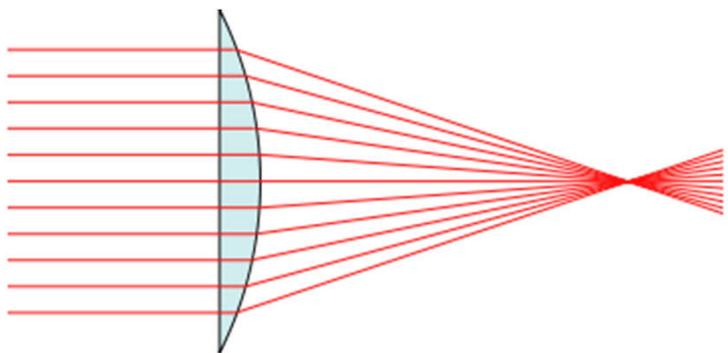
$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \frac{\theta^9}{9!} \dots$$

色差

8.7 像差

像差—球面像差 (Spherical aberration)

轴上物点发出的大孔径光线不聚焦于一点。

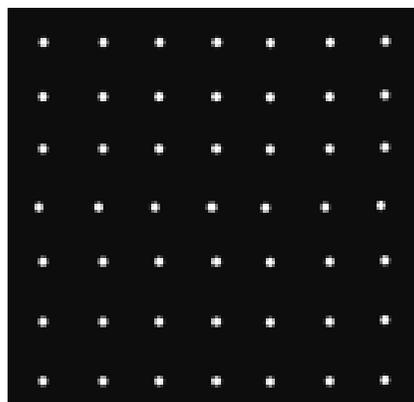


8.7 像差

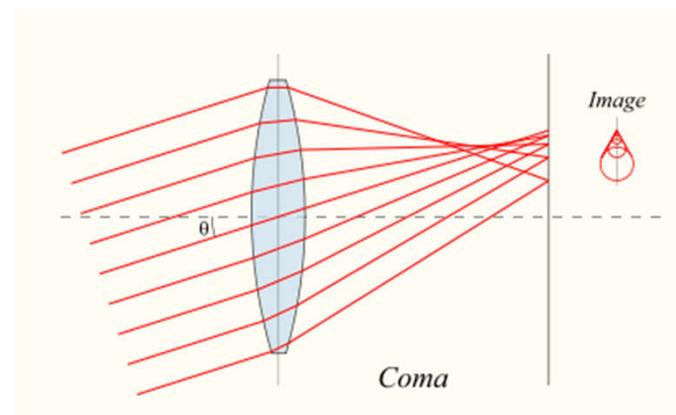
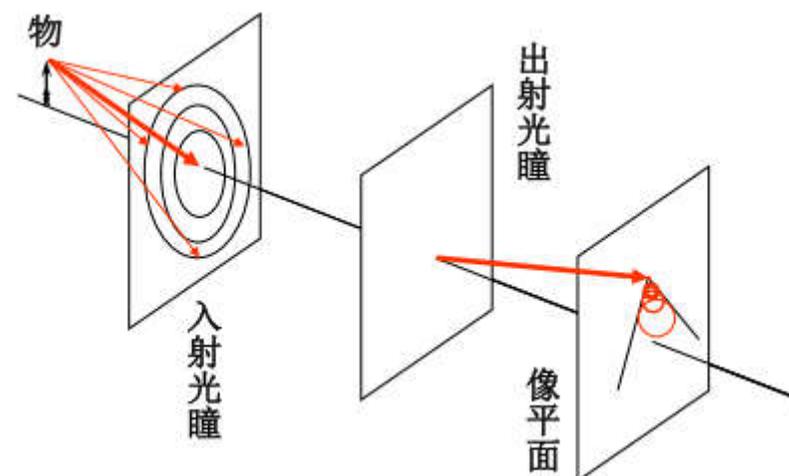
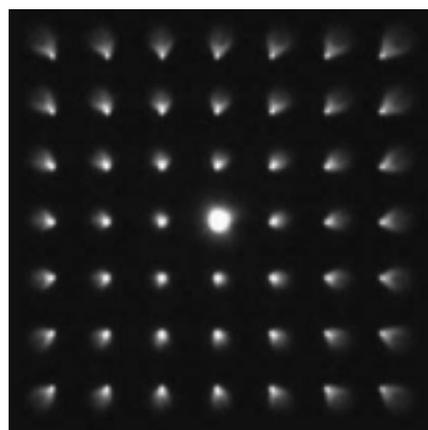
像差—彗形像差 (Comatic aberration, Coma)

轴外物点发出的宽光束不再交于一点，形成状如彗星的亮斑，称为彗差。

物



像

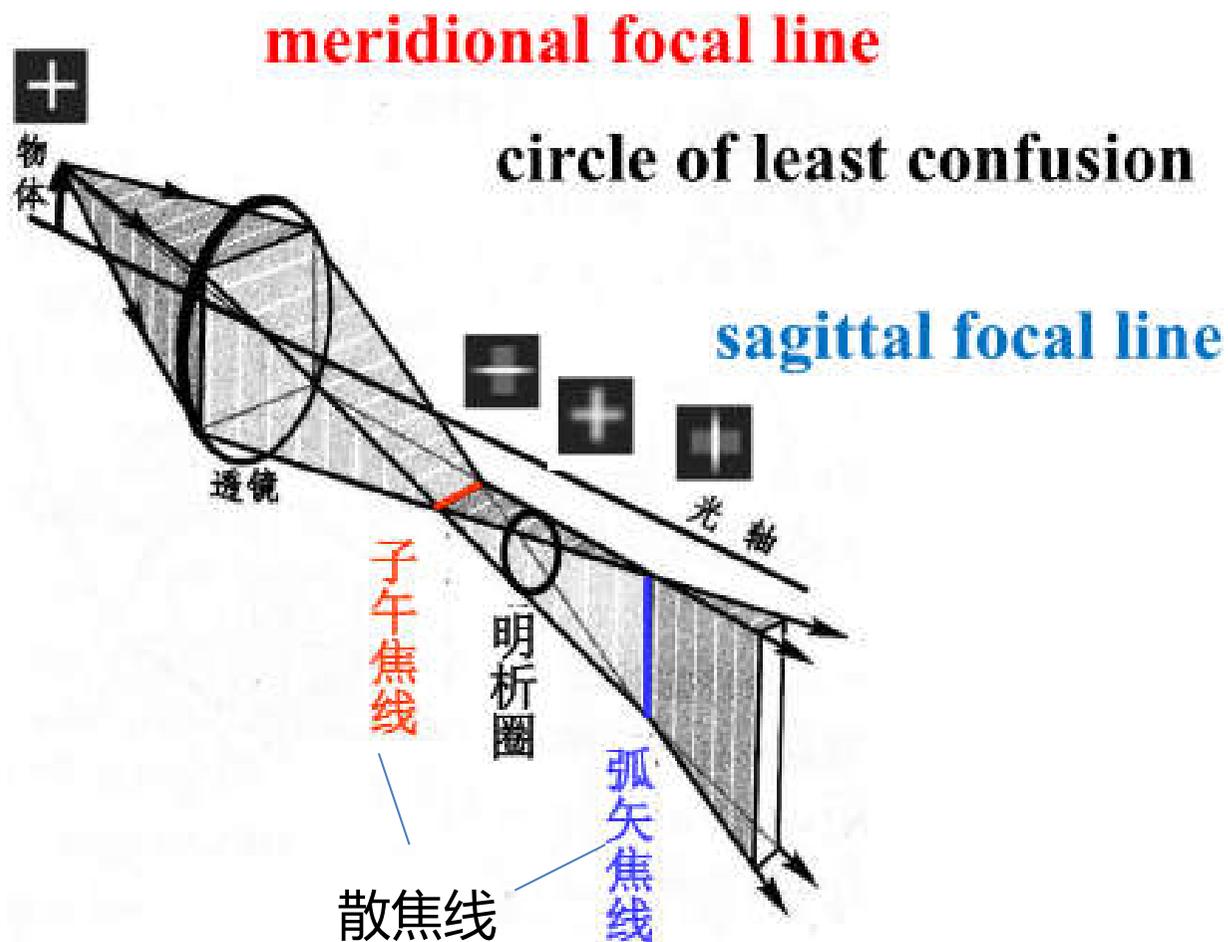


8.7 像差

像差—像散 (astigmatism)

轴外物点发出的宽光束，水平方向和垂直方向的光线的汇聚点在不同平面上，并且两处的汇聚点演化为两条相互垂直的线，称为像散。

明晰圈是放置底片的最佳位置。



8.7 像差

像差—像散 (astigmatism)

原物 Original

aio

Compromise 明晰圈

aio

弧矢焦线 Horizontal Focus

aio

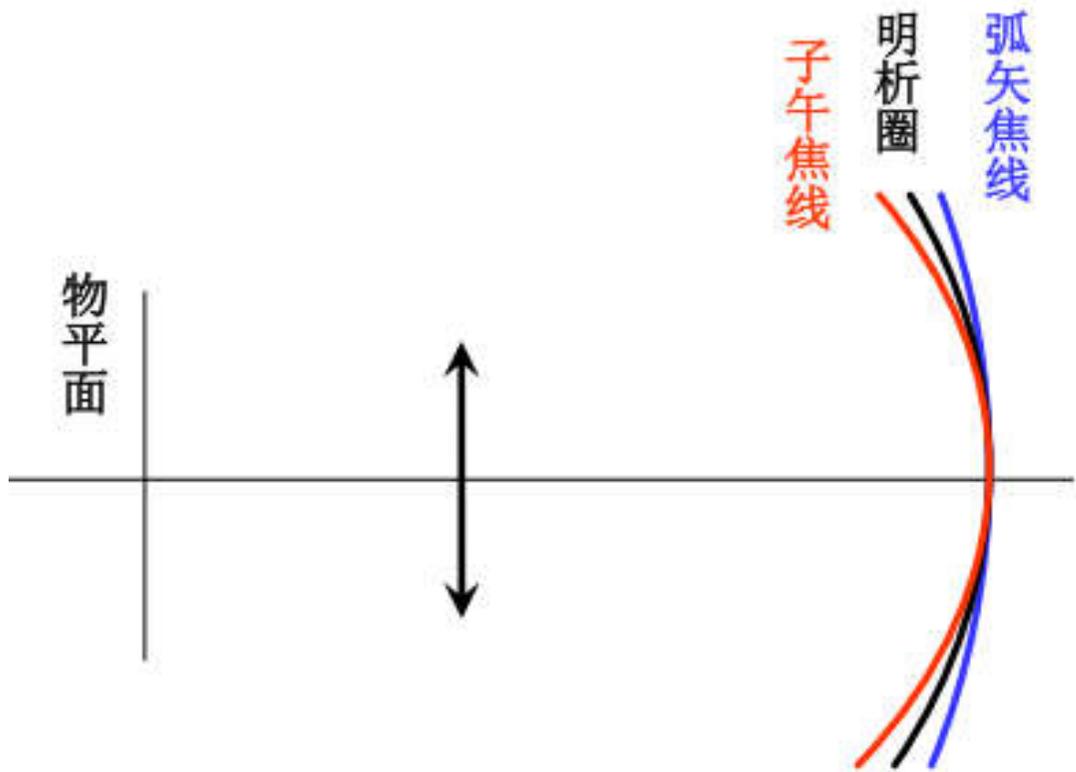
Vertical Focus 子午焦线

aio

8.7 像差

像差—像场弯曲 (curvature of field)

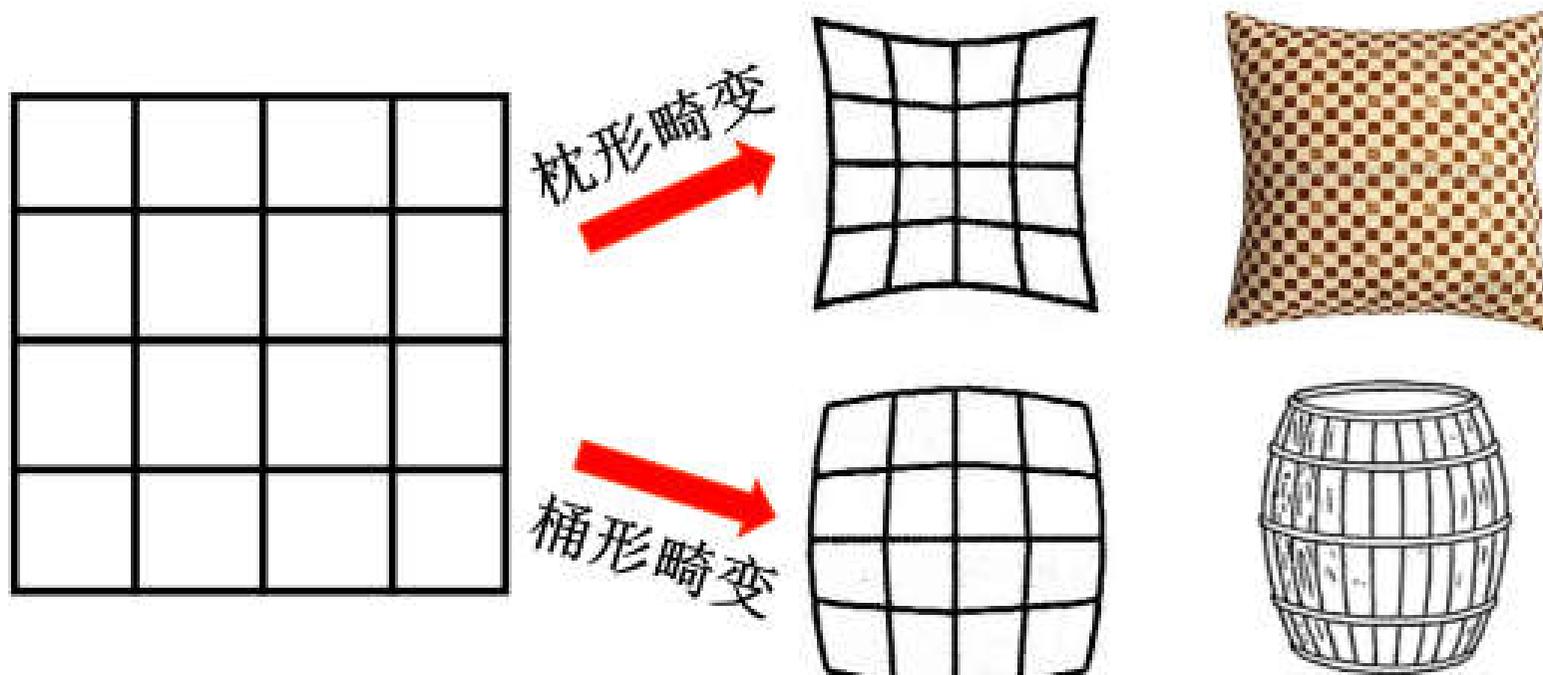
对于物平面上所有的点，明晰圈的轨迹一般是个曲面，称为像场弯曲。



8.7 像差

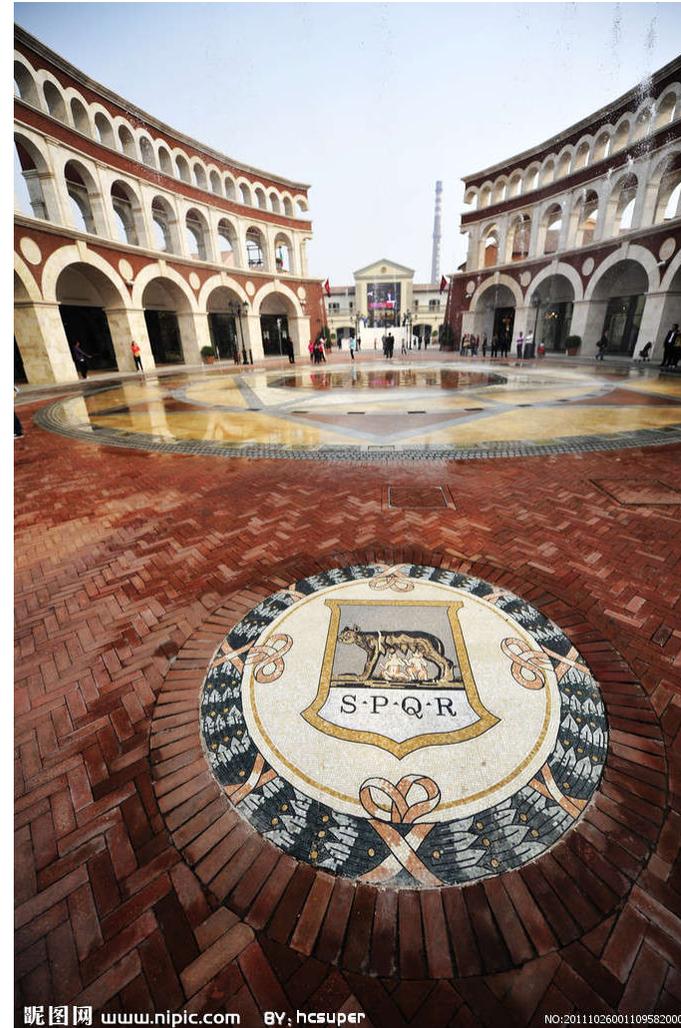
像差—畸变 (distortion)

对于物平面上所有的点，横向放大率随离光轴的距离变化，使像平面上的图形与原物不成比例。与球差、彗差和像散不同，畸变不破坏光束的同心性，从而不影响像的清晰度。



8.7 像差

像差—畸变 (distortion)

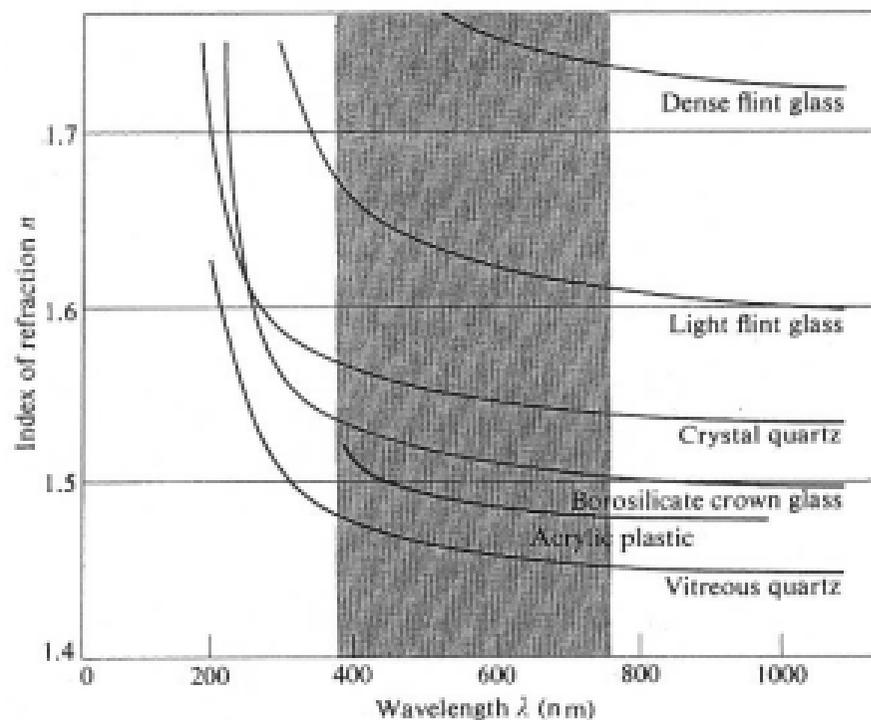
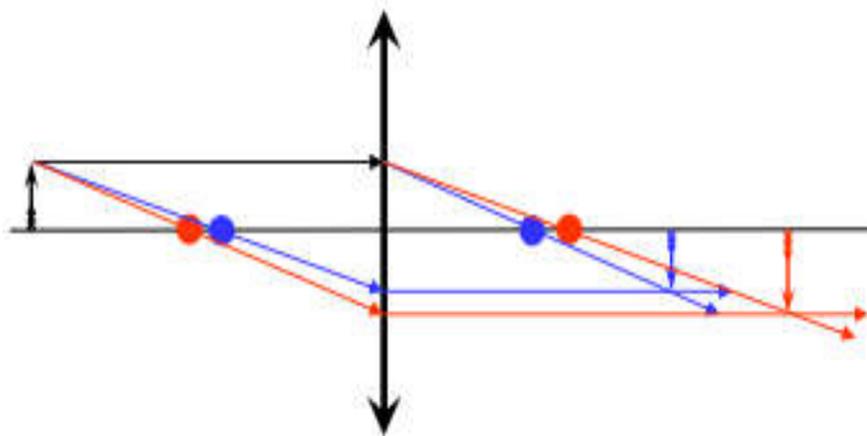


移轴镜头对畸变进行修正

8.7 像差

像差—色差 (chromatic aberration)

折射率随颜色(波长)而变, 致使白光成像时, 不同颜色的光所成的像位置和大小都不同, 称为色差。分为轴向 (位置) 色差、横向 (放大率) 色差。



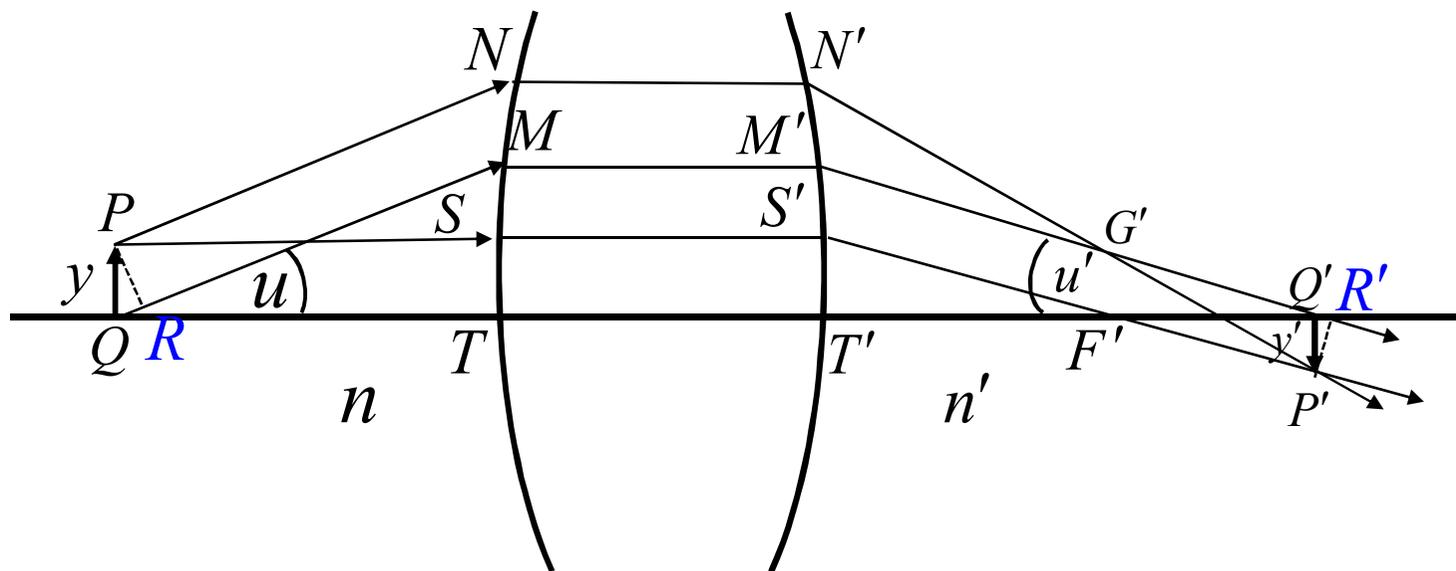
8.7 像差

像差—色差 (chromatic aberration)



8.7 像差

像差—正弦条件和齐明点



傍轴大孔径成像要求：

$$(QMM'Q') = (QTT'Q')$$

$$(PNN'P') = (PSS'P')$$

$$(PSS'F') = (QTT'F')$$

$$(PNN'G') = (RMM'G')$$

8.7 像差

像差—正弦条件和齐明点

利用傍轴近似：

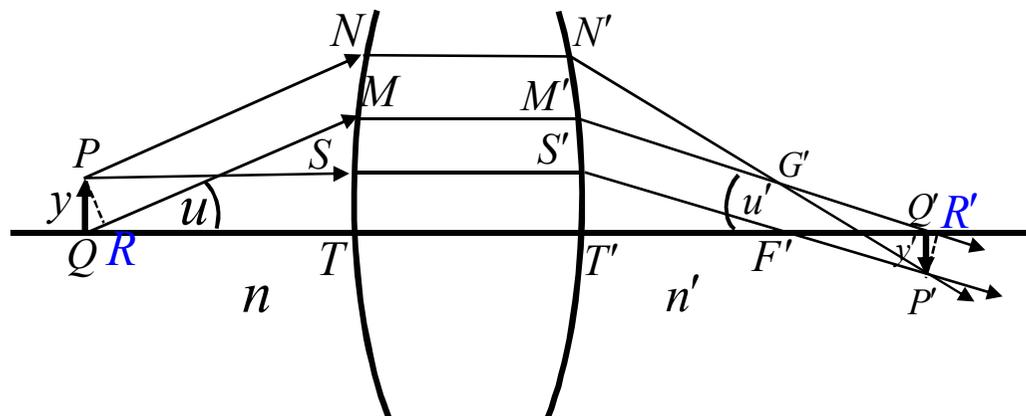
$$(F'Q') \approx (F'P')$$

$$(G'R') \approx (G'P')$$

得到： $(QR) \approx (Q'R')$

$$(QR) = n\overline{QR} = ny \sin u$$

$$(Q'R') = n'\overline{Q'R'} = n'y' \sin u'$$



得到轴上消球差条件下傍轴大孔径成像的条件：

$$yn \sin u = y'n' \sin u' \quad \text{阿贝正弦条件}$$

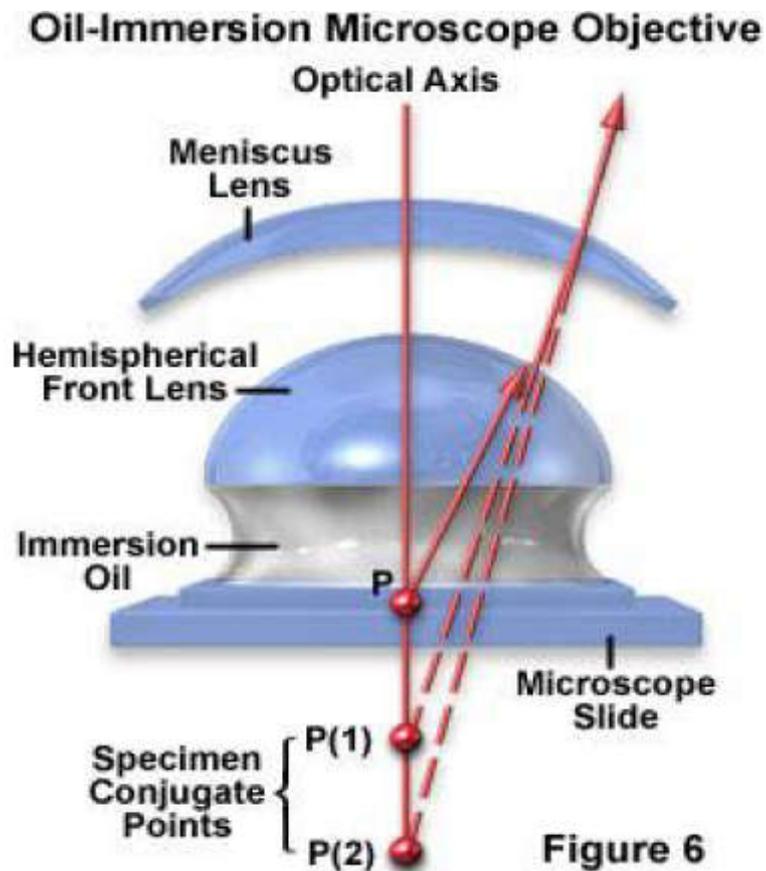
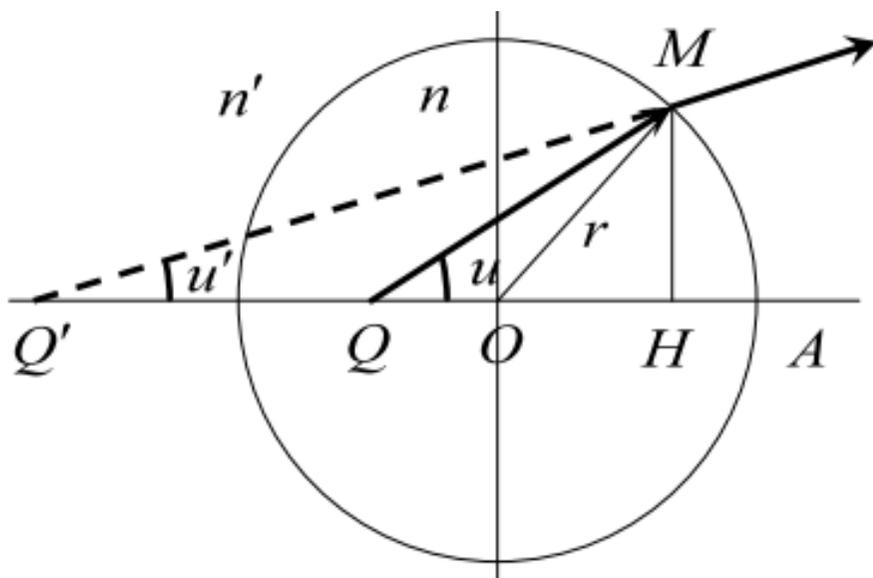
光轴上已消除球差且满足阿贝正弦条件的一对共轭点称为齐明点。

数值孔径： $N.A. = n \sin u$ 与亥姆霍兹公式 $yn \tan u = y'n' \tan u'$ 比较？

8.7 像差

像差—正弦条件和齐明点

$$QO = \frac{n'}{n}r \quad Q'O = \frac{n}{n'}r$$



浸油物镜

注意：齐明点远未达到理想光具组的要求！

本节重点

1. 各种光学仪器的基本原理
2. 物镜、目镜的作用
3. 显微镜和望远镜成像和放大机制的异同
4. 高斯、牛顿公式在光学仪器性能分析中的应用。

作业

P97—3,6 (1-3问必做, 第4问选做) (重排版 p70)

选做思考题

1. 望远镜也被称为“无焦系统”，但为什么实际使用时经常还需要通过调节筒长来对焦？
2. 同一个望远镜，对于近视眼和正常眼来说，放大倍数相同吗？