

# 光与光学

## Light and Optics

---

2019.11.14

为什么理解 VR 需要了解光在物理世界中的传播方式？

- VR 头戴式设备中，工程镜头和人眼系统是成像的研究对象。
- 虚拟世界的构建。
- 有助于理解相机如何工作，应用在全景视频、追踪中。

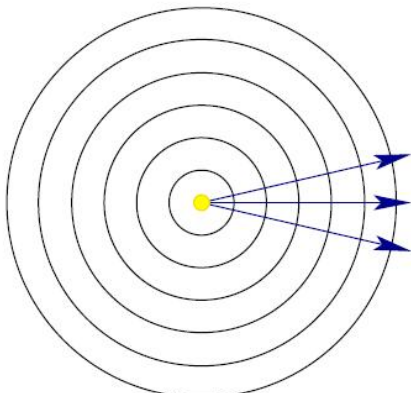
# Outline

- ① 光的基本行为
- ② 镜头
- ③ 光学畸变
- ④ 人眼
- ⑤ 相机
- ⑥ 显示设备

# 光

光可以用三种方式来描述：

- 光子：在空间中高速移动的微小能量粒子。
- 光波：通过空间的波纹，类似于在水面上传播的波浪，但是是三维的。
- 光线：光线追踪单个假想光子的运动。方向垂直于波前。



# 扩散波

如果点光源离“无限远”，那么将获得平行波前

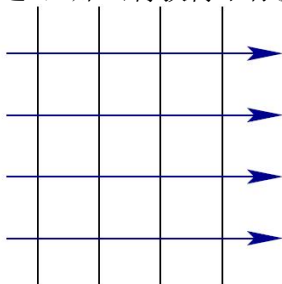


Figure 4.2: If the point light source were “infinitely far” away, then parallel wavefronts would be obtained. Other names for this setting are: Collimated light, parallel rays, rays from infinity, rays to infinity, and zero vergence.

图片来自 [3]

# 与材料的相互作用

当光能碰到不同介质的边界时，有三种可能性：透射，吸收和反射

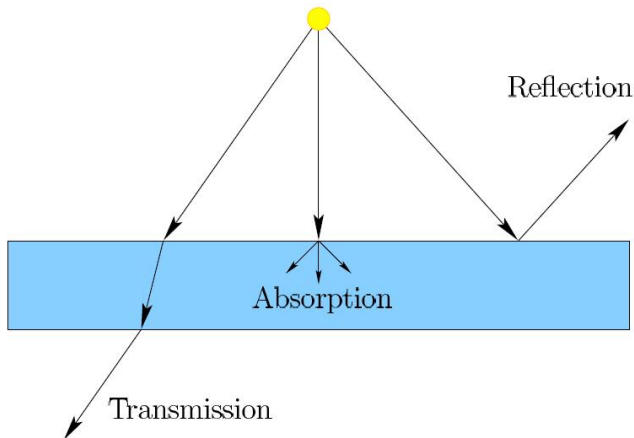
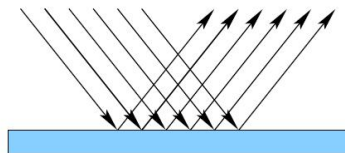


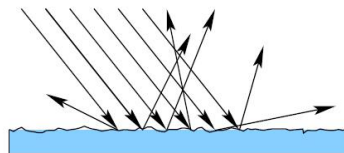
Figure 4.3: As light energy hits the boundary of a different medium, there are three possibilities: transmission, absorption, and reflection.

# 与材料的相互作用

## 镜面反射 VS. 漫反射



Specular



Diffuse

Figure 4.4: Two extreme modes of reflection are shown. Specular reflection means that all rays reflect at the same angle at which they approached. Diffuse reflection means that the rays scatter in a way that could be independent of their approach angle. Specular reflection is common for a polished surface, such as a mirror, whereas diffuse reflection corresponds to a rough surface.

图片来自 [3]

# 相干与混杂的光线

相干光 (coherent light): 波前完全在时间和空间上对齐, 例如激光。

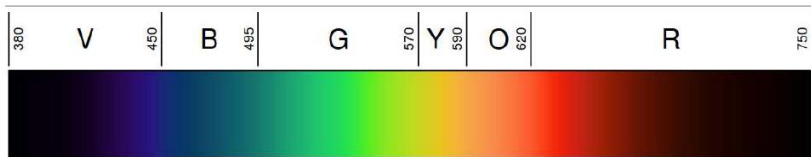


Figure 4.5: Visible light spectrum corresponds to the range of electromagnetic waves that have wavelengths between 400nm and 700nm. (Figure by David Eccles for Wikipedia.)

图片来自 [3]



# 光谱功率

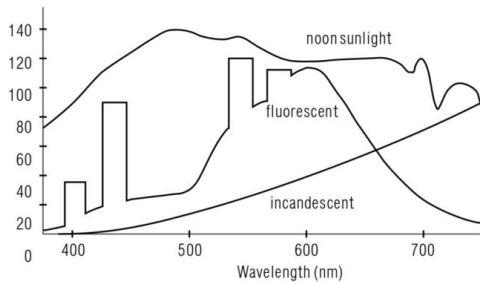


Figure 4.6: The *spectral power distribution* for some common light sources. (Figure from [226]).

图片来自 [3]

# 光谱功率

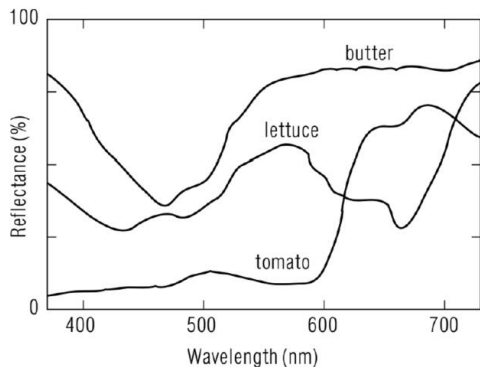


Figure 4.7: The *spectral reflection function* of some common familiar materials (Figure from [226]).

图片来自 [3]

# 频率

频率是波峰每秒通过固定位置的次数。

已知波长  $\lambda$  和速度  $s$ ，频率  $f$ ： $f = s/\lambda$

光在真空中的速度  $c = 3 \times 10^8 m/s$ 。

光在密度较大的介质（如水或透镜）传播， $s$  明显变小。

# Outline

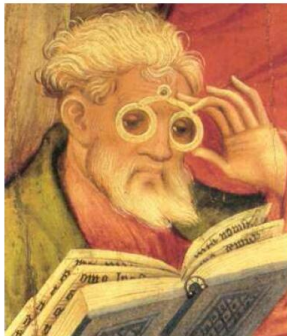
- ① 光的基本行为
- ② 镜头
- ③ 光学畸变
- ④ 人眼
- ⑤ 相机
- ⑥ 显示设备

# 镜头

传统光学设备：眼镜，放大镜，望远镜，照相机和显微镜等。  
VR 头盔与传统光学设备不同，导致许多新的挑战。



(a)



(b)

Figure 4.8: (a) The earliest known artificially constructed lens, which was made between 750 and 710 BC in ancient Assyrian Nimrud. It is not known whether this artifact was purely ornamental or used to produce focused images. Picture from the British Museum. (b) A painting by Conrad von Soest from 1403, which

# 斯内尔定律

镜片的工作原因是斯内尔定律，它表达了当进入或退出透明材料时光线有多少弯曲。

折射率定义为： $n = c/s$ ，其中  $s$  是介质中的光速。

斯内尔定律 (Snell's law):  $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ .

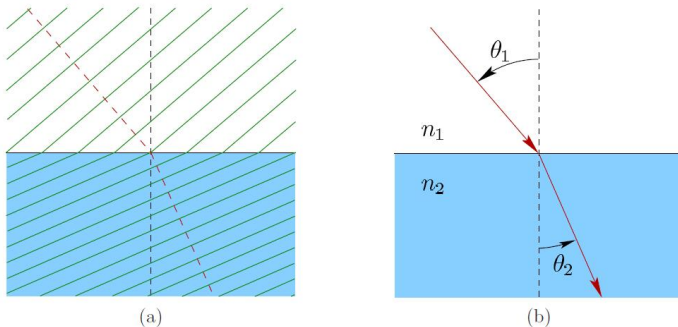


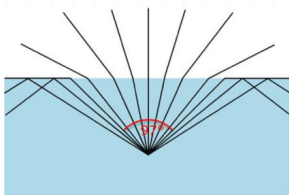
Figure 4.9: Propagating wavefronts from a medium with low refractive index (such as air) to one with a higher index (such as glass). (a) The effect of slower propagation on the wavefronts is shown as they enter the lower medium. (b) This shows the resulting bending of a light ray, which is always perpendicular to the wavefronts.

# 斯内尔定律

Snell's law:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ .



(a)



(b)



(c)

# 棱镜

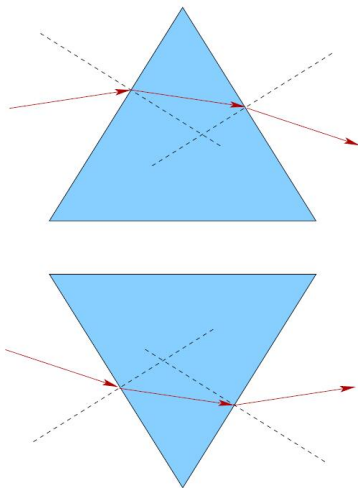


Figure 4.10: The upper part shows how a simple prism bends ascending rays into descending rays, provided that the incoming ray slope is not too high. This was achieved by applying Snell's law at the incoming and outgoing boundaries. Placing



## 简单的凸透镜

一个简单的凸透镜会使平行光线聚焦在焦点处。虚线为光轴，它垂直于镜头并穿过其中心。

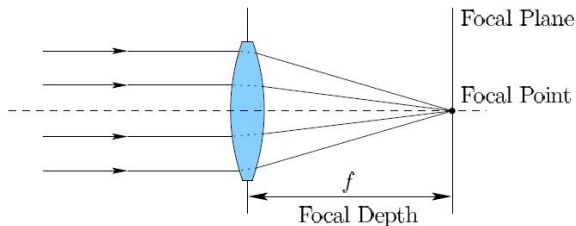
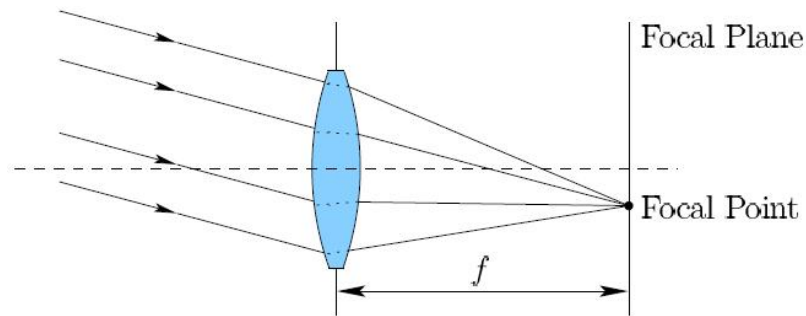


Figure 4.11: A simple convex lens causes parallel rays to converge at the focal point. The dashed line is the *optical axis*, which is perpendicular to the lens and pokes through its center.

图片来自 [3]

# 简单的凸透镜

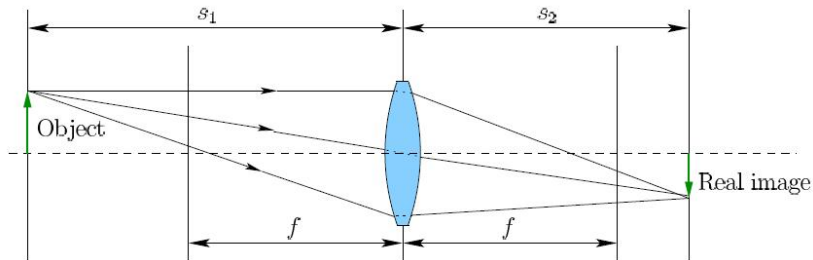
如果光线不垂直于透镜，则焦点偏离光轴。



图片来自 [3]

# 简单的凸透镜

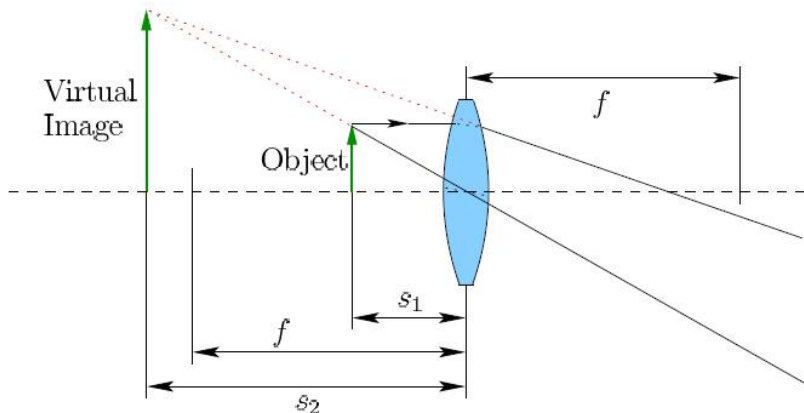
假设透镜焦距为  $f$ 。如果将光源放置在与透镜距离为  $s_1$  的位置，当且仅当满足以下等式（斯内尔定律）时，经过该透镜的光线才会聚焦：
$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f}$$



图片来自 [3]

# 简单的凸透镜

如果物体非常接近透镜，那么透镜不能强制出射光线会聚至某一点。但在这种情况下会出现一个虚拟图像，透镜的作用为放大镜。这是通常用于 VR 设备的方式。

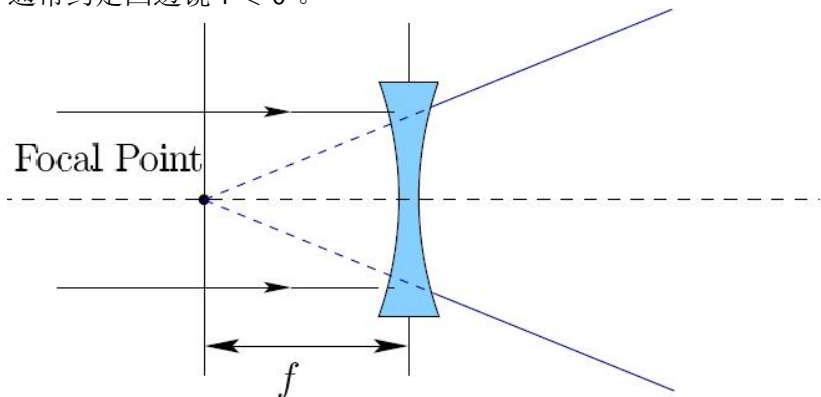


图片来自 [3]

## 简单的凹透镜

在凹透镜的情况下，平行射线被分散。光线可以通过镜头向后延伸，到达左侧的焦点。

通常约定凹透镜  $f < 0$  。



图片来自 [3]

# Lensmaker 方程

对于一个给定的简单透镜，焦距  $f$  可以使用 Lensmaker 等式计算得到：

$$(n_2 - n_1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f}$$

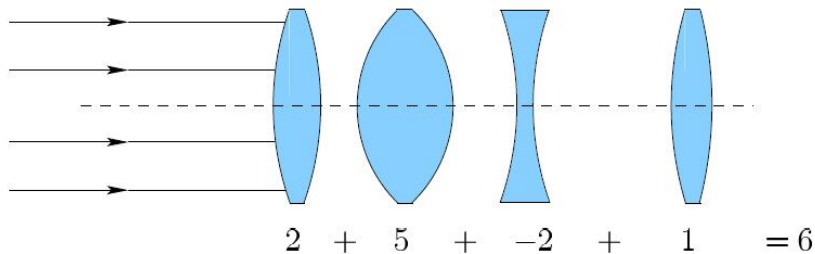
参数  $r_1$  和  $r_2$  分别表示透镜前后表面的曲率半径。

此外，通常假定  $n_1 = 1$ ，为空气的折射率。

# 屈光度

VR 光学系统中，单个镜头通过连续组合几个透镜的方式构成。  
这样组合的效果是什么呢？

定义一个屈光度  $D$ ， $D = 1/f$ ，即焦距的倒数。



图片来自 [3]

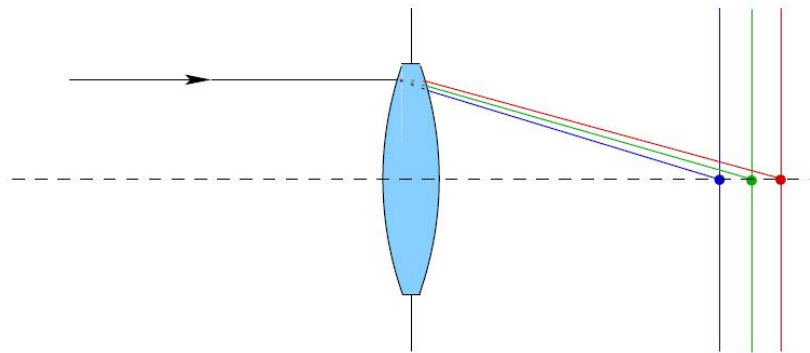
# Outline

- ① 光的基本行为
- ② 镜头
- ③ 光学畸变
- ④ 人眼
- ⑤ 相机
- ⑥ 显示设备



# 色差

白光通过棱镜折射时，整个可见光谱按颜色被很好地分开，对于镜头来说分散了图像的各种颜色成分。这个问题被称为色差。



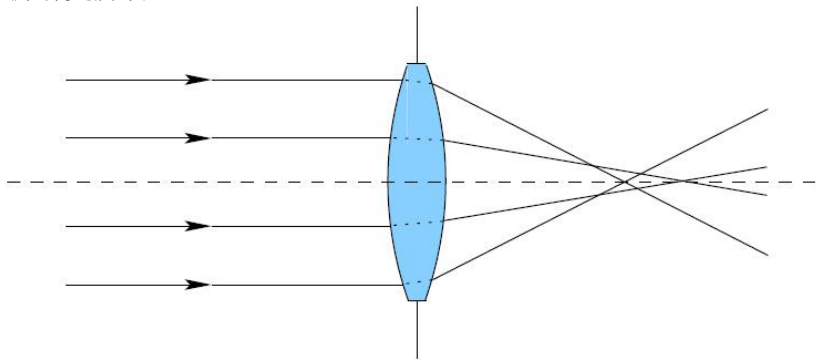
图片来自 [3]

# 色差



# 球面像差

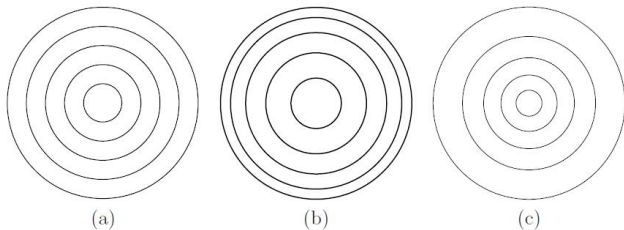
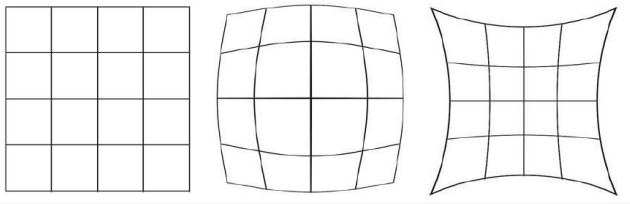
球面像差引起焦点无法聚集，因为远离光轴的光线比周边的光线折射更厉害。



图片来自 [3]

# 光学失真

图像也可能在外围发生扭曲：桶形失真和枕形失真。  
纠正这种失真对于目前具有宽视场的 VR 头戴式设备至关重要，  
否则，呈现的虚拟世界就会变形。



图片来自 [3]

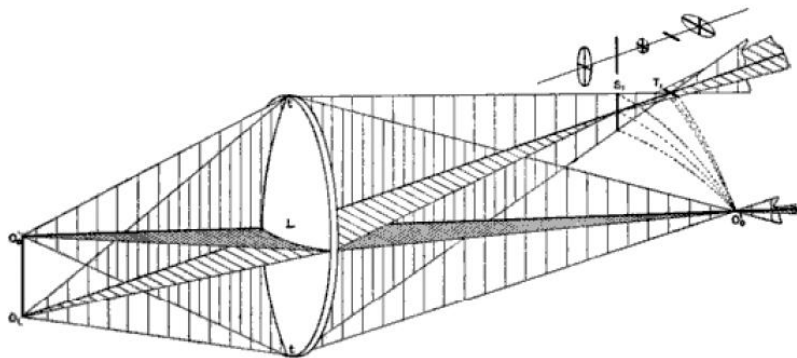
# 光学失真



图片来自 [3]

# 像散性

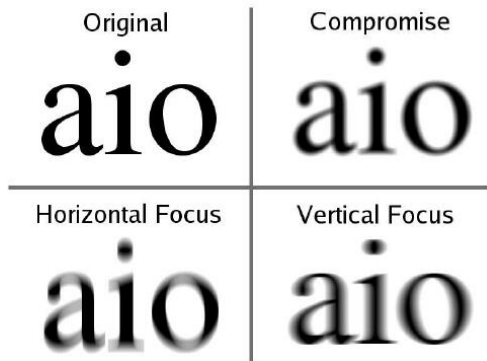
像散性主要是由于入射光线在一个平面内偏离轴线，而在另一个平面内接近垂直。



图片来自 [3]

# 像散性

由于像散性，无法将图像完美地聚焦。在一个深度上，它可能会水平聚焦，而另一个深度上则是垂直聚焦。



图片来自 [3]

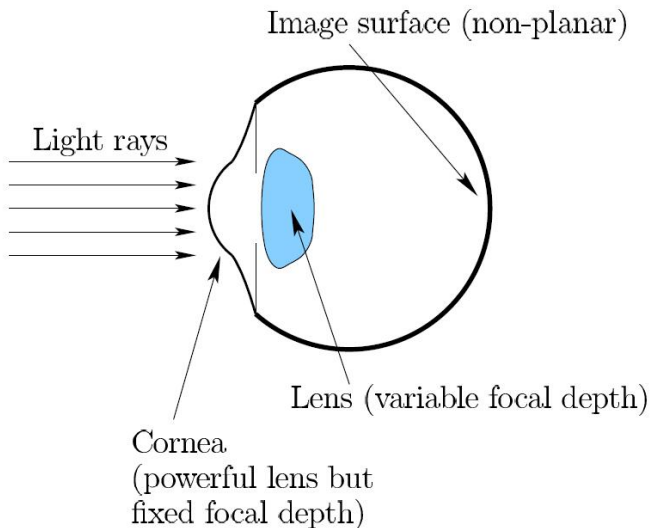
# Outline

- ① 光的基本行为
- ② 镜头
- ③ 光学畸变
- ④ 人眼
- ⑤ 相机
- ⑥ 显示设备



## 人眼

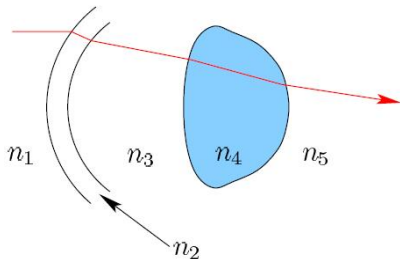
## 人眼光学系统的简化视图



# 人眼

焦平面被视网膜的球形曲面所取代。视网膜包含将光转换为神经脉冲的光感受器。

眼球的内部实际上是液体，而不是空气。



1.  $n_1 = 1.009$  (air)
2.  $n_2 = 1.376$  (cornea)
3.  $n_3 = 1.336$  (aqueous fluid)
4.  $n_4 = 1.413$  (lens)
5.  $n_5 = 1.337$  (vitreous fluid)

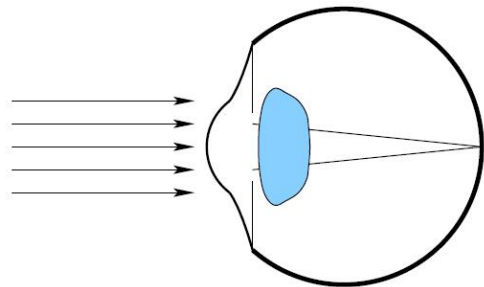
图片来自 [3]

# 人眼

眼睛的光焦度眼球的外径大约为 24mm，这意味着至少需要 40D 的镜片才能使平行光线聚焦到眼睛内部的视网膜中心。

实际上眼睛有两个凸透镜：角膜和晶状体。

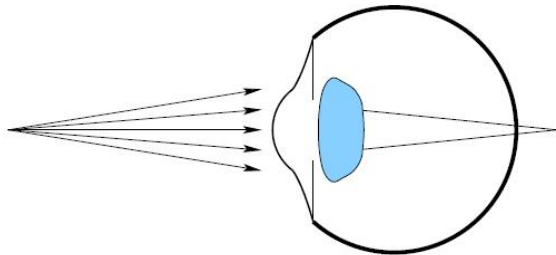
- 角膜是最先进入的眼睛的最外面部分，具有最大的光焦度，约 40D。
- 眼睛晶状体不那么强大，提供额外的 20D。



图片来自 [3]

# 人眼

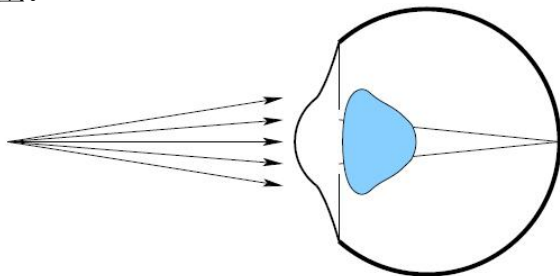
一个近物会产生发散的光线，但如果晶状体松弛，图像在视网膜上模糊不清。



图片来自 [3]

# 人眼

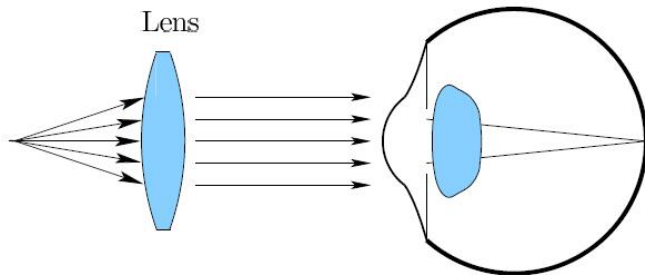
眼睛肌肉拉动晶状体，使其增加聚光力量并将图像聚焦在视网膜上。



图片来自 [3]

# 人眼

在眼前放置凸透镜是提升聚光能力的另一种方式，以便附近的物体可以在眼睛中汇聚焦点。这就是老花镜的原则。



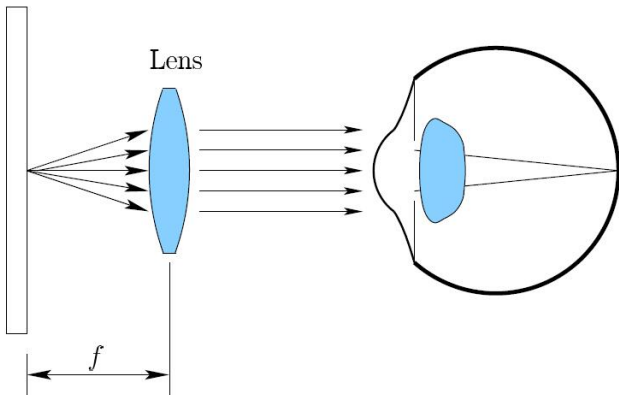
图片来自 [3]

## 简单的 VR 头戴式设备

放置一个非常接近眼睛的屏幕来构建 VR 头戴式设备，需使用凸透镜来增加光焦度。

屏幕显示为无限远的巨大虚拟图像。

Screen



图片来自 [3]

# Outline

- ① 光的基本行为
- ② 镜头
- ③ 光学畸变
- ④ 人眼
- ⑤ 相机
- ⑥ 显示设备

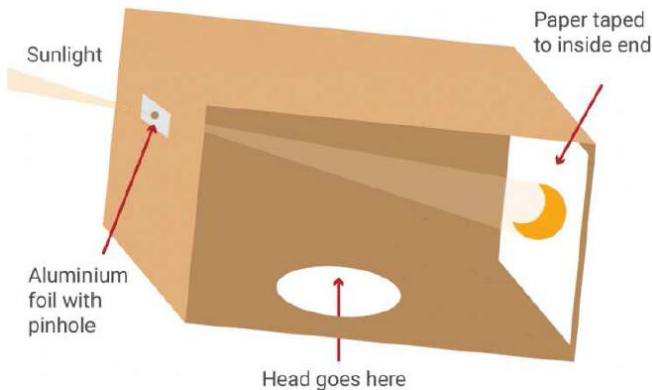


# 光

相机：眼睛的工程近似。

从暗箱开始，允许光线通过针孔，呈现有真实图像的 surface。

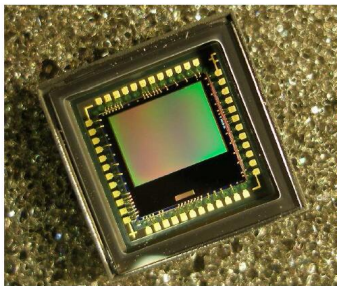
19 世纪，基于化学的技术：光子撞击成像表面会自动蚀刻出图像。



图片来自 [3]

# 相机

20 世纪，数码相机使用传感器以电子方式捕获图像。  
两种流行的技术：电荷耦合器件（CCD）阵列和 CMOS 有源像素  
图像传感器。



(a)



(b)

Figure 4.32: (a) A CMOS active-pixel image sensor. (b) A low-cost CMOS camera module (SEN-11745), ready for hobbyist projects (picture by SparkFun).

图片来自 [3]

# 快门

快门：打开关闭时间间隔。

CMOS 传感器逐行发送图像信息。因此，传感器与滚动式快门连接，在信息发送之前，每个线路都允许光线进入。这意味着捕捉不会在整个图像上同步，从而导致奇怪的伪像。



CCD 传感器一次抓取并发送整个图像，产生全局快门。CCD 一直比 CMOS 传感器更昂贵。

图片来自 [2]

# 光圈

光圈光学系统也影响到达传感器的光量。光圈设置光线进入的孔的大小。

f/1.4



f/2



f/2.8



f/4



f/5.6



f/8



f/11



f/16



图片来自 [3]

# Outline

- ① 光的基本行为
- ② 镜头
- ③ 光学畸变
- ④ 人眼
- ⑤ 相机
- ⑥ 显示设备

## CRT

CRT(Cathode ray tube): 电视广播时代。

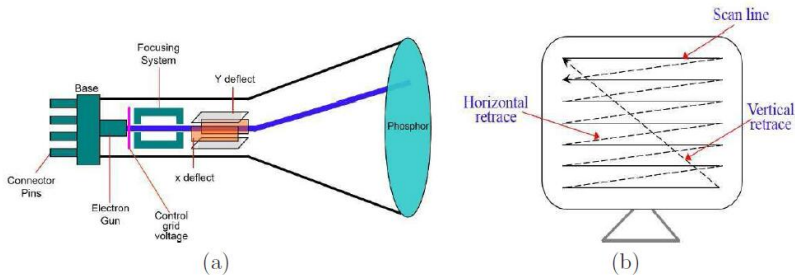


Figure 4.35: (a) In a cathode ray tube (CRT), an electron gun emits a beam of electrons, which are deflected in both X and Y directions according to an analog signal. When the beam hits the screen, an element of phosphor briefly lights up. (b) A special scanning pattern was used to draw out each video frame, line by line.

图片来自 [3]

# 平板显示

Liquid crystal displays (LCD displays), light emitting diodes (LEDs).

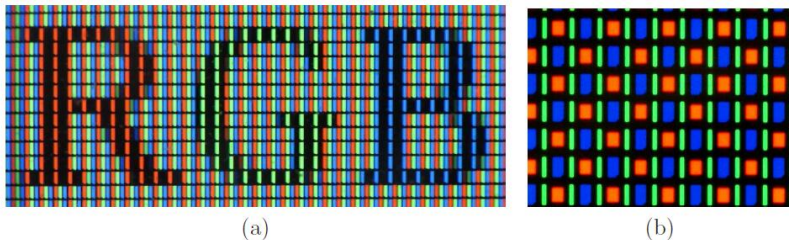


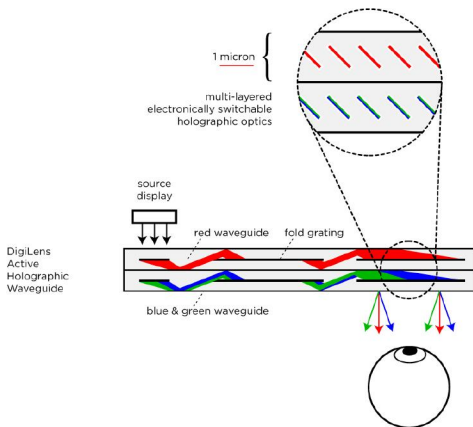
Figure 4.36: In displays, the pixels break into subpixels, much in the same way that photoreceptors break into red, blue, and green components. (a) An LCD display. (Photo by Luis Flavio Loureiro dos Santos.) (b) An AMOLED PenTile display from the Nexus One smartphone. (Photo by Matthew Rollings.)

图片来自 [3]

# Toward Custom VR displays

## Near-eye display

- Microdisplay : liquid crystal on silicon (or LCoS), organic LEDs (OLEDs)
- Virtual retinal display





# Any Questions?