



Lecture 19: 相机与镜头

SSE315: 计算机图形学
Computer Graphics

陈壮彬

软件工程学院

chenzhb36@mail.sysu.edu.cn

Course roadmap

光栅化 Rasterization

计算机图形学介绍
基于采样的光栅化
空间变换
纹理映射、深度和透明度

几何 Geometry

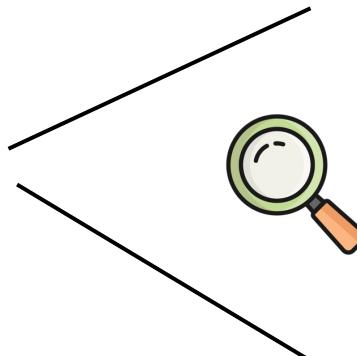
几何介绍
曲线与曲面
几何处理

材质与光线 Materials and Lighting

光线几何
光线追踪
辐射度量学
材料与高级渲染
相机与颜色

动画 Animation

相机与颜色



Today's topics

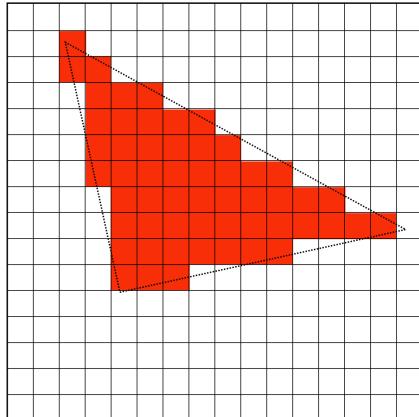
□ 相机 (Camera)

□ 镜片 (Lens)

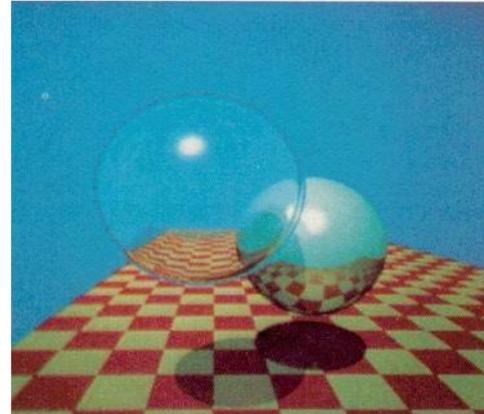
成像 Imaging

口合成方法 Synthesis

光栅化
Rasterization



光线追踪
Ray tracing

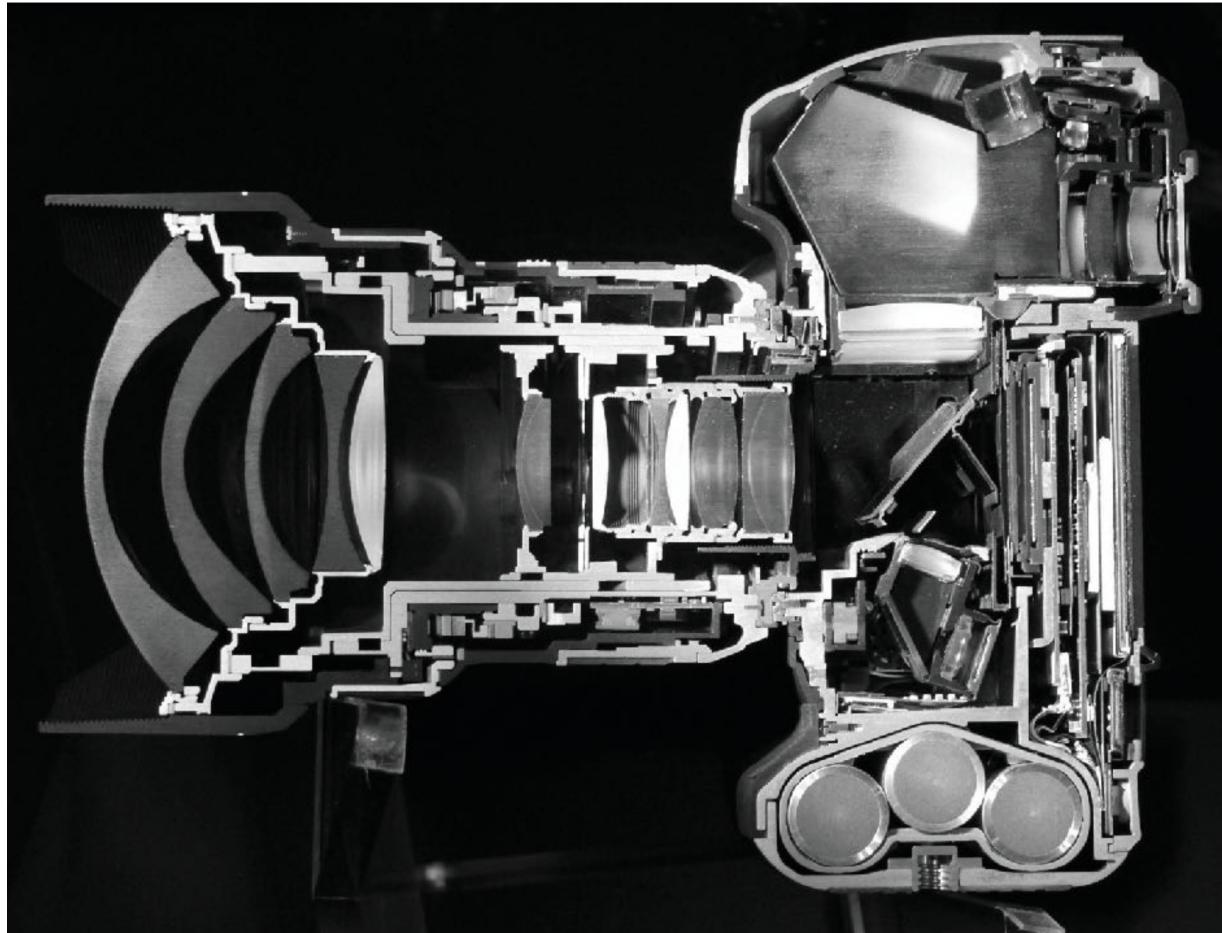


口捕捉方法 Capture



相机内部

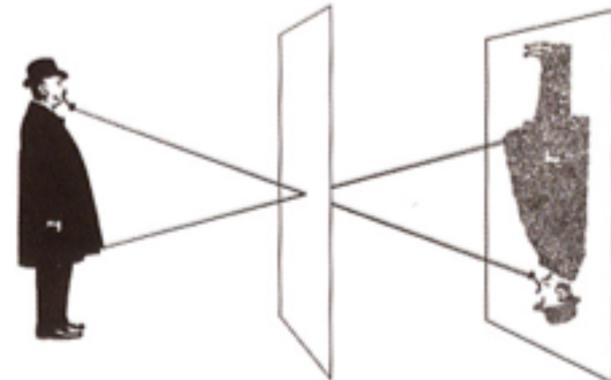
镜头 (Lens)、光圈 (Aperture)、快门 (Shutter)、感光元件 (Image sensor)...



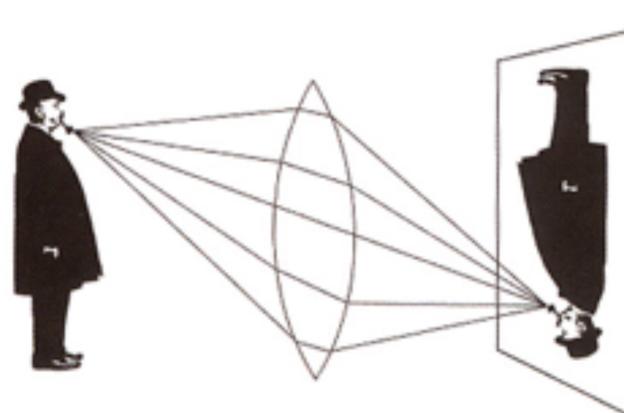
Cross-section of Nikon D3, 14-24mm F2.8 lens

针孔和透镜在传感器上形成图像

Photograph made with small pinhole

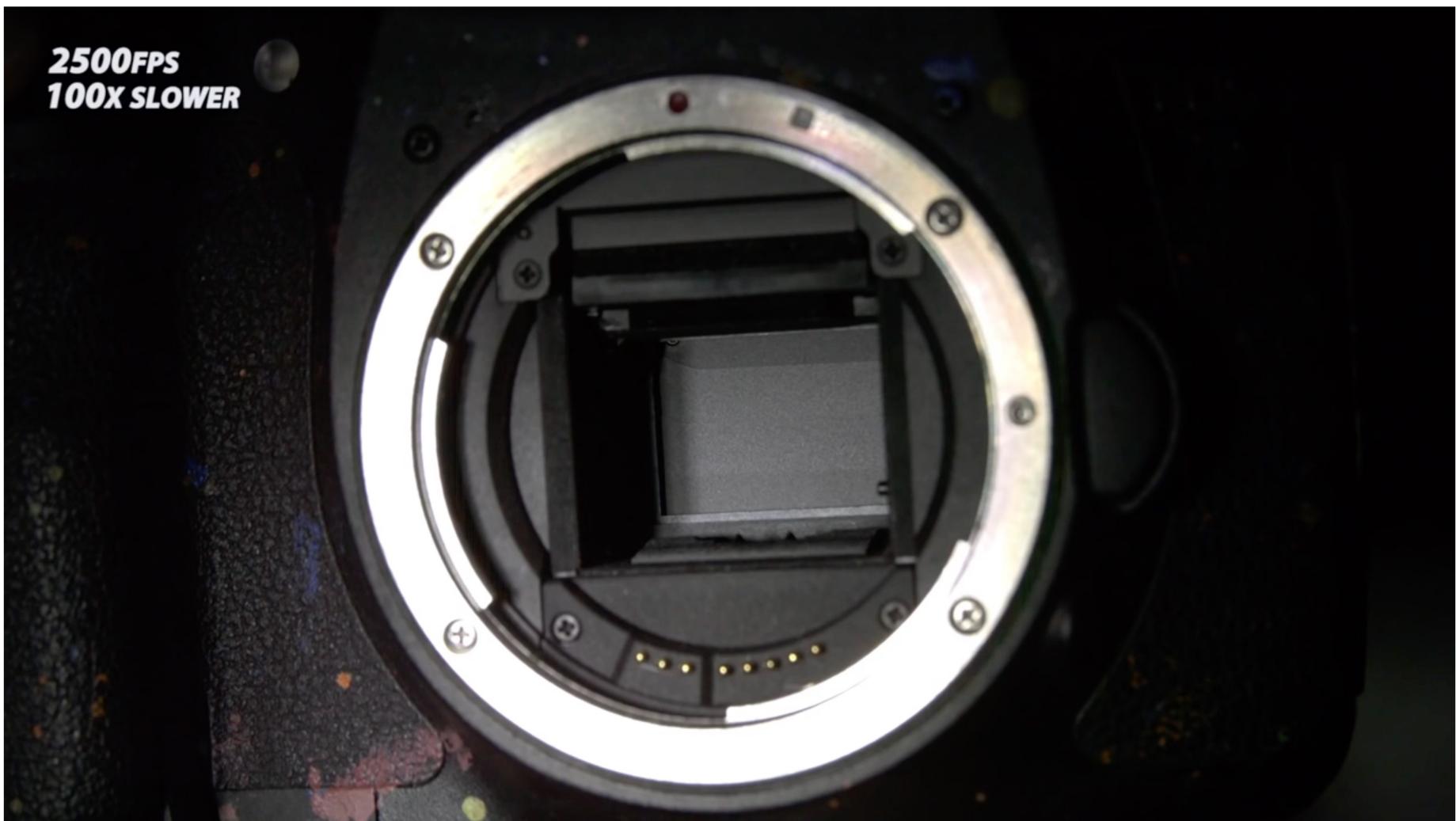


Photograph made with lens



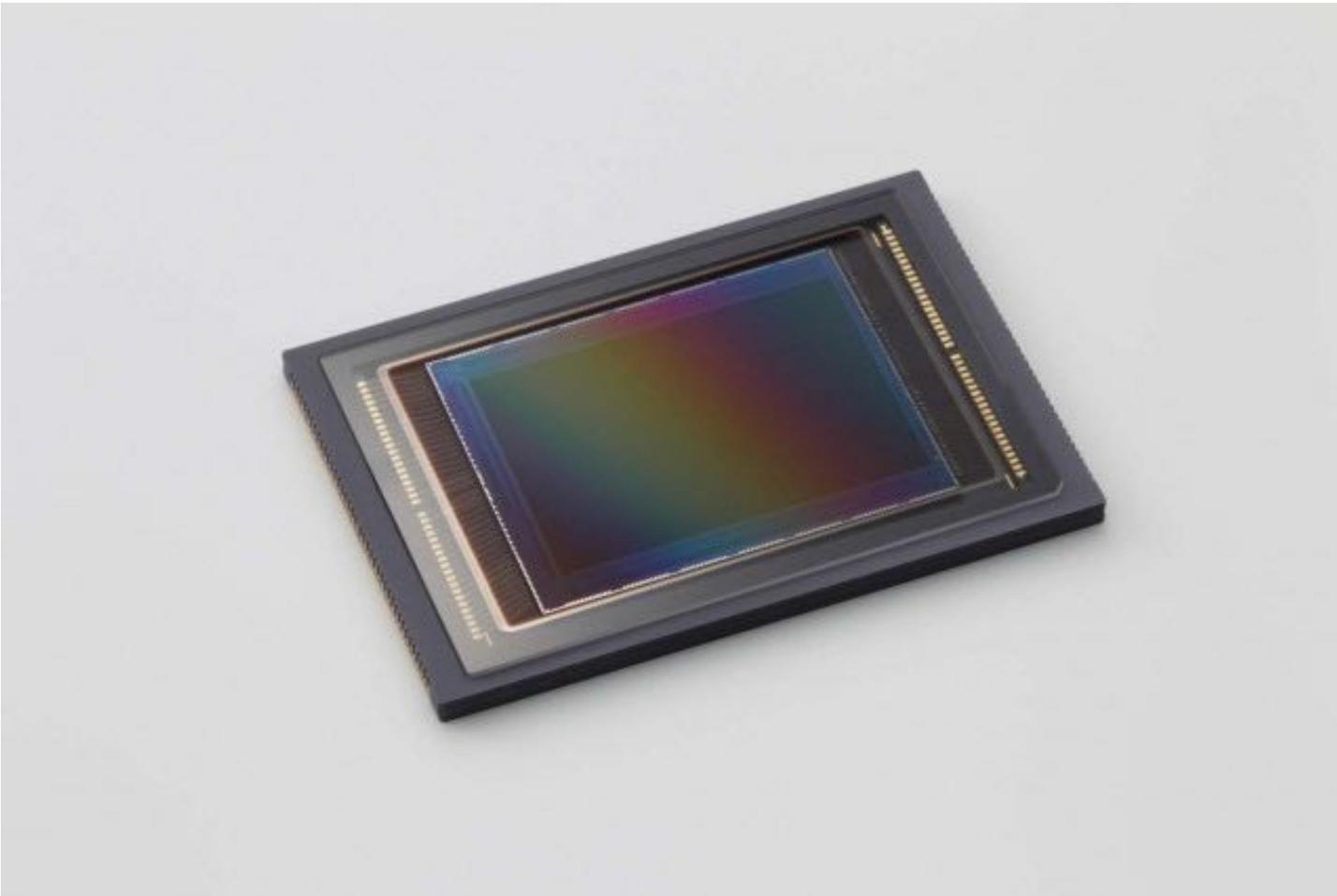
London and Upton

快门 (Shutter) 使传感器精确曝光



感光元件

将透过镜头的光线转换为电信号，然后再将电信号转换为可以被相机处理的数字信息

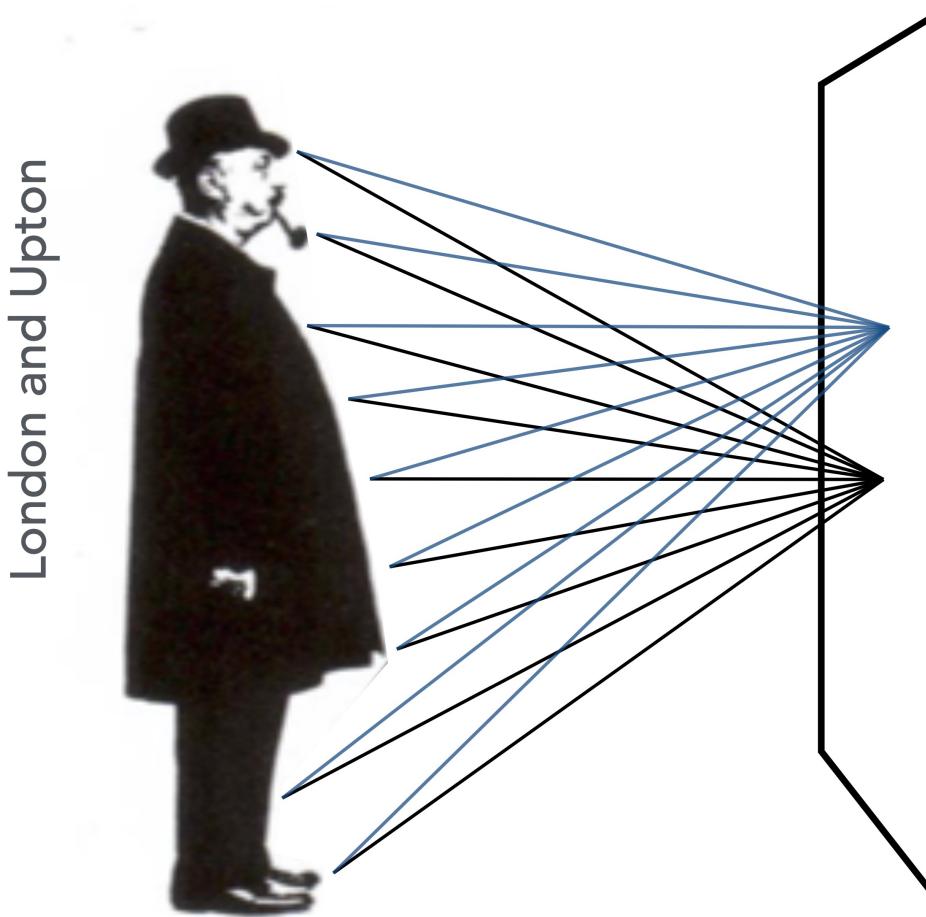


Q: 感光元件在曝光过程中积累的是?

- 辐射能量 (Energy)
- 辐射功率 (Power)
- 辐照度 (Irradiance)
- 辐亮度 (Radiance)

传感器能否不借助透镜成像？

传感器上每个点都集成来自物体上所有点的光，因此所有像素值都是相似（且模糊）的

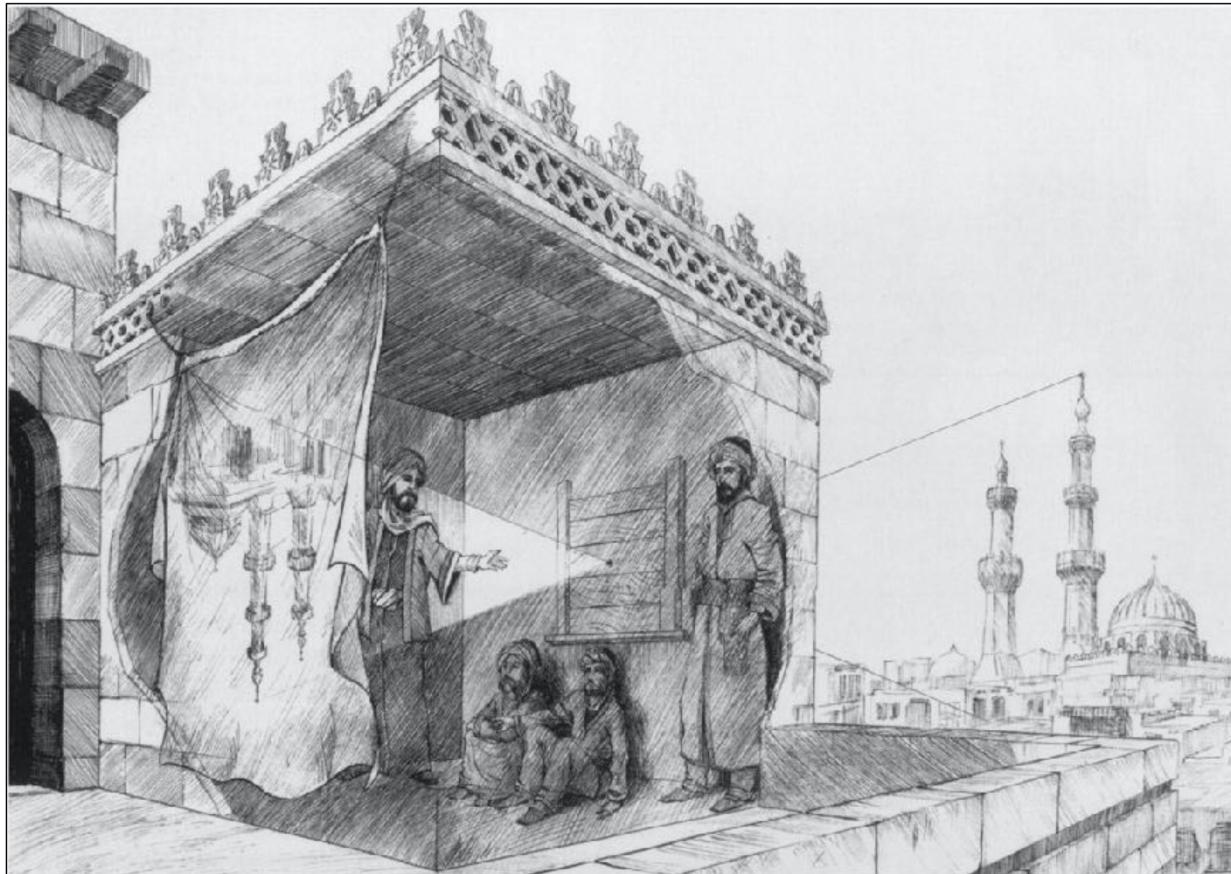


针孔成像

Pinhole image formation

针孔相机

□很早以前的针孔成像



墨子

Mo Tzu (c. 470–c. 390 BC)

Aristotle (384–322 BC)

Ibn al-Haytham (965–1040)

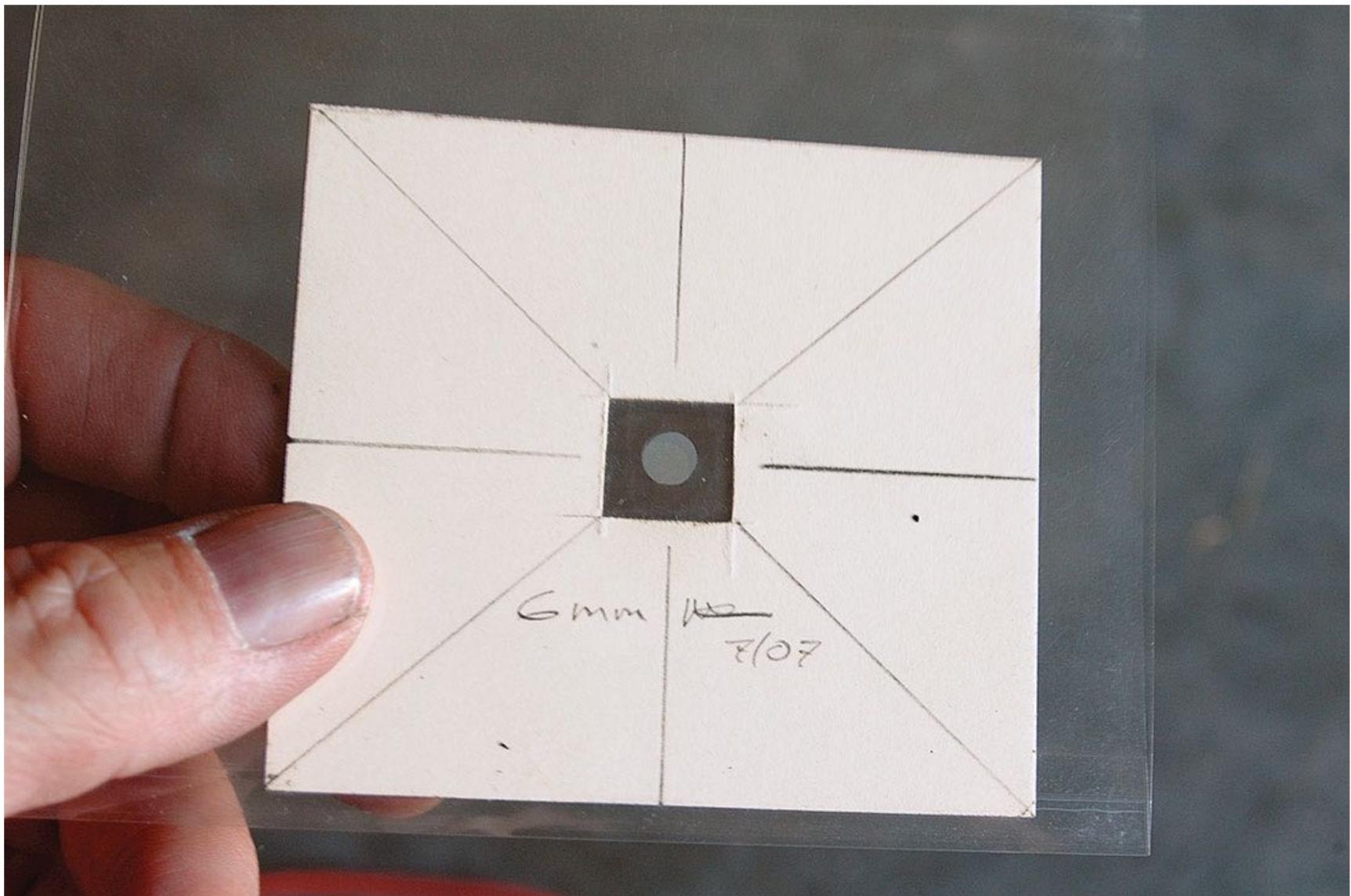
Shen Kuo (1031–1095)

Roger Bacon (c. 1214–1294)

Johannes Kepler (1571–1630)

A. H. Zewail, *Phil. Trans. R. Soc. A* 2010;368:1191–1204

最大的针孔照片

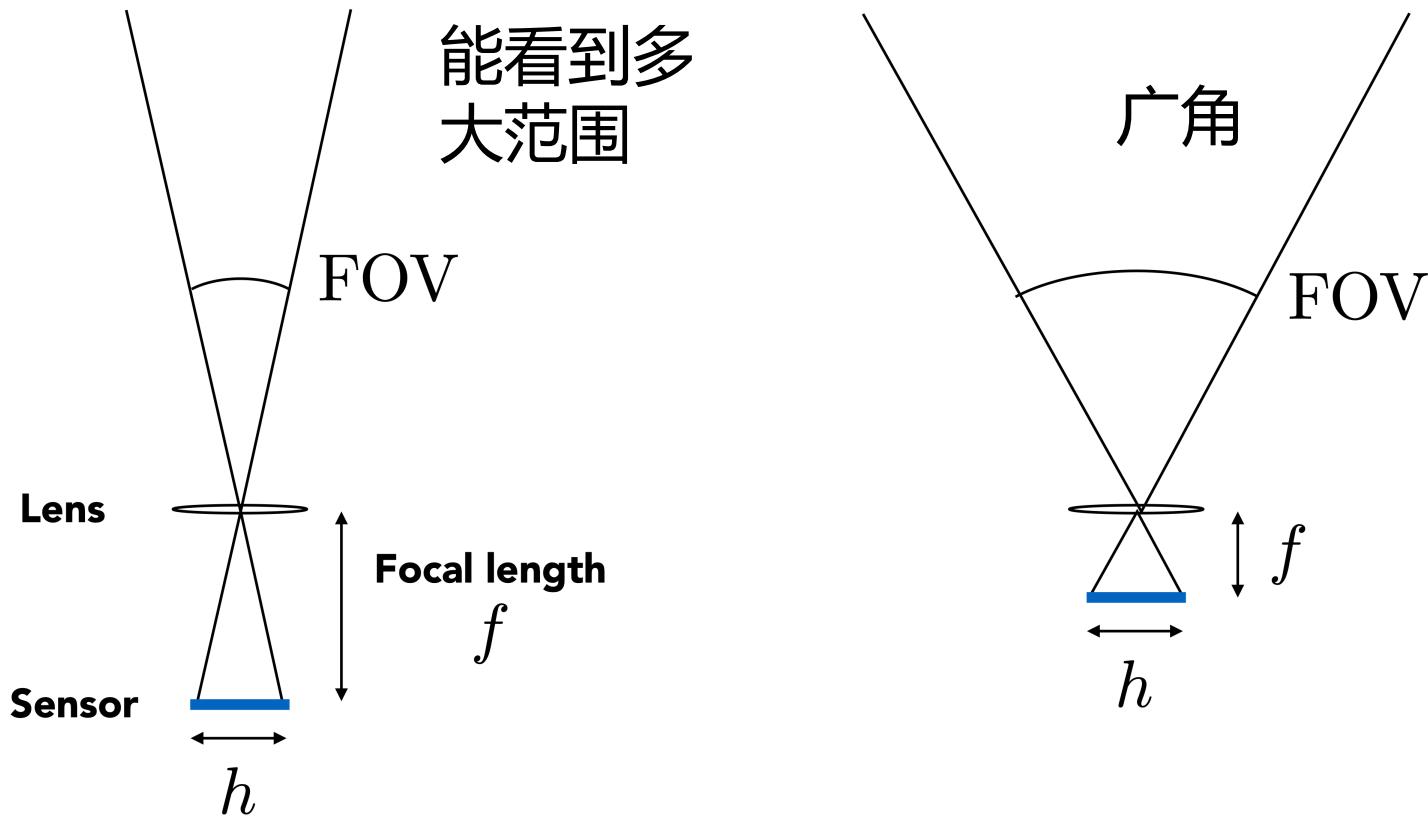


最大的针孔照片



视场
Field of View (FOV)

焦距 (Focal length) 对 FOV 的影响



对于固定的传感器尺寸，
减小焦距会增加视场

$$\text{FOV} = 2 \arctan\left(\frac{h}{2f}\right)$$

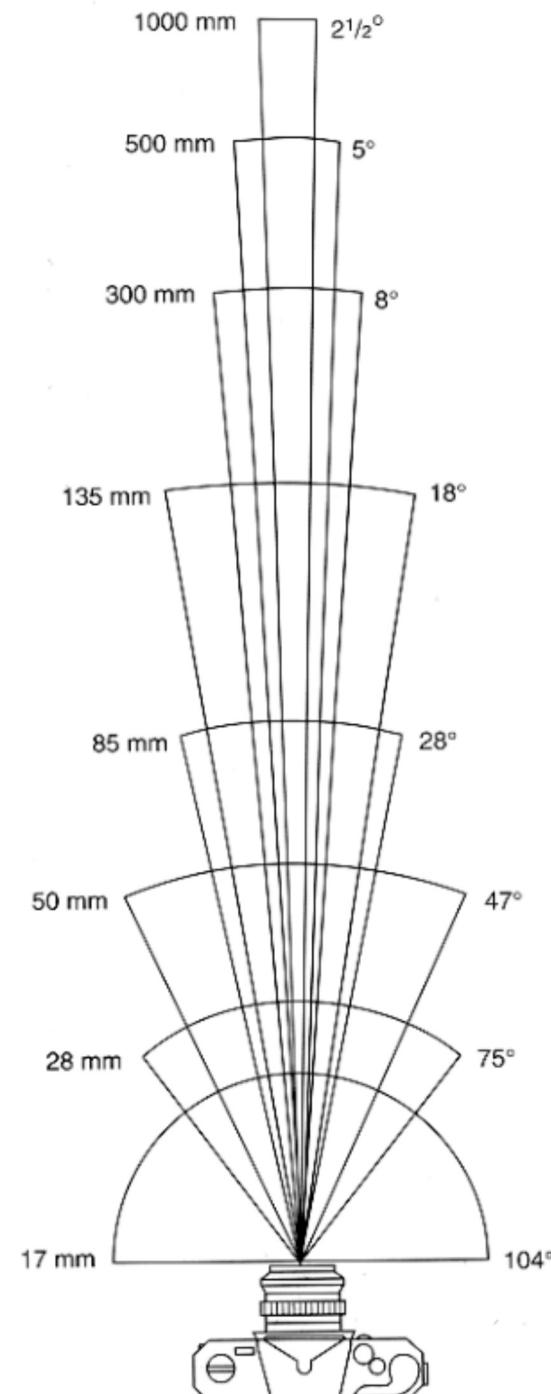
焦距 vs. 视场

□ 由于历史原因，通常用 35mm 胶片 ($36 \times 24\text{mm}$) 上使用的镜头焦距来表示视场

□ 35mm 格式的焦距示例：

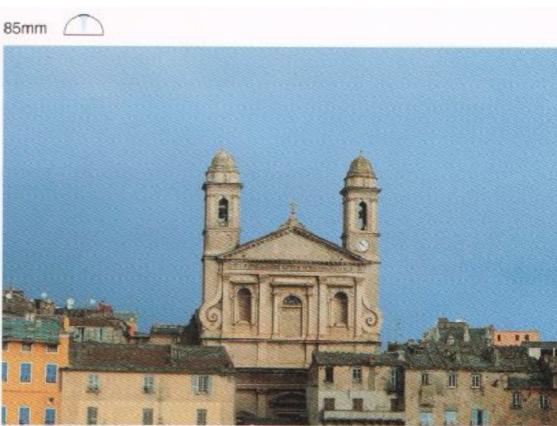
- 17mm 为广角镜头 104°
- 50mm 为常见镜头 47°
- 200mm 为长焦镜头 12°

□ 注意⚠️ 当我们说手机的焦距约为 28mm 时，也是使用了上述惯例（实际上手机的焦距并没有 28mm）

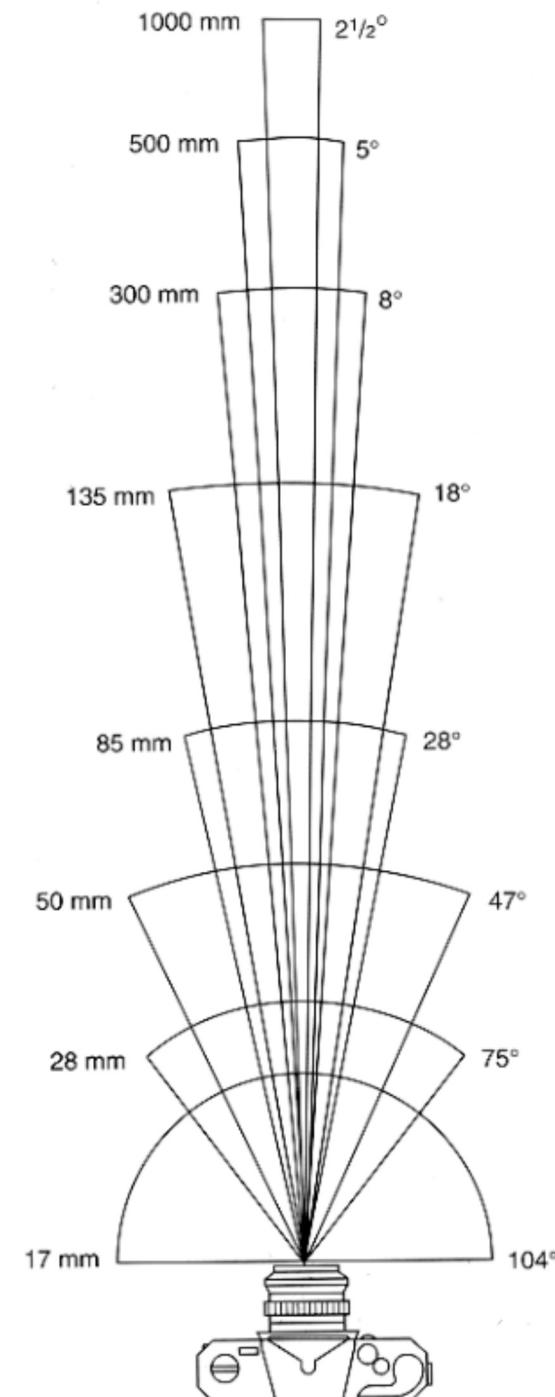


焦距 vs. 视场

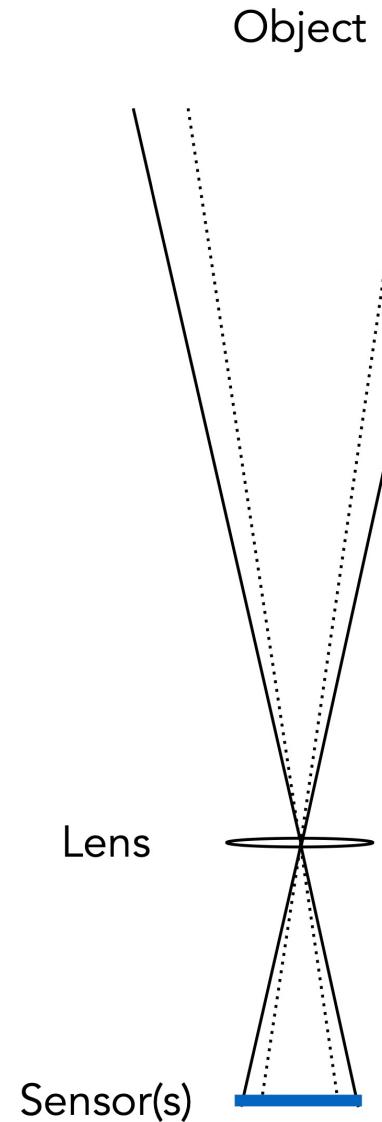
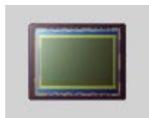
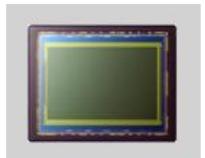
同一拍摄位置和角度



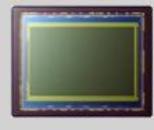
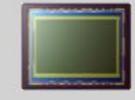
From London and Upton, and Canon EF Lens Work III



传感器尺寸对视场的影响



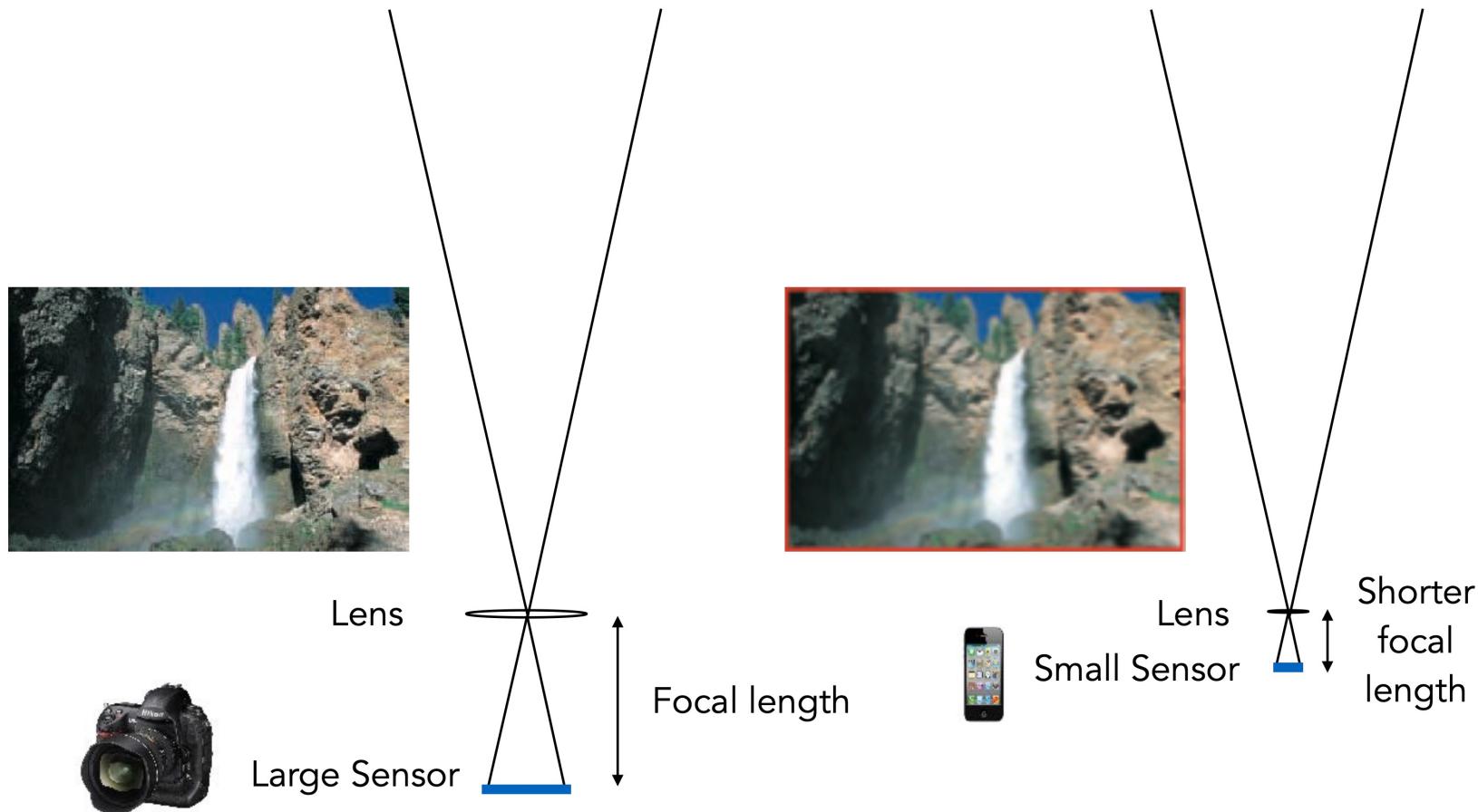
常见的传感器尺寸

Sensor Name	Medium Format	Full Frame	APS-H	APS-C	4/3	1"	1/1.63"	1/2.3"	1/3.2"
Sensor Size	53.7 x 40.2mm	36 x 23.9mm	27.9x18.6mm	23.6x15.8mm	17.3x13mm	13.2x8.8mm	8.38x5.59mm	6.16x4.62mm	4.54x3.42mm
Sensor Area	21.59 cm ²	8.6 cm ²	5.19 cm ²	3.73 cm ²	2.25 cm ²	1.16 cm ²	0.47 cm ²	0.28 cm ²	0.15 cm ²
Crop Factor	0.64	1.0	1.29	1.52	2.0	2.7	4.3	5.62	7.61
Image									
Example									



Credit: lensvid.com

在小传感器上维持视场不变？



为了维持视场，要按照传感器的宽度/高度比例减小透镜的焦距

曝光 Exposure

曝光

□ 定义为： $H = T \times E$

□ 曝光 = 时间 × 辐照度 (Exposure = time × irradiance)

□ 曝光时间 (T)

- 由快门控制

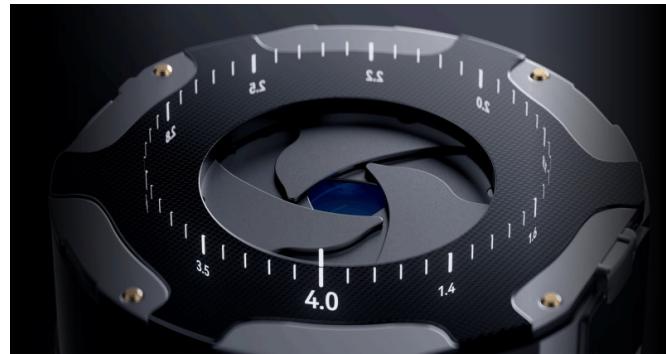
□ 辐照度 (E)

- 落在传感器单位面积上的光功率
- 由镜头光圈和焦距控制

摄影中的曝光控制

口光圈大小 (Aperture size)

- 控制光线进入相机的孔径大小
- 通过打开/关闭光圈来更改光圈的大小 (f 数, f-stop) (如果相机有光圈控制)



[Huawei Mate 50 可变光圈](#)

口快门速度 (Shutter speed)

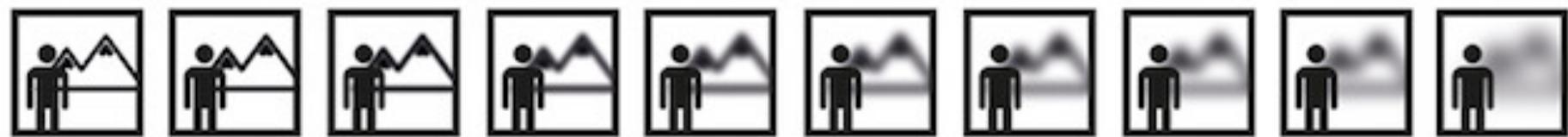
- 感光元件 (如胶片或数字传感器) 暴露在光线下的时间

口感光度 (ISO)

- 后期处理
- 更改传感器值和数字图像值之间的倍数



曝光：光圈、快门、感光度



F32 F22 F16 F11 F8 F5,6 F4 F2,8 F2 F1,4



1/1000 1/500 1/250 1/125 1/60 1/30 1/15 1/8 1/4 1/2



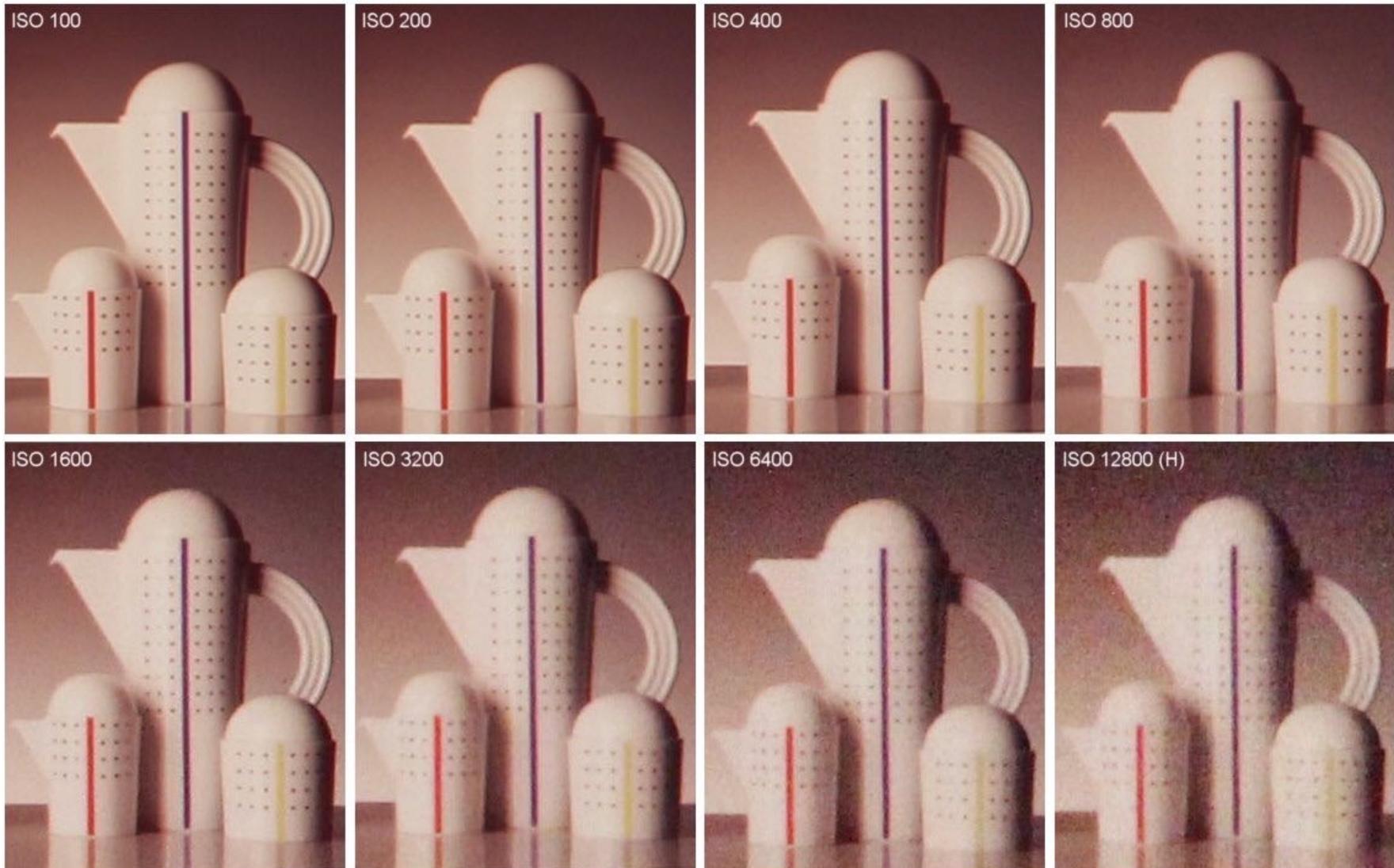
ISO 50 ISO 100 ISO 200 ISO 400 ISO 800 ISO 1600 ISO 3200 ISO 6400 ISO 12800 ISO 25600

为什么会有噪声？

感光度 (ISO)

- 口是对图像传感器对光线敏感度的量化表示
- 口传感器将模拟信号转化为数字信号的过程中进行调整
- 口当感光度加倍时 (ISO 100 -> ISO 200)，传感器对光的敏感度也加倍，图像的亮度也会增加一倍
- 口提高 ISO 值虽然可以在暗光环境下获取更亮的图像，但同时也会增加图像的噪点，降低图像质量

Canon T2i 中的感光度 vs. 噪声



Credit: bobatkins.com

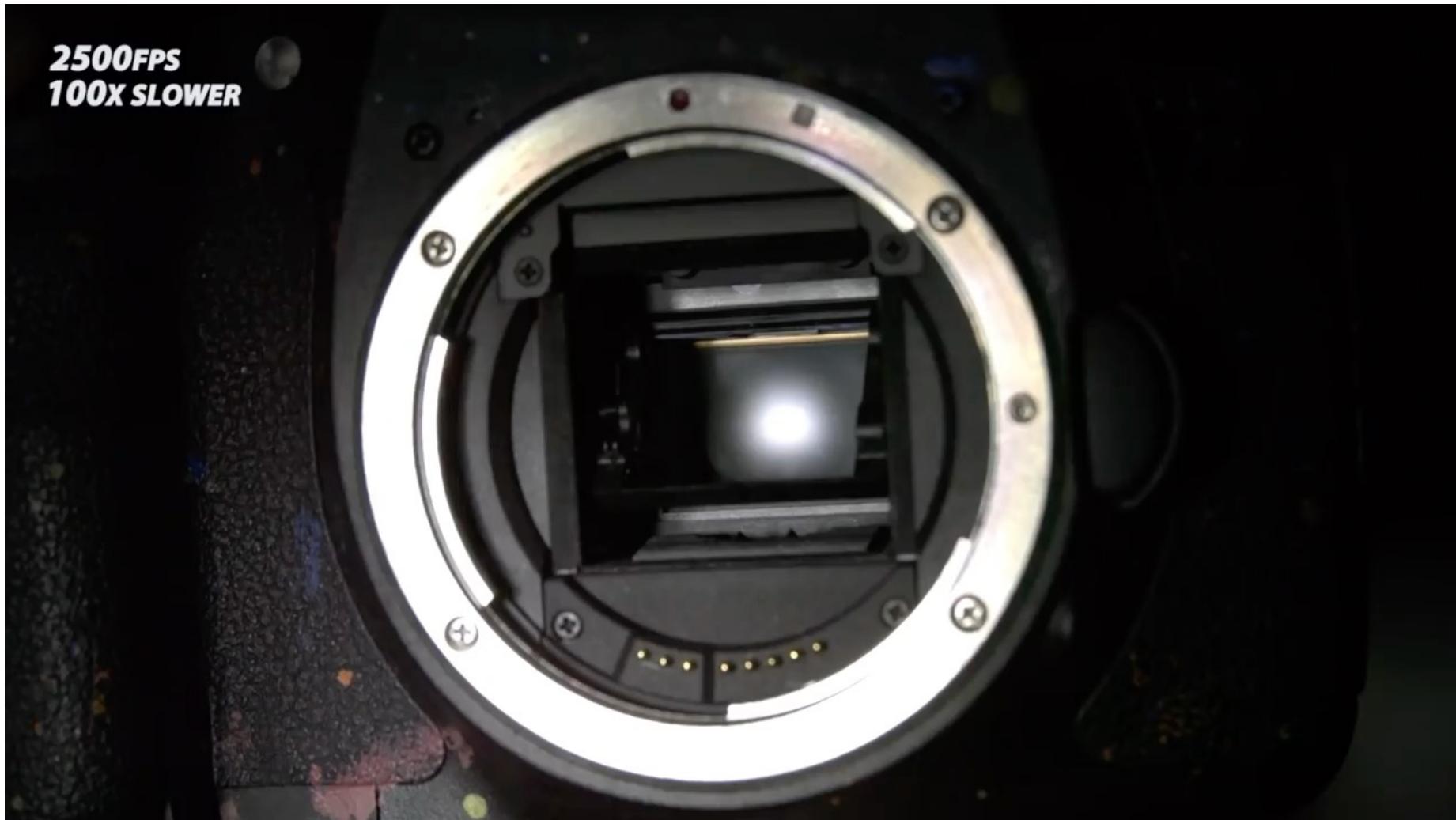
F 数 (F-number, F-stop): 曝光等级

口写成 FN 或 F/N, N 是具体的数字

口定义：焦距与光圈直径的比值



物理快门 (1/25 秒曝光)



快门速度的副作用

- 口运动模糊 (Motion blur): 手抖动、物体运动
- 口加倍快门时间会加倍运动模糊



快门速度的副作用

- 口运动模糊并不总是无益的
- 口考虑抗走样 (anti-aliasing)

Slow shutter speed



Fast shutter speed



London

快门速度的副作用

口卷帘式快门 (rolling shutter): 在不同时间拍摄物体的不同部分



快门速度的副作用

口卷帘式快门 (rolling shutter): 在不同时间拍摄物体的不同部分



恒定曝光：调整光圈与快门速度

口示例：以下 F 数和快门速度的组合具有相同的曝光度

F 数	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8.0	11.0	16.0	22.0	32.0
快门时间	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1

口如果曝光太亮/太暗，可能需要调整光圈和/或快门

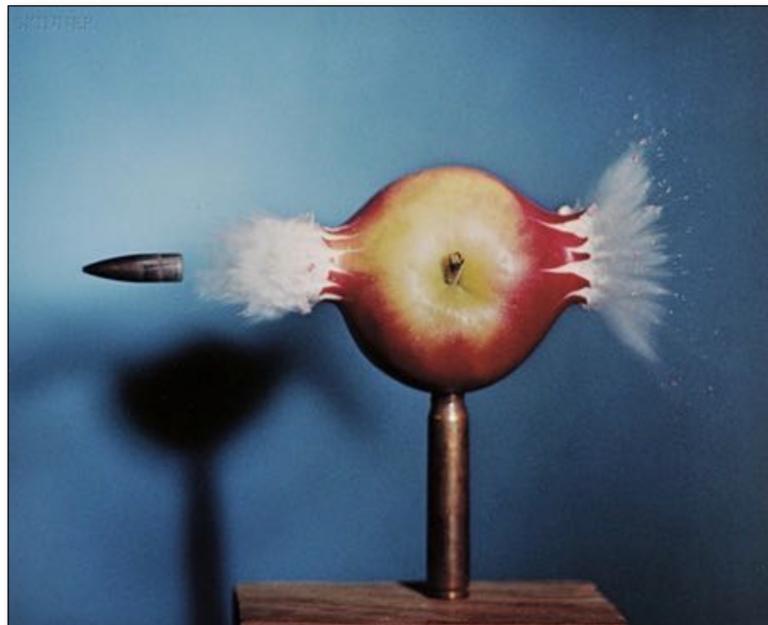
- 是否曝光度一样，拍摄的效果就一样？
- 摄影师必须权衡景深 (depth of field) 和运动模糊

快速和慢速摄影 Fast and Slow Photography

高速摄影

- 正常的曝光度 = 极快的快门速度 × 大光圈和/或高感光度
- 每秒要拍更多的照片

Normal exposure =
extremely fast shutter speed ×
(large aperture and/or high ISO)

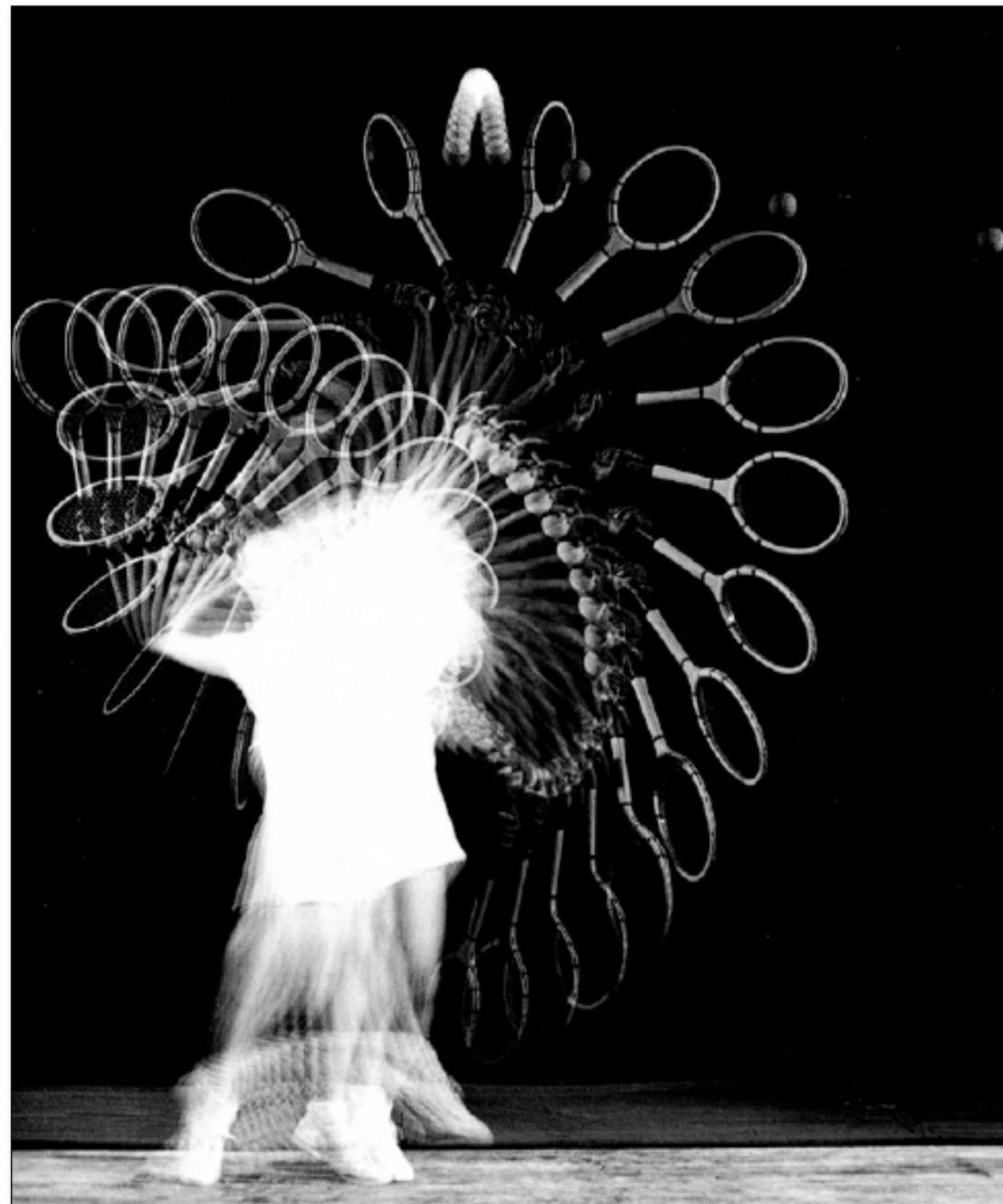


Harold Edgerton



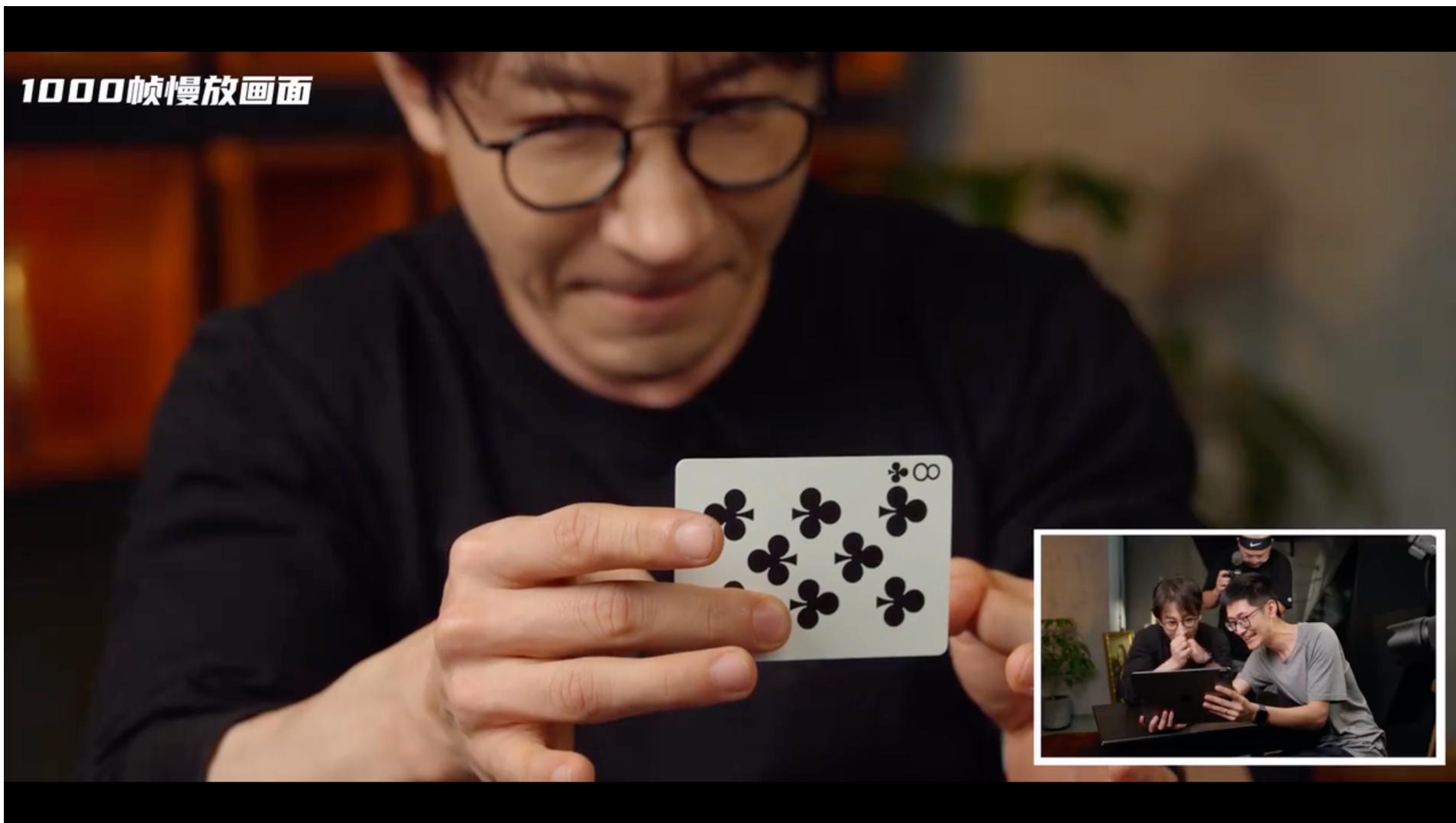
Mark Watson

高速摄影



Harold Edgerton

高速摄像 vs. 魔术



<https://www.bilibili.com/video/BV1Uh411p7r3/>

高速摄像 vs. 艺术

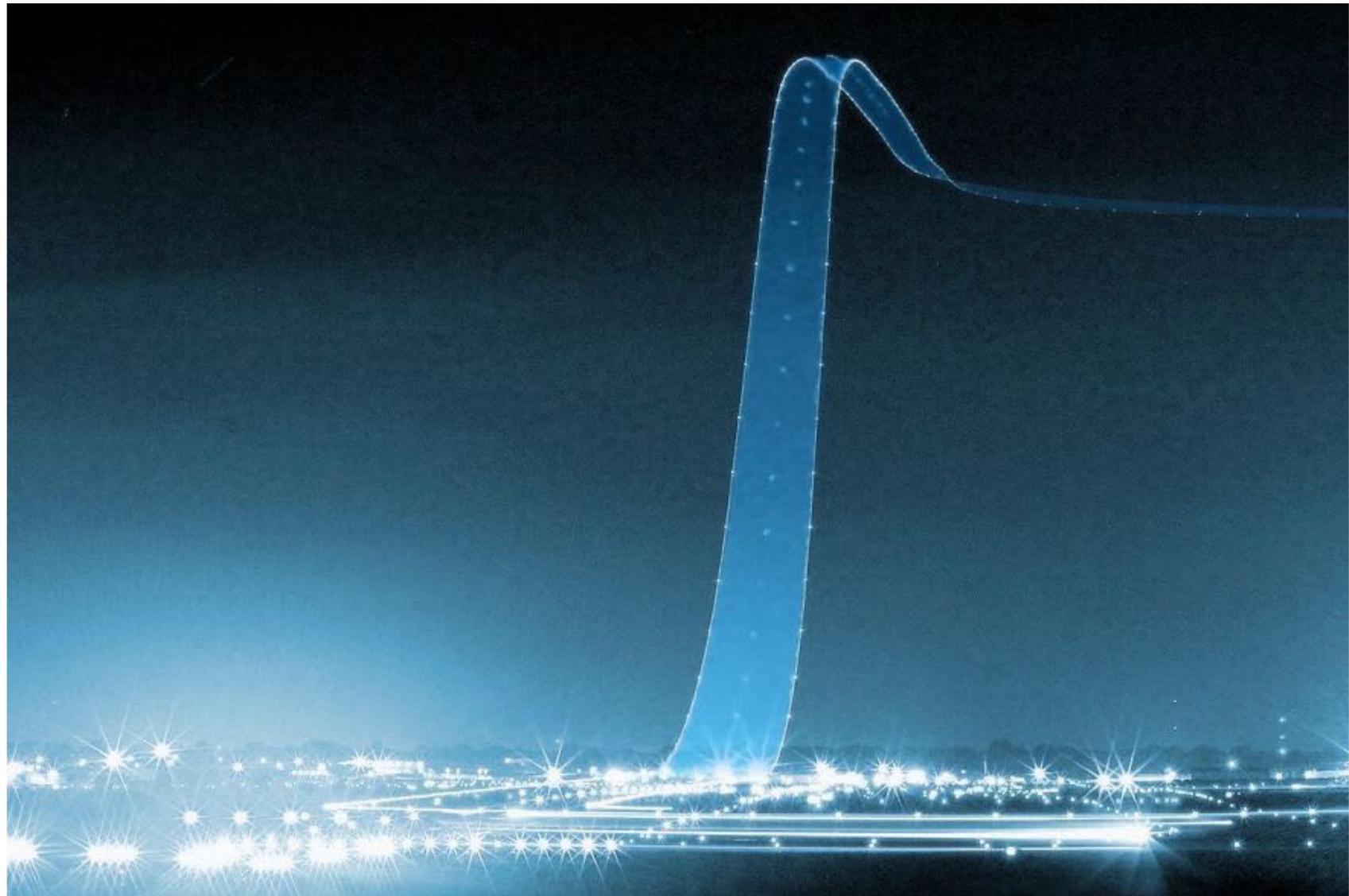


工科男孙老师 bilibili

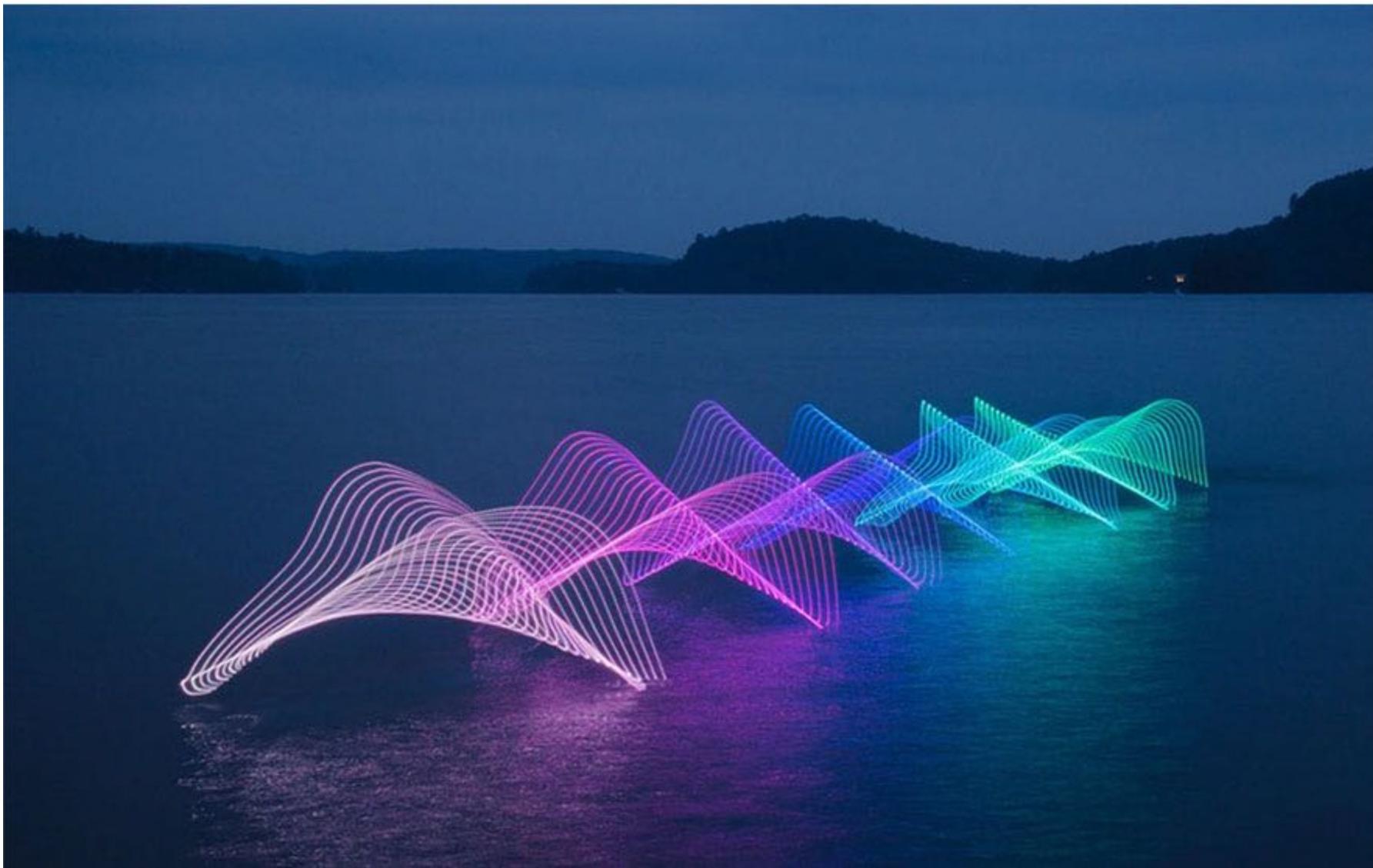
《染色体一号》

<https://www.bilibili.com/video/BV1Uc411B72i/>

超长曝光 – 延迟摄影



超长曝光 – 延迟摄影



超长曝光 – 延迟摄影



薄透镜近似

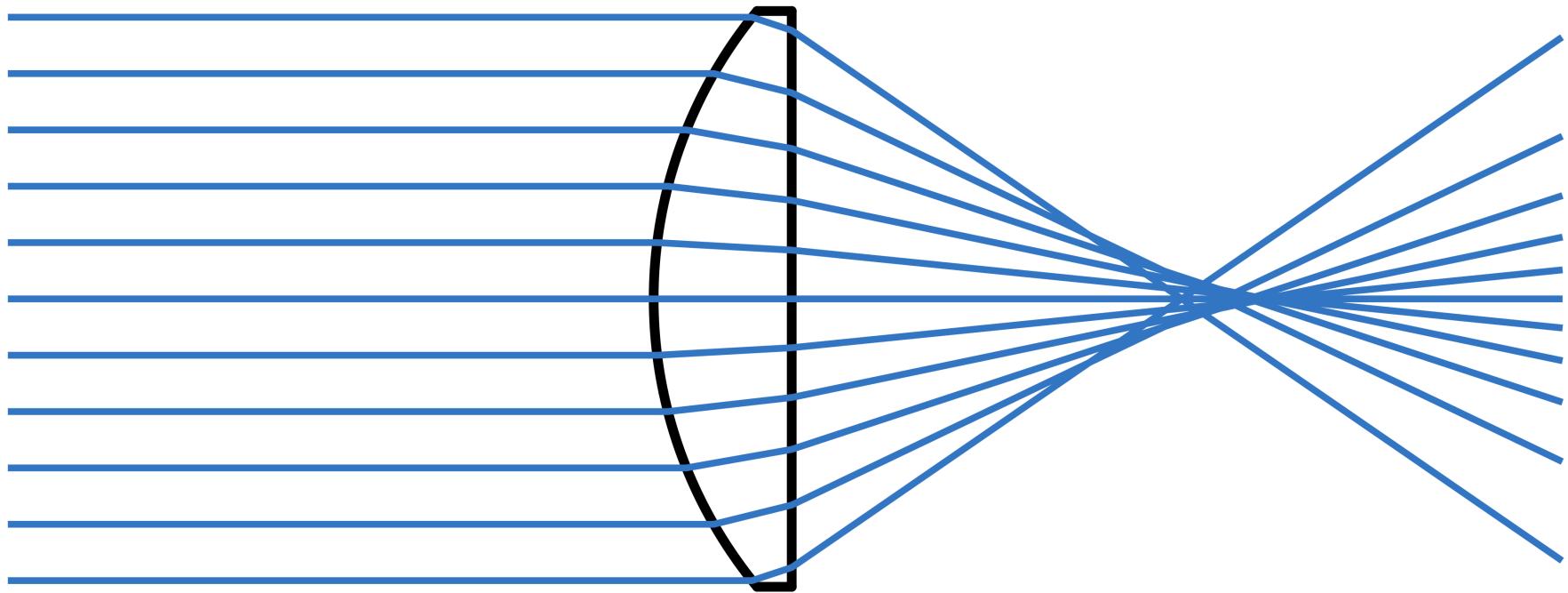
Thin Lens Approximation

真实的镜头设计非常复杂



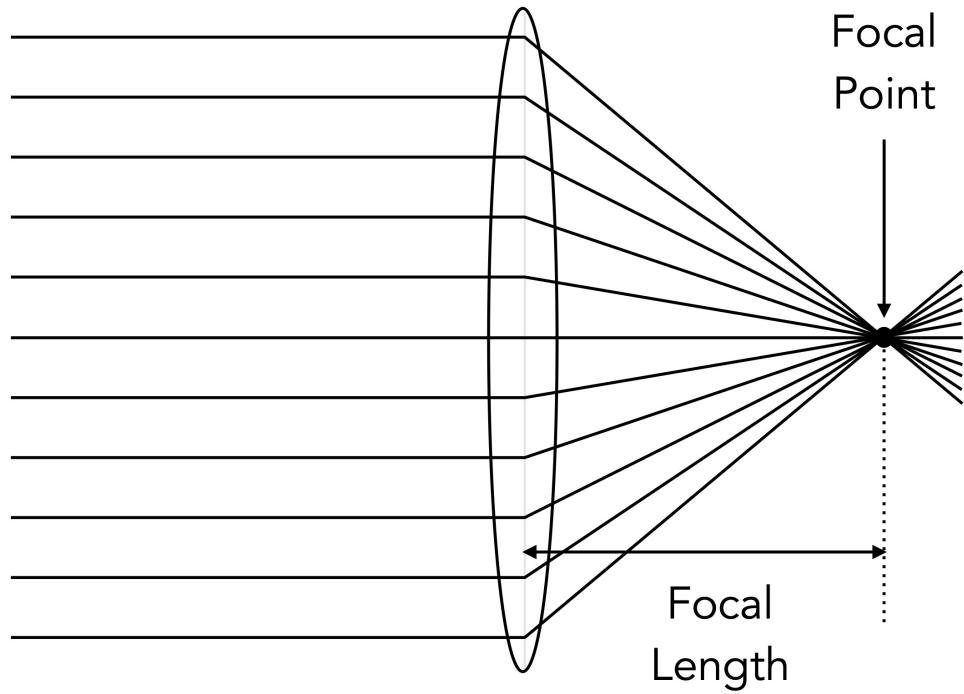
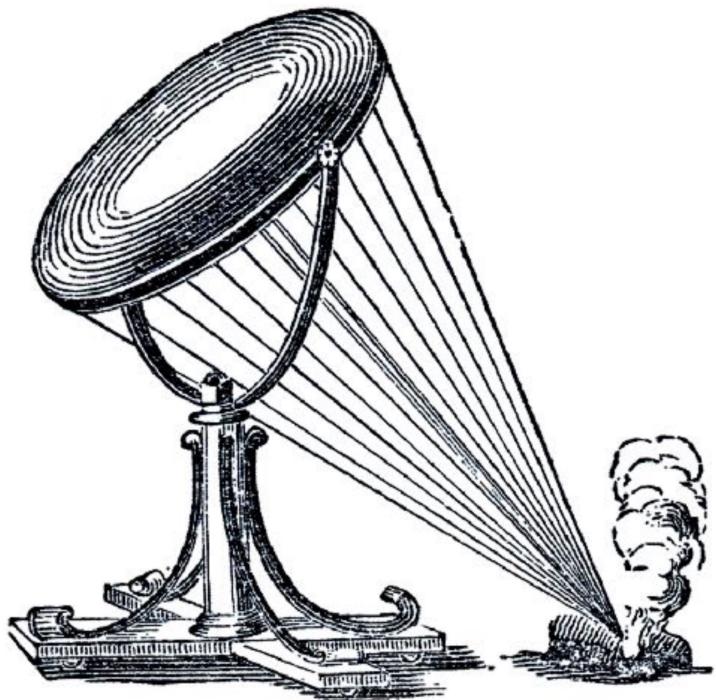
[Apple]

真实透镜元件是不完美的 – 像差



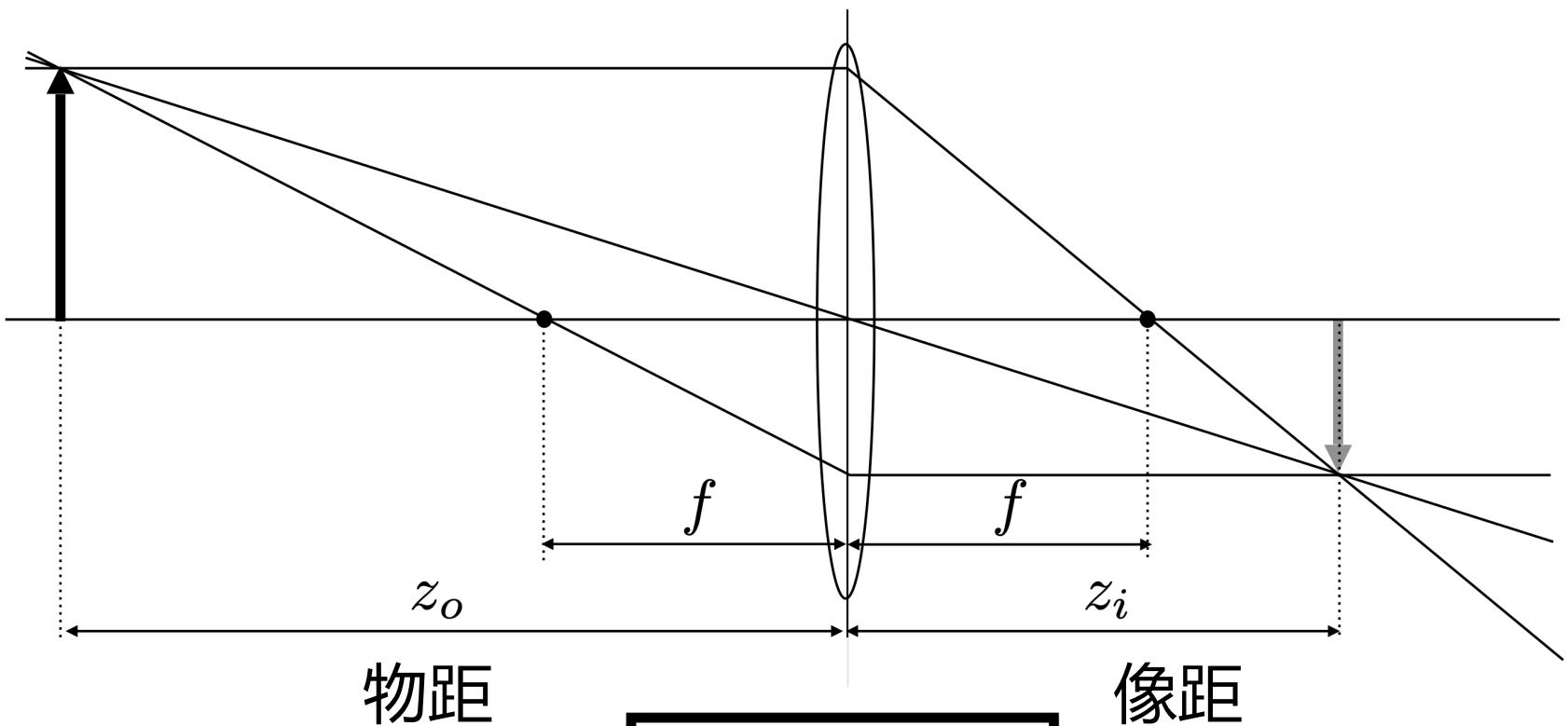
- 口 真实的平凸透镜 (球面形状)
- 口 透镜不会将光线会聚到某一点

理想的薄透镜 – 焦点



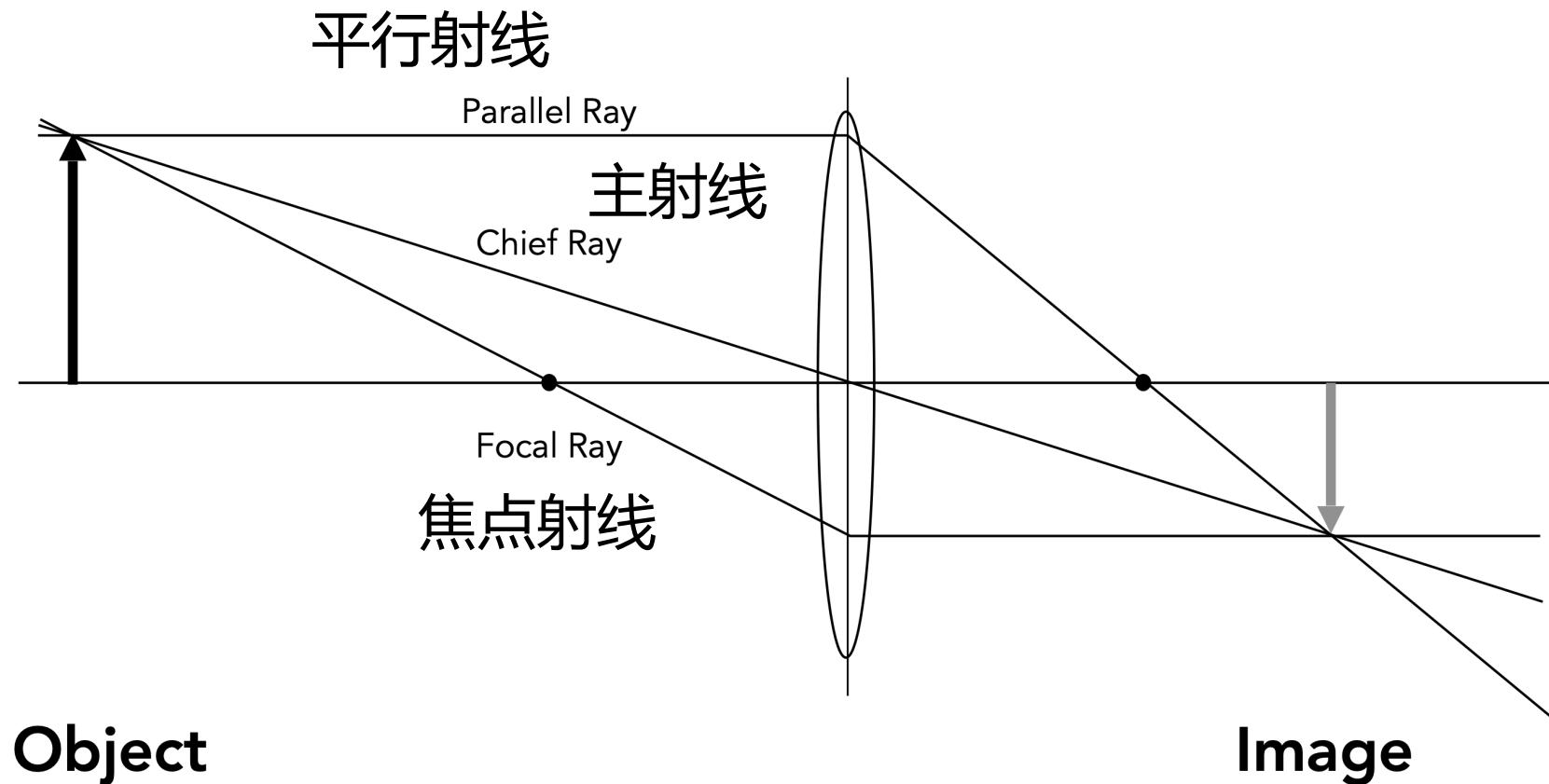
- 1) 所有进入透镜的平行光线都会穿过透镜的焦点
- 2) 所有通过焦点的光线在通过透镜后都是平行的
- 3) 焦距可以任意更改 (通过多个透镜组合实现)

薄透镜方程

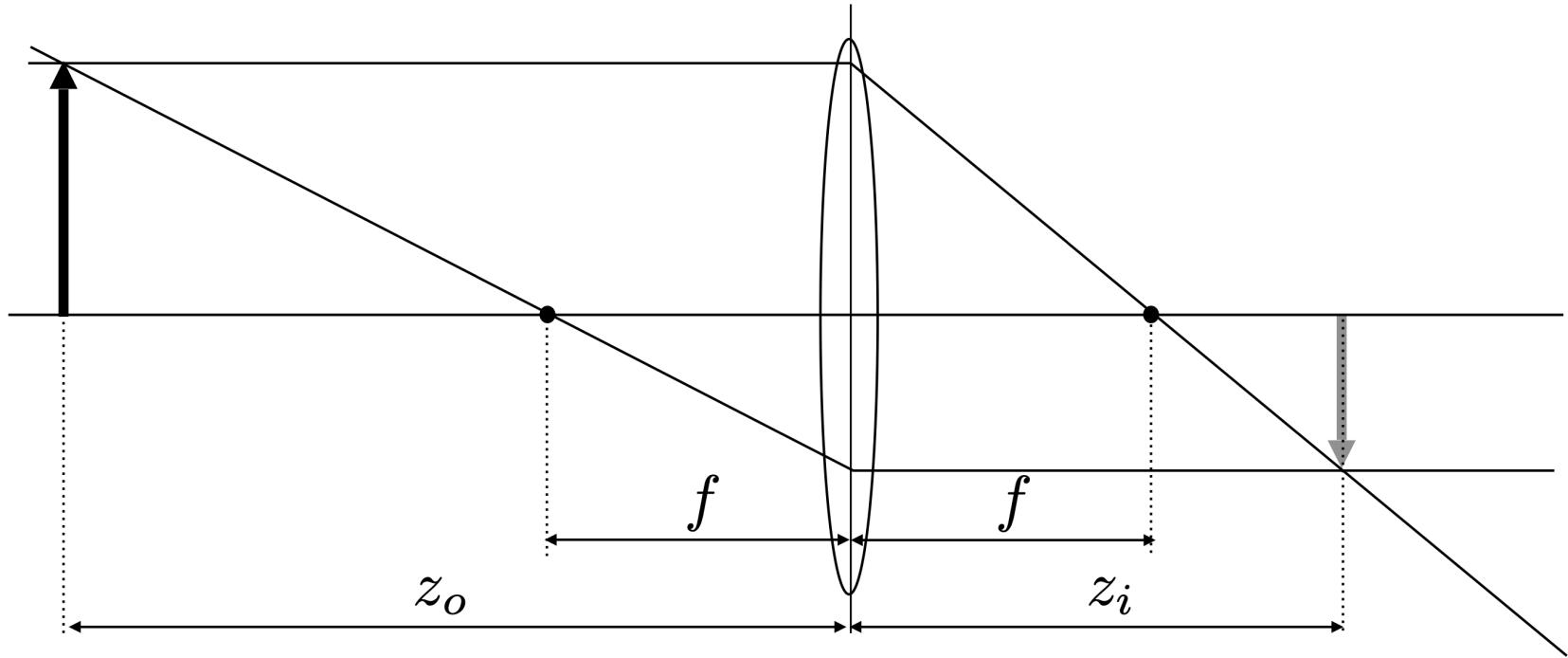


$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_i} + \frac{1}{z_o}$$

高斯射线图 Gauss' Ray Diagrams

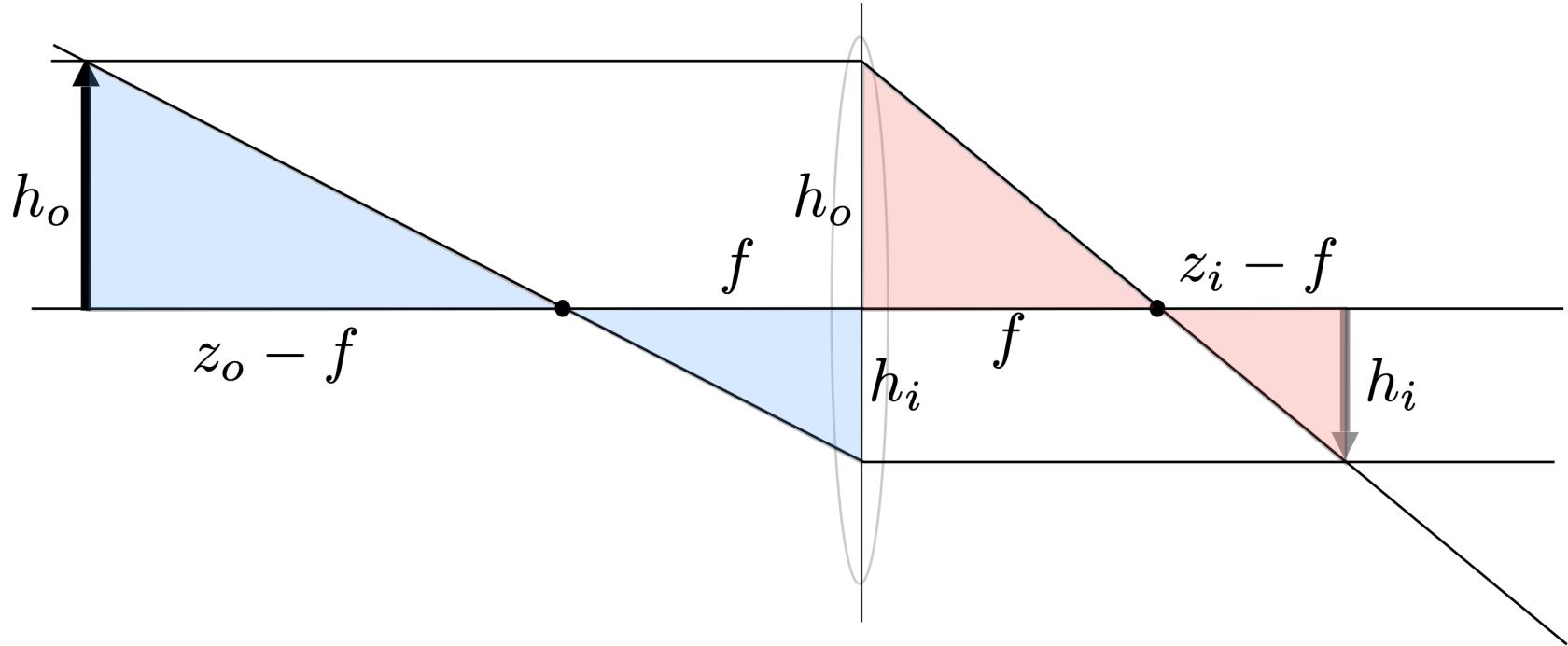


高斯光线追踪



What is the relationship between conjugate depths z_o, z_i ?

高斯光线追踪



$$\frac{h_o}{z_o - f} = \frac{h_i}{f}$$

$$\frac{h_o}{f} = \frac{h_i}{z_i - f}$$

高斯光线追踪

$$\frac{h_o}{z_o - f} = \frac{h_i}{f}$$

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{z_o - f}{f}$$

$$\frac{h_o}{f} = \frac{h_i}{z_i - f}$$

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{f}{z_i - f}$$

$$\frac{z_o - f}{f} = \frac{f}{z_i - f}$$

$$f^2 = (z_o - f)(z_i - f)$$

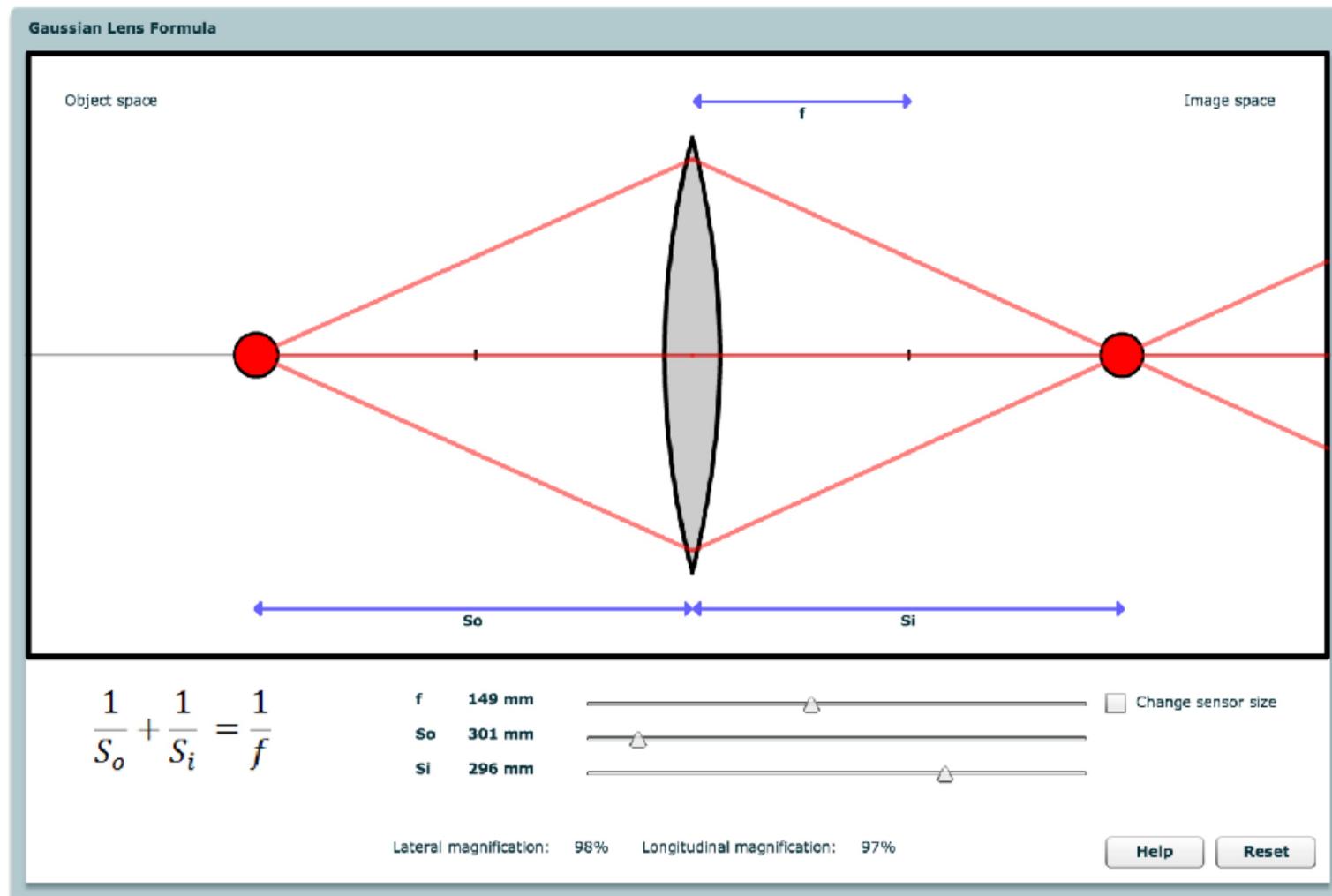
$$f^2 = f^2 - (z_o + z_i)f + z_o z_i$$

$$(z_o + z_i)f = z_o z_i$$

$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{z_i} + \frac{1}{z_o}$$

高斯薄透镜公式

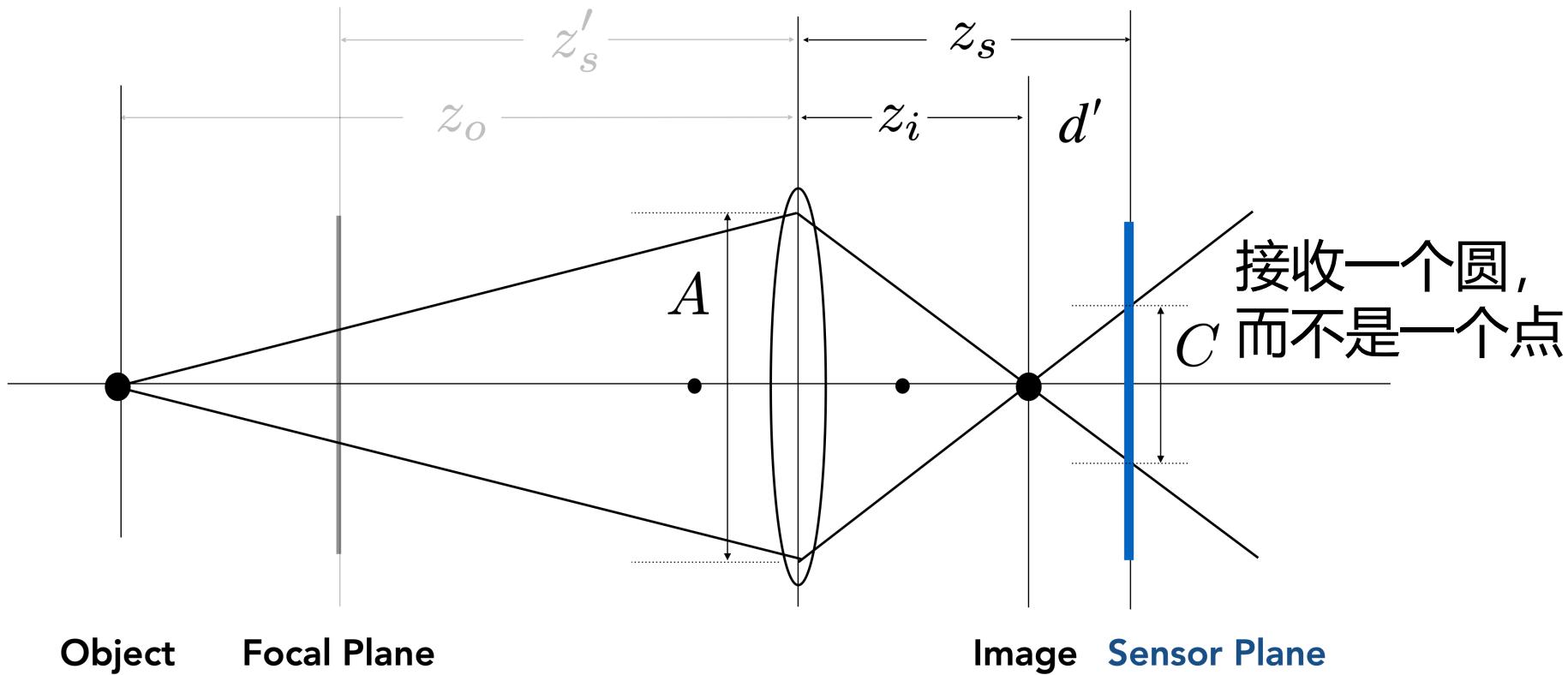
薄透镜展示



<https://graphics.stanford.edu/courses/cs178-10/applets/gaussian.html>

离焦模糊
Defocus Blur

计算模糊圈 (Circle of Confusion, CoC) 大小



口模糊圈与光圈大小成正比

$$\frac{C}{A} = \frac{d'}{z_i} = \frac{|z_s - z_i|}{z_i}$$

模糊圈 vs. 光圈大小

口照片的模糊程度与光圈大小有关

f/1.4



f/22



回看 F数 (a.k.a F-stop)

□ F数 定义为焦距除以光圈大小，常用 f/数字 来表示

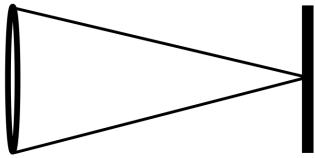
□ 光圈直径 A 可通过焦距 f 除以相对光圈 N (即 f数) 得到

$$A = \frac{f}{N}$$

□ 镜头上常见的 F 数：

1.4、2、2.8、4.0、5.6、8、11、16、22、32

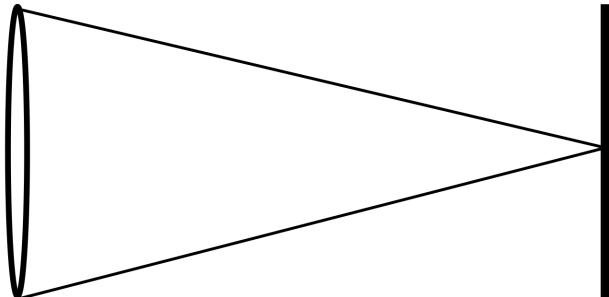
例子：计算 F数



$$A = 50\text{mm}$$

$$f = 100\text{mm}$$

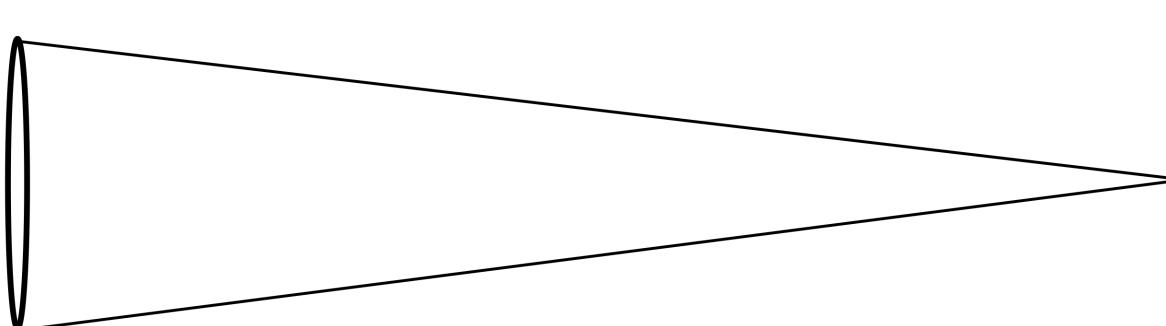
$$N = f/A = 2$$



$$A = 100\text{mm}$$

$$f = 200\text{mm}$$

$$N = f/A = 2$$



$$A = 100\text{mm}$$

$$f = 400\text{mm}$$

$$N = f/A = 4$$

CoC 的大小与 F-Stop 成反比



R. Berdan, canadiannaturephotographer.com

$$C = A \frac{|z_s - z_i|}{z_i} = \frac{f}{N} \frac{|z_s - z_i|}{z_i}$$

理想薄透镜光线追踪

Ray tracing with ideal thin lenses

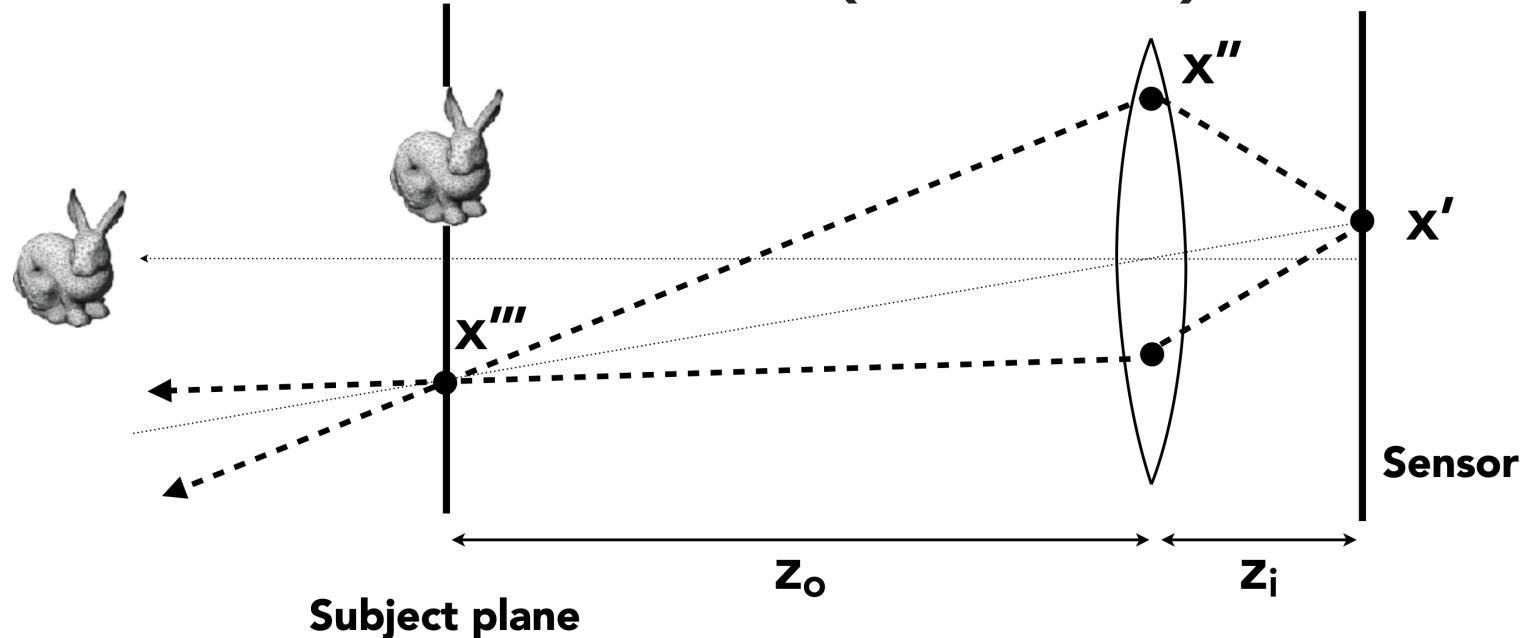
使用镜头聚焦的渲染示例

口薄透镜下的光线追踪 (渲染出用薄透镜拍照的效果)



Pharr and Humphreys

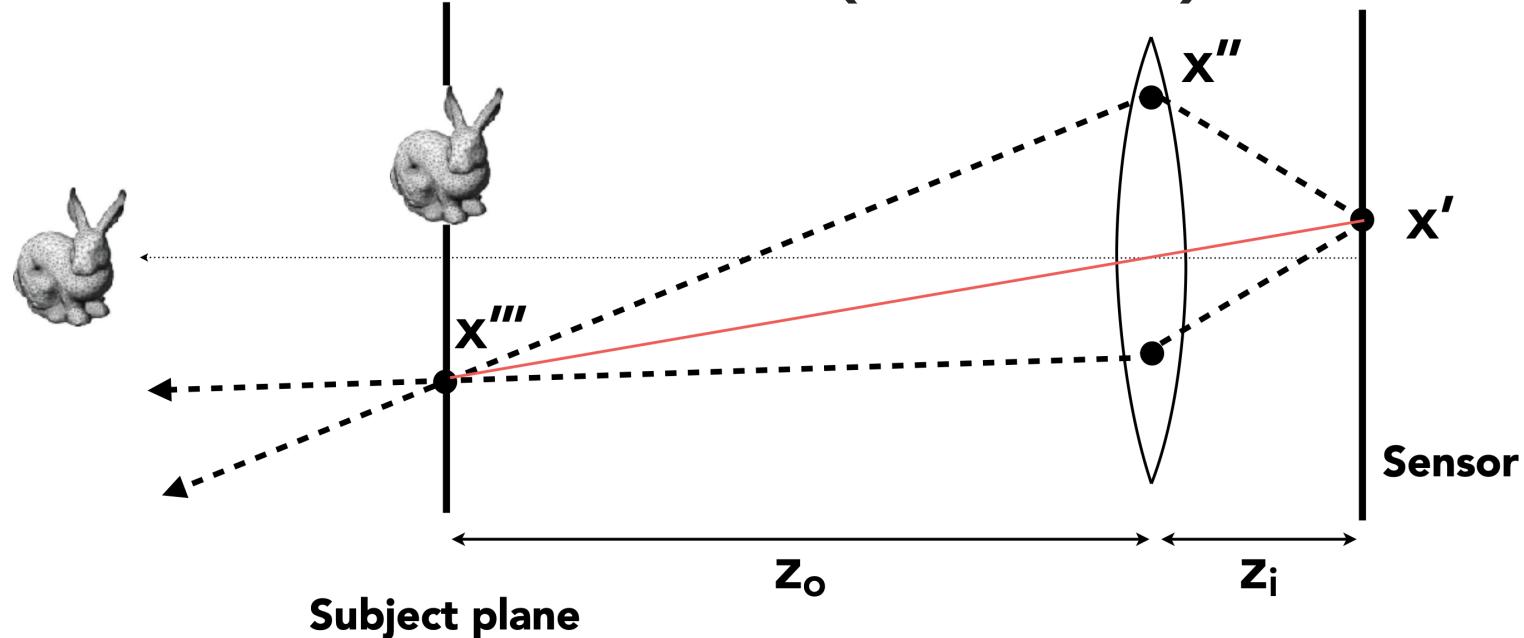
离焦模糊的光线跟踪 (薄透镜)



□一种可能的设置 (Setup)

- 选择传感器尺寸、镜头焦距和光圈尺寸
- 选择着重拍摄的物体的深度 z_o (物距)
- 根据薄透镜公式计算传感器的相应深度 z_i (像距)

离焦模糊的光线跟踪 (薄透镜)



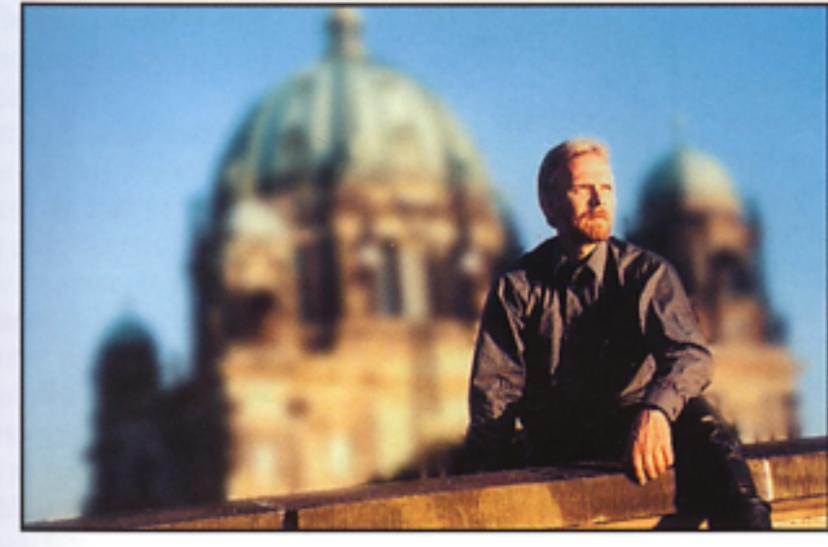
口渲染 (Rendering)

- 对于感光元件上的每个像素点 x'
- 随机采样透镜平面上的点 x''
- 计算穿过透镜的光线与物体平面相交的点 x''' , 基于:
 - 1) 薄透镜公式; 2) 从 x' 到透镜中心的虚拟光线
- 估计射线 $x'' \rightarrow x'''$ 的辐亮度 (Radiance)

景深
Depth of Field

景深

Large aperture opening



Small aperture opening

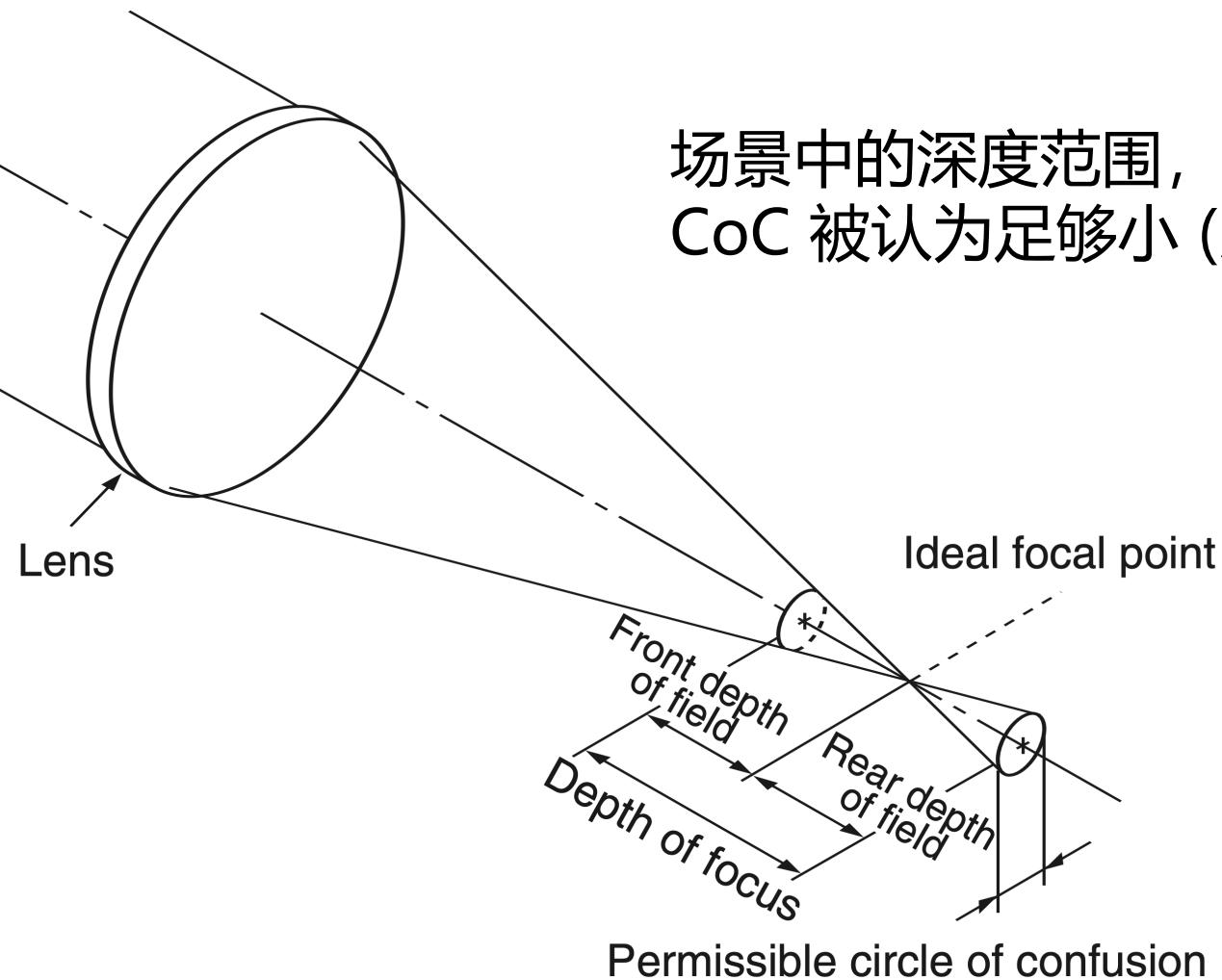


From London and Upton

□ 设置最大允许的模糊圈

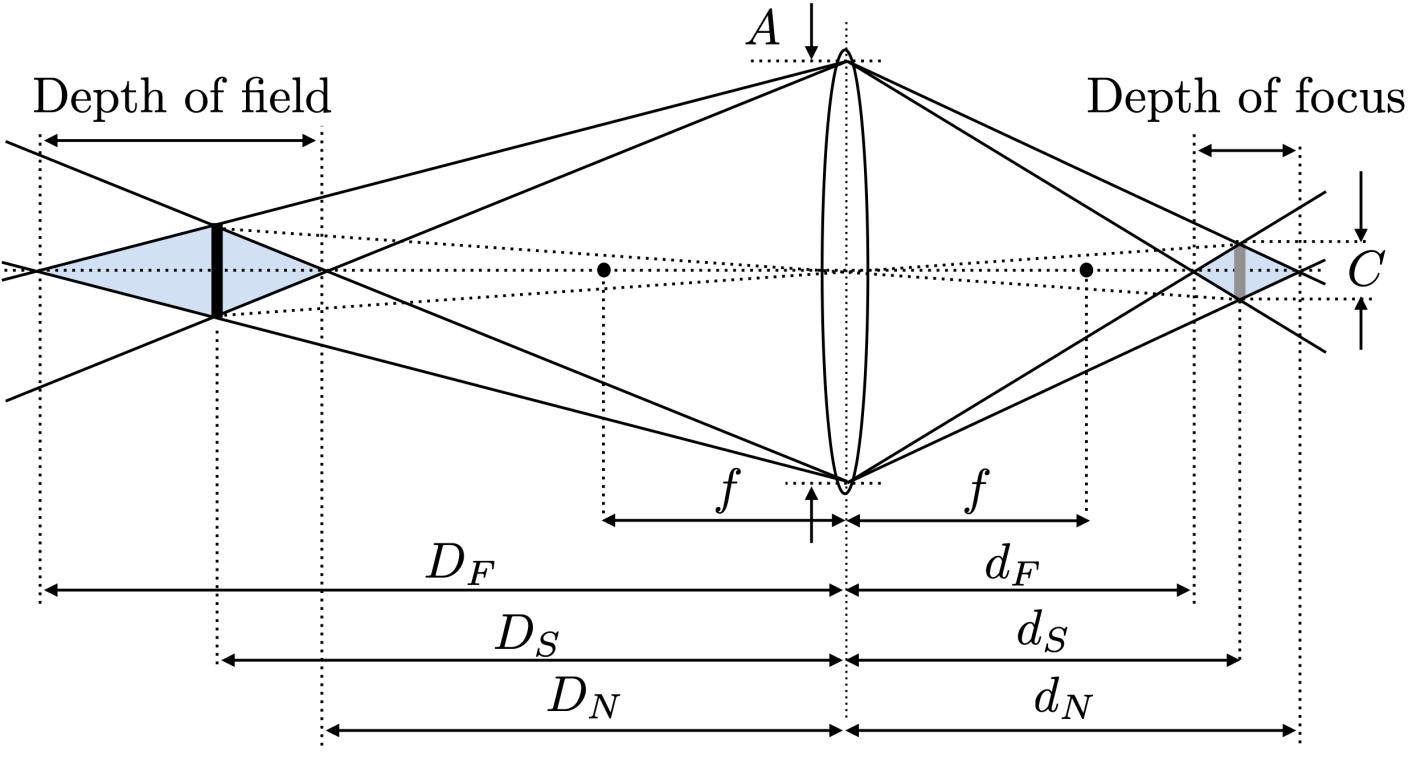
□ 最终成像小于模糊圈的部分会显得清晰

景深的模糊圈



[Canon, EF Lens Work III]

景深



$$\text{DOF} = D_F - D_N$$

$$D_F = \frac{D_S f^2}{f^2 - NC(D_S - f)} \quad D_N = \frac{D_S f^2}{f^2 + NC(D_S - f)}$$

$$\frac{d_N - d_S}{d_N} = \frac{C}{A}$$

$$\frac{d_S - d_F}{d_F} = \frac{C}{A}$$

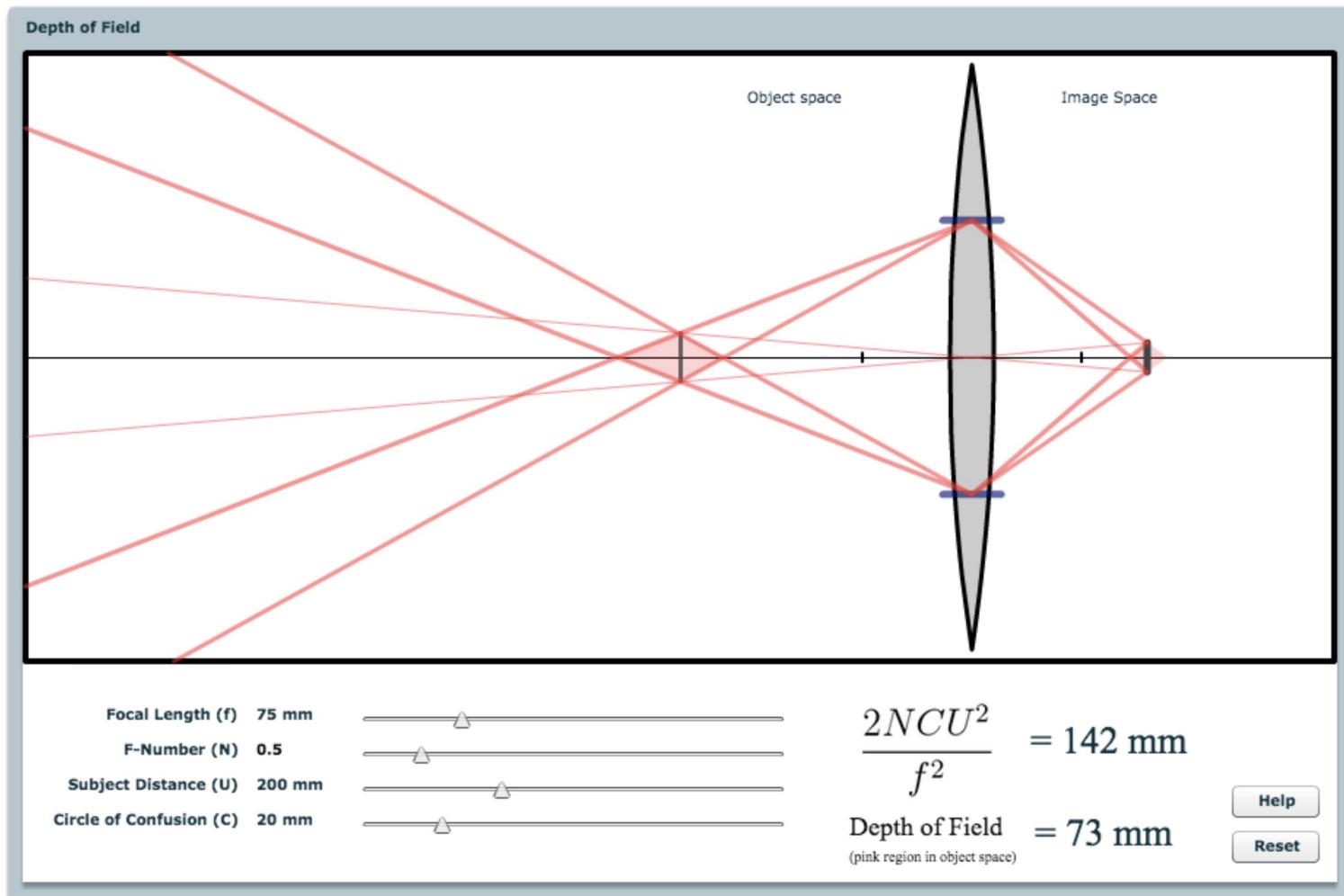
$$N = \frac{f}{A}$$

$$\frac{1}{D_F} + \frac{1}{d_F} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{D_S} + \frac{1}{d_S} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{D_N} + \frac{1}{d_N} = \frac{1}{f}$$

景深展示



<https://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/dof.html>



中山大學 软件工程学院
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF SOFTWARE ENGINEERING

谢谢

陈壮彬
软件工程学院
chenzhb36@mail.sysu.edu.cn