



# Lecture 18: 材质和外观

SSE315: 计算机图形学  
Computer Graphics

---

陈壮彬

软件工程学院

chenzhb36@mail.sysu.edu.cn

# Today's topics

- 图形学材质和外观介绍

- 常见材质的 BRDF

- BRDF 的性质与测量

# 自然界中的材质

当光线和材质表面发生相互作用就形成外观



# 日出

口云被染成红色



# 海浪

□ 光能部分穿透海浪

□ 海水的含盐度也能影响最终外观



# 光柱

口光的散射



# 头发

光线在成千上万的头发中如何弹射?



# 丝绸

为什么一眼看上去就知道是丝绸，而不是金属？



# 彩虹

□ 彩虹是如何产生的？



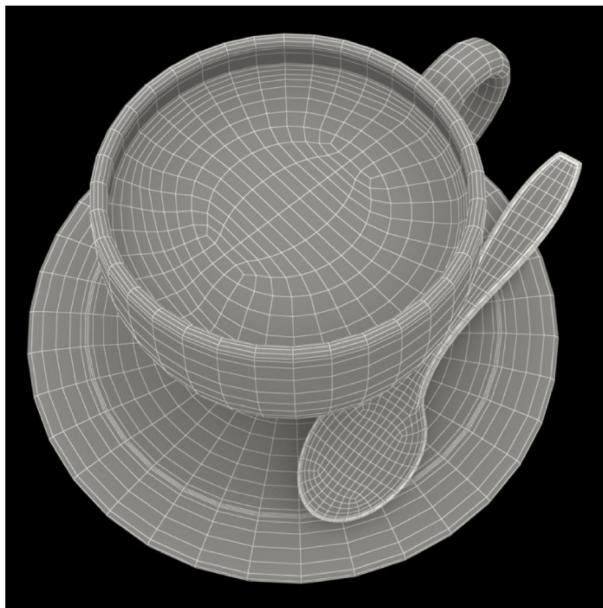
# 寿司

呈现出一定的透明度 (次表面散射)



# 计算机图形学中，材质是什么？

- 通过给模型指定不同的材质，可以得到不同的渲染结果
- 如何在渲染方程中指定材质？



3D coffee mug model



Rendered

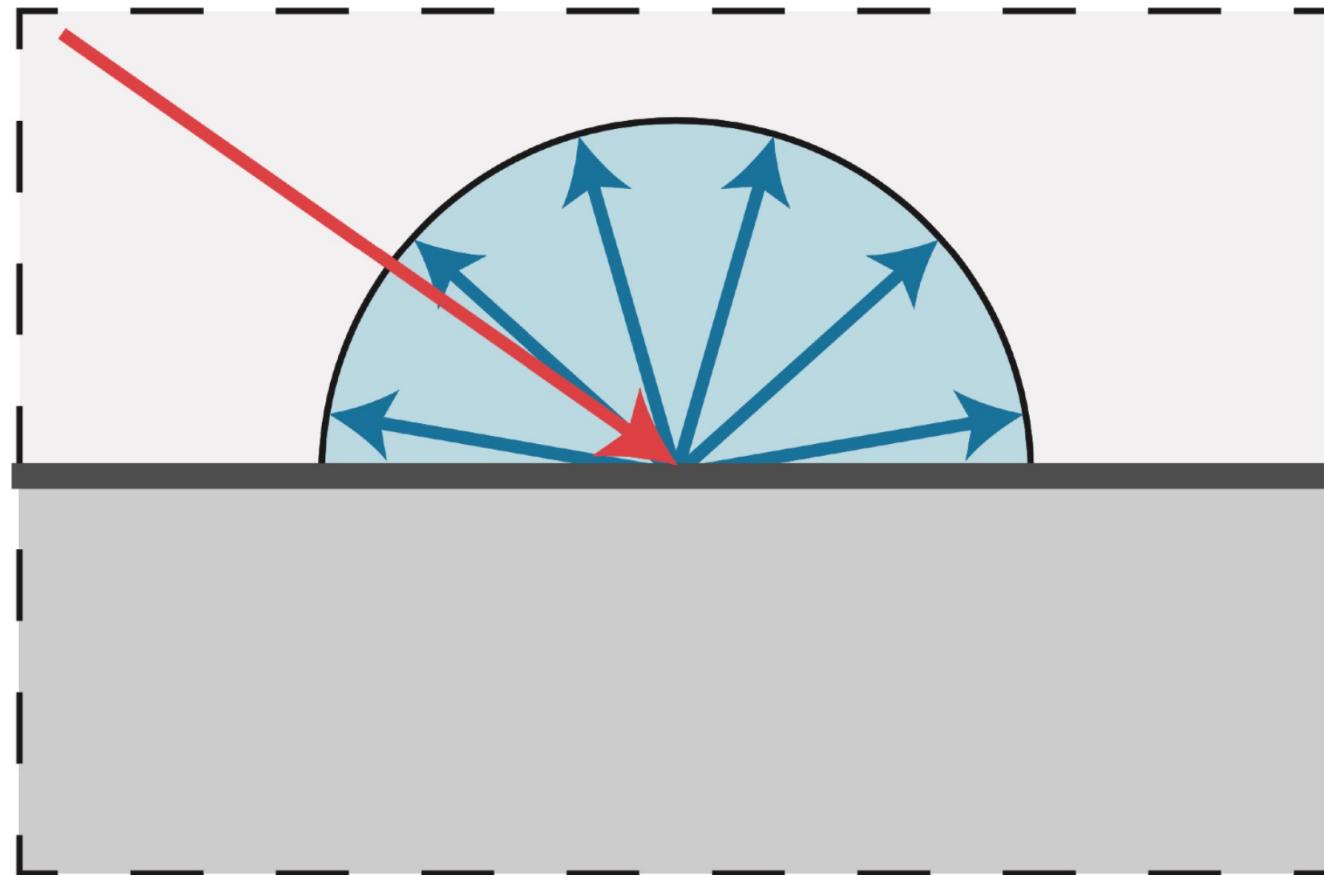


Rendered

**Material = BRDF**

# 这是什么材质？

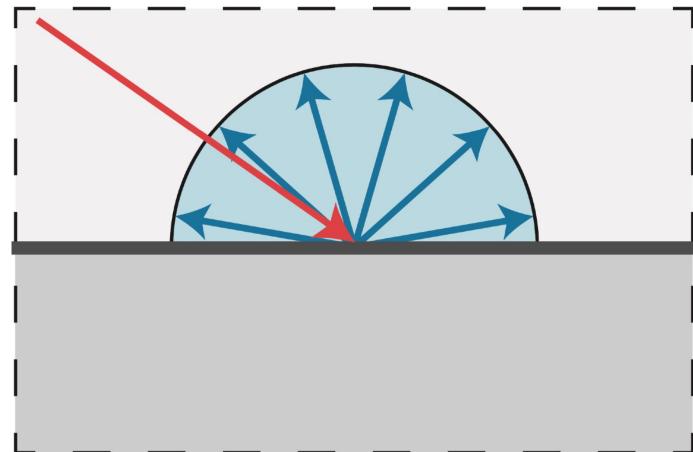
□漫反射材质



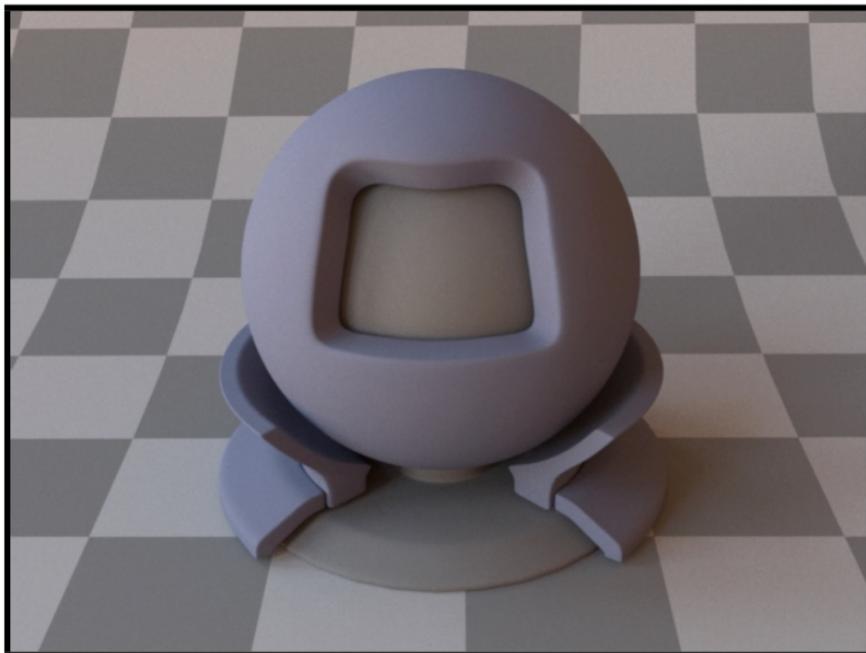
# 漫反射/朗伯材质

□不同材质吸收不同波长的光，  
形成不同颜色

□前面学的漫反射系数是什么？



[Mitsuba renderer, Wenzel Jakob, 2010]



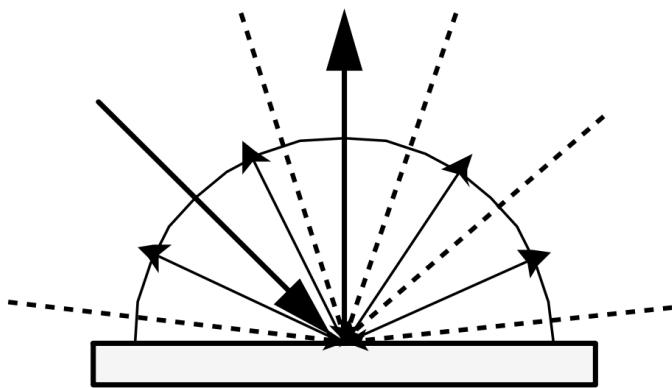
Uniform colored diffuse BRDF



Textured diffuse BRDF

# 漫反射/朗伯材质的 BRDF

口光在不同输出方向上的反射相等



$$f_r = c$$

假设入射光线是均匀的

$$L_r(\omega_r) = \int_{H^2} f_r L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

$$L_r(\omega_r) = f_r L_i \int_{H^2} (\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

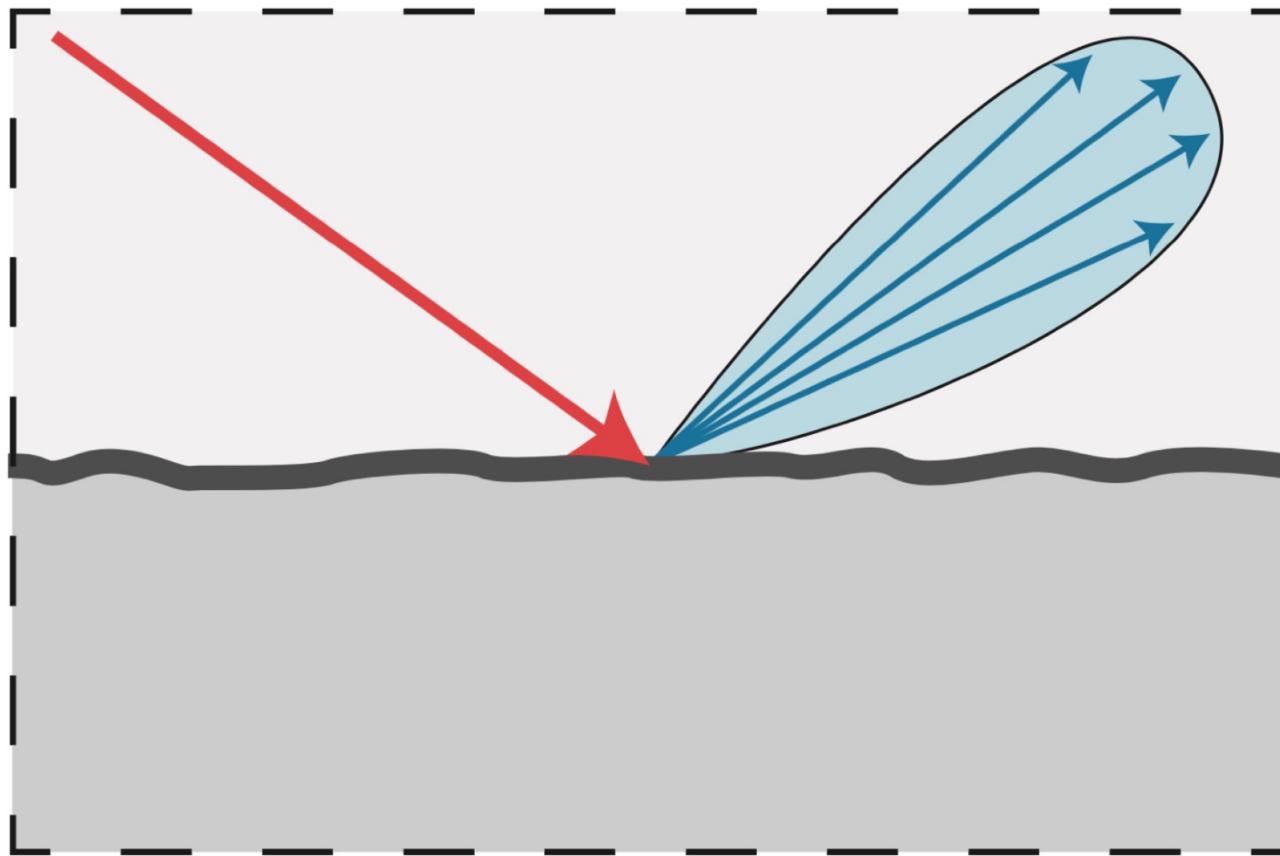
$$L_r = \pi f_r L_i$$

$$f_r = \frac{L_r}{\pi L_i} = \frac{1}{\pi} \quad L_r = L_i \text{ 表示材料不吸收任何光}$$

$$f_r = \frac{\rho}{\pi} \xrightarrow{\text{albedo}} \frac{L_r}{L_i} = \rho < 1 \text{ (单通道或三通道), 表示颜色}$$

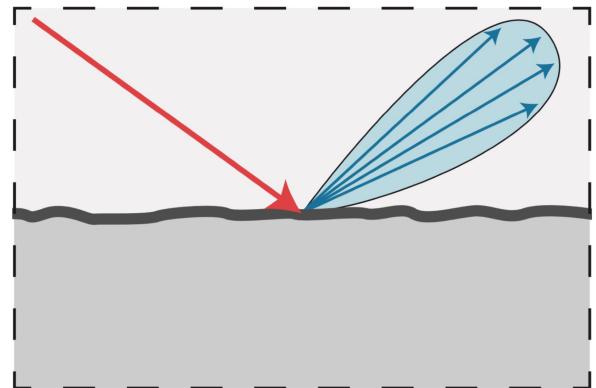
# 这是什么材质？

高光材质

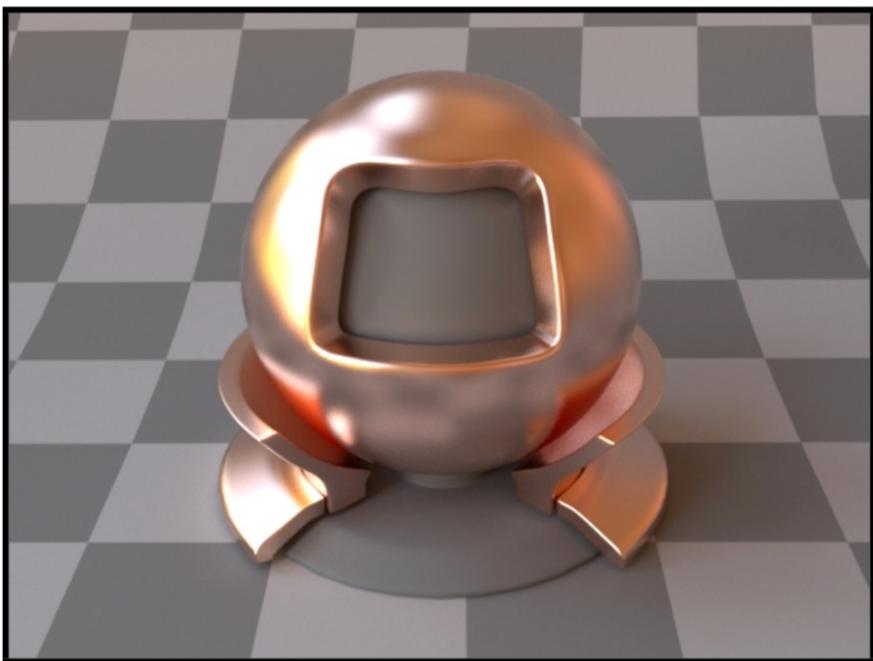


# 高光 (glossy) 材质

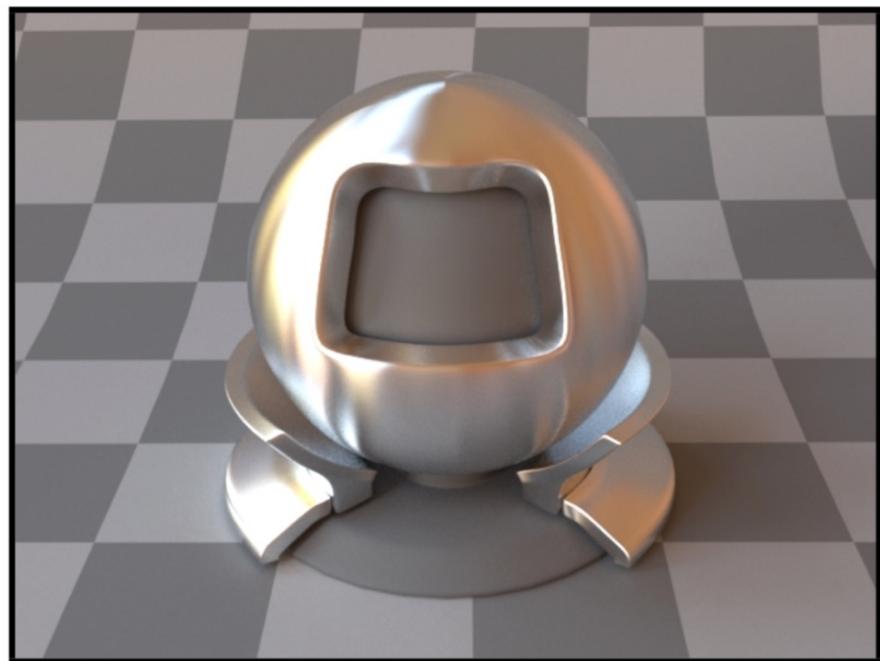
能看到高光区域



[Mitsuba renderer, Wenzel Jakob, 2010]



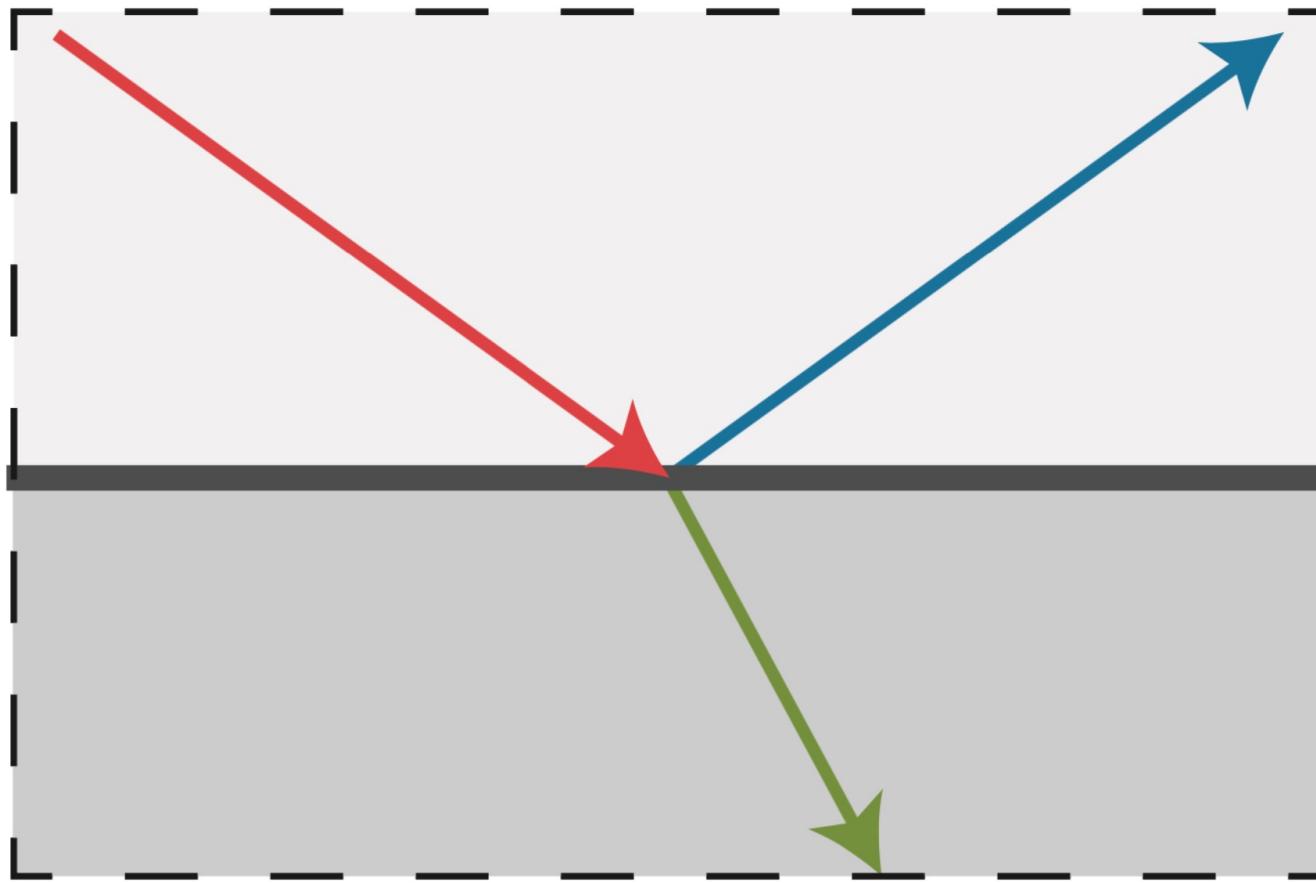
Copper



Aluminum

# 这是什么材质？

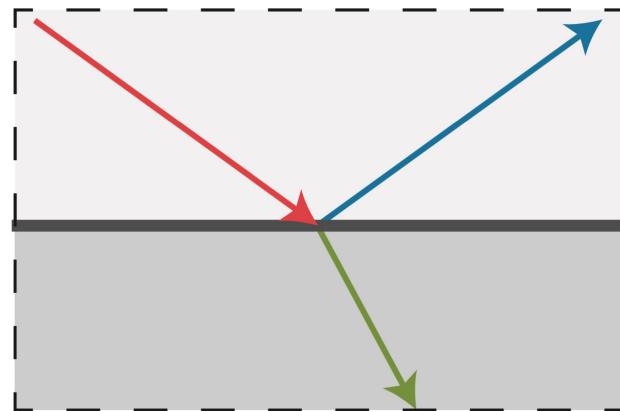
□透明材质



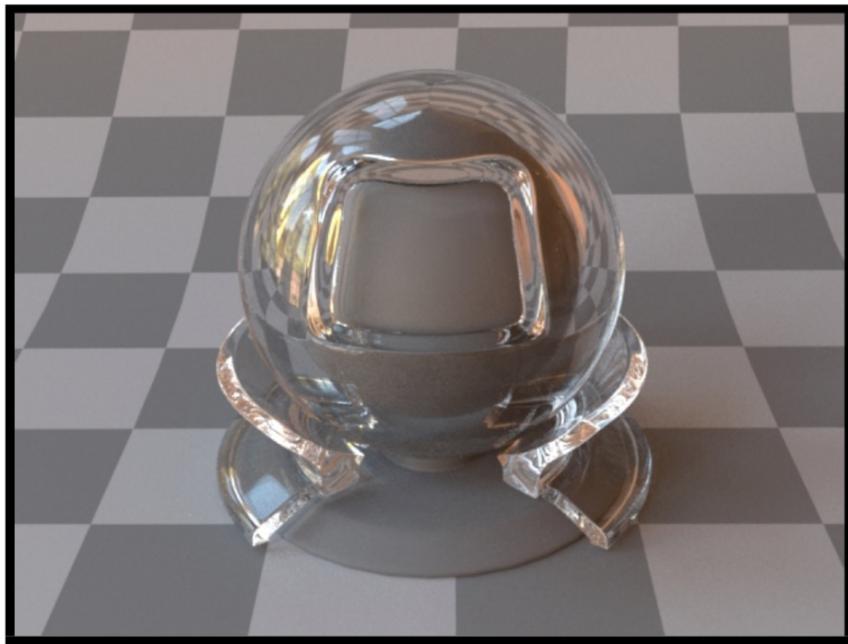
# 理想的反射/折射材质

□ 表面既有反光，又能看到内部

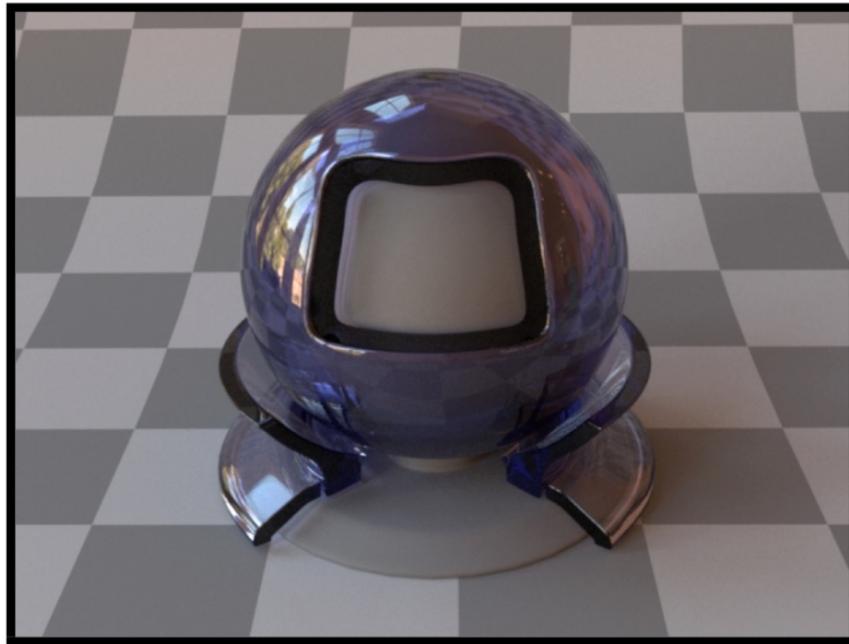
□ 内部光线被部分吸收，因此呈现颜色



[Mitsuba renderer, Wenzel Jakob, 2010]

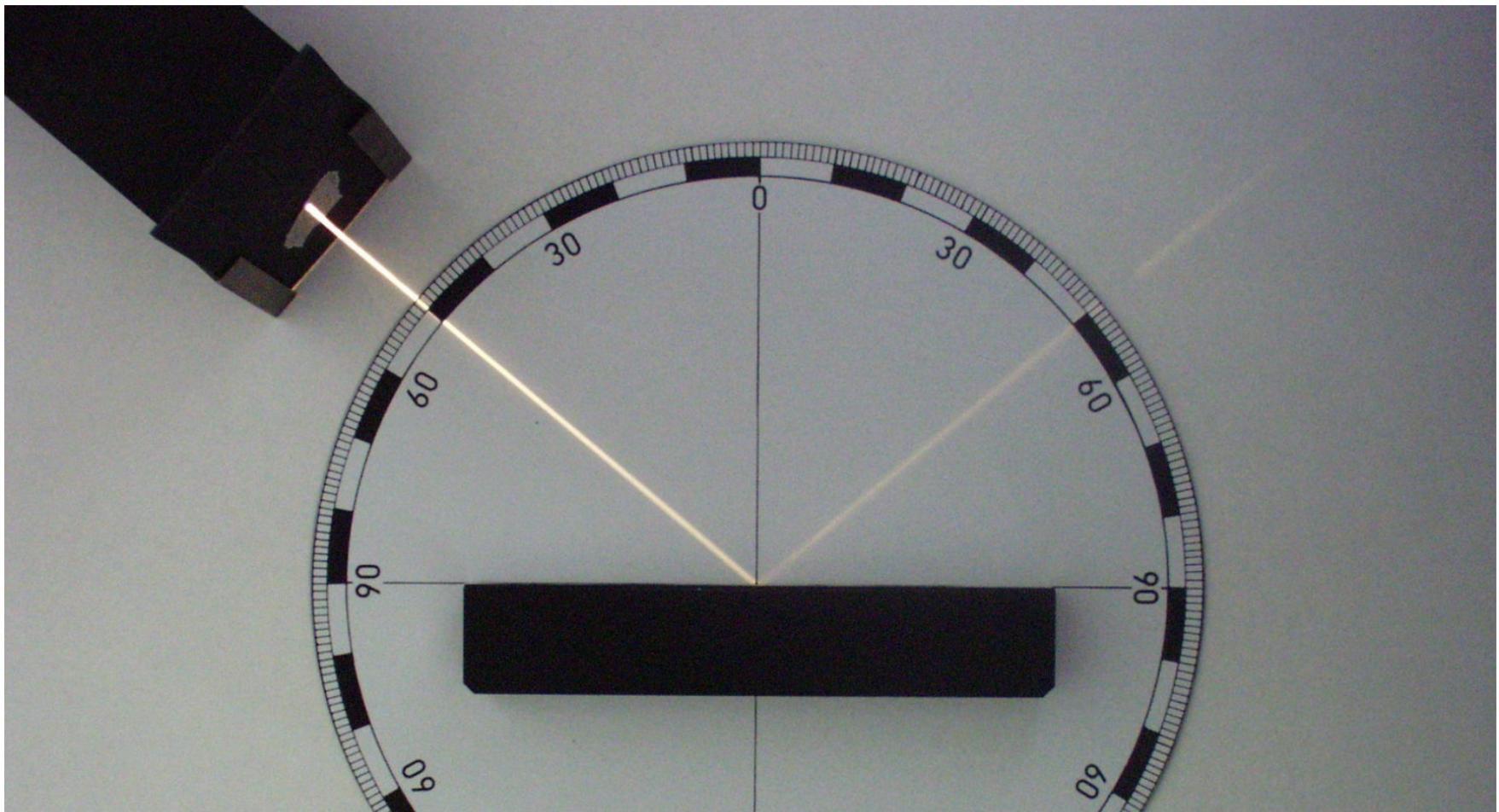


Air <-> water interface



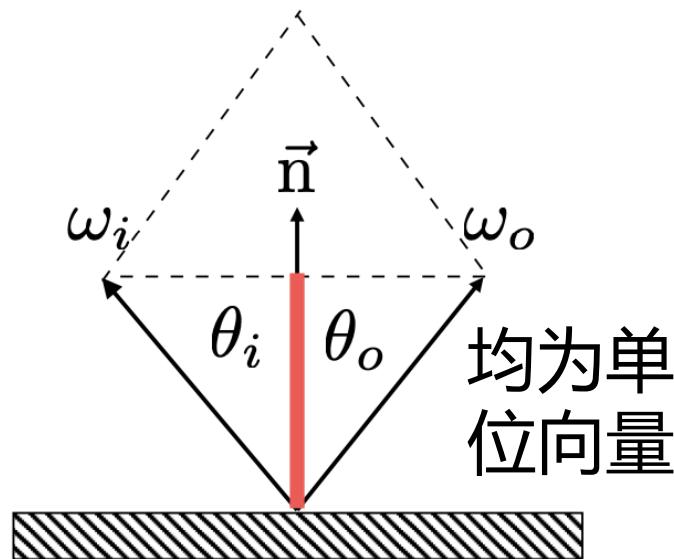
Air <-> glass interface  
(with absorption)

# 完美的镜面折射



[Zátónyi Sándor]

# 完美的镜面折射 – 反射公式



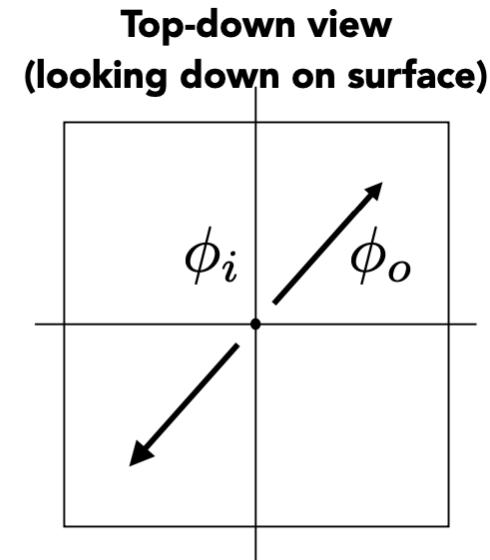
$$\theta = \theta_o = \theta_i$$

$$\omega_o + \omega_i = 2 \cos \theta \vec{n} = 2(\omega_i \cdot \vec{n})\vec{n}$$

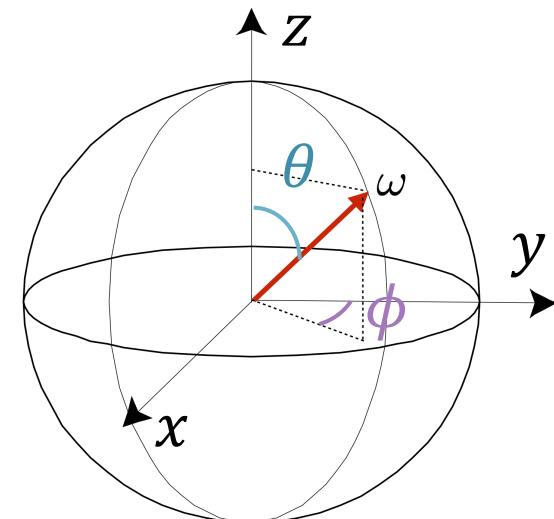
给定入射光和法线，求出射光

$$\omega_o = -\omega_i + 2(\omega_i \cdot \vec{n})\vec{n}$$

方位角



$$\phi_o = (\phi_i + \pi) \bmod 2\pi$$



# 高光着色

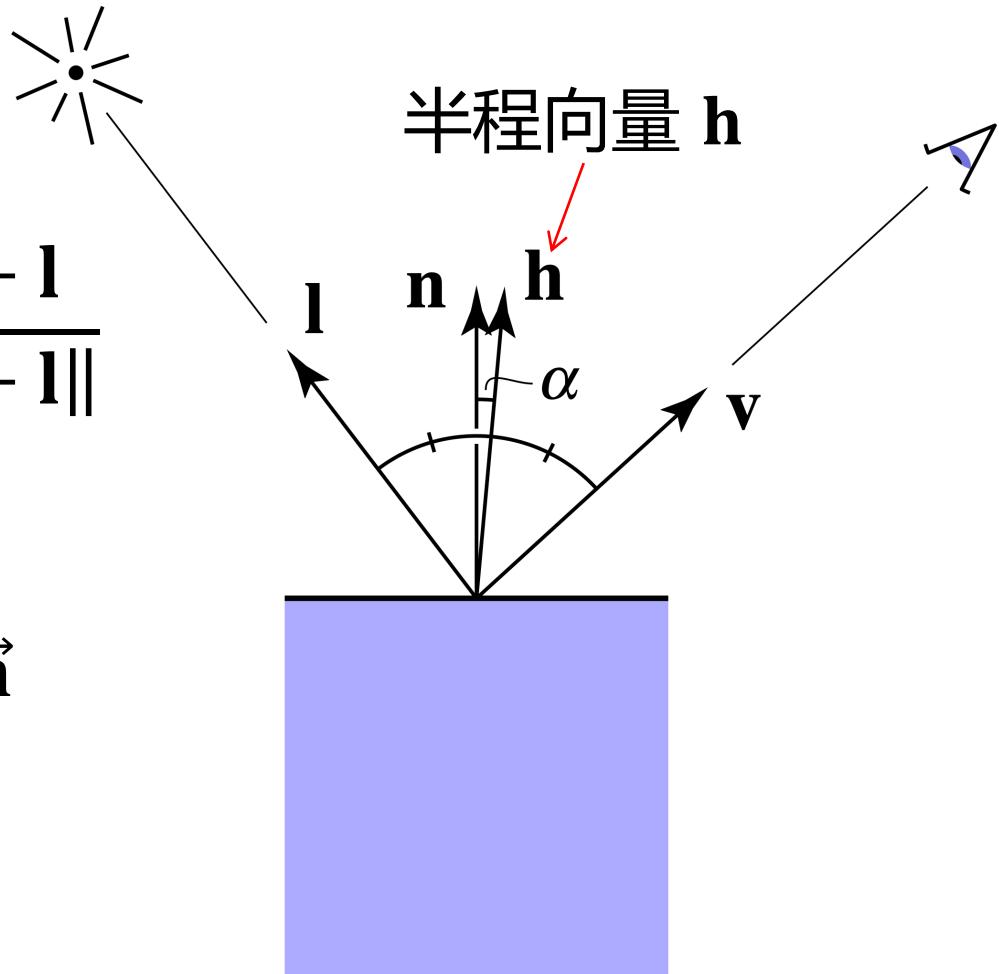
□ Blinn-Phong 模型对高光的处理

- 观察角度与镜面反射角度接近  $\Leftrightarrow$  半程向量与法向量接近

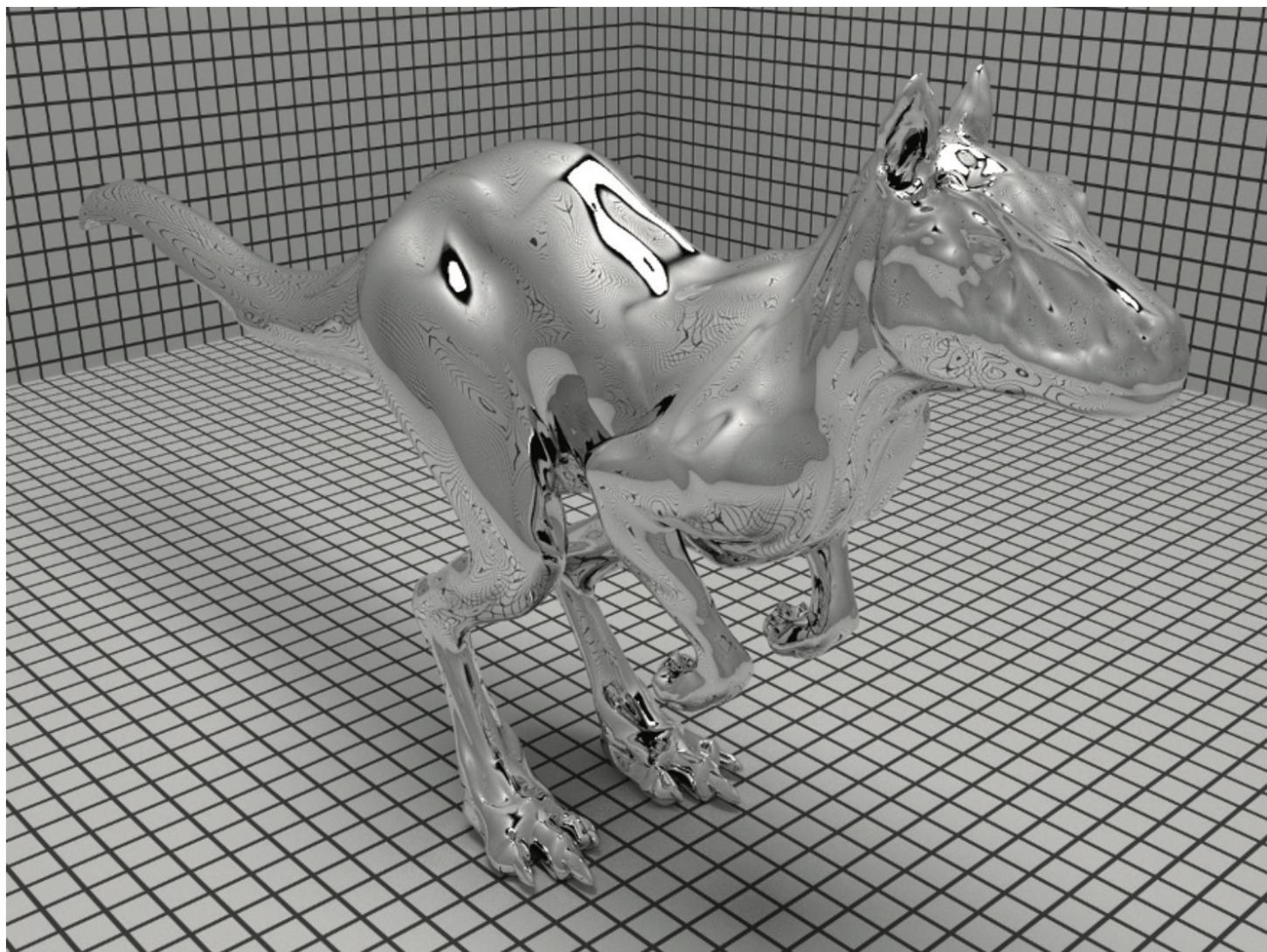
$$\mathbf{h} = bisector(\mathbf{v}, \mathbf{l}) = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{l}}{\|\mathbf{v} + \mathbf{l}\|}$$

vs.

$$\omega_o = -\omega_i + 2(\omega_i \cdot \vec{n})\vec{n}$$



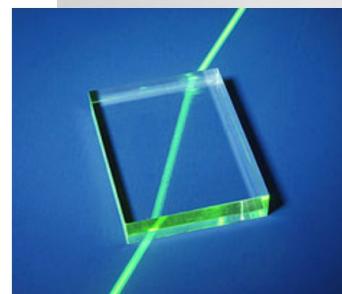
# 完美的镜面折射 BRDF



# 折射 Specular refraction

口光除了从表面反射出去外，还可以透过表面  
口光进入一种新的介质时会发生折射

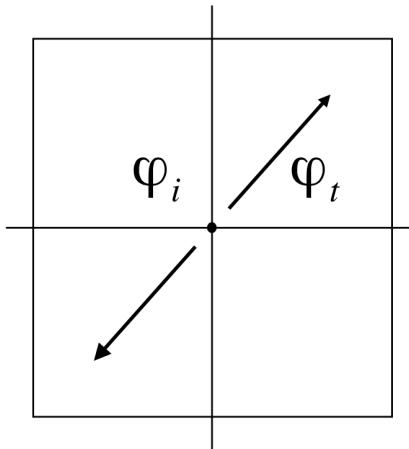
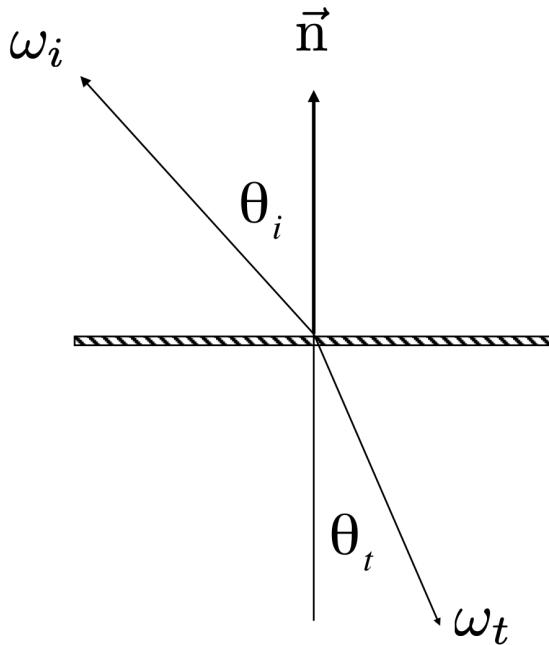
不同频率的光因为有不同  
折射率，因此呈现出彩虹



# 斯内尔定律/折射定律 Snell' s Law

口折射角度取决于

- 入射光线介质的折射率  $\eta_i$
- 出射光线介质的折射率  $\eta_t$

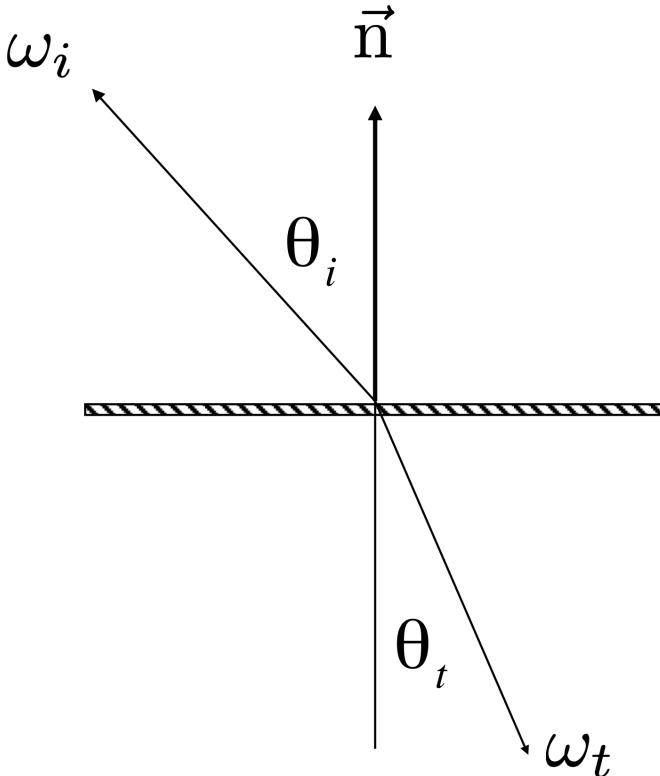


$$\eta_i \sin \theta_i = \eta_t \sin \theta_t$$

Medium	$\eta^*$
Vacuum	1.0
Air (sea level)	1.00029
Water (20°C)	1.333
Glass	1.5-1.6
Diamond	2.42

\*折射率取决于波长，  
这些是不同波长的  
平均值

# 折射定律



$$\eta_i \sin \theta_i = \eta_t \sin \theta_t$$

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t}$$

$$= \sqrt{1 - \left(\frac{\eta_i}{\eta_t}\right)^2 \sin^2 \theta_i}$$

$$= \sqrt{1 - \left(\frac{\eta_i}{\eta_t}\right)^2 (1 - \cos^2 \theta_i)}$$

$$1 - \left(\frac{\eta_i}{\eta_t}\right)^2 (1 - \cos^2 \theta_i) < 0$$

口当光从光密介质 (折射率较大)  
光疏介质 (折射率较小) 时  $\frac{\eta_i}{\eta_t} > 1$

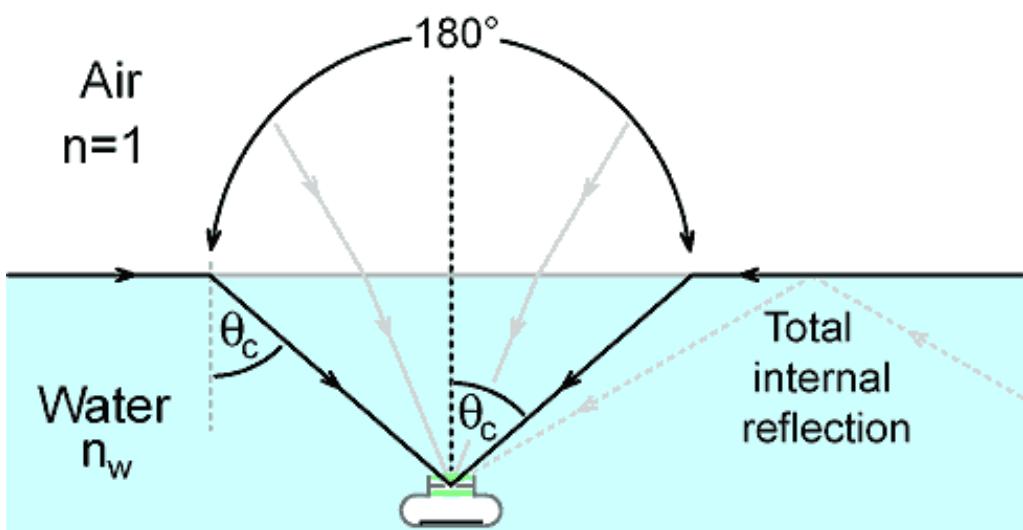
口从足够大的角度入射到边界  
上的光不会离开介质

**全反射现象**

# 斯内尔窗口/斯内尔圈现象

无法看到锥形之外的区域

- 临街角  $\theta_c \approx 48.5^\circ$



# 菲涅耳项 Fresnel Reflection / Term

口反射和折射有很多不同的性质

- 菲涅耳项是描述光在接触物体表面后，反射和折射之间比例的一个物理量

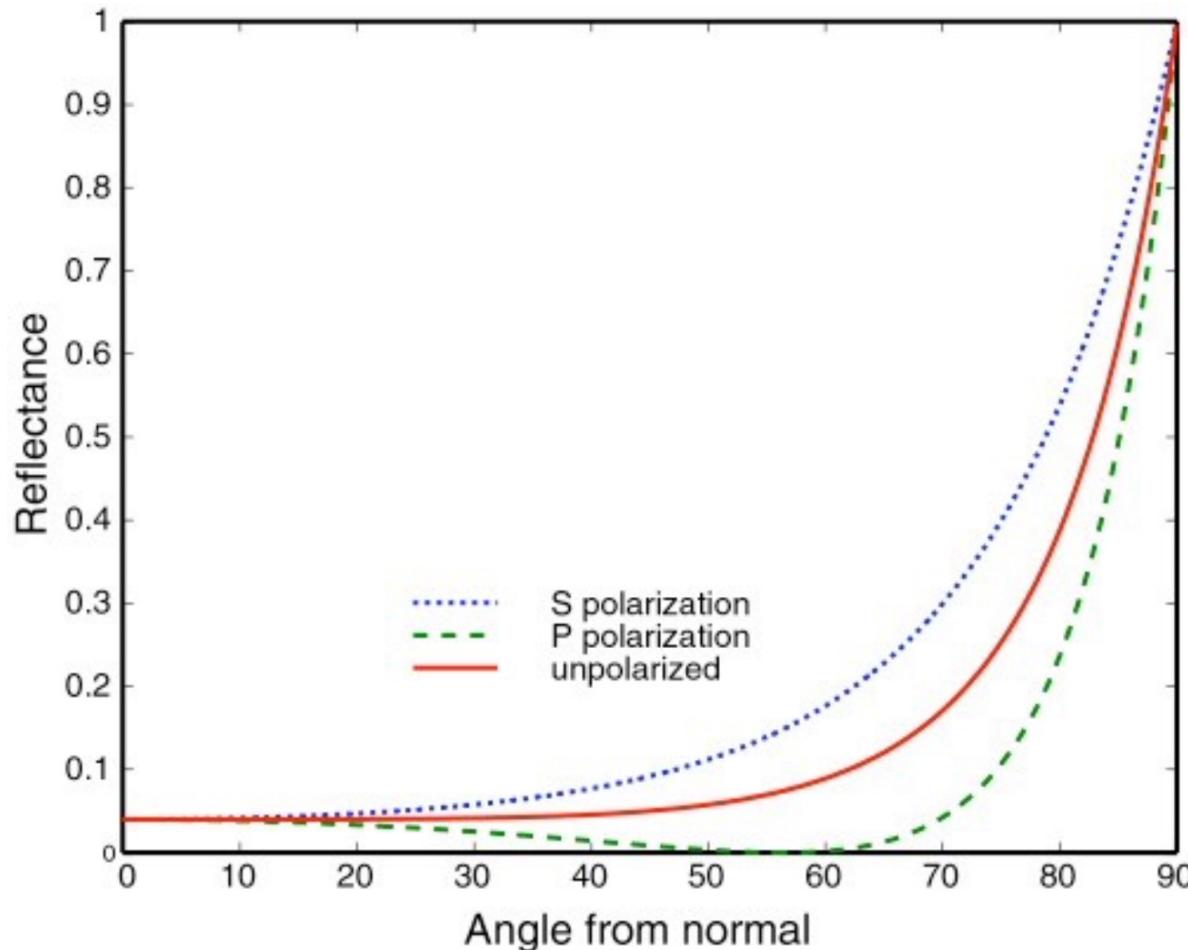
口菲涅耳项的值取决于入射角（和光的偏振），即光线与物体表面法线之间的角度



在这个例子中，反射率随掠入射角  
(grazing angle) 增加

# 菲涅耳项 (绝缘体, $\eta = 1.5$ )

- 当光线与物体法线几乎垂直时，反射率最高
- 当光线与物体法线几乎平行时，反射率最低



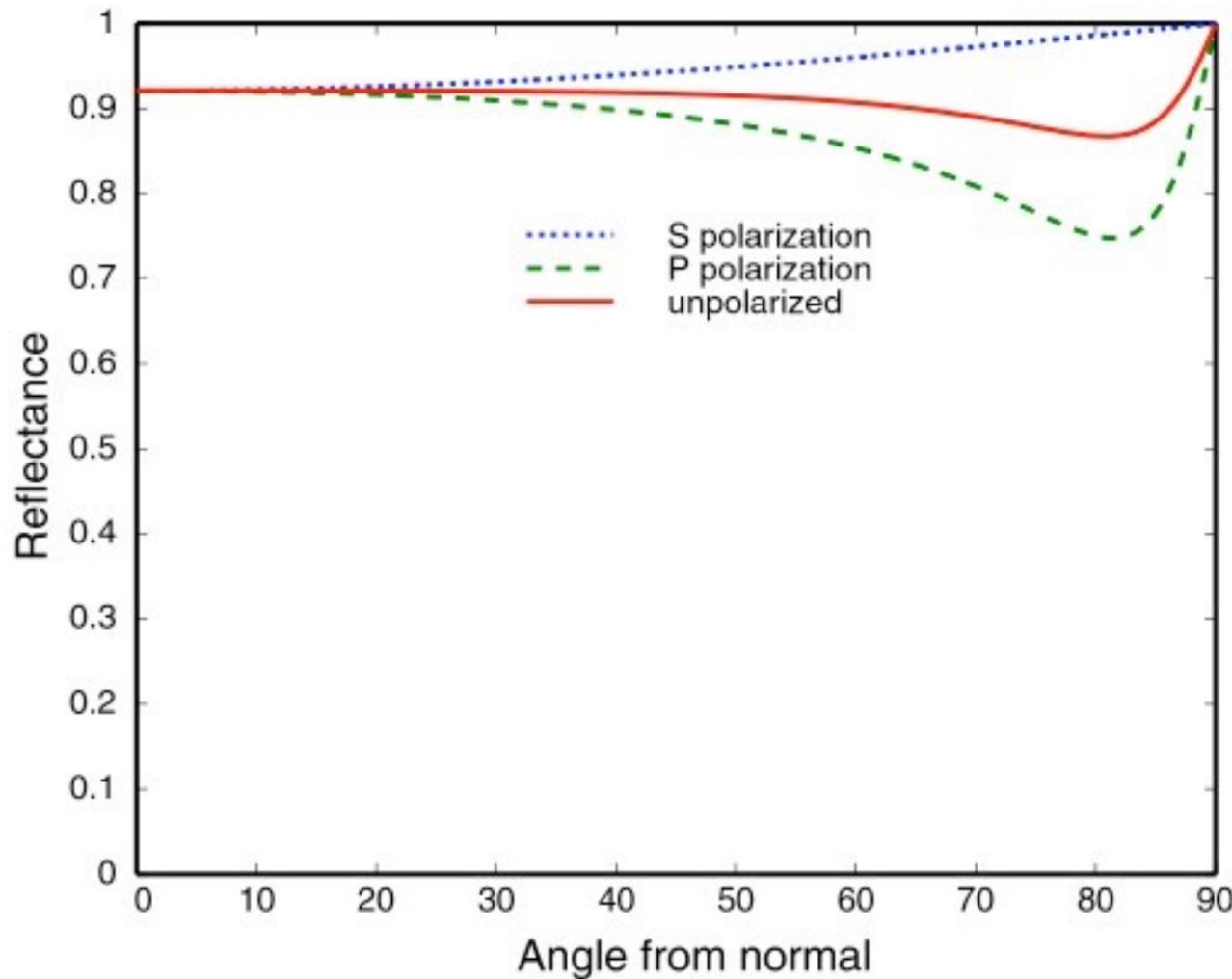
# 菲涅耳项

□近处能通过车前挡风玻璃看到内部



# 菲涅耳项 (导体)

口古人用铜镜是因为各个方向的反射率都比较大



# 菲涅耳项 – 计算反射光

$n_1, n_2$  为入射和折  
射介质的折射率

□准确模型：考虑了极化

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}} \right|^2$$

$$R_{eff} = \frac{1}{2} (R_s + R_p)$$

$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right|^2$$

□近似模型：Schlick 's approximation

- $R_0$  为光线垂直表面入射时的反射率

$$R(\theta) = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos \theta)^5$$

$$R_0 = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

# **微表面材质**

# **Microfacet Material**

# Microfacet Material: Motivation



[https://twitter.com/Cmdr\\_Hadfield/status/318986491063828480/photo/1](https://twitter.com/Cmdr_Hadfield/status/318986491063828480/photo/1)

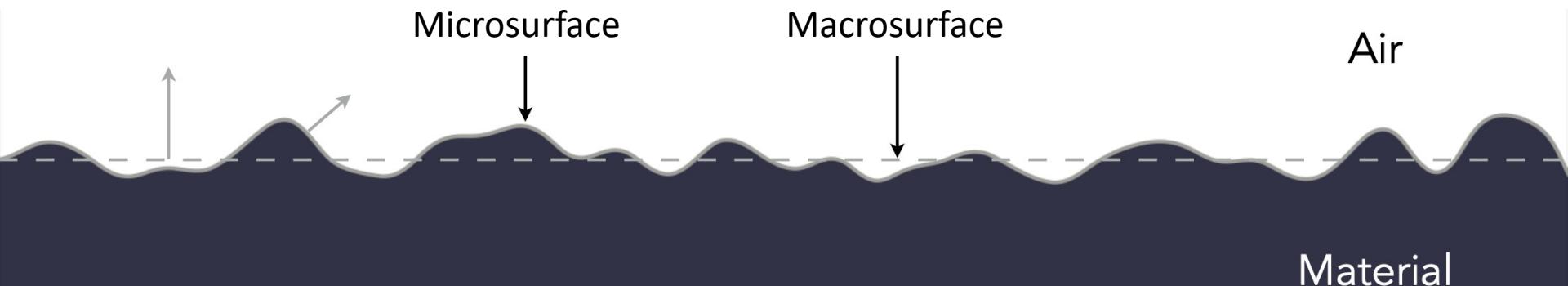
# 微表面 Microfacets

□ 微表面模型用以模拟复杂的光照和反射效果

- 假设物体表面由大量的微小平面（microfacet）组成
- 每个微表面都有自己的法线

□ 宏观 (Macroscale): 远处看是平坦的且整体**材质粗糙**

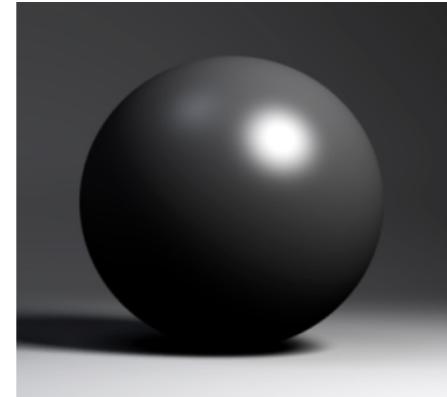
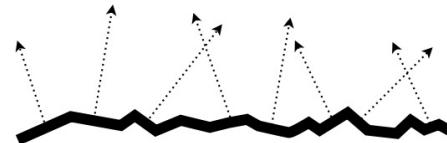
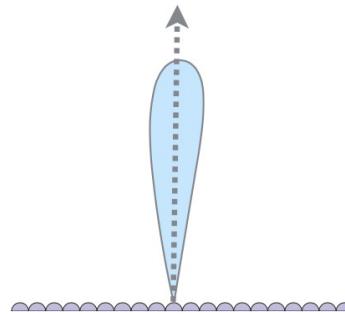
□ 微观 (Microscale): 近处能看到**几何细节**且局部有**镜面反射**



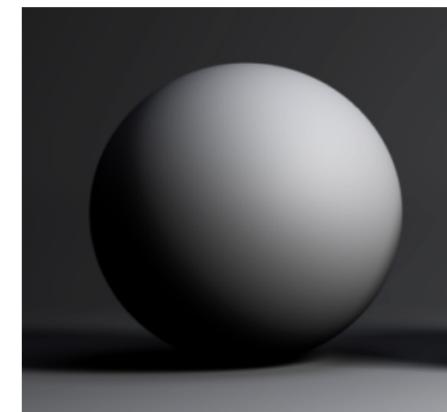
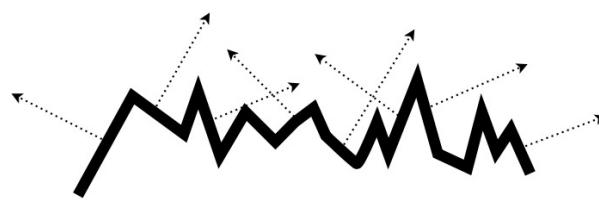
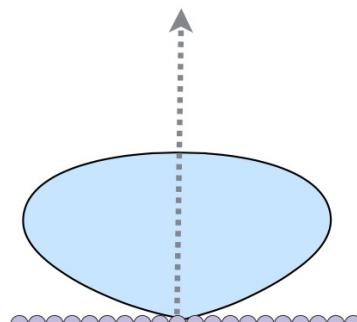
# 微表面法向量分布

用微表面法向量的分布来表示粗糙程度

- 法向量集中 -> 光泽材质 (Glossy)

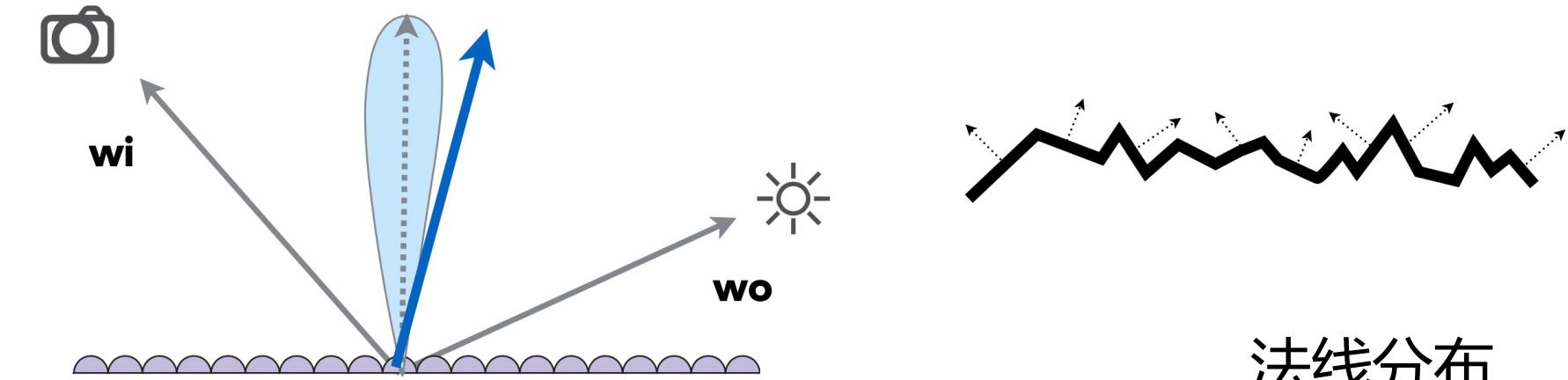


- 法向量分散 -> 漫反射 (Diffuse)



# 微表面 BRDF - Torrance-Sparrow 模型

什么样的微平面才能把入射光  $\omega_i$  反射到出射光  $\omega_o$ ?



菲涅耳项  
(光线反射/折射的比例)

阴影/遮挡项  
(微表面相互遮挡)

法线分布  
(半程向量是否  
接近法线)

$$f(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{F(\mathbf{i}, \mathbf{h})G(\mathbf{i}, \mathbf{o}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})}{4(n, \mathbf{i})(n, \mathbf{o})}$$

# 微表面 BRDF 实例



# 各向同性/各向异性材质

□电梯间内部 (为什么会出现条状的光线? )

- 电梯内的金属是 (至上而下) 磨过的金属

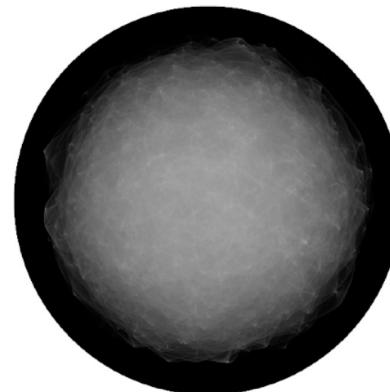
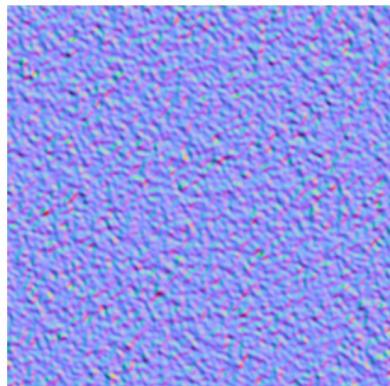


# 各向同性/各向异性材质

口各向同性材质：微表面法向量不存在方向性或方向性很弱

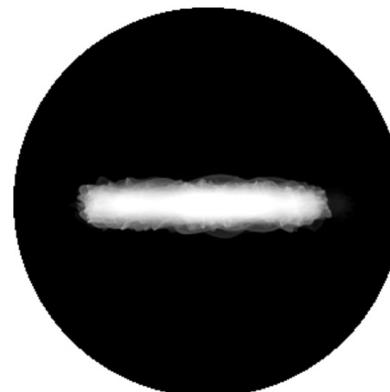
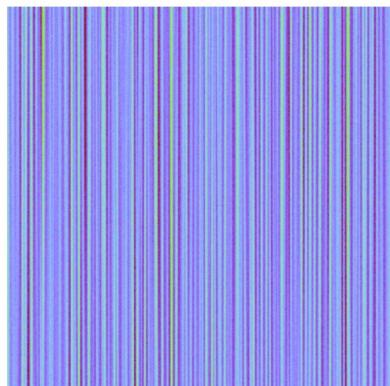
口各向异性材质：微表面法向量存在明确的方向性

Isotropic  
各向同性



法线分布  
均匀

Anisotropic  
各向异性



法线分布  
不均匀

Surface (normals)

BRDF (fix  $w_i$ , vary  $w_o$ )

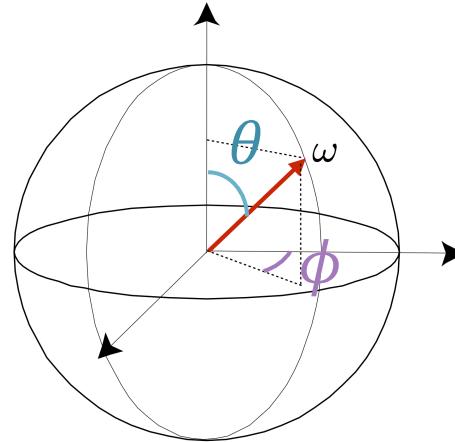
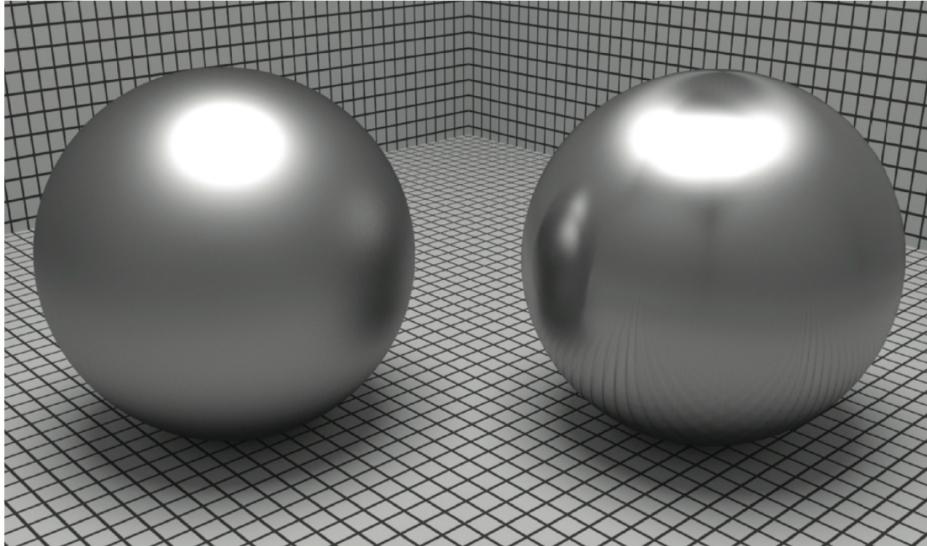
# 各向异性 BRDFs

口反射取决于方位角  $\phi$

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \neq f_r(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i)$$

$i, r$  表示入射和出射光线

口各向异性的表面常见例子，  
如金属拉丝材质



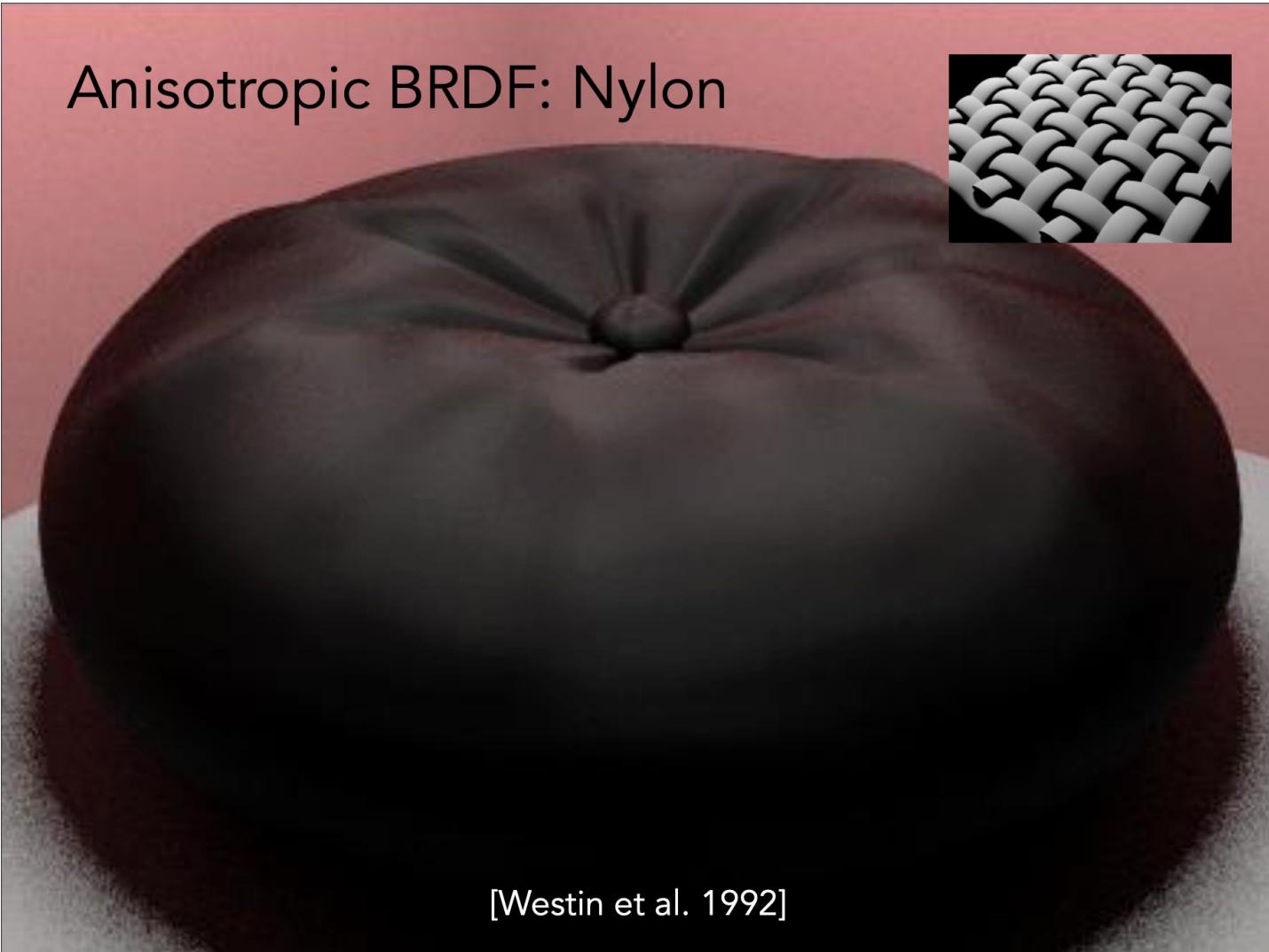
# 各向异性 BRDF：拉丝金属

口锅底旋转式条纹



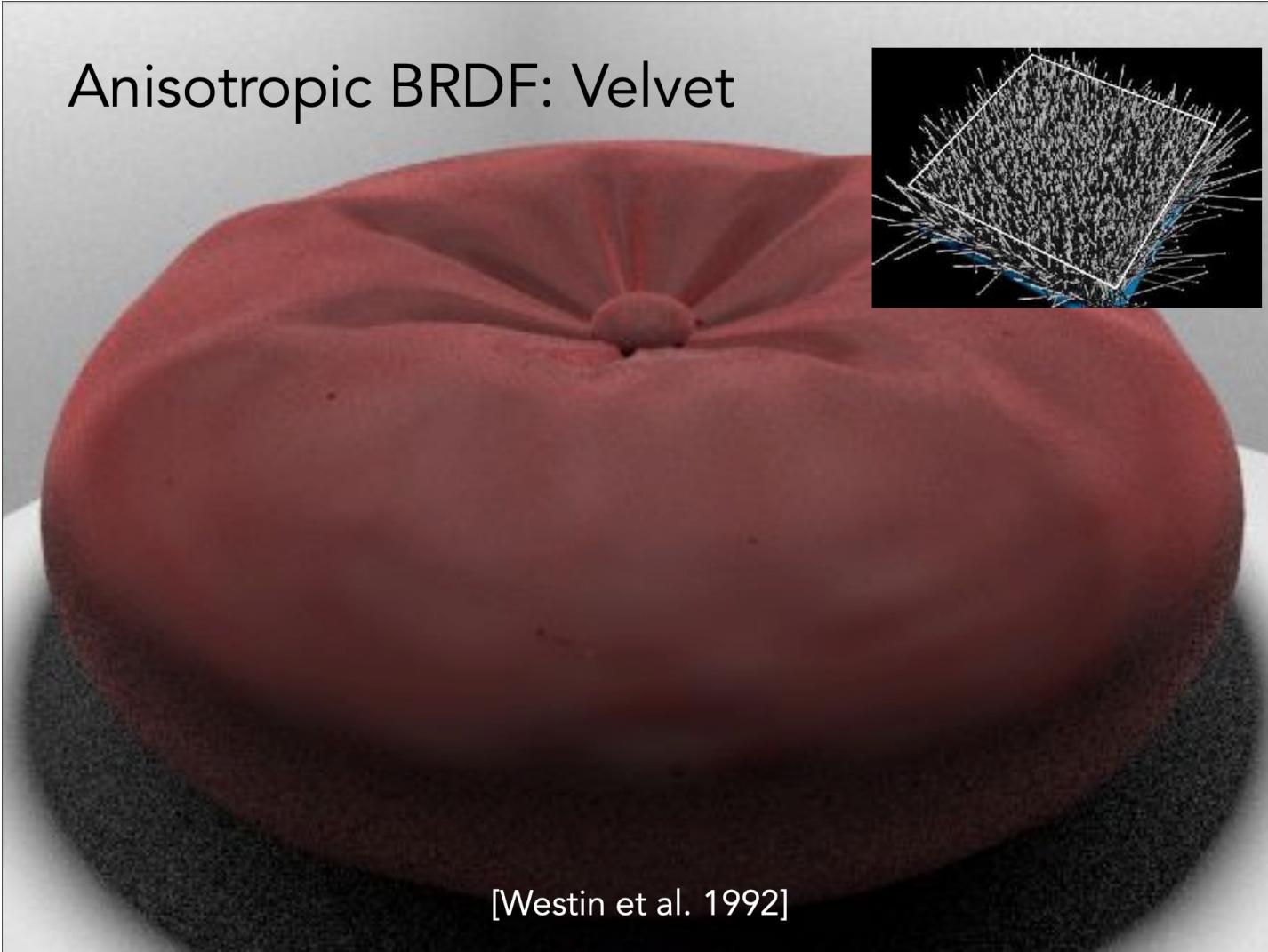
# 各向异性 BRDF：尼龙

· 水平竖直方向很接近各向同性，对角方向不是



# 各向异性 BRDF: 天鹅绒

凸起的多条纤维导致各向异性



# 各向异性 BRDF：天鹅绒

口人为改变各项异性的效果，从而产生不同表面



# BRDF 性质

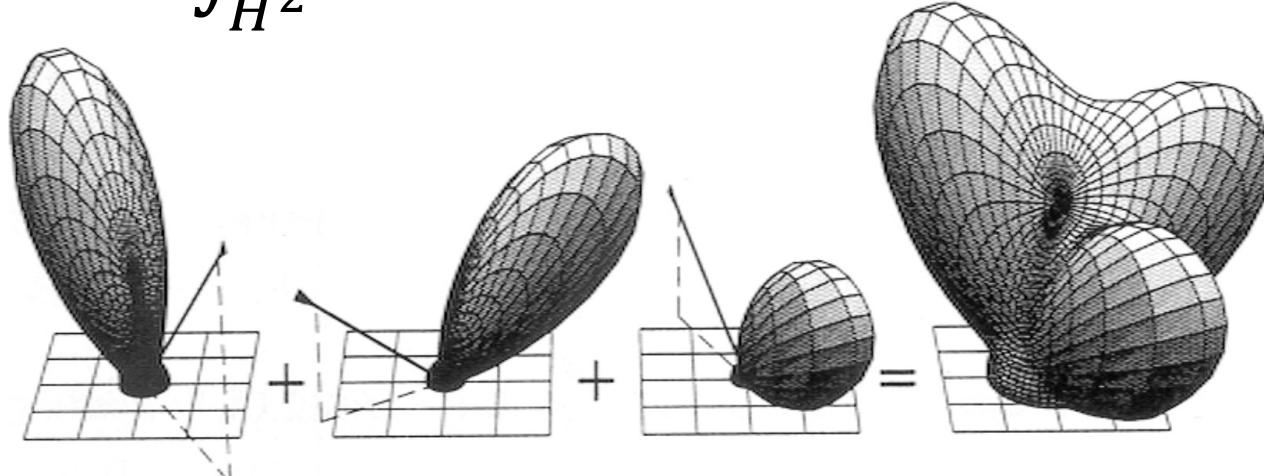
□ 非负性 Non-negativity

$$f_r(\omega_i \rightarrow \omega_r) \geq 0$$

□ 线性性质 Linearity

- 把一个 BRDF 拆成几部分再组合

$$L_r(p, \omega_r) = \int_{H^2} f_r(p, \omega_i \rightarrow \omega_r) L_i(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$



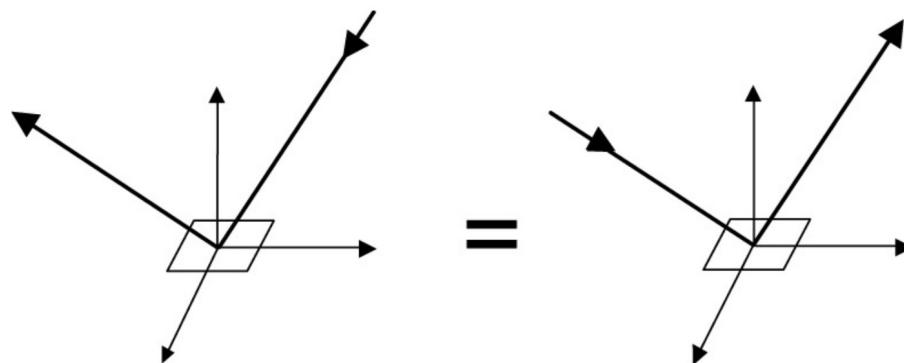
[Sillion et al. 1990]

# BRDF 性质

## 口可逆性 Reciprocity principle

- 调换出射光和入射光的位置，得到相同的 BRDF 的值

$$f_r(\omega_r \rightarrow \omega_i) = f_r(\omega_i \rightarrow \omega_r)$$



## 口能量守恒 Energy conservation

- 能量被吸收

$$\forall \omega_r \int_{H^2} f_r(\omega_i \rightarrow \omega_r) \cos \theta_i d\omega_r \leq 1$$

# BRDF 性质

口各向同性与各向异性

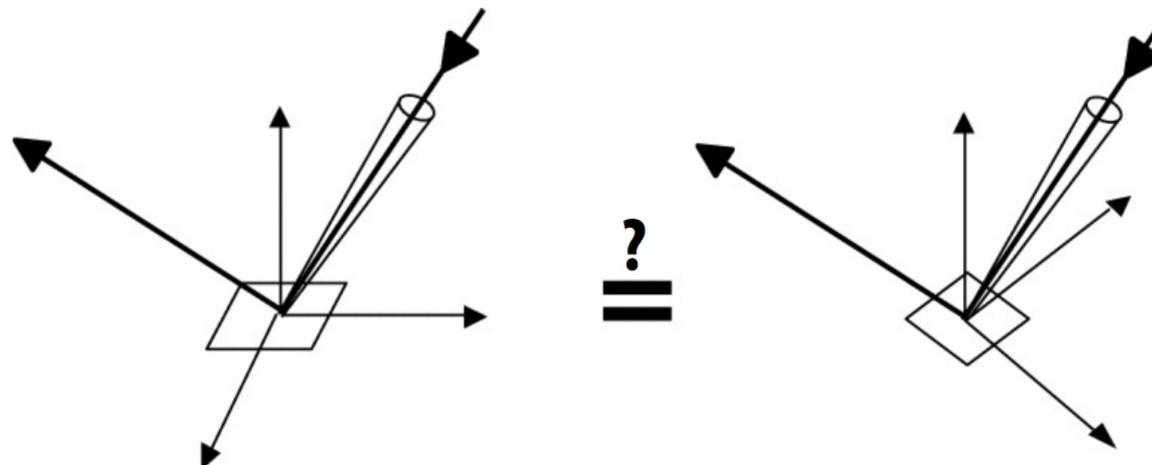
- 各向同性

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = f_r(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i)$$

- 各向异性 (同样满足可逆性)

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \neq f_r(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i)$$

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i) = f_r(\theta_r, \theta_i, \phi_i - \phi_r) = f_r(\theta_i, \theta_r, |\phi_r - \phi_i|)$$

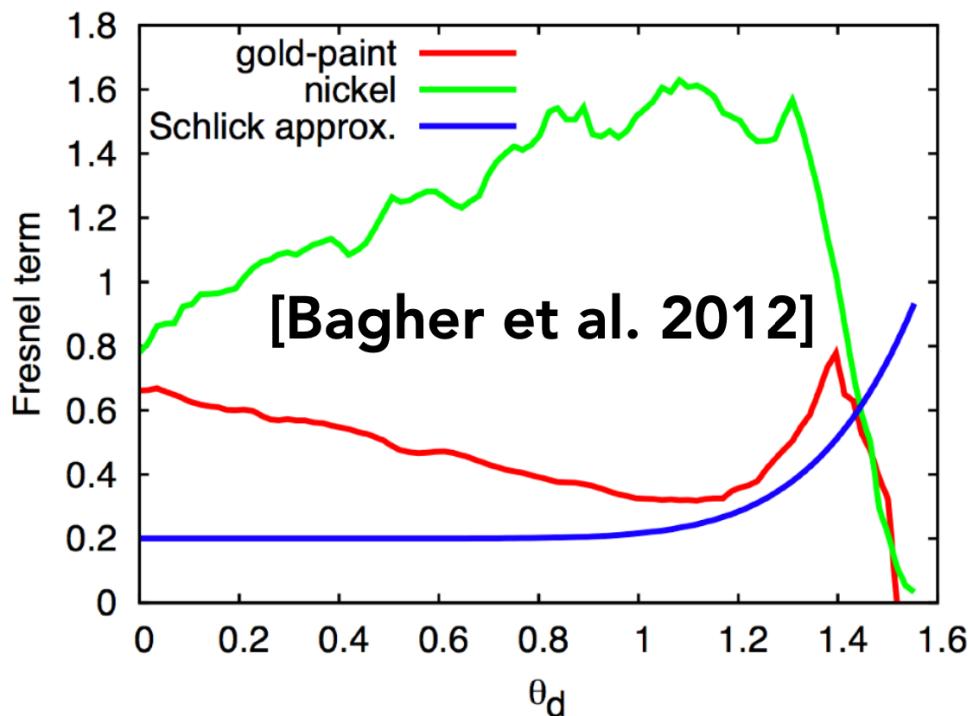


# **测量 BRDFs**

# **Measuring BRDFs**

# 测量 BRDF：动机

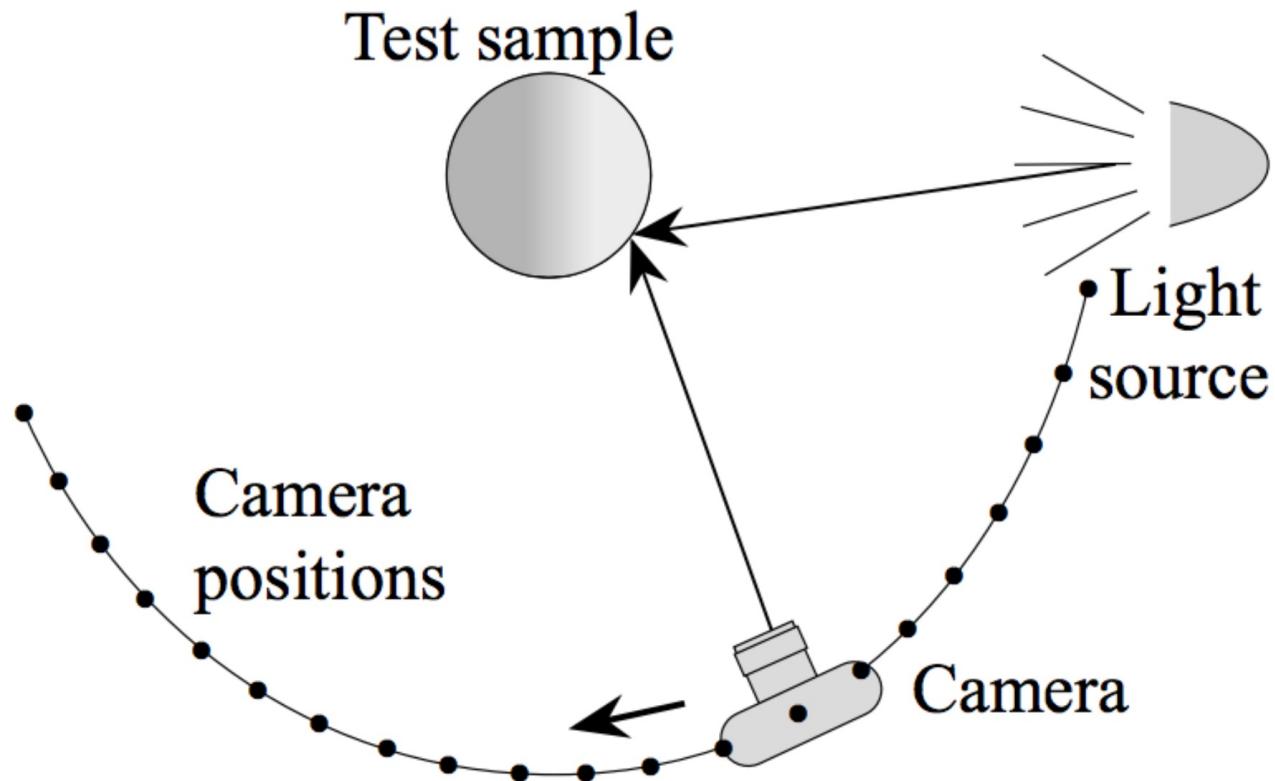
- 理论与真实的 BRDF 通常有差距
- 实际测量 BRDF 能避免开发/推导模型
  - 自动得到所有的散射效果
- 可以使用真实世界的材质进行精确渲染
  - 适用于产品设计、特效等



# 基于图像的 BRDF 测量

口实际测量 BRDF 的方法

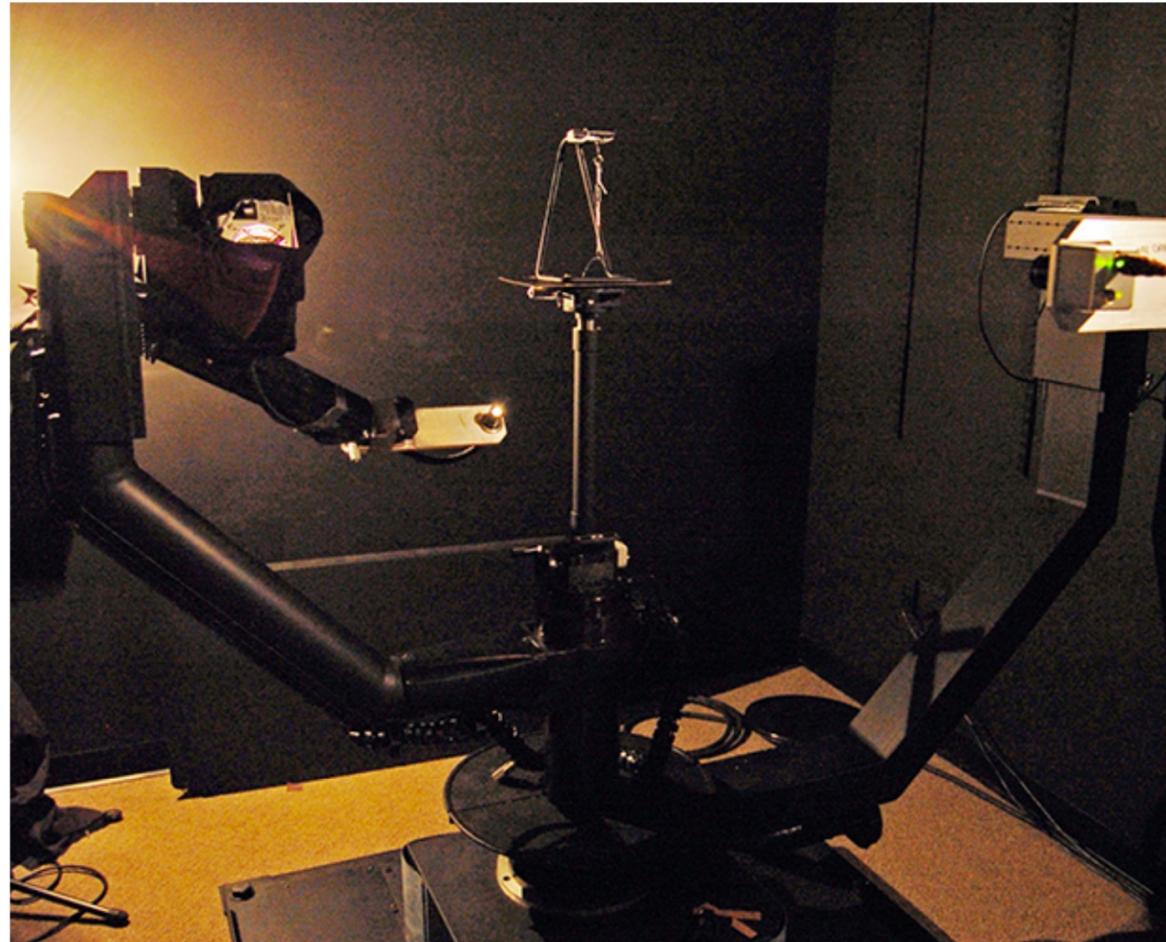
- 利用光源和相机测量物体所有角度对光线的反射情况



[Marschner et al. 1999]

# 测量 BRDF仪器

口角度反射计 gonioreflectometer



Spherical gantry at UCSD

# 测量 BRDFs

口一般的方法 (枚举所有的出射和入射方向)

```
foreach outgoing direction wo
    move light to illuminate surface with a thin beam from wo
    for each incoming direction wi
        move sensor to be at direction wi from surface
        measure incident radiance
```

口提升效率的策略  $f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = f_r(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i)$

- 若是各向同性材质，能将测量维度从 4D 降低到 3D
- BRDF 可逆性使测量次数减少一半
- 利用插值方法避免测量所有角度等

# 测量 BRDFs

## 口测量 BRDFs 的挑战

- 掠入射角的精确测量 (菲涅耳效应)
- 使用足够密集的采样进行测量，以捕捉高频镜面反射
- 空间变化的反射率

## 口如何表示/存储已测量的 BRDF 值

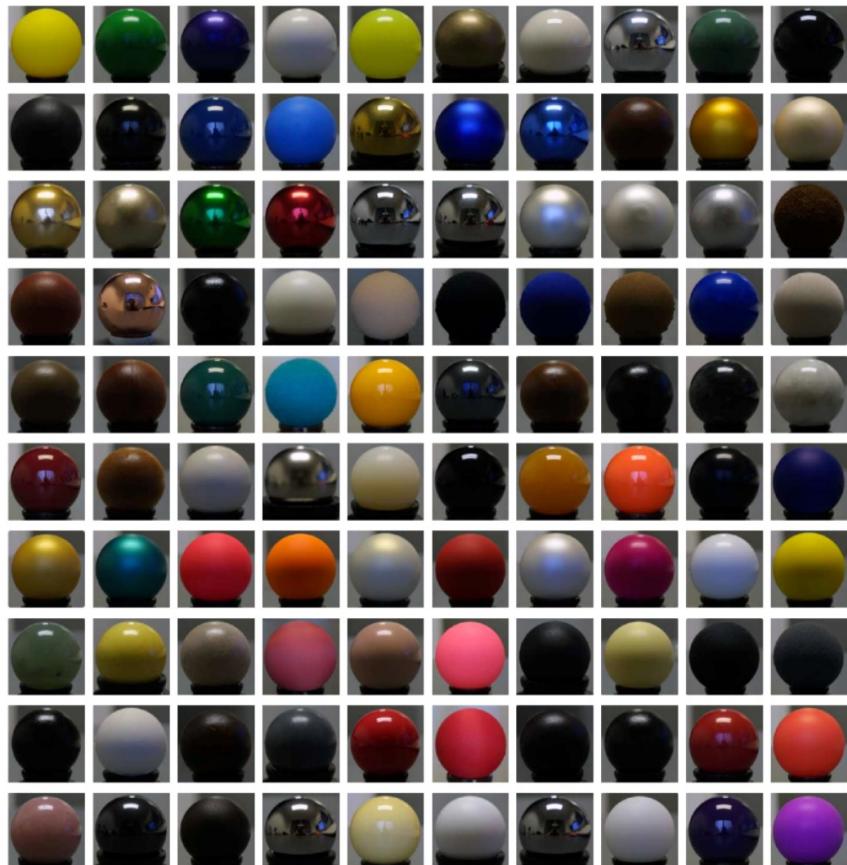
- 测量数据的精确表示
- 紧凑表示
- 任意方向对的有效评估
- 能够支持基于重要性的采样

# 表格表示法 Tabular representation

□ 在  $(\theta_i, \theta_o, |\phi_i - \phi_o|)$  区间  
均匀划分采样点

□ 存储开销非常高

测量了一系列各向同性的材质



MERL BRDF Database  
[Matusik et al. 2004]  
90 \* 90 \* 180 measurements



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](mailto:chenzhb36@mail.sysu.edu.cn)