

# 光照模型

信息与软件工程学院

吴 佳

# 光照模型

本章重点：

1. 光源
2. 基本光照模型（反射）
3. 透射模型

# 光照模型

- 真实感绘制依赖于表面光照效果：
  - 光的反射
  - 透明性
  - 表面纹理
  - 阴影
- **光照模型(lighting model)** - 对象表面上单个点的**光强度**计算模型

# 光照模型

1. 光源
2. 基本光照模型（反射）
3. 透射模型

# 1. 光源

- **光源**(light source) – 任意发出辐射能量的对象
- 光源可以是**发光体**和**反射体**的混合
- 光源属性：
  - 位置
  - 发射光颜色
  - 发射方向
  - 光源形状

# 1. 光源

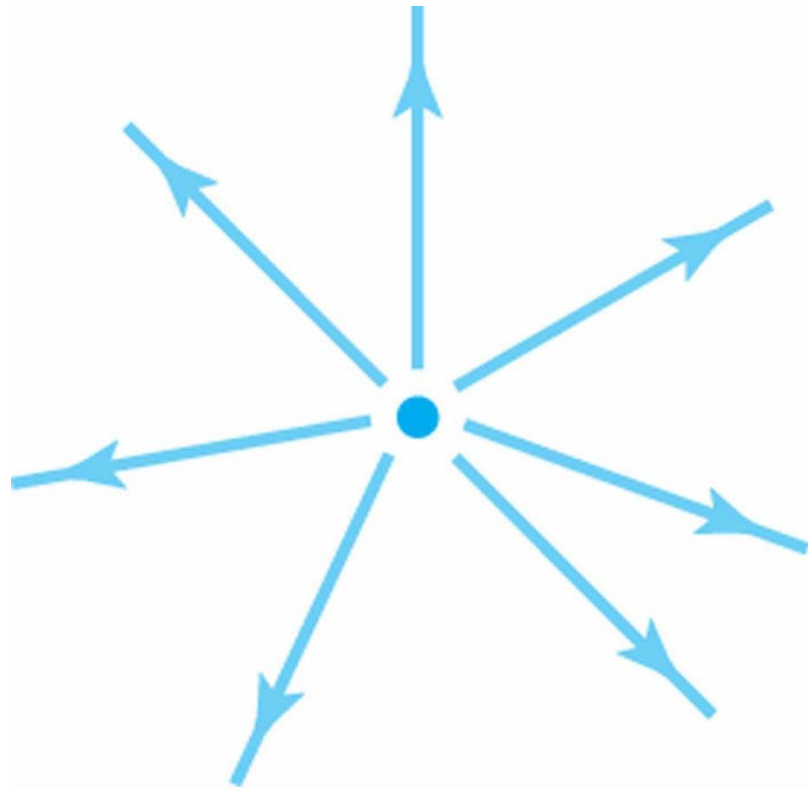
1.1 光源分类

1.2 辐射强度衰减

1.3 方向光源和投射效果

1.4 角强度衰减

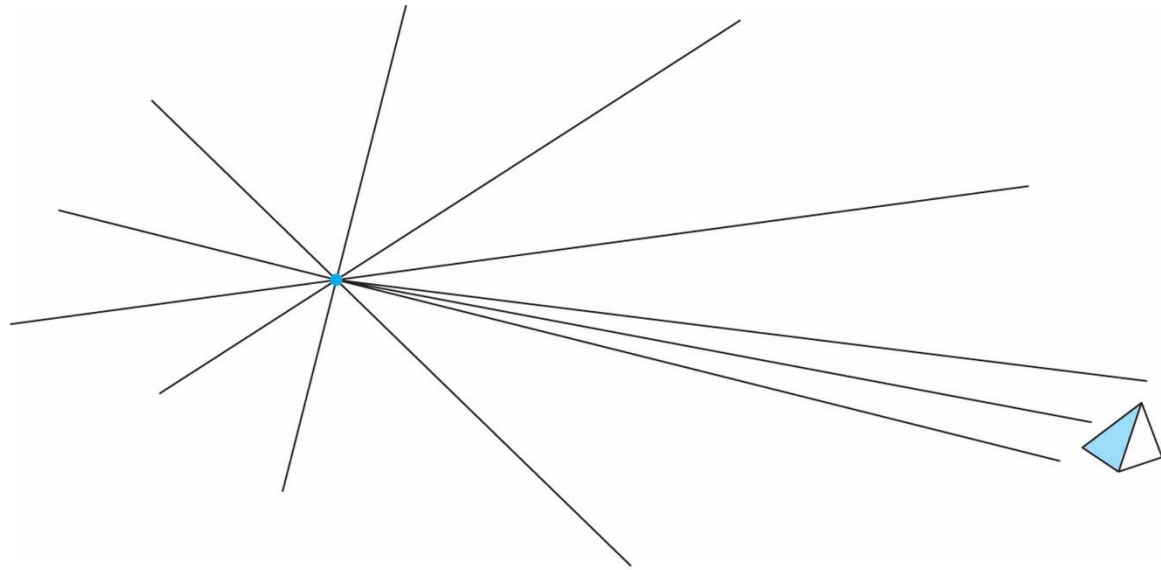
# 1.1 光源模型



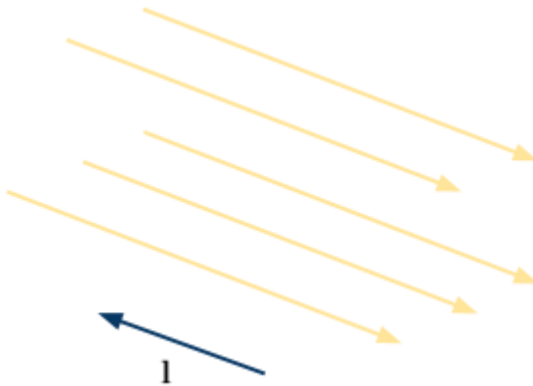
- **点光源** – 指一个无限小的点，所有光向四周**平均**地散射光
- 适用范围：
  - 比**对象小**得多的光源
  - 离**场景不是太近**的大光源

Copyright ©2011 Pearson Education, publishing as Pearson Hall

# 无穷远光源



- 光源在无限远放射
- 在任何位置，放射方向都是一致的，可以模拟类似太阳的光线





# 1. 光源

1.1 光源分类

1.2 辐射强度衰减

1.3 方向光源和投射效果

1.4 角强度衰减

## 1.2 辐射强度衰减

- 光强度随着光源距离 $d_l$ 衰减
  - 离光源距离为 $d_l$ 处光辐射强度按照 $1/d_l^2$ 衰减
- 问题:
  - 接近光源时,  $1/d_l^2$ 会产生过大的强度变化
  - 当 $d_l$ 很大时, 变化又太小
- 改进:

$$f_{\text{radatten}}(d_l) = \frac{1}{a_0 + a_1 d_l + a_2 d_l^2}$$

用户可以调整系数 $a_0$ ,  $a_1$ 和 $a_2$ 的值以得到场景中不同的光照效果

## 1.2 辐射强度衰减

- 光强度衰减函数:

$$f_{radatten}(d_l) = \begin{cases} 1.0 & \text{如果光源在无穷远处} \\ \frac{1}{a_0 + a_1 d_l + a_2 d_l^2} & \text{如果光源是局部光源} \end{cases}$$

# 1. 光源

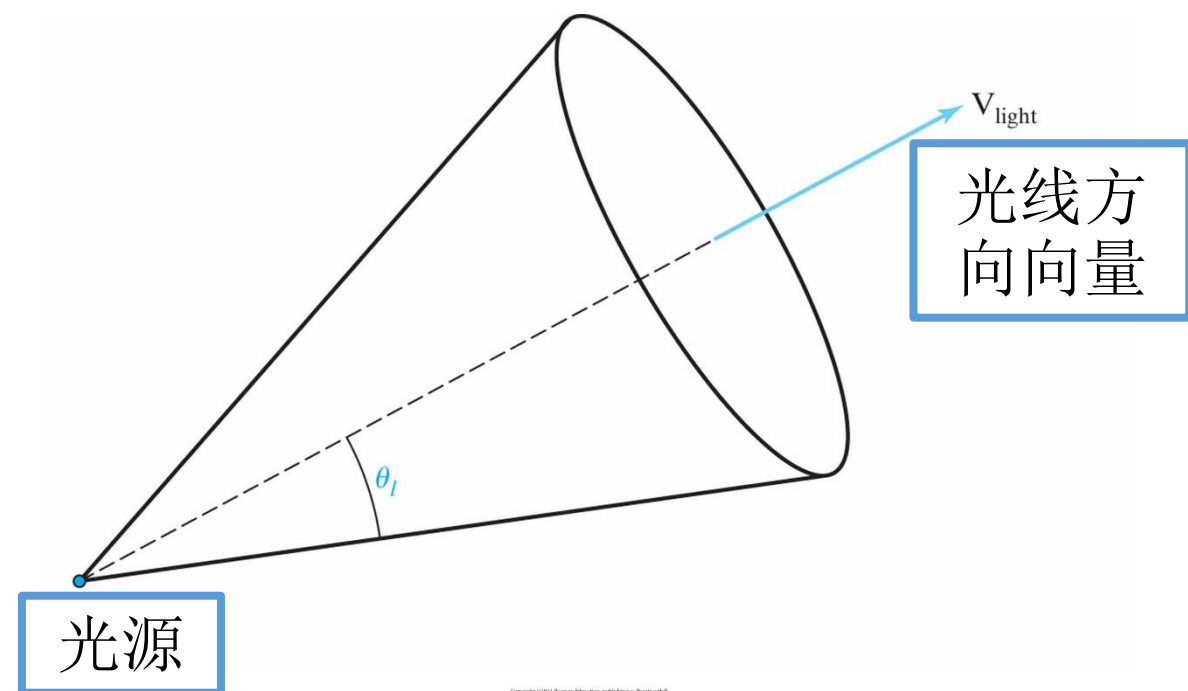
1.1 光源分类

1.2 辐射强度衰减

1.3 方向光源和投射效果

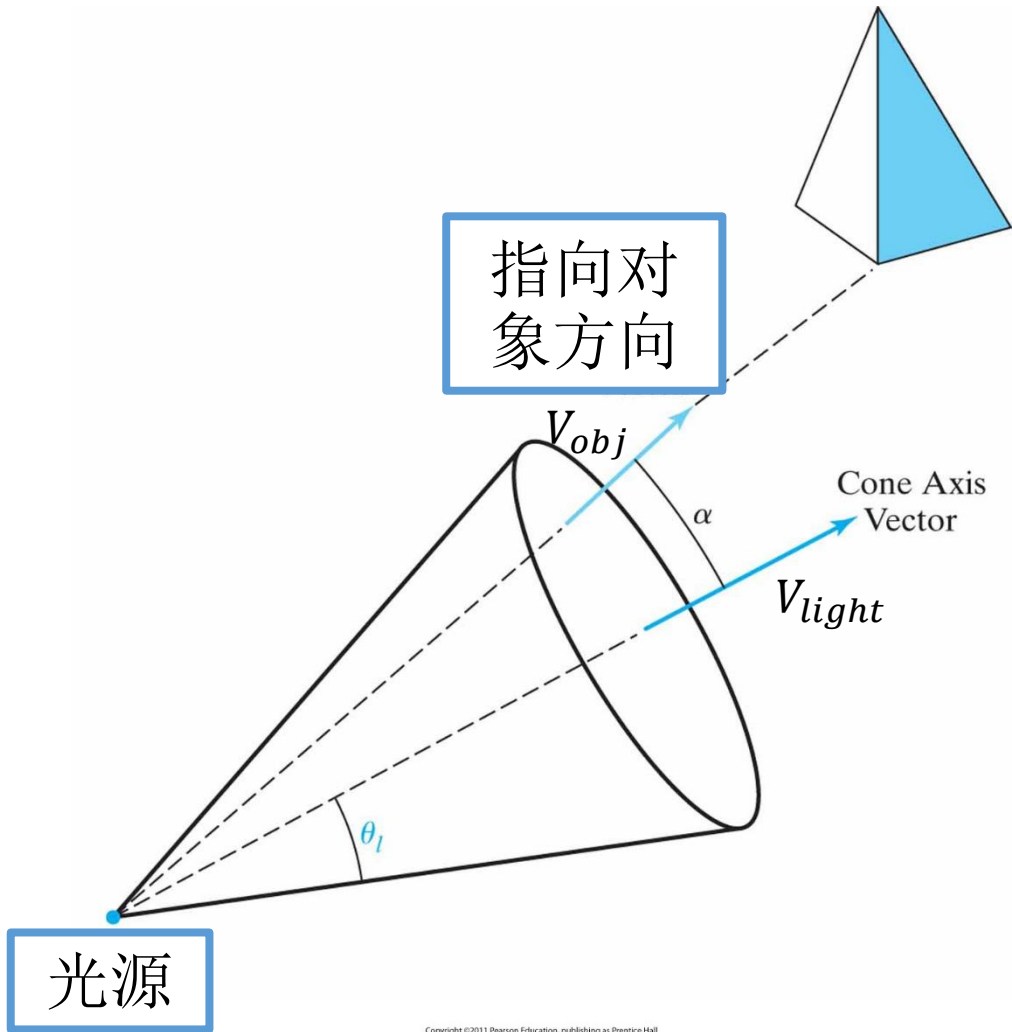
1.4 角强度衰减

## 1.3 方向光源和投射效果



- 对局部光源稍加修改可产生方向光源
- **方向光源** – 对象位于光源的方向范围 $\theta_l$ 内才能得到光照

## 1.3 方向光源和投射效果



- **方向光源** – 对象位于光源的方向范围 $\theta_l$ 内才能得到光照
- $V_{light}$  – **光源方向**的单位向量
- $V_{obj}$  – 光源位置到一个**对象位置**的方向向量

$$V_{obj} \cdot V_{light} = \cos \alpha$$

# 1. 光源

1.1 光源分类

1.2 辐射强度衰减

1.3 方向光源和投射效果

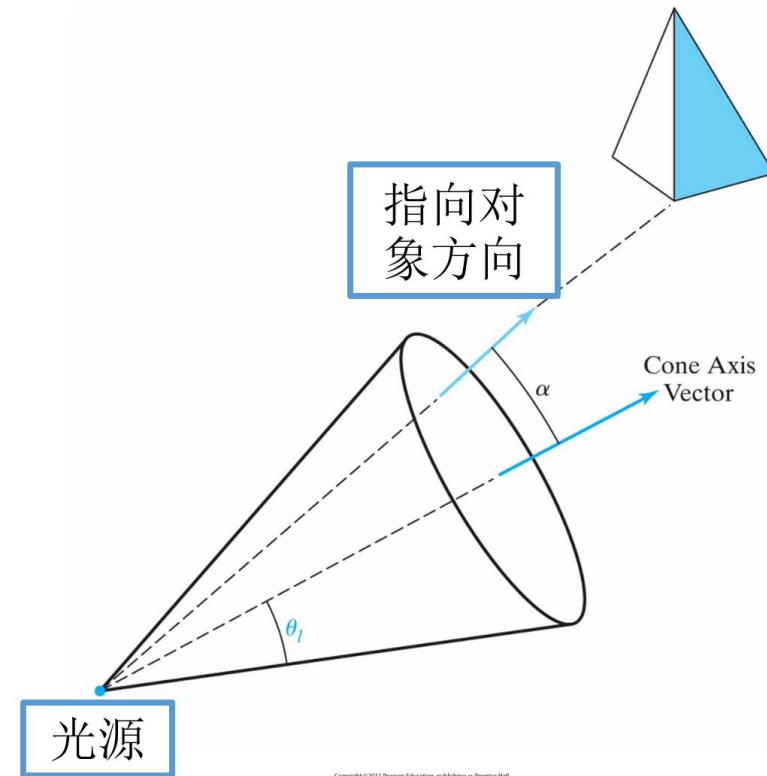
1.4 角强度衰减

## 1.4 角强度衰减

- 沿着圆锥轴光强最大，离开时强度减弱
- 方向光源角强度衰减函数：

$$\begin{aligned} f_{angatten}(\alpha) &= \cos^{a_l} \alpha \\ &= \left( \mathbf{V}_{obj} \cdot \mathbf{V}_{light} \right)^{a_l} \end{aligned}$$

- $a_l$  – 衰减指数

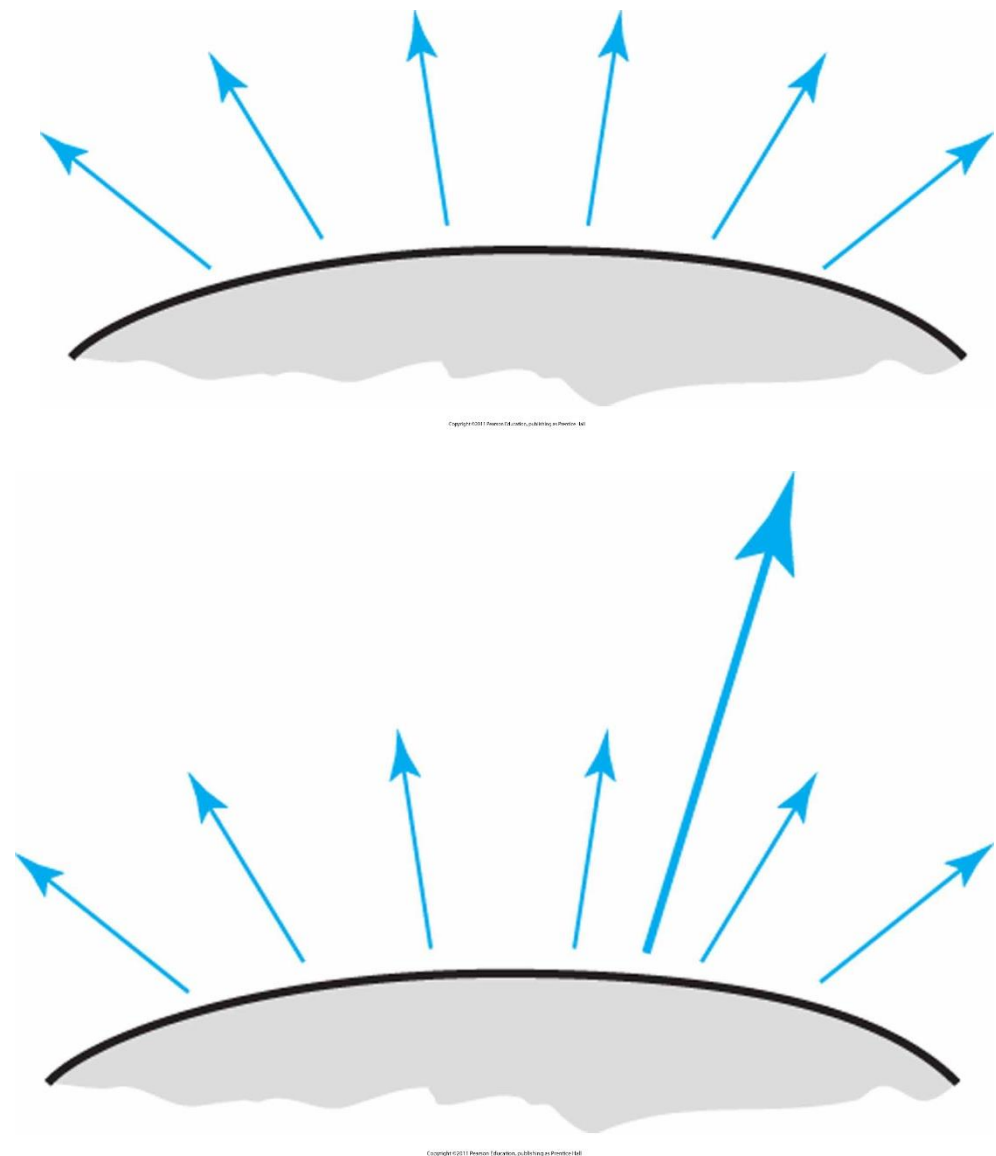




# 光照模型

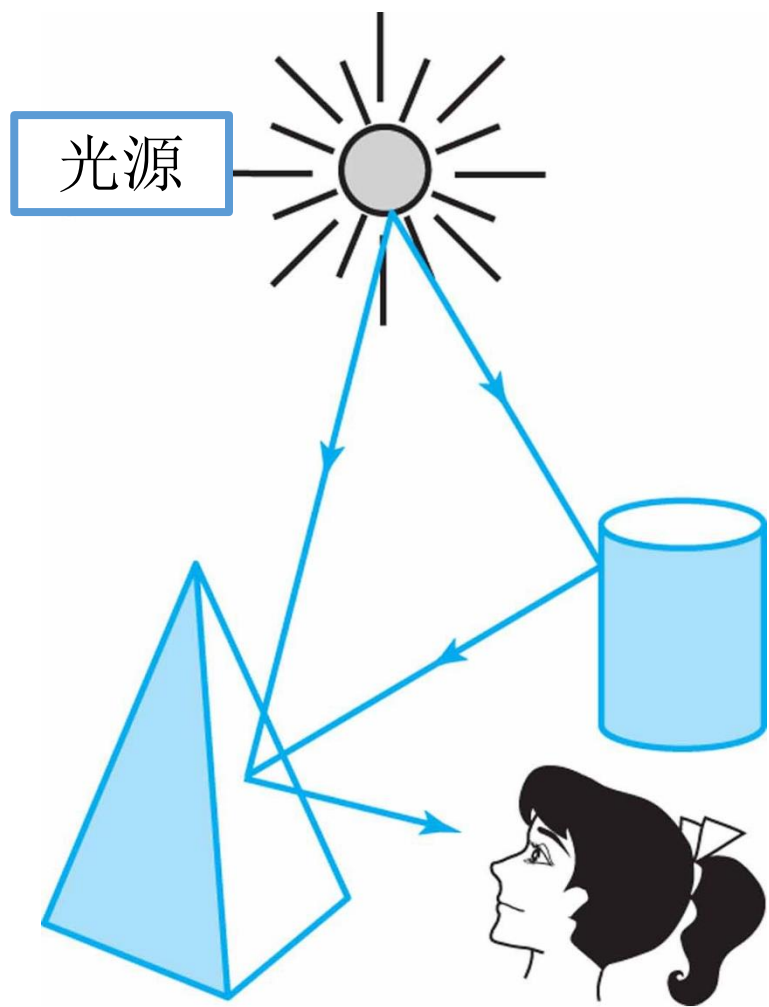
1. 光源
2. 基本光照模型（反射）
3. 透射模型

# 表面光照效果



- 反射：
  - **漫反射**：表面将光向各个方向发散出去（粗糙表面）
  - **镜面反射**：反射光汇集集中在一部分区域（光滑表面）
- **环境光**（背景光）- 场景中各个表面的反射光生成的光照效果
  - **环境光**：设定场景一般亮度级

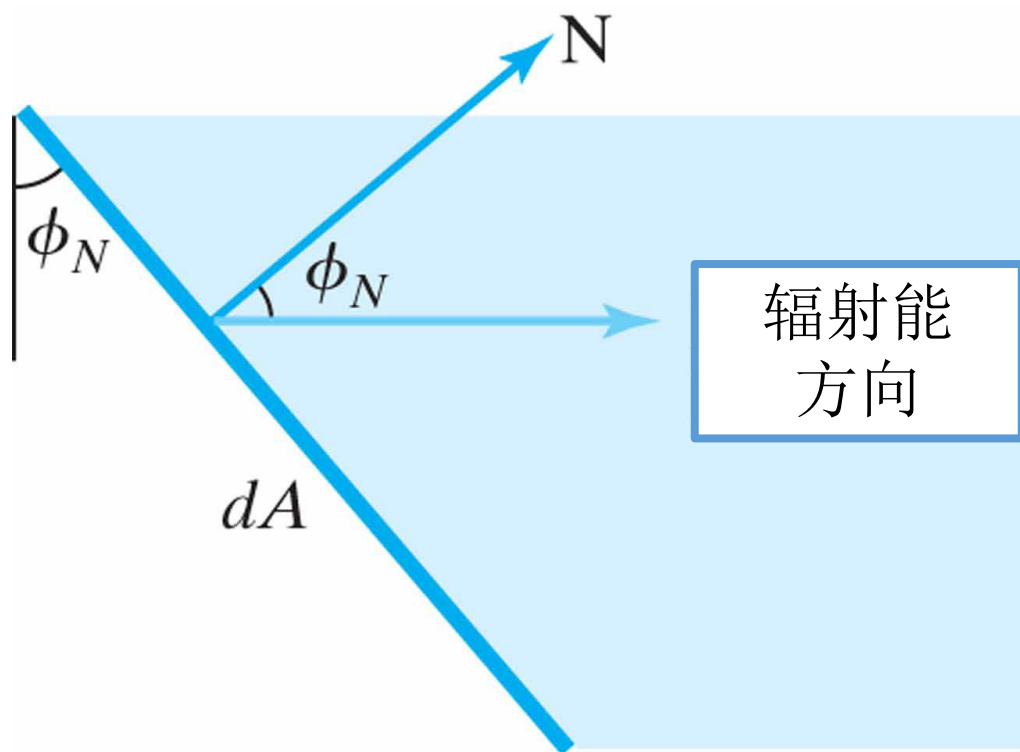
# 基本光照模型



Copyright ©2011 Pearson Education, publishing as Prentice Hall

- 表面光照效果是由光源光和其他表面反射光混合生成的
- 基本光照模型（一般限于点光源）包含：
  - 环境光
  - 光源光的反射
- 接下来分别推导两类基本光照模型：
  - ① 漫反射模型
  - ② 镜面反射模型

# 漫反射



- **理想漫反射体** – 入射光在**各个方向**以**相同强度**发散而与观察者位置无关

- **朗伯余弦定理**:

在与对象表面法向量夹角为 $\phi_N$ 方向上，每个面积为 $dA$ 的平面单位**所发散的光线**与 $\cos\phi_N$ 成正比

$$\text{强度} = \frac{\text{单位时间辐射能}}{\text{投影面积}}$$

$$\propto \frac{\cos \phi_N}{dA \cos \phi_N}$$

$$= \text{常数}$$

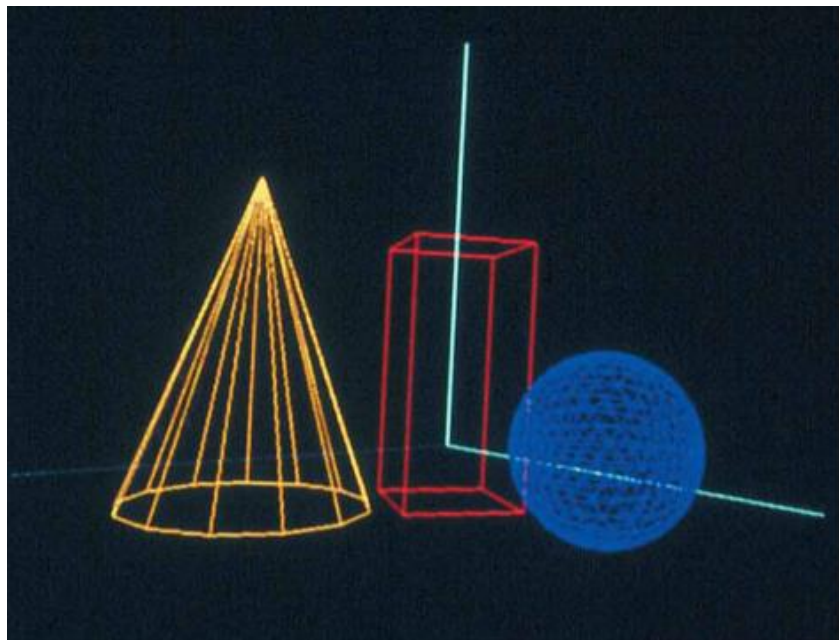
# 漫反射系数

- 假设每一表面都按照理想漫反射体对待，则可确定将要按漫反射发散的入射光部分的每一个表面设定一个参数 $k_d$ ，该参数称为漫反射系数
- 物体在该点处光强度为（其中， $I$ 为入射光强度）：

$$k_d \times I$$

- 反射系数 $k_d$ 值为0.0到1.0之间
- 如果希望一个强反射表面，则将参数的值设成接近1.0
- 如果要模拟一个能吸收大部分入射光的表面，则将反射特性设定为接近0.0

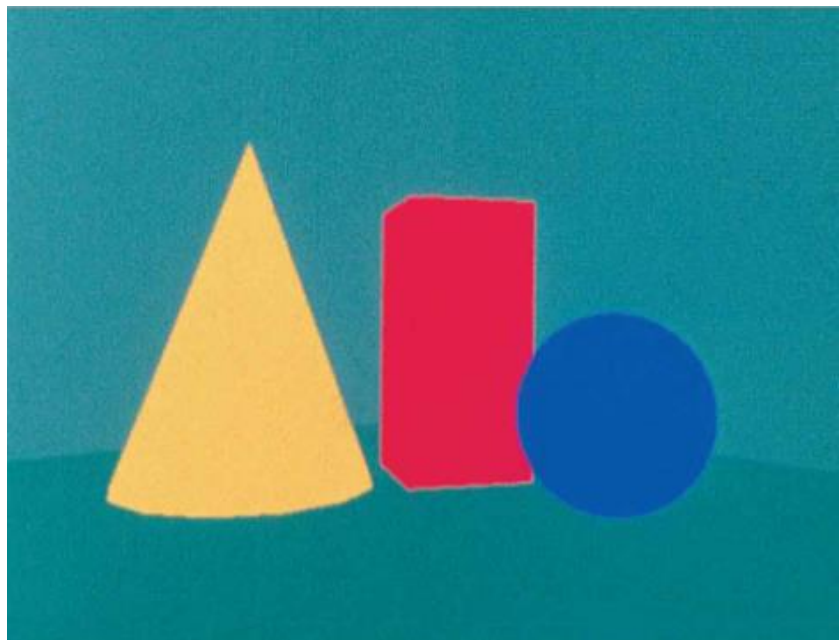
# 环境光漫反射



- 对于背景光效果，假定每一表面都使用对场景设定的环境光 $I_a$ 来照明
- 对于表面上任意一点，环境光对漫反射的贡献为：

$$I_{ambdiff} = k_d I_a$$

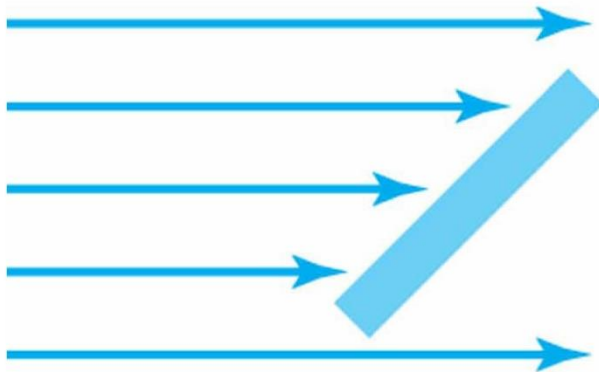
- 只用环境光，缺少立体感



# 光源漫反射



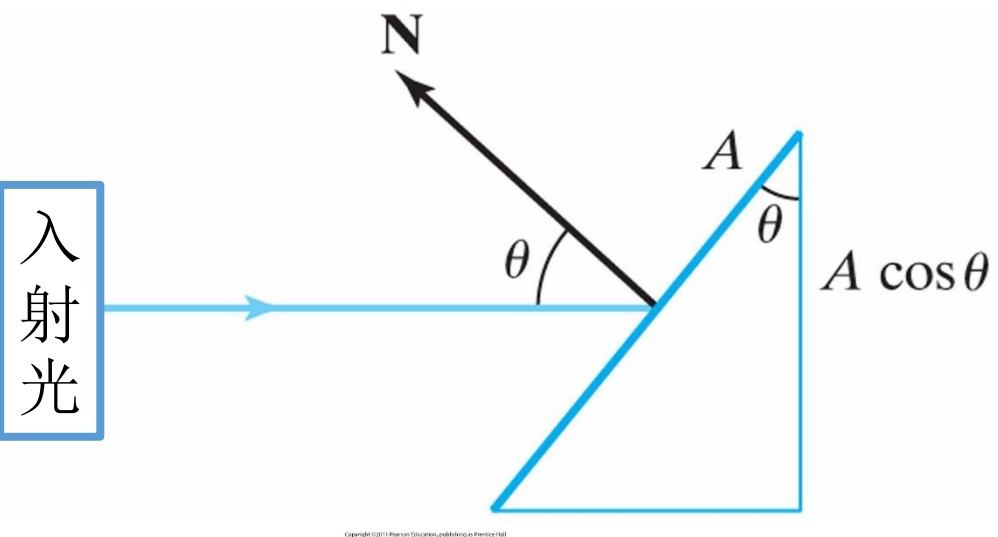
(a)



(b)

- 当强度为 $I_i$ 的光源照射一个表面时，从该光源来的入射光总量依赖于表面与光源的相对方向
- 与表面相交的光线数量与该表面投影到入射光方向的面积成正比

# 光源漫反射



当强度为 $I_l$ 的光源照射一个表面时，从该光源来的入射光总量依赖于表面与光源的相对方向

一个强度为 $I_l$ 的光源的入射光总量：

$$I_{l,incident} = I_l \cos \theta$$

- 漫反射光强度：

入射光方向与表面法向量夹角

$$\begin{aligned} I_{l,diff} &= k_d I_{l,incident} \\ &= k_d I_l \cos \theta \end{aligned}$$

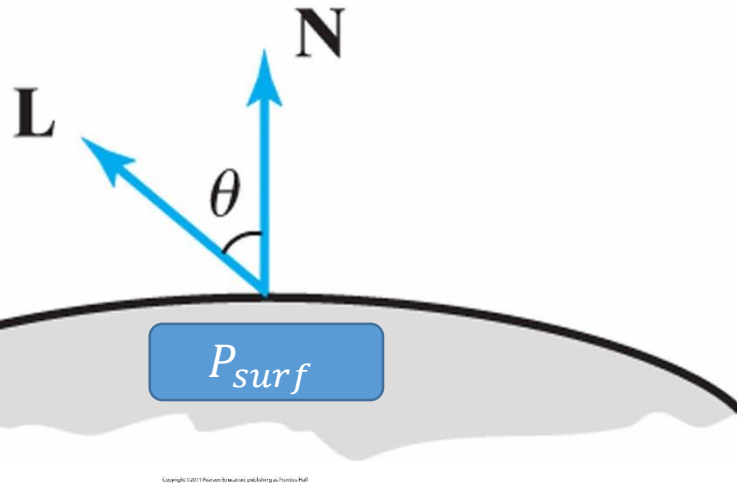


# 光源漫反射

$P_{source}$

指向光源

To Light  
Source



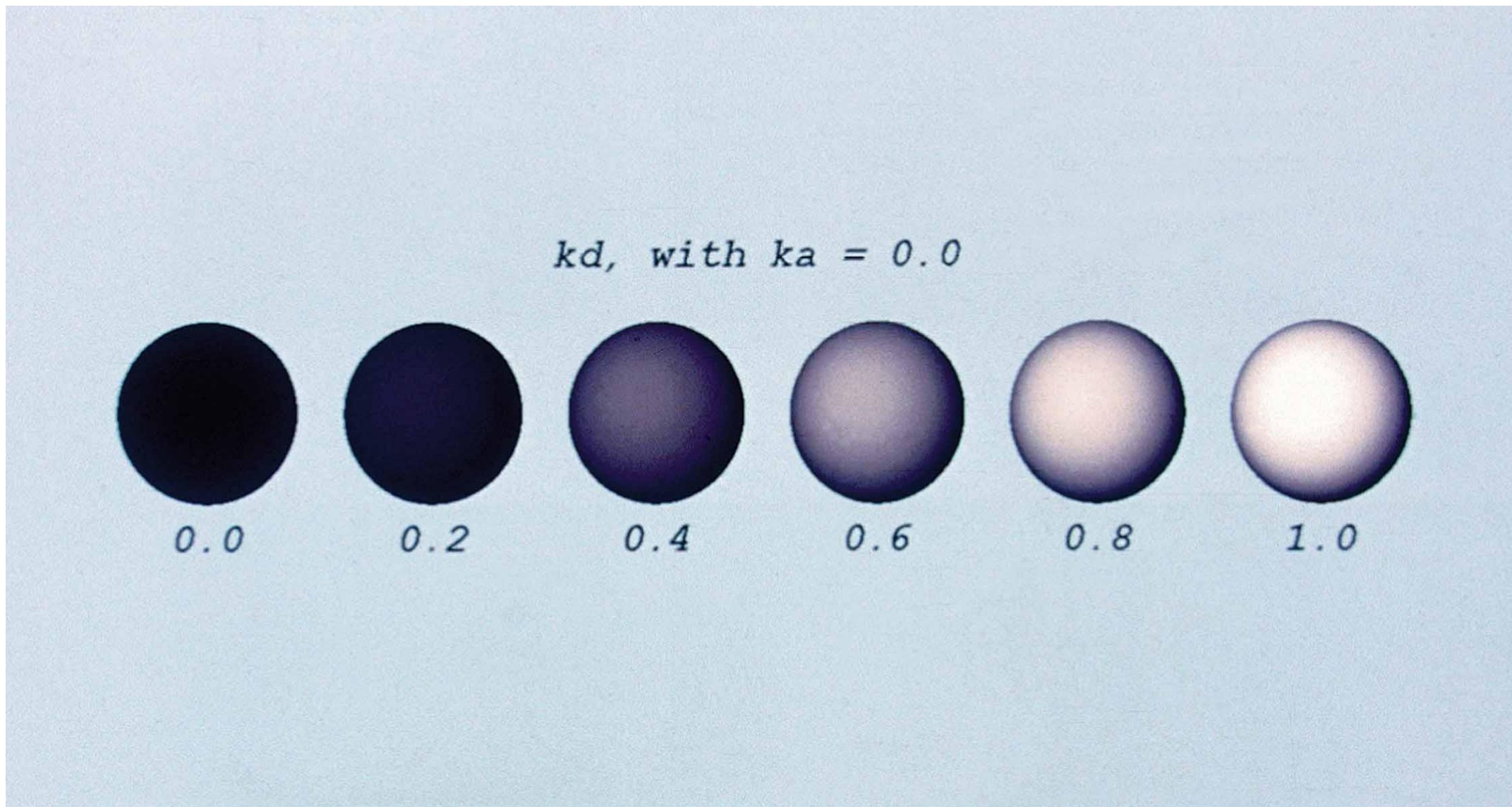
- 一个点光源在表面照明的漫反射公式:

$$I_{l,diff} = \begin{cases} k_d I_l (N \cdot L) & N \cdot L > 0 \\ 0.0 & N \cdot L \leq 0 \end{cases}$$

- $L$ 为指向点光源的单位方向向量

$$L = \frac{P_{source} - P_{surf}}{|P_{source} - P_{surf}|}$$

# 单个点光源照明下产生的漫反射



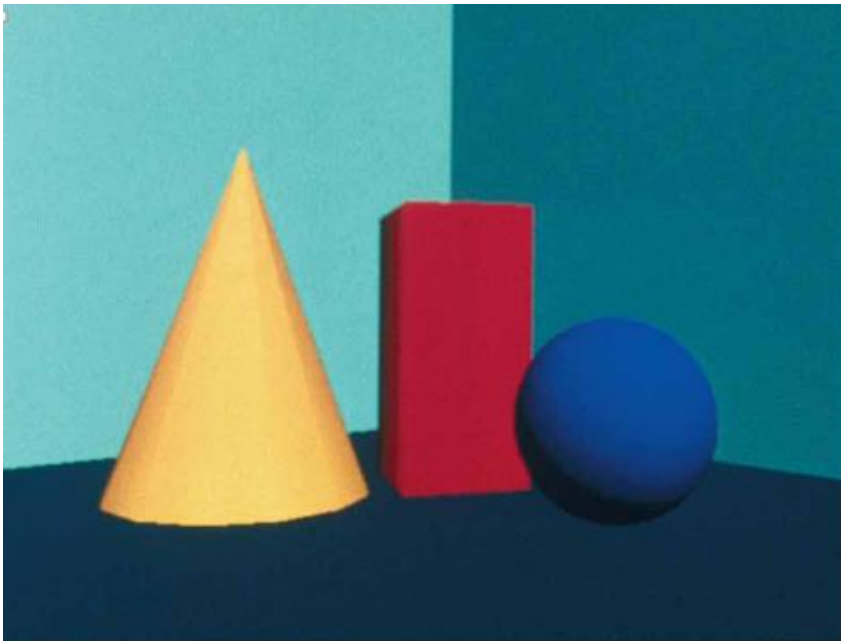
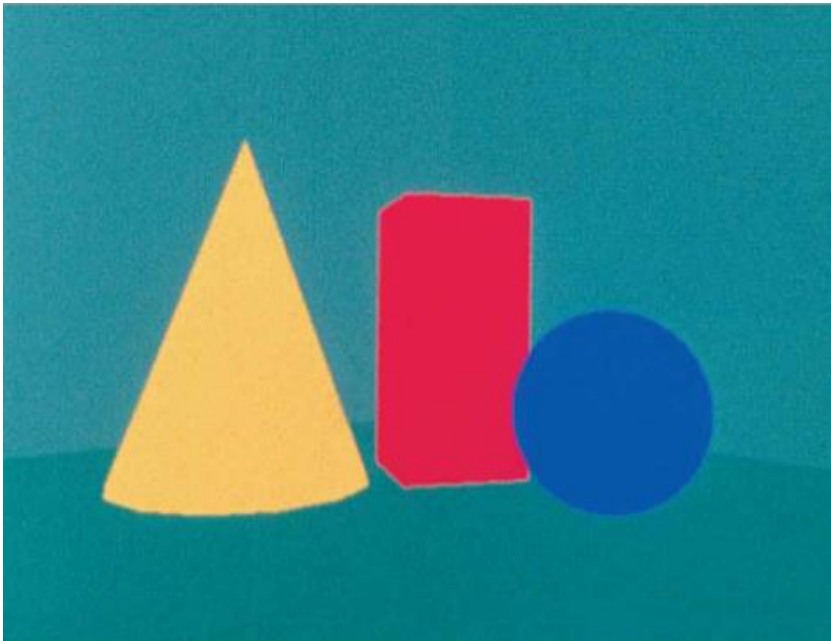
# 漫反射模型

- 全部漫反射:

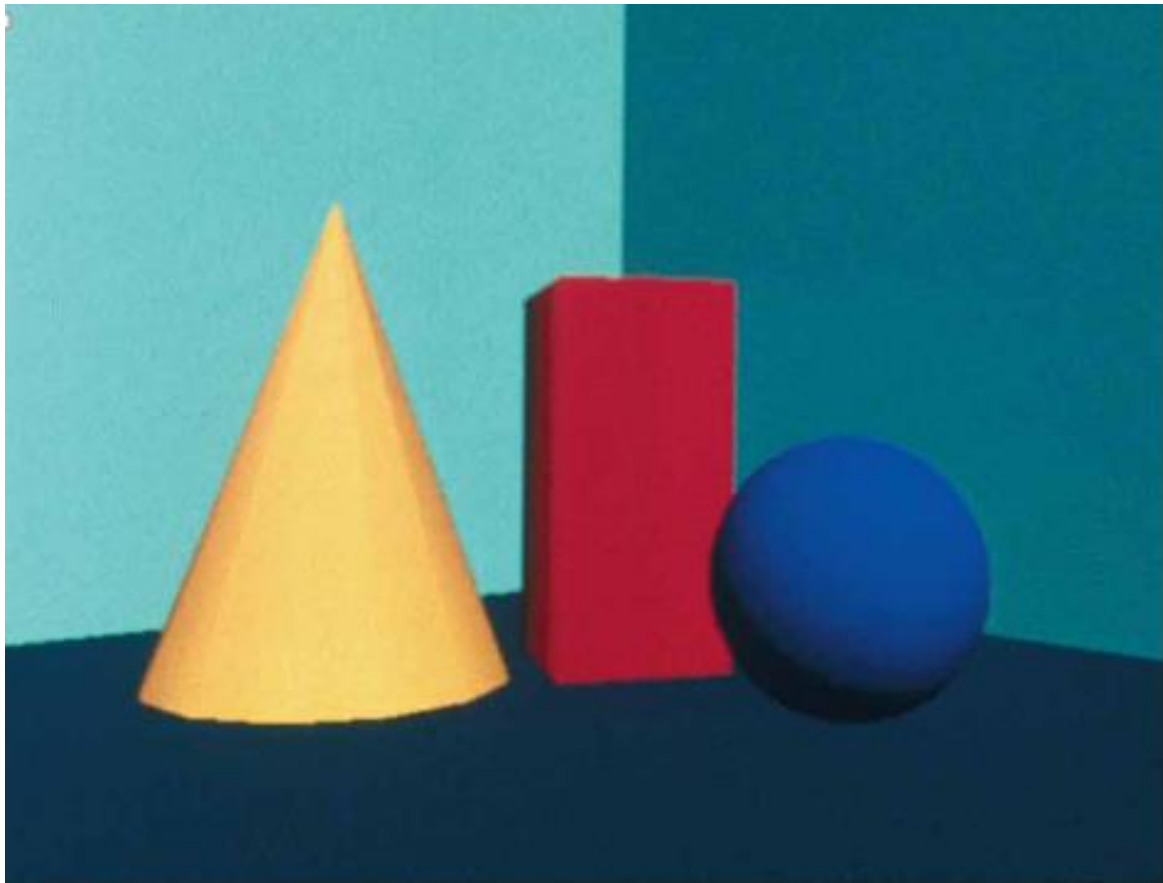
$$I_{diff} = \begin{cases} k_a I_a + k_d I_l (N \cdot L) & N \cdot L > 0 \\ k_a I_a & N \cdot L \leq 0 \end{cases}$$

- $k_a$ 为环境漫反射系数

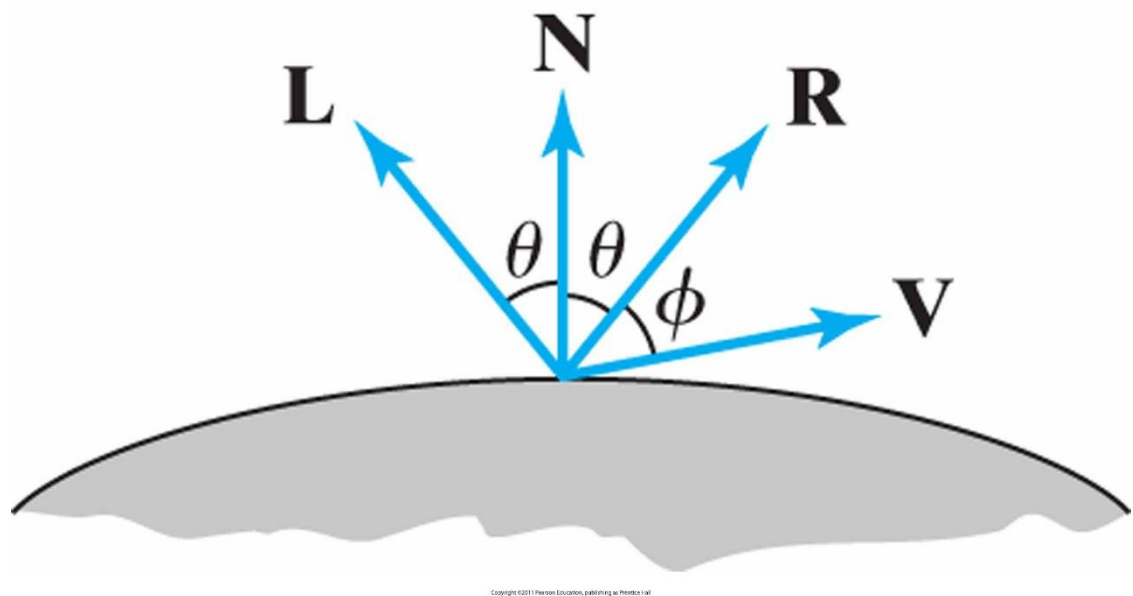
$$k_a \in [0, 1], k_d \in [0, 1]$$



# 镜面反射



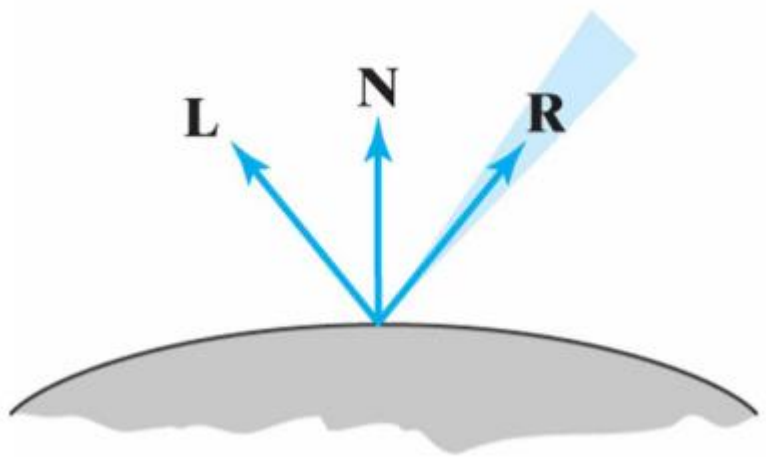
# 镜面反射



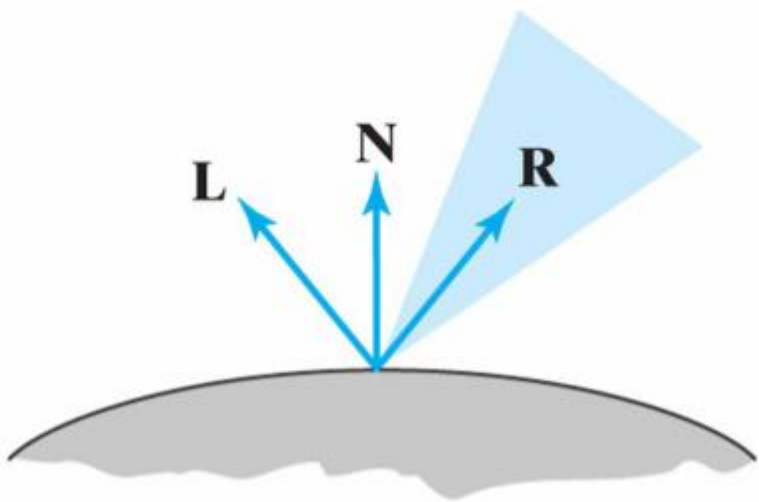
- 镜面反射：在光滑表面上看到的高光
- 镜面反射是由接近**镜面反射角**的一个**汇聚区域**内，入射光的全部或绝大部分成为反射光所导致的
- **V** – 指向视点的单位向量
- 理想的反射体 – **V**与**R**的夹角为0，仅当**V**与**R**重合时才能观察到反射光



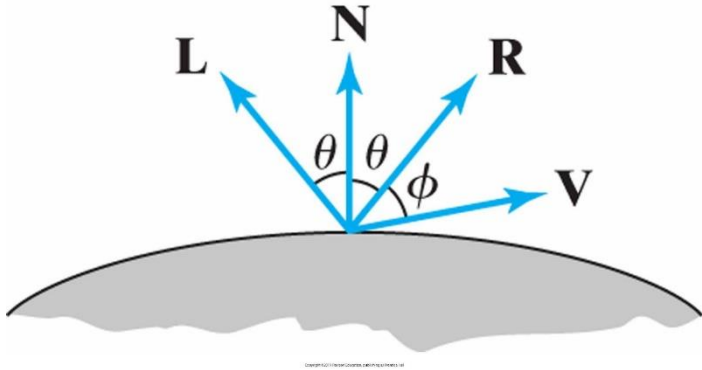
# 非理想反射体



- 反射方向分布在向量**R**周围的**有限范围**内
- 较**光滑**表面的镜面**反射**范围**较小**
- **粗糙**的对象表面有**较大**的**反射**范围



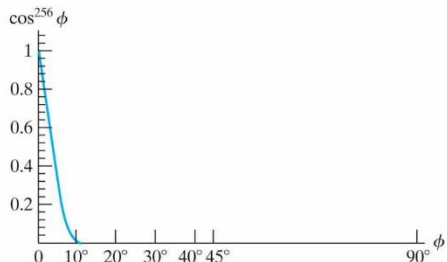
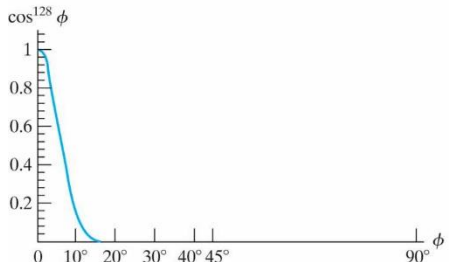
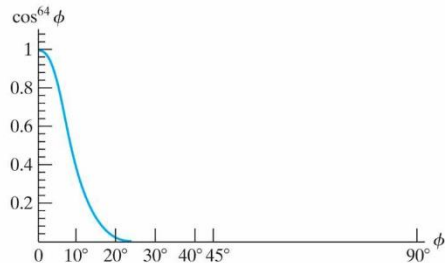
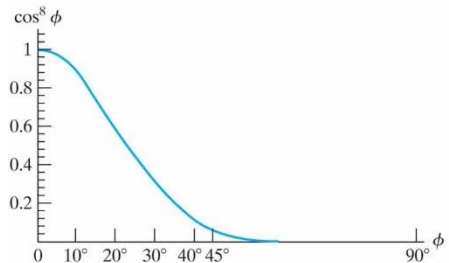
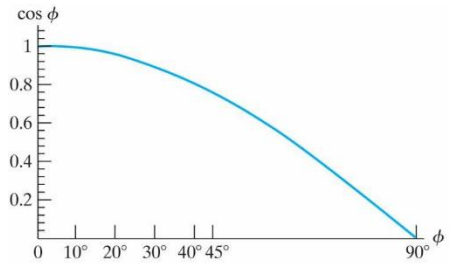
# Phong镜面反射模型



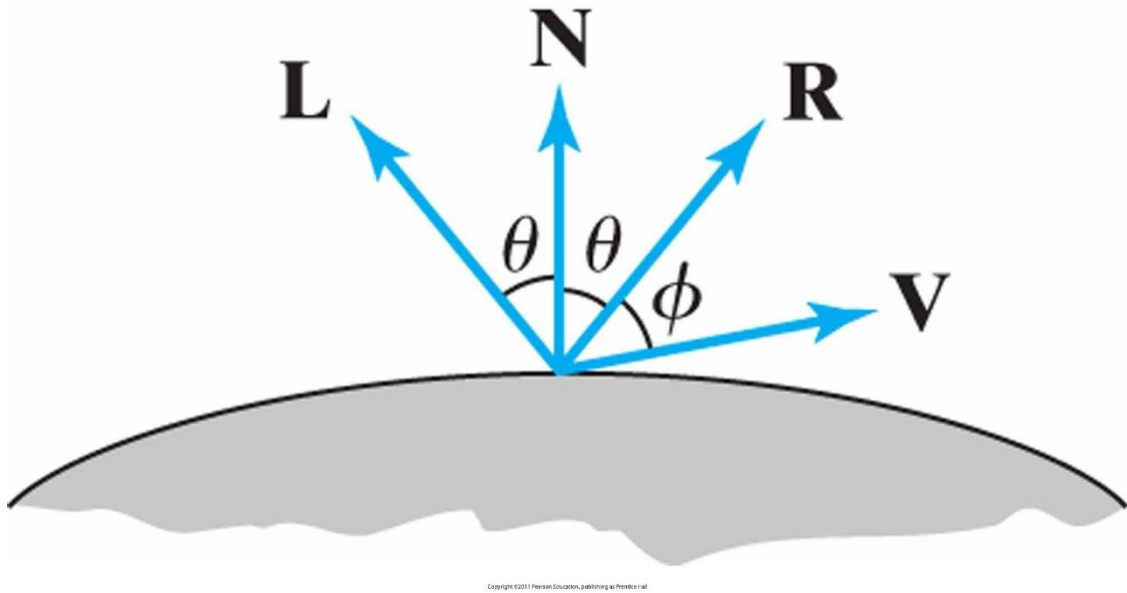
- Phong Bui Tuong提出计算镜面范围的经验公式
- Phong镜面反射模型 – 镜面反射光强度与  $\cos^{n_s} \phi$  成正比

$$I_{l,spec} \propto I_l \cos^{n_s} \phi$$

- $n_s$  – 镜面反射参数，由镜面表面材质决定。光滑表面  $n_s$  值较大，粗糙表面  $n_s$  值较小



# Phong镜面反射



- $\phi$ 为 $V$ 与 $R$ 之间夹角
- $\cos\phi = V \cdot R$
- 若 $V$ 和 $L$ 位于法向量 $N$ 的同一侧或光源在表面的后面，表面显示中不会有镜面反射效果

$$I_{l,spec} = \begin{cases} k_s I_l (V \cdot R)^{n_s} & V \cdot R > 0 \text{ 和 } N \cdot L > 0 \\ 0.0 & V \cdot R \leq 0 \text{ 和 } N \cdot L \leq 0 \end{cases}$$

$k_s$  – **镜面反射系数**，有镜面表面材质属性，以及其他因素（极性、入射光线颜色）决定

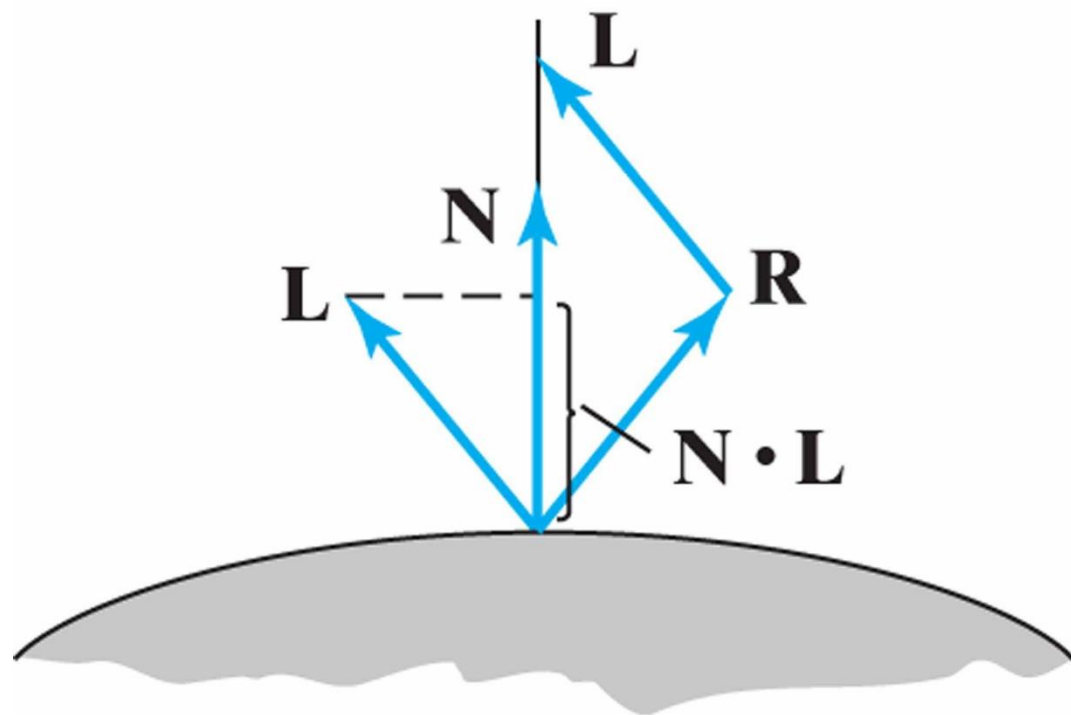


# Phong镜面反射模型

- 反射向量 $\mathbf{R}$ 计算:

$$\mathbf{R} + \mathbf{L} = (2\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) \mathbf{N}$$

$$\mathbf{R} = (2\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) \mathbf{N} - \mathbf{L}$$

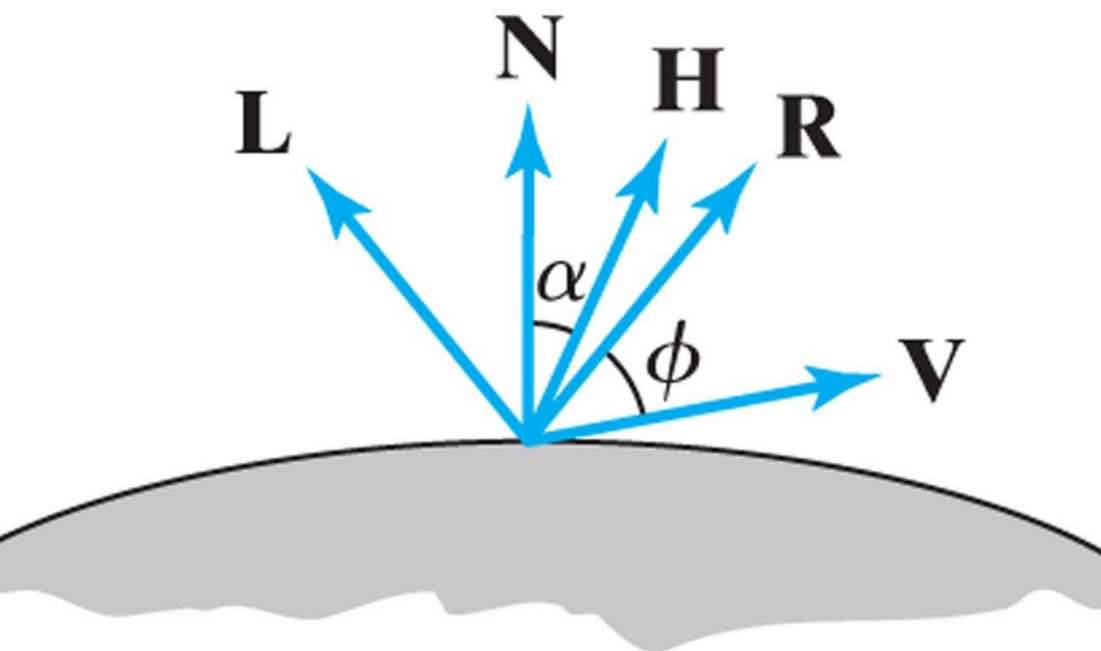


Copyright © 2011 Pearson Education, publishing as Prentice Hall

# Phong镜面反射简化模型

- $L$ 与 $V$ 间的半角向量 $H$ 来计算镜面反射范围

$$H = \frac{L + V}{|L + V|}$$



- 以 $\cos\alpha$ 替代 $\cos\phi$
- 以 $N \cdot H$ 替代 $V \cdot R$

$$I_{l,spec} = \begin{cases} k_s I_l (V \cdot R)^{n_s} & V \cdot R > 0 \text{ 和 } N \cdot L > 0 \\ 0.0 & V \cdot R \leq 0 \text{ 和 } N \cdot L \leq 0 \end{cases}$$

# Phong镜面反射

- Phong计算量:

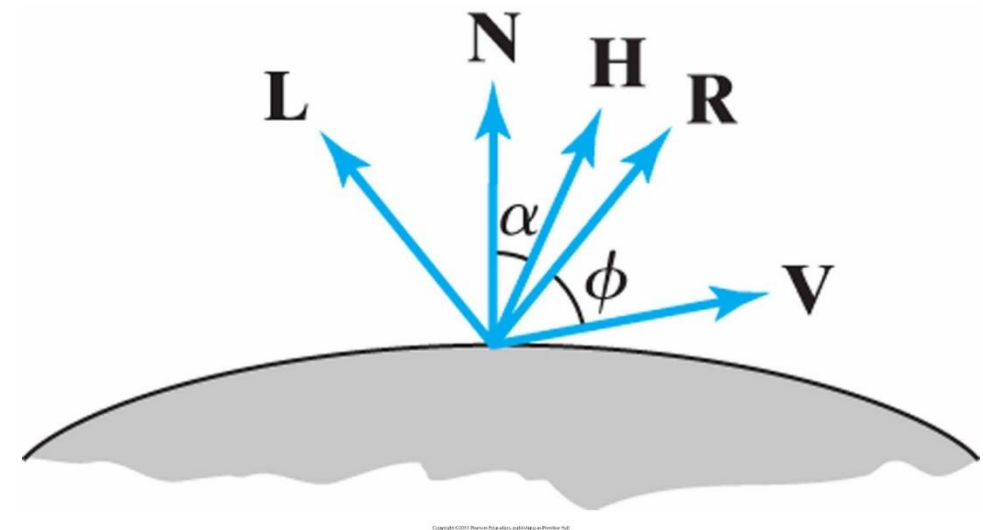
$$I_{l,spec} = \begin{cases} k_s I_l (\mathbf{V} \cdot \mathbf{R})^{n_s} & \mathbf{V} \cdot \mathbf{R} > 0 \text{ 和 } \mathbf{N} \cdot \mathbf{L} > 0 \\ 0.0 & \mathbf{V} \cdot \mathbf{R} \leq 0 \text{ 和 } \mathbf{N} \cdot \mathbf{L} \leq 0 \end{cases}$$

- 每次计算 $\mathbf{V}$ :

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{P}_{source} - \mathbf{P}_{surf}}{|\mathbf{P}_{source} - \mathbf{P}_{surf}|}$$

- 如果使用固定的 $\mathbf{V} = (0.0, 0.0, 1.0)$ ，所花时间少，但真实感不够好

# Phong镜面反射简化模型



- 使用向量 $L$ 与 $V$ 间的半角向量 $H$ 来计算镜面反射范围，可以得到简化的Phong模型：

$$H = \frac{L + V}{|L + V|}$$

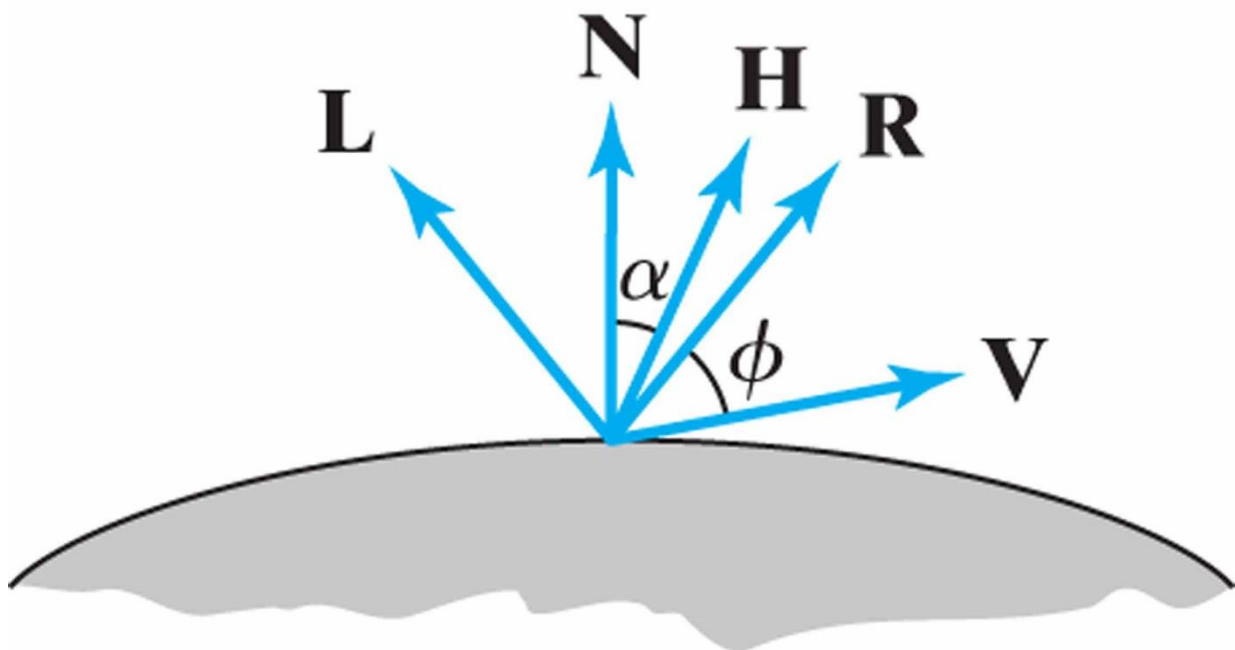
$$I_{l,spec} = k_s I_l (V \cdot R)^{n_s}$$

- 只需要用 $N \cdot H$ 替代 $V \cdot R$
- 经验性估算 $\cos \alpha$ 来替代 $\cos \phi$

# Phong镜面反射简化模型

- 非平面表面， $N \cdot H$ 比 $V \cdot R$ 所需计算量较少
  - 因为在每个表面点的 $R$ 计算包含变化的 $N$ 向量  $R = (2N \cdot L)N - L$
  - 若观察者与光源离对象表面足够远，且 $V$ 与 $L$ 均为常量，则面上所有点的 $H$ 也为常量

$$H = \frac{L + V}{|L + V|}$$



# 漫反射和镜面反射合并

- 对于单点光源，光照表面上某点处的漫反射和镜面反射为：



$$I = I_{diff} + I_{spec}$$

$$= k_a I_a + k_d I_l (N \cdot L) + k_s I_l (N \cdot H)^{n_s}$$

环境光

漫反射

镜面反射

# 漫反射和镜面反射合并

- 对于多光源，光照表面上某点处的漫反射和镜面反射为：

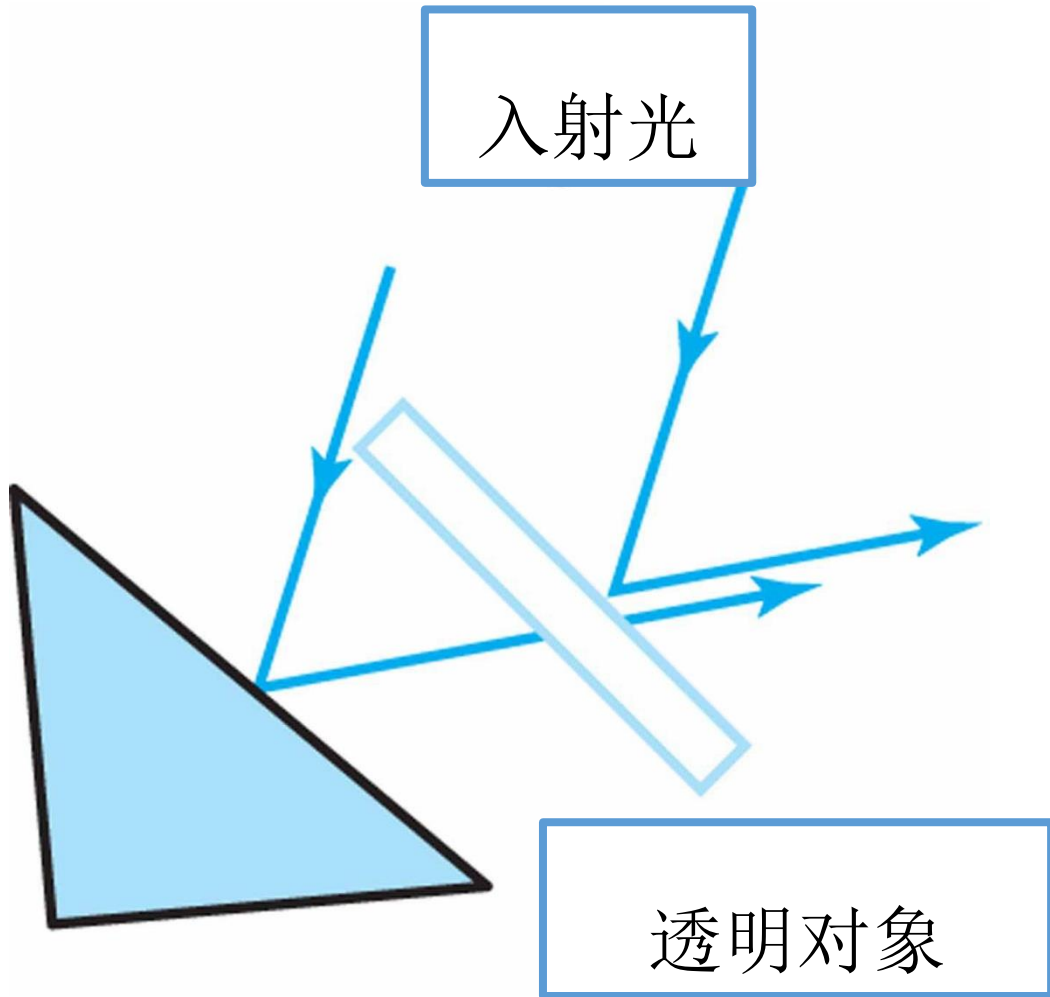
$$\begin{aligned} I &= I_{ambdiff} + \sum_{l=1}^n \left( I_{l,diff} + I_{l,spec} \right) \\ &= k_a I_a + \sum_{l=1}^n I_l \left[ k_d (N \cdot L) + k_s (N \cdot H)^{n_s} \right] \end{aligned}$$

# 光照模型

1. 光源
2. 基本光照模型（反射）
3. 透射模型



# 透明表面



Copyright ©2011 Pearson Education, publishing as Prentice Hall

- 透明表面 – 可透过该表面看到其后面的东西，如窗玻璃
- 透明对象表面同时产生反射光和折射光



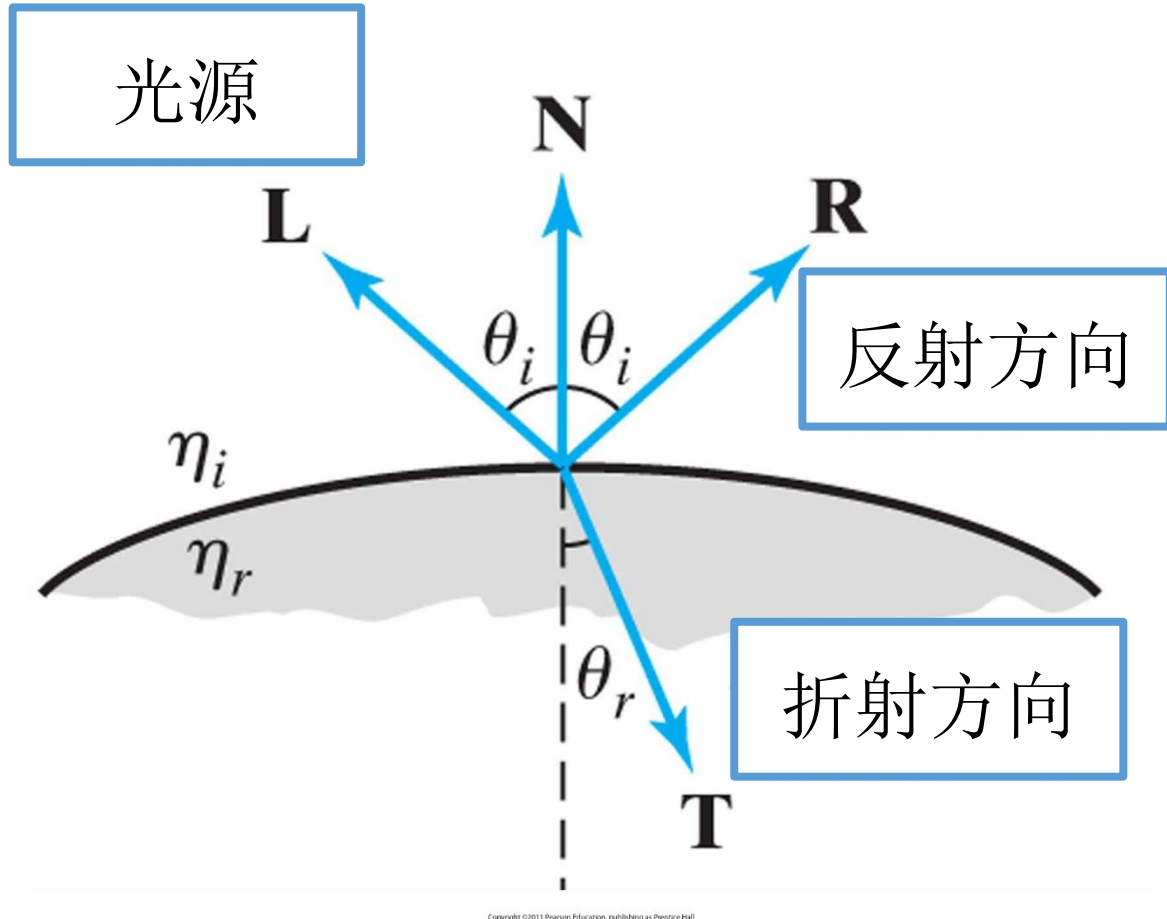
# 光折射

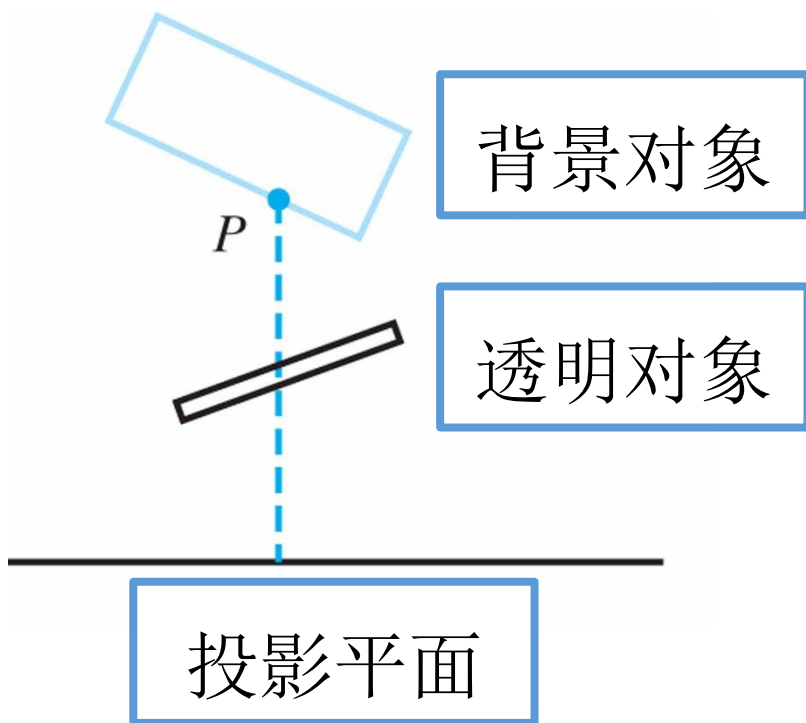
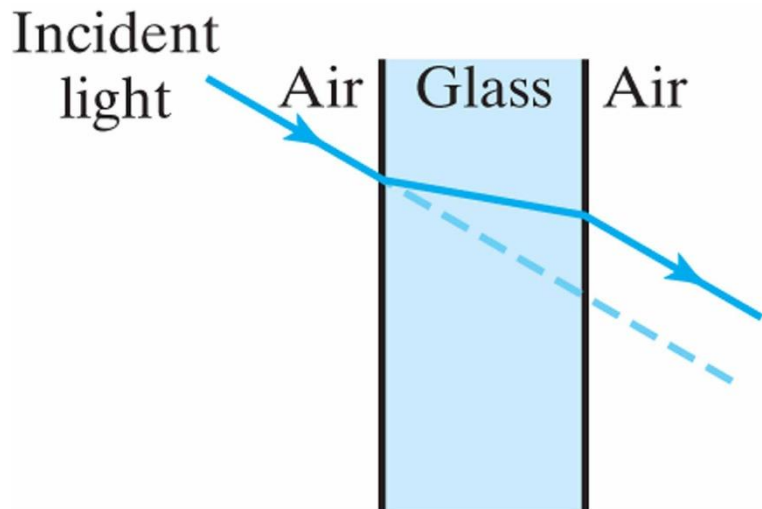
- 折射角 $\theta_r$ 计算根据Snell公式:

$$\sin \theta_r = \frac{\eta_i}{\eta_r} \sin \theta_i$$

- 折射方向向量 $\mathbf{T}$ :

$$\mathbf{T} = \left( \frac{\eta_i}{\eta_r} \cos \theta_i - \cos \theta_r \right) \mathbf{N} - \frac{\eta_i}{\eta_r} \mathbf{L}$$





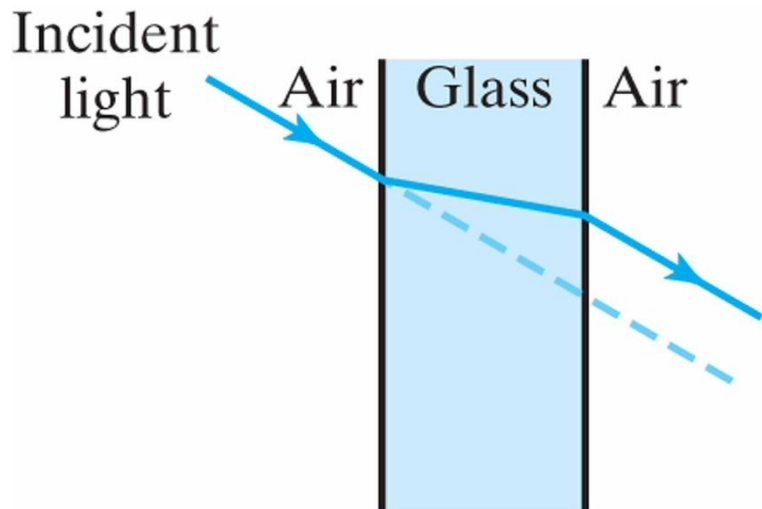
# 基本的透明模型

- 假设：
  - 不考虑折射导致的路径平移
  - 各对象间的折射率不变
  - 折射角=入射角

- 对象表面的**折射光强**：

$$I = k_t I_{trans}$$

- $I_{trans}$  是到达该点背后的光强
- $k_t$  是该点的透射系数



# 基本的透明模型

- 假设：
  - 不考虑折射导致的路径平移
  - 各对象间的折射率不变
  - 折射角=入射角

- 对象表面的**总光强**：

$$I = (1 - k_t) I_{\text{refl}} + k_t I_{\text{trans}}$$

- $I_{\text{refl}}$  - 该点反射的光强
- $k_t$  - 该点的透射系数

