



计算机图形学

光照和明暗处理

陈中贵
厦门大学

Graphics@XMU <http://graphics.xmu.edu.cn/>

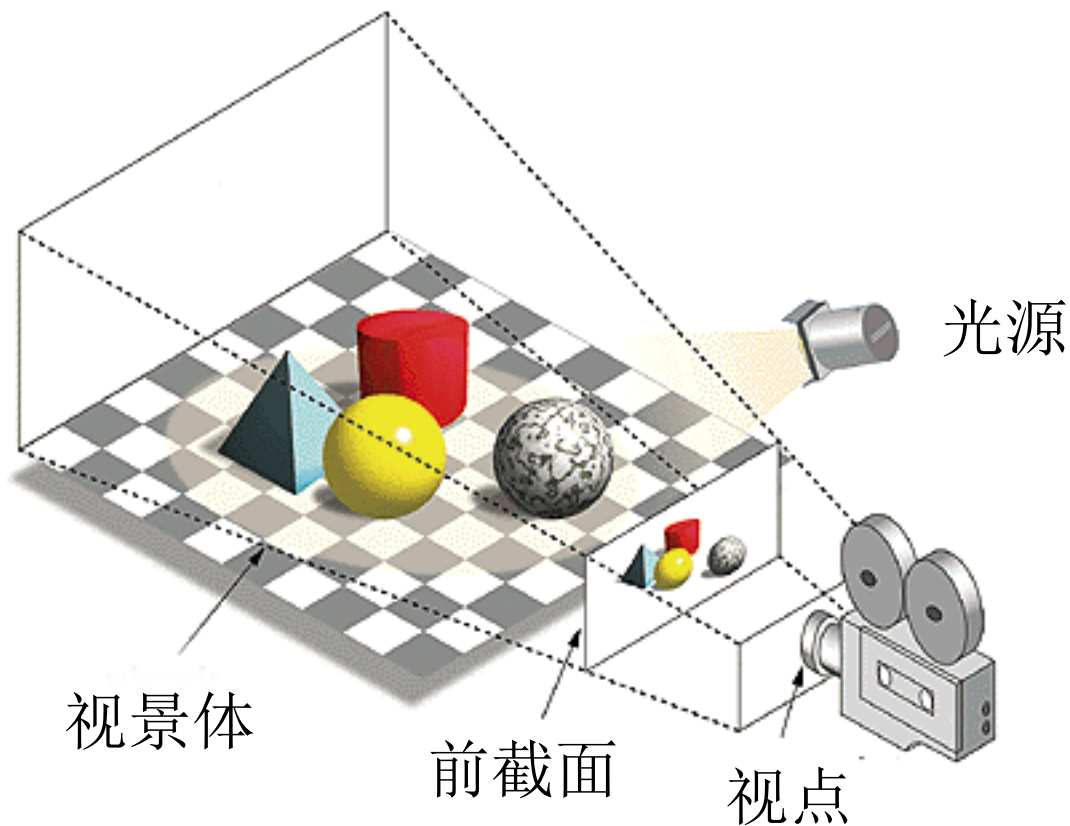
第二节 Phong光照模型

- Phong光照模型
 - 模型
 - 向量计算



三维场景

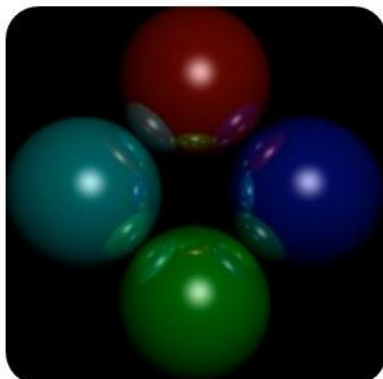
- 对象、光源、相机



光照模型

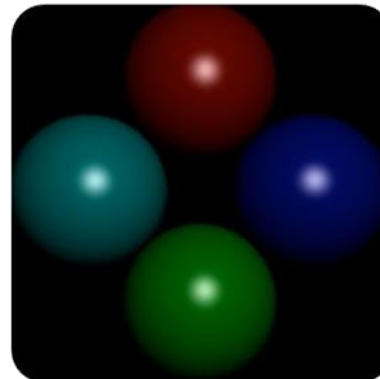
- 全局光照模型

- 考虑到环境中所有表面和光源相互作用
- 效果非常好
- 速度慢、离线渲染
- 例：光线跟踪算法



- 局部光照模型

- 只考虑光源到模型表面的照射效果
- 效果可接受
- 速度快、实时交互
- 例：Phong光照模型



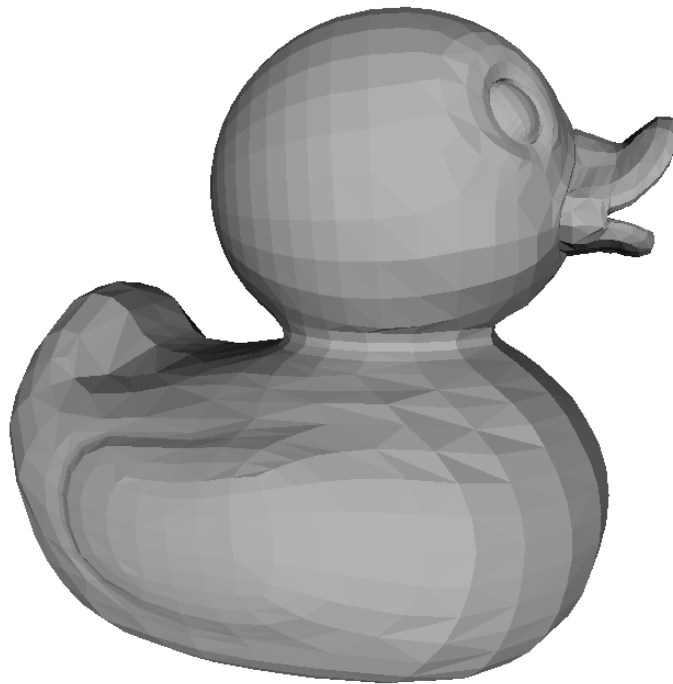
真实照片or虚拟场景？



光线跟踪算法，渲染时间近一个小时

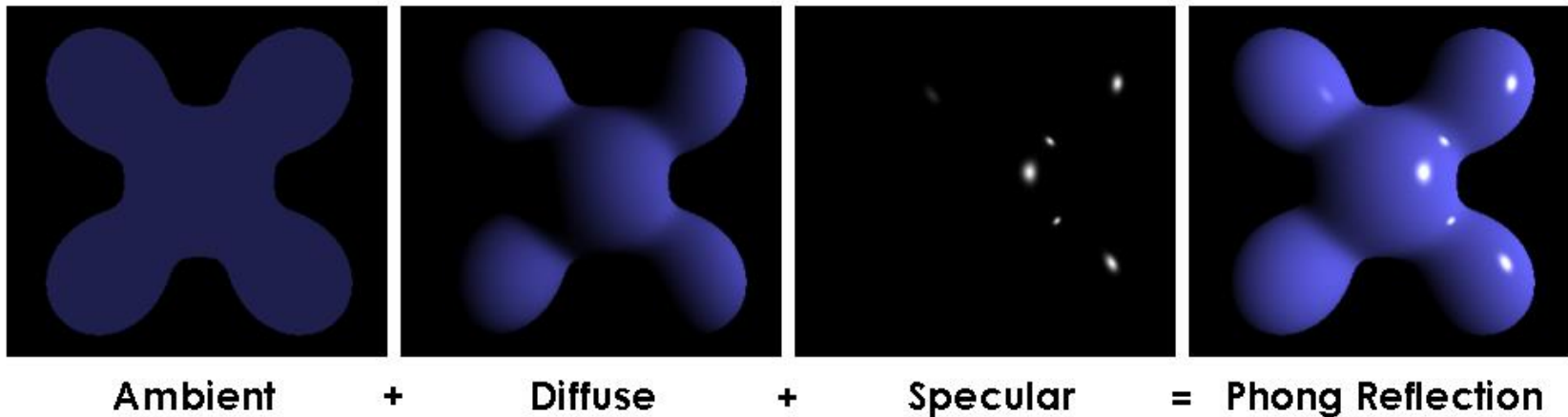
Phong光照模型

- 经验模型，尽量模拟真实光照效果
- 思考：如何呈现物体表面明暗不同？



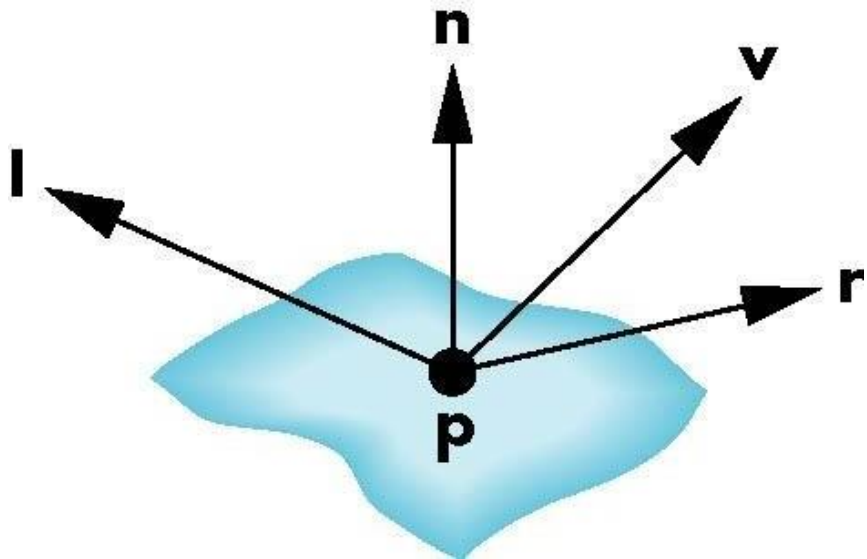
Phong光照模型

- 可以快速计算的局部光照模型
- 有三类分量
 - 环境光 (Ambient) : 场景中的其他间接光照
 - 漫反射 (Diffuse) : 散射部分 (大但不光亮)
 - 高光反射 (Specular) : 镜面反射部分 (小而亮)



Phong光照模型

- 使用四个向量
 - 入射光方向 \mathbf{l}
 - 视点方向 \mathbf{v}
 - 法向 \mathbf{n}
 - 理想反射方向 \mathbf{r}



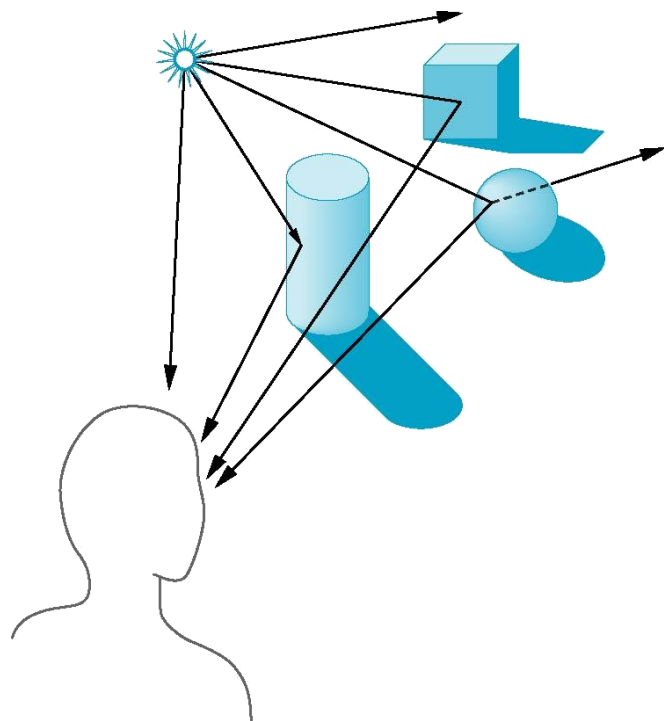
Phong光照模型 – 环境光

- 环境光由场景中光源与对象间的多次相互作用而导致

- 环境光模型：

$$I_{ambient} = k_a \cdot L_a$$

其中： k_a 反射系数，
 L_a 环境光强度



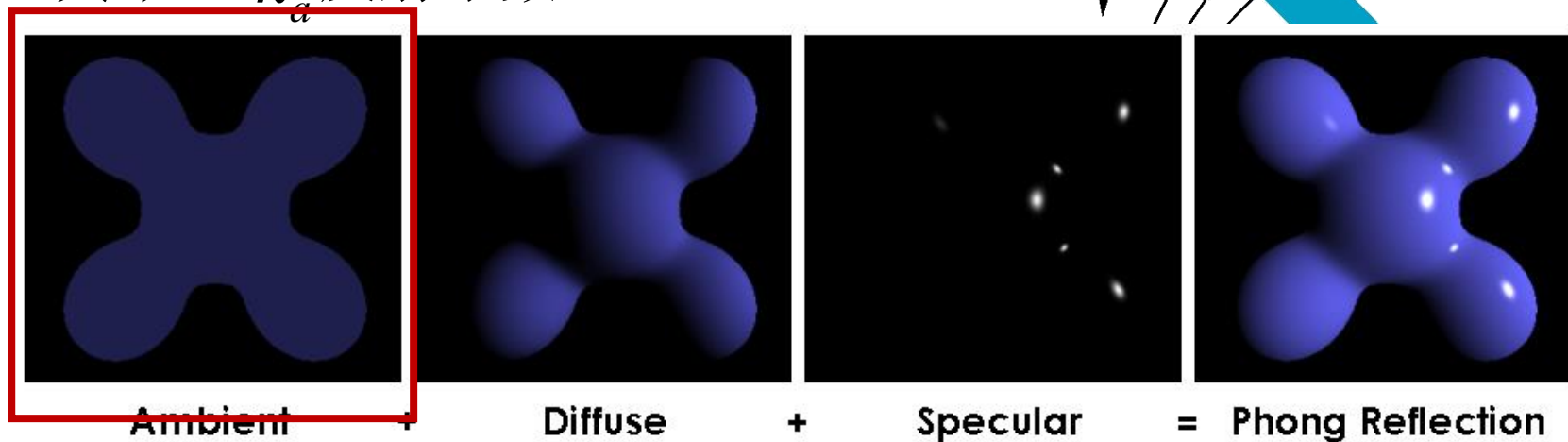
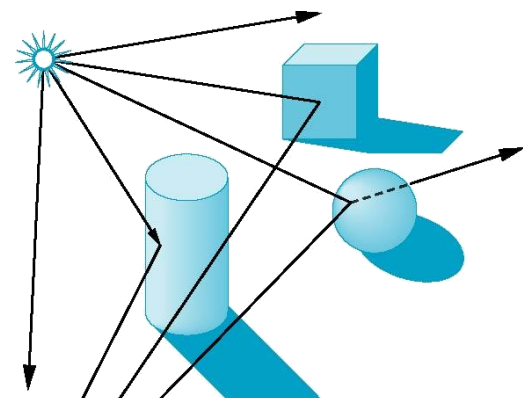
Phong光照模型 – 环境光

- 环境光由场景中光源与对象间的多次相互作用而导致

- 环境光模型：

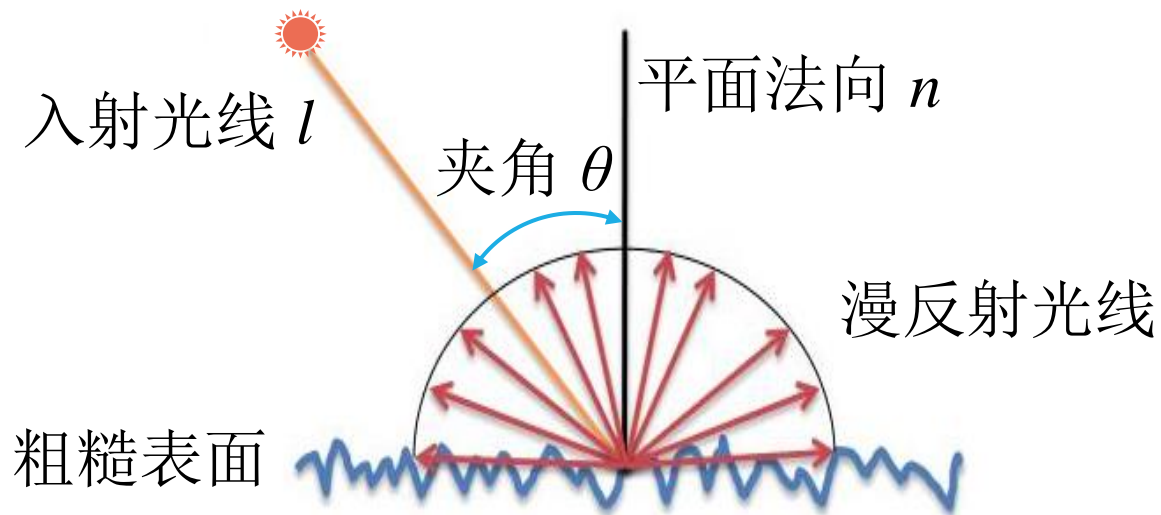
$$I_{ambient} = k_a \cdot L_a$$

其中： k_a 反射系数，



Phong光照模型

- 漫反射光
 - 模拟粗糙的物体表面
 - 光向各个方向均匀地散射



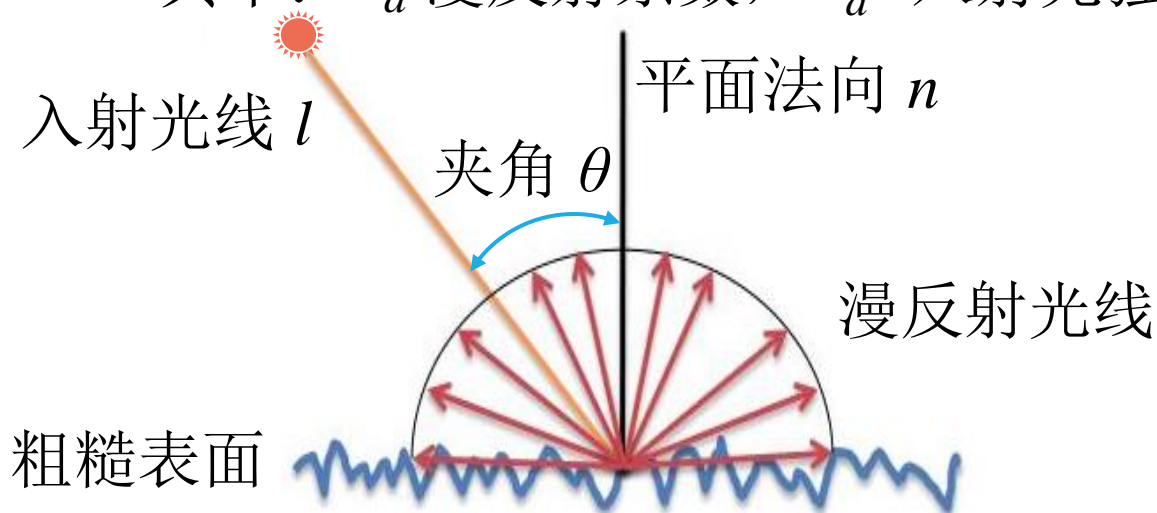
Phong光照模型 – 漫反射光强

- 正比于入射光与物体表面竖直的分量

- 即反射光强 $\sim \cos \theta$

- 漫反射光强: $I_{diffuse} = k_d \cdot \cos \theta \cdot L_d$

其中: k_d 漫反射系数, L_d 入射光强度



Phong光照模型 – 漫反射光强

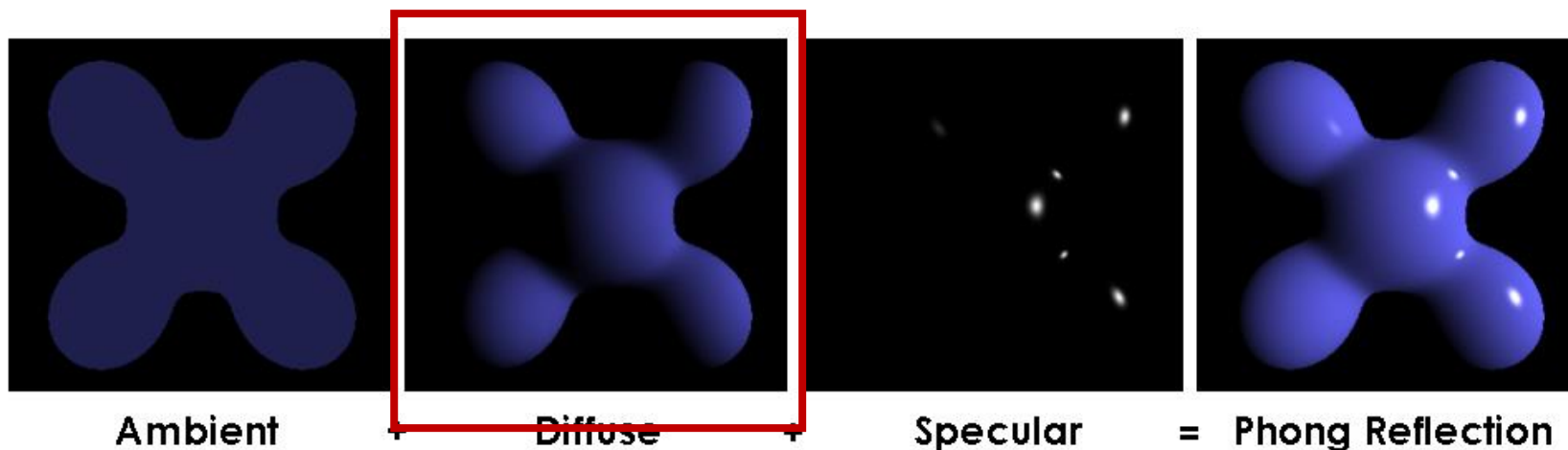
- 正比于入射光与物体表面竖直的分量

- 即反射光强 $\sim \cos \theta$

- 漫反射光强:

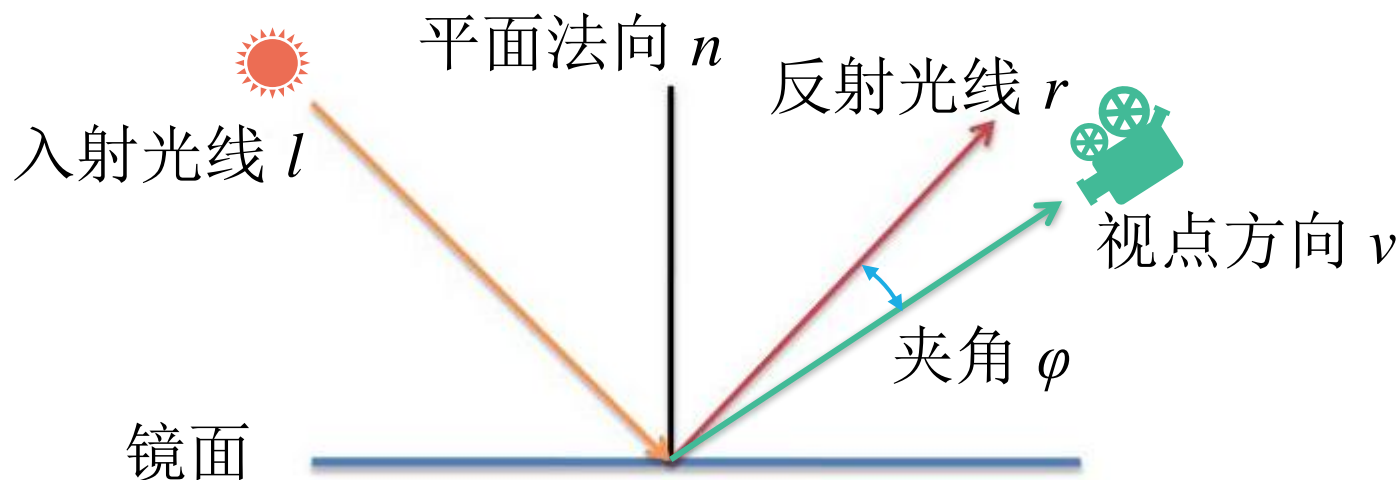
$$I_{diffuse} = k_d \cdot \cos \theta \cdot L_d$$

其中: k_d 漫反射系数, L_d 入射光强度



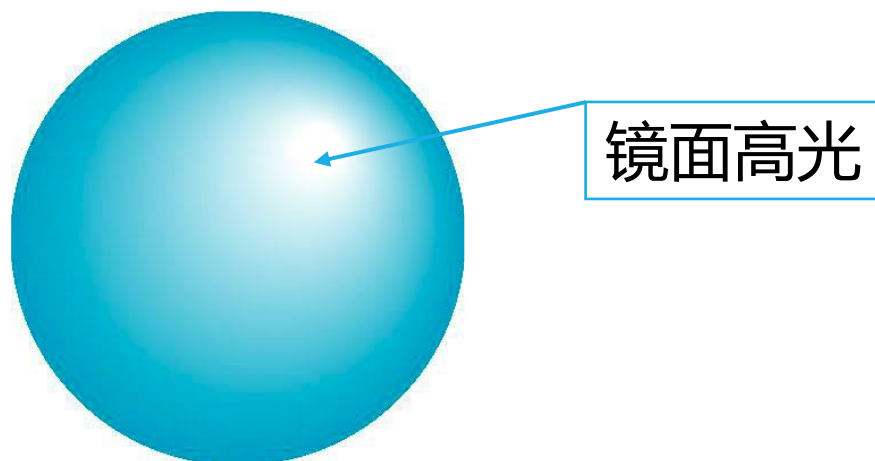
Phong光照模型 – 镜面光

- 理想的镜面反射



Phong光照模型 – 镜面光

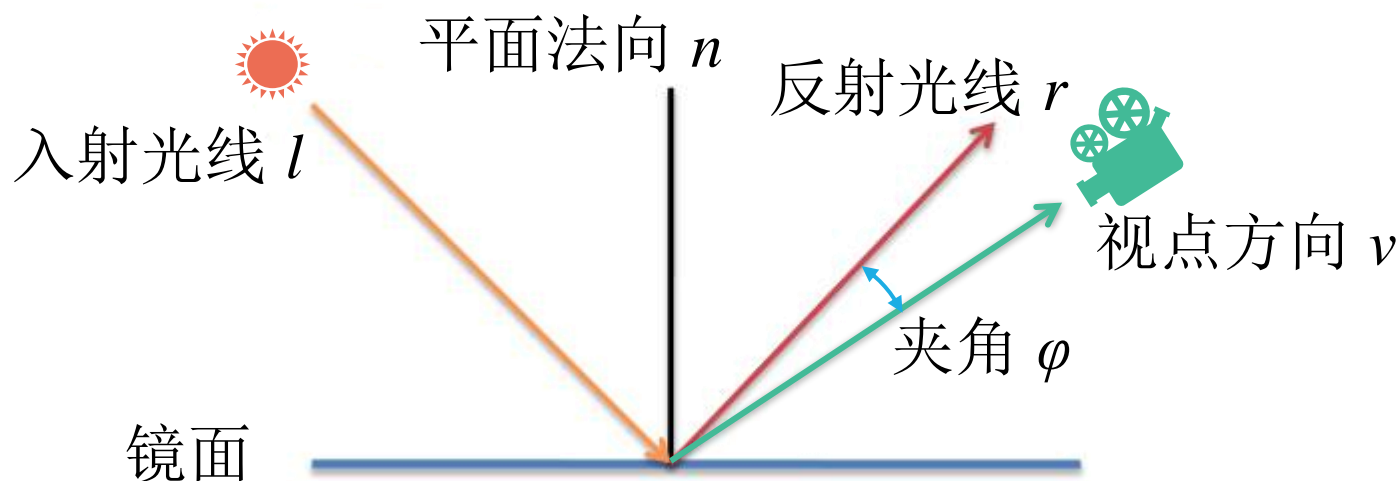
- 大多数曲面既不是理想的漫反射型曲面，也不是真正的镜面
- 光滑表面显出镜面高光，因为入射光反射后，绝大多数集中在理想反射方向周围



Phong光照模型 – 镜面光

• 镜面光强度: $I_{\text{specular}} = k_s \cdot L_s \cdot \cos^\alpha \varphi$

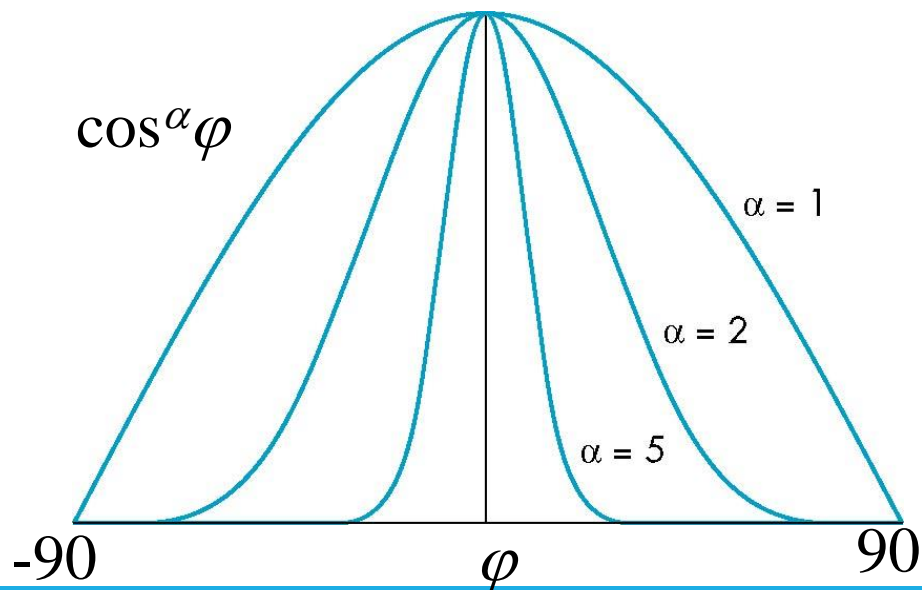
其中: k_s 镜面反射系数, L_s 入射光强度
 α 高光系数



Phong光照模型 – 镜面光

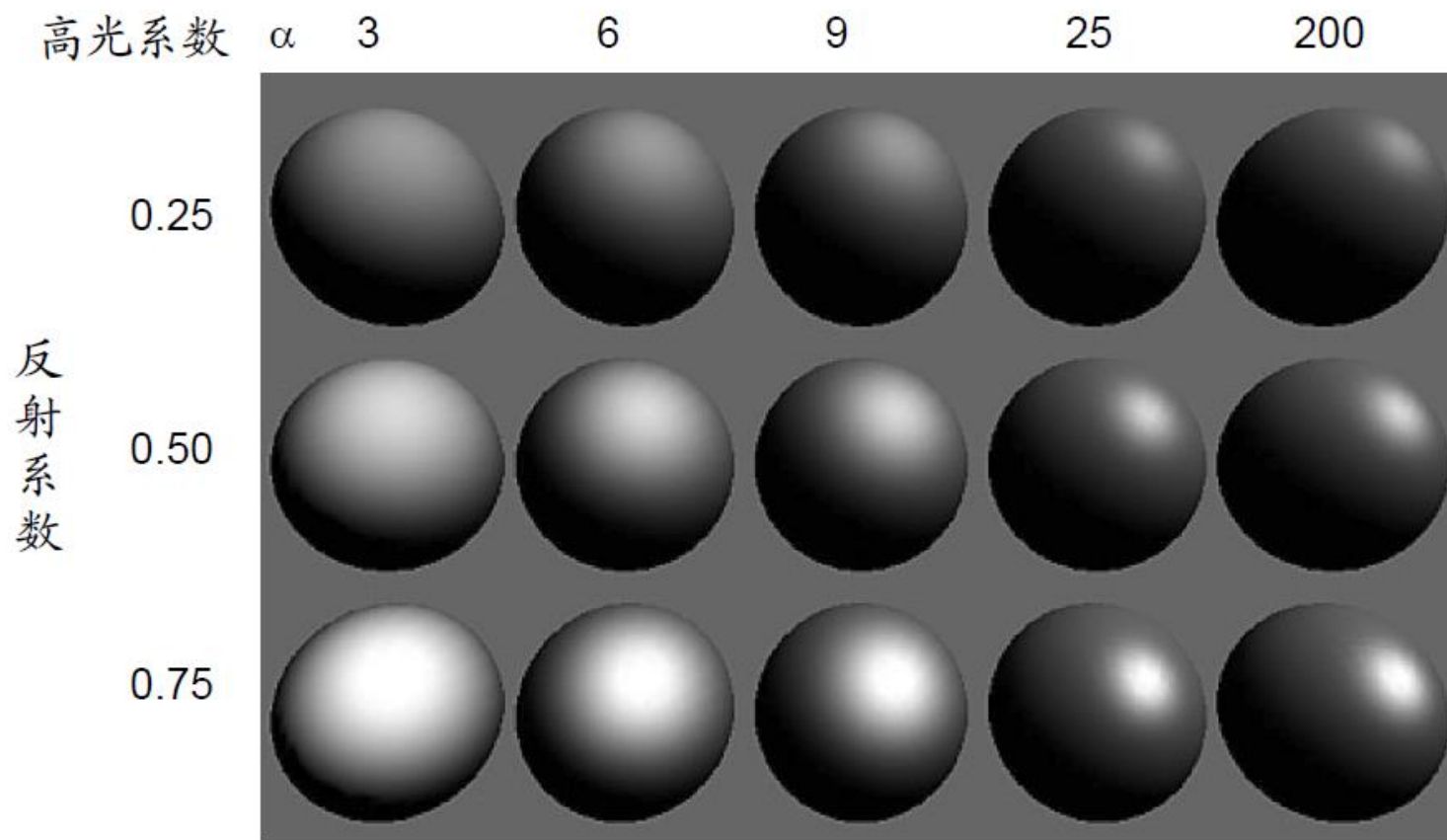
- 高光系数

- 金属材料, α 值介于100到200之间
- 塑料材料, α 值介于5到10之间
- 镜子, α 趋向无穷大



Phong光照模型 – 镜面光

- 镜面反射参数的影响

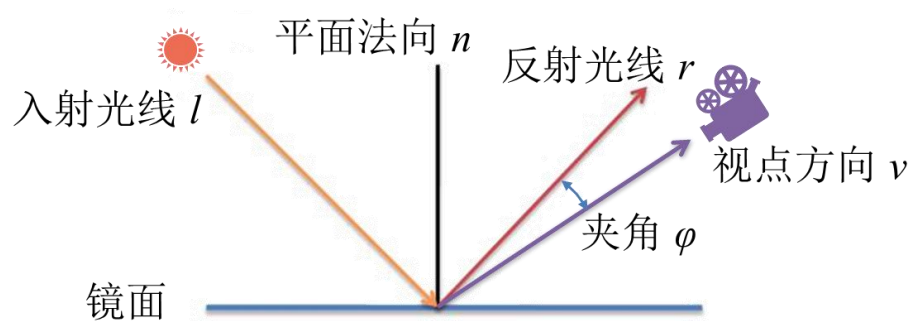
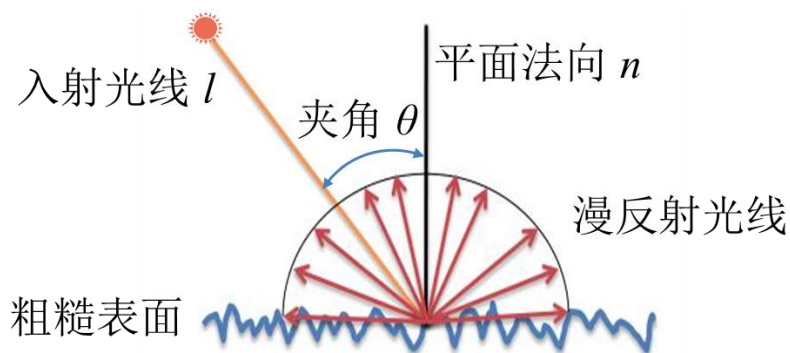


Phong光照模型

- 反射光强 = 漫反射光 + 镜面光 + 环境光

$$I_{total} = I_{diffuse} + I_{specular} + I_{ambient}$$

$$= k_d \cdot \cos \theta \cdot L_d + k_s \cdot L_s \cdot \cos^\alpha \varphi + k_a \cdot L_a$$

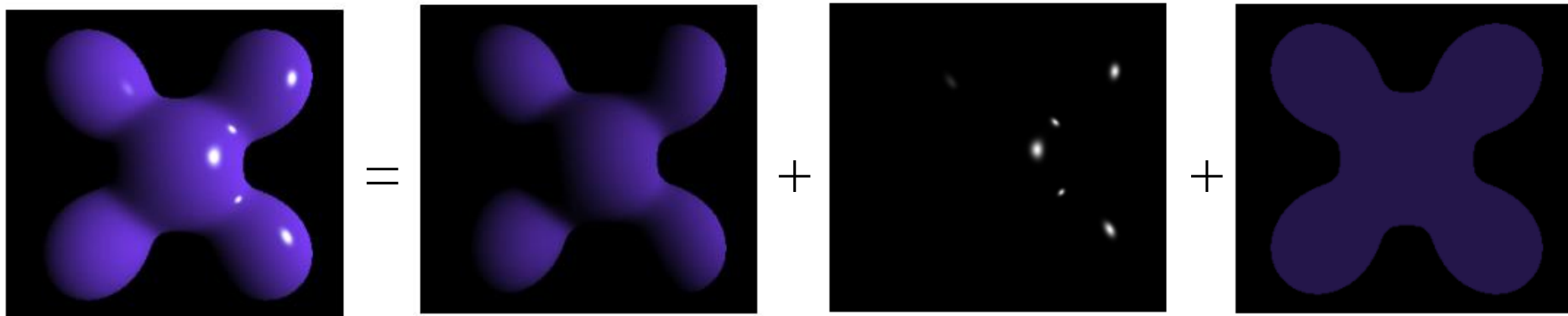


Phong光照模型

- 反射光强 = 漫反射光+镜面光+环境光

$$I_{total} = I_{diffuse} + I_{specular} + I_{ambient}$$

$$= k_d \cdot \cos \theta \cdot L_d + k_s \cdot L_s \cdot \cos^\alpha \varphi + k_a \cdot L_a$$



光源模型

- Phong模型假设点光源的三原色都有各自的环境光、漫反射光和镜面反射光
 - 用局部光照模型去模拟本质上全局的光照效果
 - 需要9个系数来描述光源在表面上点 p 处的光照属性, 即入射光属性:
 - $L_{ar}, L_{ag}, L_{ab}, L_{dr}, L_{dg}, L_{db}, L_{sr}, L_{sg}, L_{sb}$
 - 这里没考虑距离衰减因素

反射系数

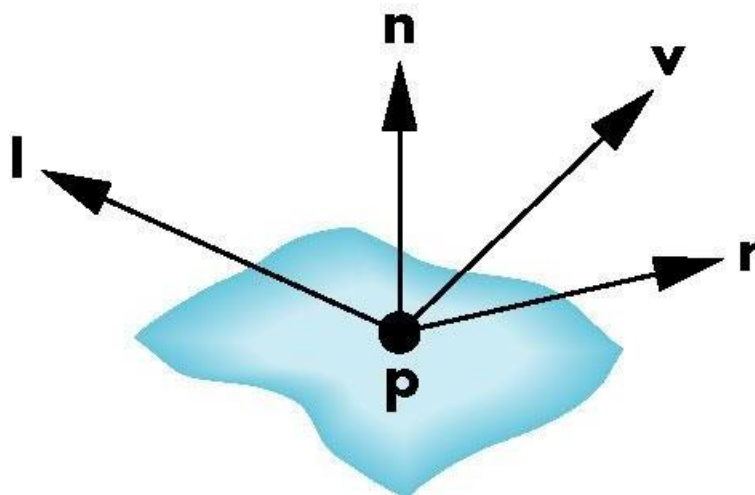
- 光照模型的前提是已知某点的入射光，通过某种方法求得在该点的反射光
- 假设光源的漫反射项中红光分量为 L_{dr} ，点 p 的反射率为 k_{dr} ，则光源在该点光强的贡献值为 $k_{dr} L_{dr}$
 - k_{dr} 与材料属性、表面朝向、光源方向以及光源与观察者距离有关
 - 9个反射系数

把各种分量叠加在一起

- 对于每个光源和每种颜色成分，**Phong光照模型**可以表示为(没有距离项)

$$I = k_d L_d \max(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}, 0) + k_s L_s \max((\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha, 0) + k_a L_a$$

- 对每个颜色分量，把所有光源贡献的值加在一起



距离项

- 从点光源到达对象表面的光强反比于两者之间距离的平方
- 向漫反射项和镜面项中添加形式为

$$1/(a + b d + c d^2)$$

的二次距离衰减因子，其中d表示距离

- 常数与线性项起到柔和点光源的效果

材料属性

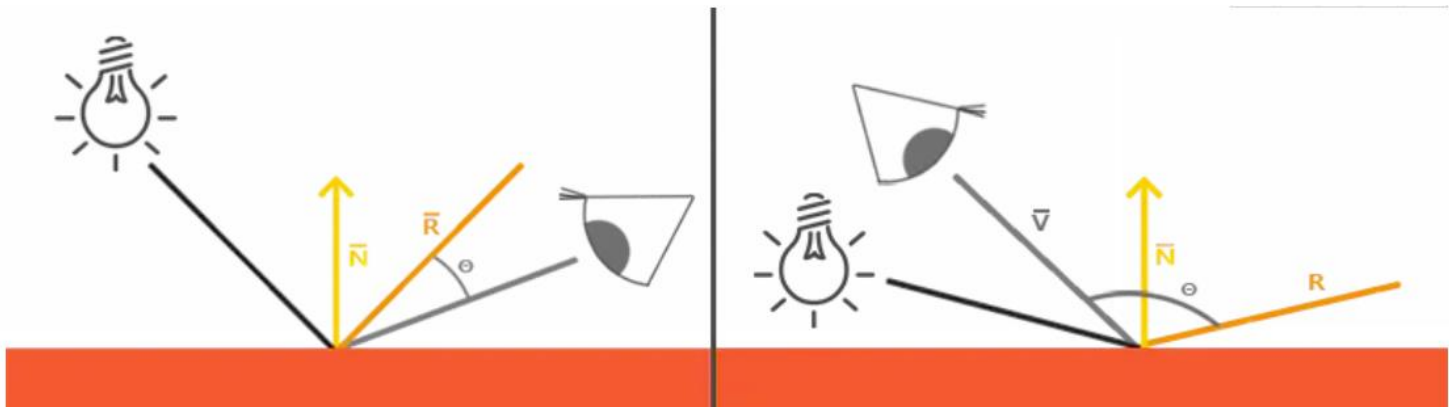
- 材料属性与光源属性相匹配
 - 九个反射系数
 - k_{dr} , k_{dg} , k_{db} , k_{sr} , k_{sg} , k_{sb} , k_{ar} , k_{ag} , k_{ab}
 - 高光系数 α

改进的Phong模型

- 在Phong模型中，镜面光项有一个问题，因为它需要为每个顶点计算一个新的反射向量和视点向量

$$I = k_d L_d \max(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}, 0) + k_s L_s \max((\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha, 0) + k_a L_a$$

- 观察向量和反射向量之间的夹角大于90度时，被截断

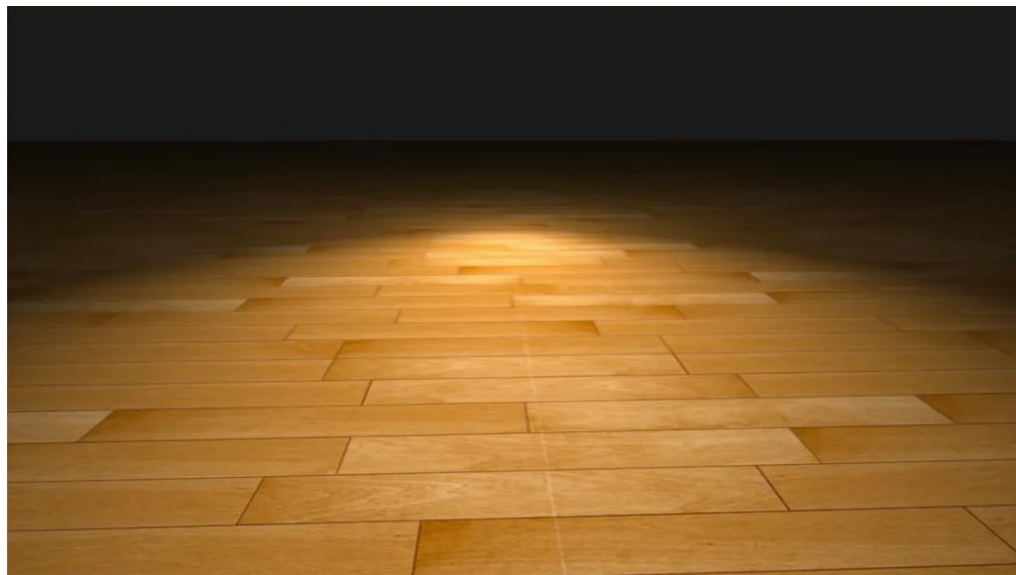


改进的Phong模型

- 在Phong模型中，镜面光项有一个问题，因为它需要为每个顶点计算一个新的反射向量和视点向量

$$I = k_d L_d \max(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}, 0) + k_s L_s \max((\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha, 0) + k_a L_a$$

- 观察向量和反射向量之间的夹角大于90度时，被截断



Blinn-Phong模型

- 在Phong模型中，镜面光项有一个问题，因为它需要为每个顶点计算一个新的反射向量和视点向量

$$I = k_d L_d \max(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}, 0) + k_s L_s \max((\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha, 0) + k_a L_a$$

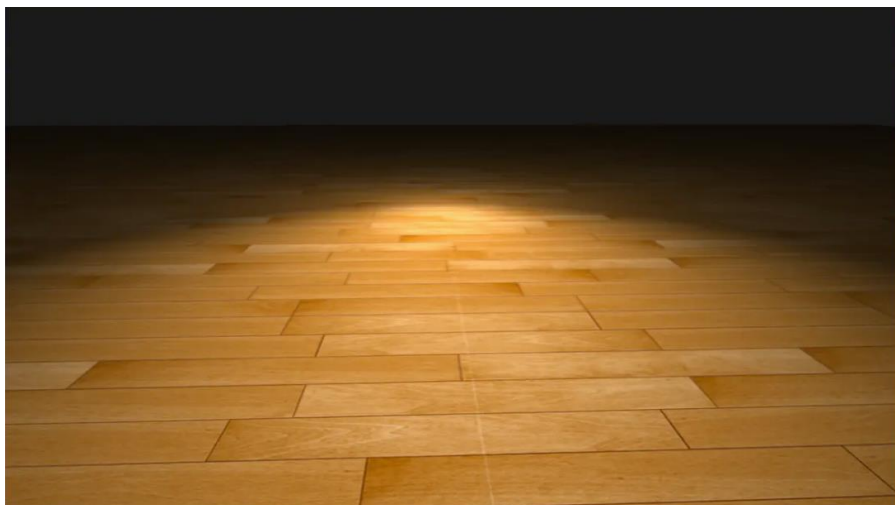
- 观察向量和反射向量之间的夹角大于90度时，被截断
- Blinn利用中值(halfway)向量给出了一个近似，从而使得效率更高

Blinn-Phong模型

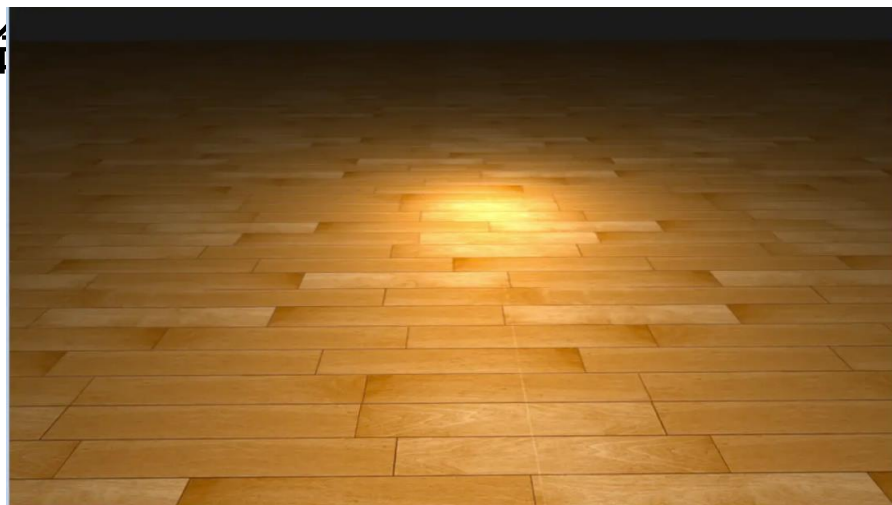
- 在Phong模型中，镜面光项有一个问题，因为它需要为每个顶点计算一个新的反射向量和视点向量

$$I = k_d L_d \max(\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}, 0) + k_s L_s \max((\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha, 0) + k_a L_a$$

- 观察向量和反射向量之间的夹角大于90度时，被截断



Phong



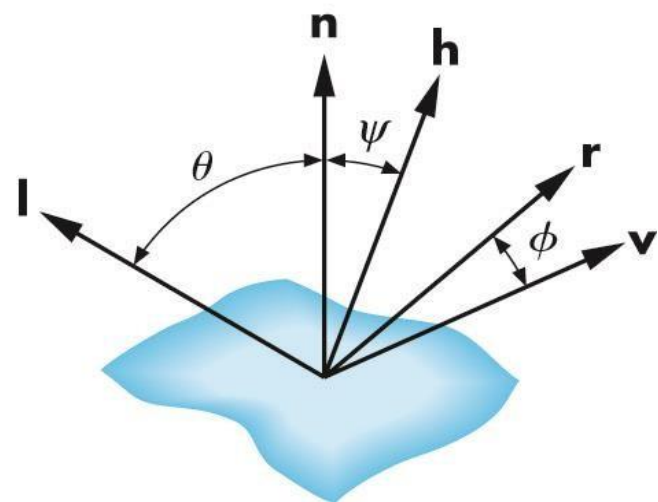
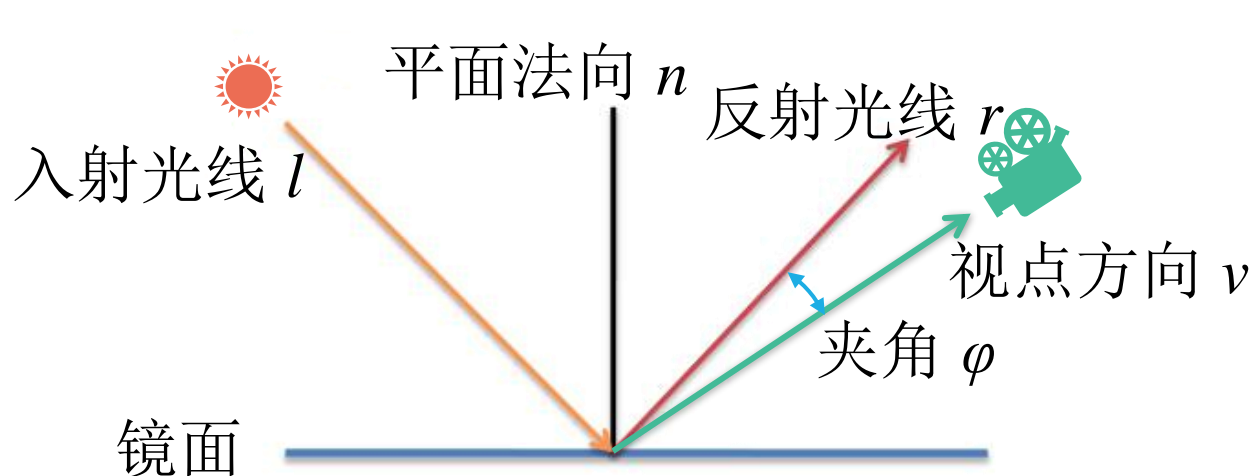
Blinn-Phong

中值向量

- 中值向量 \mathbf{h} 是 \mathbf{l} 和 \mathbf{v} 的中值单位向量, 即

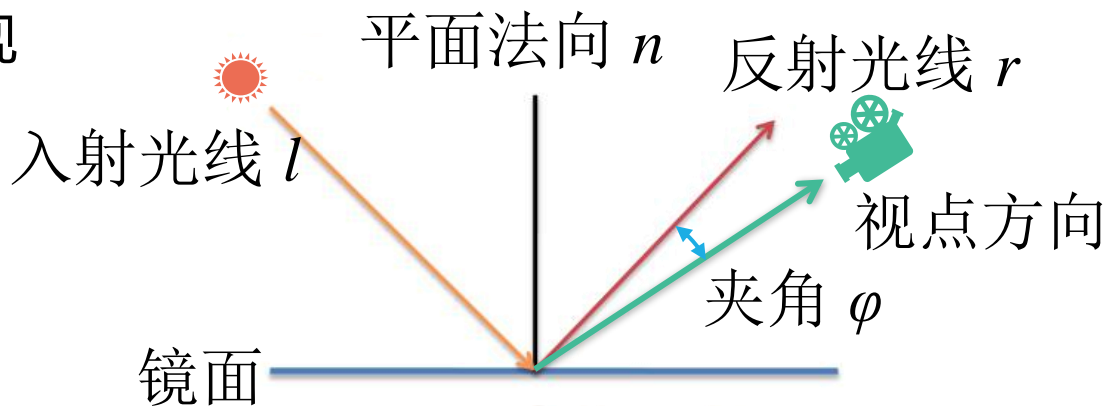
$$\mathbf{h} = (\mathbf{l} + \mathbf{v}) / |\mathbf{l} + \mathbf{v}|$$

- \mathbf{n} 和 \mathbf{h} 的夹角 ψ 称为中值角 (halfway angle)
- 当 \mathbf{v} 位于 \mathbf{l} 、 \mathbf{n} 和 \mathbf{r} 所在平面时, 可以证明 $2\psi = \phi$



改进的Phong模型

- 镜面项用 $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^\beta$ 代替 $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^\alpha$
 - 参数 β 恰当选取，以匹配光洁度 α
- 当 \mathbf{l} , \mathbf{n} , \mathbf{v} 共面时，中值角 ψ 就是 \mathbf{r} 和 \mathbf{v} 的夹角 ϕ 的一半
- 由此得到的模型称为改进的Phong模型或者Blinn光照模型
 - 在OpenGL标准中实现



向量的计算

- \mathbf{l} 和 \mathbf{v} 由应用程序指定
- 可以从 \mathbf{l} 和 \mathbf{n} 计算 \mathbf{r} ($\mathbf{r} = 2 (\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} - \mathbf{l}$)
- 问题就剩下如何确定 \mathbf{n}
- 对于简单曲面, \mathbf{n} 可以被确定, 但确定的方式要根据曲面的表示有所不同

平面法向

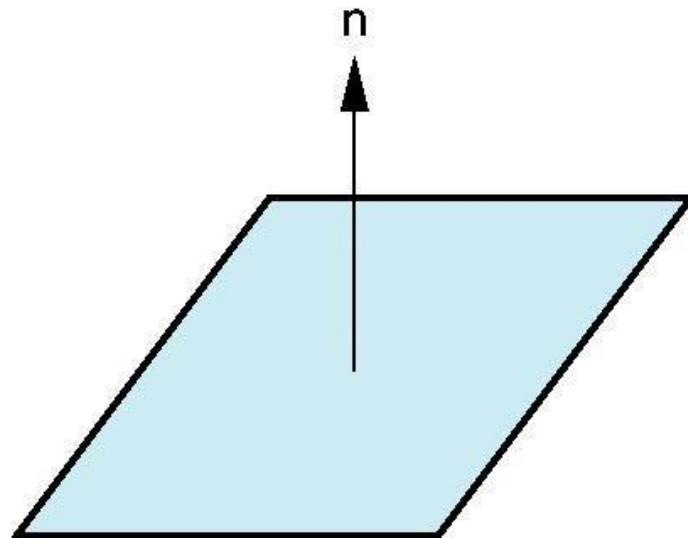
- 平面方程: $ax+by+cz+d=0$, 法向

$$\mathbf{n} = [a, b, c]^T$$

- 平面可由三个不共线点 p_0, p_1, p_2 或法向 \mathbf{n} 与一个点 p_0 来确定
- 法向可由下式得到:

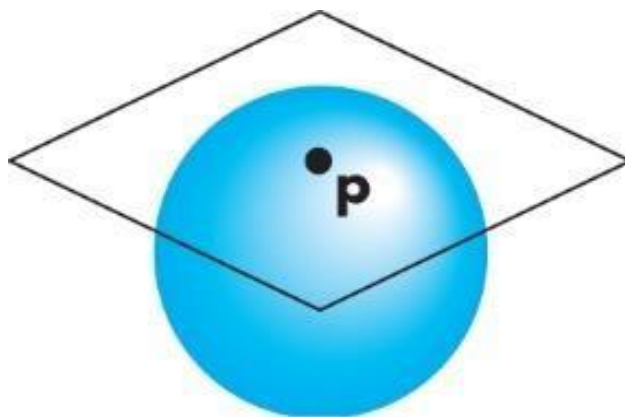
$$\mathbf{n} = (p_2 - p_0) \times (p_1 - p_0)$$

— 注意顶点在叉积中出现的顺序



球面法向

- 隐函数曲面 $f(\mathbf{p})=f(x,y,z)=0$
- 局部法向可由梯度向量 ∇f 给出
- 球面隐方程表示 $f(\mathbf{p})=\mathbf{p}\cdot\mathbf{p} - 1=x^2+y^2+z^2-1=0$
- 法向 $\mathbf{n} = [\partial f/\partial x, \partial f/\partial y, \partial f/\partial z]^T = 2\mathbf{p}$



参数形式

- 单位球面的参数表示

$$x=x(u,v)=\cos u \sin v$$

$$y=y(u,v)=\cos u \cos v$$

$$z=z(u,v)=\sin u$$

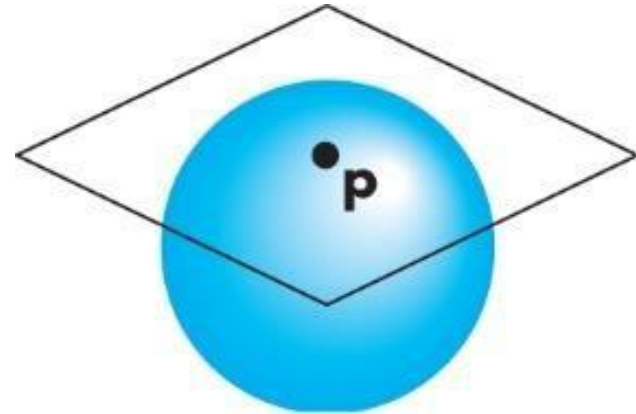
- 切平面由两个切方向确定

$$\partial \mathbf{p} / \partial u = [\partial x / \partial u, \partial y / \partial u, \partial z / \partial u]^T$$

$$\partial \mathbf{p} / \partial v = [\partial x / \partial v, \partial y / \partial v, \partial z / \partial v]^T$$

- 法向由叉积给出

$$\mathbf{n} = \partial \mathbf{p} / \partial u \times \partial \mathbf{p} / \partial v = (\cos u) \mathbf{p}$$



一般情形

- 我们能计算其他简单参数曲面的法向，例如
 - 二次曲面
 - 参数多边形曲面
 - Bezier曲面片
- 绝大多数模型是用多边形网格构成的，那么法向的计算可以大大简化

OpenGL法向定义

- OpenGL把法向量的计算留给应用程序
 - 例外：GLU中的二次曲面和Bézier曲面

- OpenGL里，顶点法向用如下函数定义

```
glNormal3f(nx, ny, nz);
```

```
glNormal3fv(pointer_to_normal);
```

- 法向是状态值