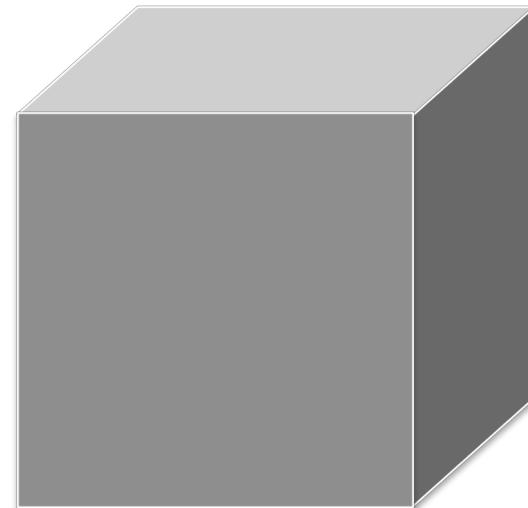
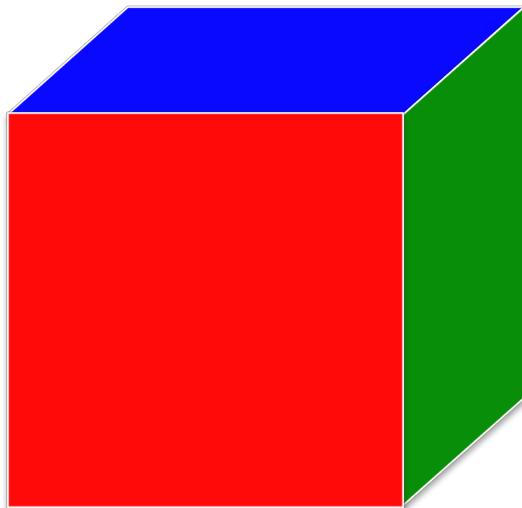


コンピュータグラフィックス

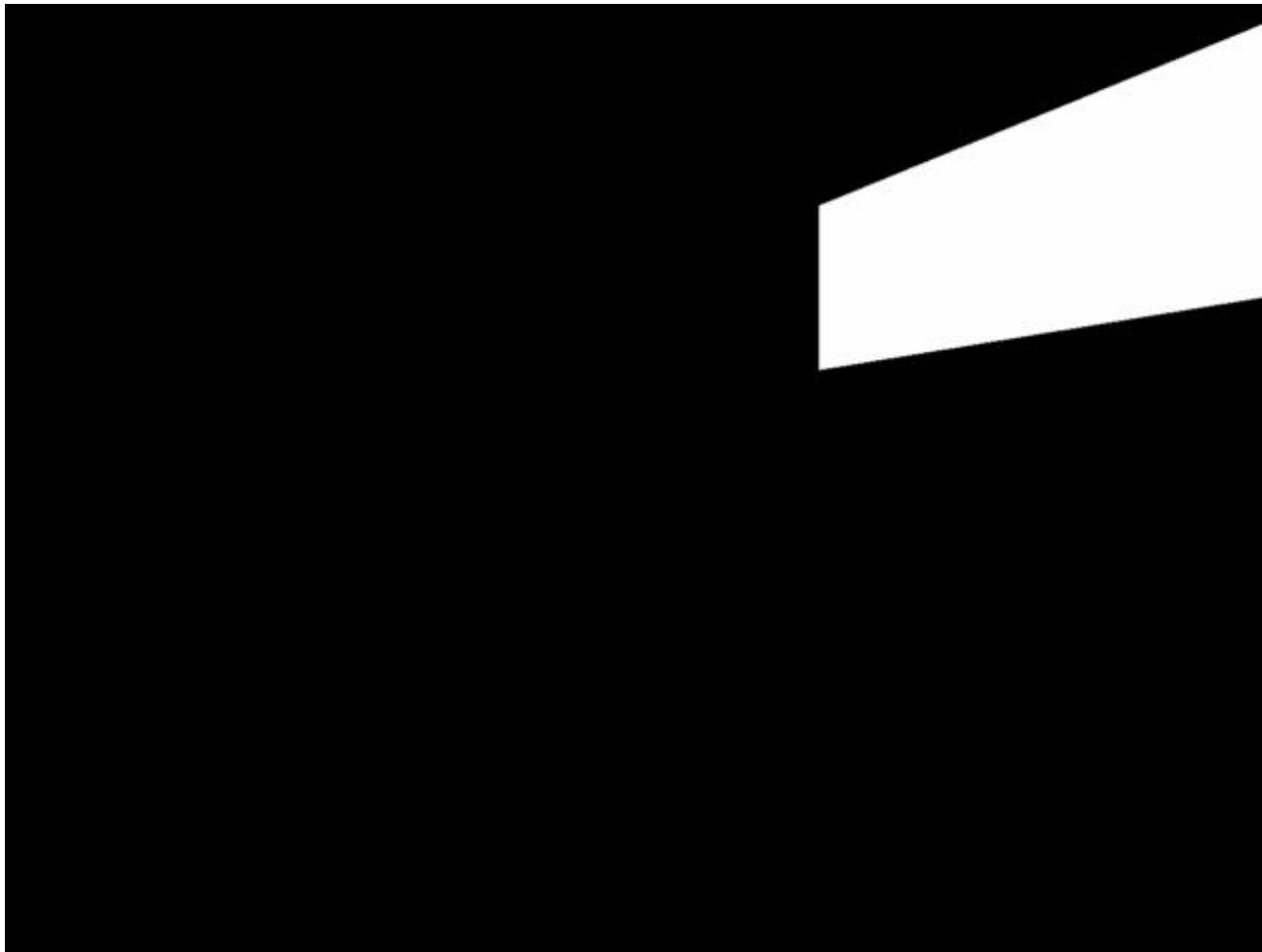
第10回：光を当ててみる

リアリティの基本は陰影

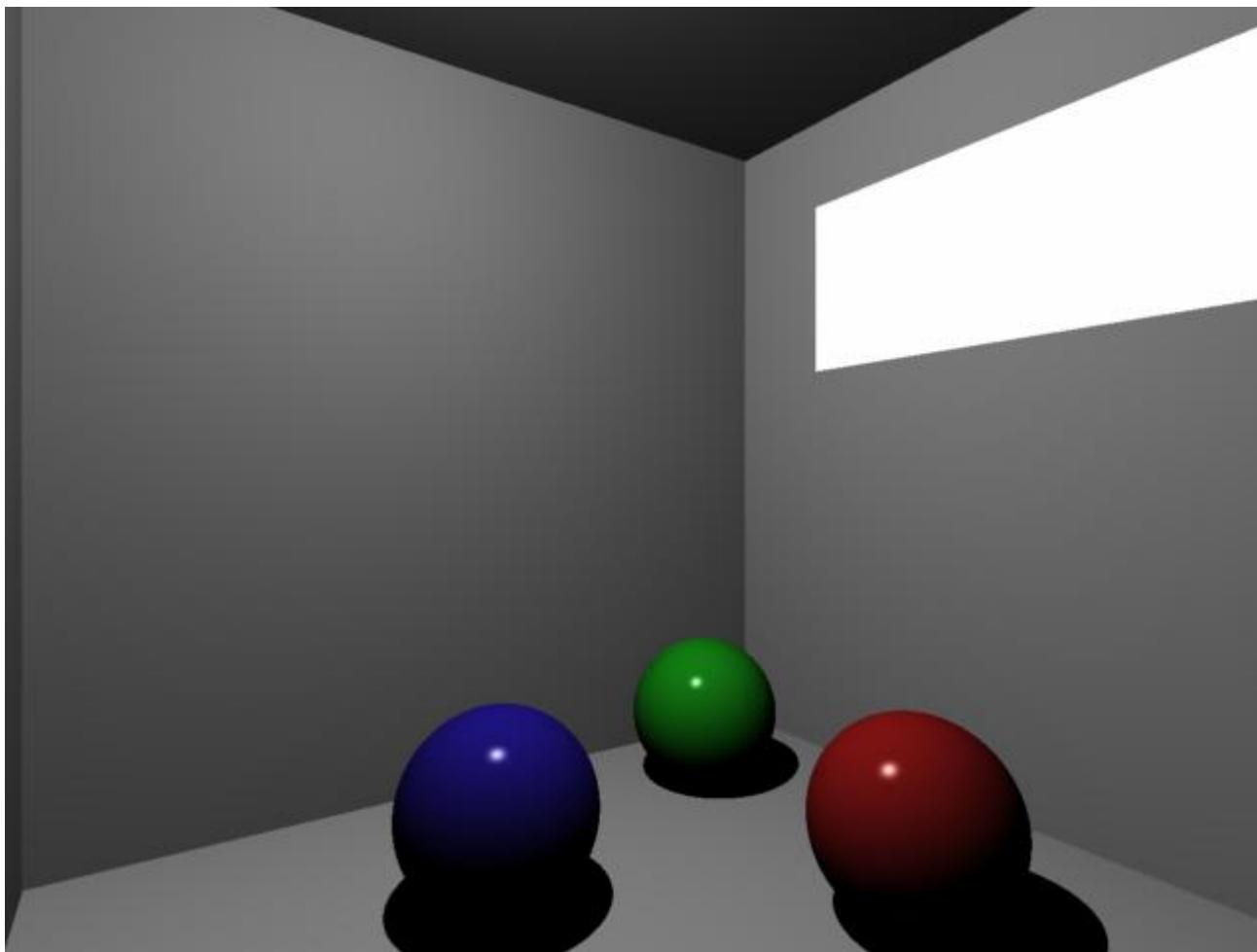


どっちが「リアル」？

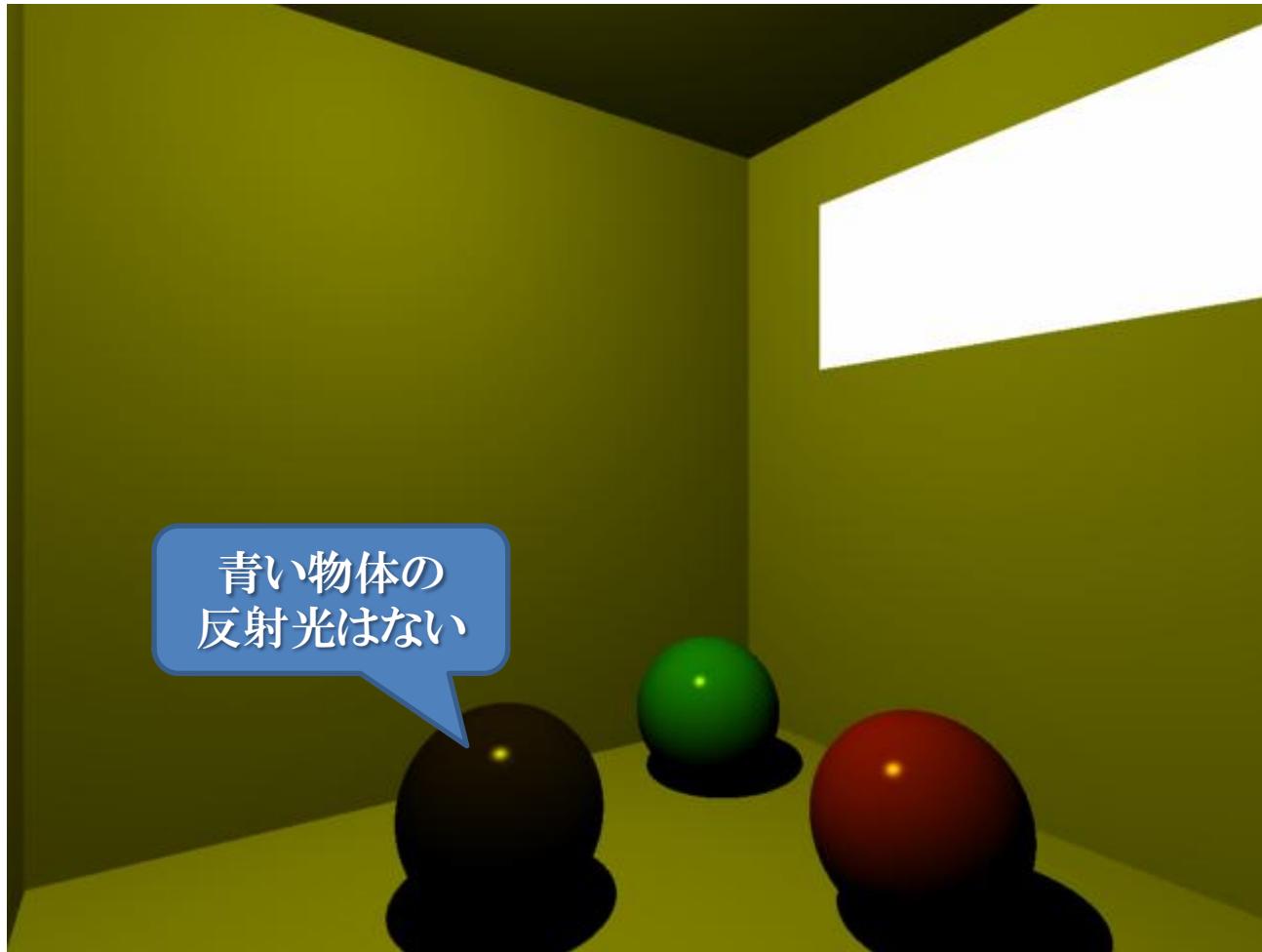
光源が無ければ色は見えない



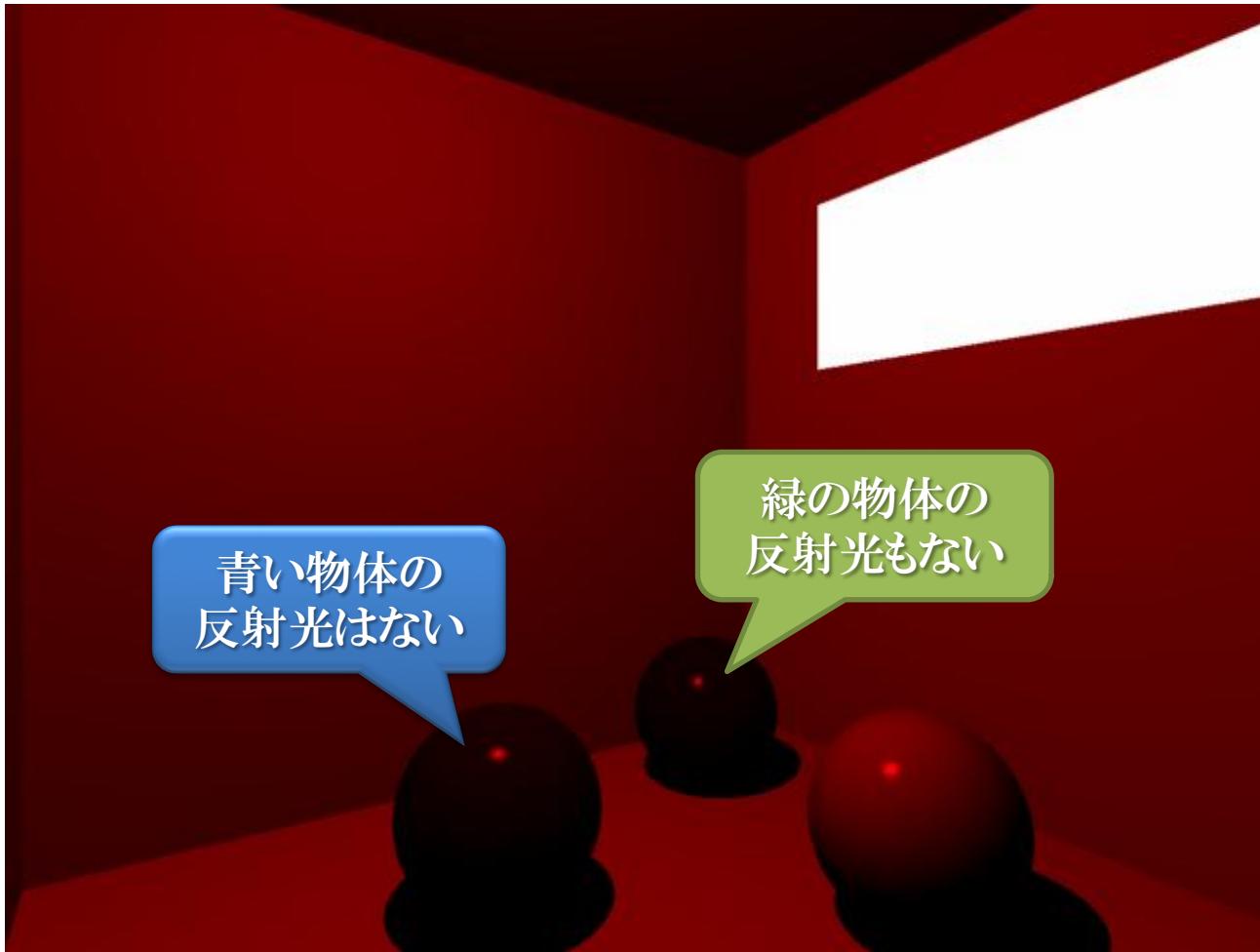
光源からの光の反射光が見える



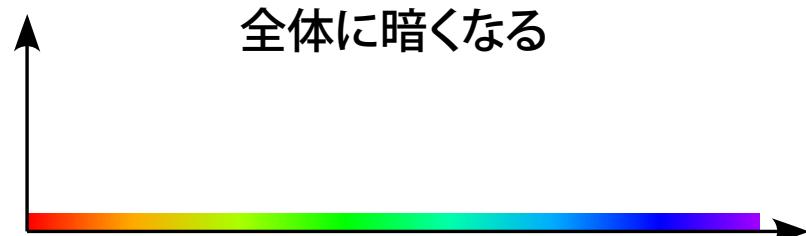
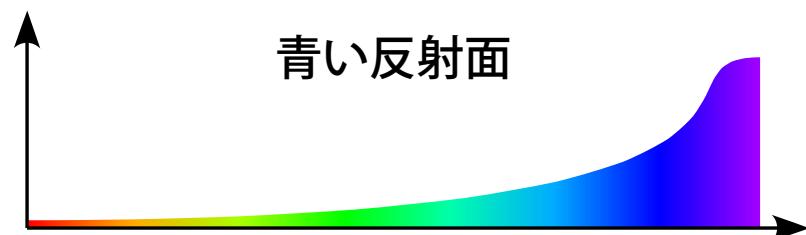
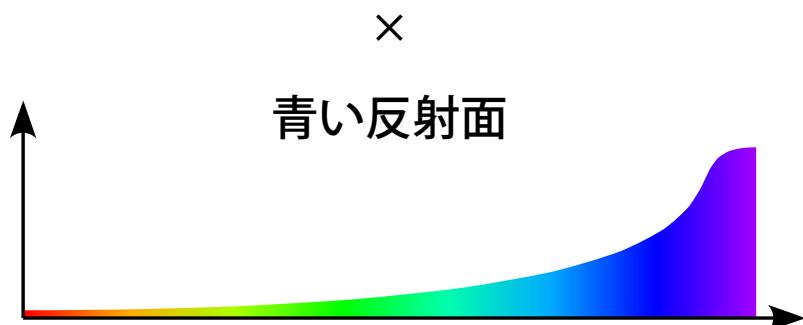
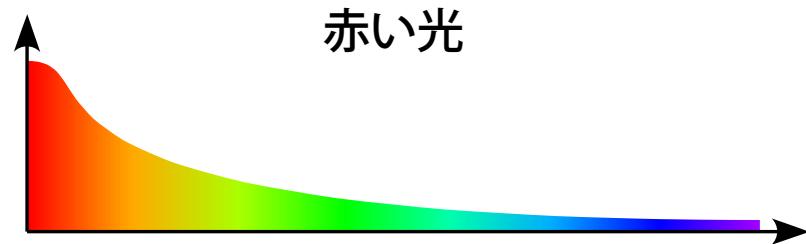
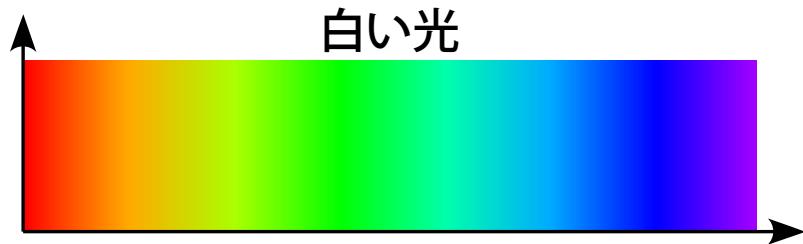
光源の光が黄色い場合



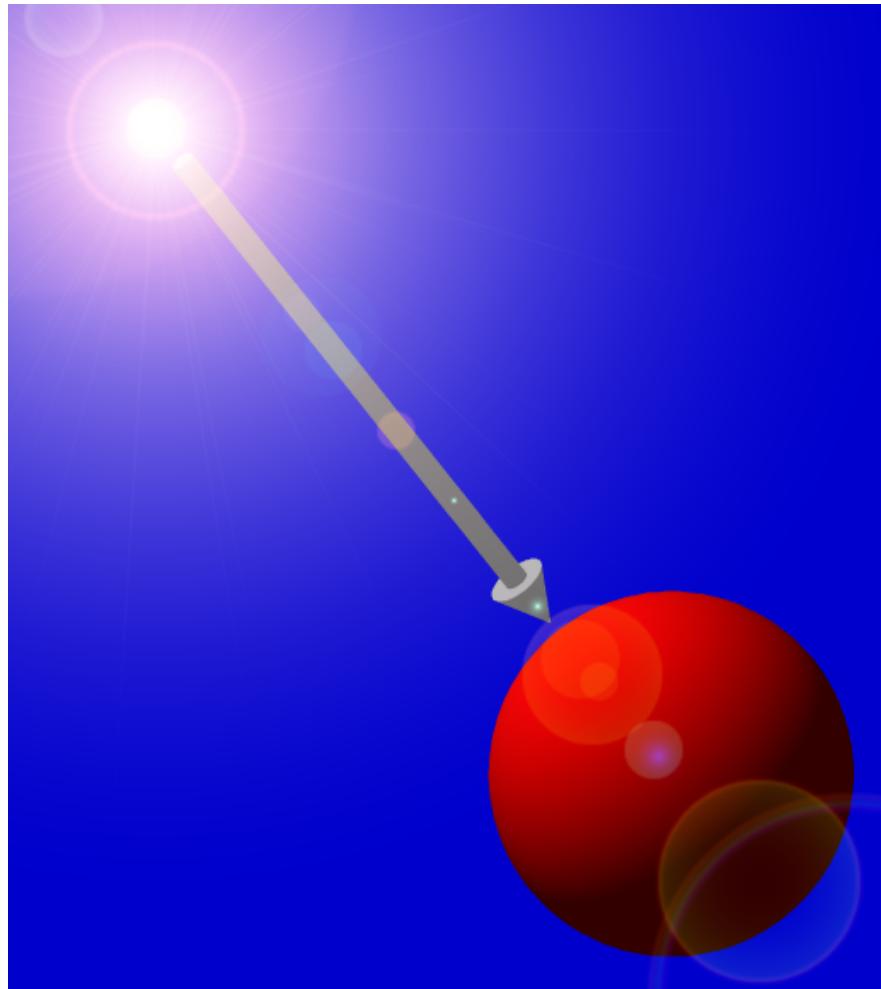
光源の光が赤い場合



反射光の色成分



照明と陰影



- 照明によってものが見える
 - ものの「色」は反射光
- 陰影により形が認識できる
 - 入射光の方向によって反射光強度が変化する
- 反射光は光源色と物体色の相互作用で決まる

CGでは
これを計算により求める

陰影付け(シェーディング)

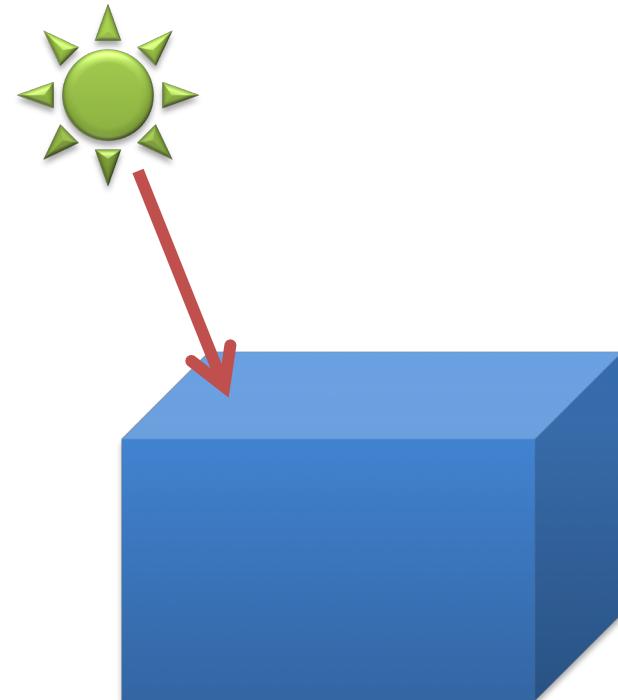
- 光が当たった物体表面上の色を求める

- 光源の特性

- ・ 色(明るさ)
 - ・ 位置や方向(入射角)
 - ・ 距離

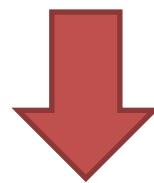
- 物体表面の特性

- ・ 色(反射率)
 - ・ 映り込みの反射率
 - ・ 滑らかさ

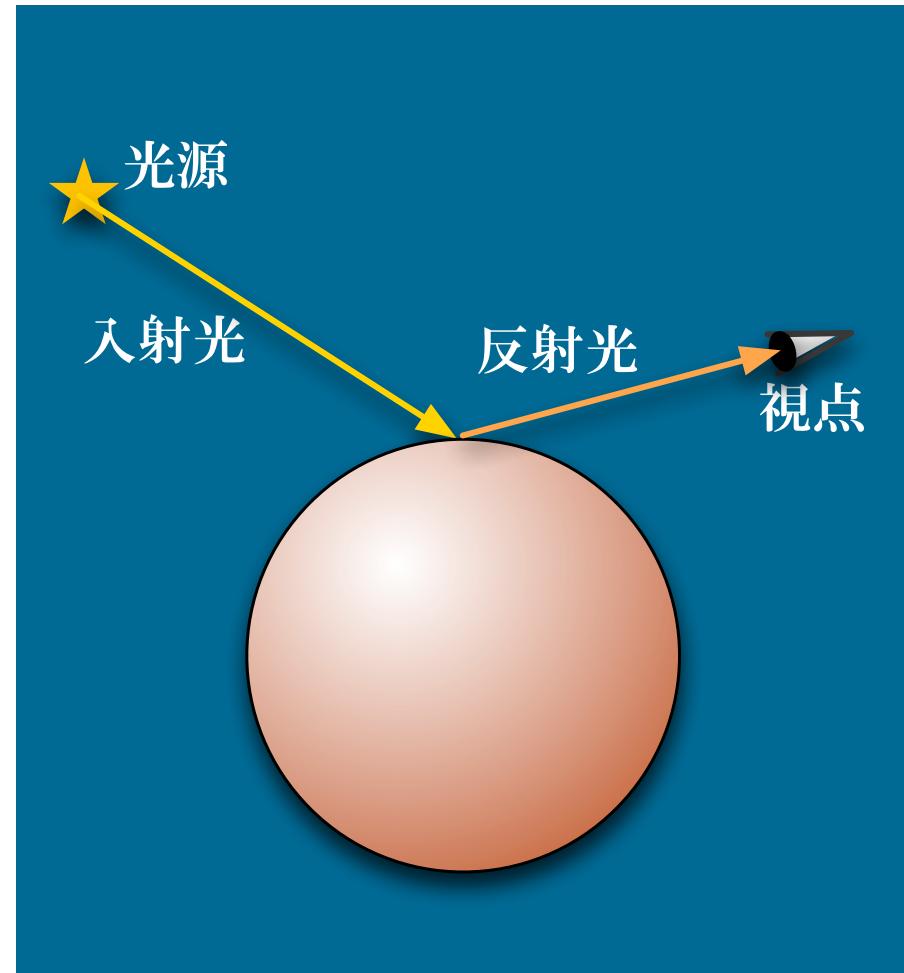


陰影付けモデル

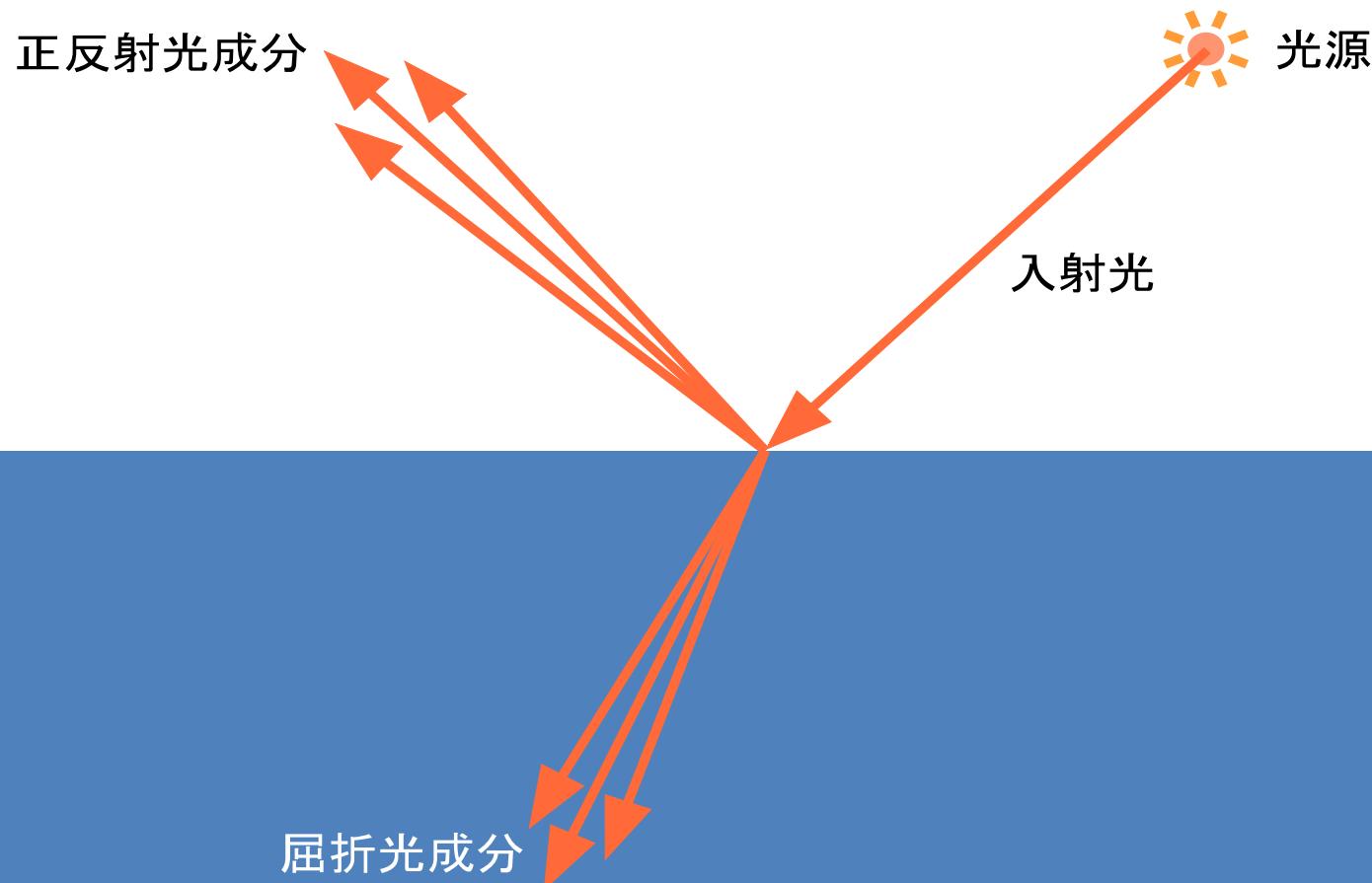
- 照明と反射光の関係を記述
 - 光源の位置・強度・色
 - 表面の光の反射特性
 - 視点の位置



反射光

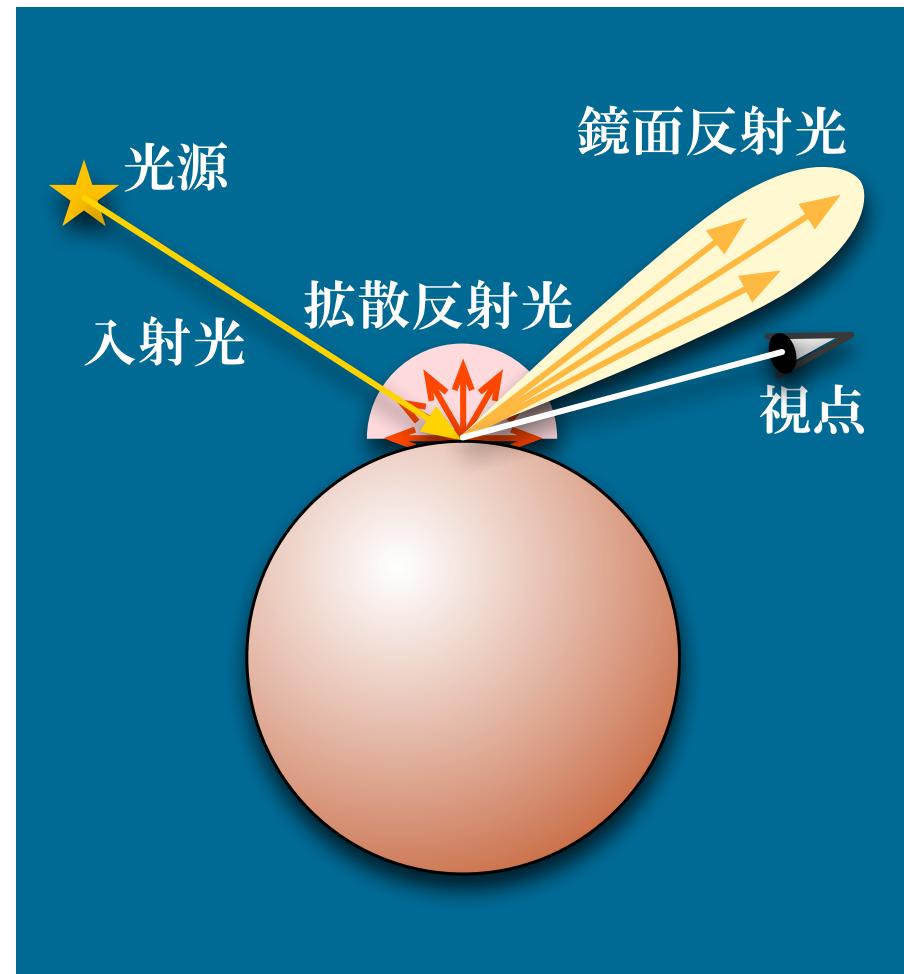


反射と屈折



二色性反射モデル

- 拡散反射光
 - 入射光の入射位置の周囲に均等に放射される光
- 鏡面反射光
 - 入射光の正反射方向に放射される光
- 環境光
 - 間接光などの周囲の光による反射光



拡散反射光 (diffuse)

- 完全拡散反射面

- 入射光は物体内での散乱によって再び物体外に放射されると考える
- 全方向に対して均一に光を反射する

- 反射光強度

- 入射光強度に比例

- 入射光強度

- 入射光密度に比例

拡散反射光の強度は
入射光の密度に比例する



拡散反射の考え方

- 入射光は屈折して物体内に進入し散乱と吸収を繰り返す
- 吸収されずに残った光が入射点から再び外部に放射される
 - 散乱により指向性を失う
 - ・すべての方向に対して均等に放射される
 - ・反射光強度は視線の方向に依存しない
 - 吸収により物体の色がつく
 - ・入射光の色成分のうち吸収されなかつたものが放射される

完全拡散反射面

散乱と吸収

● 散乱

- 光が光学的な**不連続性**に出会うことで発生する
 - ・異なる光学特性を持つ材質の境界面
- 光は向きを変えるだけで光の量は変化しない

● 吸収

- 物質の内部で発生する
- 光が他の種類のエネルギーに**変換**される
 - ・光が消失する

入射光の密度

- 照射面の面積は入射光の入射角 θ_i の余弦 $\cos\theta_i$ の逆数に比例する

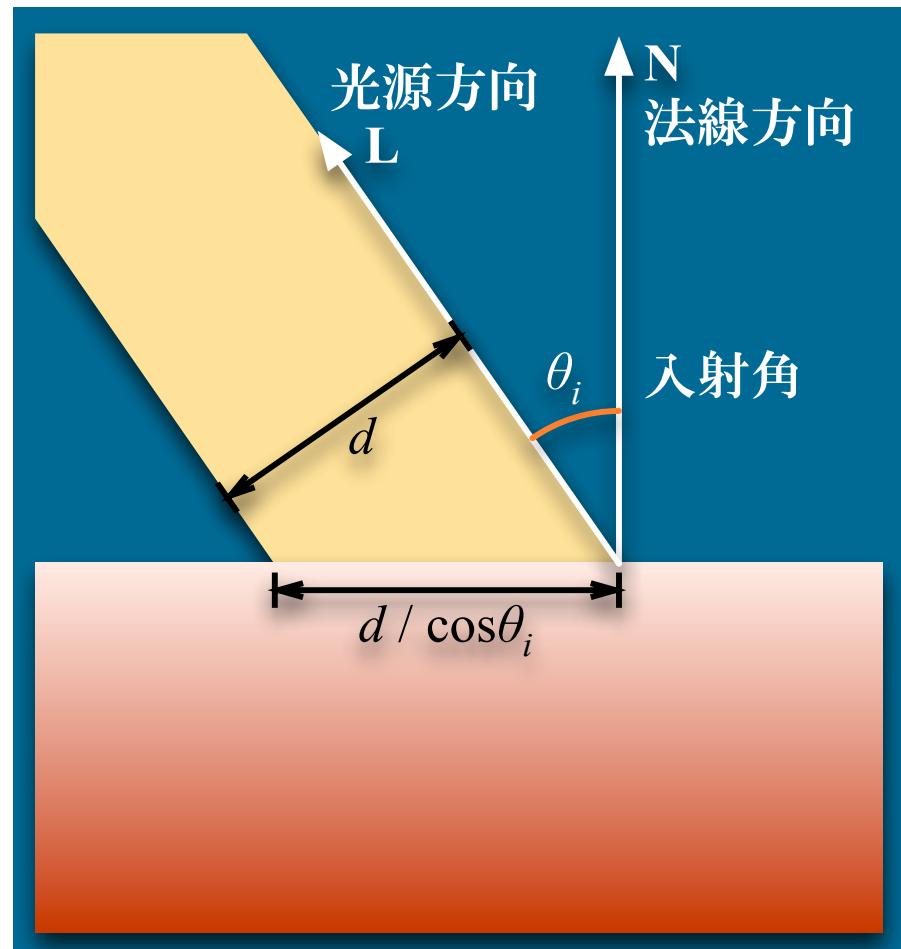


- 入射光の密度は入射角 θ_i の余弦 $\cos\theta_i$ に比例する

Lambert の余弦法則

$$\cos\theta_i = \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}$$

\mathbf{N}, \mathbf{L} が単位ベクトルのとき



拡散反射光強度

I_{diff} : 拡散反射光強度

K_{diff} : 材質の拡散反射係数

L_{diff} : 光源強度の拡散反射光成分

\otimes : 要素ごとの積

$I_{diff}, K_{diff}, L_{diff}$ は
RGB の三つの
要素を持つ

実際の光源にそんな成分がある訳ではない

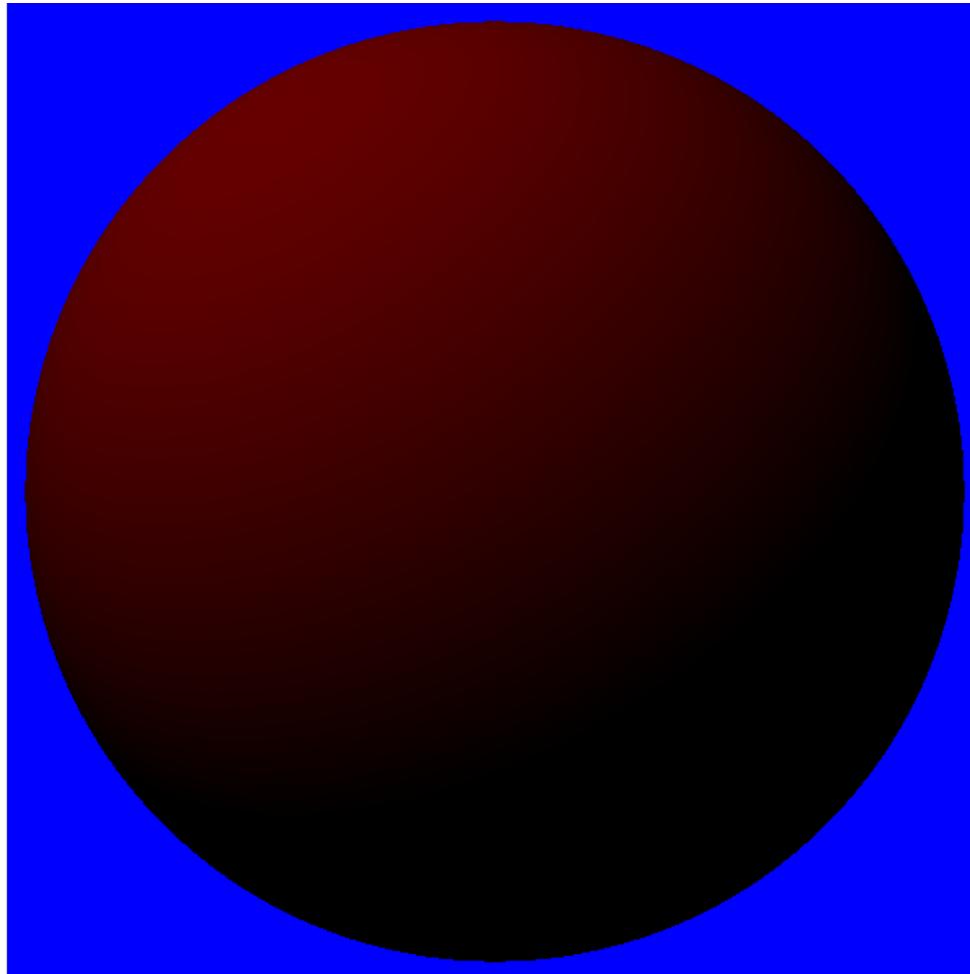
$$I_{diff} = \cos \theta_i K_{diff} \otimes L_{diff} = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) K_{diff} \otimes L_{diff}$$

\mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角が $\pi / 2$ 以上なら拡散反射光強度は 0:

$$I_{diff} = \max(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}, 0) K_{diff} \otimes L_{diff}$$

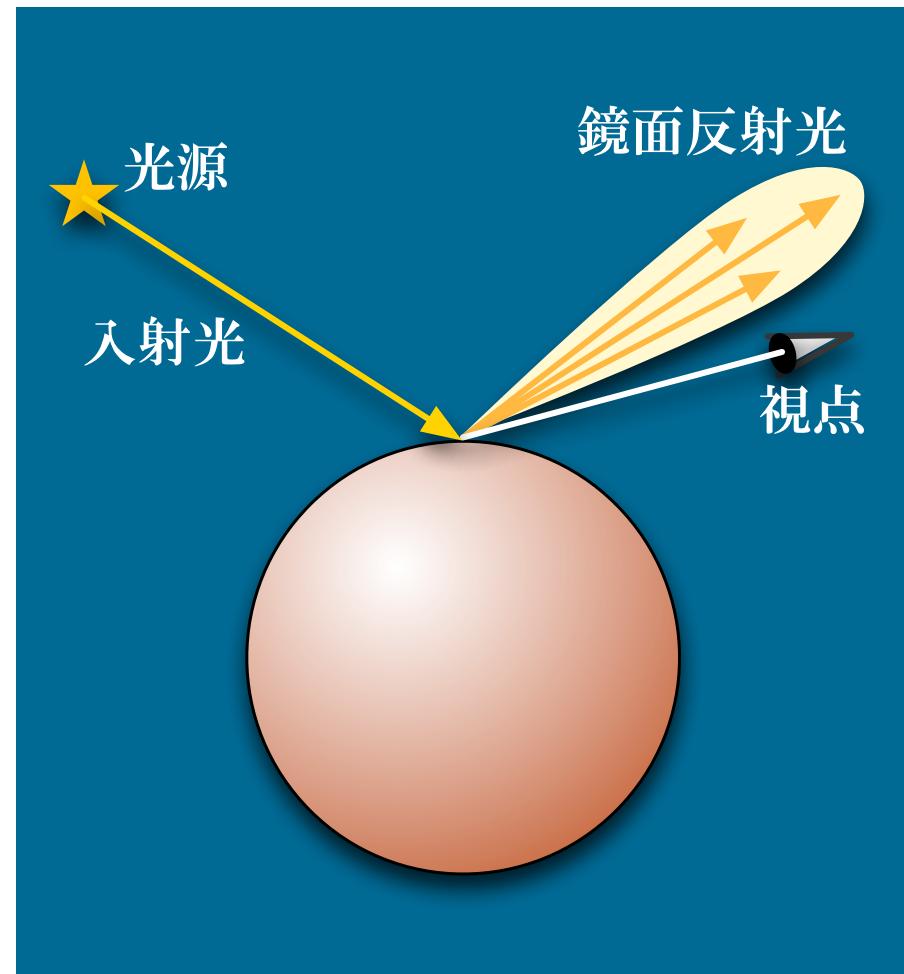


拡散反射光による陰影



鏡面反射光 (specular)

- 入射光の正反射光のうち視点方向に到達する成分
 - そう仮定しないと「見えない」
 - ・ 光源は「点」なので大きさを持たない
- 物体表面での反射
 - 物体の内部には進入しない
 - ・ 物体の色は付かない
 - ・ 光源の色を反映する
 - 表面の滑らかさの影響を受ける
- ハイライトを生じる
 - 物体を輝かせて見せる



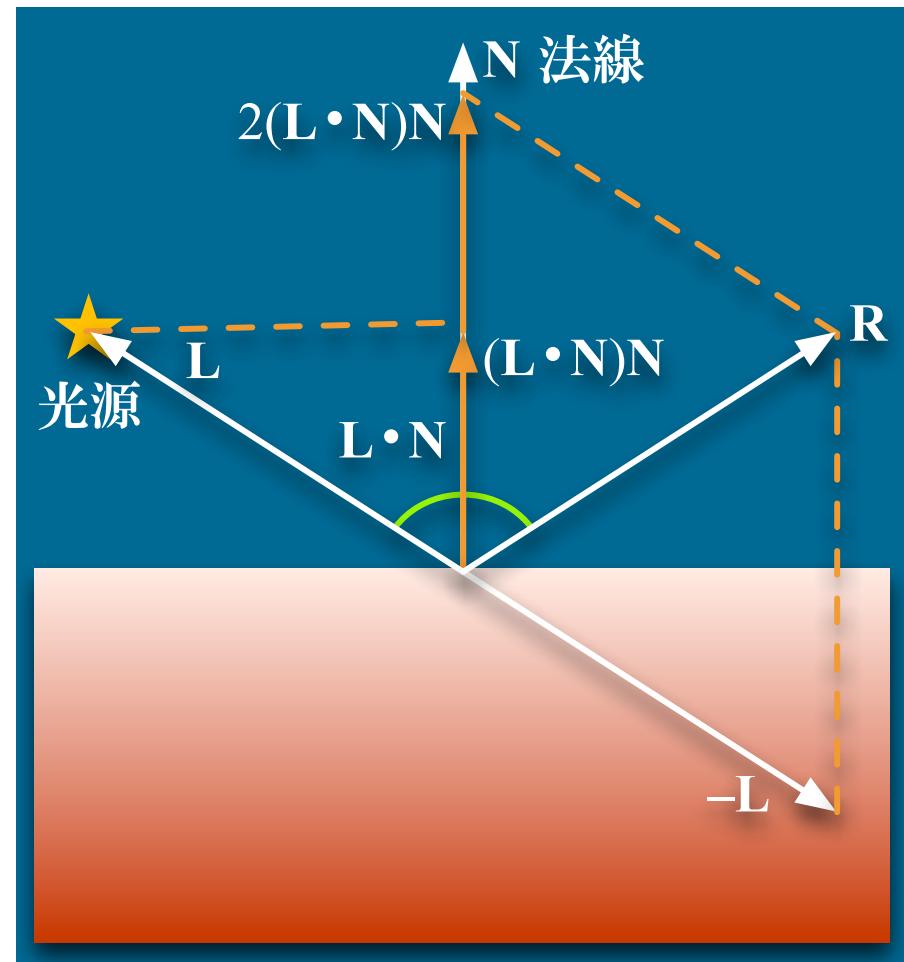
正反射光の方向

- 光源方向方向ベクトル L
- 法線方向単位ベクトル N
- 反射方向単位ベクトル R



$$R = 2(L \cdot N)N - L$$

$\cos\theta_i$



鏡面反射光の強度

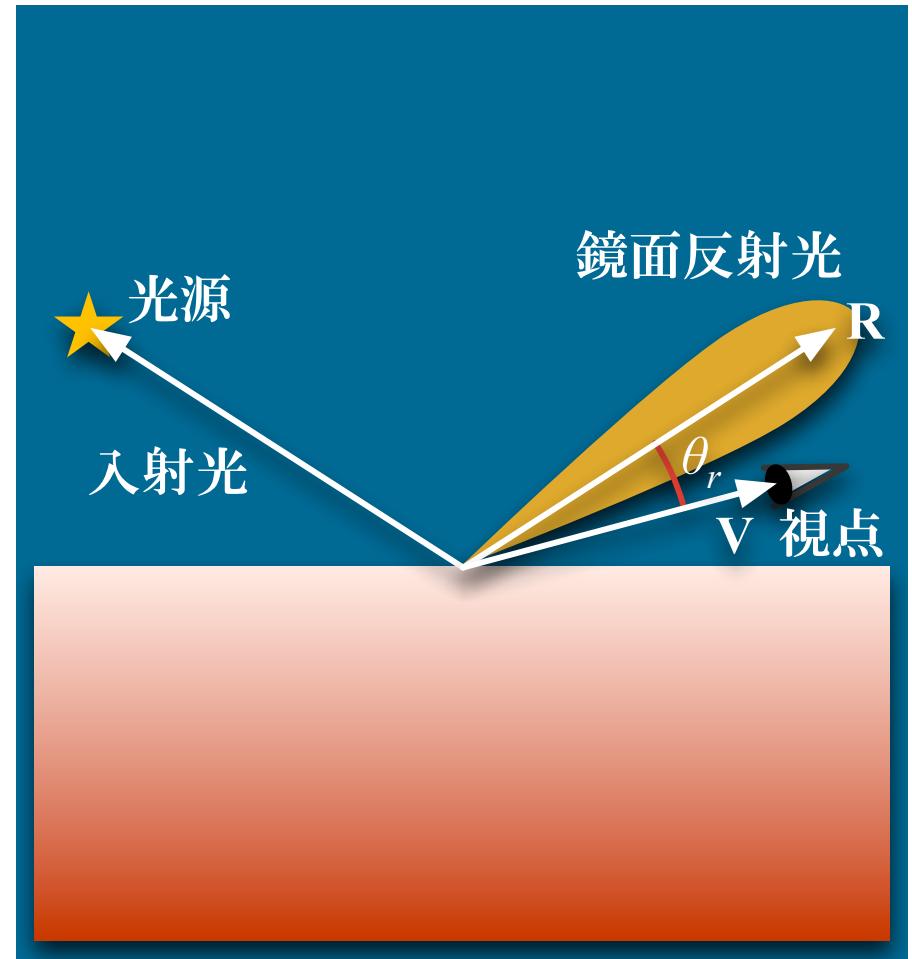
- 鏡面反射光の強度は入射方向の正反射方向と視点方向のなす角 θ_r の余弦の K_{shi} 乗 $\cos^{K_{shi}} \theta_r$ に比例する(とする)

K_{shi} : 輝き係数 (shininess)

Phong のモデル

$$\cos^{K_{shi}} \theta_r = (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^{K_{shi}}$$

\mathbf{R}, \mathbf{V} が単位ベクトルのとき



鏡面反射光強度 (Phong のモデル)

I_{spec} : 鏡面反射光強度

K_{spec} : 材質の鏡面反射係数

K_{shi} : 輝き係数

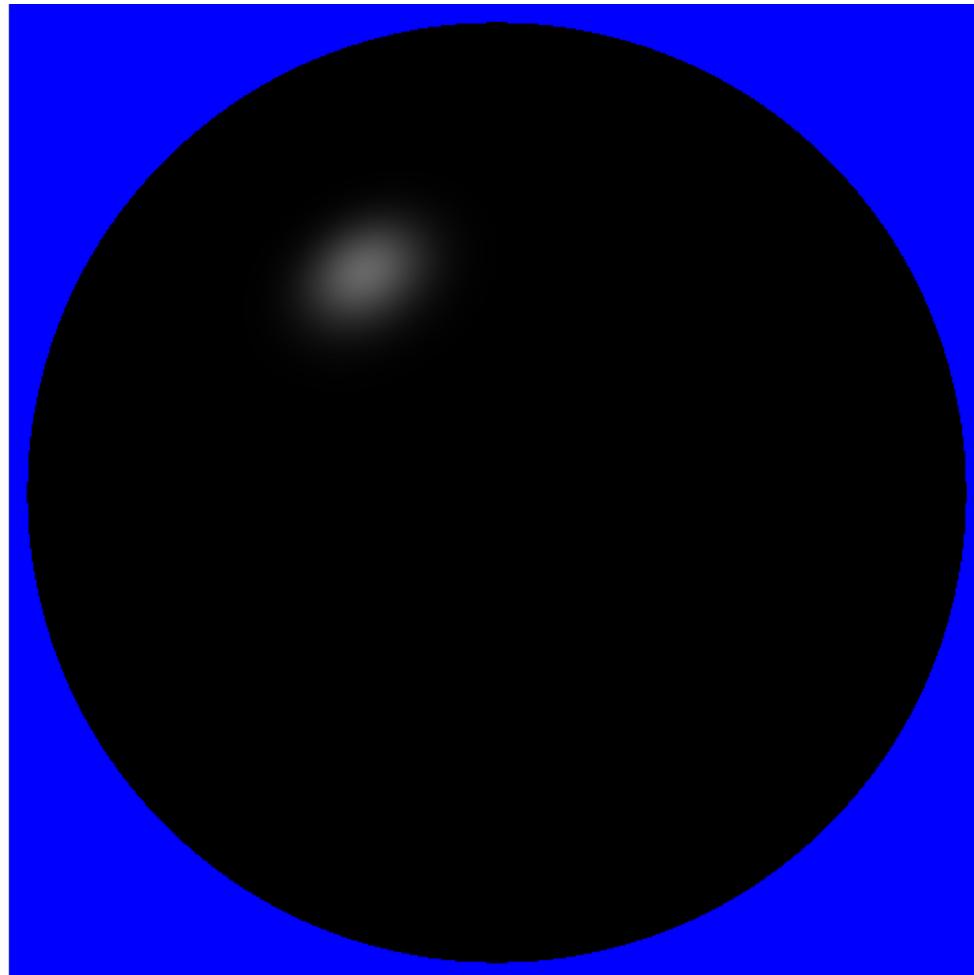
L_{spec} : 光源強度の鏡面反射光成分

$$I_{spec} = \cos^{K_{shi}} \theta_r K_{spec} \otimes L_{spec} = (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^{K_{shi}} K_{spec} \otimes L_{spec}$$

\mathbf{R} と \mathbf{V} のなす角が $\pi / 2$ 以上なら鏡面反射光強度は 0:

$$I_{spec} = \max(\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}, 0)^{K_{shi}} K_{spec} \otimes L_{spec}$$

鏡面反射光による陰影 (Phong)



中間ベクトルを用いる方法

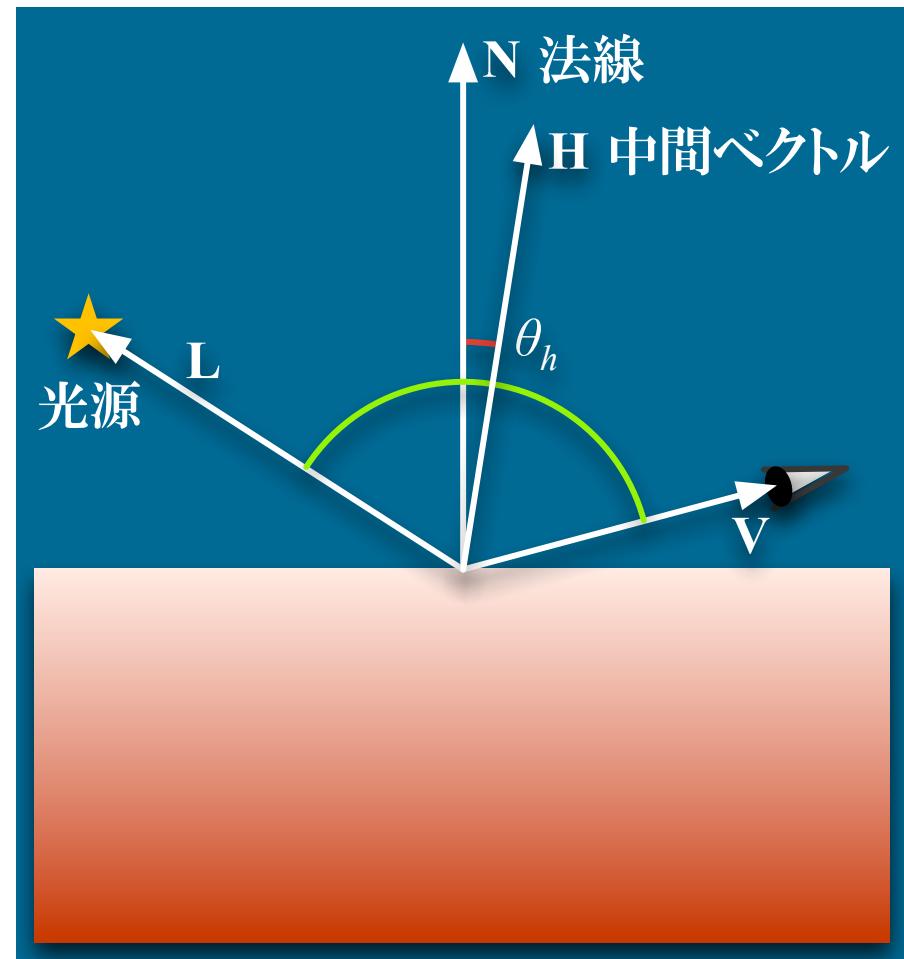
- 鏡面反射光の強度は入射方向と視点方向の中間方向と法線方向のなす角 θ_h の余弦の K_{shi} 乗 $\cos^{K_{shi}} \theta_h$ に比例する(とする)

Blinn-Phong のモデル

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

$$\cos^{K_{shi}} \theta_h = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^{K_{shi}}$$

$\mathbf{L}, \mathbf{N}, \mathbf{V}$ が単位ベクトルのとき



鏡面反射光強度 (Blinn のモデル)

I_{spec} : 鏡面反射光強度

K_{spec} : 材質の鏡面反射係数

K_{shi} : 輝き係数

L_{spec} : 光源強度の鏡面反射光成分

$$I_{spec} = \cos^{K_{shi}} \theta_h K_{spec} \otimes L_{spec} = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^{K_{shi}} K_{spec} \otimes L_{spec}$$

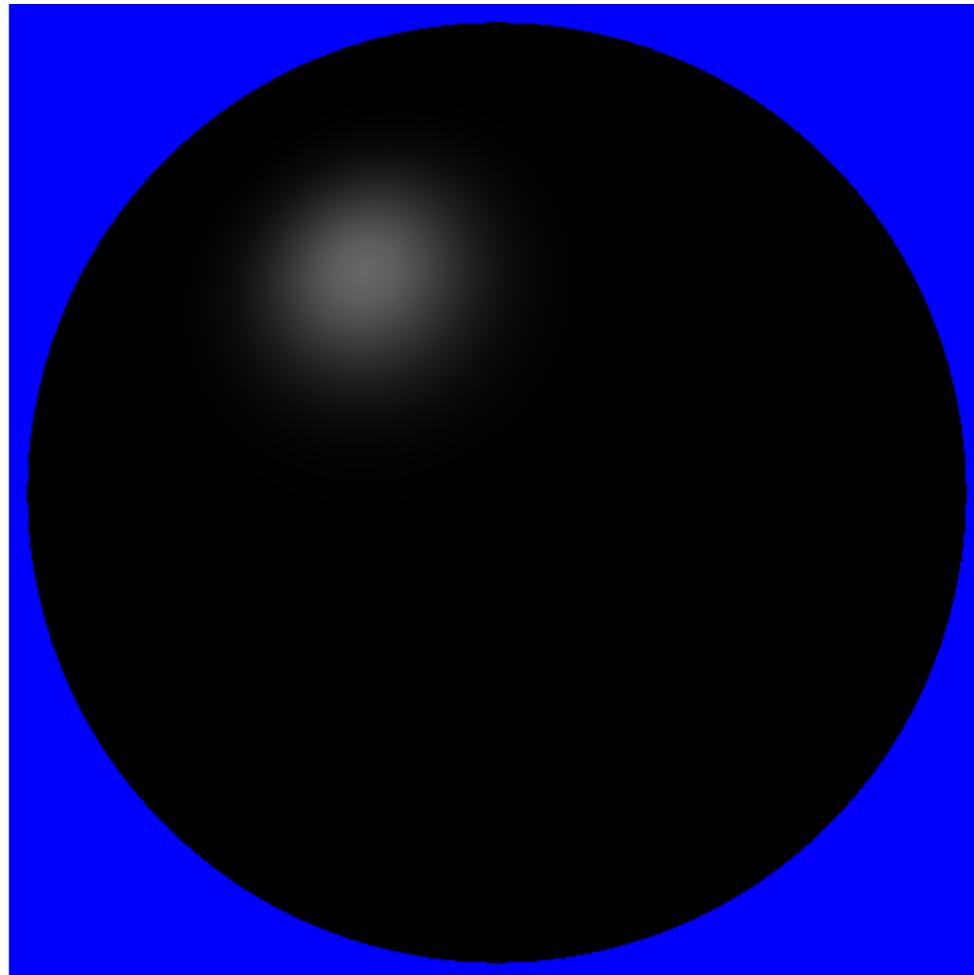
lobe(反射光分布の包絡形状)には Phong と同じ cosine モデルを使う

\mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が $\pi / 2$ 以上なら鏡面反射光強度は 0:

$$I_{spec} = \max(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H}, 0)^{K_{shi}} K_{spec} \otimes L_{spec}$$

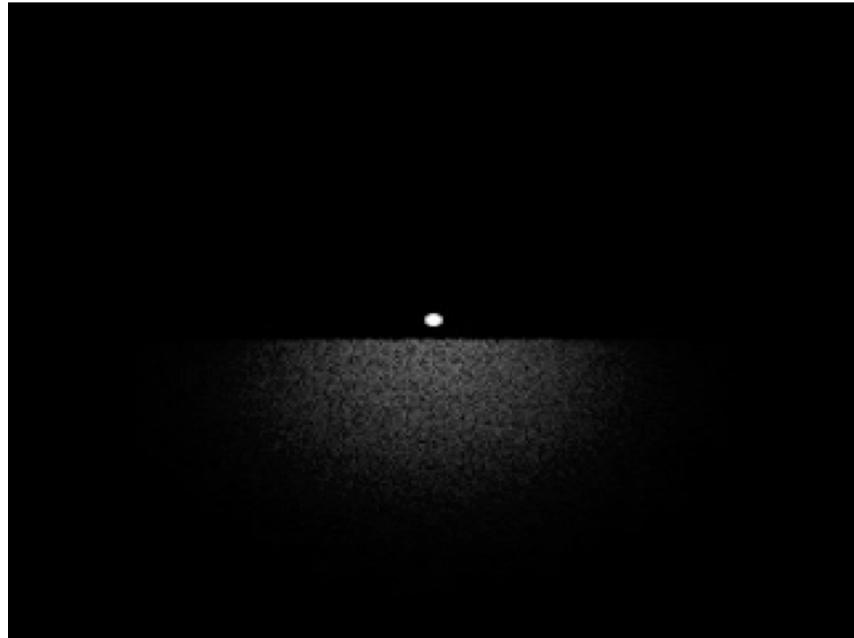
OpenGL の固定機能ハードウェアで採用されたモデル, Blinn-Phong モデル

鏡面反射光による陰影 (Blinn)

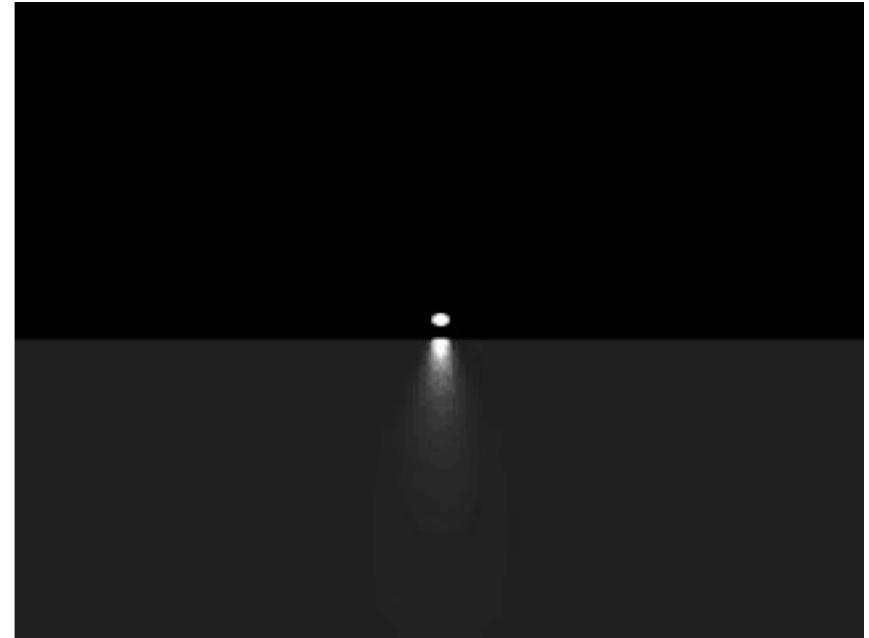


ハイライトの形状について

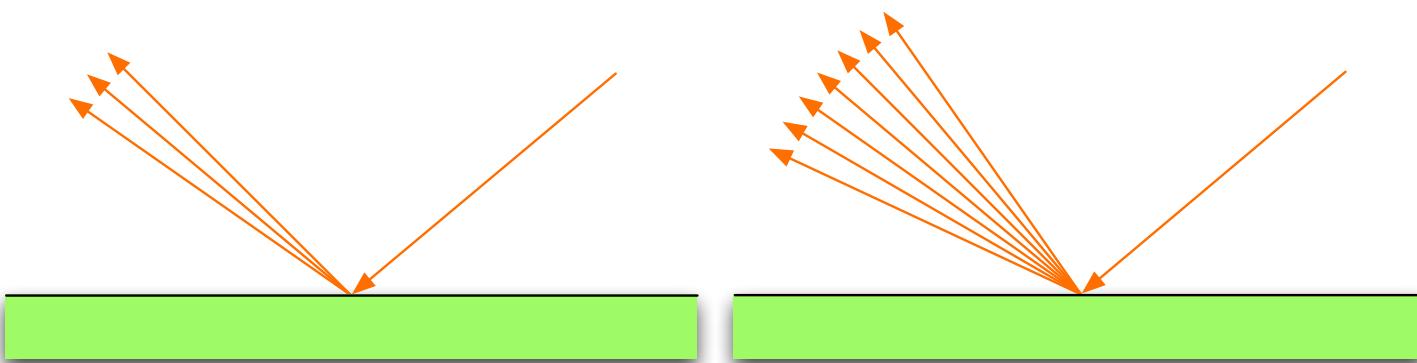
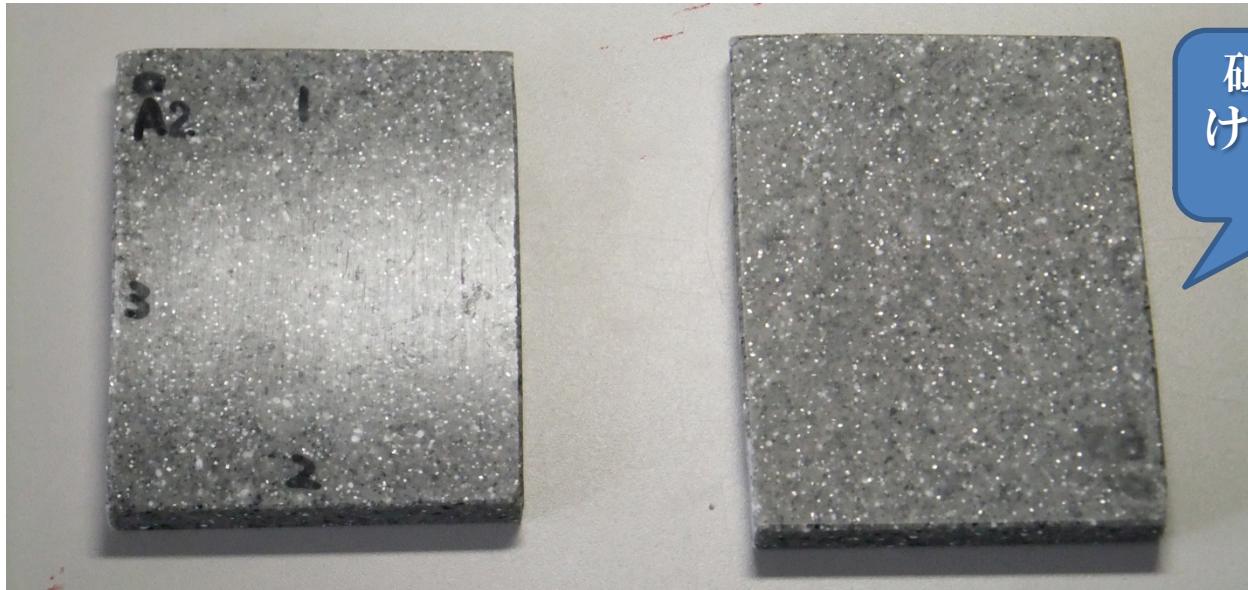
Phong



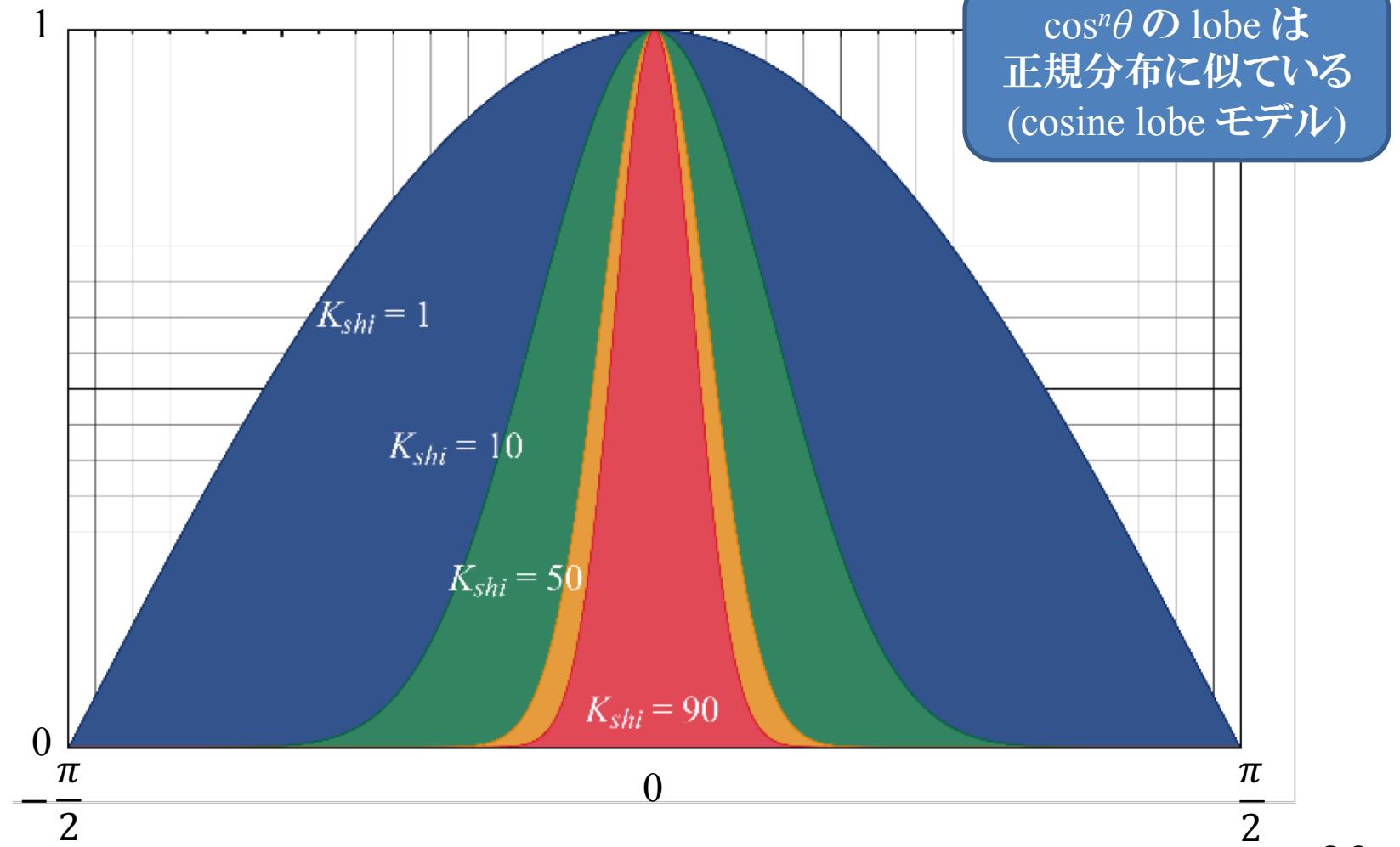
Blinn (BRDF)



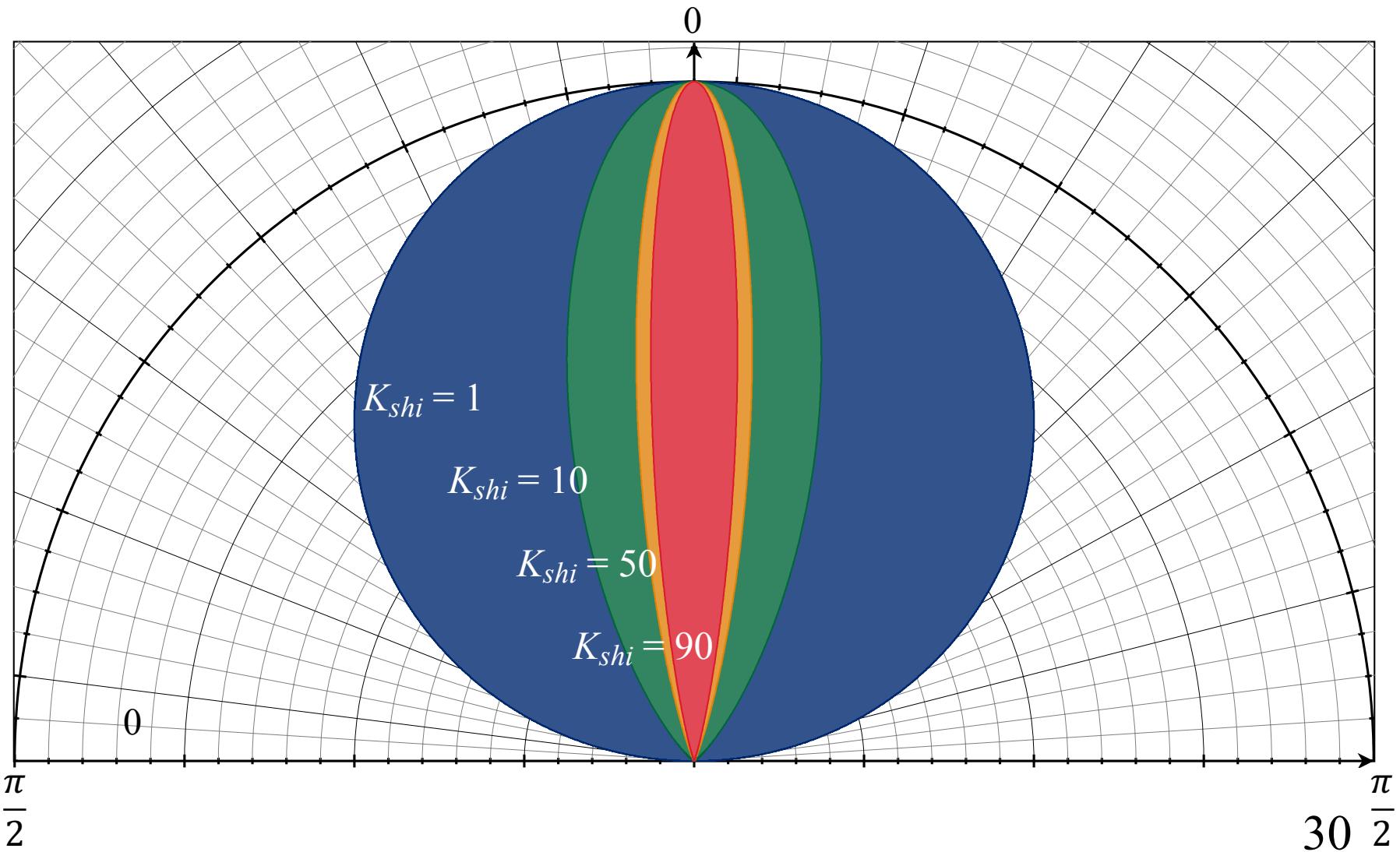
面の滑らかさ



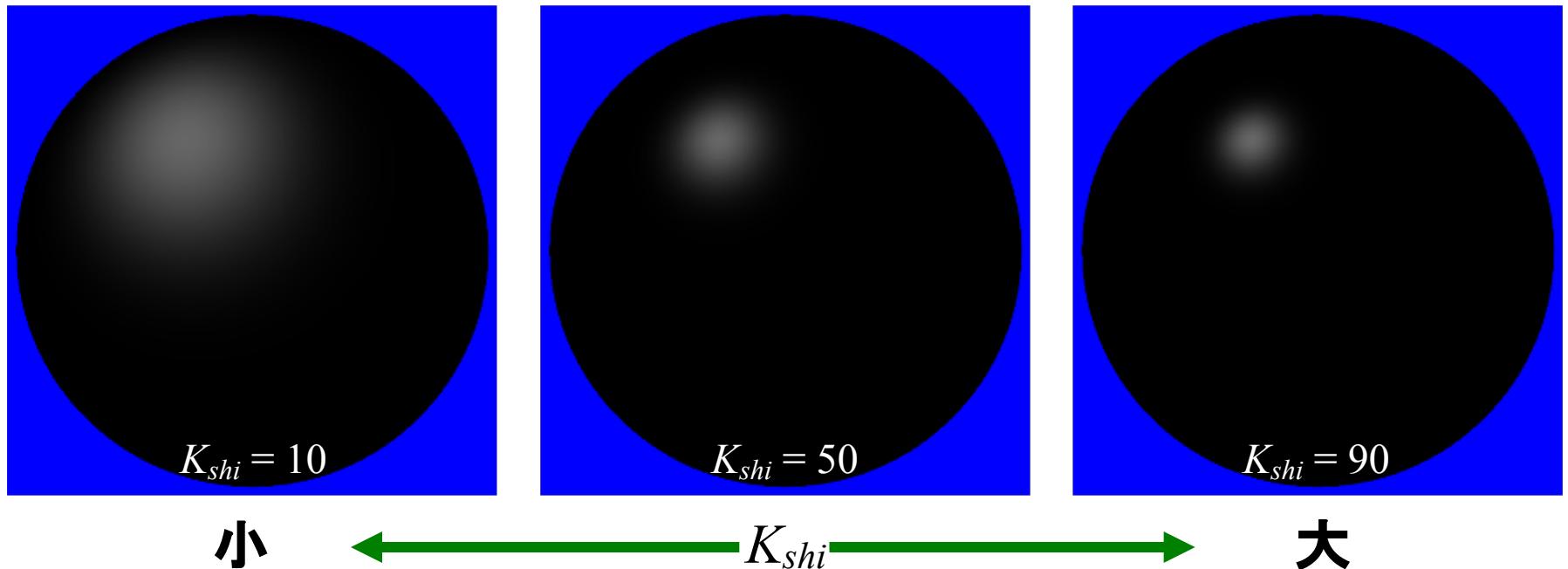
輝き係数



輝き係数(極座標表示)



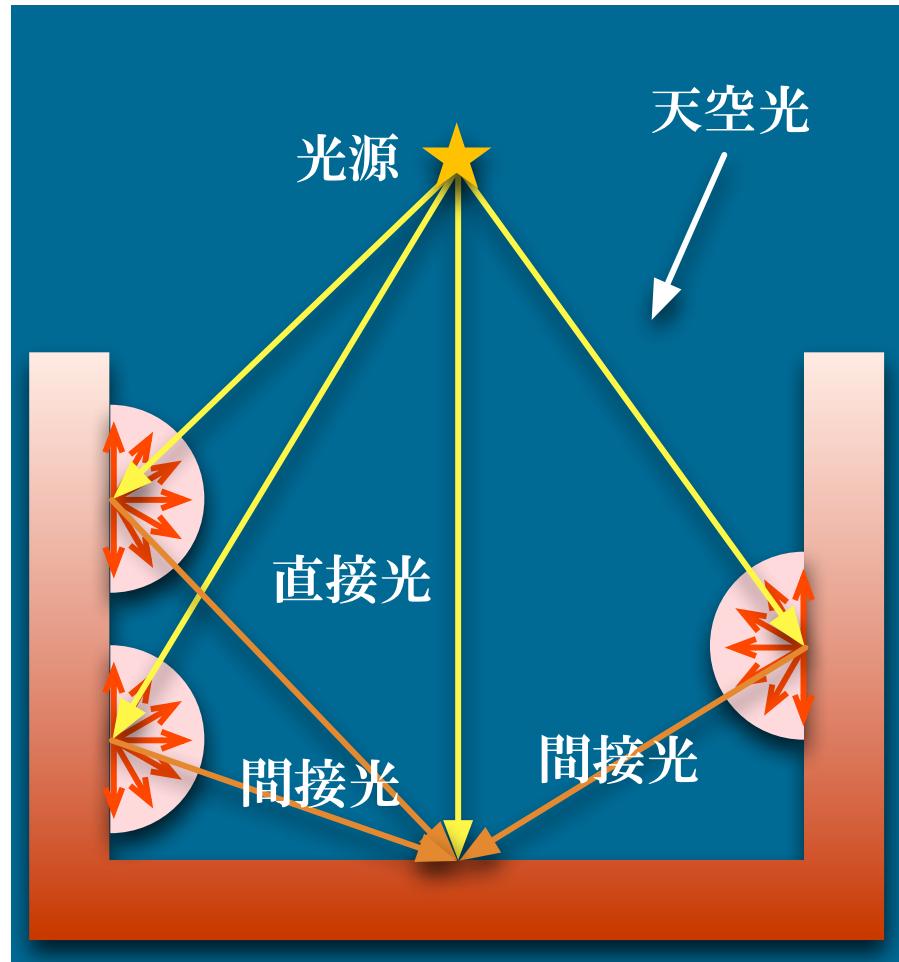
輝き係数によるハイライトの制御



環境光 (ambient)

- 物体表面には直接光のほかに間接光も届く
- 間接光の経路は複雑である
 - ある面から放射された反射光が再びその面に到達する場合もある
 - 正確に求めようとすると時間がかかる
- 間接光の反射光強度は入射光や視線の方向によらず一定とみなす

環境光



環境光の反射光強度

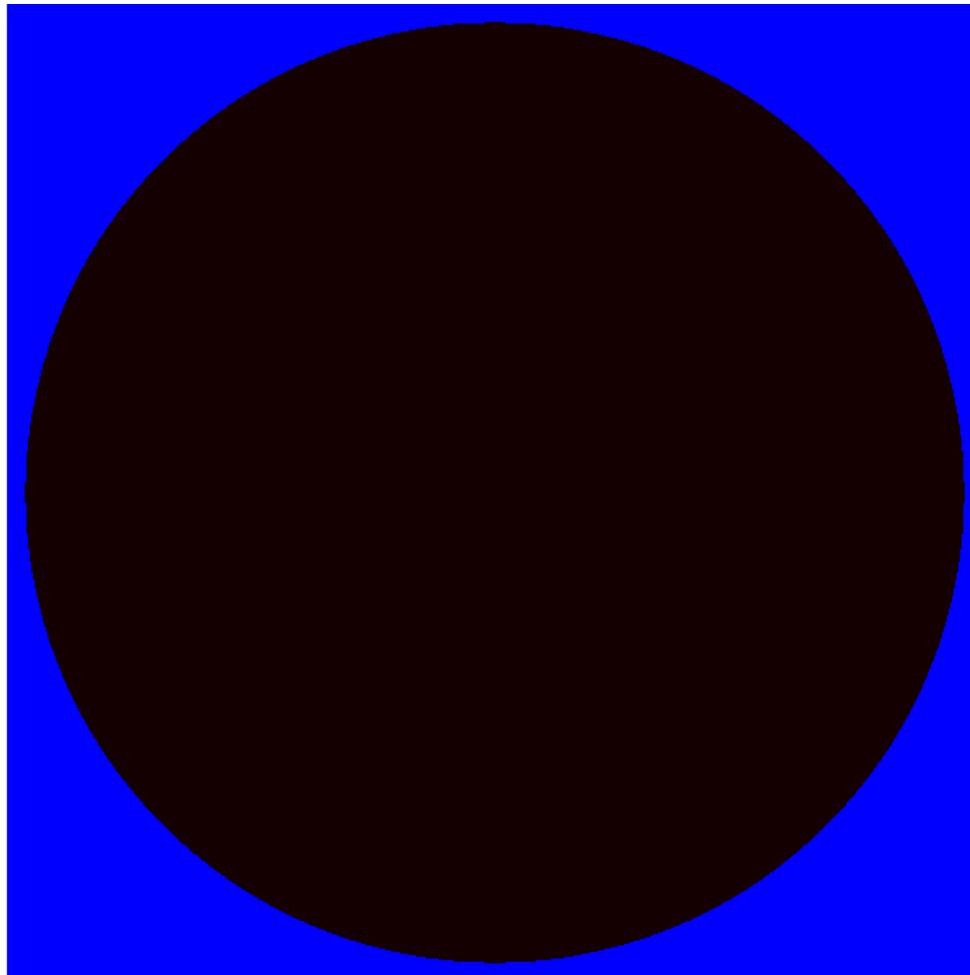
I_{amb} : 環境光の反射光強度

K_{amb} : 材質の環境光に対する反射係数

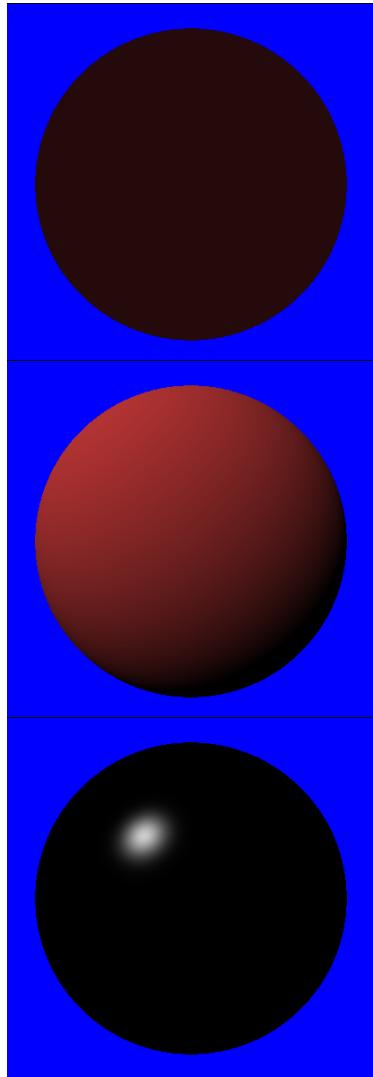
L_{amb} : 光源の環境光強度

$$I_{amb} = K_{amb} \otimes L_{amb}$$

環境光成分による陰影



照明方程式



環境光成分

$$I_{amb}$$

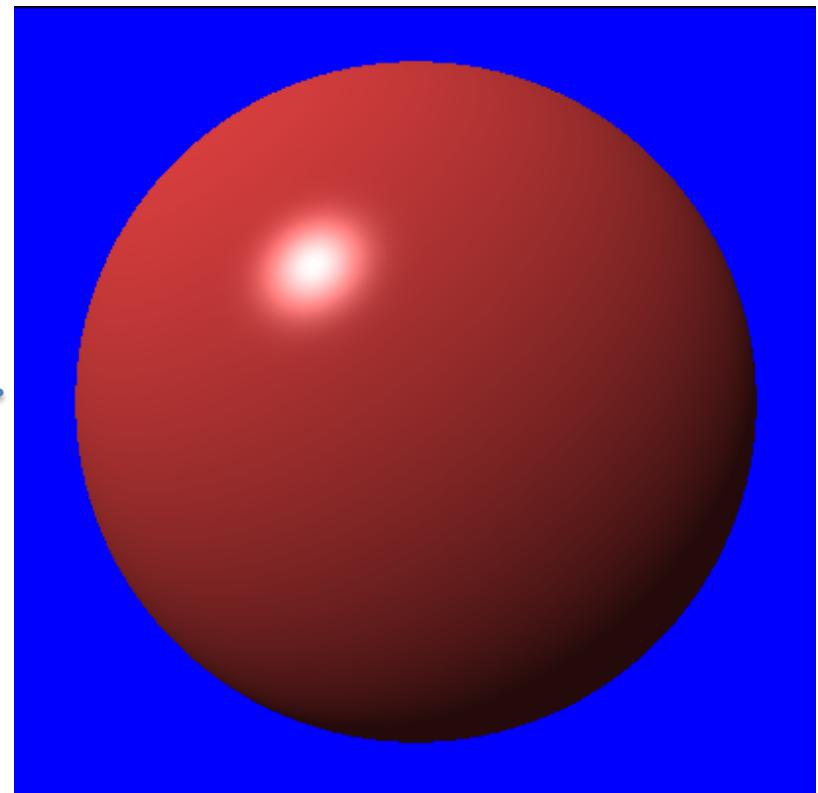
拡散反射光成分

$$I_{diff}$$

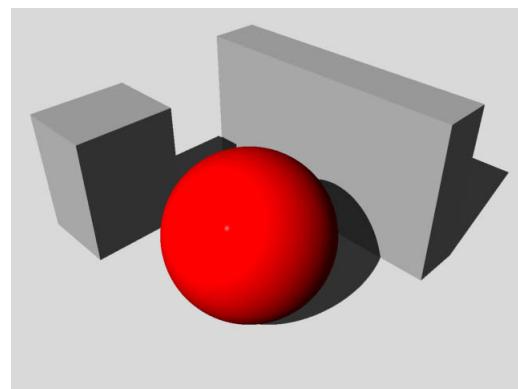
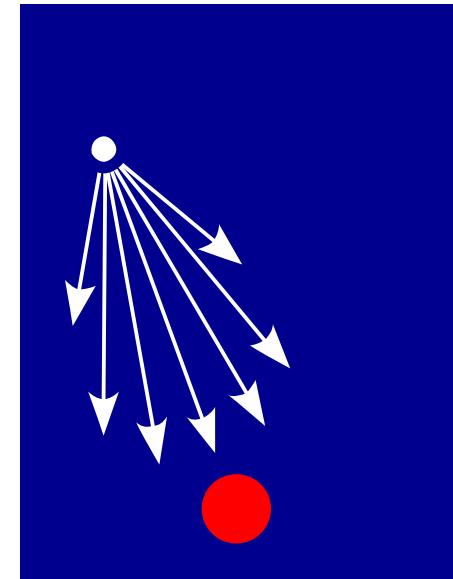
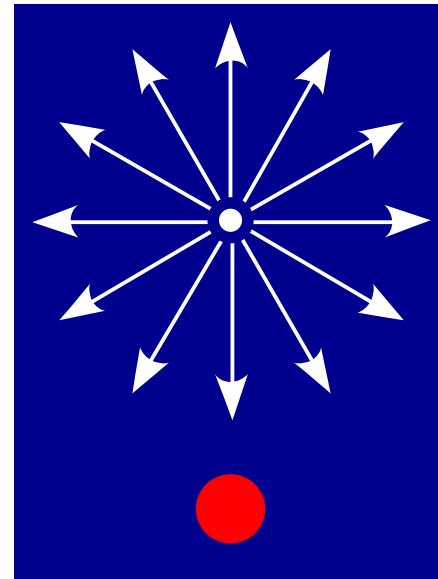
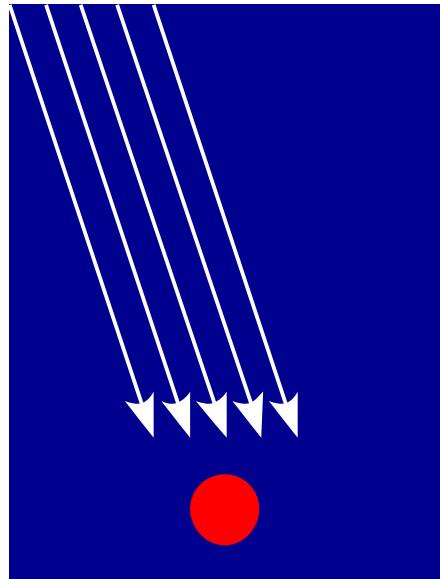
鏡面反射光成分

$$I_{spec}$$

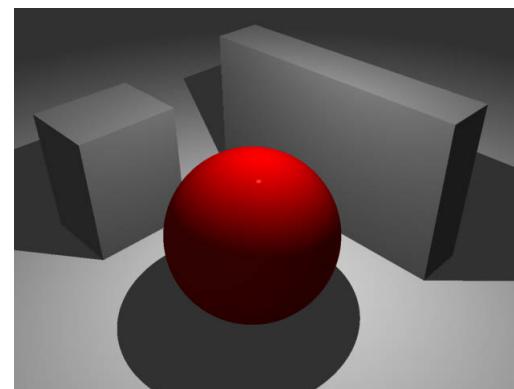
$$I_{tot} = I_{amb} + I_{diff} + I_{spec}$$



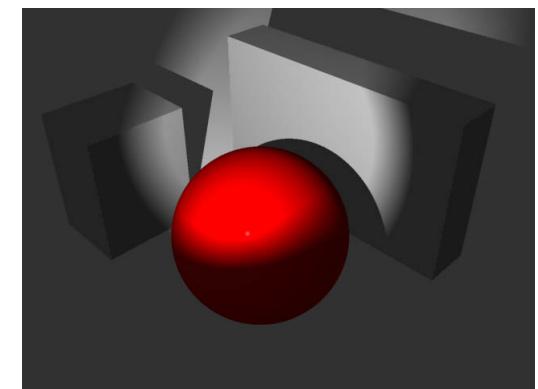
光源の種類(基本的なもの)



平行光線



点光源



スポットライト₃₆

距離に伴う減衰

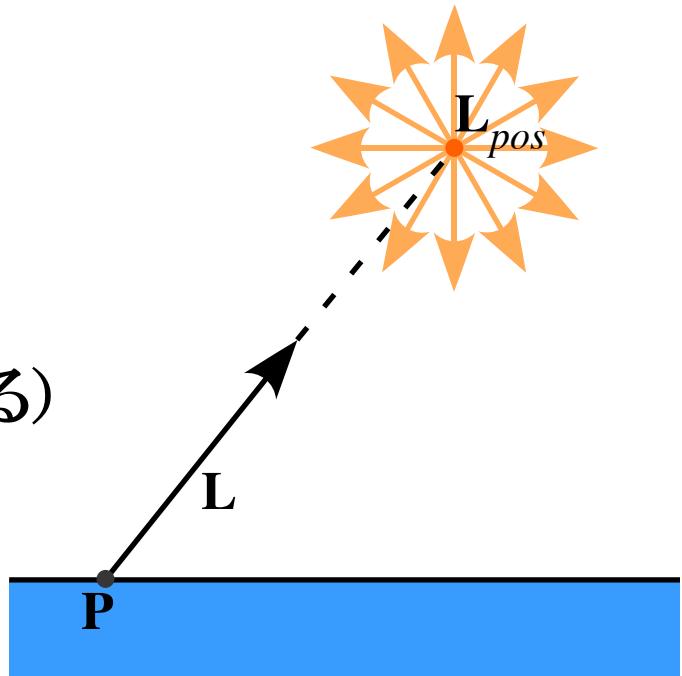
- 物理的には

$$d = \frac{1}{|\mathbf{L}_{pos} - \mathbf{P}|^2}$$

↓ 減衰が急峻すぎる(暗くなりすぎる)

$$d = \frac{1}{s_c + s_l |\mathbf{L}_{pos} - \mathbf{P}| + s_q |\mathbf{L}_{pos} - \mathbf{P}|^2}$$

$$I_{tot} = I_{amb} + d(I_{diff} + I_{spec})$$



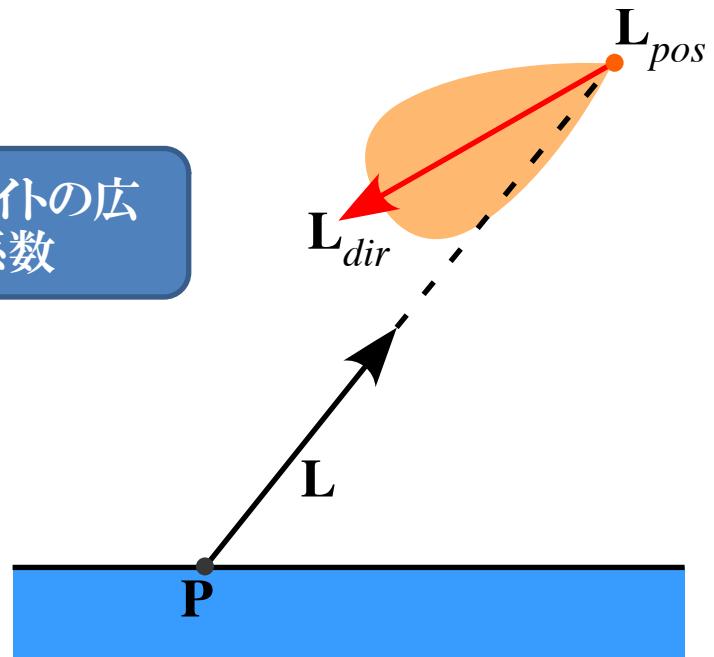
$$(s_c, s_l, s_q) = \begin{cases} (1, 0, 0) & \text{一定} \\ (0, 1, 0) & \text{反比例} \\ (0, 0, 1) & \text{物理的} \end{cases}$$

スポットライトの場合

- スポットライトの配光分布

$$C_{spot} = \max(-\mathbf{L} \cdot \mathbf{L}_{dir})^{s_{exp}}$$

スポットライトの広
がり係数



- 照明方程式

$$I_{tot} = C_{spot} \{ I_{amb} + d(I_{diff} + I_{spec}) \}$$

最終的な陰影付け方程式

光源に依存しない環境光(背景光): L_{glob}

自己発光強度: L_{emi}

スポットライトの配光分布: C_{spot}

距離減衰係数: d

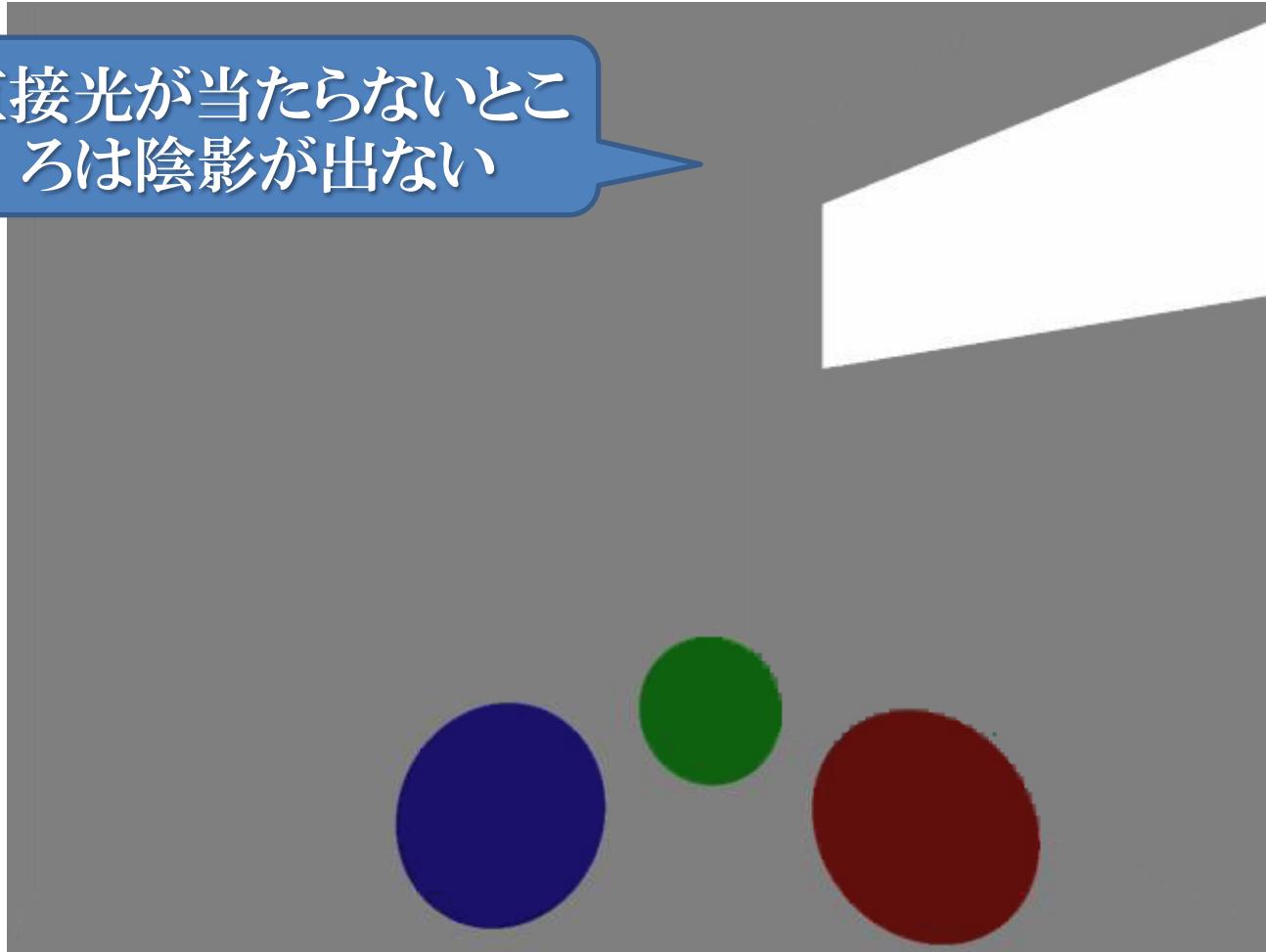
$$I_{tot} = L_{glob} \otimes K_{amb} + L_{emi} + c_{spot} \left\{ I_{amb} + d \left(I_{diff} + I_{spec} \right) \right\}$$

光源の数: n

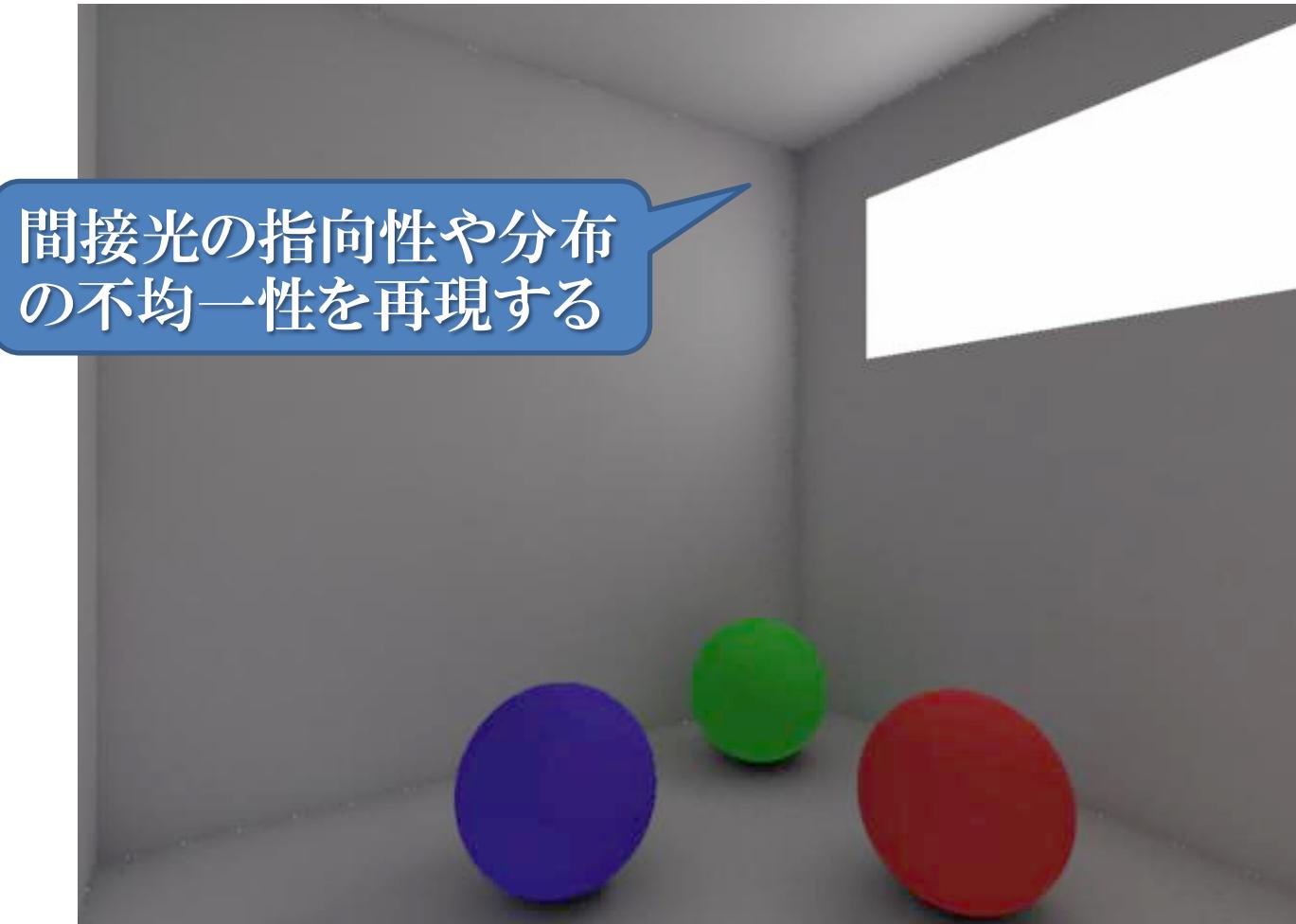
$$I_{tot} = L_{glob} \otimes K_{amb} + L_{emi} + \sum_{k=1}^n c_{spot}^k \left\{ I_{amb}^k + d^k \left(I_{diff}^k + I_{spec}^k \right) \right\}$$

環境光が定数の場合

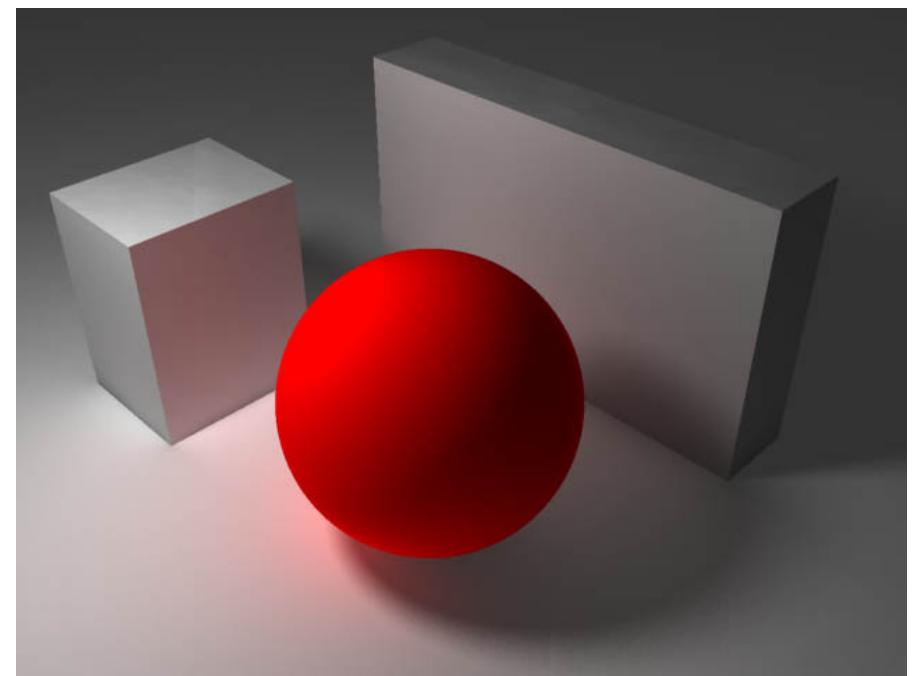
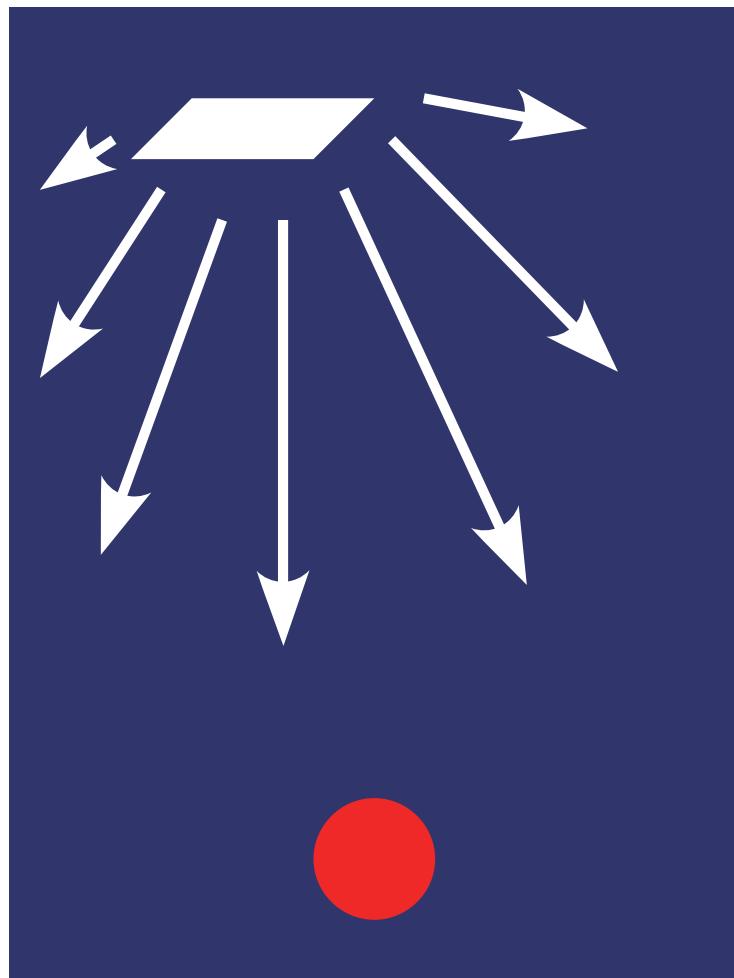
直接光が当たらないところは陰影が出ない



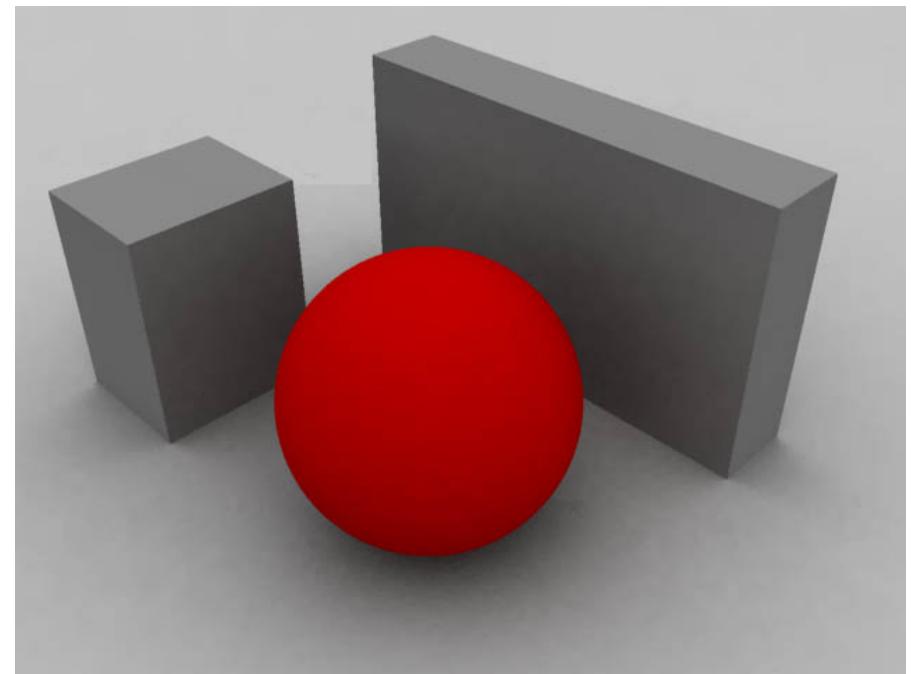
大域照明モデル



光源が面積を持っている場合

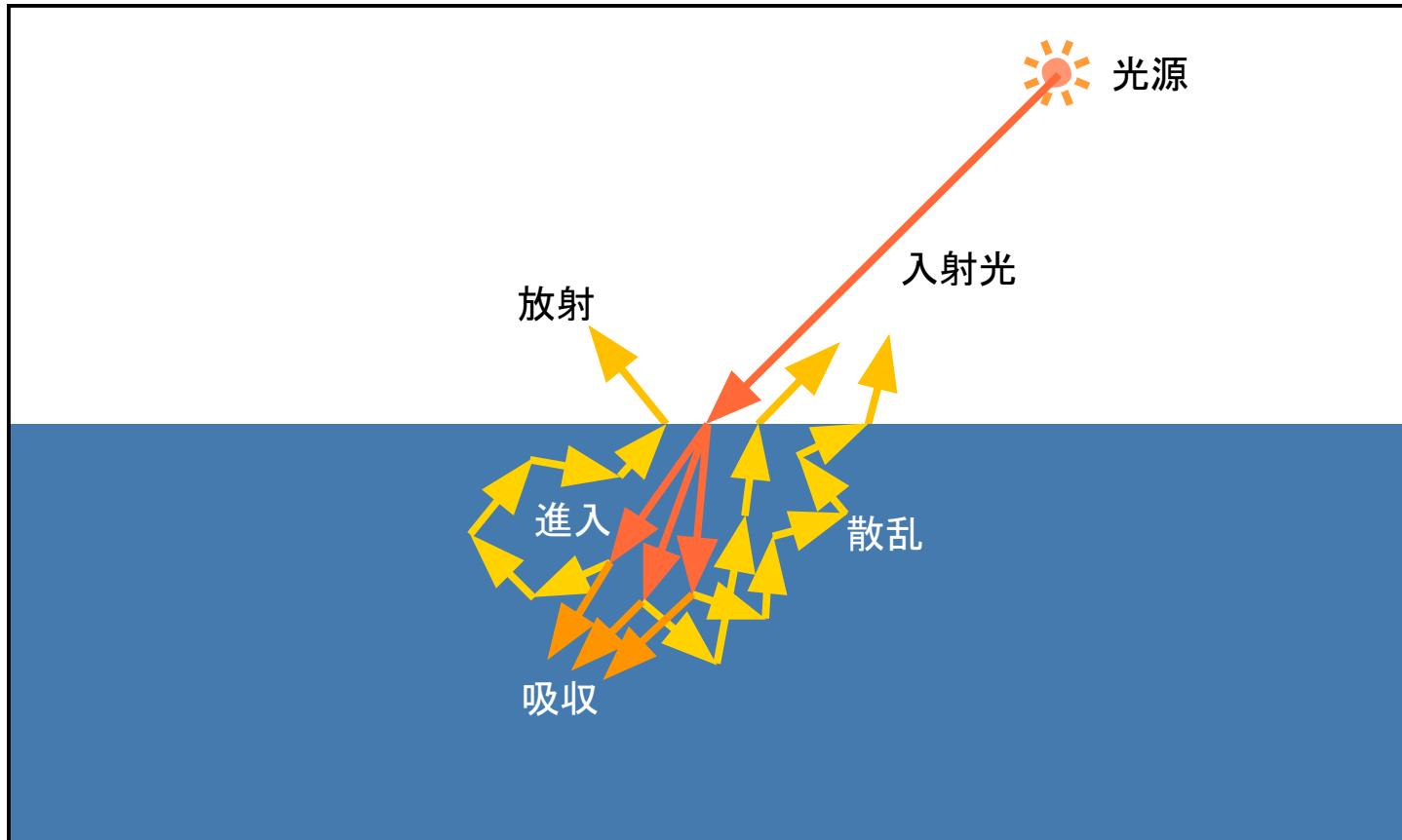


天空全体が光源の場合



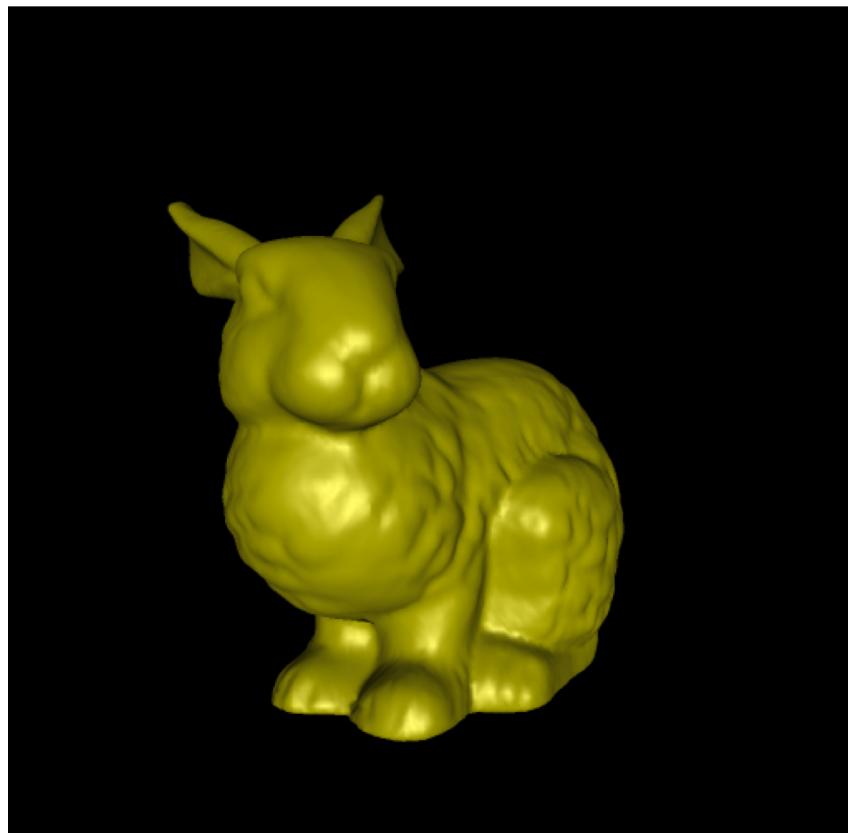
表面下散乱を考慮する

- 反射光は入射位置と異なる場所から放射される



表面下散乱の有無

表面下散乱なし



表面下散乱あり



おわり