

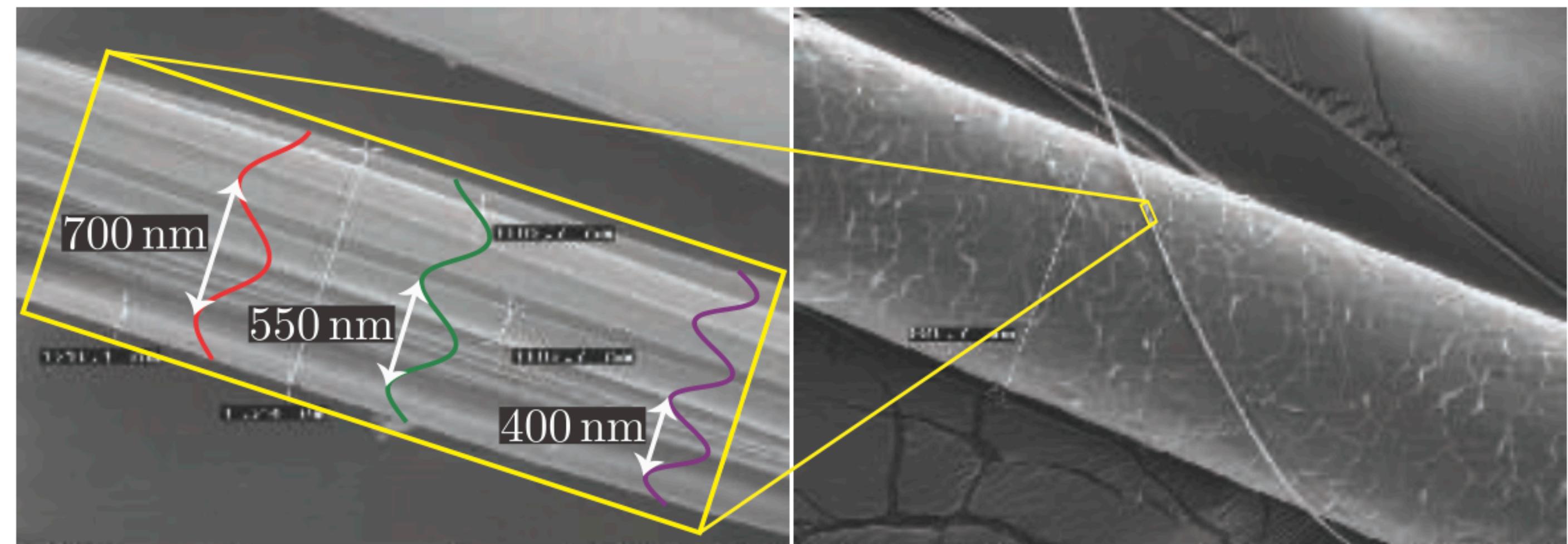
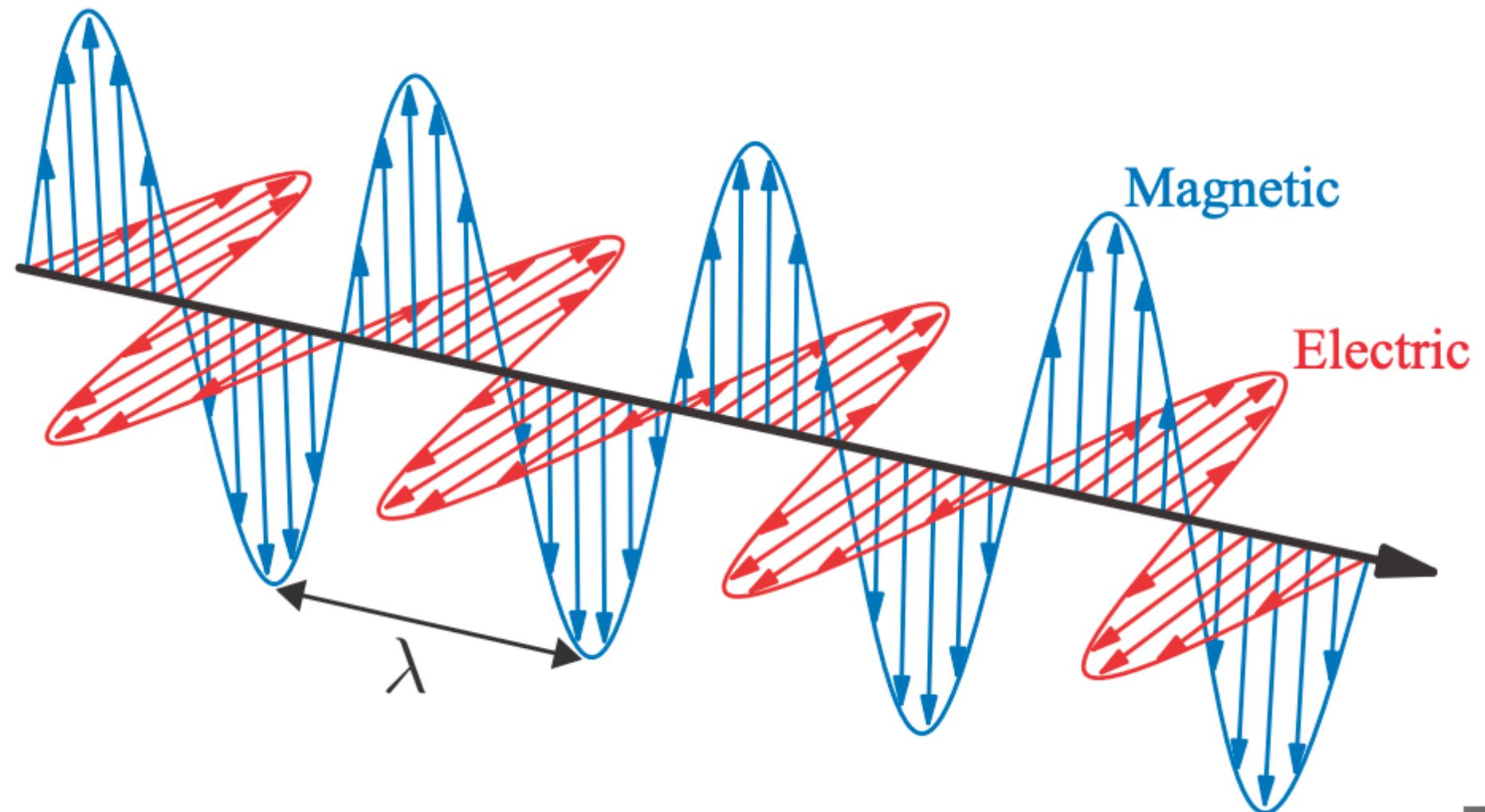
Physically Based Shading

230217 19101188 고은수

Contents

- 1. Physics of Light
- 2. The Camera
- 3. The BRDF
- 4. Illumination
- 5. Fresnel Reflectance
- 6. Microgeometry
- 7. Microfacet Theory
- 8. BRDF Models for Surface Reflection
- 9. BRDF Models for Subsurface Scattering
- 10. BRDF Models for Cloth
- 11. Wave Optics BRDF Models
- 12. Layered Materials
- 13. Blending and Filtering Materials

Physics of Light

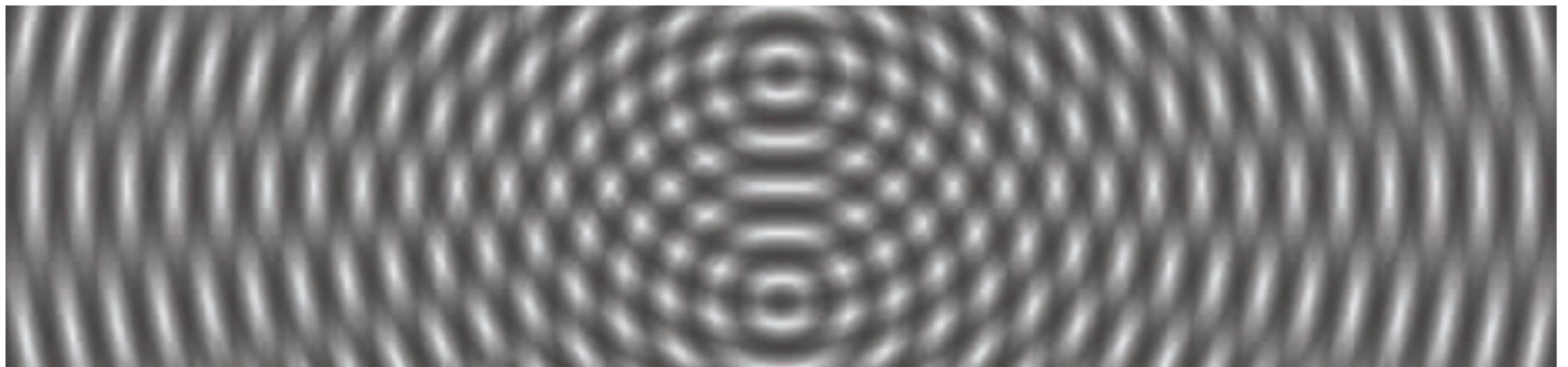
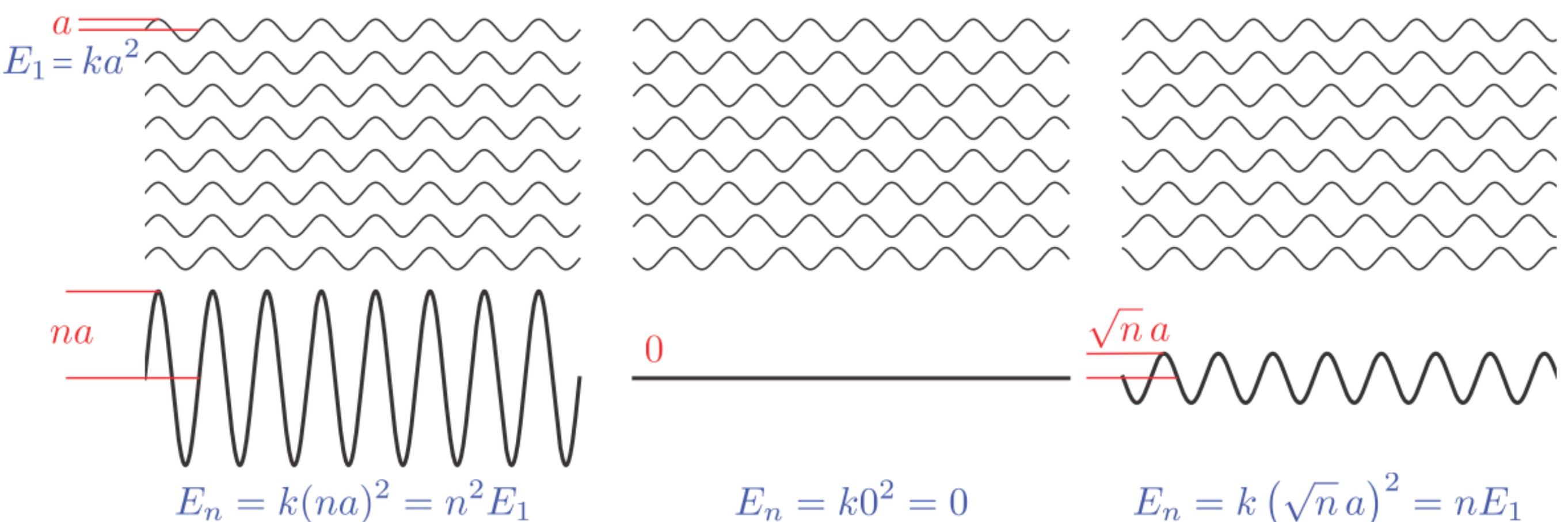


Physics of Light

1+1 = 4? -> sometimes

에너지 보존법칙에 위배? -> no

산란 - 진동하는 전기장은 물질의 전하를 밀고 당기고 차례로 진동시키는데 들어오는 광파의 에너지 일부를 새로운 방향으로 바꾸는 새로운 광파를 방출



Physics of Light

여러 분자에서 빛이 산란되는 경우

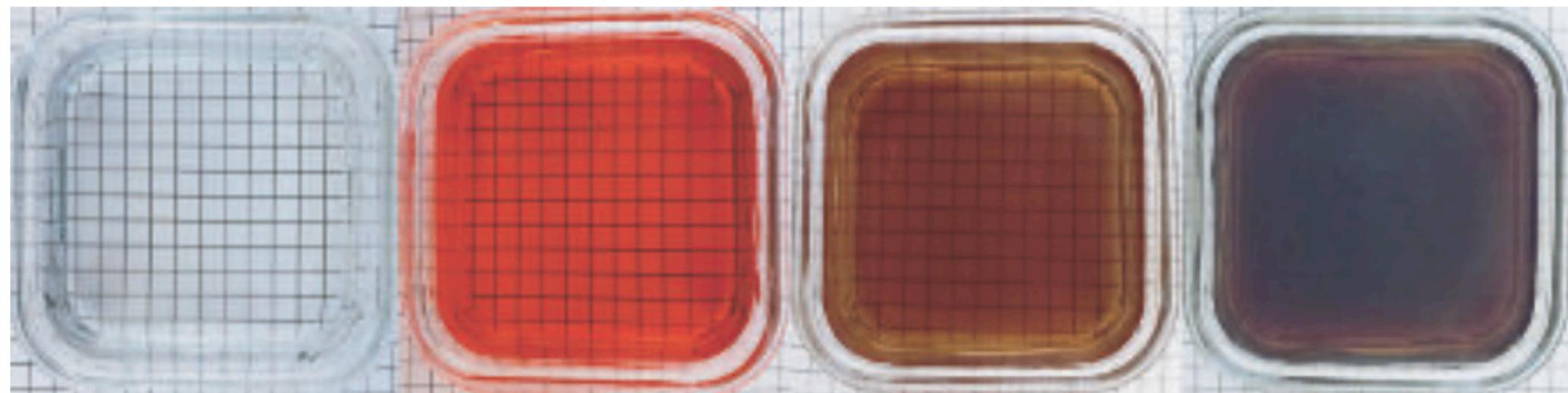
Particles - 이상기체에서 분자들은 서로 영향을 미치지 않으나 분자들이 광파장보다 훨씬 작은 성단에 빽빽하게 들어차면 각 성단의 산란된 광파는 위상을 이루고 간섭함 ex)구름, 안개

Physics of Light

Media - 균일한 간격의 동일한 문자로 채워진 매질을 통해 전파. 원래의 파동이 개별 문자에서 산란된 모든 파동과 결합된 후 최종 결과는 위상 속도와 진폭을 제외하고는 원래의 파동과 같음

빛 흡수는 빛의 강도를 감소시키고 색을 바꿀 수 있기 때문에 시각적으로 직접적인 영향

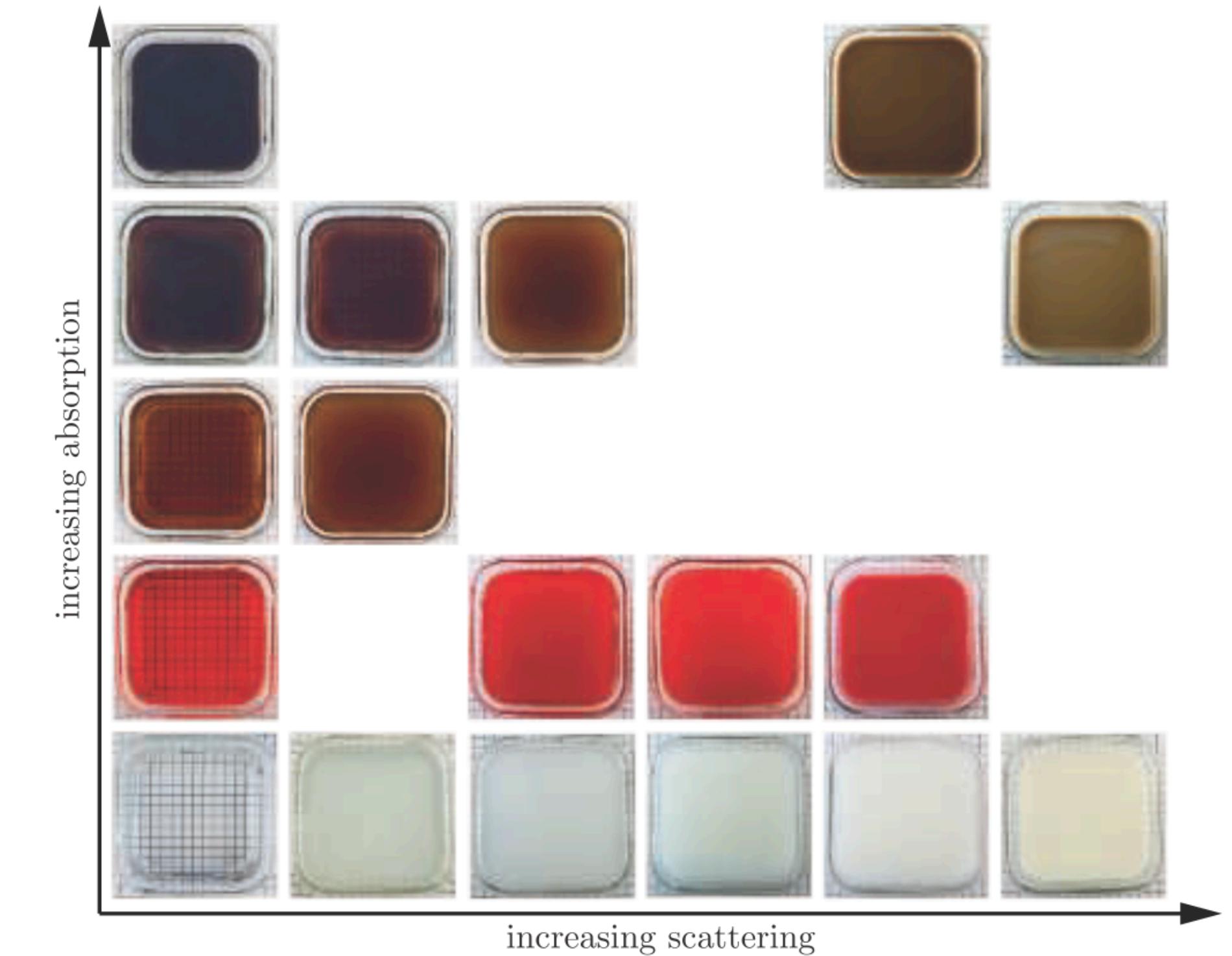
분자 분포의 국소적인 변화는 파괴적인 간섭 패턴을 깨뜨려 산란된 빛의 전파를 가능하게 함. 이러한 국소적 변화는 다른 문자 유형의 클러스터, 공극, 기포 또는 밀도 변화일 수 있음



Physics of Light

산란과 흡수는 모두 규모에 의존

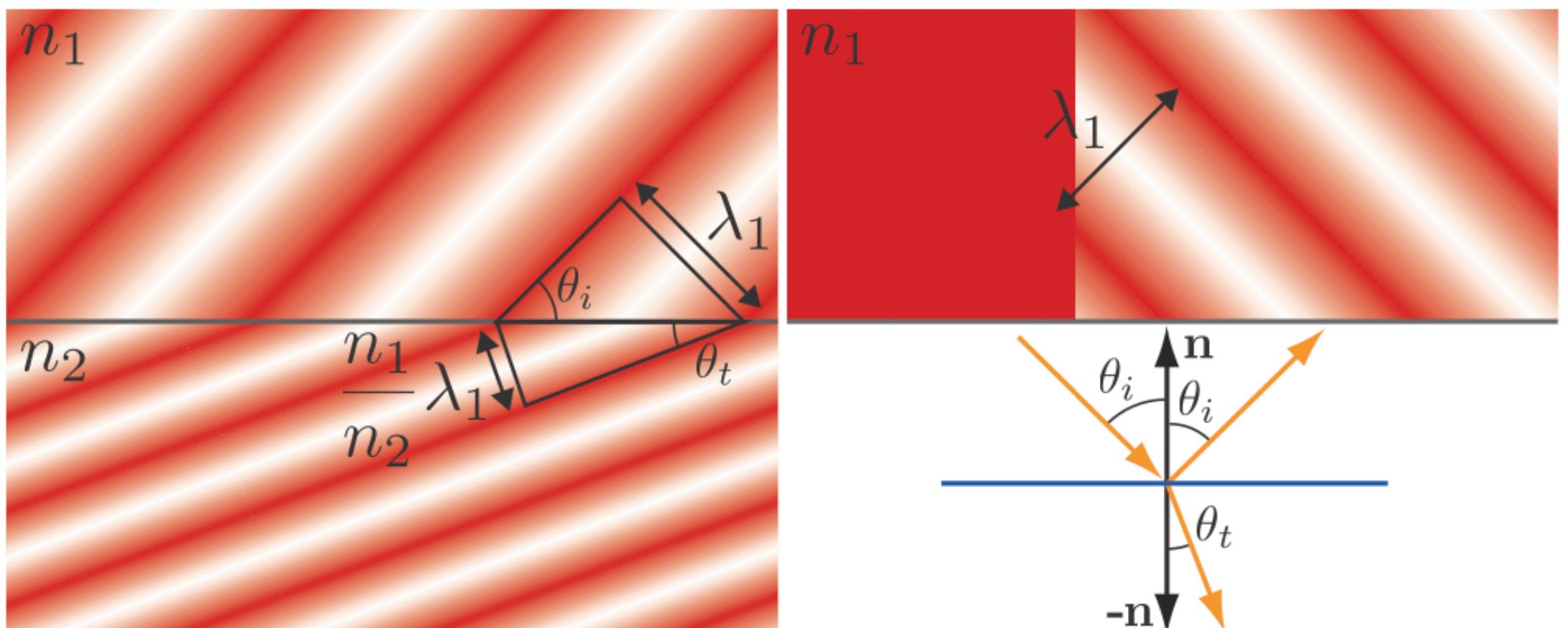
매개체의 외관은 비산과 흡수의 일부 조합에 의해 발생



Physics of Light

Surface

1. 표면에서 산란파는 입사파와 위상이 180도 이상이어야 함
2. 산란파는 입사파와 동일한 주파수를 가짐
3. 광파가 한 매질에서 다른 매질로 이동함에 따라 위상속도는 상대 굴절률(n_1/n_2)에 비례하여 변화



Physics of Light

굴절률의 보다 점진적인 변화는 빛을 분열시키는 것이 아니라 굴절에서 발생하는 불연속적인 굴곡의 연속적인 유사체에서 빛의 경로를 곡선으로 만든다

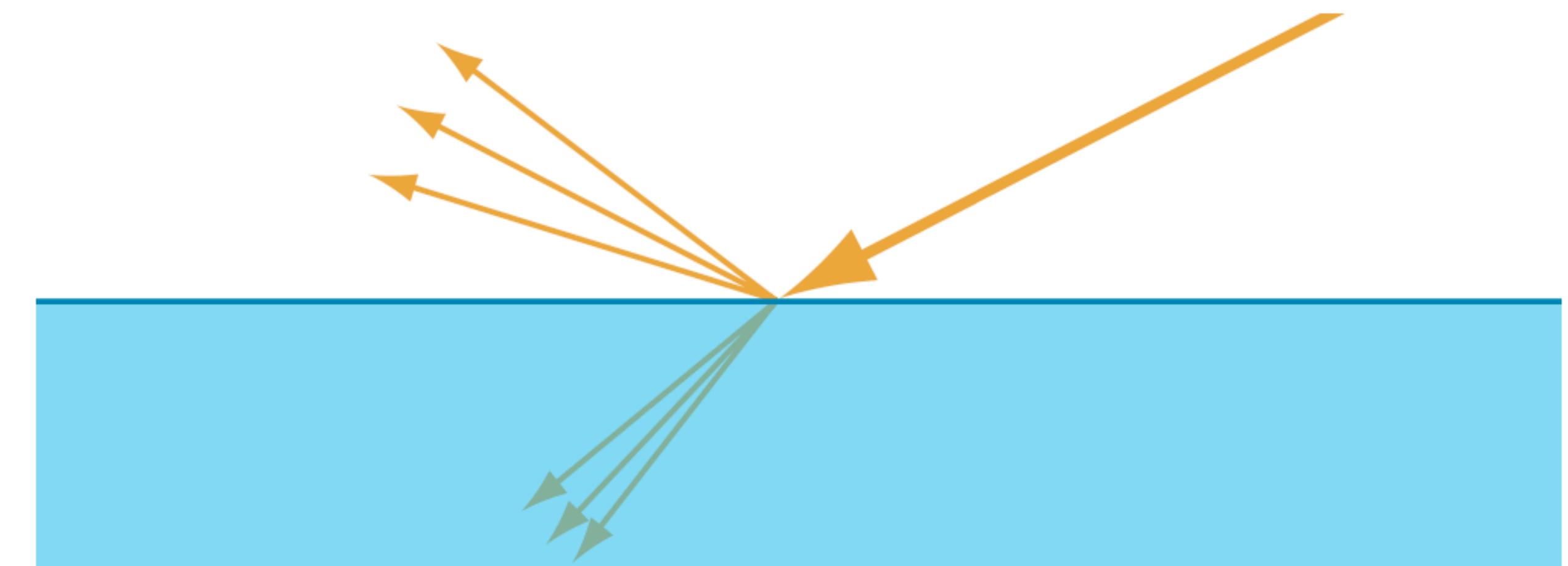
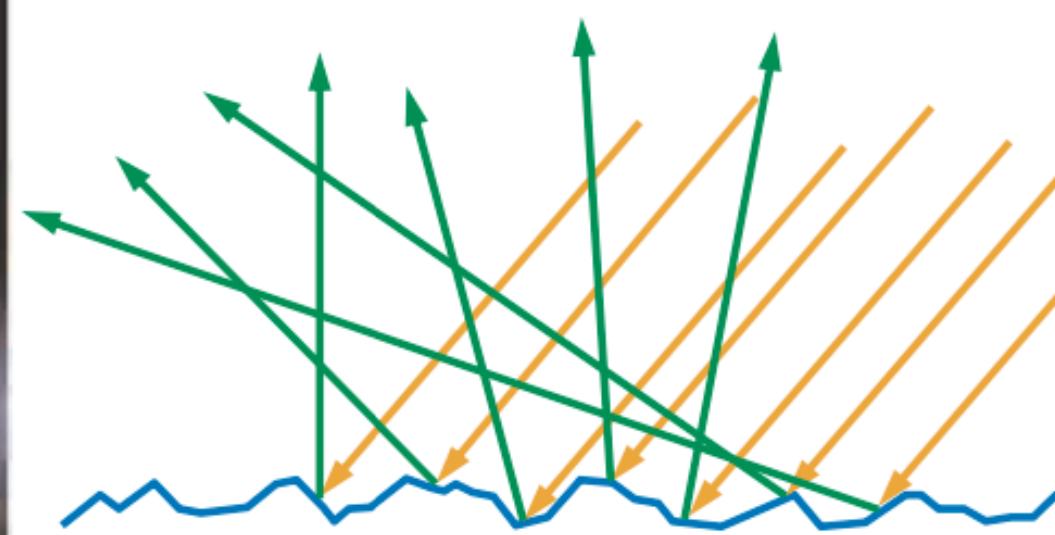
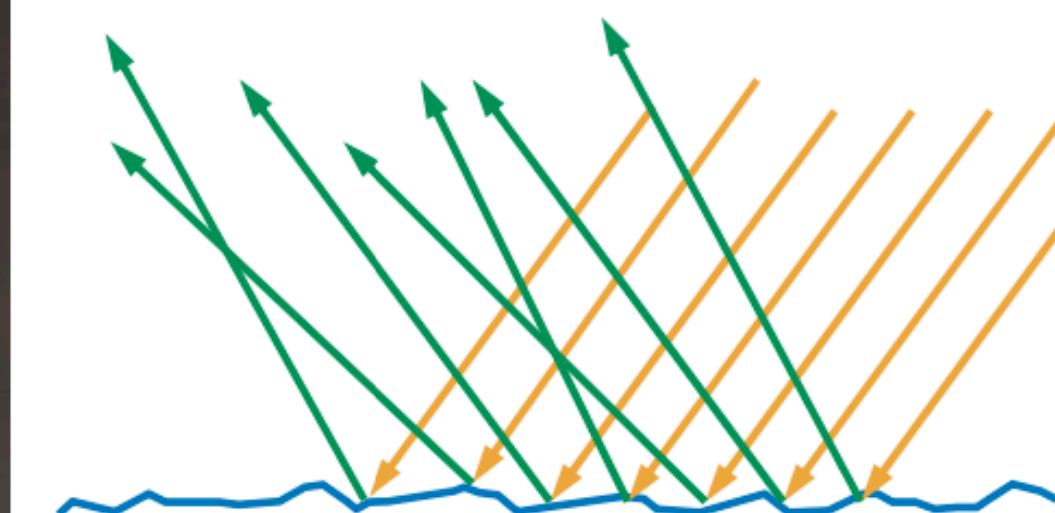
같은 굴절률을 가진 물질에 담그면 눈에 보이는 표면이 없다



Physics of Light

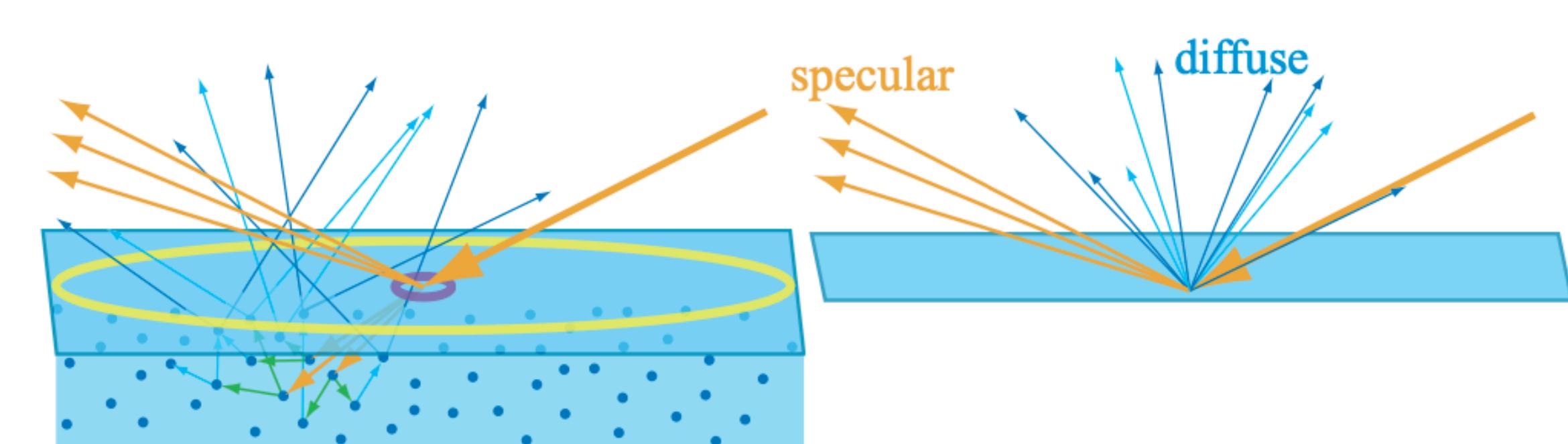
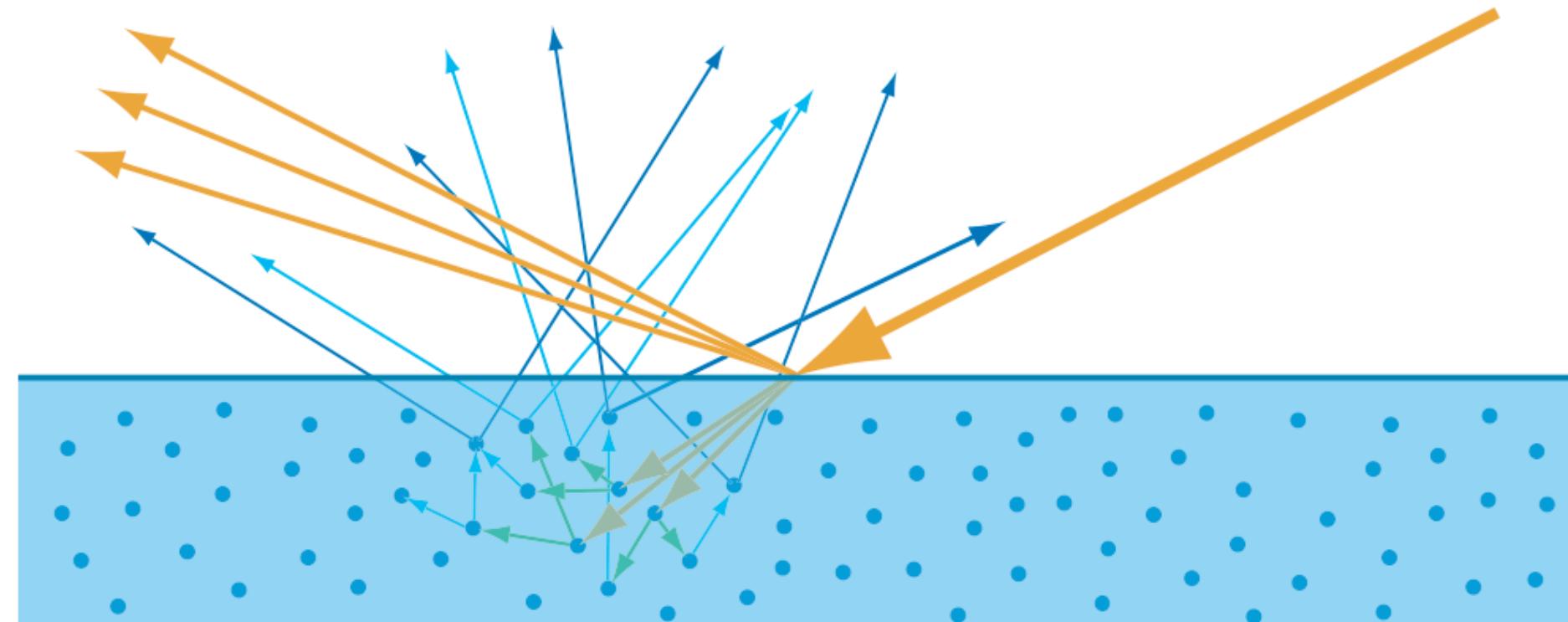
표면의 각 특정 지점이 단방향으로만 빛을 반사하지만 각 픽셀은 다양한 방향으로 빛을 반사하는 많은 표면 지점을 덮음

마이크로 지오메트리를 통계적으로 처리하고 표면을 미세 구조 노말 분포의 랜덤 분포를 갖는 것으로 본다. 결과적으로 표면을 방향의 지속적인 확산에서 빛을 반사, 굴절 하는 것으로 모델링



Physics of Light

Subsurface Scattering - 굴절된 빛은 물체의 내부와 계속 상호작용

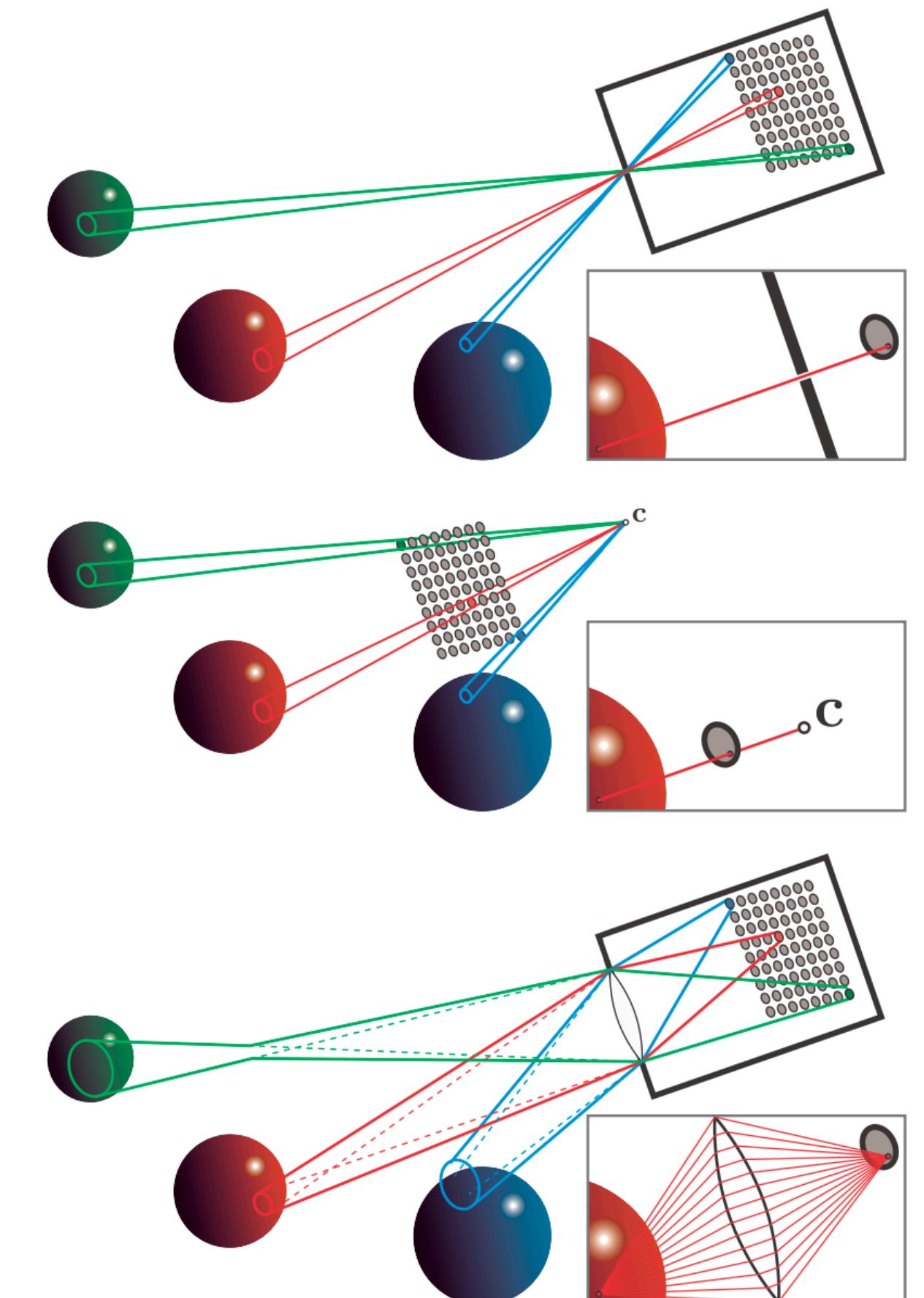


The Camera

렌더링 시 쉐이딩 처리된 표면 지점에서 카메라 위치까지의 광도를 계산함

전체 영상 시스템은 빛이 센서에 들어가고 부딪힐 수 있는 방향을 제한하는 단일 작은 조리개를 가진 차광 인클로저를 포함함

렌즈를 사용하여 더 큰 조리개를 사용 할 수 있고 이는 이미징 시스템에 의해 수집되는 빛의 양을 크게 증가시키나 이로 인해 카메라 시야 깊이가 제한되어 너무 가깝거나 먼 물체가 흐려짐



The BRDF

BRDF - Bidirectional Reflectance Distributing Function. Diffuse BRDF, Specular BRDF
 입사하는 빛에 따른 반사하는 빛의 비율에 대한 함수, 빛이 표면에서 어떻게 반사되는지 설명 -
 Phong, Blinn, etc.

$$L_i(\mathbf{c}, -\mathbf{v}) = L_o(\mathbf{p}, \mathbf{v}),$$

$$L_o(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \int_{\mathbf{l} \in \Omega} f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{p}, \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l}.$$

$$L_o(\mathbf{v}) = \int_{\mathbf{l} \in \Omega} f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) L_i(\mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l}.$$

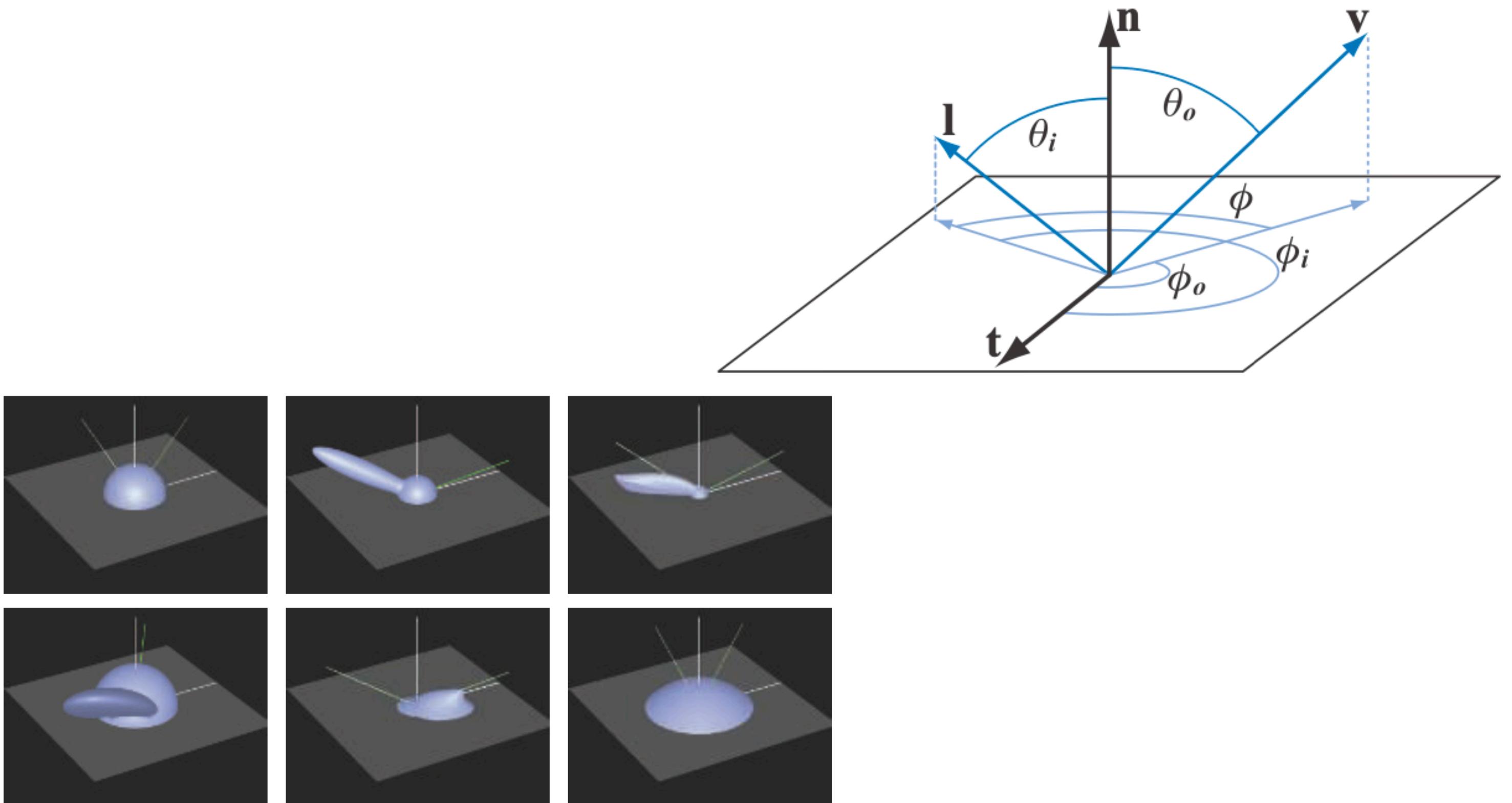
$$L_o(\theta_o, \phi_o) = \int_{\phi_i=0}^{2\pi} \int_{\theta_i=0}^{\pi/2} f(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o) L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i.$$

$$L_o(\mu_o, \phi_o) = \int_{\phi_i=0}^{2\pi} \int_{\mu_i=0}^1 f(\mu_i, \phi_i, \mu_o, \phi_o) L(\mu_i, \phi_i) \mu_i d\mu_i d\phi_i.$$

$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = f(\mathbf{v}, \mathbf{l}).$$

$$R(\mathbf{l}) = \int_{\mathbf{v} \in \Omega} f(\mathbf{l}, \mathbf{v})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) d\mathbf{v}. \quad R(\mathbf{v}) = \int_{\mathbf{l} \in \Omega} f(\mathbf{l}, \mathbf{v})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) d\mathbf{l}.$$

$$R(\mathbf{l}) = \pi f(\mathbf{l}, \mathbf{v}). \quad f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{\rho_{ss}}{\pi}.$$



Illumination

반사 방정식을 사용하여 각 표면 지점에서 쉐이딩을 로컬로 계산하는 로컬 조명에 초점

$$L_o(\mathbf{v}) = \pi f(\mathbf{l}_c, \mathbf{v}) \mathbf{c}_{\text{light}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_c).$$

$$L_o(\mathbf{v}) = \pi f(\mathbf{l}_c, \mathbf{v}) \mathbf{c}_{\text{light}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_c)^+.$$

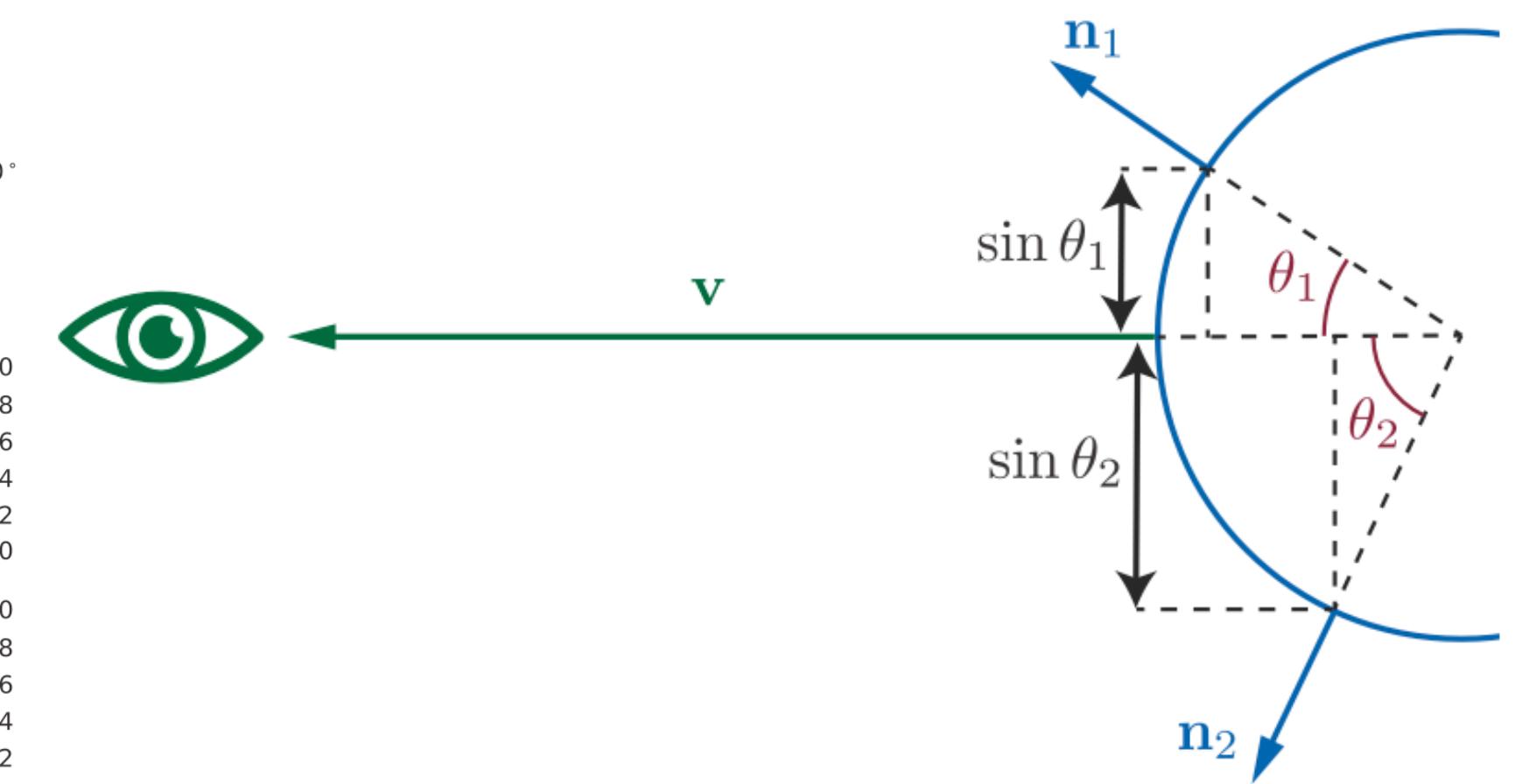
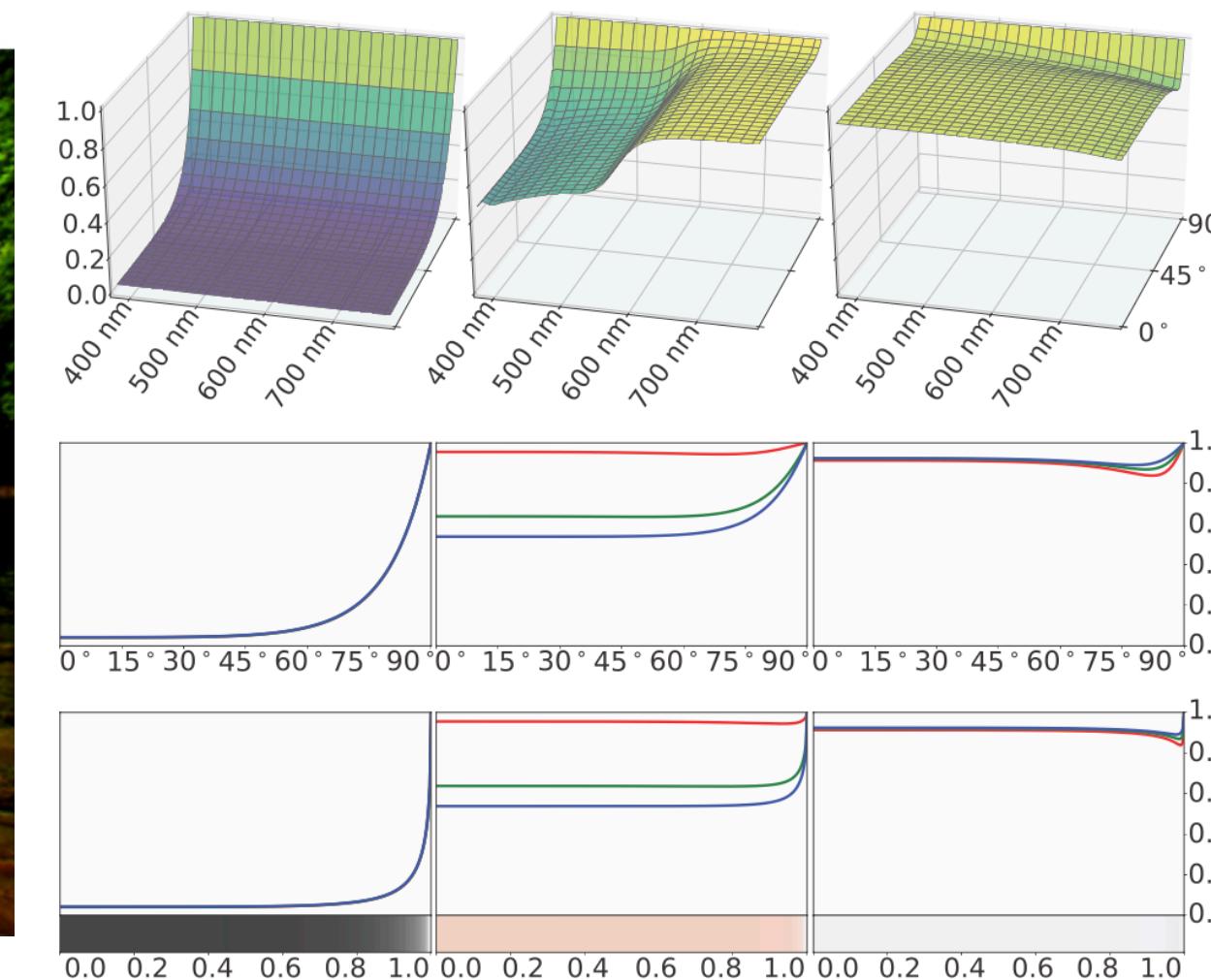
$$L_o(\mathbf{v}) = \pi \sum_{i=1}^n f(\mathbf{l}_{c_i}, \mathbf{v}) \mathbf{c}_{\text{light}_i} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_{c_i})^+,$$

Fresnel Reflectance

빛이 물체에 도달할 때 시야각에 따라 일정량은 반사하고 일정량은 굴절

External Reflection - $n_1 < n_2$ 인 경우(공기 -> 물체)

- 빛이 표면에 수직인 상태에서 $\theta_i = 0$ 일 때 $F(\theta_i)$ 는 물질의 성질인 값을 가짐
- y_i 가 증가하고 빛이 점점 더 힐끗거리는 각도로 부딪힐 때 $F(y_i)$ 의 값은 증가하는 경향이 있으며 $y_i=90^\circ$ 에서 모든 주파수에 대해 1에 도달함



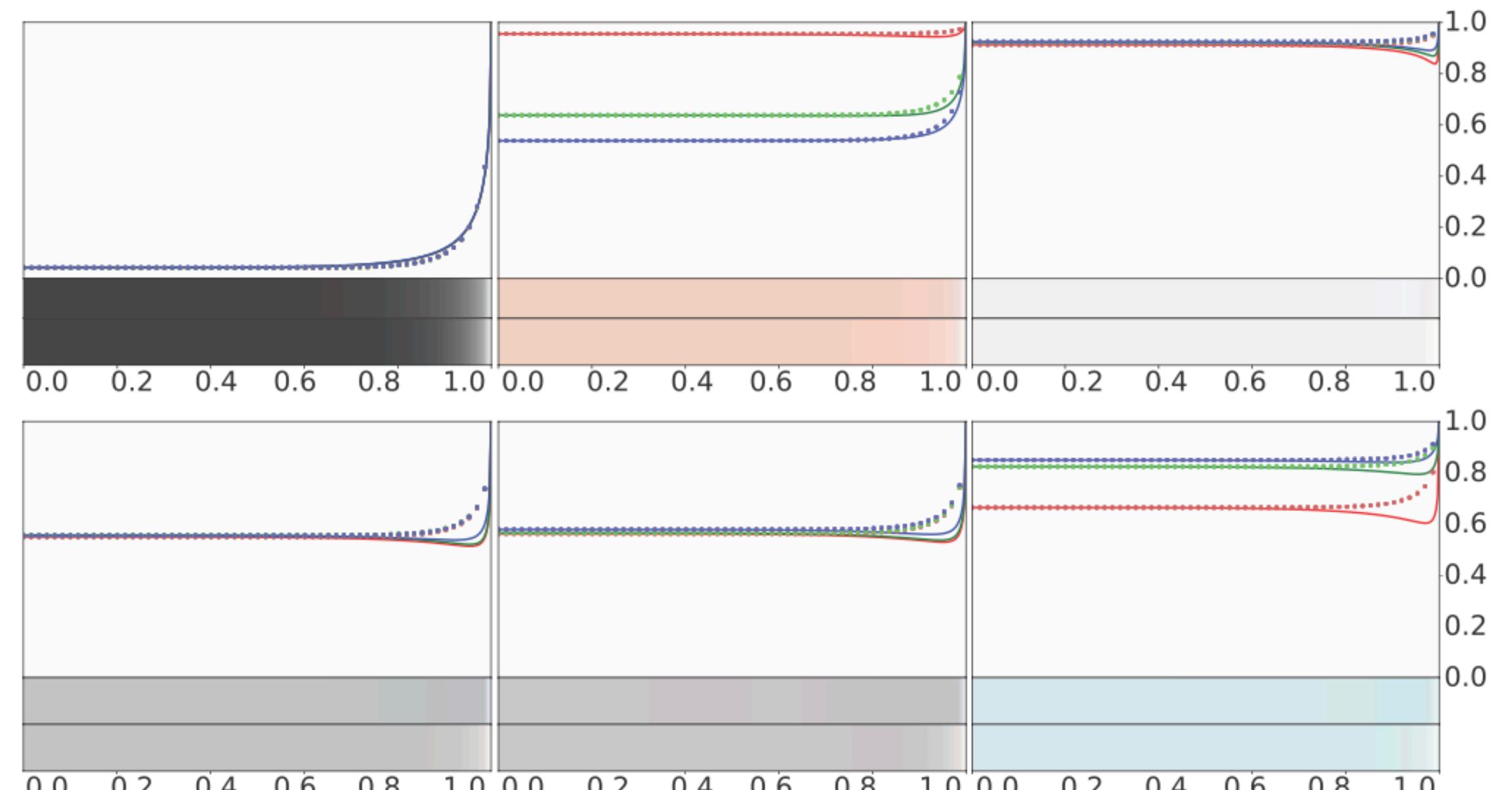
Fresnel Reflectance

Fresnel 방정식은 복잡성 외에도 가시 스펙트럼에서 샘플링된 굴절률 값이 필요하며 이러한 값은 복소수일 수 있기 때문에 렌더링에 직접 사용하기 어려운 특성을 가짐 -> Schlick 근사

$$F(\mathbf{n}, \mathbf{l}) \approx F_0 + (1 - F_0)(1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})^+)^5.$$

$$F_0 = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

$$F(\mathbf{n}, \mathbf{l}) \approx F_0 + (F_{90} - F_0)(1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})^+)^{\frac{1}{p}}.$$



Fresnel Reflectance

Typical Fresnel Reflectance Values

- 유전체

Dielectric	Linear	Texture	Color	Notes
Water	0.02	39		
Living tissue	0.02–0.04	39–56		Watery tissues are toward the lower bound, dry ones are higher
Skin	0.028	47		
Eyes	0.025	44		Dry cornea (tears have a similar value to water)
Hair	0.046	61		
Teeth	0.058	68		
Fabric	0.04–0.056	56–67		Polyester highest, most others under 0.05
Stone	0.035–0.056	53–67		Values for the minerals most often found in stone
Plastics, glass	0.04–0.05	56–63		Not including crystal glass
Crystal glass	0.05–0.07	63–75		
Gems	0.05–0.08	63–80		Not including diamonds and diamond simulants
Diamond-like	0.13–0.2	101–124		Diamonds and diamond simulants (e.g., cubic zirconia, moissanite)

Fresnel Reflectance

- 금속

Metal	Linear	Texture	Color
Titanium	0.542,0.497,0.449	194,187,179	#C8A29E
Chromium	0.549,0.556,0.554	196,197,196	#C8C8C8
Iron	0.562,0.565,0.578	198,198,200	#C8C8D0
Nickel	0.660,0.609,0.526	212,205,192	#B8C8A0
Platinum	0.673,0.637,0.585	214,209,201	#C8C8C8
Copper	0.955,0.638,0.538	250,209,194	#F8B8B0
Palladium	0.733,0.697,0.652	222,217,211	#C8C8C8
Mercury	0.781,0.780,0.778	229,228,228	#C8C8C8
Brass (C260)	0.910,0.778,0.423	245,228,174	#F8D860
Zinc	0.664,0.824,0.850	213,234,237	#B8C8D0
Gold	1.000,0.782,0.344	255,229,158	#F8D860
Aluminum	0.913,0.922,0.924	245,246,246	#C8C8C8
Silver	0.972,0.960,0.915	252,250,245	#C8C8C8

- 반도체

Substance	Linear	Texture	Color
Diamond	0.171,0.172,0.176	115,115,116	#A8A8A8
Silicon	0.345,0.369,0.426	159,164,174	#B8C8D0
Titanium	0.542,0.497,0.449	194,187,179	#C8A29E

Fresnel Reflectance

- Fresnel Reflectance Values in Water

$$F_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Substance	Linear	Texture	Color
Skin (in air)	0.028	47	#333333
Skin (in water)	0.0007	2	#222222
Schott K7 glass (in air)	0.042	58	#444444
Schott K7 glass (in water)	0.004	13	#333333
Diamond (in air)	0.172	115	#555555
Diamond (in water)	0.084	82	#444444
Iron (in air)	0.562,0.565,0.578	198,198,200	#CCCCCC
Iron (in water)	0.470,0.475,0.492	182,183,186	#CCCCCC
Gold (in air)	1.000,0.782,0.344	255,229,158	#FFCC00
Gold (in water)	1.000,0.747,0.261	255,224,140	#FFCC00
Silver (in air)	0.972,0.960,0.915	252,250,245	#CCCCCC
Silver (in water)	0.964,0.950,0.899	251,249,243	#CCCCCC

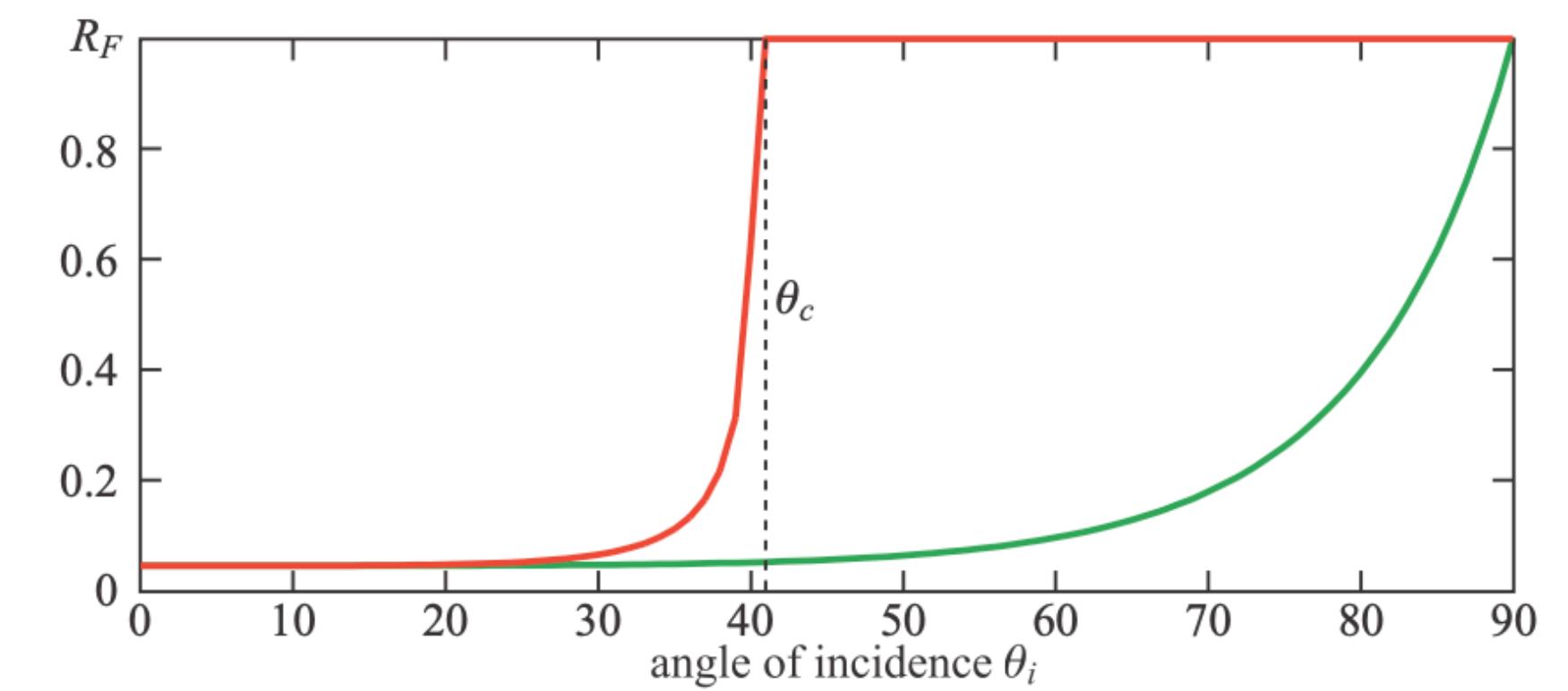
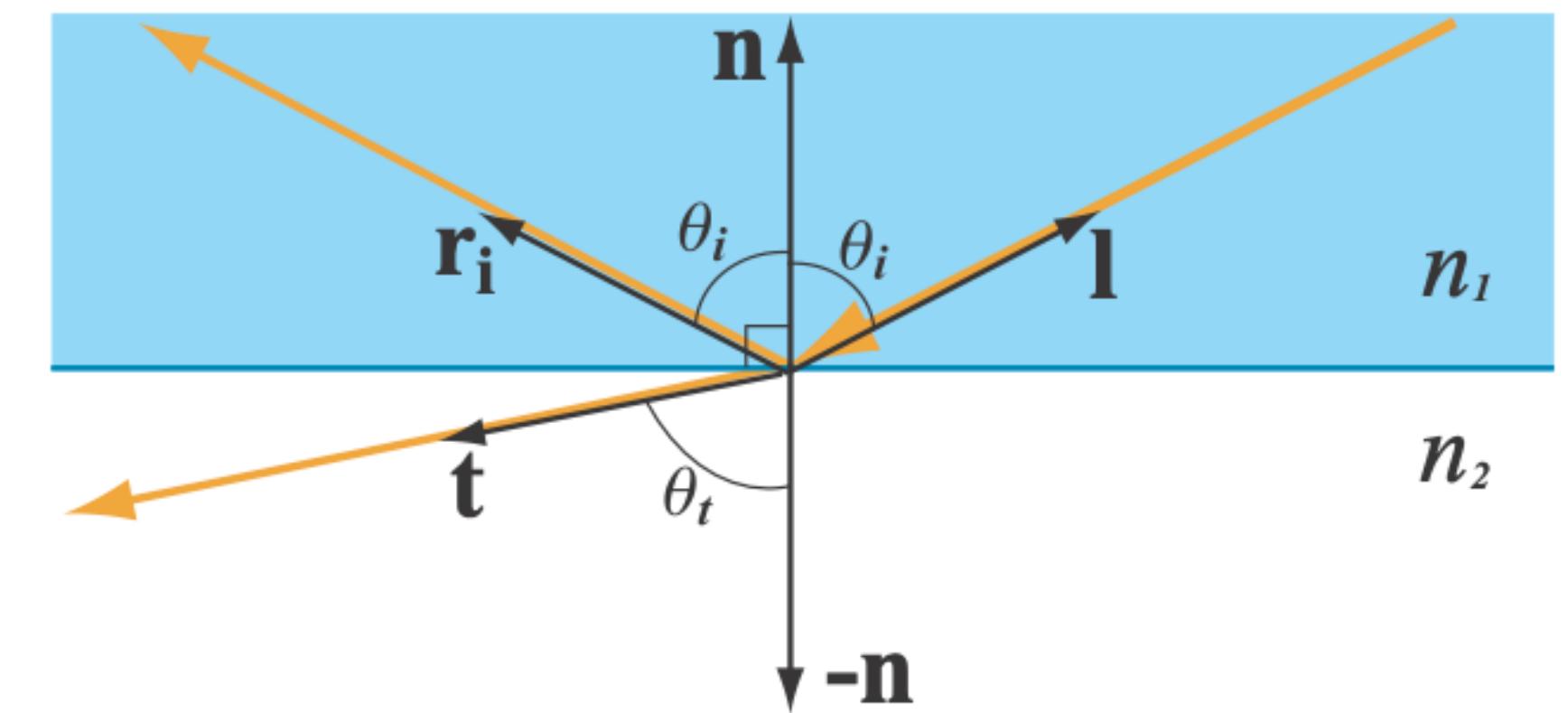
- Parameterizing Fresnel Values

Fresnel Reflectance

Internal Reflection - $n_1 > n_2$

내부 반사는 평균적으로 반사율이 더 높고 유전체에서만 발생

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1 - \sqrt{F_0}}{1 + \sqrt{F_0}}.$$



— glass (external reflection)

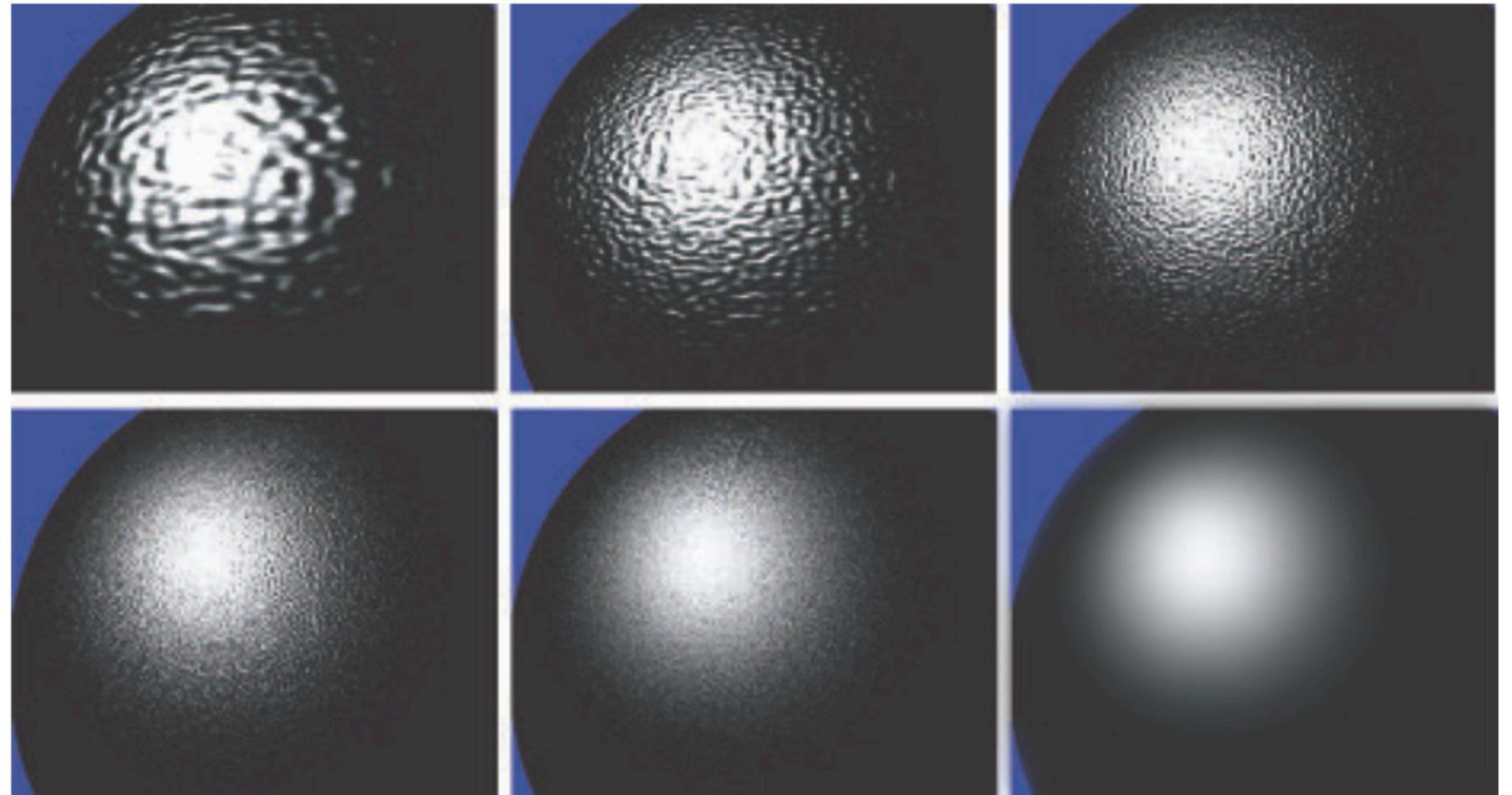
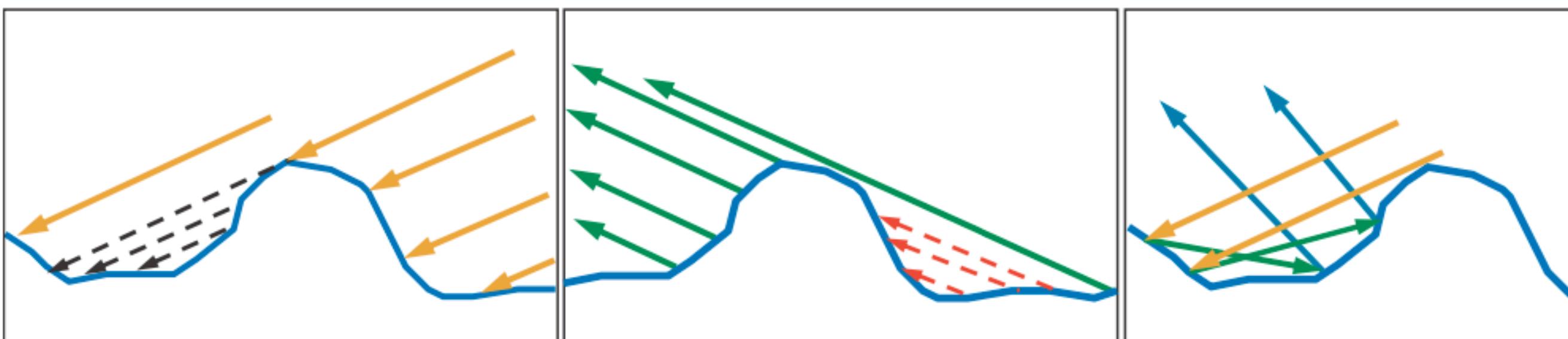
— glass (internal reflection)

Microgeometry

개별 microfacet의 방향은 다소 무작위적이기 때문에 통계적 분포로 모델링하는 것이 타당함. 이 분포의 밀함은 표면 거칠기에 의해 결정됨, 표면이 거칠수록 마이크로 지오메트리 법선은 더 확산됨

거친 표면에서는 빛에너지가 더 넓은 원뿔형 방향으로 퍼지기 때문에 더 어두움

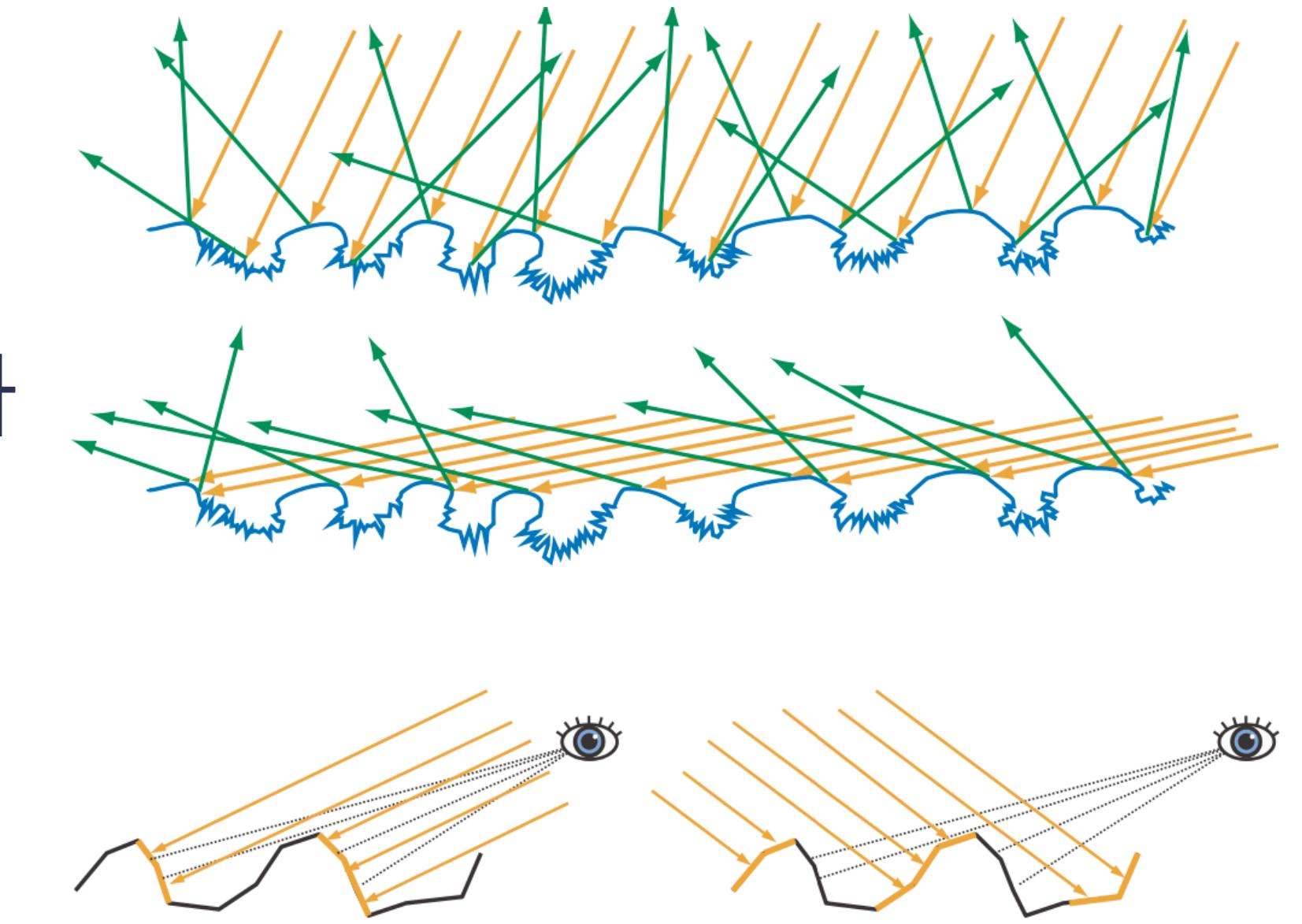
대부분의 표면에서 마이크로스케일 표면 법선의 분포는 등방성이며 이는 회전 대칭이며 고유한 방향성이 없음을 의미함



Microgeometry

마이크로 지오메트리 높이와 표면 정규 분포 사이에 상관 관계가 있는 경우 그림자 및 마스킹을 통해 노말 분포 변경 가능

마이크로 지오메트리의 불규칙성이 지표면 아래의 산란 거리보다 크면 그림자와 마스킹은 빛이 들어오는 방향으로 우선적으로 반사되는 역반사 효과를 일으킬 수 있음. 역반사는 거친 표면을 평평하게 보이게 하는 경향

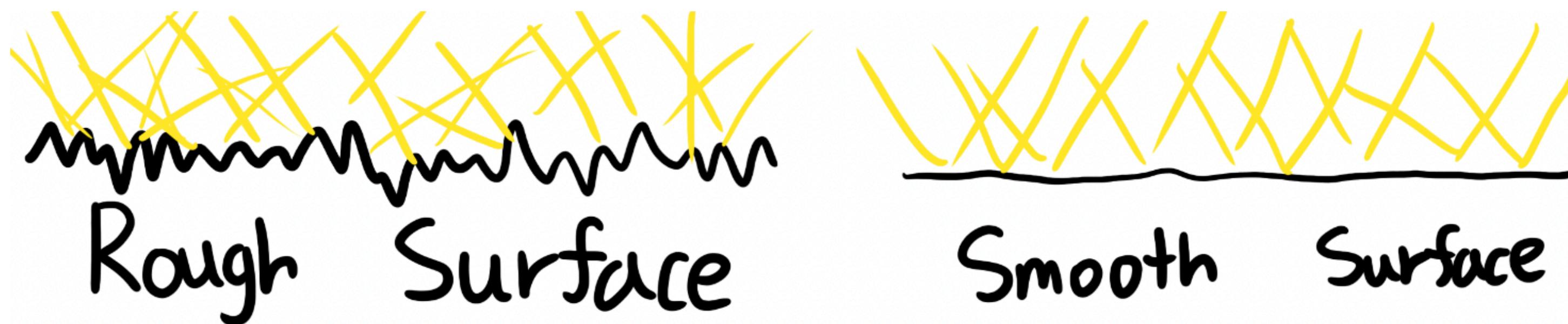


Microfacet Theory

많은 BRDF 모델은 microfacet 이론이라고 불리는 반사율에 대한 마이크로 기하학의 영향에 대한 수학적 분석에 기반

Microfacet은 아주 미세한 microfacet들을 가지고 이 microfacet은 완벽한 거울이다. 표면의 거친 정도를 표현하는 roughness를 사용해 microfacet들이 얼마나 정렬되어있는지 표현

일반적으로 각 microfacet가 완벽한 프레넬 미러가 되어 표면 반사를 모델링하기 위한 specular microfacet BRDF가 되는 것이다. 또한 확산 microfacet BRDF는 여러 로컬 지표면 아래 산란 모델을 만드는데 사용되며 회절 microfacet BRDF는 기하학적 효과와 파동 광학 효과를 결합한 shading model을 만드는데 사용된다.



Microfacet Theory

$$\int_{\mathbf{m} \in \Theta} D(\mathbf{m})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m}) d\mathbf{m} = 1. \quad \int_{\mathbf{m} \in \Theta} D(\mathbf{m})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{m}) d\mathbf{m} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}.$$

$$\int_{\mathbf{m} \in \Theta} G_1(\mathbf{m}, \mathbf{v}) D(\mathbf{m})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{m})^+ d\mathbf{m} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n},$$

$$G_1(\mathbf{m}, \mathbf{v}) = \frac{\chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{v})}{1 + \Lambda(\mathbf{v})}, \quad \chi^+(x) = \begin{cases} 1, & \text{where } x > 0, \\ 0, & \text{where } x \leq 0. \end{cases}$$

$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \int_{\mathbf{m} \in \Omega} f_\mu(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{m}) G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{m}) D(\mathbf{m}) \frac{(\mathbf{m} \cdot \mathbf{l})^+}{|\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}|} \frac{(\mathbf{m} \cdot \mathbf{v})^+}{|\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}|} d\mathbf{m}.$$

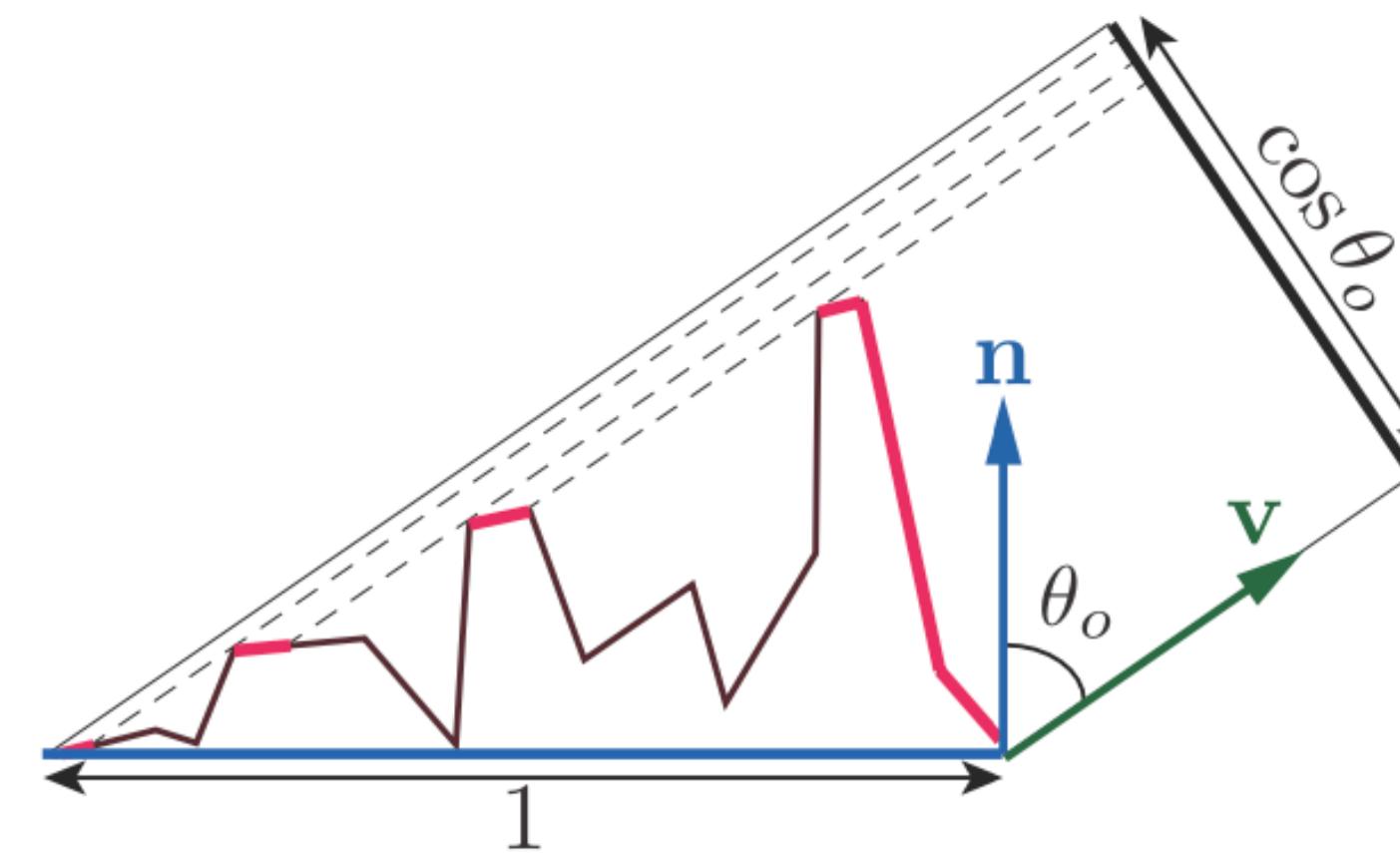
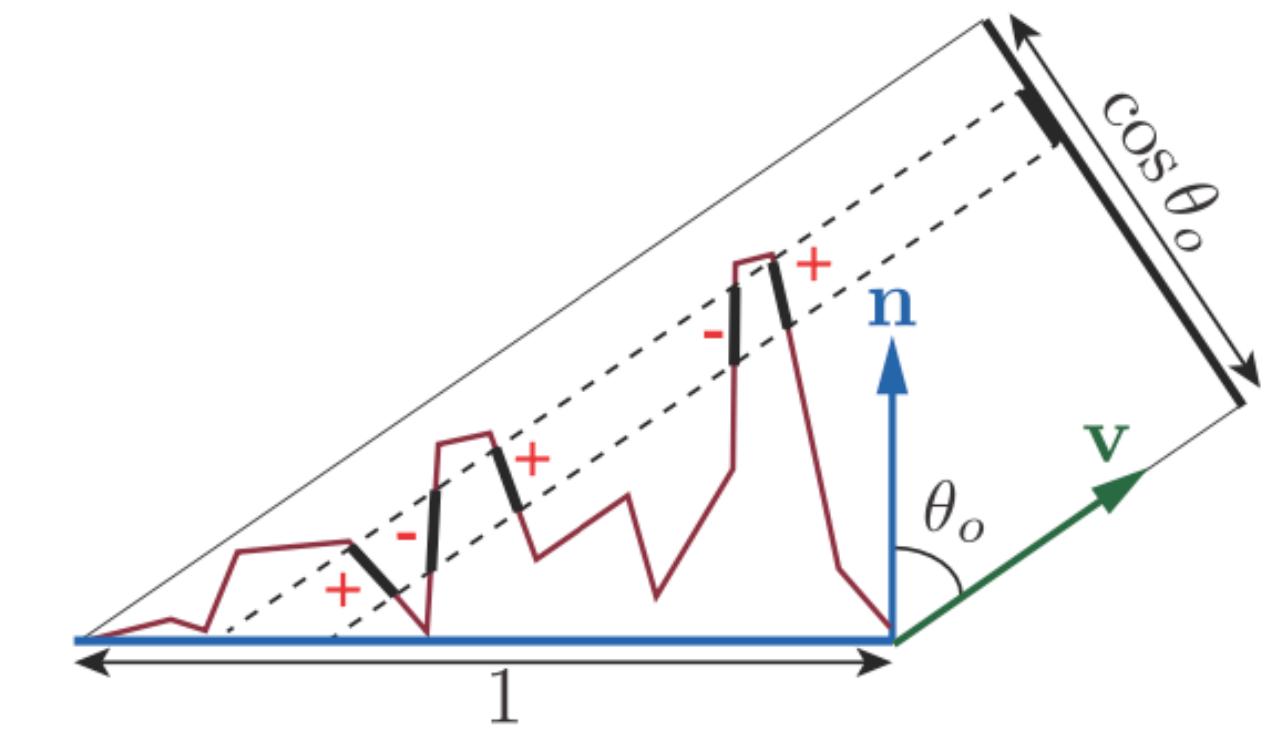
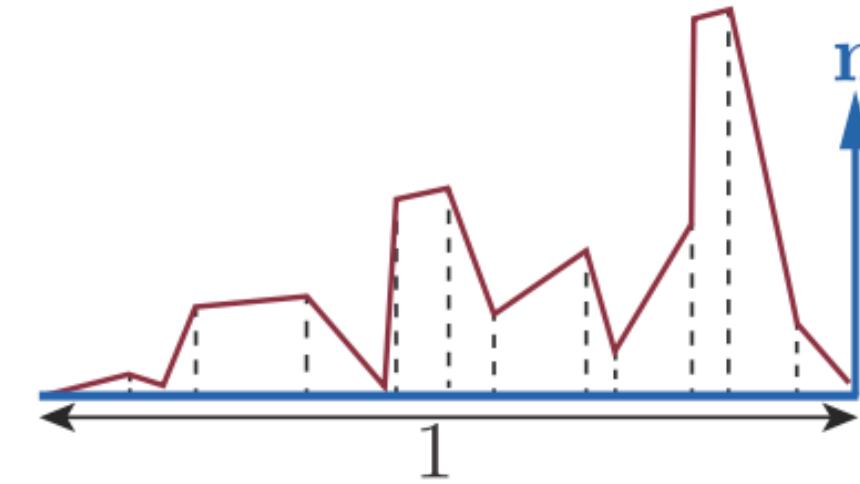
$$G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{m}) = G_1(\mathbf{v}, \mathbf{m}) G_1(\mathbf{l}, \mathbf{m}).$$

$$G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{m}) = \lambda(\phi) G_1(\mathbf{v}, \mathbf{m}) G_1(\mathbf{l}, \mathbf{m}) + (1 - \lambda(\phi)) \min(G_1(\mathbf{v}, \mathbf{m}), G_1(\mathbf{l}, \mathbf{m})),$$

$$\lambda(\phi) = 1 - e^{-7.3\phi^2}. \quad \lambda(\phi) = \frac{4.41\phi}{4.41\phi + 1}.$$

$$G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{m}) = \frac{\chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{v}) \chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{l})}{1 + \Lambda(\mathbf{v}) + \Lambda(\mathbf{l})}.$$

$$G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{m}) = \frac{\chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{v}) \chi^+(\mathbf{m} \cdot \mathbf{l})}{1 + \max(\Lambda(\mathbf{v}), \Lambda(\mathbf{l})) + \lambda(\mathbf{v}, \mathbf{l}) \min(\Lambda(\mathbf{v}), \Lambda(\mathbf{l}))};$$

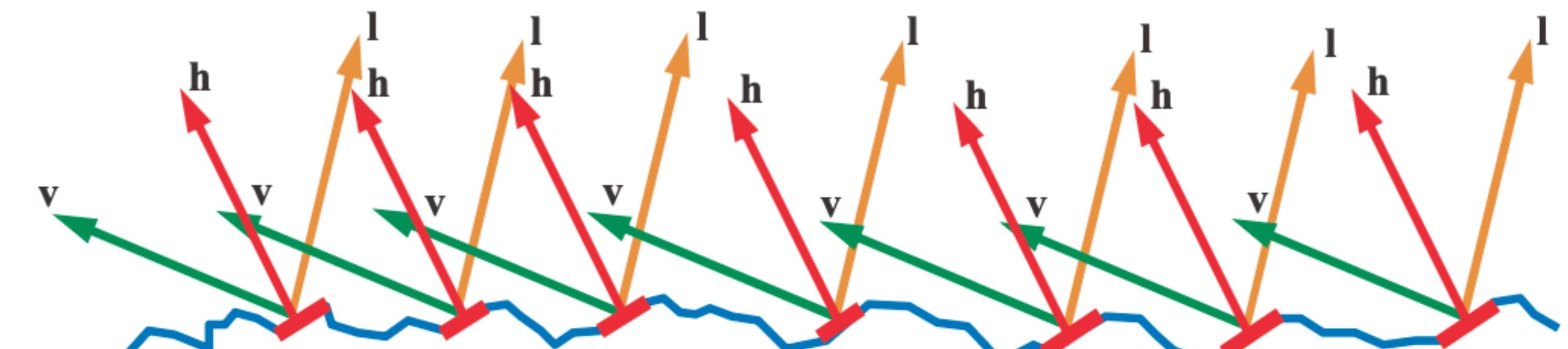
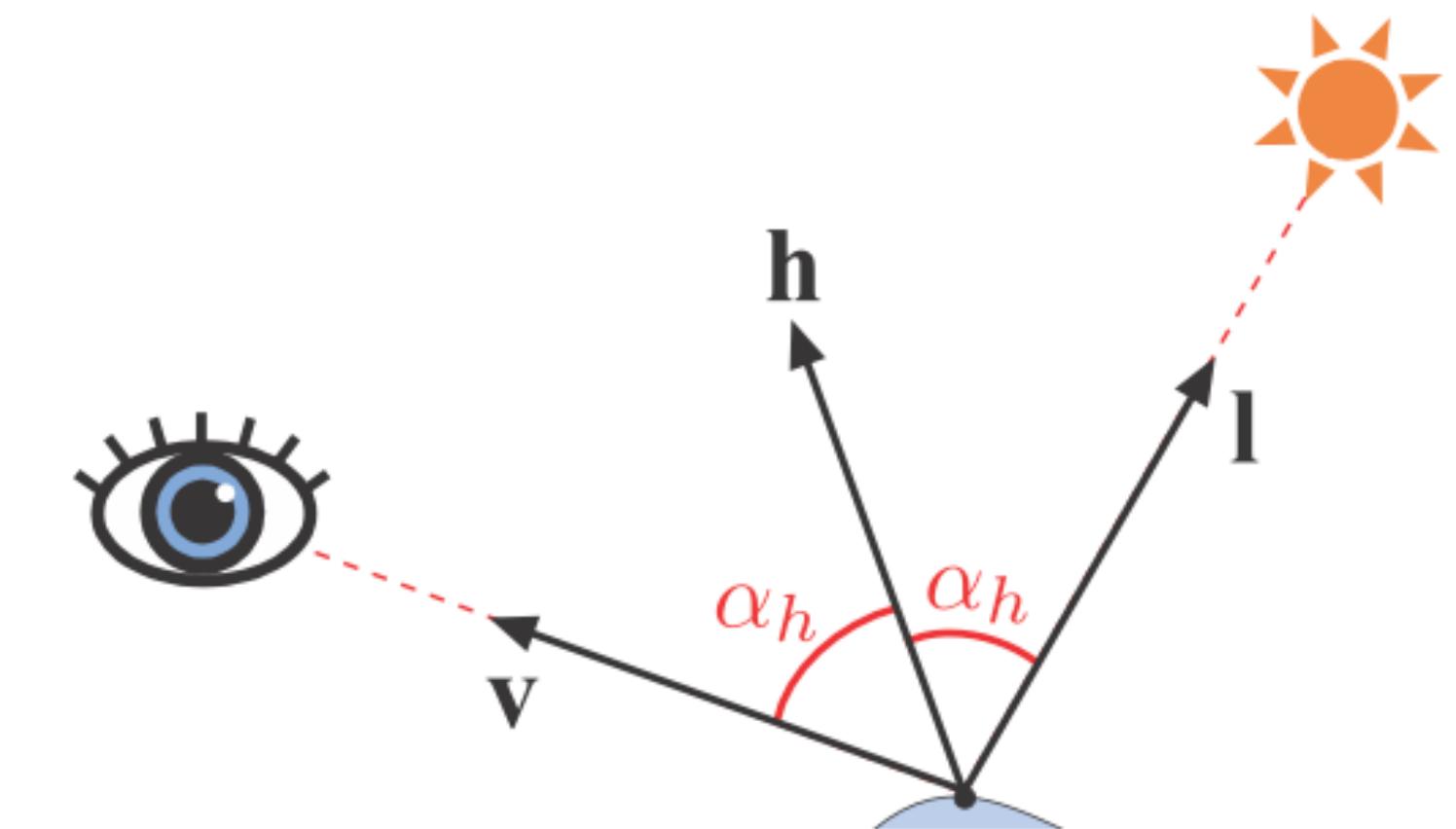


BRDF Models for Surface Reflection

BRDF에 대해 fspec 표기법을 사용하여 표면 반사만 모델링

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{l} + \mathbf{v}}{\|\mathbf{l} + \mathbf{v}\|}.$$

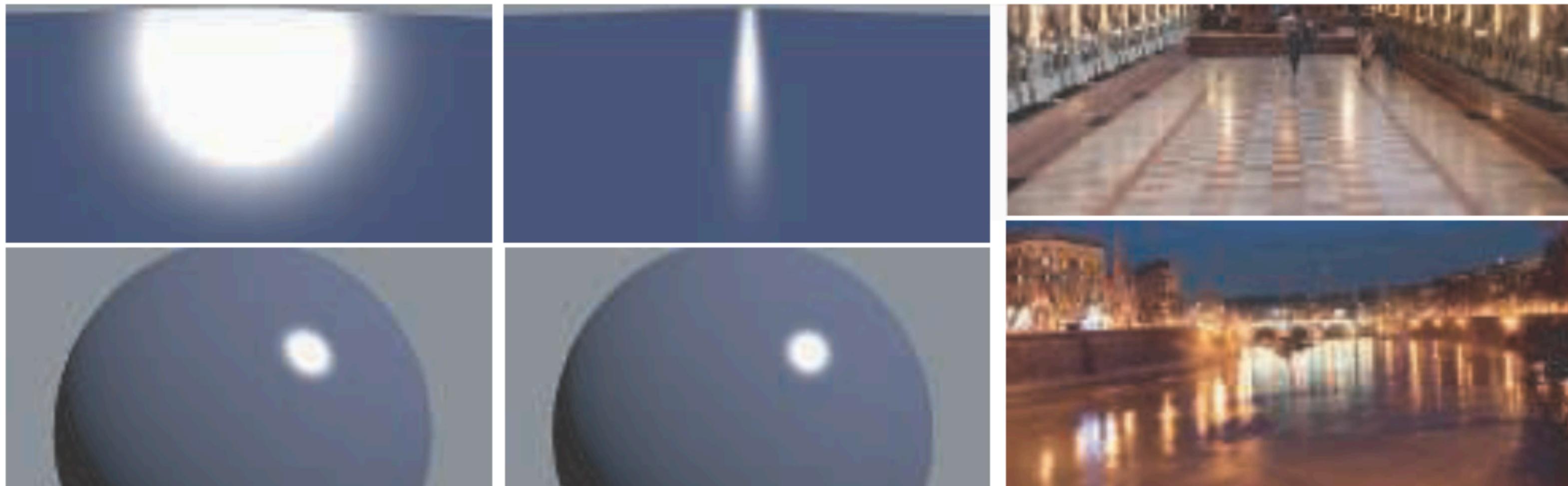
$$f_{\text{spec}}(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{h}, \mathbf{l})G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})}{4|\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}| |\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}|}.$$



BRDF Models for Surface Reflection

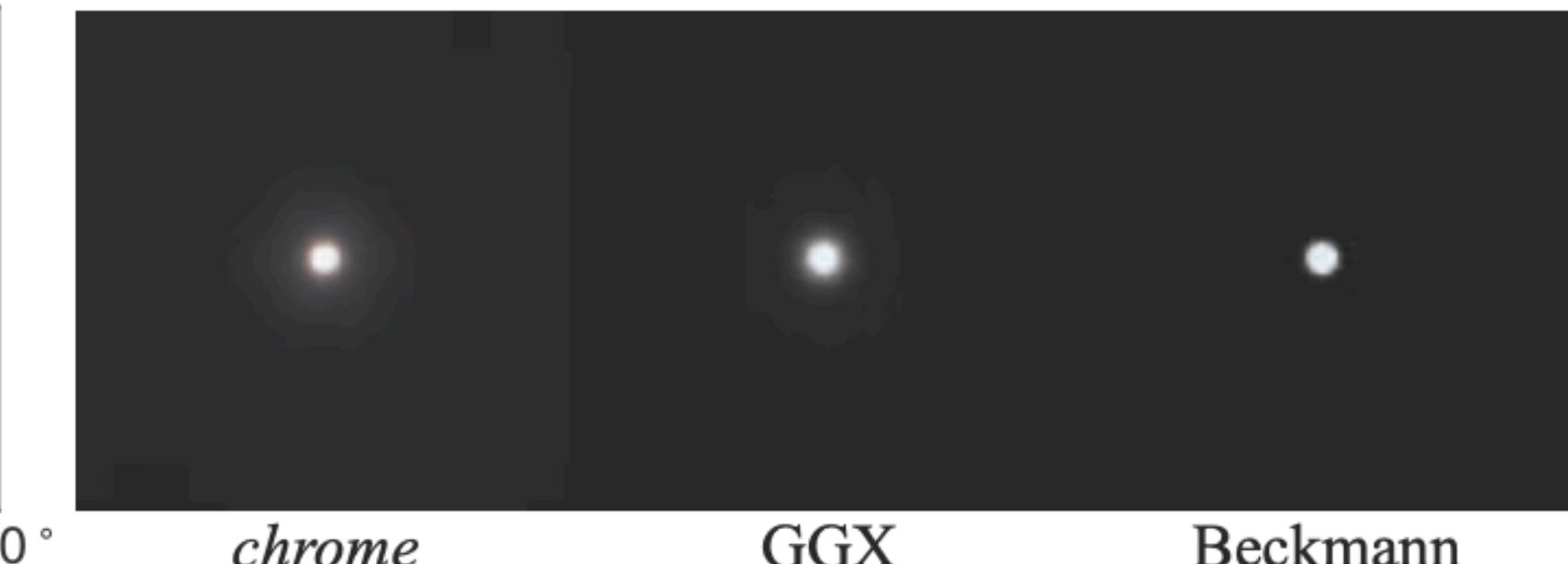
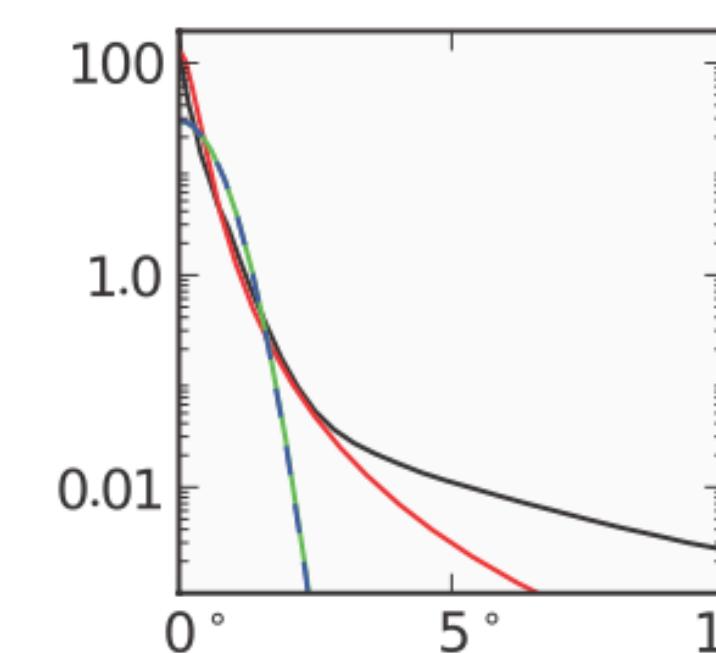
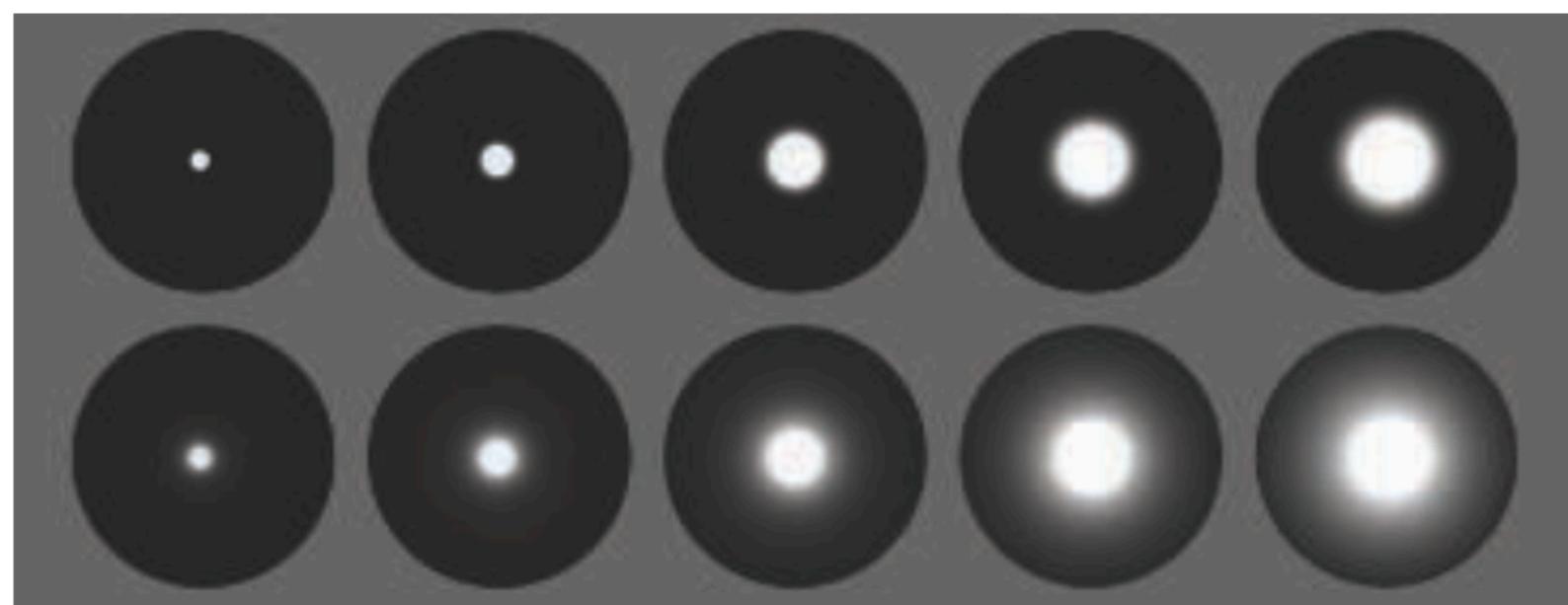
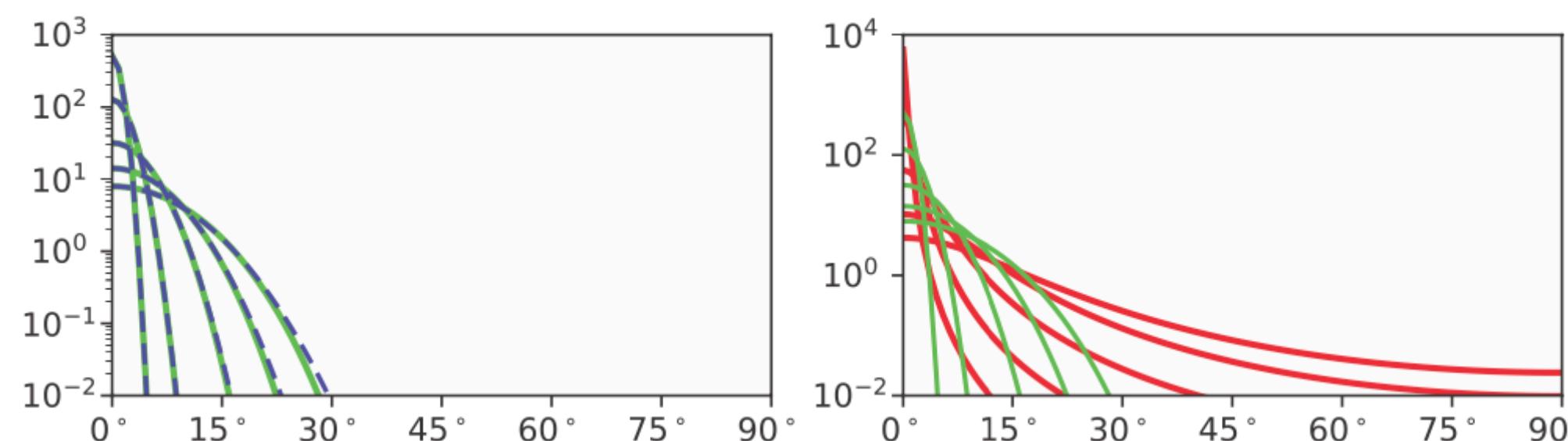
Normal Distribution Functions - 렌더링된 지표면의 모양에 영향

표면 거칠기에 대한 전반적인 인식뿐만 아니라 하이라이트가 뚜렷한 가장자리를 갖는지 또는 연무로 둘러싸여있는지와 같은 미묘한 시각적 측면에도 영향



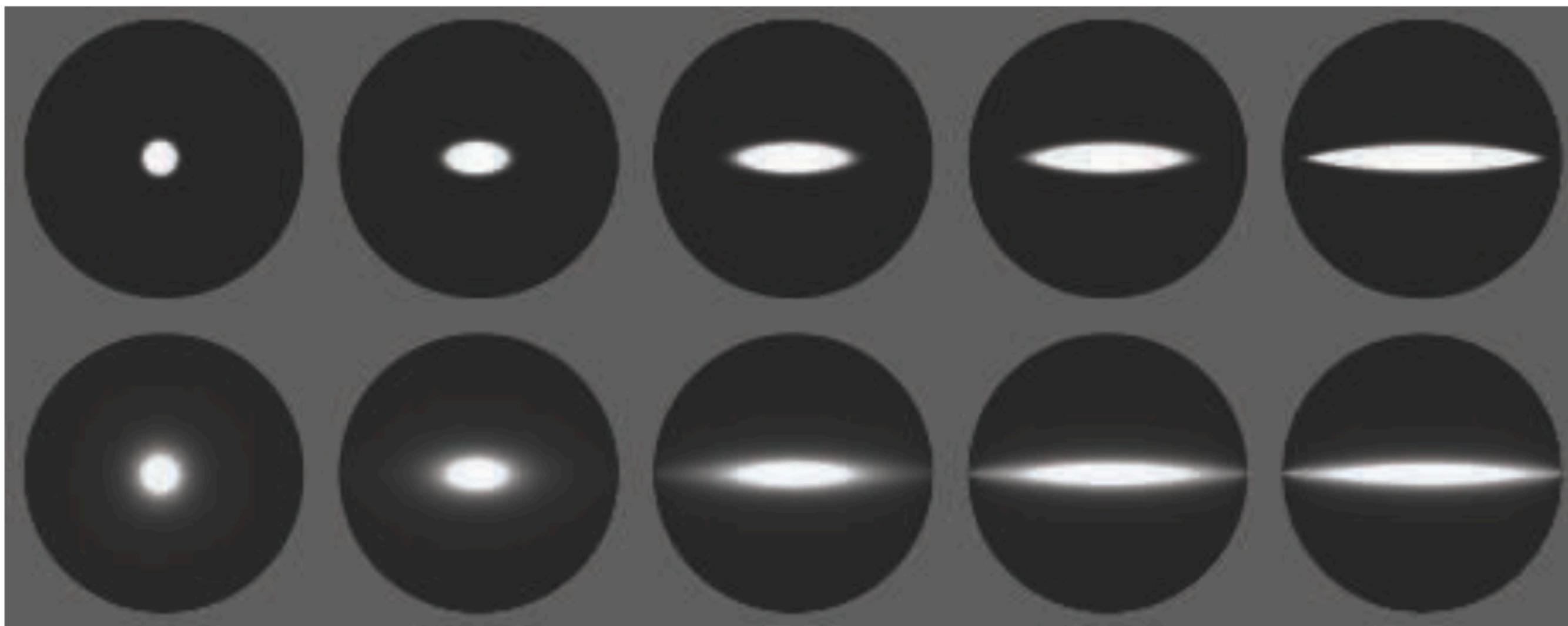
BRDF Models for Surface Reflection

Isotropic Normal Distribution Functions - Beckmann, Cook-Torrance, Blinn-Phong, GGX



BRDF Models for Surface Reflection

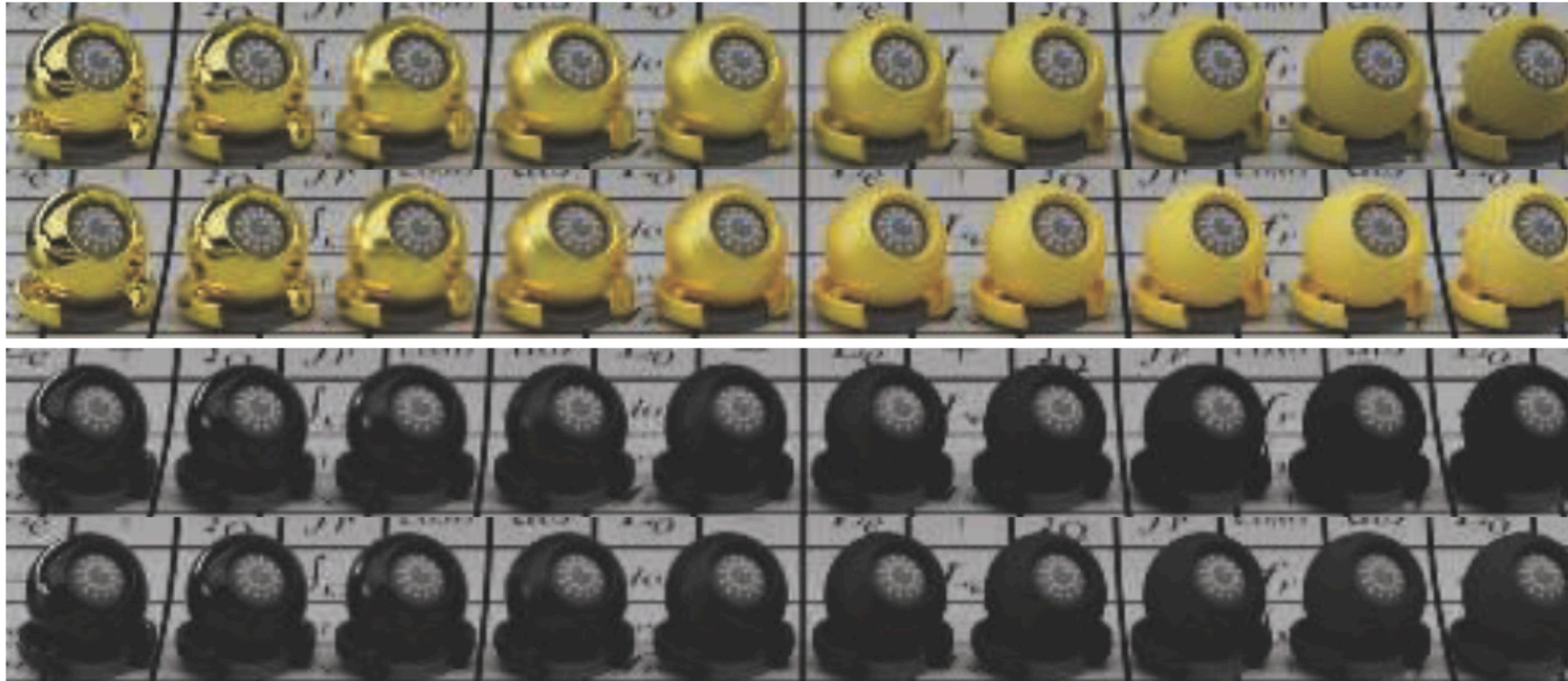
Anisotropic Normal Distribution Functions



BRDF Models for Surface Reflection

Multiple-Bounce Surface Reflection

マイクロフェイス BRDF プレインワーク는 마이크로 표면에서 여러번 반사되는 빛을 고려하지않음. 이러한 단순화로 인해 일부 에너지 손실과 overdarkening 야기



BRDF Models for Subsurface Scattering

Subsurface Albedo

불투명한 유전체의 subsurface albedo ρ_{ss} 는 표면을 빠져나가는 빛의 에너지와 물질 내부로 들어오는 빛의 에너지 사이의 비율이다.

유전체는 대부분의 입사광을 표면에서 반사하는 것이 아니라 전달하기 때문에 표면 아래의 알베도 ρ_{ss} 는 일반적으로 더 밝으며 따라서 시각적으로 중요하다.

BRDF Models for Subsurface Scattering

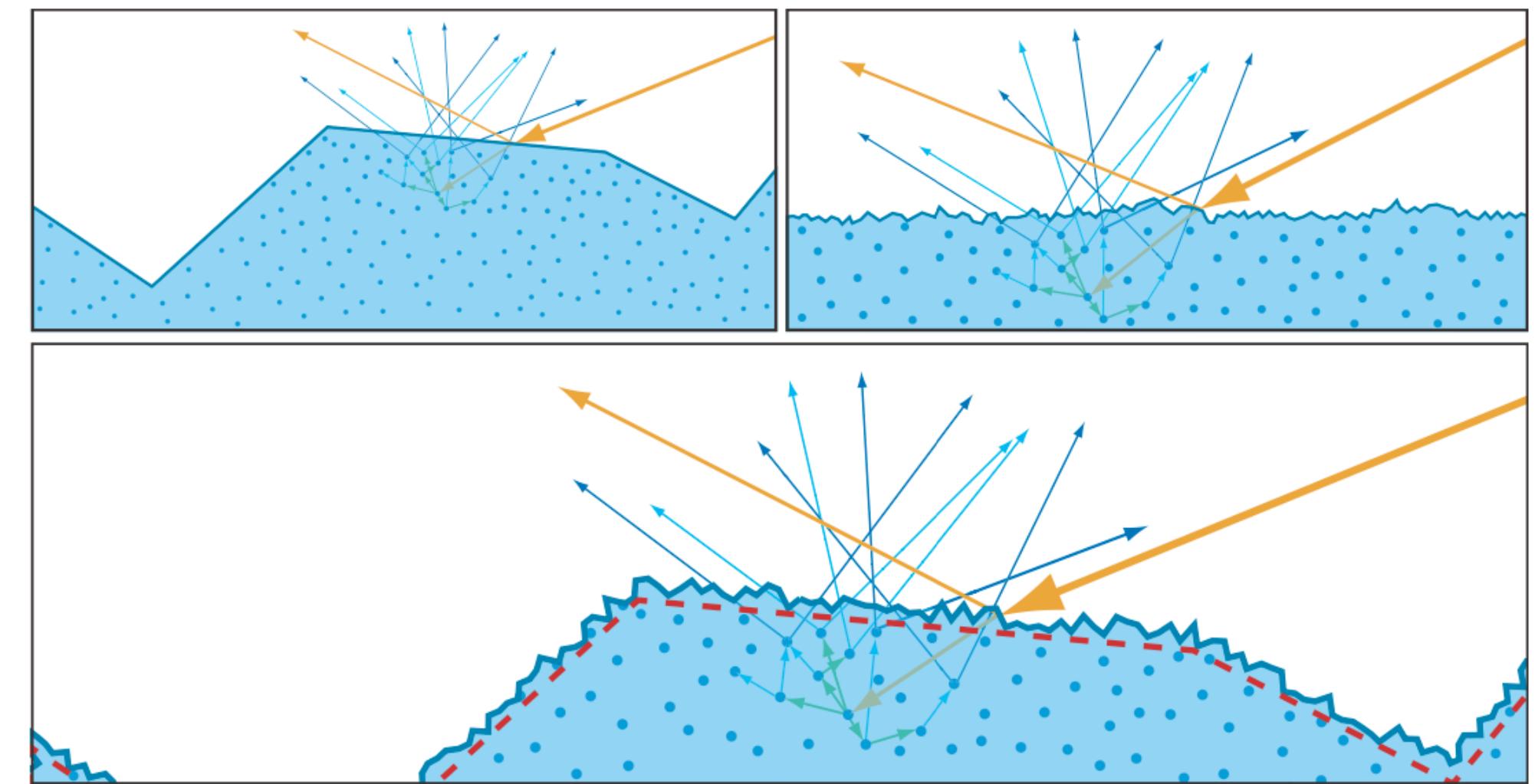
Scale of Subsurface Scattering and Roughness

Subsurface Scattering을 위한 BRDF 모델은 표면 불규칙성의 상대적 크기와 지표면 아래의 산란 거리를 고려함.

마이크로 지오메트리 불규칙성이 subsurface 산란 거리보다 크면 역반사와 같은 마이크로 지오메트리 관련 효과를 나타내고 거친 표면 확산 모델을 사용해야함.

산란 거리가 모두 불규칙성보다 큰 경우 표면은 subsurface 산란을 모델링 할 목적으로 평평한 것으로 간주해야 하며 역반사가 나타나지 않음. 이 경우는 매끄러운 표면 확산 모델 사용.

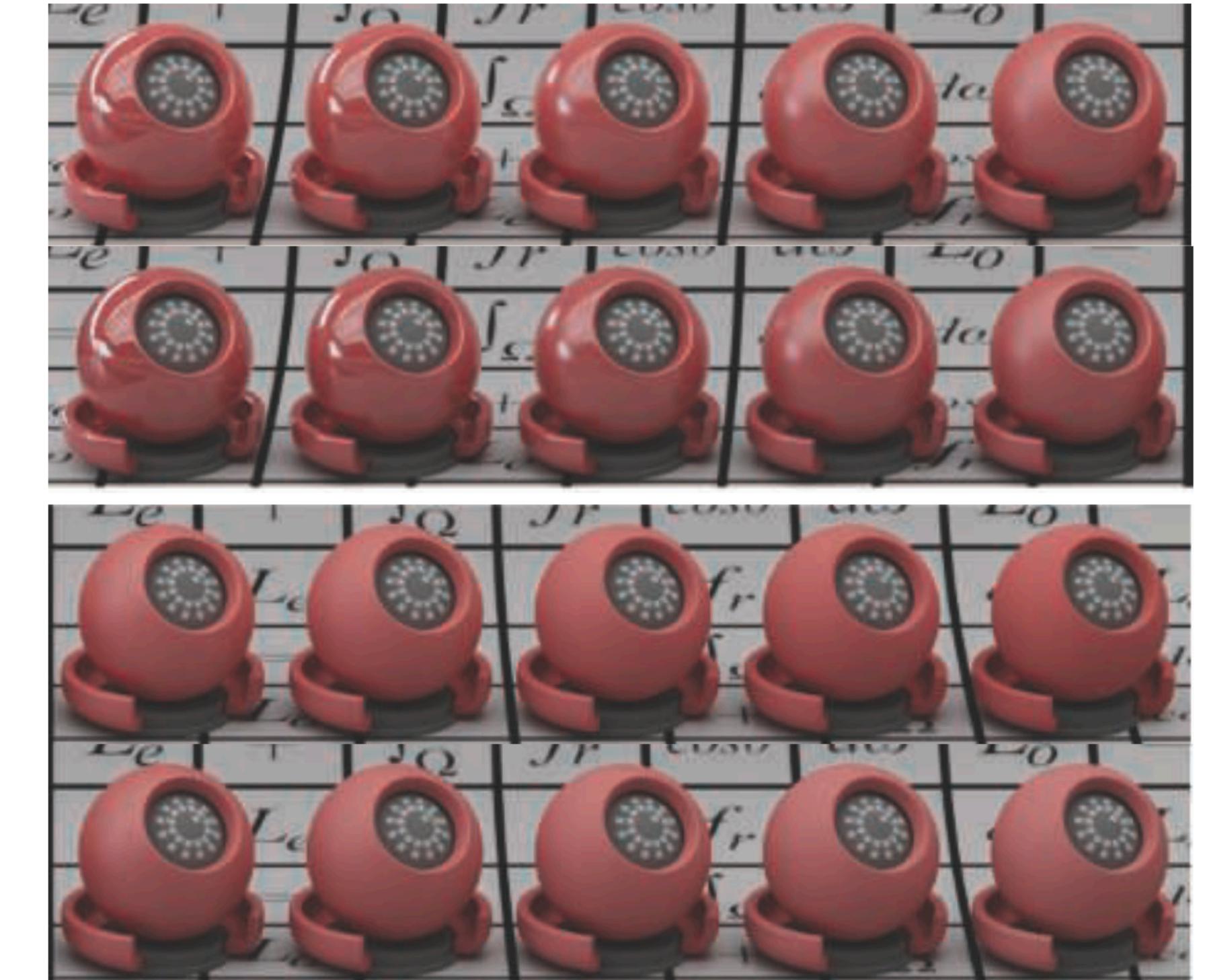
표면이 산란 거리보다 크고 작은 척도에서 거칠기를 갖는 중간 경우에는 거친 표면 확산 모델을 사용해야 하지만 산란 거리보다 큰 불규칙성만 포함하는 효과적인 표면을 사용해야함.



BRDF Models for Subsurface Scattering

Smooth-Surface Subsurface Models

표면 불규칙성이 지표면 아래 산란 거리보다 작은 모델링에 적합. Diffuse shading은 표면 거칠기에 직접적인 영향을 받지 않고 diffuse와 specular이 결합된 경우 간접적으로 영향을 미칠수있음.



BRDF Models for Subsurface Scattering

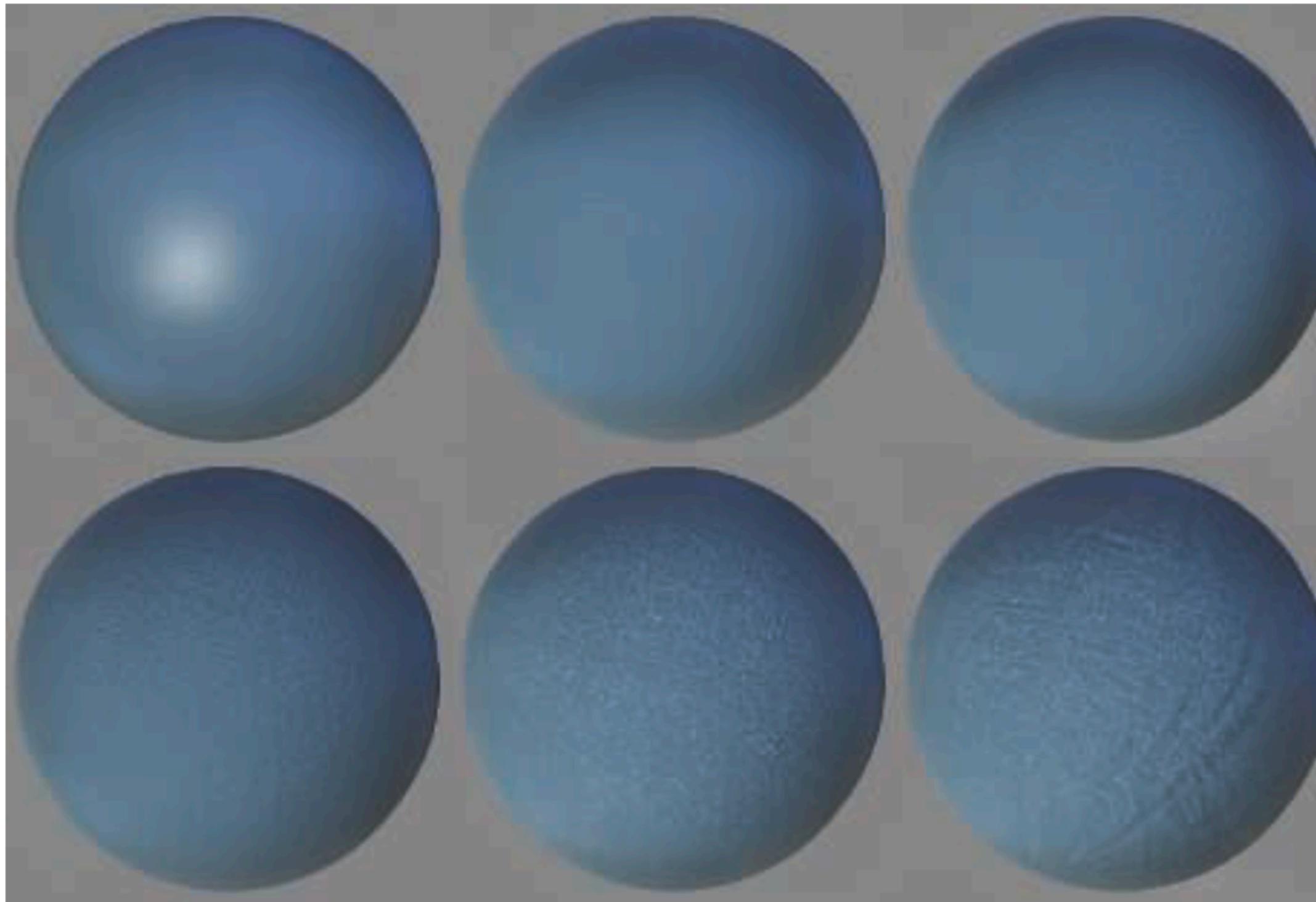
Rough-Surface Subsurface Models

디즈니의 shading 모델의 일부로 Burley는 거칠기 효과를 포함하고 측정된 materials과 일치하도록 설계된 확산 BRDF모델을 사용함.

대부분의 다른 거친 표면 확산 BRDF는 NDF, 마이크로-BRDF f_{μ} , masking-shadowing 함수 g_2 에 대한 다양한 선택과 함께 마이크로페이스 이론을 사용하여 개발됨.

BRDF Models for Cloth

원단은 다른 종류의 materials과 다른 미세 기하학적 구조를 가짐. 일반적으로 비등방성 specular highlight, 거친 산란, 뷔 방향에 따른 색상 이동과 같은 특수한 shading model을 필요로 함. 대부분의 직물은 신뢰 할 수 있는 직물 외관을 만드는데 중요한 고주파 공간 변화를 가짐.



BRDF Models for Cloth

Empirical Cloth Models

$$f_{\text{diff}}(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{\rho_{\text{ss}}}{\pi} \left(k_{\text{rim}} ((\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})^+)^{\alpha_{\text{rim}}} + k_{\text{inner}} (1 - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})^+)^{\alpha_{\text{inner}}} + k_{\text{diff}} \right),$$

$$f_{\text{diff}}(\mathbf{l}, \mathbf{v})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})^+ \Rightarrow \frac{\rho_{\text{ss}}}{\pi} \left(\mathbf{c}_{\text{scatter}} + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})^+ \right)^{\bar{+}} \frac{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l} + w)^{\bar{+}}}{1 + w}.$$

$$f_{\text{sheen}}(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = k_{\text{sheen}} \mathbf{c}_{\text{sheen}} (1 - (\mathbf{h} \cdot \mathbf{l})^+)^5,$$

Microfacet Cloth Models

$$D(\mathbf{m}) = \frac{\chi^+(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})}{\pi(1 + k_{\text{amp}}\alpha^2)} \left(1 + \frac{k_{\text{amp}} \exp\left(\frac{-(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^2}{\alpha^2((\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^2 - 1)}\right)}{(1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^2)^2} \right),$$

$$f(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = (1 - F(\mathbf{h}, \mathbf{l})) \frac{\rho_{\text{ss}}}{\pi} + \frac{F(\mathbf{h}, \mathbf{l}) D(\mathbf{h})}{4(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l} + \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}))}$$

$$D(\mathbf{m}) = \frac{\chi^+(\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})(2 + \frac{1}{\alpha})(1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{m})^2)^{\frac{1}{2\alpha}}}{2\pi}$$



Micro-Cylinder Cloth Models

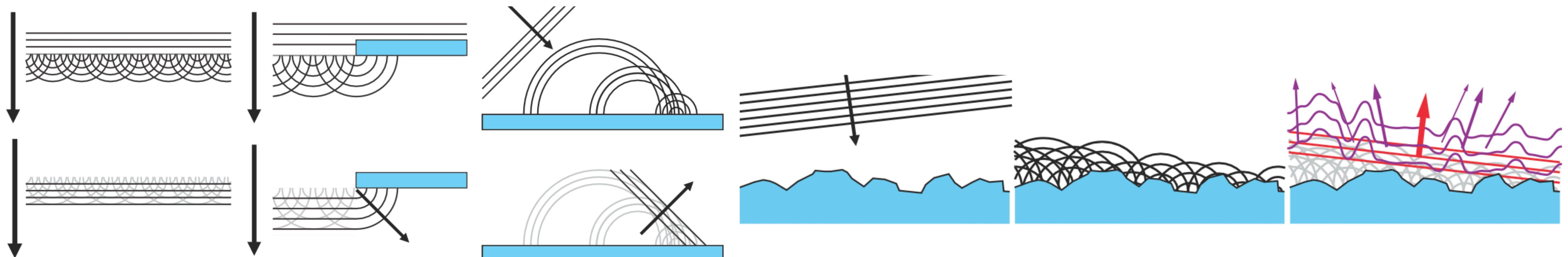
마리카락에 사용되는 모델과 유사함을 이용

Wave Optics BRDF Models

지난 세션들에서는 빛을 파동이 아닌 광선으로 전파하는 것으로 취급하는 기하학적 광학에 의존했으나 나노 기하학 불규칙성이 반사율에 미치는 영향은 기하학적으로 모델링 할 수 없음.

Diffraction Models

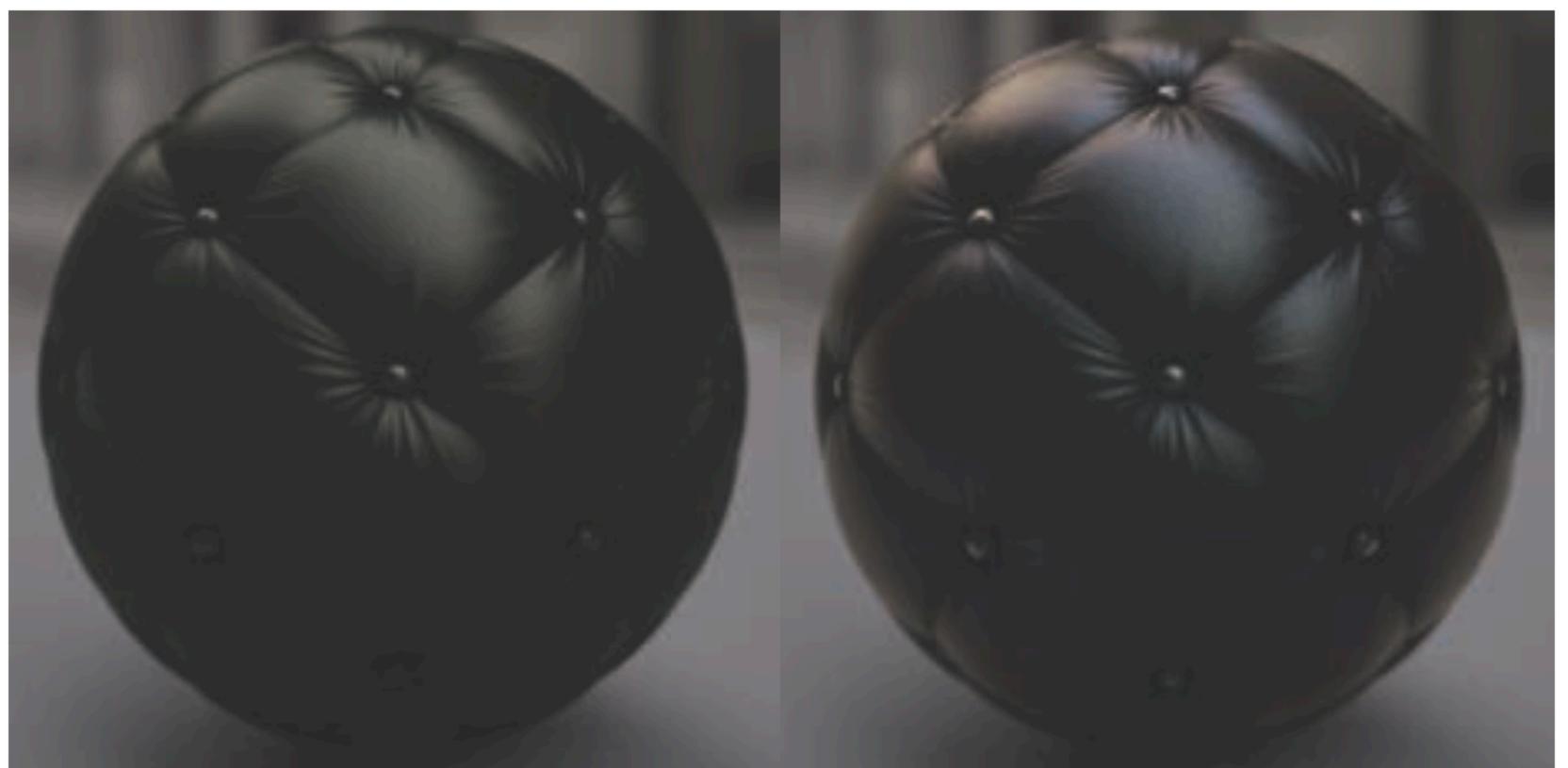
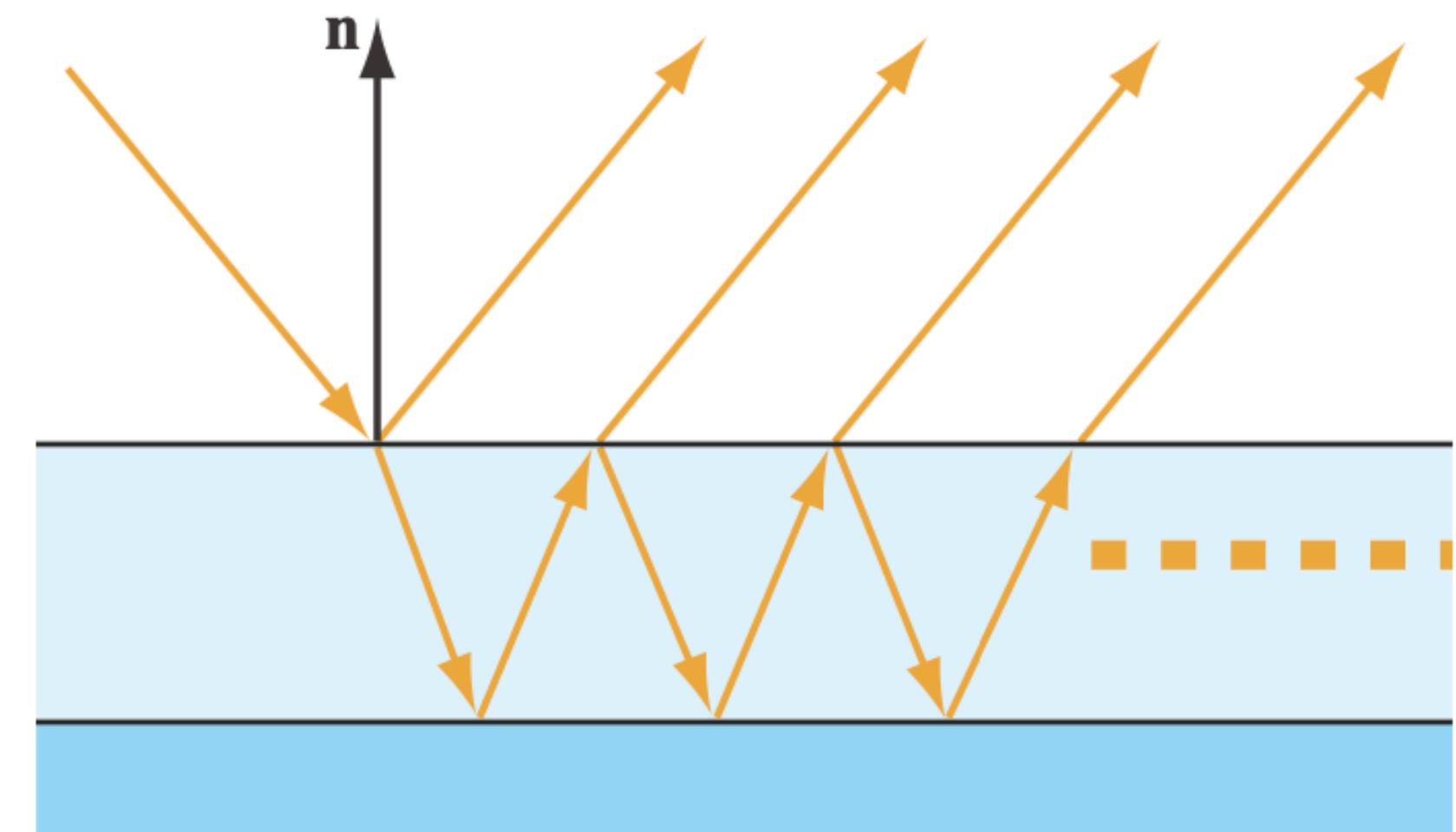
나노 기하학은 회절을 발생시킴. Huygens-fresnel 원리는 표면의 구형파가 반사된 파면을 만들기 위해 바로 정렬하고 다른 모든 방향의 파동은 파괴적인 간섭을 통해 제거된다는 것을 보여줌. 지표면 점의 높이가 다르기 때문에 지표면의 구형파는 깔끔하게 정렬되지 않음.



Wave Optics BRDF Models

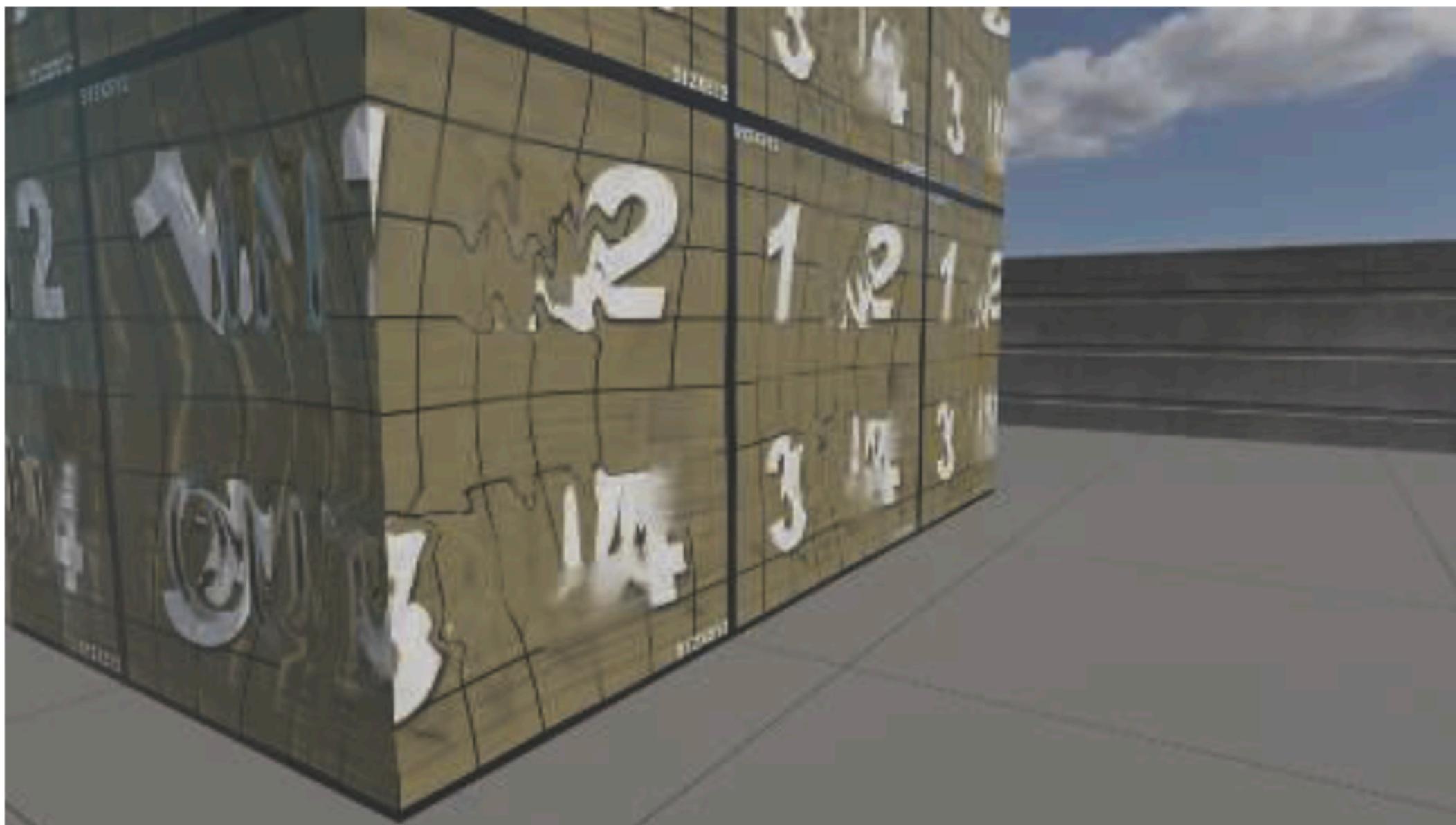
Models for Thin-Film Interference

Thin-film interference란 얇은 유전체층의 상부와 하부에서 반사되는 빛 경로가 서로 간섭할 때 발생하는 파동 광학 현상이다. 다른 파장의 빛은 파장과 경로 길이 차이의 관계에 따라 건설적이거나 파괴적으로 간섭한다.



Layered Materials

Material 들은 서로 겹쳐진다. layering의 가장 단순하고 시각적으로 중요한 경우는 투명한 경우인데 가장 눈에 띄는 시각적 결과는 투명 코팅과 기초 기판 모두에서 반사되는 빛에 의한 이중 반사이다. 이 두번째 반사는 기판이 금속일 때 가장 두드러지는데 그 이유는 유전체 클리어 코팅의 굴절률과 기판의 굴절률 차이가 가장 크기 때문이다. 기판이 유전체인 경우, 그 굴절률이 클리어 코팅의 굴절률에 근접하여 2차반사가 상대적으로 약해진다. 일반적인 경우 서로 다른 층들은 서로 다른 표면 법선을 가질 수 있다.



Blending and Filtering Materials

Material 혼합은 여러 material의 특성, 즉 BRDF 매개변수를 결합하는 과정이다. 예를 들어 녹 반점이 있는 금속 시트를 모델링하기 위해 마스크 텍스처를 칠하여 녹과 금속의 특성을 혼합하는데 사용한다. 대부분의 혼합은 오프라인 전처리로 이루어지지만 특정 합성 작업은 런타임으로 수행 될 수 있다.

Material 특성은 일반적으로 텍스처에 저장되며 GPU 이중선형 필터링 및 mipmapping과 같은 메커니즘을 통해 필터링된다. 그러나 이러한 메커니즘은 필터링되는 양이 최종 색상과 선형 관계를 갖는다는 가정에 기초한다. 아티팩트는 일반 맵에서 선형 mipmapping을 사용하거나 거칠기와 같은 비선형 BRDF 매개 변수를 포함하는 텍스처에서 발생 할 수 있다. 이러한 아티팩트는 specular aliasing 또는 카메라로부터의 표면 거리의 변화에 따른 표면 광택 또는 밝기의 예상치 못한 변화로 나타날 수 있다. 이러한 아티팩트를 완화하는 기술을 specular antialiasing 이라고 한다.

Blending and Filtering Materials

Filtering Normals and Normal Distributions

Material filtering artifacts와 가장 자주 사용되는 솔루션의 대부분은 normal 및 normal 분포 함수의 필터링과 관련이 있음.

카메라와 표면 사이의 거리가 증가하면 이전에 여러 픽셀을 덮었던 표면 구조가 범프 맵 영역에서 NDF 영역으로 이동하면서 서브픽셀 크기로 축소될 수 있다. 이러한 전환은 밀립 맵 체인과 밀접하게 관련되어 있다.

단순한 normal 평균보다 이상적인 NDF에 적합한 normal 및 광택 값을 포함하여 훨씬 더 충실하게 표현 할 수 있다.

현재 사용하는 대부분의 기술은 normal분포의 분산을 계산하여 작동

