

Physically Based Shading

230309 19101188 고은수

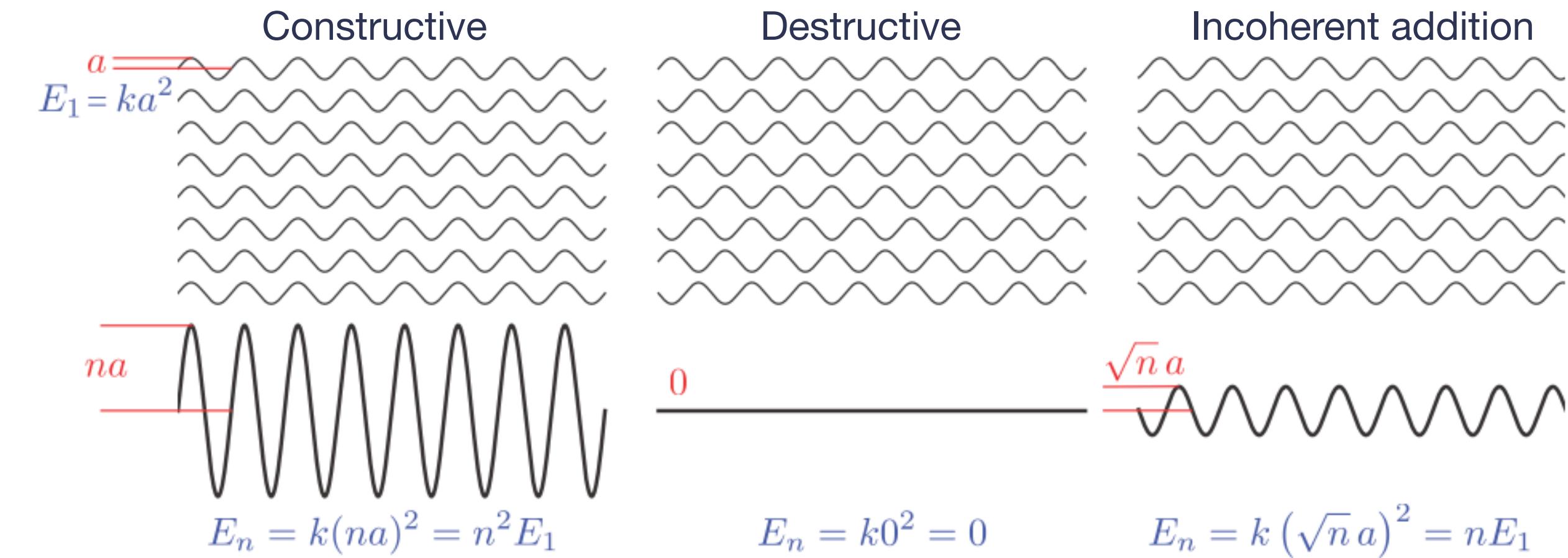
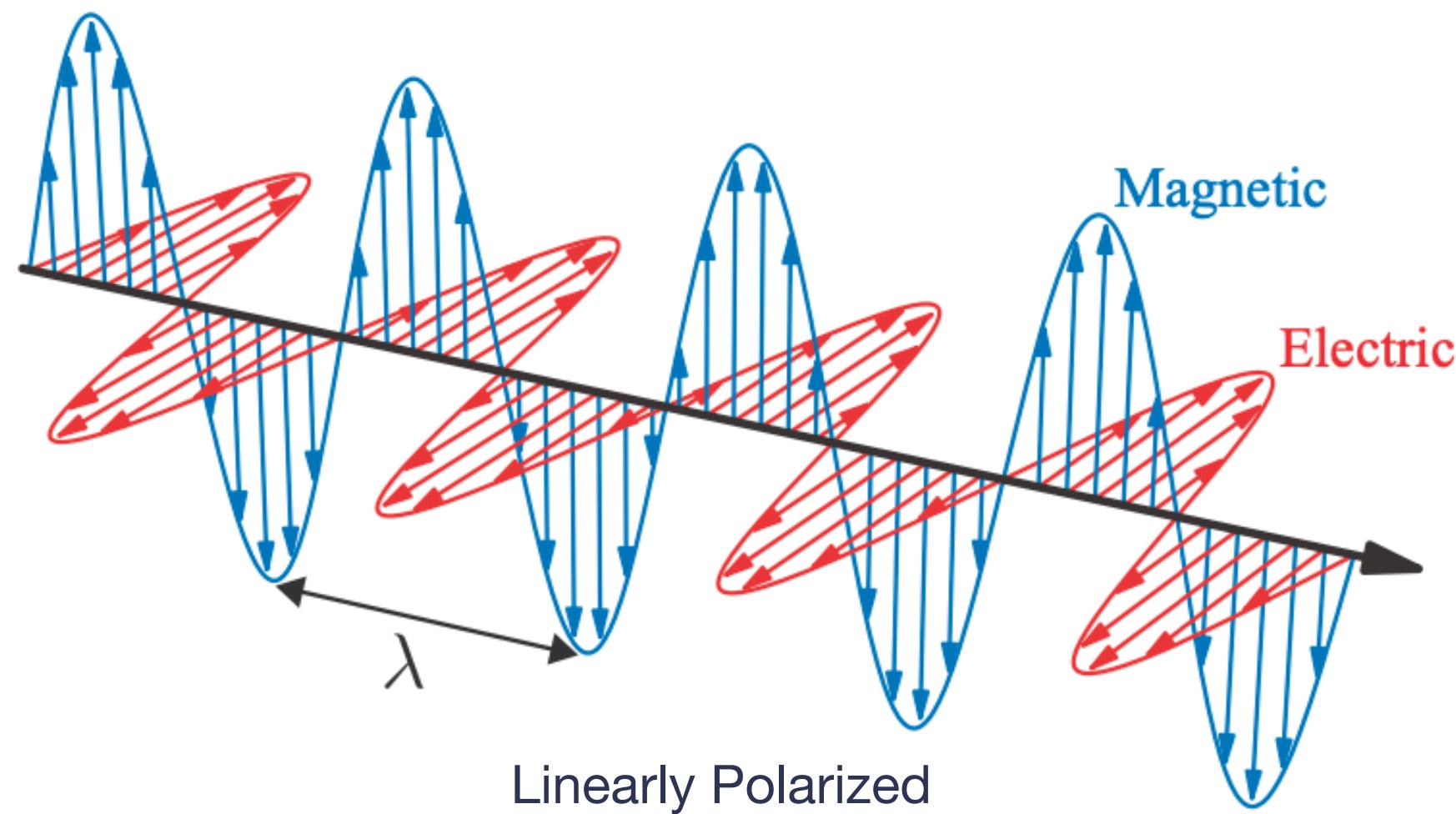
Contents

- 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

Irradiance(방사조도) E : 시간에 따른 평균 에너지 흐름이고 파동 진폭의 제곱에 비례함.

Scattering(산란) : 진동하는 전기장이 전하를 밀고 당기며 차례차례 진동하게 만들고 이 전하는 전파를 방출시키고 새로운 방향으로 빛을 보내고 산란된 빛은 원래의 파동과 같은 주파수를 가진다.



Physics of Light

Particle

이상기체 모델은 대기압에서는 좋은 모델이지만 보통 다른 분자들로부터 산란되는 파동 사이의 차이는 무작위적이고 계속해서 바뀐다.

n 개의 분자에서 산란된 빛에너지는 하나의 분자에서 산란된 빛에너지의 n 배이고 분자들이 광파장보다 훨씬 작은 클러스터에 빽빽하게 들어가면 constructive하게 간섭하여 n 의 제곱배이다.

구름이나 안개가 빛을 강하게 산란시키는 현상을 설명 할 수 있다.

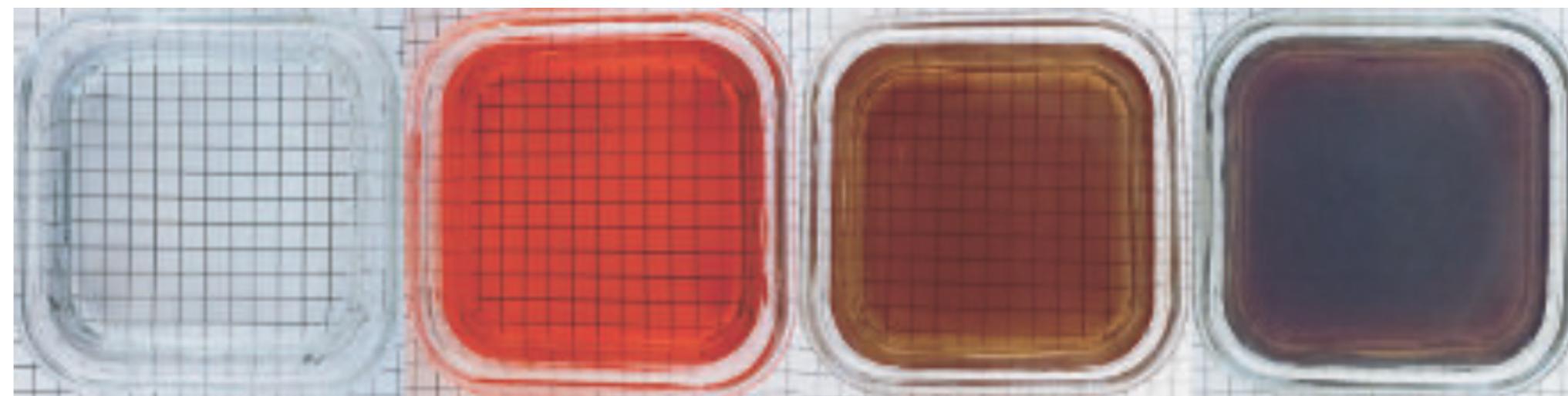
Physics of Light

Media

동일한 분자로 채워진 균질 매질. 균질 매질에서 산란된 파동은 일렬로 서지고 원래 파장의 방향을 제외한 모든 방향으로 destructive하게 간섭한다.

원래 파동이 각각 분자로부터 산란된 모든 파동과 결합하면 최종 결과는 산란을 보여주지 않고 원래 파동과 주파수가 같다.

빛 흡수는 빛의 강도를 감소시키고 색을 바꿀 수 있고 비균질 매질은 산란 입자가 내장된 균질 매질로 모델링 될 수 있다.



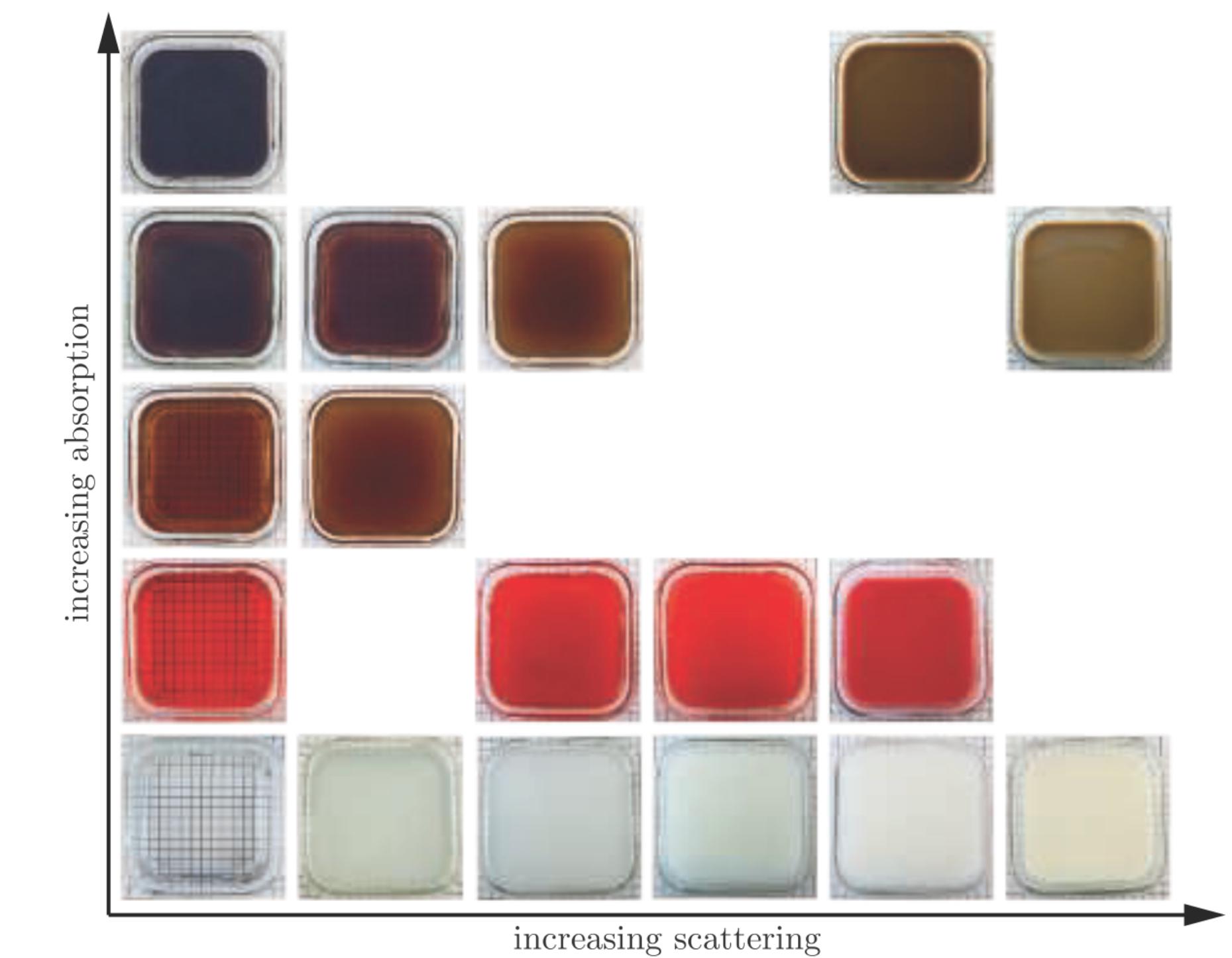
우유에서 산란되는 particle은 가시광선 파장보다 크기때문에 색깔없이 산란됨.

Opalescent

Physics of Light

산란과 흡수는 규모에 독립적이지 않다.

매질의 외견은 산란과 흡수의 조합으로 나타나는데 산란의 정도는 뿐영게 나타나고 (높은 산란은 불투명하게 보임) 특수한 매질의 입자들은 빛의 파장보다 거서 모든 가시광선 파장의 빛을 균등하게 산란시킨다.



Physics of Light

Surface

광학적 관점에서 물체 표면은 굴절률이 다른 두 volume을 분리하는 2차원 인터페이스이다. 빛이 표면을 때리면 각 물질과 표면 geometry가 영향을 미친다.

물질의 구성이나 밀도에서 단절이 되면 광파는 산란하는데 여기서 몇가지 의미를 가진다.

1. 표면에서 산란파는 입사파와 위상이 180도 이상이어야 한다.
2. 산란파는 입사파와 동일한 주파수를 가진다.
3. 속도는 굴절률에 비례하여 변화한다.

표면 굴절은 굴절률의 급격한 변화로 인해 일어나고 굴절률의 점진적인 변화는 빛을 나누지 않고 커브시킨다. 이는 온도에 따른 공기 밀도가 다를 때 볼 수 있다. 굴절률이 같을 땐 경계가 보이지 않는 것을 관찰할 수 있다.



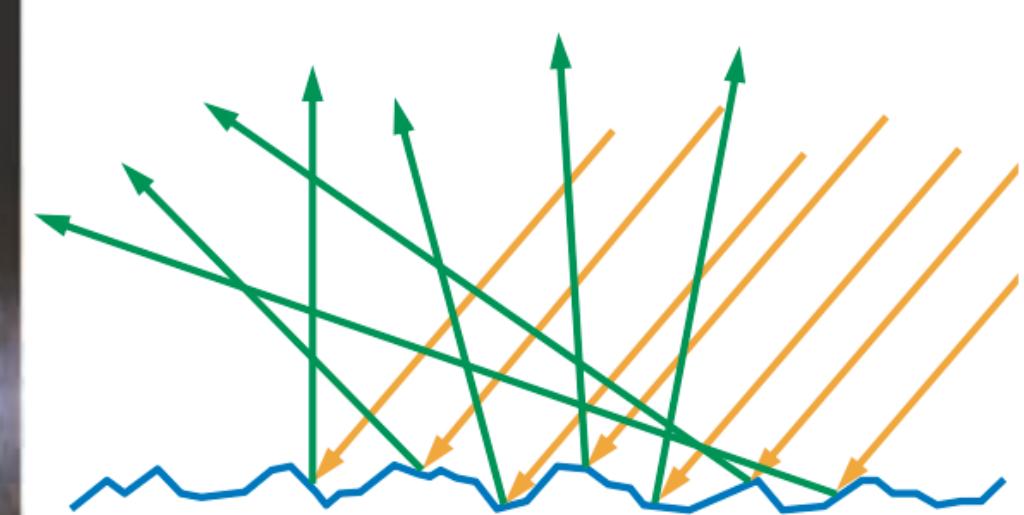
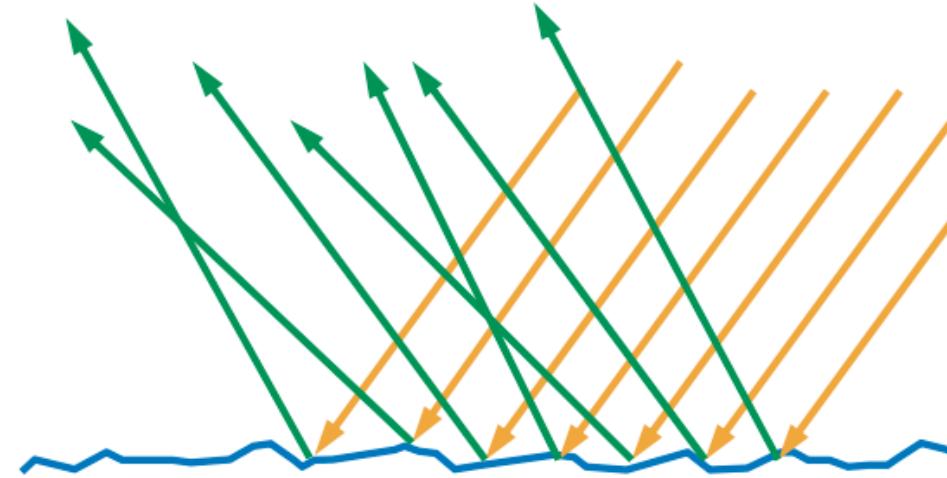
Physics of Light

Surface geometry

실제로 완벽히 평평한건 불가능하다. 파장보다 작은 표면의 irregularities(불규칙성)는 빛에 영향을 미치지 않으며 파장보다 훨씬 큰 표면의 불규칙성은 local flatness에 영향을 미치지 않고 효과적으로 표면을 기울인다. 보통 geometry optics라는 것을 사용하는데 간섭과 회절은 고려하지 않는데 이는 표면 불규칙성이 빛의 파장보다 작거나 훨씬 크다고(파장의 100배 이상) 가정하는 것과 같다. Geometry optics에서 빛은 파동이 아니라 광선으로 모델링되고 빛이 표면을 가로지를 때 표면은 국부적으로 평평하다고 여겨진다.

불규칙성이 파장보다 클 때 local 방향을 바꾸는데 이게 픽셀보다 작을 때 microgeometry라고 하며 이는 표면의 normal을 바꾸고 빛 방향의 반사와 굴절을 바꾼다.

표면의 각 특정 지점이 단방향으로만 빛을 반사하지만 각 픽셀은 다양한 방향으로 빛을 반사하는 많은 표면 지점을 덮고 이를 명시적으로 모델링하기 보다는 통계적으로 처리한다.

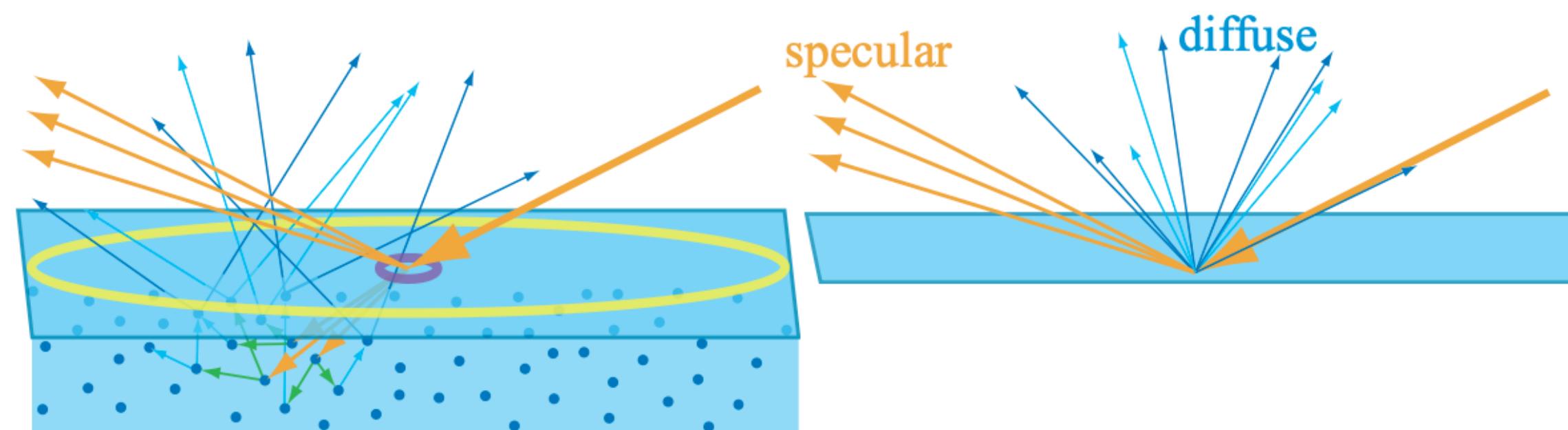
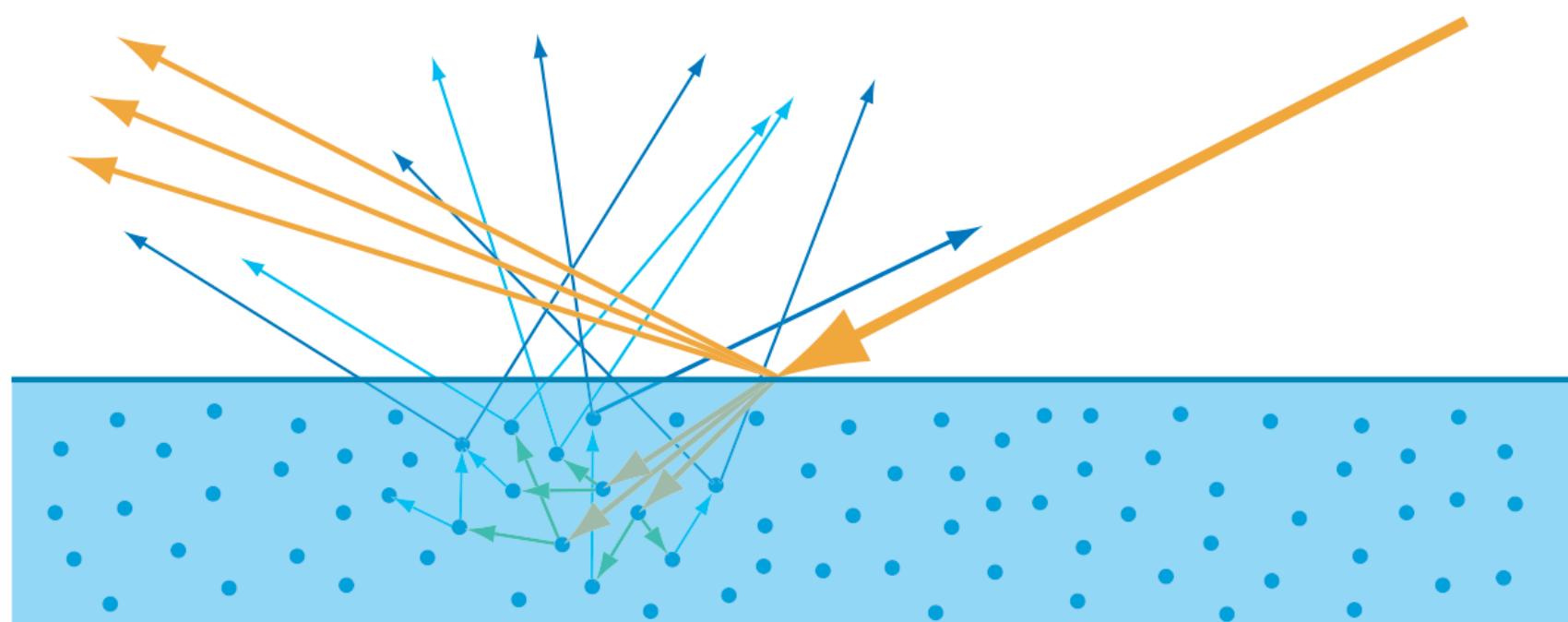


Physics of Light

Subsurface scattering

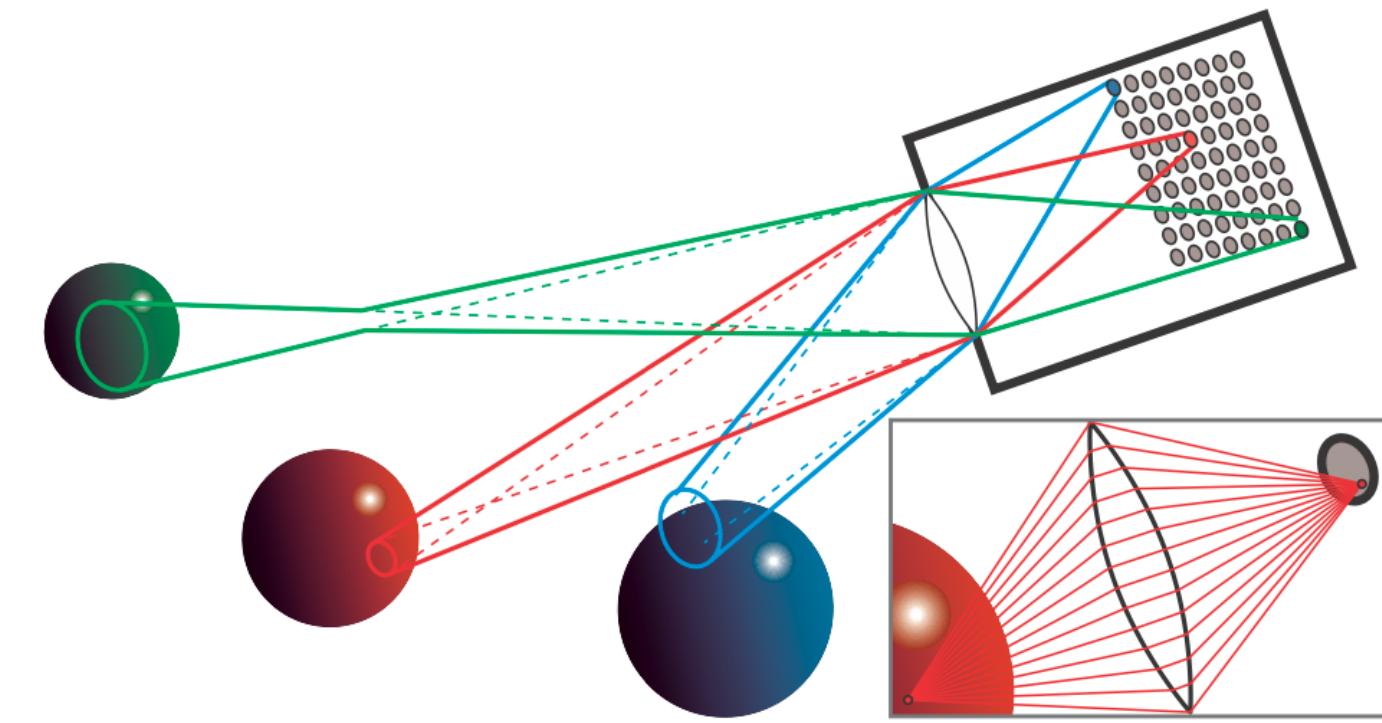
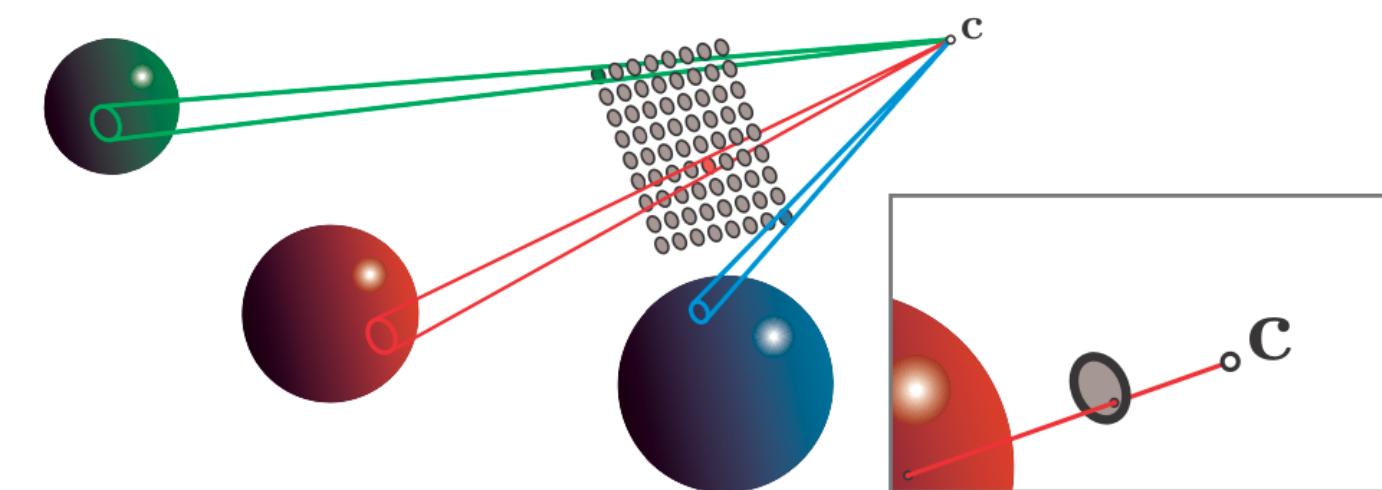
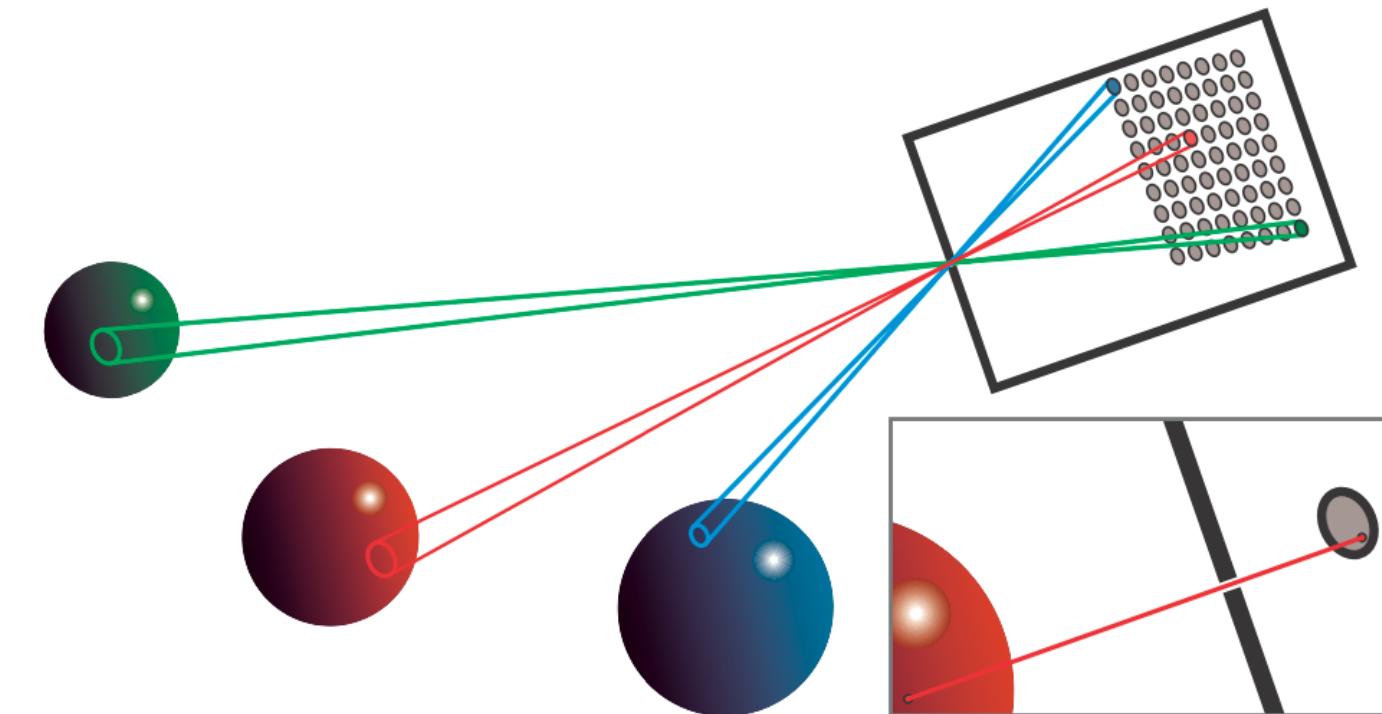
굴절된 빛은 물체의 내부와 계속 상호작용한다.

entry-exit 거리가 매우 작으면 0으로 가정할 수 있고 큰 경우에는 전문화된 렌더링 기술이 필요하다.



Camera

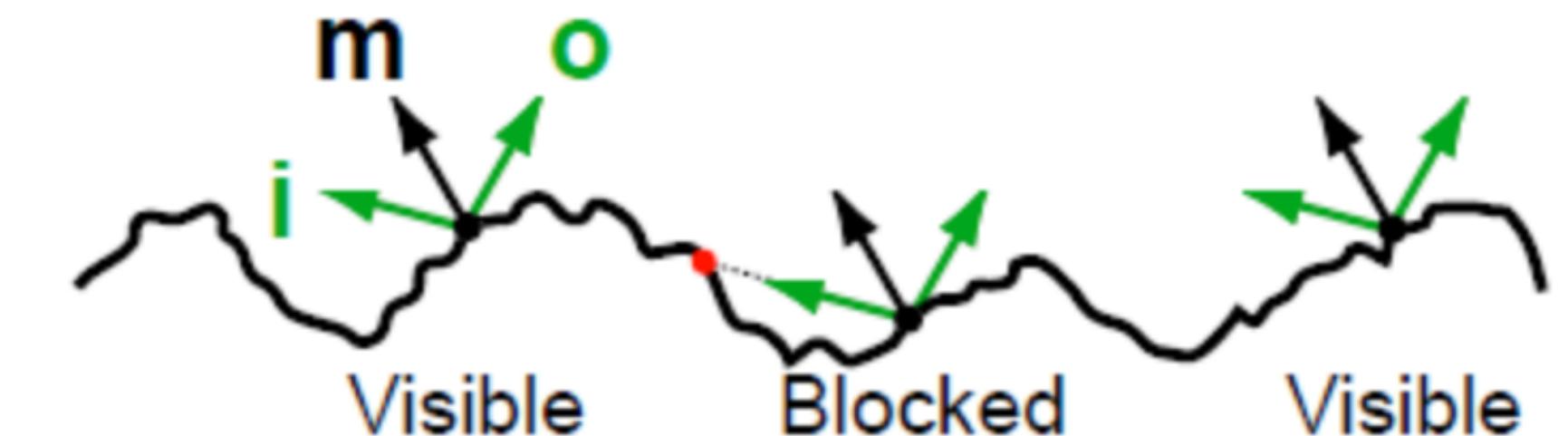
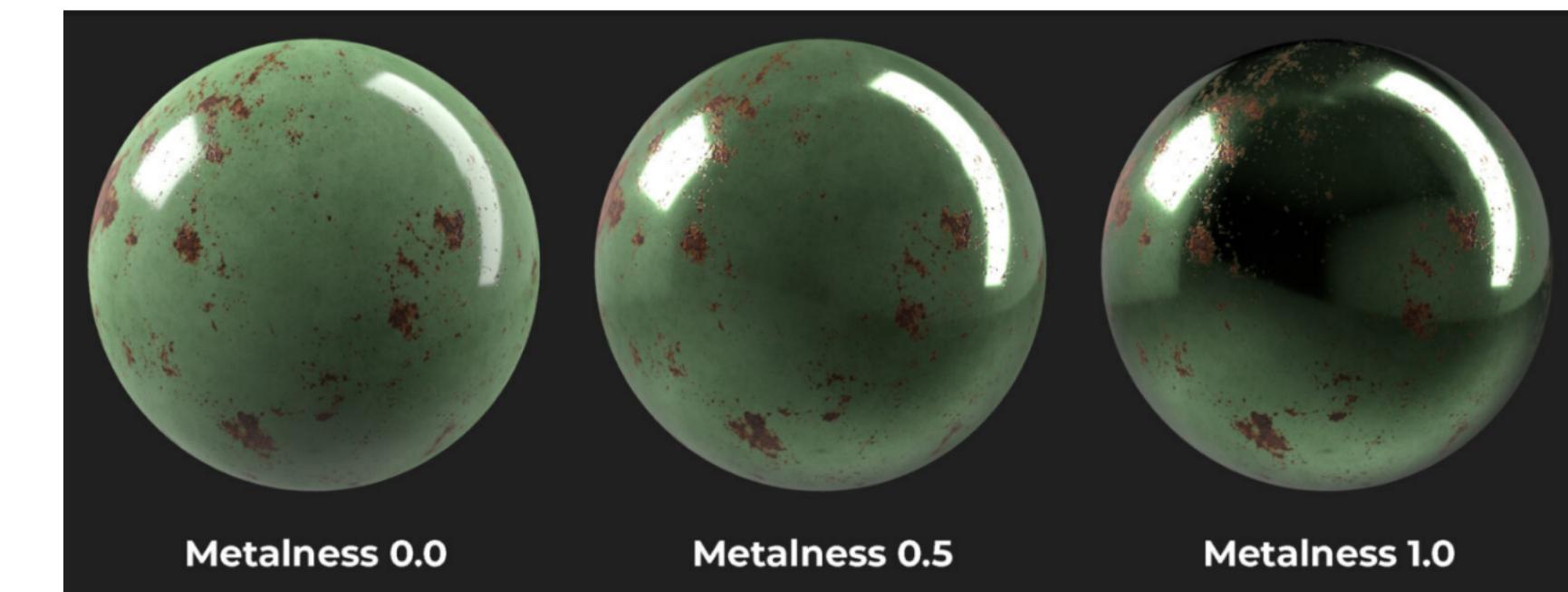
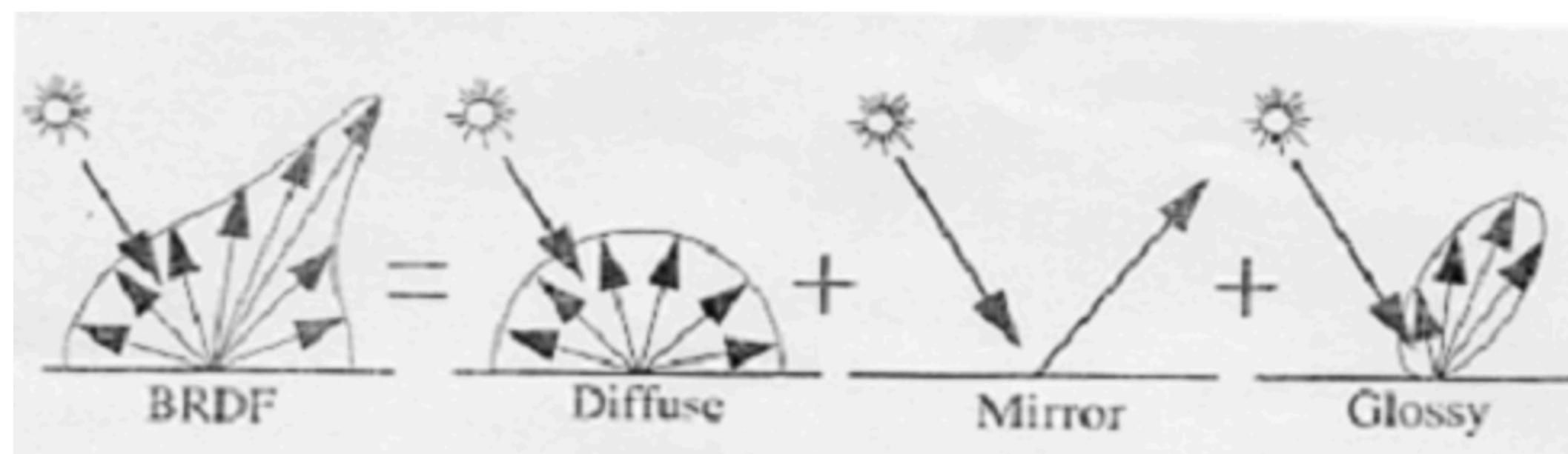
카메라 위치에서 shading된 표면까지의 광도를 계산한다.



The BRDF

BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)는 인풋으로 빛을 받는 좌표, 입사각, 반사각을 받고 아웃풋으로 빛이 얼마나 반사되는지가 나온다.

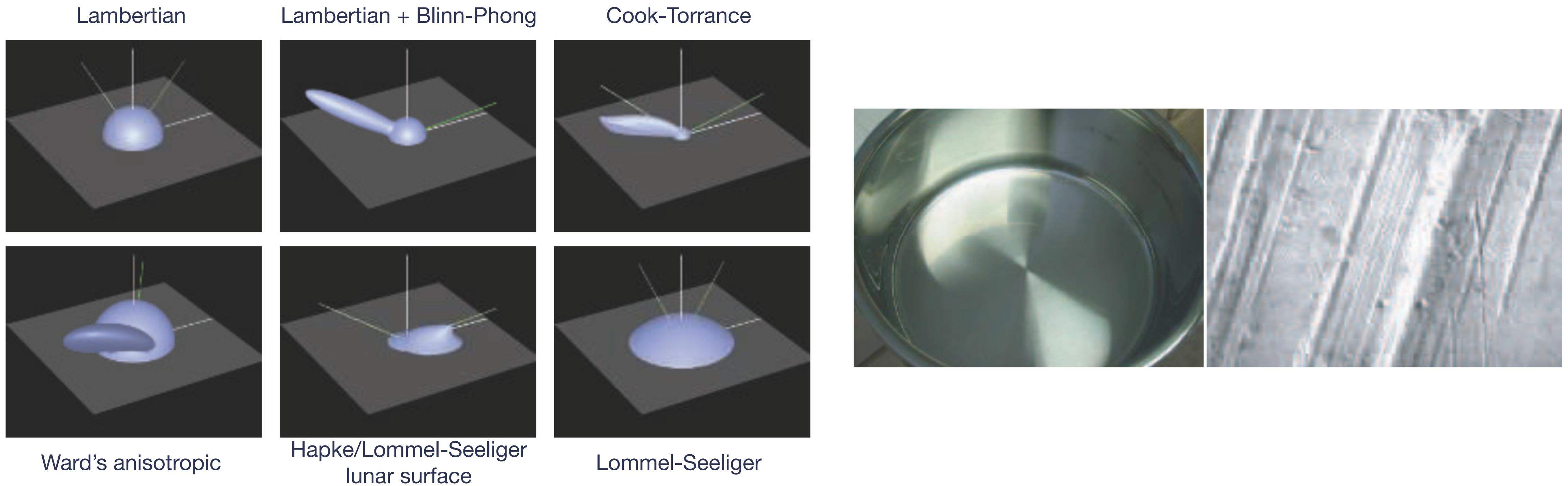
BRDF는 함수 내에서 roughness, metalness, microfacet shadow와 같은 물리적 요소들을 고려해서 물리적인 반사효과를 계산하여 physically based rendering에 사용된다.



The BRDF

Isotropic(등방성) BRDF : 빛이 방해받지 않고 모든 방향으로 거의 균일하게 퍼져나가는 모양. 입사와 반사의 방향이 바뀌어도 함수값이 바뀌지 않음. 대부분의 재질

Anisotropic(비등방성) BRDF : 어떤 요인에 의해 특정 축이나 면으로 불균형하게 퍼져나가는 모양. 표면이 들어오는 빛의 방향에 따라 다른 반사율을 가짐. Ex) 알루미늄, 옷감 등



Illumination

들어오는 빛은 scene의 다른 부분에서 shading 처리된 표면 점에 충돌하는 빛을 나타낸다. 들어오는 빛은 광원에서 직접 방출되거나 다른 표면에서 반사되는 모든 방향에서 0이 아닌 방사를 포함한다.

이 장과 다음 장에서는 반사 방정식을 사용하여 각 표면 지점에서 shading을 local로 계산하는 local illumination에 초점을 맞추고 들어오는 빛이 주어지며 따로 계산할 필요가 없다.

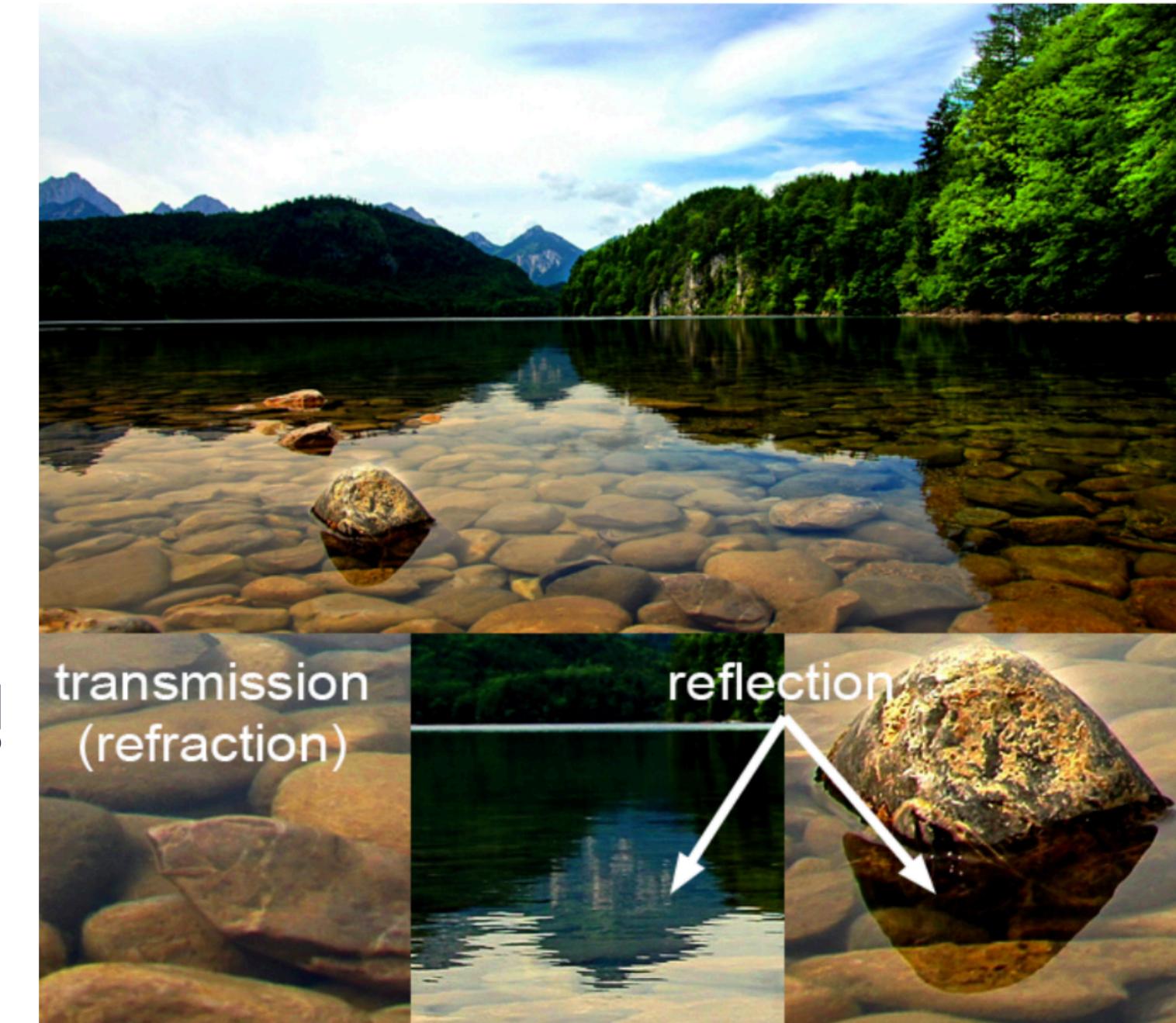
Fresnel Reflectance

9.1에서 다룬 빛-물질 상호작용과 9.3에서 다룬 BRDF를 수치화하여 shading model에 사용할 수 있다.

빛이 다른 매질과 충돌할 때 일정 비율은 굴절되고 일정 비율은 반사되는데 입사각에 따라 굴절과 반사의 비율이 달라지기 때문에 물 표면을 볼 때 가까운 물은 투명하게 보이고 먼 물은 거울처럼 반사되어 보이게 된다.

결론적으로 입사각에 따라 반사, 굴절이 달라지고 이를 표현한 것이 플레넬 방정식이다.

직접 계산하기엔 너무 복잡하기 때문에 schlick의 근사화한 버전을 사용하고 halfway벡터, view벡터, 매질의 기본 반사율 F_0 를 인풋으로 받고 플레넬 방정식에 의해 정의되는 반사율이 아웃풋이 된다.



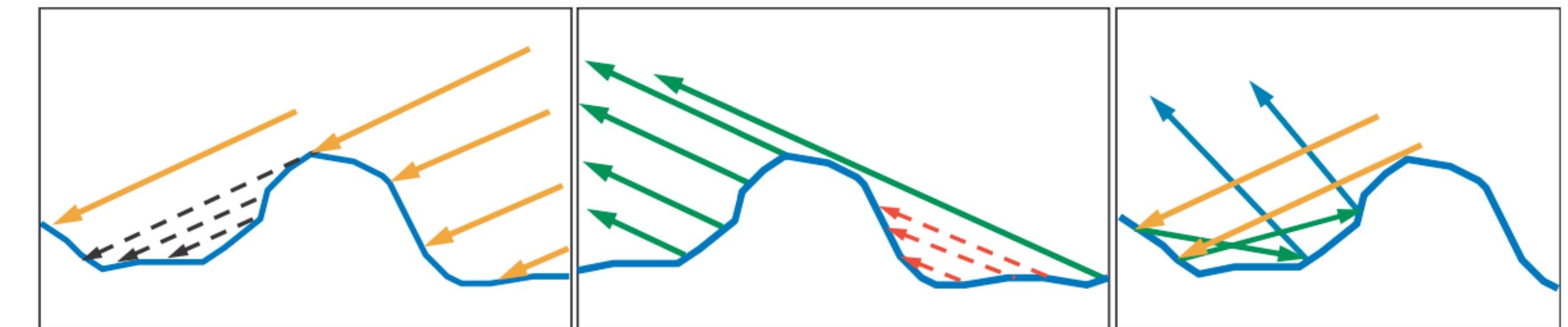
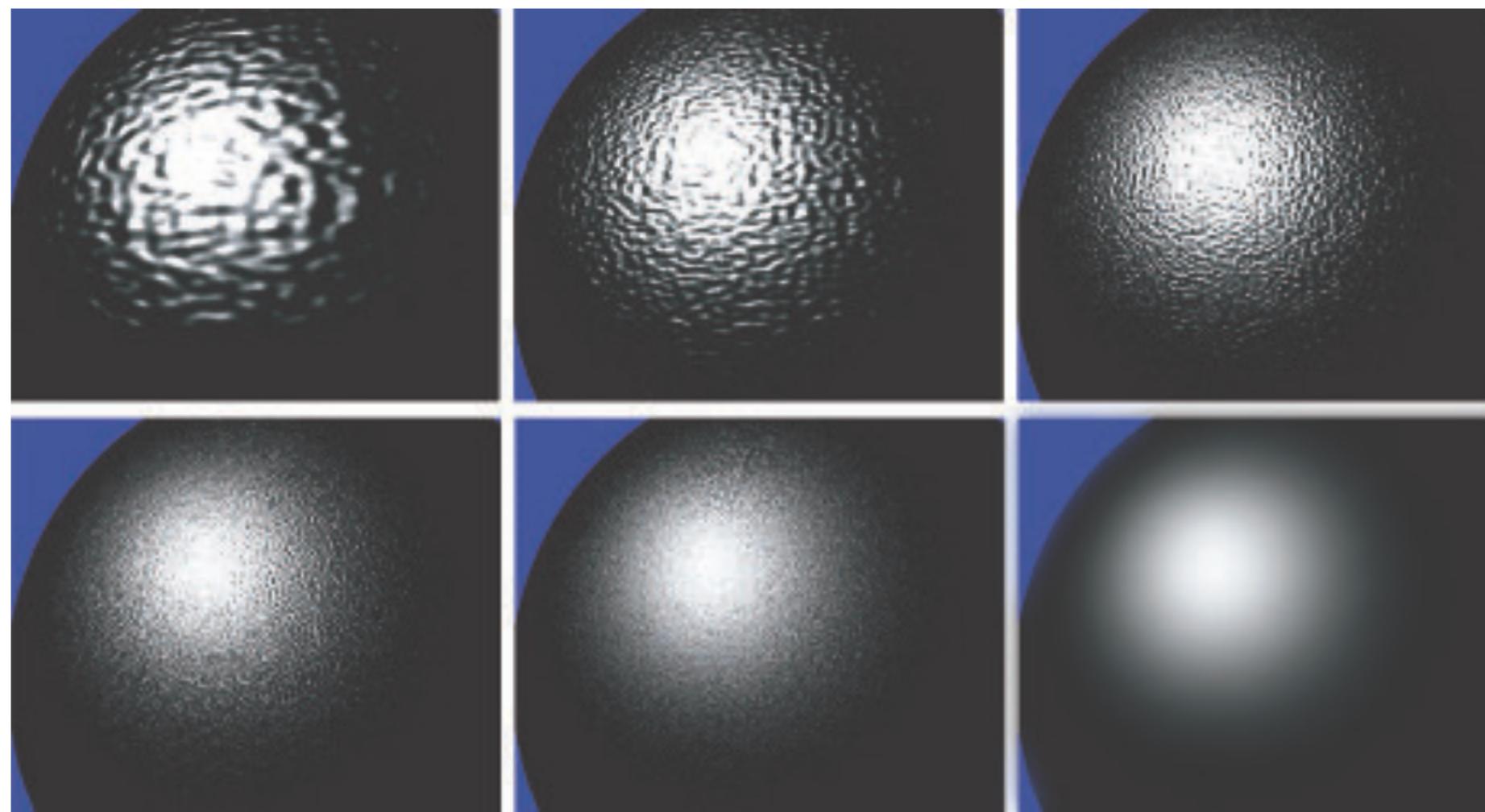
$$F_{Schlick}(h, v, F_0) = F_0 + (1 - F_0)(1 - (h \cdot v))^5$$

Microgeometry

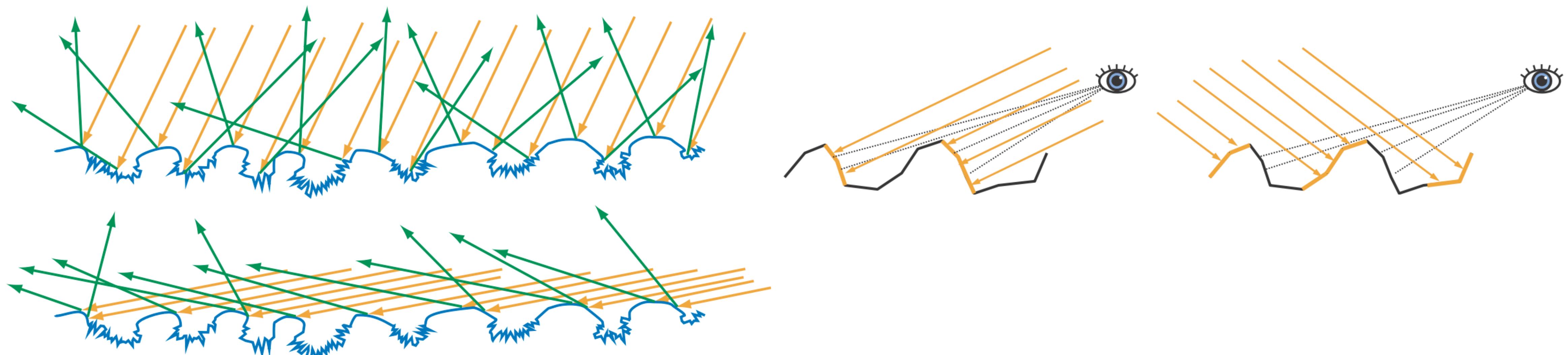
픽셀보다 작은 표면 불규칙성은 명시적으로 모델링 할 수 없으므로 BRDF는 통계적으로 모델링한다. 이 장에서는 불규칙성이 빛의 파장보다 작거나 100배 이상인 영역에서 다룬다.

Microgeometry surface normal 분포의 밀함은 표면 거칠기에 의해 결정되는데 표면이 거칠수록 더 확산되고 거칠기가 증가하면 반사는 더 흐려진다.

Multiple surface normal, shadowing, Masking, 다른 microgeometry에 반사, 역반사.



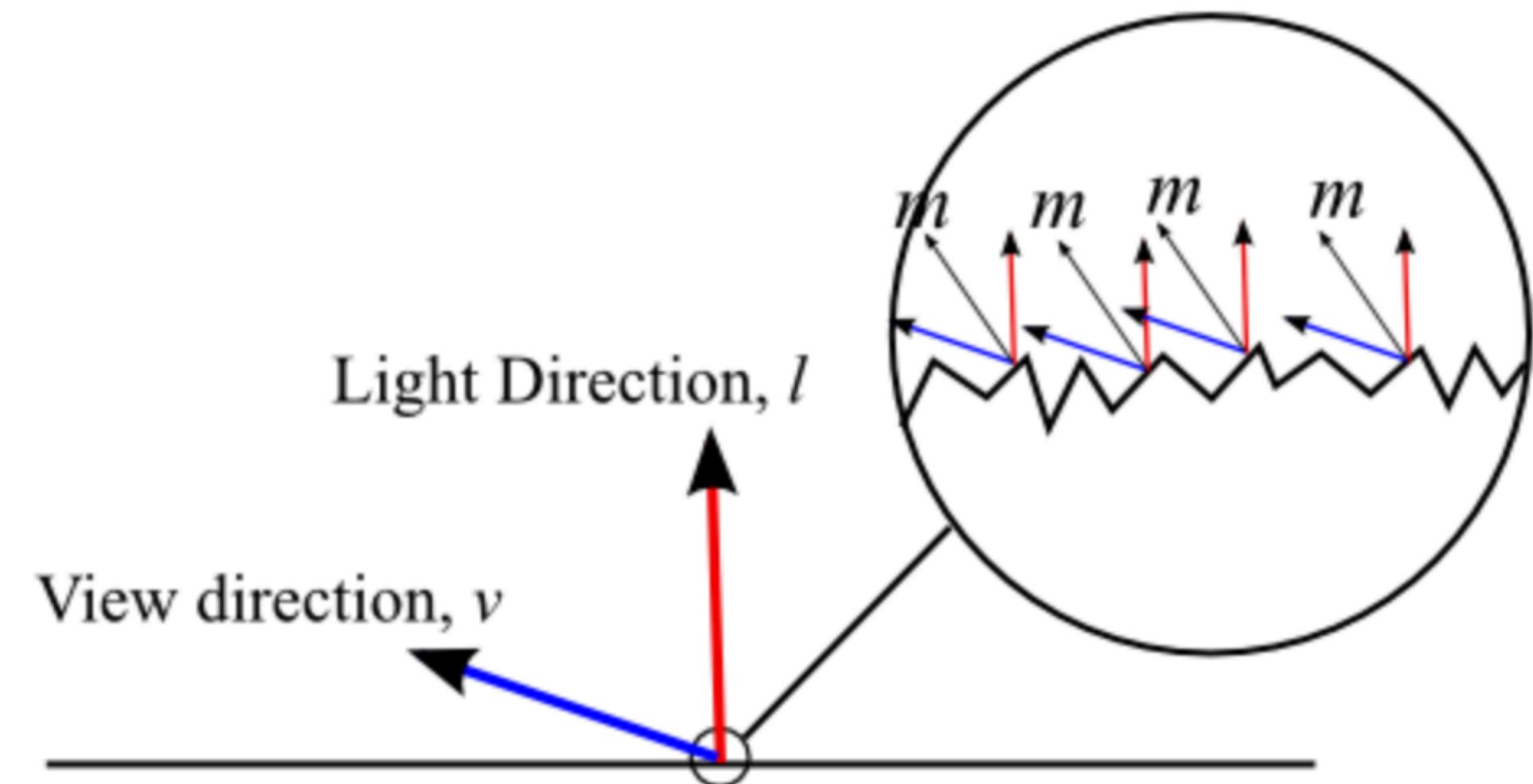
Microgeometry



Microfacet Theory

많은 BRDF 모델들은 반사에 의한 microgeometry의 효과들을 수학적으로 분석하는 microfacet 이론에 따른다. 이때 각 facet은 평평하고 하나의 normal을 가지며 매끄러운 플레넬 거울이다.

빛을 개별적으로 반사하고 전체 표면 BRDF에 대한 모든 microfacet의 결합된 반사율을 합성한다. 일반적으로 microfacet BRDF는 렌더링에 직접 사용되진 않는다.



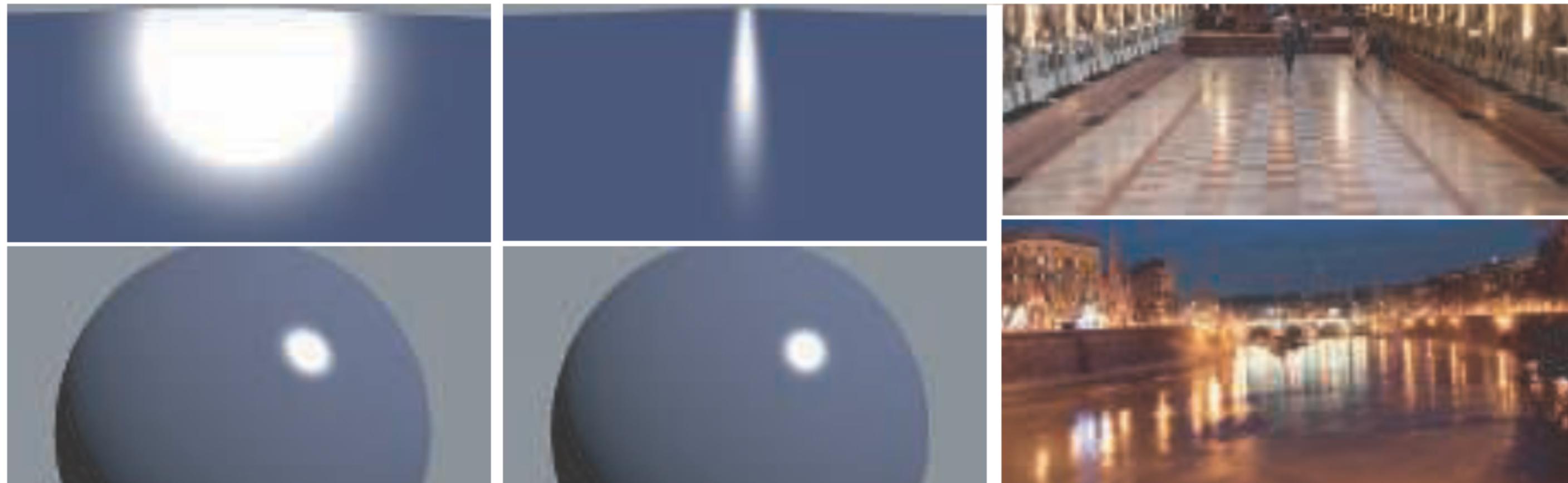
$$f_{\text{spec}}(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{F(\mathbf{h}, \mathbf{l})G_2(\mathbf{l}, \mathbf{v}, \mathbf{h})D(\mathbf{h})}{4|\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}||\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}|}.$$

BRDF Models for Surface Reflection

Physically based rendering에 사용되는 specular BRDF는 microfacet 이론에서 파생되었다.

Normal Distribution Functions(NDF) 는 렌더링된 표면의 모양에 큰 영향을 미친다. NDF의 모양은 반사광 선의 lobe의 너비와 모양을 결정하며 이는 다시 specular highlight의 크기와 모양을 결정한다. NDF는 표면 거칠기에 대한 전반적인 인식 뿐만 아니라 하이라이트가 뚜렷한 가장자리를 갖는지 또는 안개로 덮여있는지와 같은 시각적 측면에도 영향을 미친다.

Specular lobe는 NDF의 단순한 복제가 아니므로 표면 곡률은 시야각에 따라 하이라이트 모양이 왜곡되는데 이러한 왜곡은 힐끗 보는 각도에서 평평한 표면에 특히 강하게 나타난다.

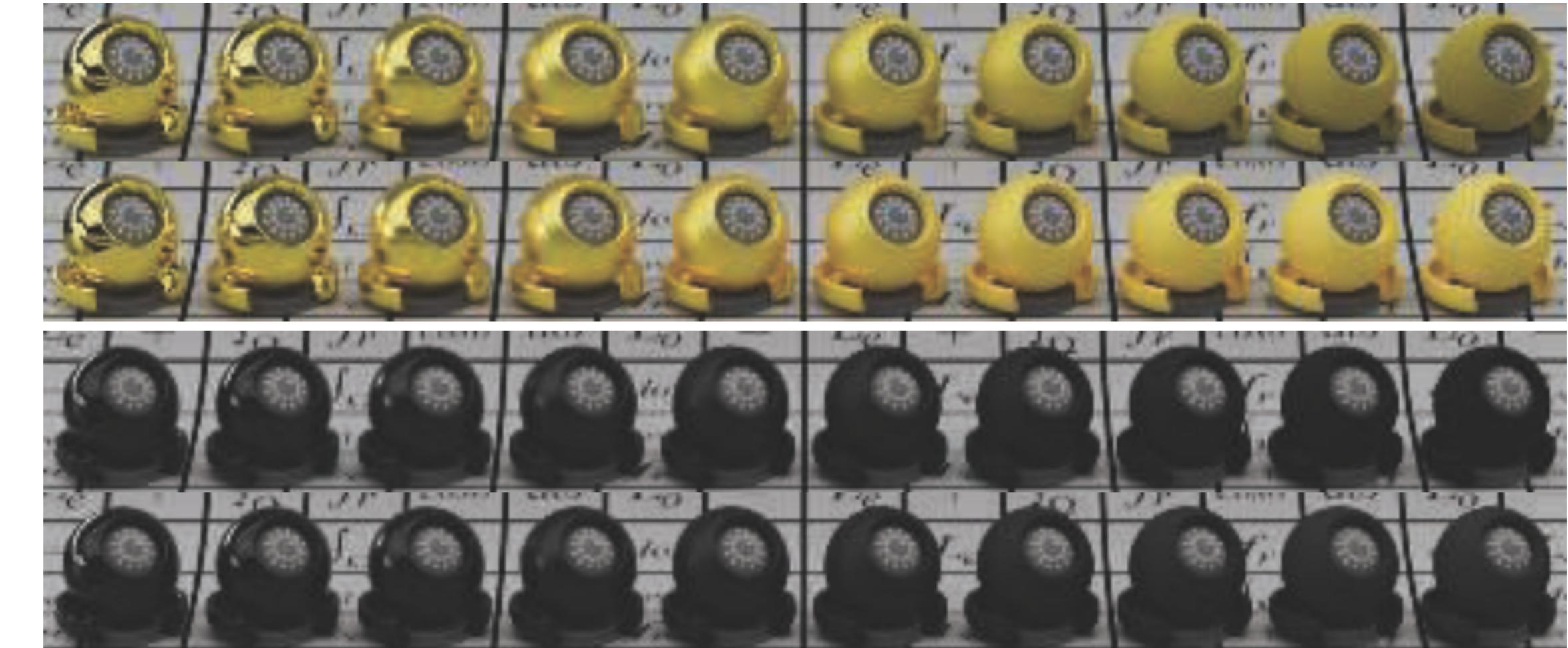
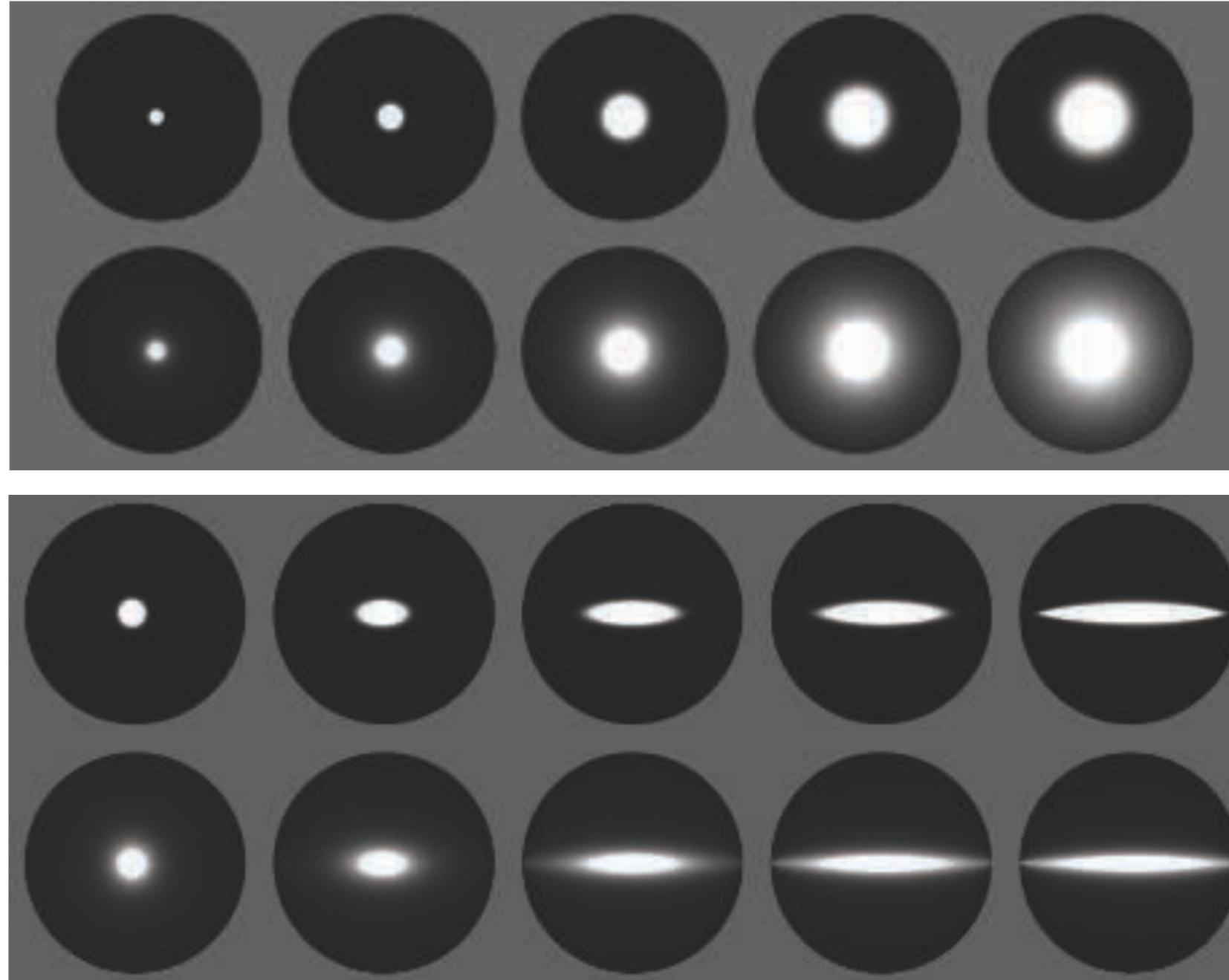


BRDF Models for Surface Reflection

Isotropic NDF : 대부분의 NDF. Beckmann, Cook-Torrance, Blinn-Phong, GGX 등

Anisotropic NDF : isotropic NDF와 달리 추가 방향 정보가 필요하며 일반적으로 isotropic NDF를 일반화하여 만들 수 있다.

Microfacet 각각은 완전한 거울이므로 여러번 반사되는 빛을 고려하지 않는다. 이러한 단순화로 인해 특히 거친 금속에서 에너지 손실과 overdarkening을 야기한다. 이를 시뮬레이션 하기 위해 BRDF에 추가한다.



BRDF Models for Subsurface Scattering

이전 섹션에서는 표면 반사와 specular 반사에 대해 다루었고 이 섹션에서는 표면 아래에서 굴절된 빛에 대해 설명한다. 이 빛은 산란과 흡수를 겪고 일부는 원래 표면에서 다시 방출된다. 여기서 금속은 subsurface 상호작용을 하지 않기 때문에 다루지 않고 불투명한 유전체의 BRDF 모델만을 다룬다.

Subsurface Albedo

먼저 diffuse model의 특성과 이 색상이 실제 material에서 가질 수 있는 가능한 값에 대해 논의한다.

불투명한 유전체의 subsurface albedo는 표면을 빠져나가는 빛의 에너지와 물질 내부로 들어오는 빛의 에너지 사이의 비율이다. 알베도는 파장에 비례하며 0이면 빛을 다 흡수하는 것, 1이면 빛을 흡수하지 않는 것을 의미한다. 플레넬 반사가 specular로 간주되는 것처럼 알베도는 diffuse로 간주된다.

유전체는 대부분 반사하기보다는 전달하므로 알베도는 보통 더 밝고 specular color 보다 더 중요하다. specular한 빛은 colored 되지 않는데 diffuse한 빛은 colored 된다. Ex) 빨간색 플라스틱 공은 흰색 highlight가 나타남

액체 위의 거품이 액체 자체보다 훨씬 밝은 이유는 수많은 공기-액체 계면을 추가하여 산란량이 크게 증가했기 때문이고 물질이 젖었을 때 어두워지는 것은 물이 공기로 채워진 공간으로 침투하여 산란이 감소하였기 때문이다.

BRDF Models for Subsurface Scattering

Scale of Subsurface Scattering and Roughness

다음은 표면 거칠기가 diffuse에 미치는 영향과 주어진 material에 대해 매끄러운 표면 또는 거친 표면 shading model을 사용할지 여부를 선택하는 기준에 대해 다룬다.

Local한 subsurface scattering을 위한 BRDF모델은 표면 거칠기를 고려하는데 일반적으로 diffuse micro-BRDF를 갖는 microfacet이론을 사용한다. 얼마나 거친지가 아니라 표면 불규칙성의 상대적 크기와 지표면 아래의 산란 거리와 관련이 있다.

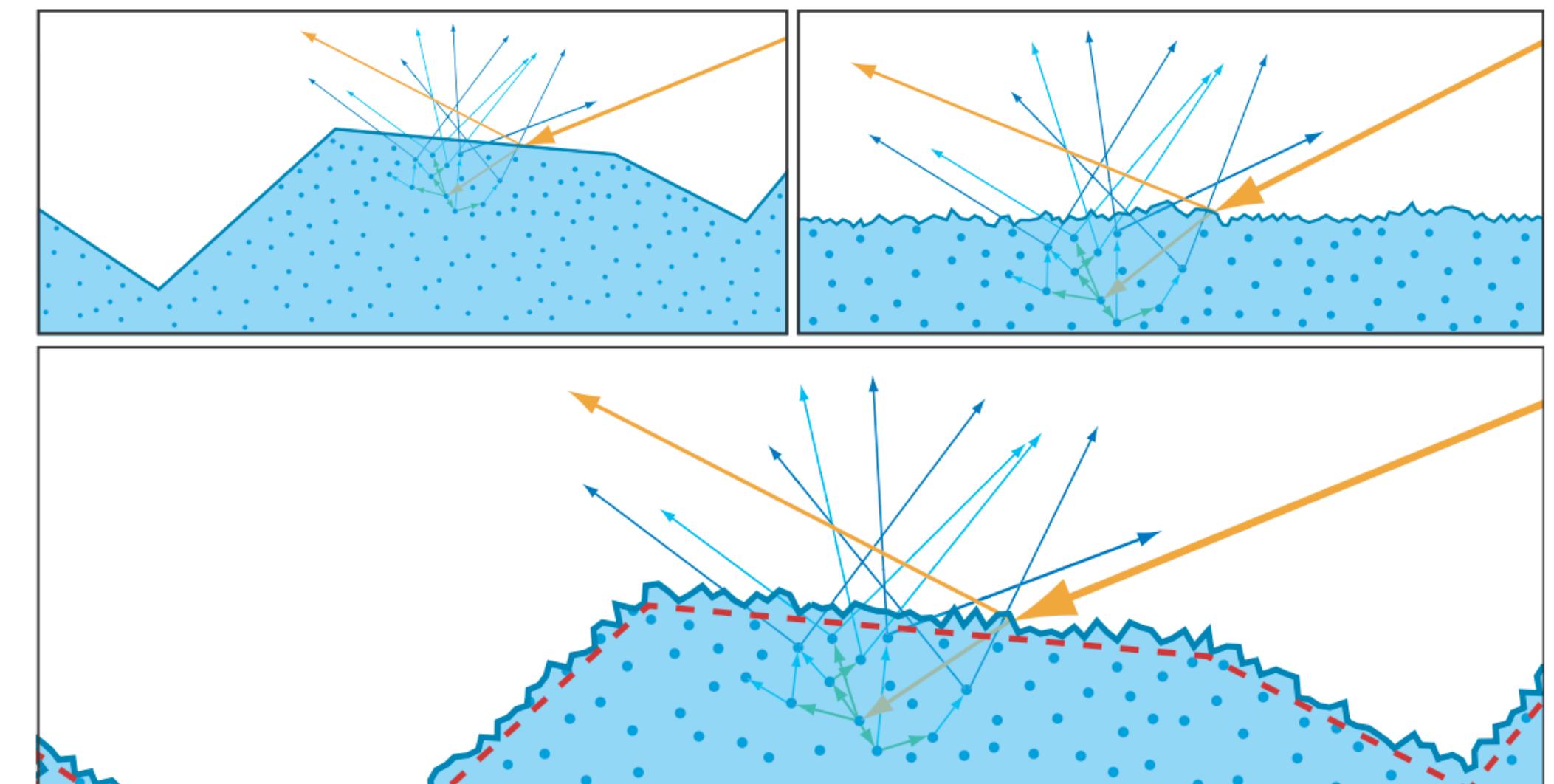
불규칙성 > 산란거리 인 경우

지표면 아래 산란은 역반사와 같은 microgeometry 관련 효과가 나타나므로 rough-surface diffuse model을 사용

불규칙성 < 산란거리 인 경우

Subsurface scattering을 모델링할 목적으로 평평한 것으로 간주해야 하며 역반사와 같은 효과가 나타나지 않으므로 smooth-surface diffuse model을 사용

골고루 있으면 산란거리보다 큰 불규칙성만을 포함하는 microfacet model 사용



BRDF Models for Cloth

옷은 다른 종류의 material들과 다른 microgeometry 구조를 갖는다. 직물의 종류에 따라 반복적으로 짜인 미세구조를 가질 수도 있고 표면으로부터 수직으로 돌출된 부분을 가질 수도 있다.

일반적으로 anisotropic specular highlights, asperity scattering, 뷔 방향에 따른 색상 이동과 같은 특수한 shading model을 가진다.

Cloth BRDF는 크게 관찰에서 생성된 경험적 모델, microfacet theory에 기반한 모델, microcylinder cloth 모델의 세가지로 분류된다.

Microfacet theory에 기반한 모델은 벨벳과 같은 특정 유형의 천으로 제한된다.

microcylinder model은 일반적인 천 모델이며 머리카락과 같은 아주 작은 원기둥 모델로 표면이 1차원 선으로 덮여있다고 가정한다.

Wave Optics BRDF Models

이전까지는 빛을 파동이 아닌 광선으로 여기는 geometrical optics에 대해 논의하였다. 기하학적 광학은 표면 불규칙성이 파장보다 작거나 파장의 100배 이상일때만 다루었는데 실제 표면은 이렇지만은 않다.

1-100배의 파장을 포함하는 불규칙성도 포함되고 microgeometry와 구분하기 위해 이를 nanogeometry라고 부른다. nanogeometry는 geometrical optics으로 모델링되지 않고 wave optics(physical optics)를 이용하여 모델링된다.

빛의 파장과 비슷한 두께를 가진 표면 레이어나 필름에서 빛의 파동과 관련된 광학 현상을 생성하는데 여기서 회절 및 박막 간섭과 같은 파동 광학 현상에 대해 다룬다.

Wave Optics BRDF Models

Diffraction models

회절은 파동이 장애물이나 좁은 틈을 통과할 때 파동이 그 뒤편까지 전파하는 현상이다.

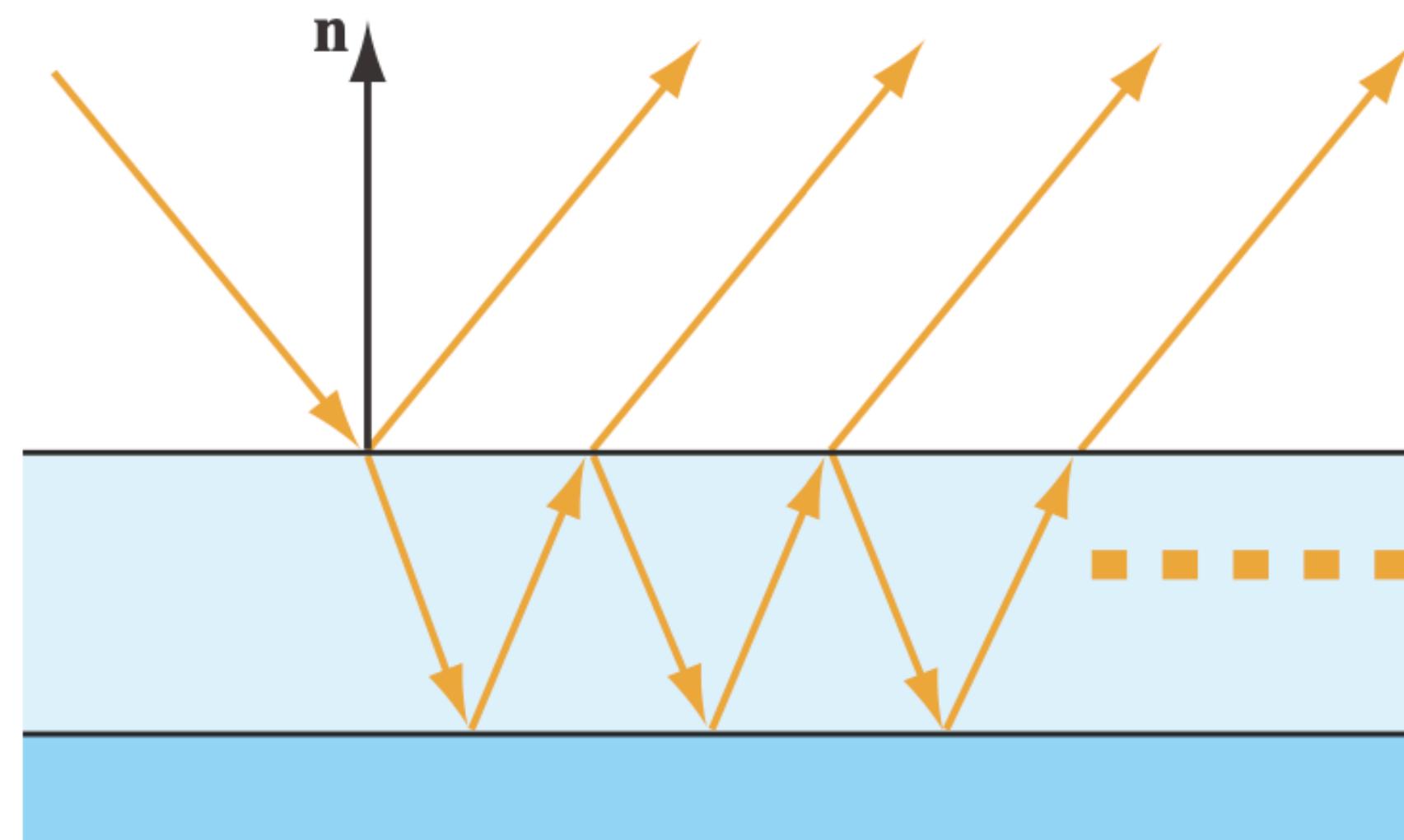
더 큰 불규칙성은 더 작은 확산을 일으키고 불규칙성이 빛의 파장의 100배보다 크면 회절된 빛과 specular 반사된 빛 사이의 각도는 무시할 수 있을 정도로 작으며 점점 줄어드는 불규칙성은 불규칙성이 빛의 파장보다 작아져 회절이 일어나지 않기 전까지 회절된 빛의 더 넓은 확산을 일으킨다.

회절은 주기적인 nanogeometry를 가진 표면에서 가장 뚜렷하게 보이는데 이는 반복 패턴이 constructive한 간섭을 통해 회절된 빛을 강화하여 무지개를 일으키기 때문이다. 이는 CD나 특정 곤충에서 관찰 할 수 있다.

Wave Optics BRDF Models

Models for Thin-Film Interference

Thin film interference는 얇은 유전체층의 상부와 하부에서 반사되는 빛 경로가 서로 간섭할 때 발생하는 파동 광학 현상이다. 다른 파장의 빛은 파장과 경로 길이 차이의 관계에 따라 constructive하거나 destructive하게 간섭한다. 경로 길이 차이는 각도에 따라 변하기 때문에 결과적으로 constructive 간섭과 destructive 간섭 사이에서 다른 파장이 전환됨에 따라 생기는 무지개색 색 변화이다.



Layered Materials

먼지, 물, 얼음, 눈이나 코팅 등으로 material들은 겹쳐진다.

이들 중 가장 간단하고 시각적으로 중요한 효과는 투명한 코팅인데 이것의 가장 눈에 띄는 시각적 결과는 코팅과 기초 기판 모두에서 반사되는 빛에 의한 이중 반사이다.

Blending and Filtering Materials

Material blending은 material의 특성(BRDF 매개변수)를 결합하는 과정이다. 녹 반점이 있는 금속을 모델링하기 위해 마스크 텍스처를 칠하여 녹 반점 위치를 설정하고 녹과 금속의 재료 특성을 혼합하여 사용한다.

Antialiasing과 surface appearance 보존을 위한 material filtering은 material blending과 매우 밀접하다. Material 특성(BRDF)은 일반적으로 텍스처에 저장되며 GPU 이중선형 필터링 및 mipmapping과 같은 매커니즘을 통해 필터링되는데 이런 매커니즘은 필터링되는 양이 최종 색상과 선형 관계를 갖는다는 가정에 기초한다.

일반 맵에서 선형 mipmapping 방법을 사용하거나 거칠기와 같은 비선형 BRDF 매개변수를 포함하는 텍스처에서 아티팩트가 발생할 수 있는데 이 아티팩트를 완화하는 기술을 specular antialiasing이라고 한다.

Blending and Filtering Materials

Filtering normals and normal distribution

Material filtering artifact에 가장 자주 사용되는 솔루션은 normal과 normal distribution 함수의 필터링과 관련이 있다. 문제를 해결하기 위해 NDF가 subpixel 표면 구조의 통계적 묘사가 된다.

카메라와 표면 사이의 거리가 증가하면 이전에 여러 픽셀을 덮었던 표면 구조가 범프 맵 영역으로 이동하면서 subpixel 크기로 축소될 수 있다. 이러한 전환은 mipmap chain과 밀접하게 관련되어 있다.

Macroscale은 삼각형들로 모델링되고 중간크기는 텍스처로 모델링되고 microscale은 BRDF로 모델링된다.



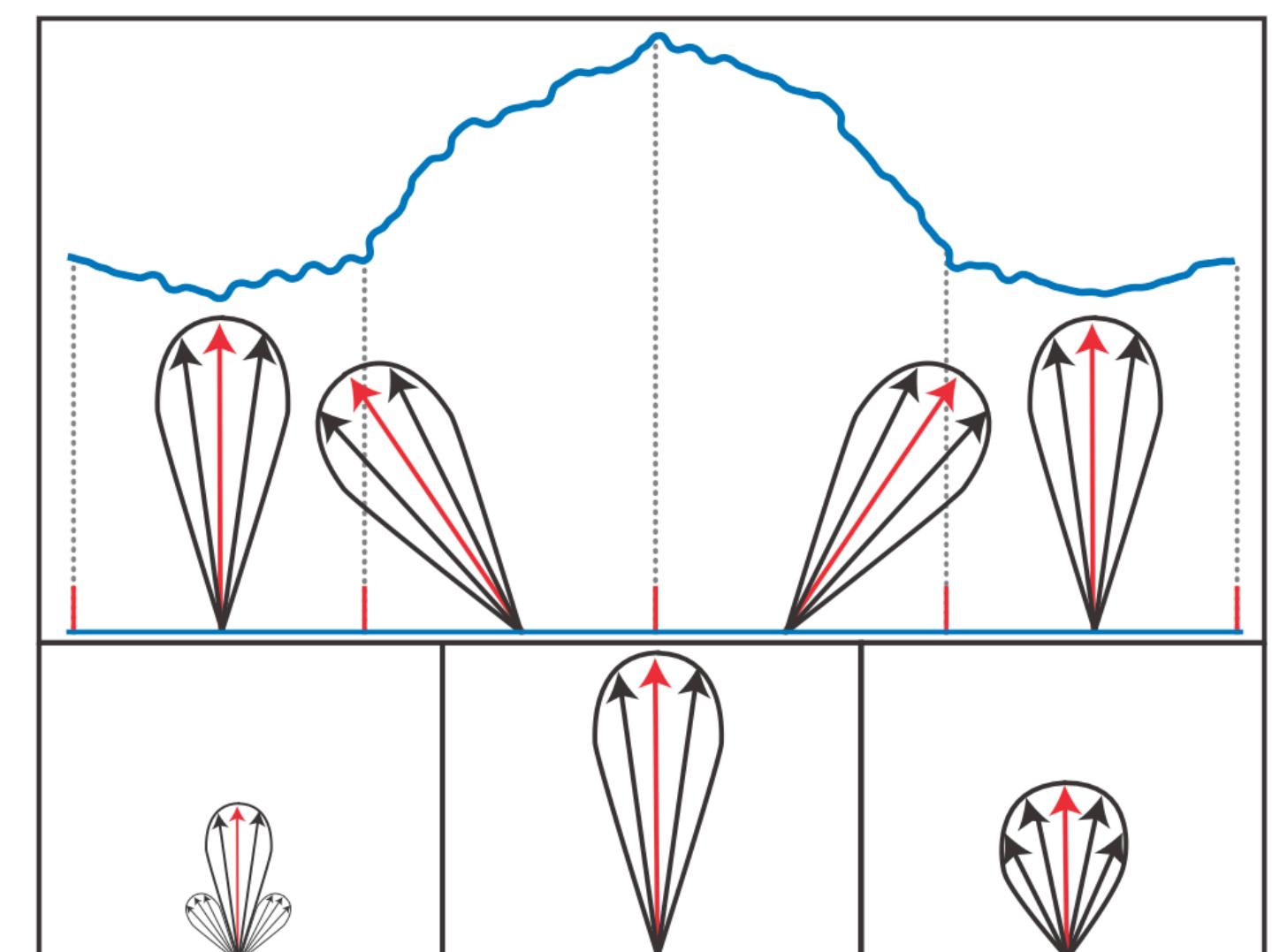
원기둥은 macroscale로 모델링, bump는 일반 맵으로 표현

Blending and Filtering Materials

카메라가 물체에서 멀리 이동했을 때의 해상상도에서 표면의 이상적인 표현은 각 픽셀이 포함하는 더 큰 표면영역에 걸쳐 수집된 모든 normal 분포를 정확하게 찾아낸다. 이 분포는 최상위 mip맵의 네 가지 텍셀에서 NDF를 평균화하여 찾을 수 있다. 왼쪽 아래 그림은 이상적인 normal 분포를 보여준다. 이는 낮은 해상도에서 표면의 모양을 가장 정확하게 나타낼 수 있다.

하단 중앙 그림은 normal 분포, 각 분포의 평균 및 각 분포의 너비에 해당하는 거칠기를 별도로 평균화 한 결과를 보여준다. 결과의 평균 normal 분포(빨간색)은 적절하지만 분포가 너무 좁기 때문에 표면이 너무 매끄럽게 나타나고 깜빡이는 하이라이트의 형태로 앤리어싱을 유발한다.

오른쪽 아래 그림은 각각의 이상적인 NDF에 대해 방향과 전체 폭 모두에서 그것과 가장 밀접하게 일치하는 방향의 Beckmann lobe를 찾는다. 이 Beckmann lobe의 중심 방향을 normal map에 저장하고 roughness map에 roughness 값을 저장한다. 이 NDF는 훨씬 이상적이고 단순한 normal 평균보다 더 충실하게 표현 할 수 있다.



Blending and Filtering Materials

최상의 결과를 얻기 위해서는 normal 분포나 roughness 값이 아닌 normal 분포에 밑 매핑과 같은 필터링 작업을 적용해야 한다.

현재 NDF 필터링 문제를 해결하기 위해 사용하는 대부분의 기술은 normal 분포의 분산을 계산하여 작동한다. 분산 매핑 기법은 매끄러운 가우스 lobe로서 normal 분포에 근사한다. 이것은 모든 픽셀이 매끄럽게 평균화 되도록 수십만 개의 범프를 덮는다면 합리적인 근사치이지만 대부분의 경우 픽셀 하나가 수백 또는 수천 개의 범프를 덮기 때문에 ‘glinty’한 모양이 될 수 있다.

이러한 구체의 애니메이션 렌더링을 관찰 할 경우 노이즈가 많은 하이라이트는 프레임에서 프레임으로 들어오고 나가는 반짝임으로 나타나는데 그러한 표면의 NDF를 표시하면 그림의 왼쪽 이미지와 같고 이 표면에 분산 매핑 기법을 사용하면 오른쪽 이미지와 같이 부드러운 NDF로 효과적으로 NDF를 근사화 할 수 있다.

