

Принципы построения физически корректных материалов в трехмерной графике

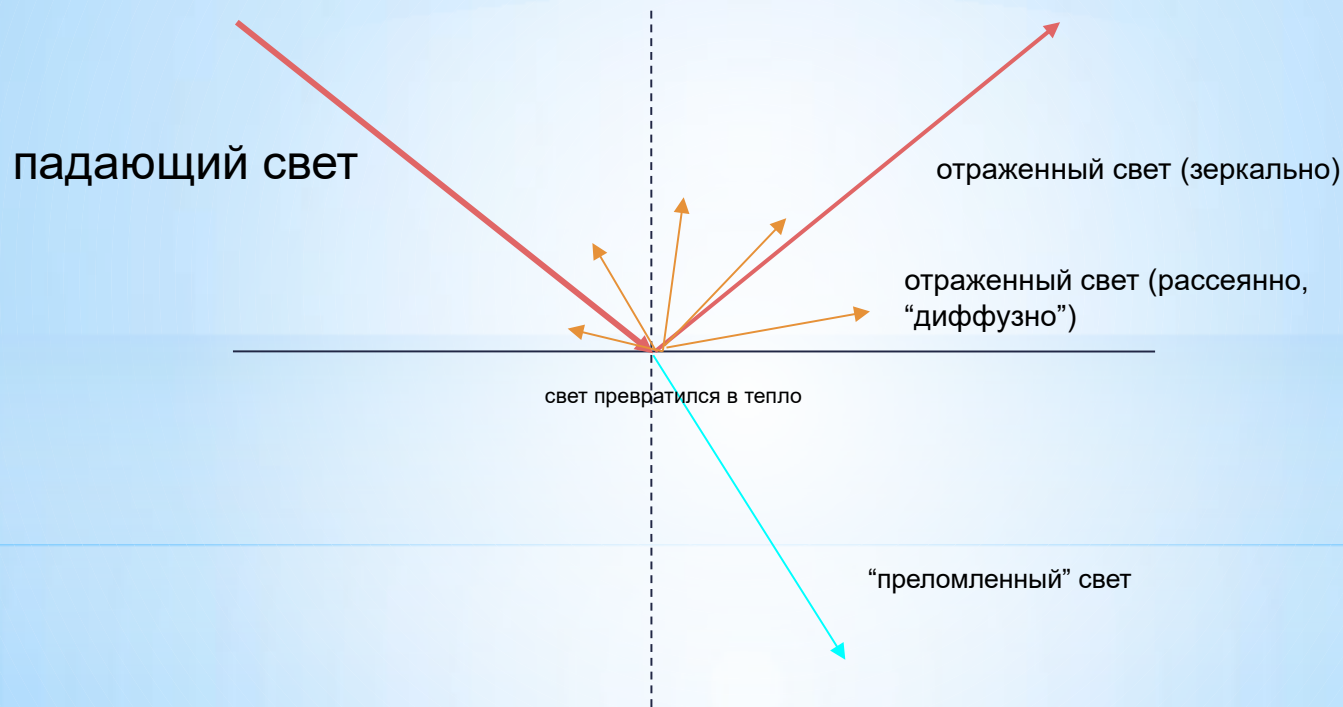


**Борис Юрьевич
Кулагин**

Лекция для художников и
дизайнеров

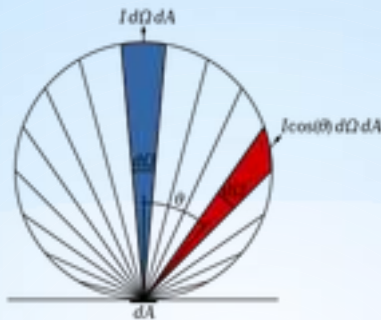
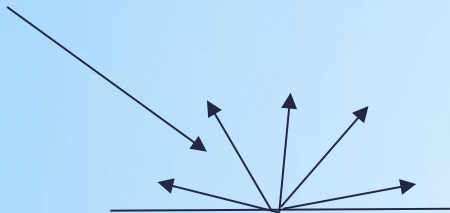
доцент
Кафедры инженерной
графики и дизайна
Национального
исследовательского
университета МИЭТ

Свет и поверхность в реальном мире (Физика, ~9 класс)

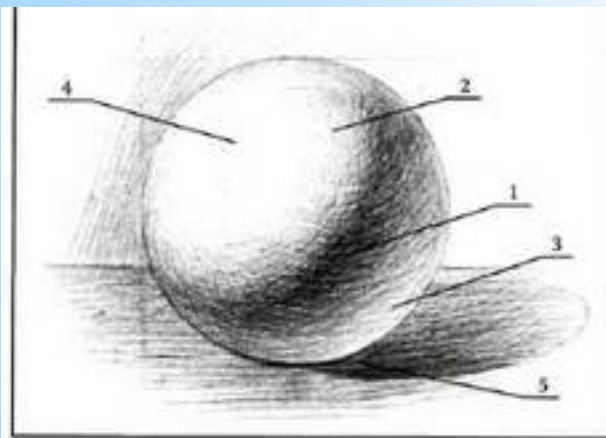


падающий свет = поглощенная энергия + отраженный свет + преломленный свет

Идеальная диффузная поверхность



1. Свет отражается равномерно во все стороны.
2. Яркость отраженного света зависит от угла падения.



Светоотражающая моделировка формы шара:

1 — собственная тень; 2 — полутон; 3 — рефлекс;
4 — свет; 5 — падающая тень

Опубликовано в 1760

году, позволяет
имитировать:

~ свежавыпавший снег

~ гипс

~ бумагу (матовую)

~ неполированное дерево

????



Иогáнн Гёнрих Лáмберт
(1728 - 1770)

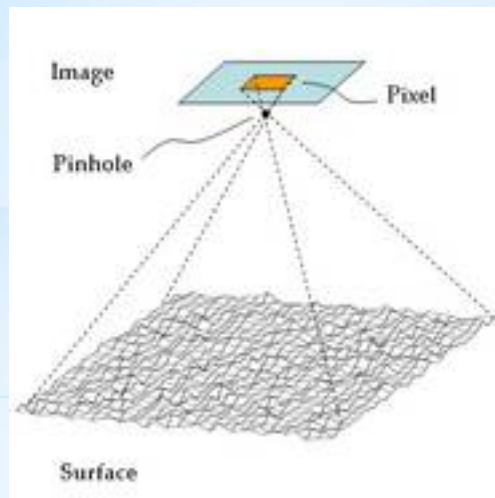
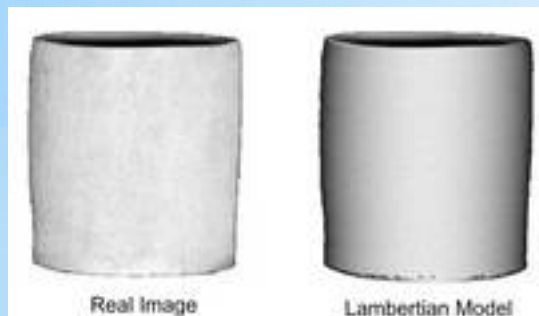
смотрит на всё это с
уважением к себе

Как же всё просто!



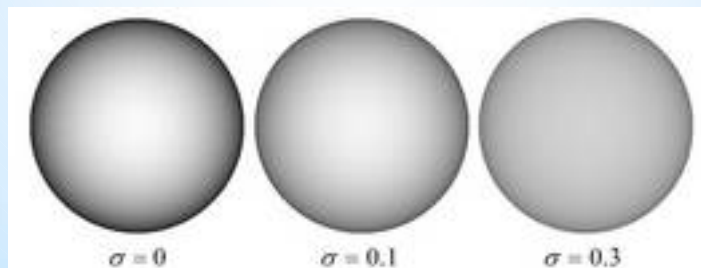
УРА!

Ламберт, ты не прав! (Oren & Nayar, 1994)



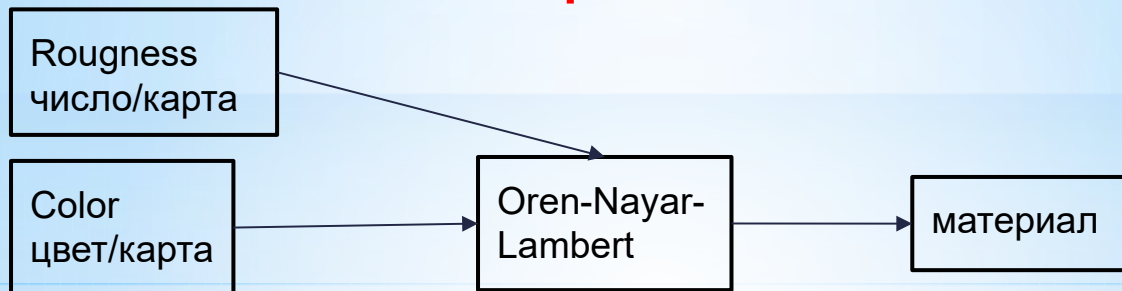
Подходит для большого количества матовых материалов.
Убирает “пластмассу”.
И все же... (см. дальше)

Roughness больше 0.5 выглядит неестественно, поэтому в большинстве рендереров 1 равна 0.5 :-) (кроме V-Ray :-)



https://en.wikipedia.org/wiki/Oren%E2%80%93Nayar_reflectance_model

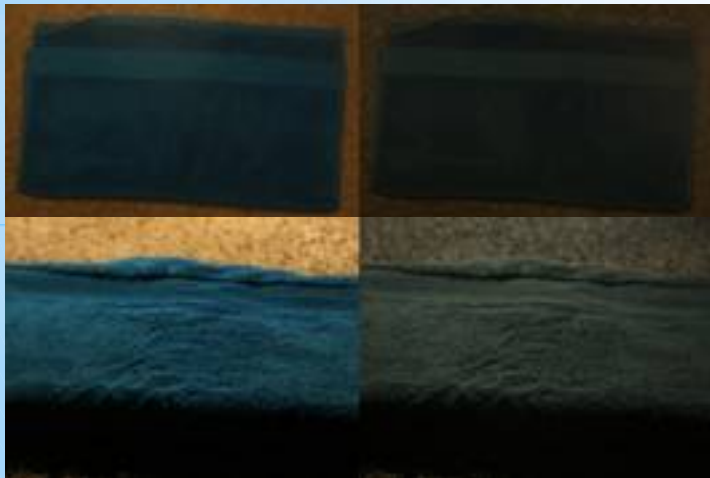
Ненамного сложнее!
Хотя уже закрадываются
подозрения...

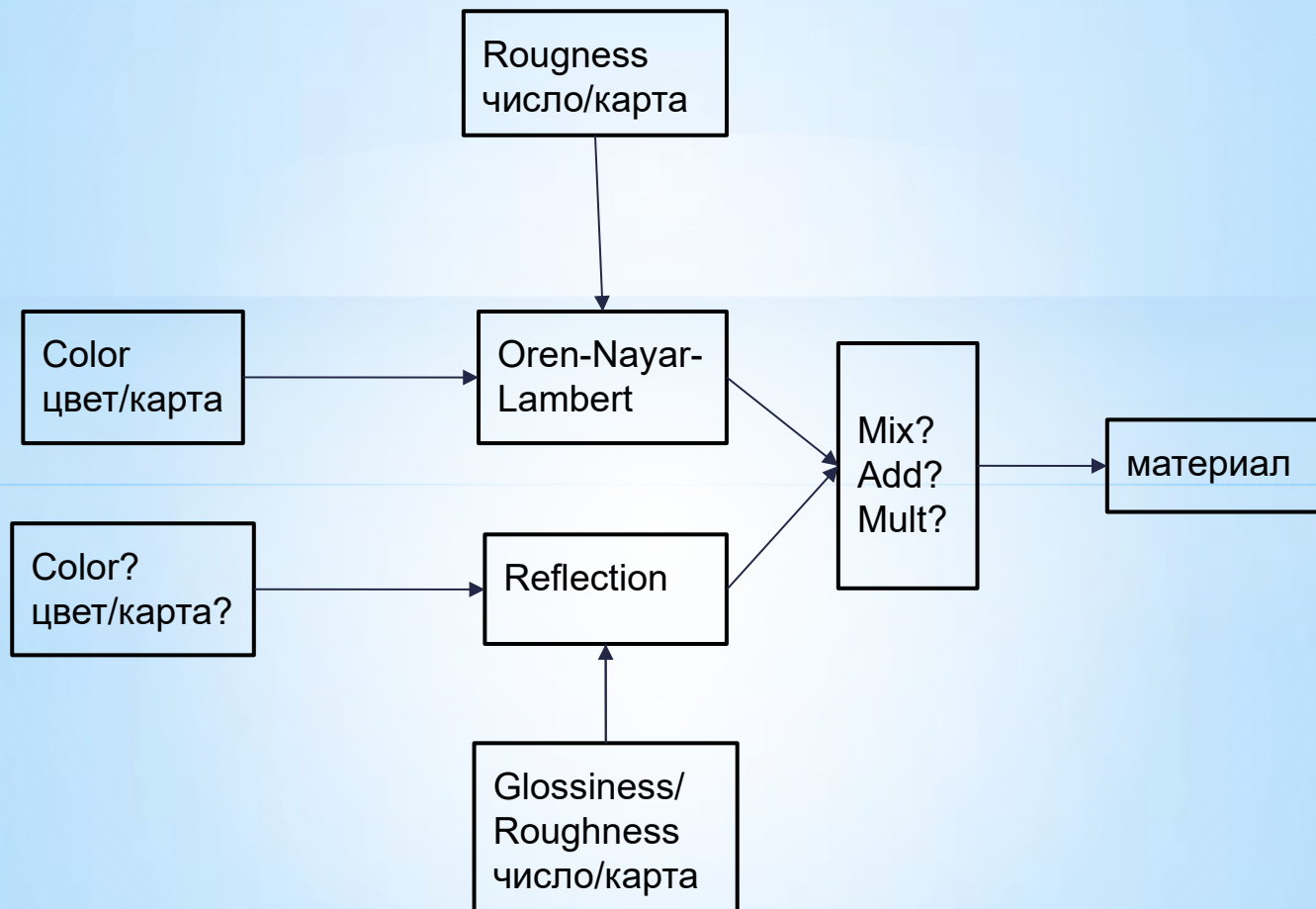


УРА!? (см. дальше)

Отражения бывают не только рассеянные, но и направленные. В трехмерной графике их **раньше** принято было разделять.

На картинках фотографии ,
сделанные с поляризационным
фильтром и без него.
Блестящие кирпичи, картон, ткань...







Карта отражений

Когда-то для отражений использовалась “похожая” кубическая карта...



Но это не дает нужного эффекта. Нужны динамические отражения - карта отражений генерируется постоянно. Но и это не выход...

Этапы большого пути по достижению реализма в трехмерной графике

Beckmann 1963

Torrance and Sparrow 1967

Smith 1967

Phong 1975

Trowbridge and Reitz 1975

Blinn 1977

Cook and Torrance 1981

He, Torrance, Sillion, and

Greenberg 1991

Ward 1992

Lewis 1993

Oren and Nayar 1994

Schlick 1994

Lafortune 1997

Wolff, Nayar and Oren 1998

Neumann et al. 1999

Ashikhmin, Premořze, and Shirley
2000

Ashikhmin and Shirley 2000

Kelemen and Szirmay-Kalos 2001

Dřur 2006

Edwards et al. 2006

Ashikhmin and Premořze 2007

Walter et al. 2007

Trowbridge-Reitz

Romeiro et al. 2008

Geisler-Moroder and Dřur 2010

Kurt et al 2010

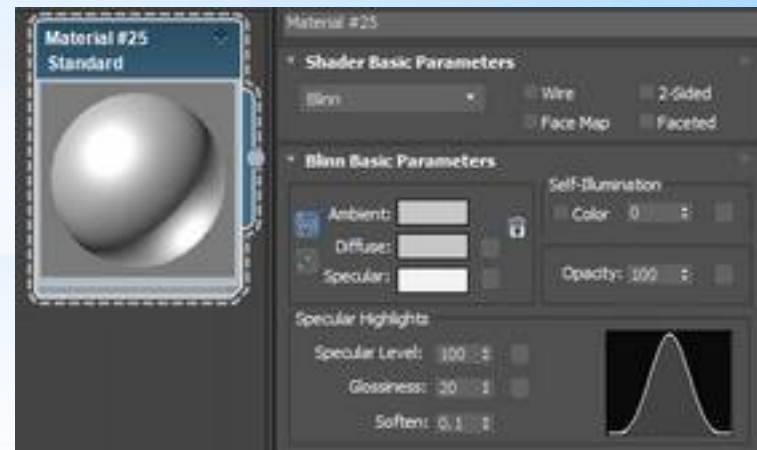
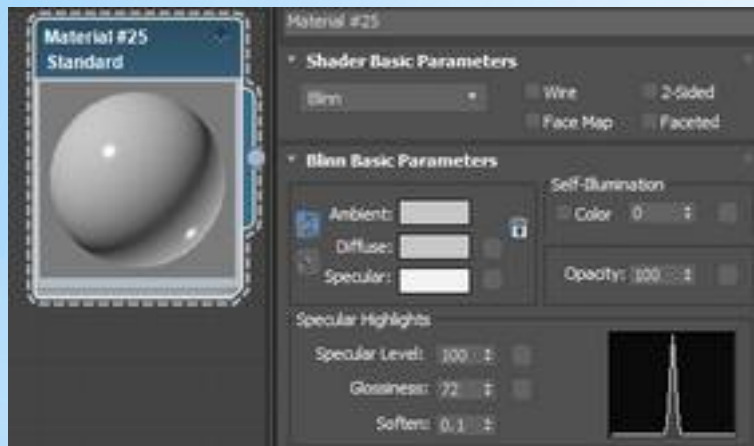
Nishino and Lombardi 2011

Lřow et al. 2012

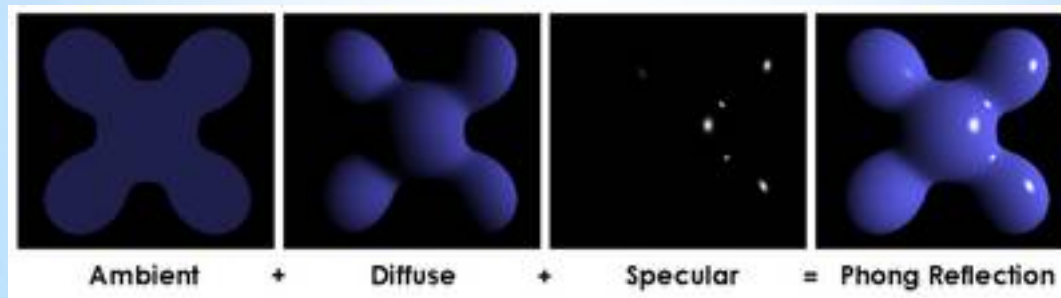
Pacanowski et al. 2012

Bagher et al. 2012

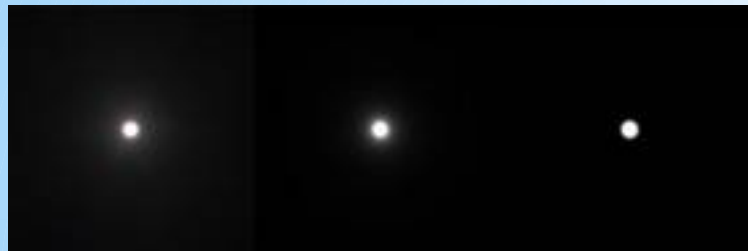
Phong/Blinn/Ward/etc.



Закон сохранения энергии? Нет, не слышали!
Френель? Кто это?



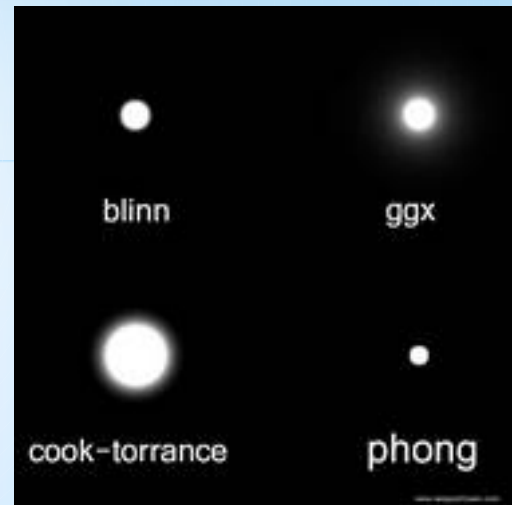
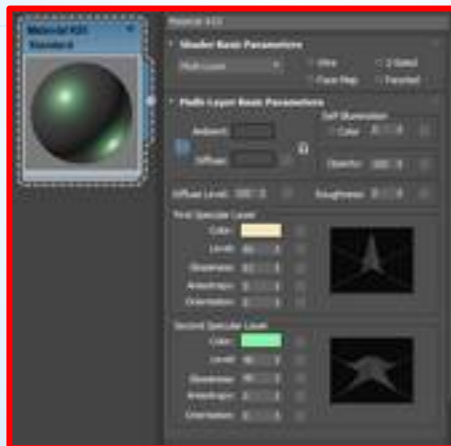
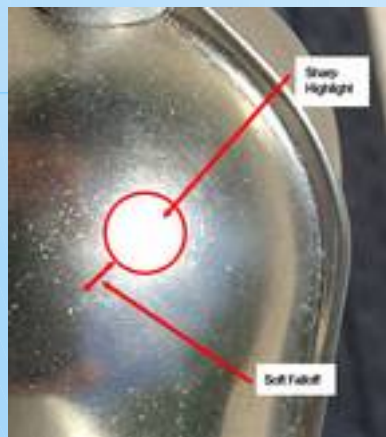
GGX*/GTR** vs Phong/Blinn/Ward/etc.



Хром (Фото)

GGX

Blinn



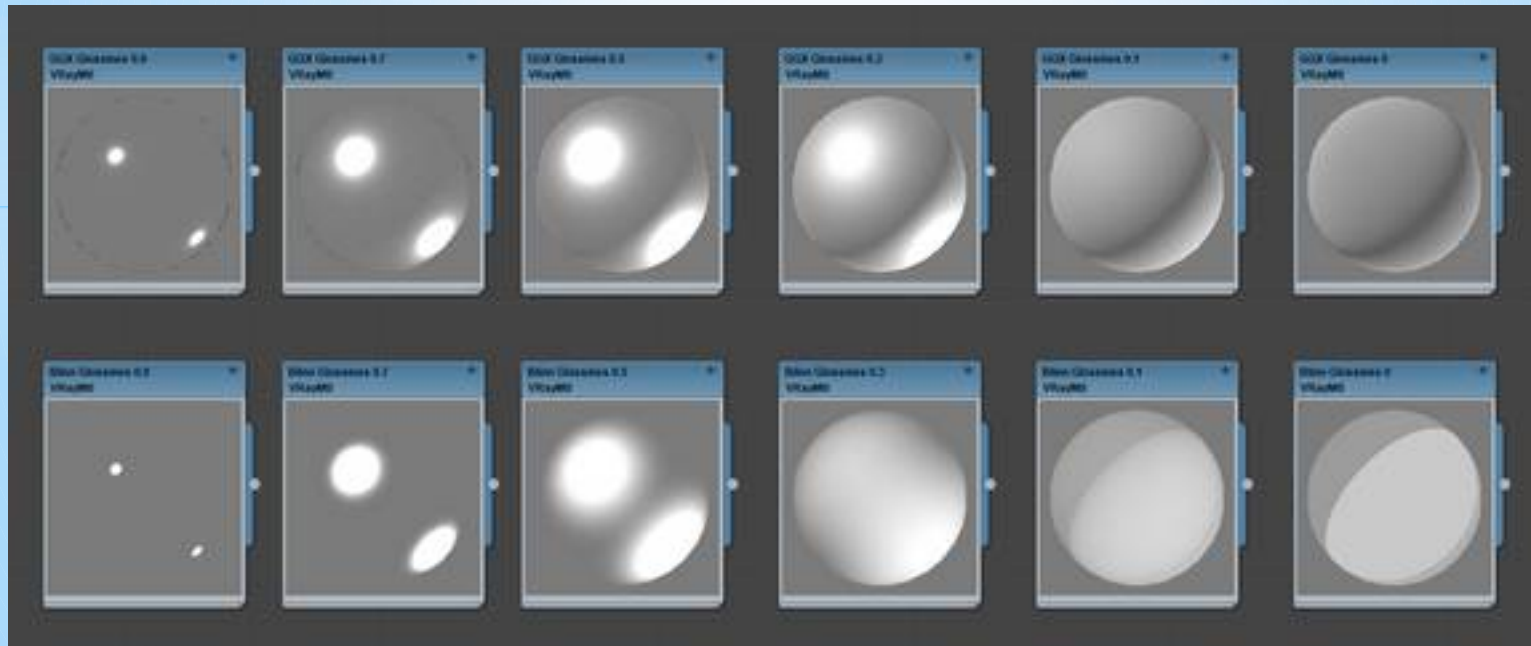
http://www.neilblevins.com/cg_education/ggx/ggx.htm

<http://www.shlyaev.com/rnd/37-cpp-category/54-ggx>

GGX/GTR vs Phong/Blinn/Ward/etc.



https://www.allegorithmic.com/system/files/software/download/build/PBR_Guide_Vol.1.pdf



1. Закон сохранения энергии
 2. “Отражения по Френелю”
 3. Разделение на металлы и диэлектрики
- ну и еще кое-что...

Физика для (3D) художников

1. Закон сохранения энергии

Старая формулировка

$$\text{diffuse} + \underline{\text{Reflection}} + \text{Refraction} \leq 1$$

(исключение - эмиссия, самосвечение)

Новая формулировка

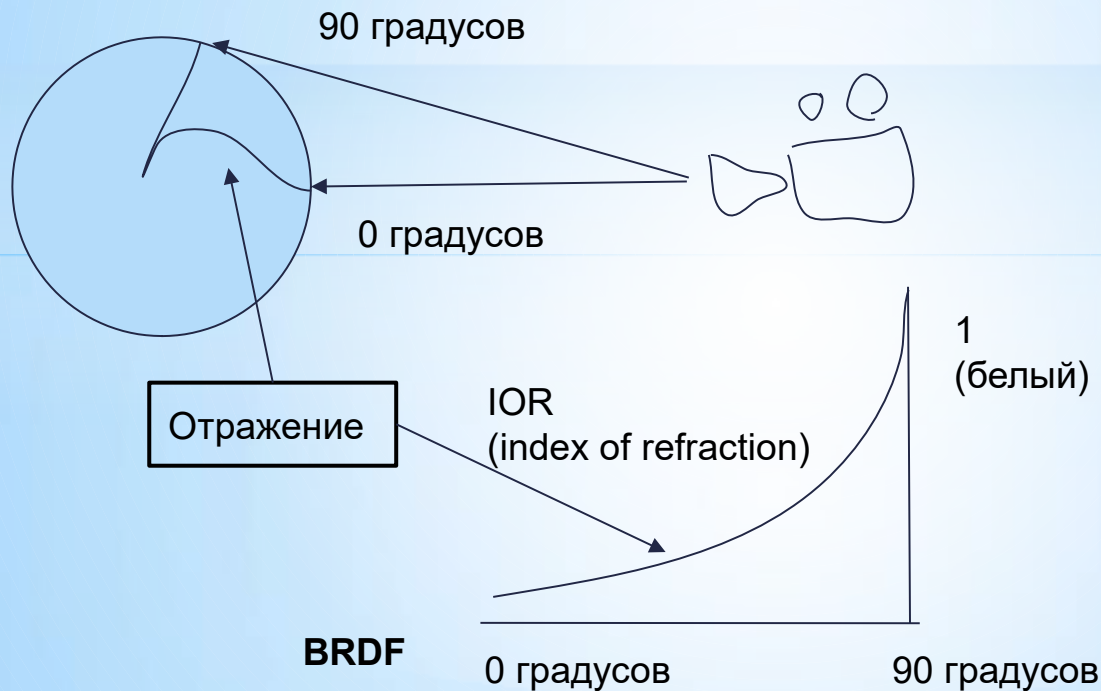
$$\text{Сумма всех компонентов материала} \leq 1$$

(исключение - эмиссия, самосвечение)

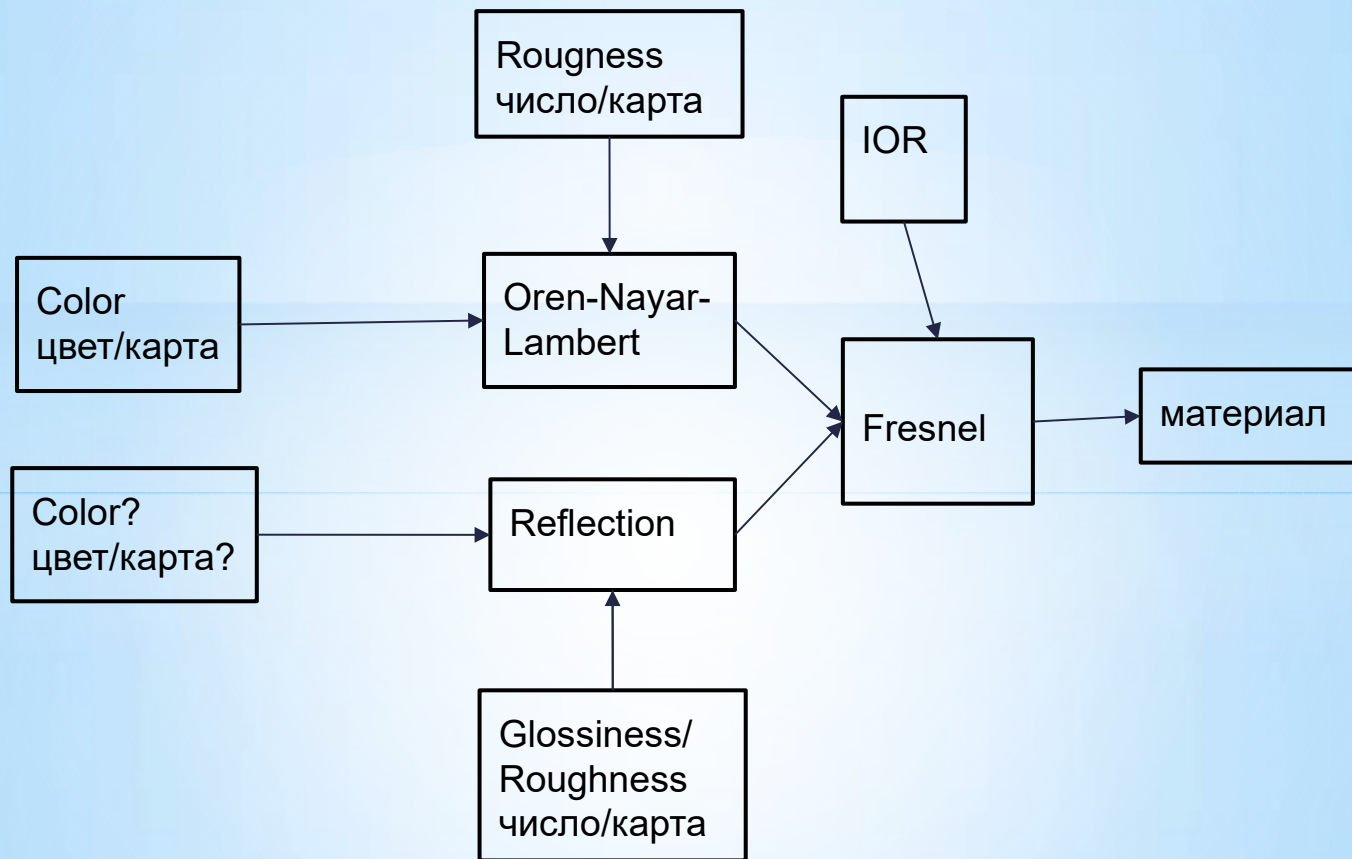
**К СЧАСТЬЮ ЭТО ПРЕДУСМОТРЕНО ПОЧТИ
ВО ВСЕХ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ!**

Физика для (3D) художников

2. Эффект Френеля



Огюстен-Жан Френель
(1788 - 1827)
отвернулся, чтобы не видеть
во что превратили его
труды



Физика для (3D) художников

3. Разделение на металлы и неметаллы (диэлектрики)

3.1. Диэлектрики

Отражение на 0 градусов мало, 0.05 - 0.15

IOR (комплексное число, вектор):

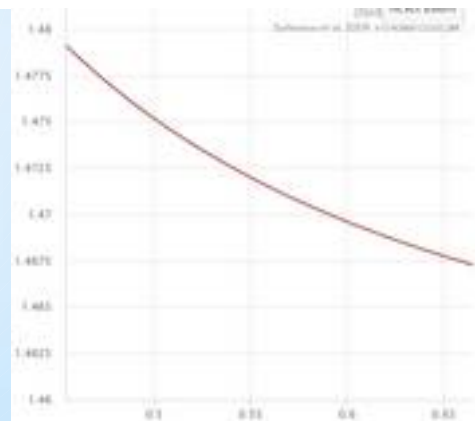
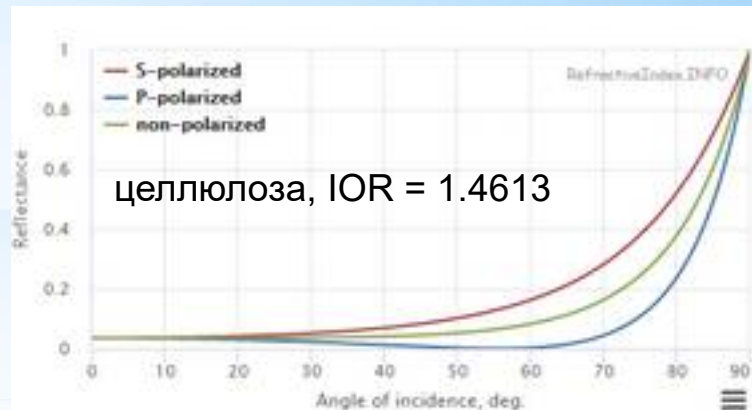
n - в основном 1.3 - 1.6

k - равен или близок к 0,

можно не учитывать

IOR почти не зависит от цвета света
(длины волны)

Цвет отражений - нейтральный,
на 90 градусов - белый (1.0)



Физика для (3D) художников

3. Разделение на металлы и неметаллы (диэлектрики)

3.2. Металлы

Отражение на 0 градусов велико,
0.8 - 0.98

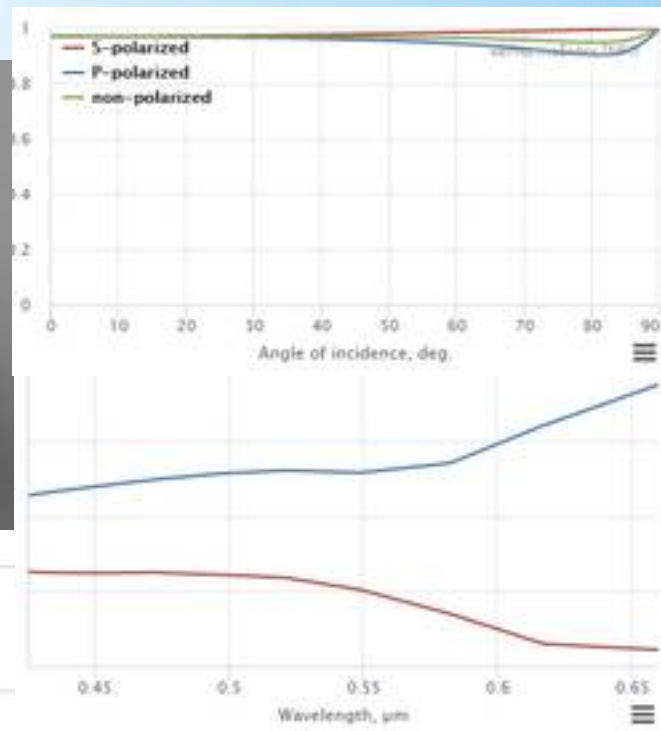
IOR (комплексное число, вектор):
n и **k** - варьируются в больших
пределах, важна сумма.

Отражения окрашиваются в
цвет металла

IOR достаточно сильно зависит
от цвета света (длины волны),
в результате при освещении белым
светом появляются
оттенки под разными углами зрения.



Refractive index
 $n = 0.32615$
Extinction coefficient
 $k = 6.5435$



Физика для (3D) художников

3. Разделение на металлы и неметаллы (диэлектрики)

3.2 Металлы

d. Поставить галку/параметр Metalness = 1

- Базовый цвет становится цветом металла
- IOR не имеет особого значения
- цвет отражений на 90 градусов - белый

Просто, но что-то тут не так...



Физика для (3D) художников

3. Разделение на металлы и неметаллы (диэлектрики)

3.2 Металлы

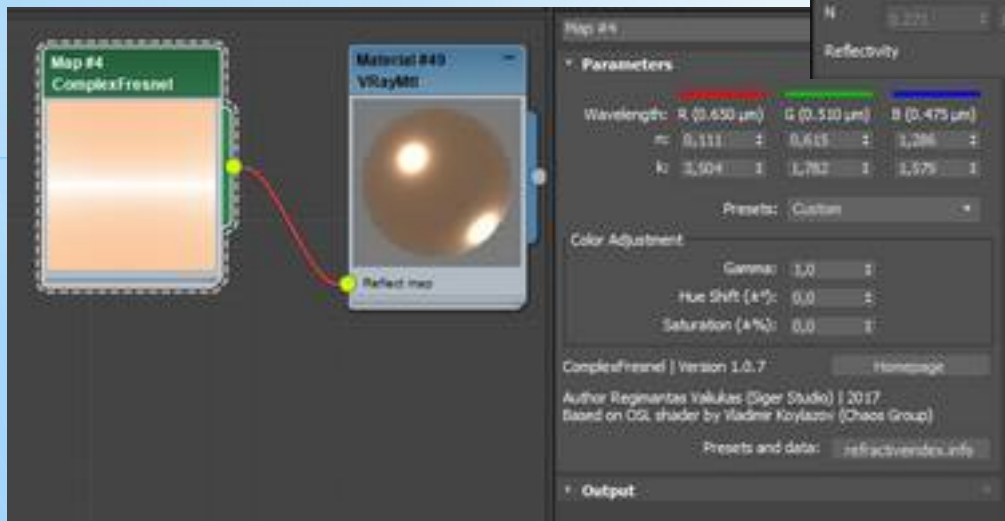
е. Табличный IOR - пропускаем, поддерживается Maxwell, Indigo, наверное Mitsuba - в общем, не сильно распространен

Физика для (3D) художников

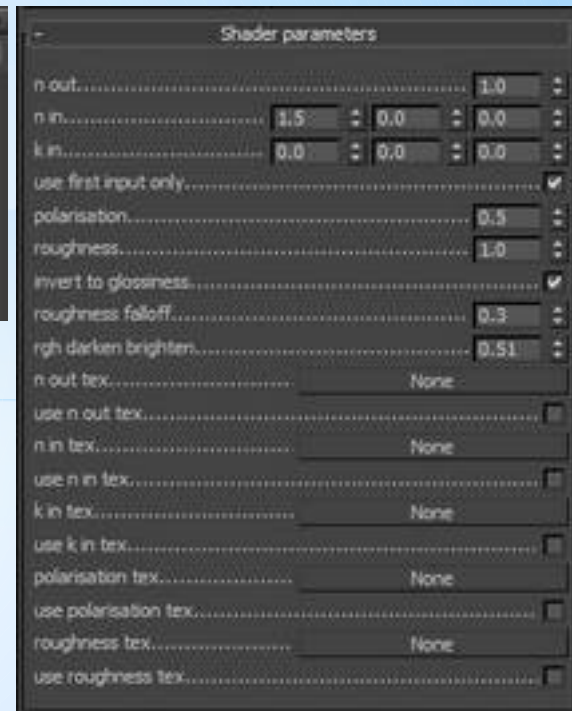
3. Разделение на металлы и неметаллы (диэлектрики)

3.2 Металлы

f. Complex Fresnel



Arnold



OSL Shader для V-Ray

<http://www.rensheeren.com/blog/osl-reflector/>

Физика для (3D) художников

3. Разделение на металлы и неметаллы (диэлектрики)

3.2 Металлы

g. Artistic Friendly Metallic Fresnel



Material	Reflectivity and Edgetint	Render
Gold		
Copper		
Silver		
Aluminium		
Unobtainium		

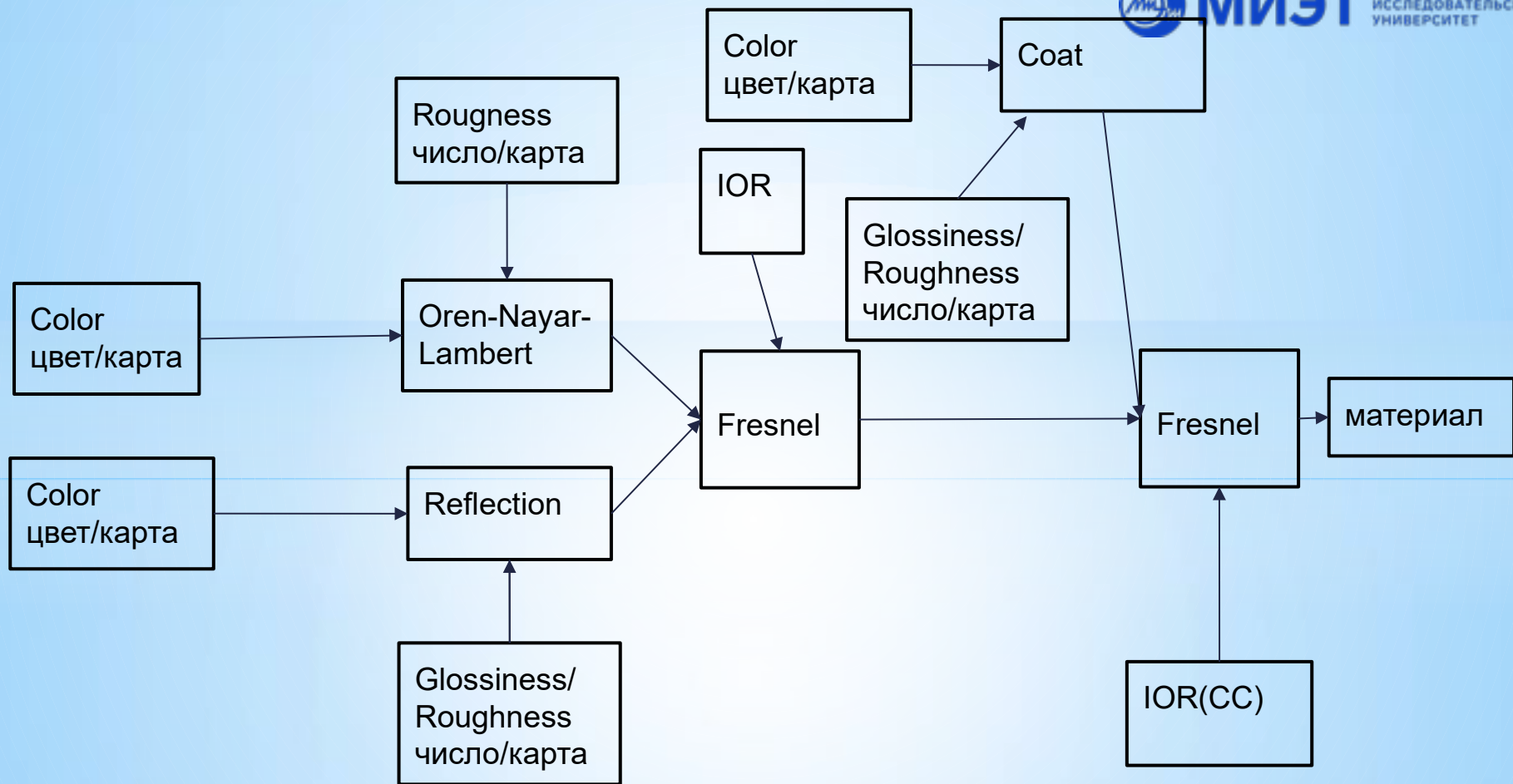
		Base Color		Specular Color
Aluminium (Al)		0.912 0.914 0.920		0.970 0.979 0.988
Copper (Cu)		0.926 0.721 0.504		0.996 0.957 0.823
Gold (Au)		0.944 0.776 0.373		0.998 0.981 0.751
Iron (Fe)		0.531 0.512 0.496		0.571 0.540 0.586
Lead (Pb)		0.632 0.626 0.641		0.803 0.808 0.862
Mercury (Hg)		0.781 0.779 0.779		0.879 0.910 0.941
Nickel (Ni)		0.649 0.610 0.541		0.797 0.801 0.789
Platinum (Pt)		0.679 0.642 0.588		0.785 0.789 0.784
Silver (Ag)		0.962 0.949 0.922		0.999 0.998 0.998

Поверхностная прозрачная пленка
(Clear Coat)



Тонкая радужная пленка
(Thin Film)

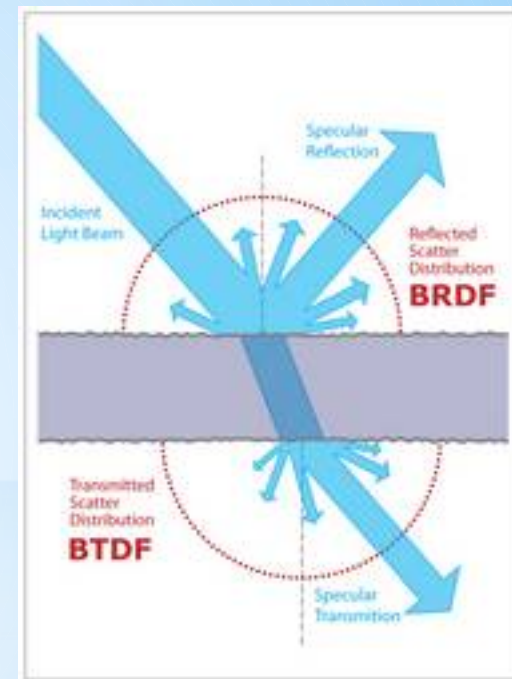




Прозрачность

В чем сложности?

1. Рассеяние (Glossiness/Roughness)
2. Поглощение (Absorption)
3. Дисперсия
4. Подповерхностное рассеивание (SubSurface Scattering)



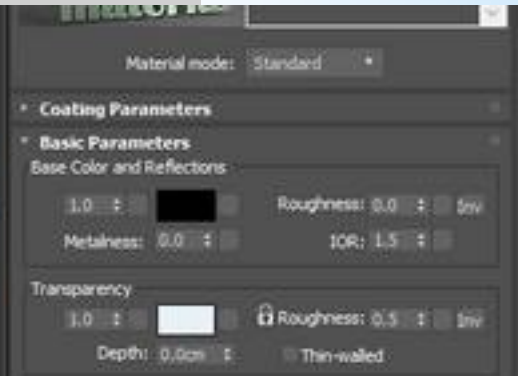
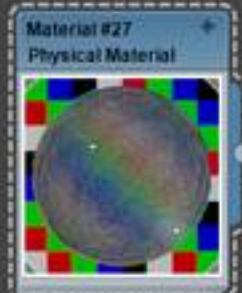
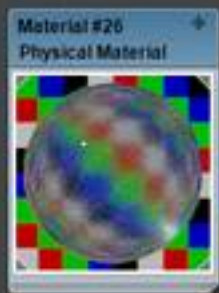
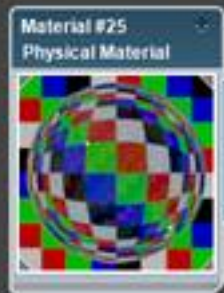
BSDF
bidirectional scattering
distribution function

Прозрачность

1. Рассеивание (Glossiness/Roughness)



Правый чайник темнее?



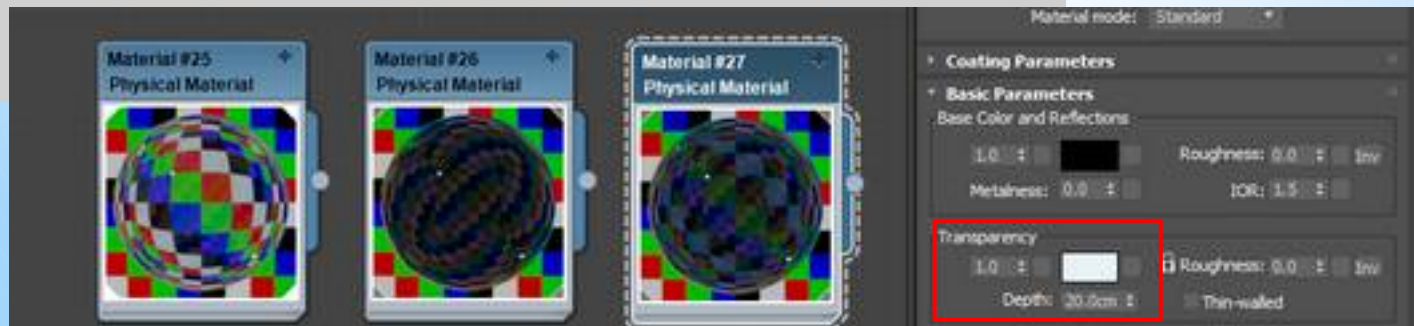
Microfacet Models for **Refraction**
through Rough Surfaces
<https://www.cs.cornell.edu/~srm/publications/EGSR07-btdf.pdf>

Прозрачность

2. Поглощение (Absorption)



У левого чайника поглощение отключено, равномерное окрашивание.



Прозрачность

3. Дисперсия (Dispersion).

Abbe number определяет дисперсию, чем меньше - тем сильнее.



Optical constants of CDGM - F (Flint)
F5

Wavelength: μm (0.365)

Refractive index

$n = 1.6243$

Derived optical constants

Abbe number
 $V_d = 35.93$
[Abbe diagram](#)

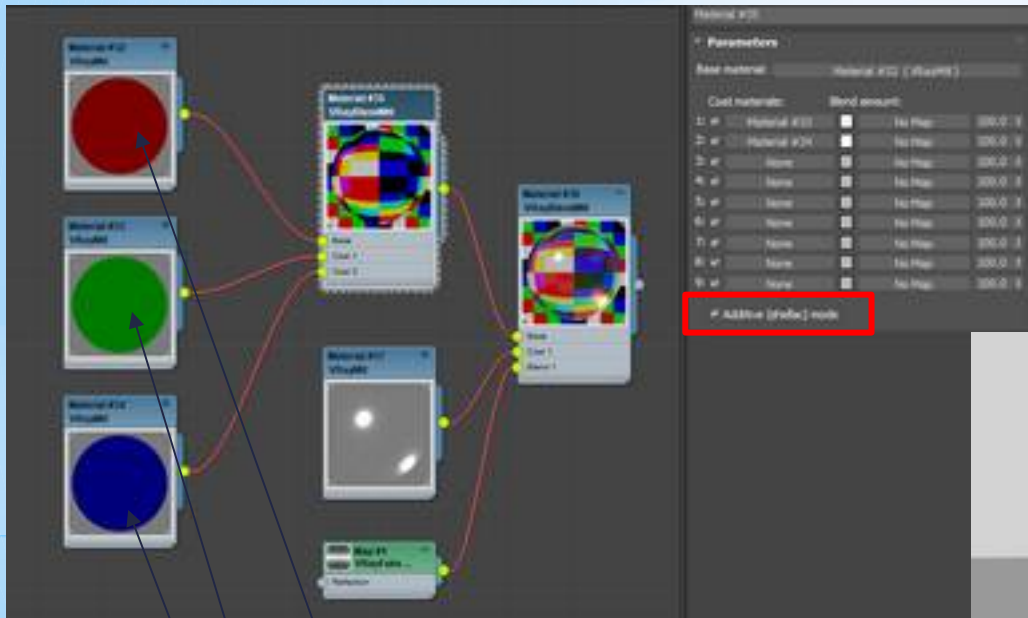
Chromatic dispersion
 $dn/d\lambda = -0.088128 \mu\text{m}^{-1}$

Group index
 $n_g = 1.6761$

Идеальное стекло и очень плохие стекла - abbe 2 и 4

Прозрачность

3. Дисперсия (Dispersion). “Кастомная”)



IOR 1.6, 1.5, 1.4



Прозрачность

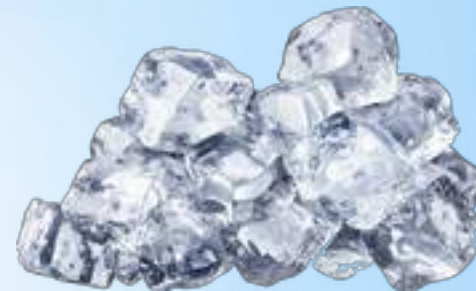
4. Подповерхностное рассеивание (SubSurface Scattering)



Простые: Воск



Мрамор



Лёд

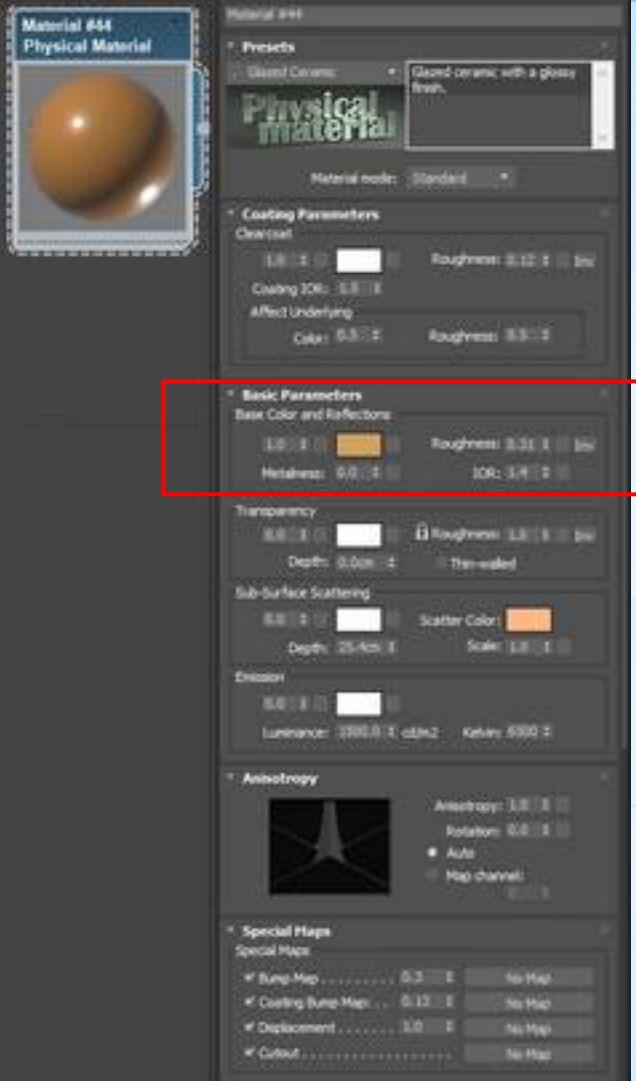
Непростое:
КОЖА





КТО МОЛОДЕЦ?
Я МОЛОДЕЦ!

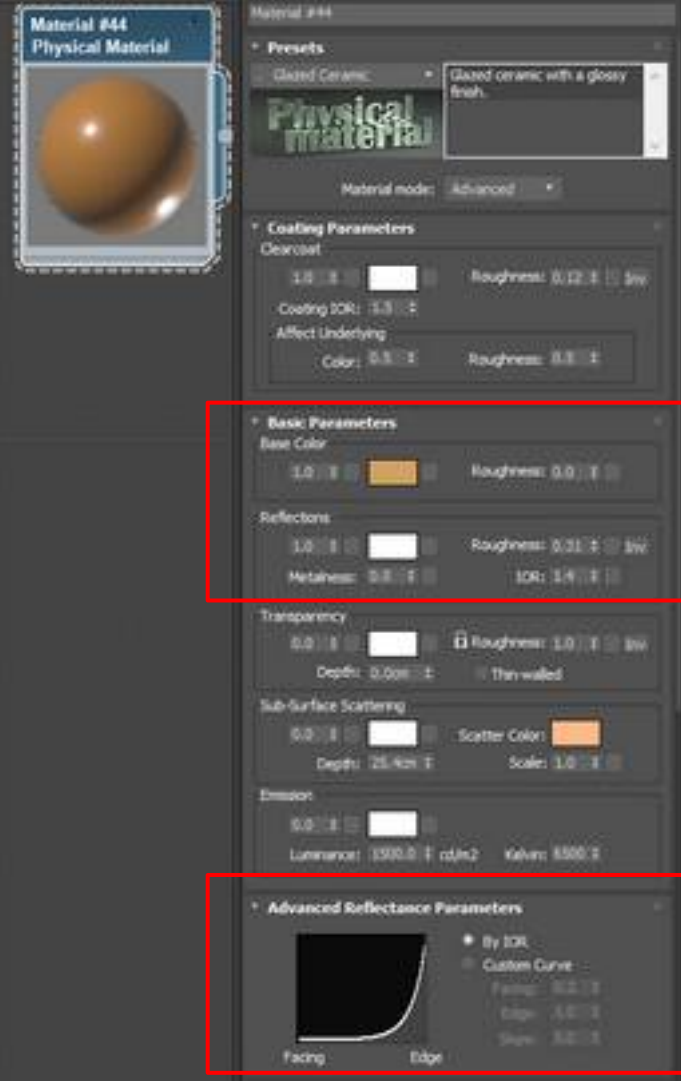
Только есть одно “но...”
Передача данных



Physical Material почти идеал...

Standard

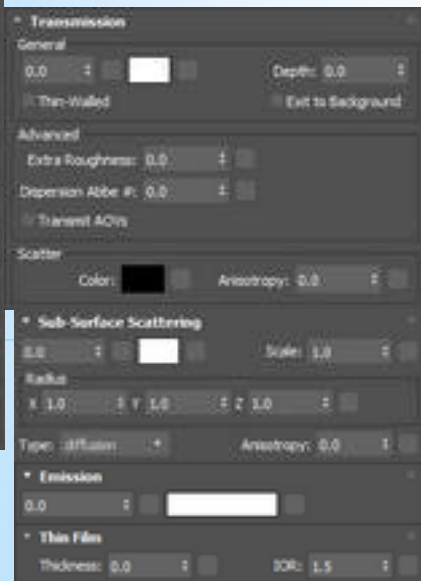
Advanced



Поэтому разрабатываются Uber Shaders

Arnold для 3ds Max

RedShift3D для 3ds Max



Сканированные материалы — уже настоящее!

Appearance Exchange Format (AxF™) от X-Rite

