

---

## Визуализация 3М сцен

Real



Simulated



Будак Владимир Павлович,

НИУ «МЭИ»

кафедра светотехники

---

☐: +7 (495) 763-5239

[BudakVP@mpei.ru](mailto:BudakVP@mpei.ru)



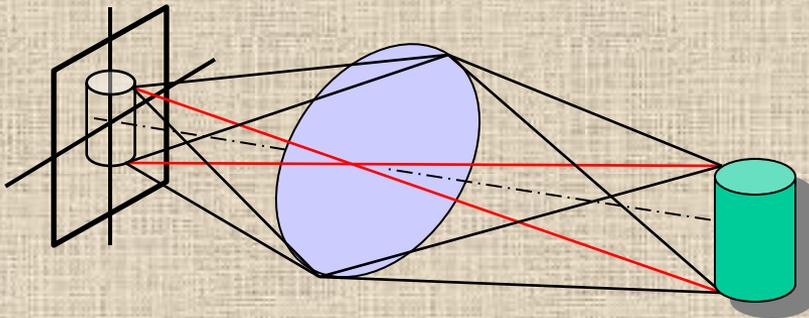
# Реалистическое изображение



- реалистическое воспроизведение = восприятие реального объекта глазом
- механизм восприятия глазом человека изучен весьма приблизительно
- мы уверенно судим о незнакомых объектах по фотографии
- фотореалистическое изображение = фотография объекта



## Центральная (перспективная) проекция



XI век – Абу Али аль-Хайсам (Альгазен)

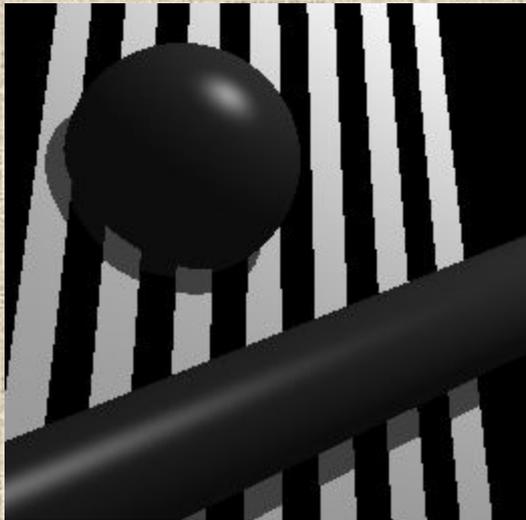
- двумерное пространство (2М) изображения на экране
- трехмерное пространство (3М) объектов визуализации

$$E = \frac{\pi O^2}{4} L$$

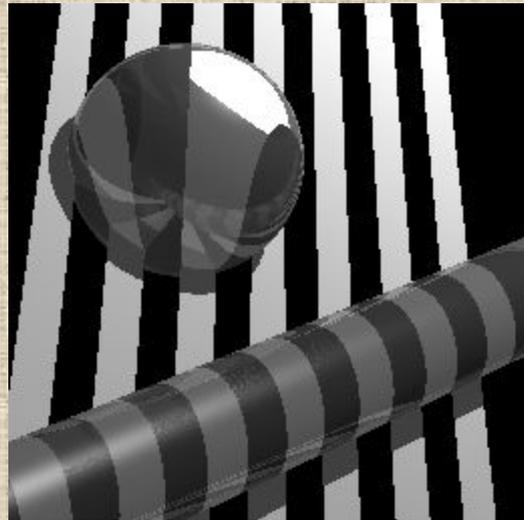
*Компьютерная графика – визуализация распределения яркости объектов в трехмерном пространстве*

# Роль многократных переотражений

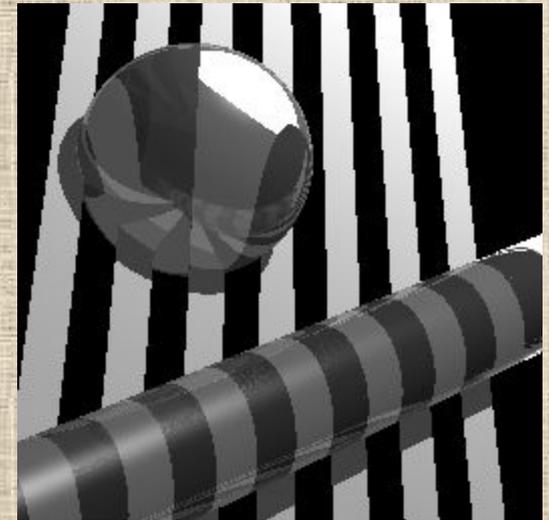
Однократное  
отражение



8 кратностей  
переотражений



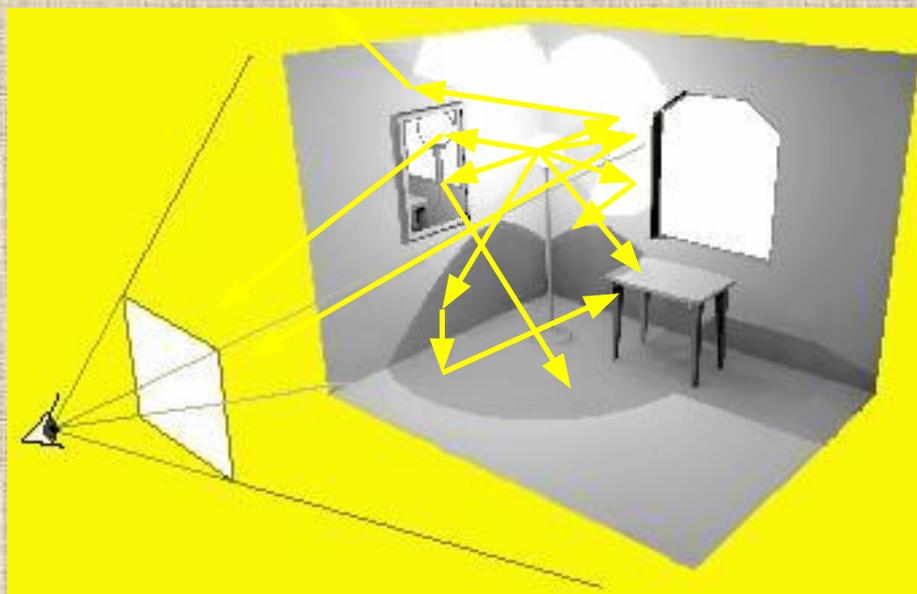
64 кратности  
переотражений



- *Локальное освещение* (local illumination) - полное пренебрежение эффектами переотражений поверхностями освещаемых объектов
- *Глобальное освещение* (global illumination) - включает все возможные акты переотражений и пропускания света объектами

*Банальности повседневной жизни - сложнейшая  
математическая задача*

# Глобальное освещение

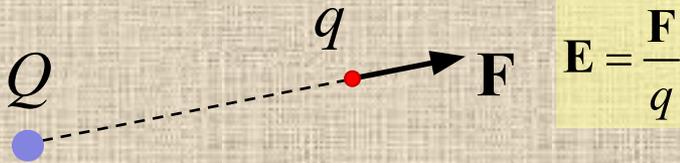


- Изменяется содержание всех фотометрических понятий:
  - Светимость – поверхностная плотность светового, излучаемого поверхностью
  - Но в нашем случае все фотометрические величины в случае многократных переотражений связаны не только с самосвечением объектов, но и отражением
  - Любое изменение в сцене (перестановка объектов, удаление или внесение новых) приводит к изменению яркости и светимости выделенной точки поверхности
- Однако с точки зрения визуализации нам и не существенна яркость поверхностей объектов сцены, нам, по сути, важна распределение яркости на входном зрачке объектива
  - Поскольку положение камеры может меняться, и в общем случае мы хотели бы иметь визуализацию сцены при любом положении камеры, то нам надо знать поле яркости в произвольной точке сцены

*Глобальное освещение (все эффекты) требует уточнения объектов – трехмерная сцена наблюдения*

# Световое поле

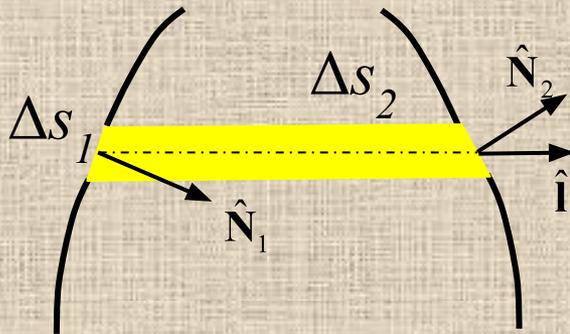
А.А.Гершуна «Световое поле»: световое поле – область пространства, исследуемого с целью изучения процессов переноса световой энергии



$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

## Оптический приемник:

- квадратичный относительно поля
- размеры  $\gg \lambda$
- постоянная времени  $\gg T$



$$\Delta\Phi \approx L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) \frac{\Delta s(\mathbf{r}_1)(\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}_1), \hat{\mathbf{i}})\Delta s(\mathbf{r}_2)(\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}_2), \hat{\mathbf{i}})}{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2} = L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})\Delta\hat{\mathbf{i}}\Delta\sigma_2, \quad \hat{\mathbf{i}} = \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$



$$\Delta E(\mathbf{r}) = \int_{\Delta\Omega} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{i}})d\hat{\mathbf{i}} \xrightarrow{\Delta\Omega \rightarrow 0} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{i}})\Delta\Omega \Rightarrow L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{i}}) \approx \frac{\Delta E_N(\mathbf{r})}{\Delta\Omega}$$



Графически в каждой точке поля можно изобразить некоторую поверхность значений яркости от направлений – тело яркости

# Иерархия физических моделей света

Квантовая  
электродинамика

Язык операторов рождения и уничтожения фотонов –  
общая теория, наиболее удаленная от эксперимента

Количество фотонов  $\gg 1$

Волновая  
оптика

Напряженности и индукции электрического и  
магнитного полей – уравнения Maxwell +  
материальные уравнения = волновое уравнение

Длина волны  $\lambda \rightarrow 0$

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

Лучевое  
приближение

$(\nabla \phi)^2 = n^2 \Rightarrow \frac{d}{ds} (n \hat{\mathbf{l}}) = \nabla n$  - уравнения эйконала и луча

$$(\hat{\mathbf{l}}, \nabla) L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \varepsilon L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = \frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi} \int_{\Gamma} \chi(\hat{\mathbf{l}}', \hat{\mathbf{l}}) L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}') d\hat{\mathbf{l}}' + Q(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) \quad - \text{УПИ}$$

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = \frac{(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{N}})}{\lambda^2} \int \Gamma(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) e^{ik\hat{\mathbf{l}}\boldsymbol{\rho}} d^2\rho, \quad \Gamma(\mathbf{r}, \boldsymbol{\rho}) = \left\langle E(\mathbf{r} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}) E^*(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\rho}) \right\rangle$$

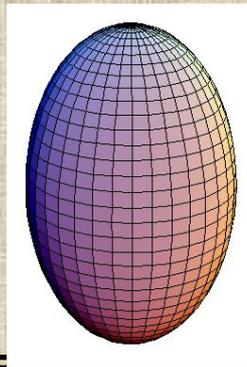
# Лучевая модель светового поля

- Поле состоит из лучей, как вещество из атомов
- Вдоль луча перетекает световая энергия с мощностью  $L(\mathbf{r}, \mathbf{l})$

$$\begin{aligned} H_N(\mathbf{r}) &= \iiint L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) d\hat{\mathbf{l}} \\ &= \int_{(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) \geq 0} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) d\hat{\mathbf{l}} - \int_{(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}}) < 0} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})|(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{l}})| d\hat{\mathbf{l}} \\ &\equiv E_+(\mathbf{r}) - E_-(\mathbf{r}) = |\mathbf{E}(\mathbf{r})| \end{aligned}$$

$$E_0(\mathbf{r}) \equiv cu(\mathbf{r}) = \iiint L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) d\hat{\mathbf{l}}$$

Тело яркости



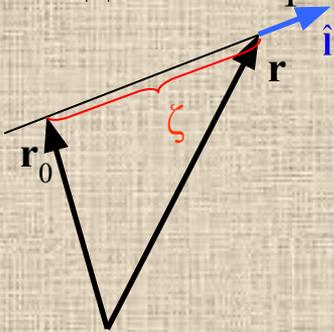
*Процесс переноса энергии в модели светового поля происходит в пятимерном фазовом пространстве  $(\mathbf{r}, \mathbf{l})$*

# Уравнение переноса излучения (УПИ)

$$(\hat{\mathbf{l}}, \nabla)L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = -\varepsilon L + \frac{\Lambda \varepsilon}{4\pi} \oint \chi(\hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}') d\hat{\mathbf{l}}' + Q(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}), \quad \frac{d}{dl} = (\hat{\mathbf{l}}, \nabla), \quad \Lambda = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Среда чисто поглощающая ( $\Lambda=0$ ,  $\varepsilon=\kappa$ ) и без источников излучения  $Q(\mathbf{r})=0$ .

Тогда УПИ примет вид



$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}} \Rightarrow \frac{dL(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}})}{d\xi} = -\kappa(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}) L(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}})$$

Откуда имеем закон Bouguer

$$\left\{ -\int_0^\xi \kappa(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}) d\xi \right\}$$

Если среда однородная  $\kappa \neq \kappa(\mathbf{r})$ , то закон Bouguer принимает вид

$$L(\mathbf{r}_0 + \xi \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}) = L(\mathbf{r}_0, \hat{\mathbf{l}}) e^{-\kappa \xi} \xrightarrow{\kappa=0} L(\mathbf{r}_0, \hat{\mathbf{l}})$$

*Возьми три зеркала, и два сначала Равно отставь, а третье вдаль попять, Чтобы твой взгляд оно меж них встречало... Хоть по количеству не столь обилен Далекий блеск, он яркостью своей Другим, как ты увидишь, равносилен. (Д.Алигьери «Божественная комедия», Рай, Песнь 2: 97)*

