Сегодня: вторник, 12 ноября 2013 г.

Лекция 7

Оптика

Содержание лекции:

- Световая волна
- Геометрическая оптика
- Световой поток
- Фотометрия

1. Световая волна

Корпускулярно-волновой дуализм: свет в некоторых явлениях обладает свойствами, присущими частицам (корпускулярная теория), в других – свойства, присущие волнам (волновая теория).

Будем рассматривать <u>свет как электромагнитные волны</u>:

под ***световым вектором*** понимается вектор напряженности электрического поля $\vec{E}$ (именно его колебаниями обусловлено физиологическое, фотохимическое и т.д. действие света).

<u>Для плоской волны:</u>

$$\boxed{E = E_0 \cos\left(\omega t - kx + \varphi\right)}$$

<u>Для сферической волны:</u>

$$\boxed{E = \frac{E_0}{r} \cos\left(\omega t - kr + \varphi\right)}$$

E_0 – амплитуда;

r – расстояние до источника (x – в случае плоской волны);

k – волновое число;

φ – начальная фаза.

Отношение скорости световой волны в вакууме к фазовой скорости в некоторой среде называется ***абсолютным показателем преломления среды***:

$$\boxed{n = \frac{c}{v}}$$

Поскольку

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Получаем

$$\boxed{n = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx \sqrt{\varepsilon}}$$

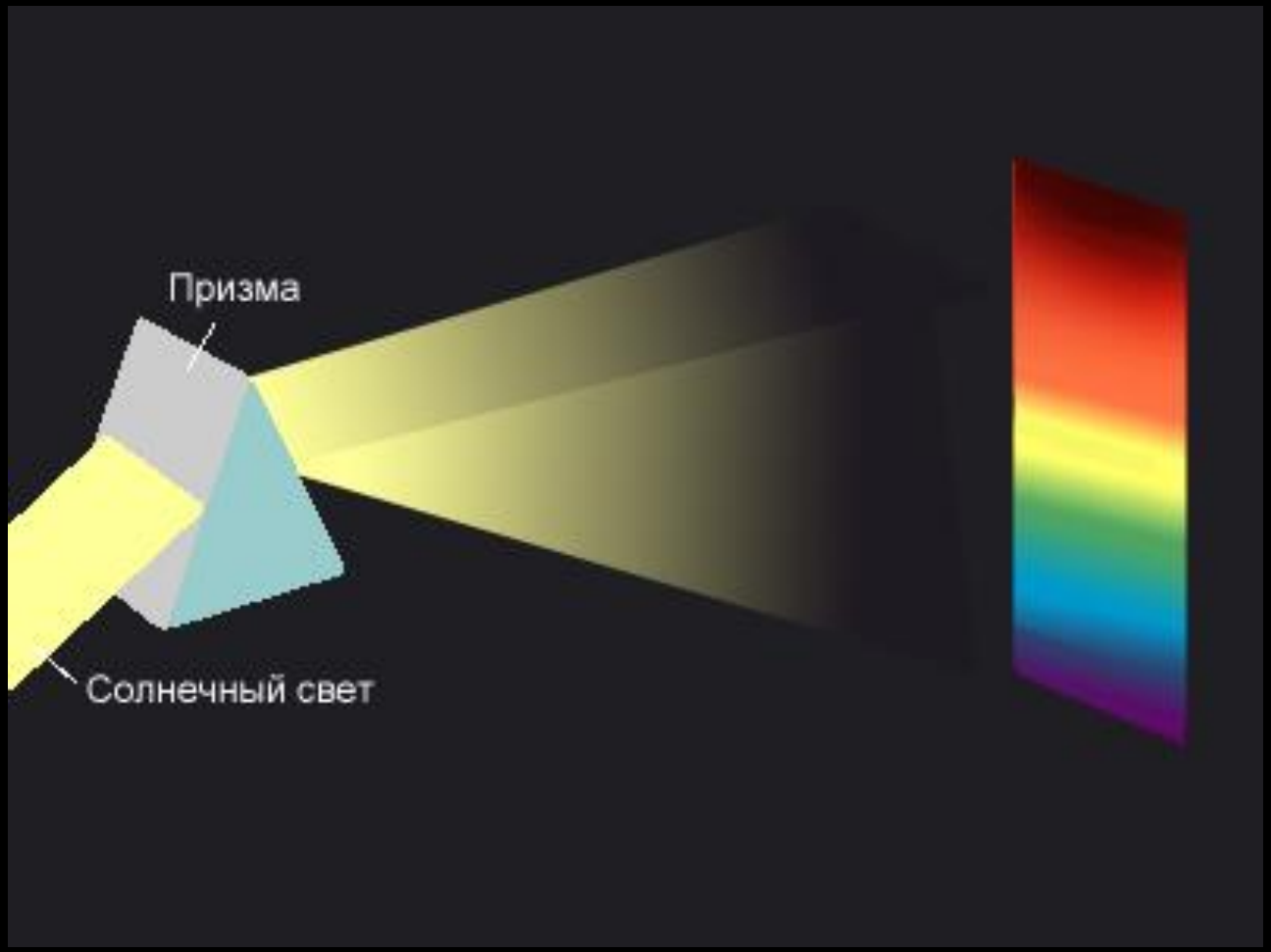
- для большинства прозрачных сред ($\mu \approx 1$)

Значение *n* определяет ***оптическую плотность среды***:

оптически более плотная среда – *среда с бóльшим* n;
оптически менее плотная среда – *среда с меньшим* n.

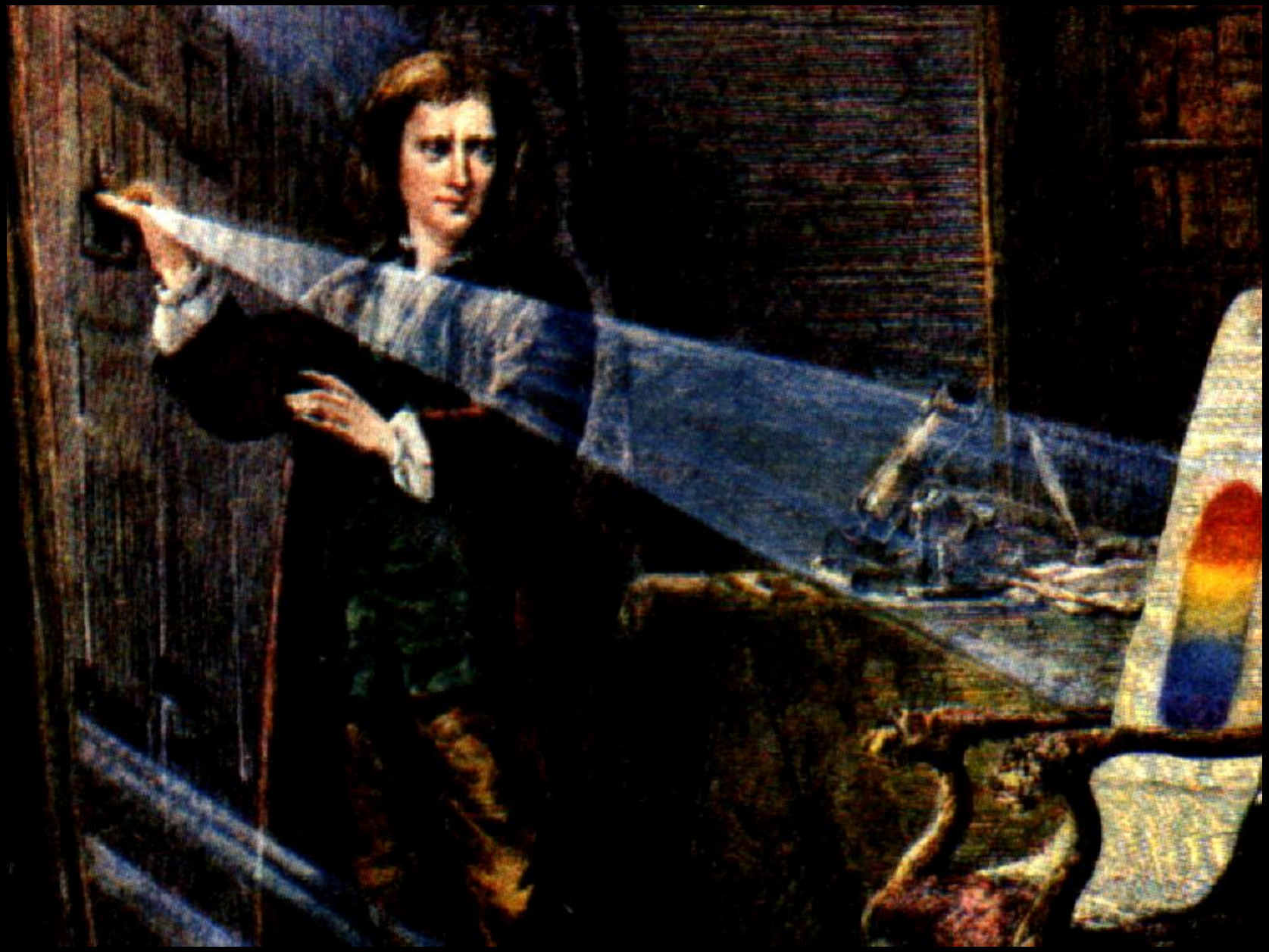
Дисперсия света *– зависимость показателя преломления (или скорости света) от частоты (или длины волны).*

Разложение светового пучка на спектральные составляющие вследствие дисперсии света на стеклянной призме



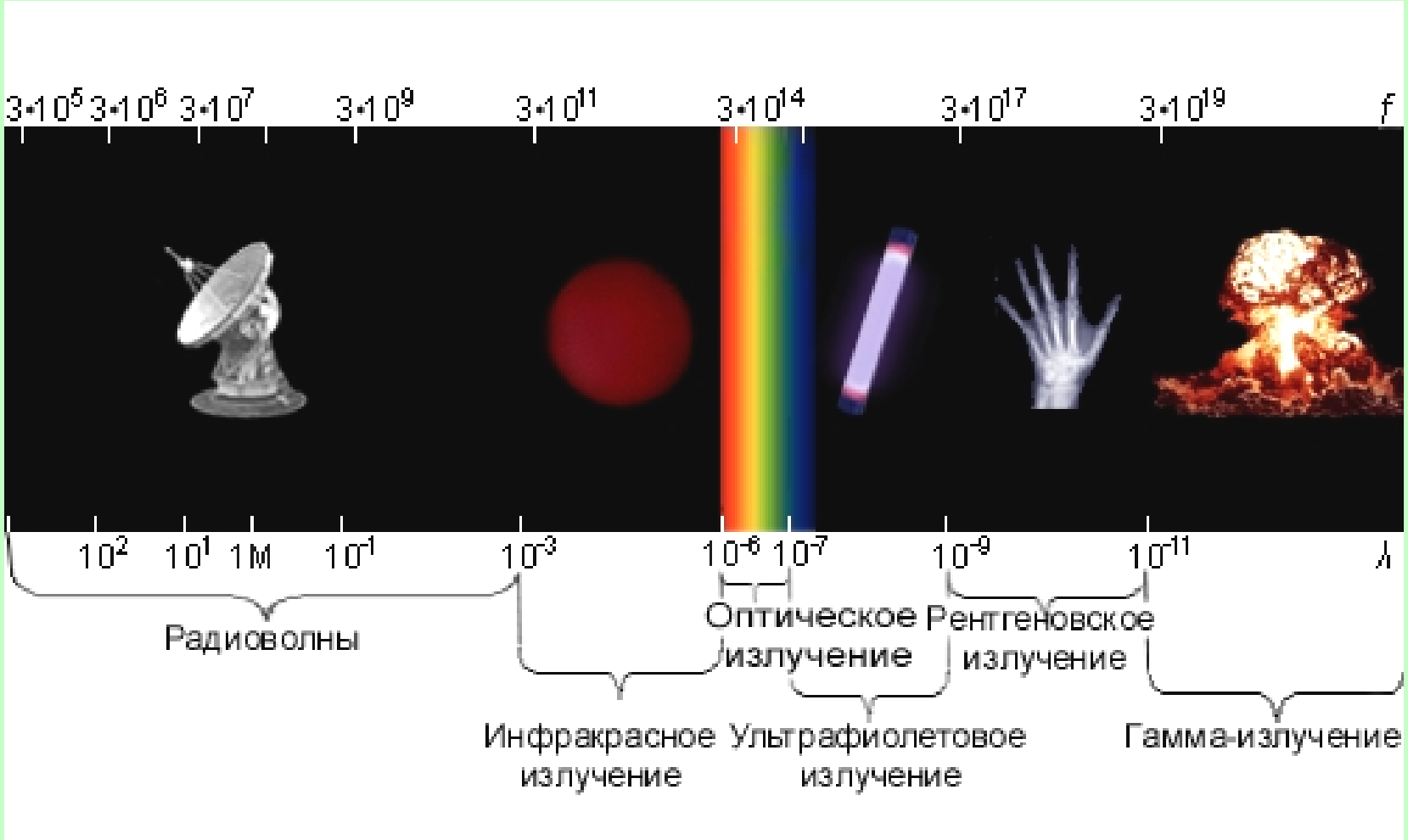
С П Е К Т Р

spectrum (лат.) - ви́дение.

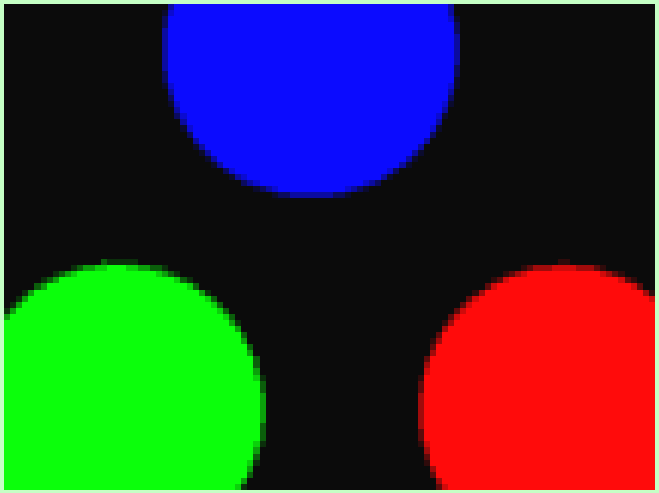


Эксперимент И. Ньютона

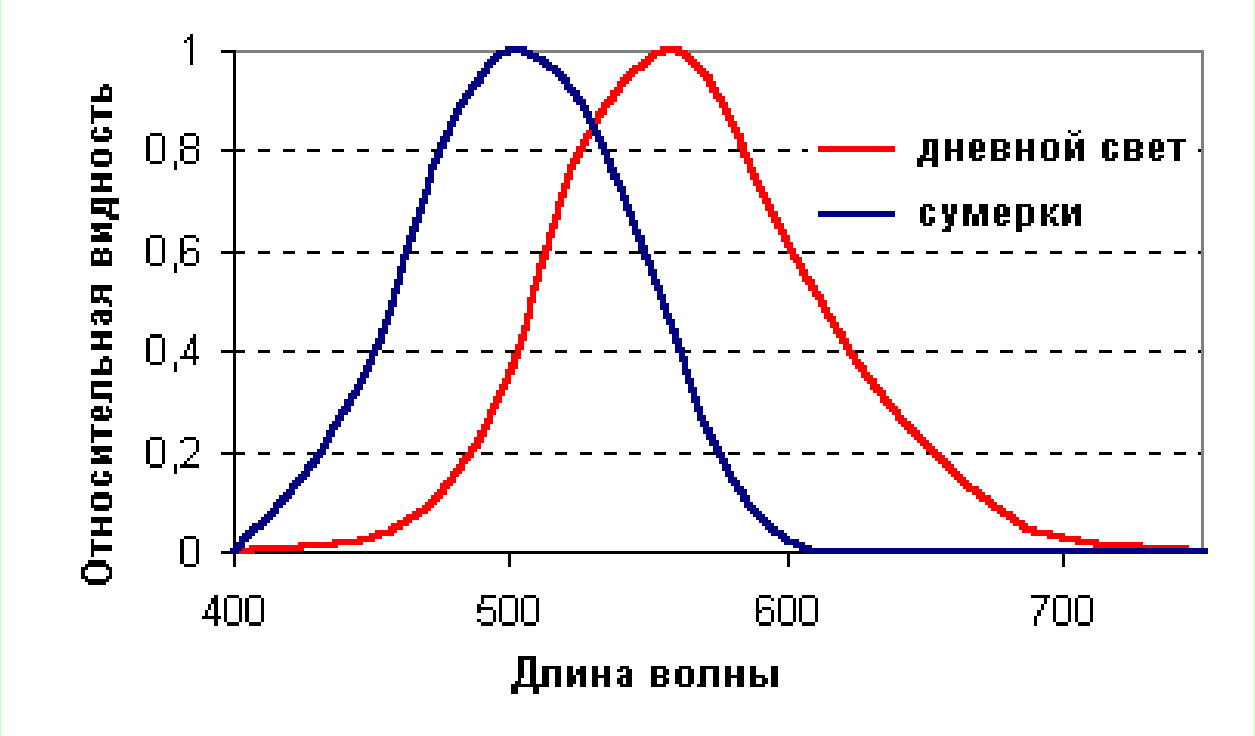
Шкала электромагнитных волн



Видимый свет (в вакууме): λ = [400 (фиолетовый);
760 нм (красный)]

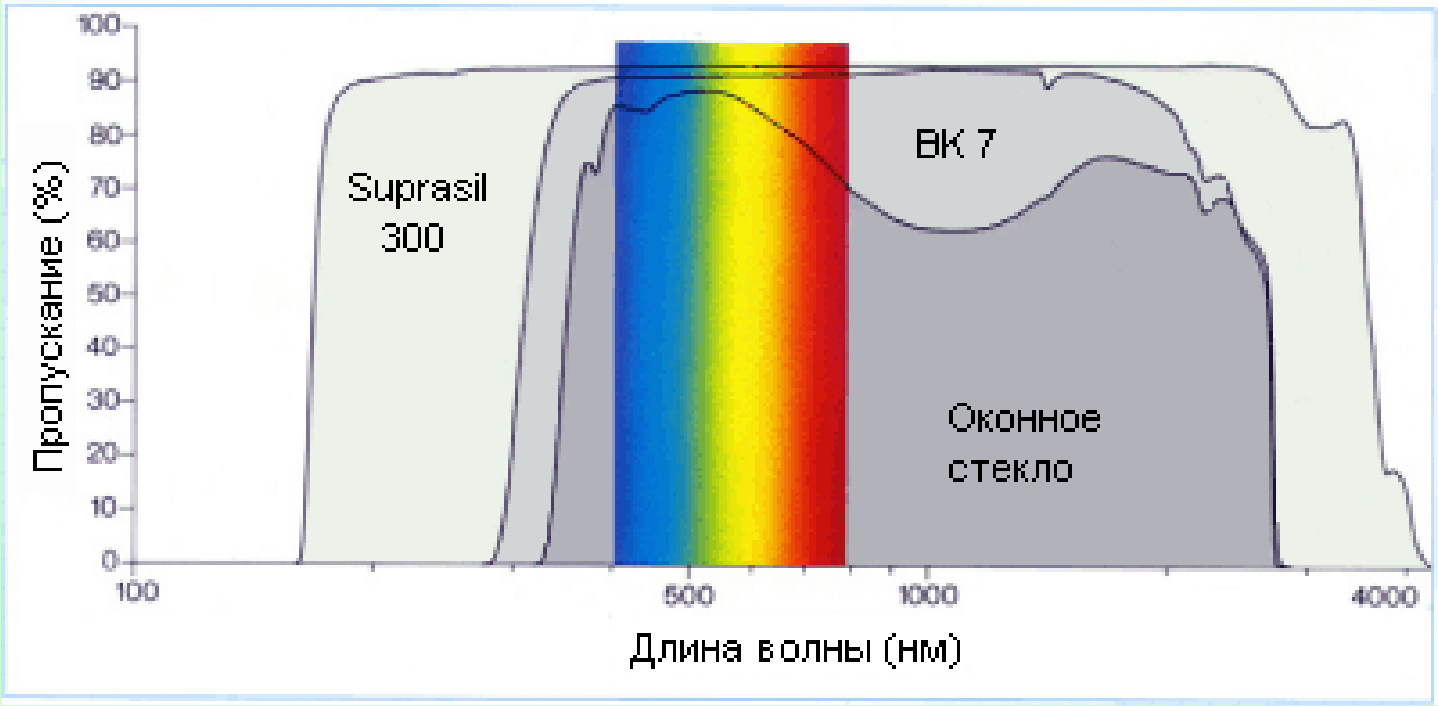


Согласно ***теории цветового зрения*** Юнга - Гельмгольца ощущение любого цвета можно получить смешиванием спектрально чистых излучений красного, зеленого и синего цветов



Относительная спектральная чувствительность глаза к излучениям различных длин волн (**кривая видности**):

- максимальная чувствительность глаза при дневном свете - на длине волны **555 нм**,
- при сумеречном свете - на длине волны **510 нм**.



Спектр оптического пропускания синтетического кварцевого стекла Suprasil 300, оптического стекла ВК 7 и обычного стекла.

(кварцевое стекло вследствие малого количества примесей обладает чрезвычайно широким спектром пропускания и малым поглощением света (обычное оконное стекло поглощает столько же света, сколько и кварцевое стекло толщиной в 100 метров)).

Интенсивность света *– модуль среднего по времени значения плотности потока энергии, переносимой световой волной*:

$$\boxed{I = \left|\left\langle \vec{P} \right\rangle\right| = \left|\left\langle \left[\vec{E}, \vec{H}\right] \right\rangle\right|}$$

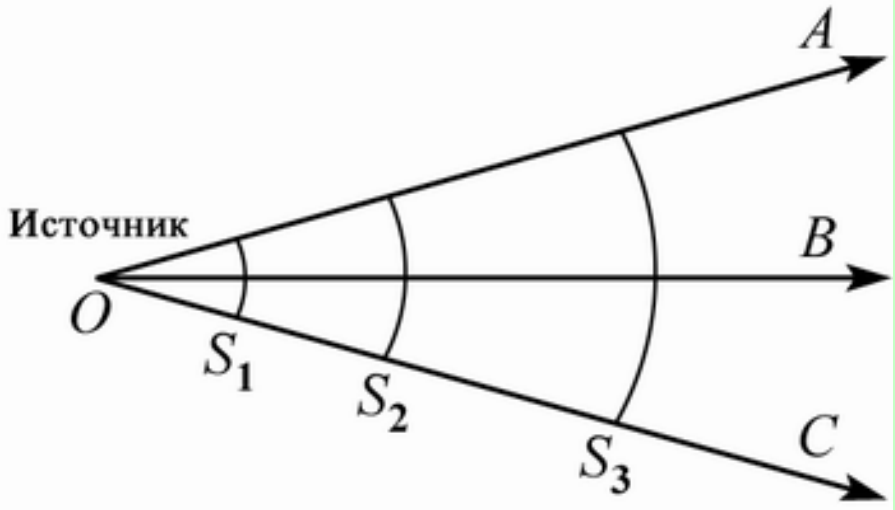
$\vec{P}$ – вектор Пойнтинга

Можно показать, что ($\mu = 1$)

$$\boxed{I = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} n E_0^2 \sim n E_0^2}$$

В случае <u>однородной среды</u> (*n* = const) интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды световой волны

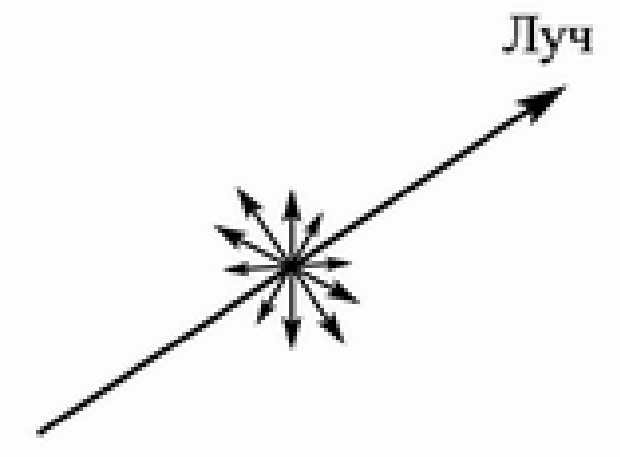
***Луч** – линия, вдоль которой распространяется световая волна.*



• В <u>изотропных средах</u> лучи перпендикулярны к волновым поверхностям

• В <u>анизотропных средах</u> лучи не ортогональны волновым поверхностям

В естественном свете *колебания светового вектора совершаются во всех направлениях, перпендикулярных к лучу.*



Излучение тела обусловлено волнами, <u>испускаемыми его атомами</u>:

длительность излучения атома ~ 10^{-8} с, за это время образуется ***цуг волн*** (набор горбов и впадин) длиной ~ 3м.

Плоскость колебаний каждого цуга ориентирована <u>случайным образом</u>.

В результирующей волне (суперпозиции цугов от разных атомов) <u>все направления равновероятны</u>.

• ***Поляризованным*** называется свет, в котором направления светового вектора упорядочены каким-либо образом:

• в ***плоско- (линейно) поляризованном*** свете колебания светового вектора лежат только в одной плоскости, проходящей через луч

• ***эллиптически поляризованный свет***: конец светового вектора описывает эллипс

• ***поляризованный по кругу свет***: конец светового вектора описывает окружность.

2. Геометрическая оптика

Геометрическая оптика – раздел оптики, в котором пренебрегают конечностью длин волн ($\lambda \to 0$).

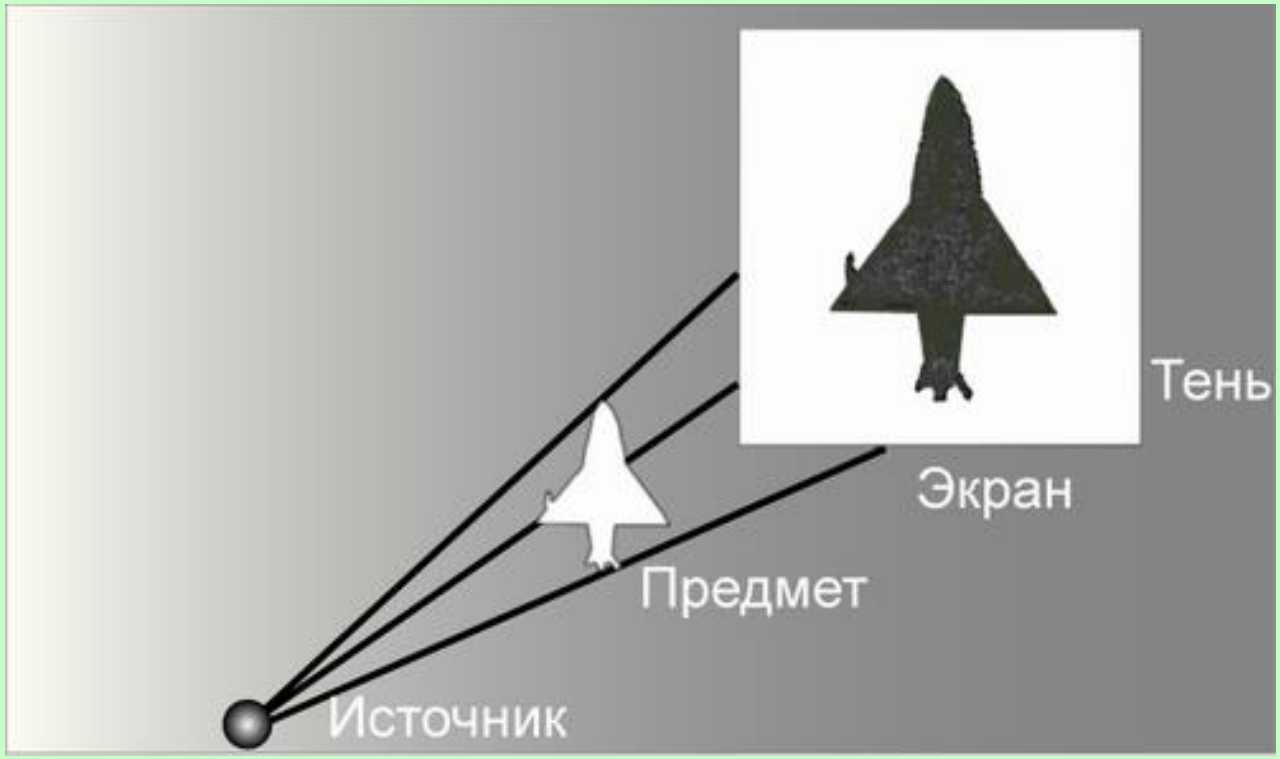
(в силу малости длин волн видимого диапазона можно отвлечься от волновой природы света, и распространение света рассматривать с точки зрения геометрии)

<u>В основе геометрической оптики лежат **4 закона**</u>:

1. ***Закон прямолинейного распространения света****: в прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно.*

<u>Отступления от закона наблюдаются при</u>:

- огибании светом препятствий (дифракция)
- прохождении в мутной среде (туман): свет рассеивается (дифракция)

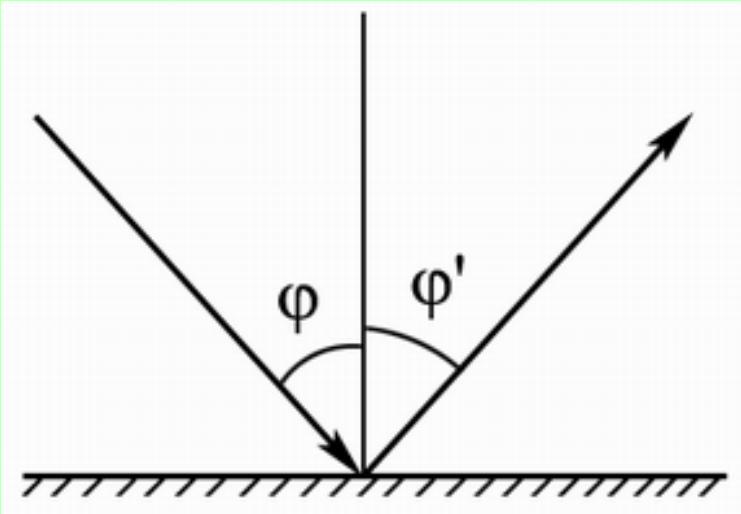


Тень, отбрасываемая предметом, обусловлена прямолинейностью распространения световых лучей в оптически однородных средах

***2. Закон независимости световых лучей**: лучи при пересечении не возмущают друг друга*

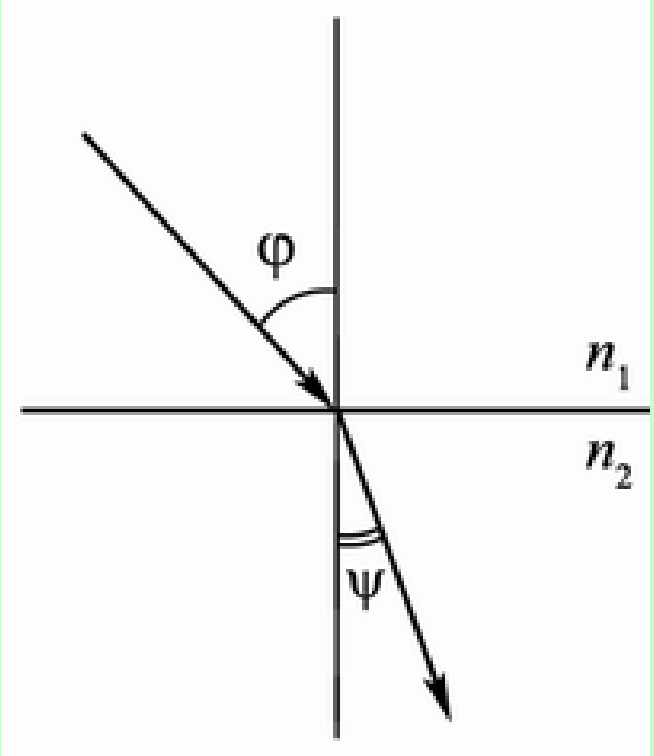
(<u>справедлив при небольших интенсивностях света</u>)

***3. Закон отражения света**: отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения (плоскость называется **плоскостью падения**); <u>угол падения равен углу отражения</u>.*



$$\boxed{\varphi = \varphi'}$$

4. Закон преломления света: *преломленный луч лежит в плоскости падения; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для рассматриваемых сред зависит только от длины световой волны, но не зависит от угла падения*.



$$\boxed{\frac{\sin\varphi}{\sin\psi} = n_{12}}$$

n_{12} – ***относительный показатель преломления*** *второй среды относительно первой, равный отношению их абсолютных показателей преломления:*

$$\boxed{n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}}$$

При переходе из оптически <u>более плотной среды в менее плотную</u> ($n_{12} < 1$) **преломленный луч не возникает** (т.к. $\sin\psi > 1$), **а свет отражается полностью** – ***явление полного внутреннего отражения*** (*свет проникает во вторую среду на расстояние порядка λ и возвращается в первую среду*).

Данное явление возникает при

$$\varphi \geq \varphi_{\text{пред}}, \quad \text{где} \quad \boxed{\sin\varphi_{\text{пред}} = n_{12}}$$

<u>При нормальном падении на границу раздела двух прозрачных сред:</u>

Коэффициент отражения

$$\boxed{k = \left(\frac{n_{12} - 1}{n_{12} + 1}\right)^2}$$

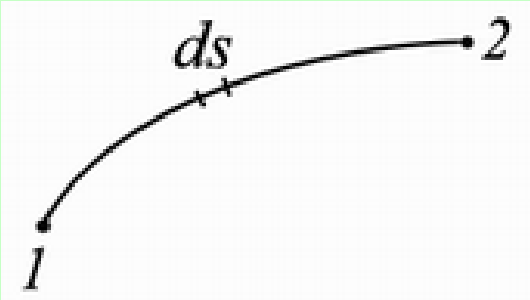
Коэффициент пропускания

$$\boxed{\tau \equiv 1 - k = n_{12}\left(\frac{2}{n_{12} + 1}\right)^2}$$

Введем понятие **оптической длины пути**:

При прохождении между точками *1*, *2* в среде с показателем преломления *n* величина, равная

$$\boxed{L = \int_1^2 n \cdot ds}$$



называется ***оптической длиной пути***.

В случае однородной среды $\boxed{L = n \cdot s}$

- оптическая длина пути равна произведению геометрической длины пути на показатель преломления данной среды.

Время прохождения данного пути $\boxed{\tau = \dfrac{L}{c}}$

Отставание по фазе, возникающее на пути с оптической длиной L:

$$\boxed{\delta = \frac{L}{\lambda_0} 2\pi}$$

(λ_0 – длина волны в вакууме).

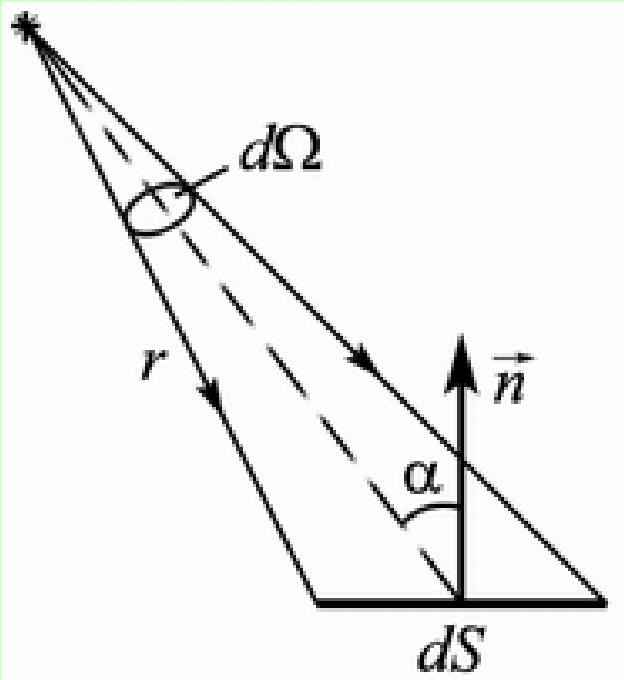
Введем понятие ***таутохронных*** путей: *пути света между двумя точками, требующие для своего прохождения одинакового времени.*

Законы *1*, *2*, *4* вытекают из ***принципа Ферма***:

- *свет при распространении из одной точки в другую выбирает путь, для прохождения которого ему требуется минимальное время.*
- *свет распространяется по такому пути, оптическая длина которого минимальна.*

Фотометрия

Будем рассматривать лучи, направления которых заполняют <u>конечные телесные углы</u>:



Энергия, переносимая этими лучами в единицу времени, называется ***потоком энергии (лучистым потоком),*** *проходящим через площадку dS в телесный угол dΩ.*

<u>Если нормаль к площадке *dS* образует с направлением излучения угол α</u>, то необходимо рассматривать ее проекцию – ***видимую величину площадки***, *если ее рассматривать под углом α к нормали*:

$$dS_{\perp} = dS\cos\alpha$$

С учетом зрительного (светового) ощущения, оцениваемого по действию света на глаз человека, вместо традиционных величин и единиц вводят **световые,** или **фотометрические** величины и единицы:

Силой света источника I *в заданном направлении* называется *световой поток, посылаемый им в этом направлении и отнесенный к единице телесного угла*.

Для точечного источника полный световой поток (интегрирование производится по полному телесному углу)

$$\boxed{\Phi = \int I \cdot d\Omega}$$

Единицы измерения: **[*I*] = кд (кандела)**

- Лучистый поток (Вт) можно рассматривать как световой поток, измеряемый в **люменах (лм)** с учетом ***световой эффективности*** *– числа люменов, соответствующего мощности в 1 Вт*.

- *Обратная величина называется* ***механическим эквивалентом света***.

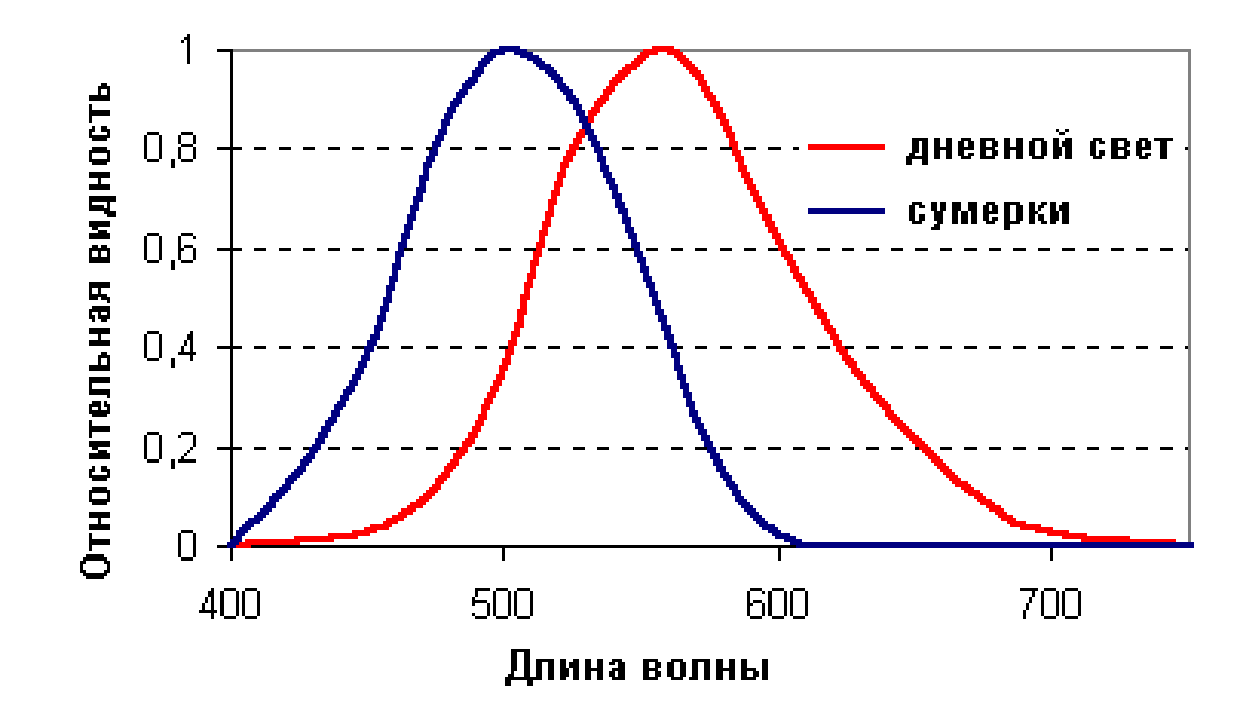
Для **λ = 555 нм** они, соответственно, равны

625 лм/Вт и **0,0016 Вт/лм**.

1 люмен – это световой поток, посылаемый источником с силой света в 1 канделу внутрь телесного угла в 1 стерадиан:

$$\mathbf{1\ лм = 1\ кд \cdot 1\ ср}$$

Для любой другой λ эти значения можно определить по **кривой видности** $V(\lambda)$:



т.е. <u>световому потоку в 1 лм</u>, образованному излучением с длиной волны λ соответствует <u>поток энергии</u>

$$\Phi_e = \frac{0,0016}{V(\lambda)} \text{ Вт}$$

Освещенностью E *некоторой поверхности называется световой поток, падающий на единицу площади освещаемой поверхности:*

$$\boxed{E = \frac{d\Phi}{dS}}$$ **, [*E*] = лк (люкс):** $1\ \text{лк} = \frac{1\ \text{лм}}{1\ \text{м}^2}$

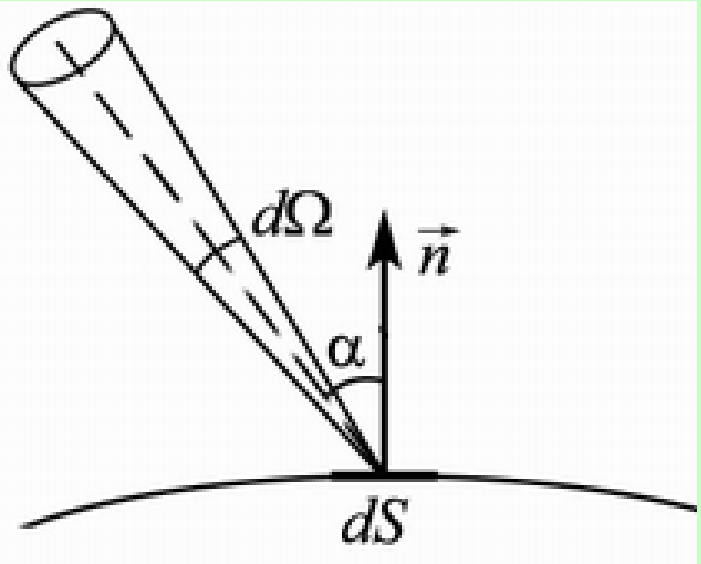
Можно показать, что для точечного источника

$$\boxed{E = \frac{I}{r^2}\cos\alpha}$$ ***- закон обратных квадратов.***

- *освещенность, создаваемая точечным источником, обратно пропорциональна квадрату расстояния до него* и прямо пропорциональна косинусу угла между направлением падающих лучей и нормалью к освещаемой поверхности.

Для протяженных источников вводятся следующие понятия:

- ***Яркостью L*** *называется световой поток, исходящий из площадки dS в заданном направлении, отнесенный к единице телесного угла и к единице ее* ***видимой величины****:*



$$L_\alpha = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos\alpha} = \frac{dI}{dS \cdot \cos\alpha}$$

где

$$dI = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

- сила света площадки *dS* в том же направлении

Источники, яркость которых одинакова по всем направлениям, называются ***ламбертовскими (косинусными)****:*

$$\mathbf{dI \sim \cos\alpha}$$

- ***Светимостью M*** *называется полный световой поток, посылаемый единицей светящейся поверхности* *<u>в одну сторону (в телесный угол Ω = 2π):</u>*

Световой поток с единицы поверхности в телесный угол $d\Omega$ равен

$$d\Phi = L_\alpha \cos\alpha \cdot d\Omega$$

Тогда

$$M = \int L_\alpha \cos\alpha \cdot d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} L_\alpha \cos\alpha \sin\alpha \cdot d\alpha$$

<u>Для **ламбертовских источников** (L = const):</u>

$$\boxed{M = \pi L}$$