

Оптика.

Лекция 2.
Фотометрия

Энергетические величины

Поток излучения

Поток излучения (лучистый поток) Φ_e – это величина энергии, переносимой полем

в единицу времени через данную площадку

Поток излучения измеряется в ваттах:

$$[\Phi_e] = \text{Вт}, \text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$$

Энергия зависит от спектрального состава света.

Если разложить поле

на монохроматические составляющие (каждая с определенной длиной волны), то вся энергия

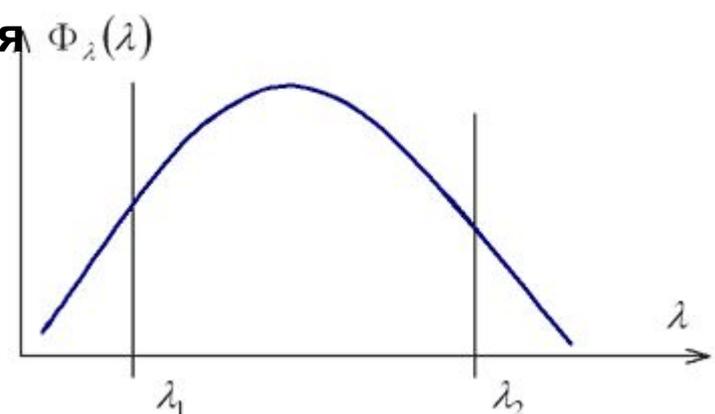
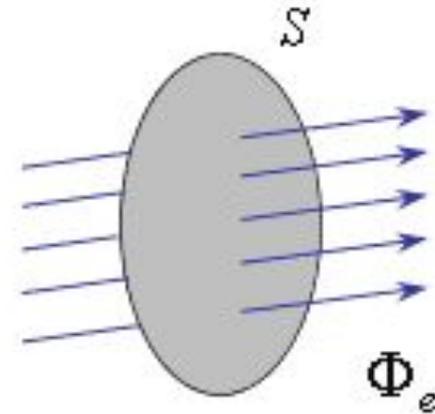
некоторым образом распределится между ними

Спектральная плотность потока излучения

$\Phi_\lambda(\lambda)$ – это функция, показывающая распределение

энергии по спектру излучения:

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \frac{\partial \Phi_e}{\partial \lambda} \quad \Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda$$



Поверхностная плотность потока энергии (освещенность, светимость)

Поверхностная плотность потока энергии

E_e – это величина потока, приходящегося на единицу

площади:

$$E_e = \frac{\nabla \Phi_e}{\partial S}, \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$$

Если площадка *освещается* потоком, то поверхностная плотность потока энергии

будет иметь смысл **энергетической освещенности** или **облученности** E_e .

Если поток *излучается* площадкой, то поверхностная плотность потока энергии

будет иметь смысл **энергетической светимости** M_e .
Спектральная плотность поверхностной плотности потока энергии показывает

распределение светимости или освещенности по спектру

излучения:
 $E_{e\lambda} = \frac{\partial E_e}{\partial \lambda}$

Сила излучения

Телесный угол данного конуса равен отношению площади поверхности, вырезанной

на сфере конусом, к квадрату радиуса сферы.

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad [sr]$$

Сила излучения (энергетическая сила света)

– это поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла, в пределах которого он распространяется:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad \left[\frac{Вт}{sr} \right]$$

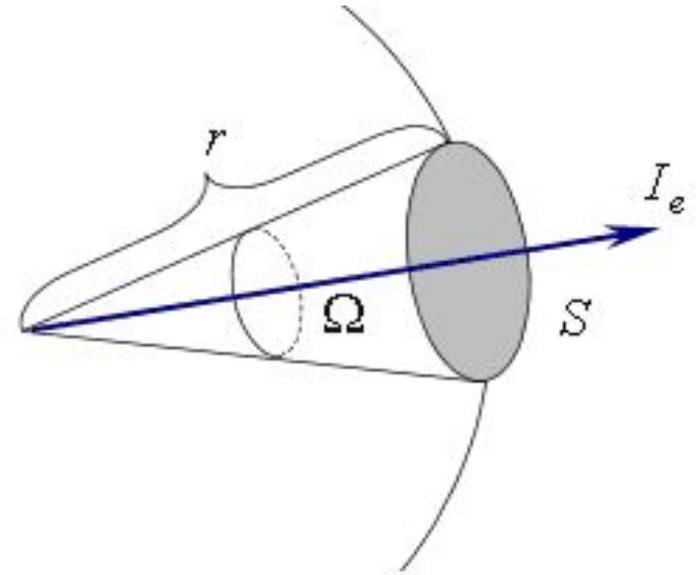
Энергетическая сила света – величина, имеющая направление. За направление силы

света принимают ось телесного угла, в пределах которого распространяется

поток излучения.

$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi}$ – средняя сферическая сила света для неравномерного потока

$I_{e\lambda} = \frac{\partial I_e}{\partial \lambda}$ – спектральная плотность силы излучения



Энергетическая яркость

Яркость является характеристикой протяженного источника, в то время как сила излучения является характеристикой [точечного источника](#).

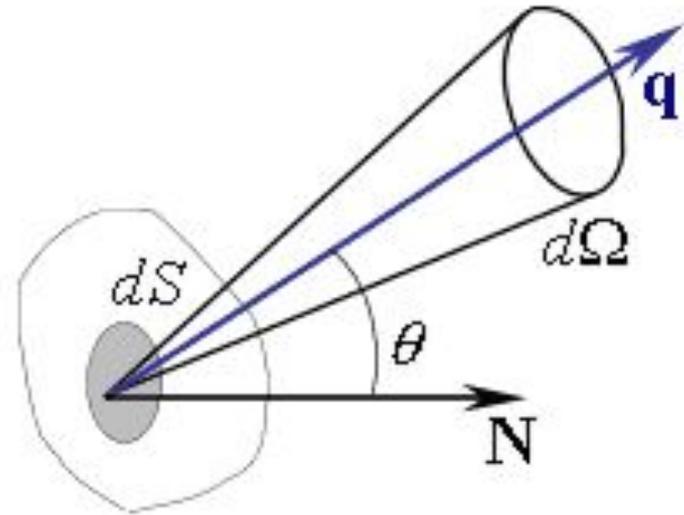
Энергетическая яркость – это величина потока, излучаемого единицей площади

в единицу телесного угла в данном направлении

$$L_e = \frac{\partial^2 \Phi_e}{\partial \Omega \partial S}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2} \right]$$

$$L_e = \frac{\partial^2 \Phi_e}{\partial \Omega \partial S \cos \theta}$$

$$L_{e\lambda} = \frac{\partial L_e}{\partial \lambda} \quad \text{- спектральная плотность энергетической яркости}$$



Яркость постоянна (инвариантна) вдоль луча при отсутствии потерь энергии:

$$L_e = \text{const}$$

$$\frac{L_e}{n^2} = \text{const} \quad \text{- приведенная яркость (инвариант яркости для неоднородной среды)}$$

яркость является основной характеристикой передачи световой энергии оптической системой;

оптическая система в принципе не может увеличивать яркость проходящего через нее излучения (она может лишь уменьшить яркость за счет поглощения или рассеяния света).

Поглощение света средой

Энергетический коэффициент пропускания τ_e – это отношение энергетического светового потока Φ'_e , пропущенного данным телом, к энергетическому потоку Φ_e упавшему на него:

Если среда поглощает, то инвариант яркости вдоль луча выглядит следующим образом:

$$\frac{L_e}{n^2 \tau_e} = const$$

Спектральная плотность пропускания $\tau_{e\lambda}(\lambda)$ показывает распределение коэффициента пропускания по спектру.

$$D = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau \quad \text{- оптическая плотность среды}$$

Световые величины

Φ – световой
поток

I – сила света

E – освещенность

M – светимость

L – яркость

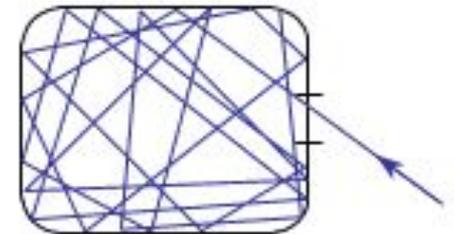
Если в энергетических величинах исходная единица – это [поток](#), то в световых величинах исходная единица – это сила света (так сложилось исторически).

Сила света определяется аналогично [энергетической силе света](#):

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega}, [\text{кд}]$$

1 кандела – сила излучения эталона (эталонный излучатель или черное тело)

Абсолютно черное тело – это тело, которое полностью поглощает падающую на него энергию. Модель абсолютно черного тела представляет собой полое тело, внутренняя поверхность которого выкрашена в черный цвет. Через небольшое отверстие поток излучения поступает внутрь тела, где в результате многократного отражения полностью поглощается



Световые величины

$\Phi = I \cdot \Omega, [\text{лм}]$ - световой поток

1 лм – это поток, который излучается источником с силой света 1 кд в телесном

угле 1 ср

$E = \frac{\Phi}{S}, [\text{лк}]$ -

освещенность

1 лк – освещенность такой поверхности, на каждый квадратный метр которой

равномерно падает поток в 1 лм.

$[M] = \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$ -

светимость

За единицу светимости принимают светимость такой поверхности, которая излучает

с 1 м^2 световой поток, равный 1 лм.

$[L] = \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ -

яркость

За единицу яркости принята яркость такой плоской поверхности, которая в

перпендикулярном направлении излучает силу света 1 кд с м^2

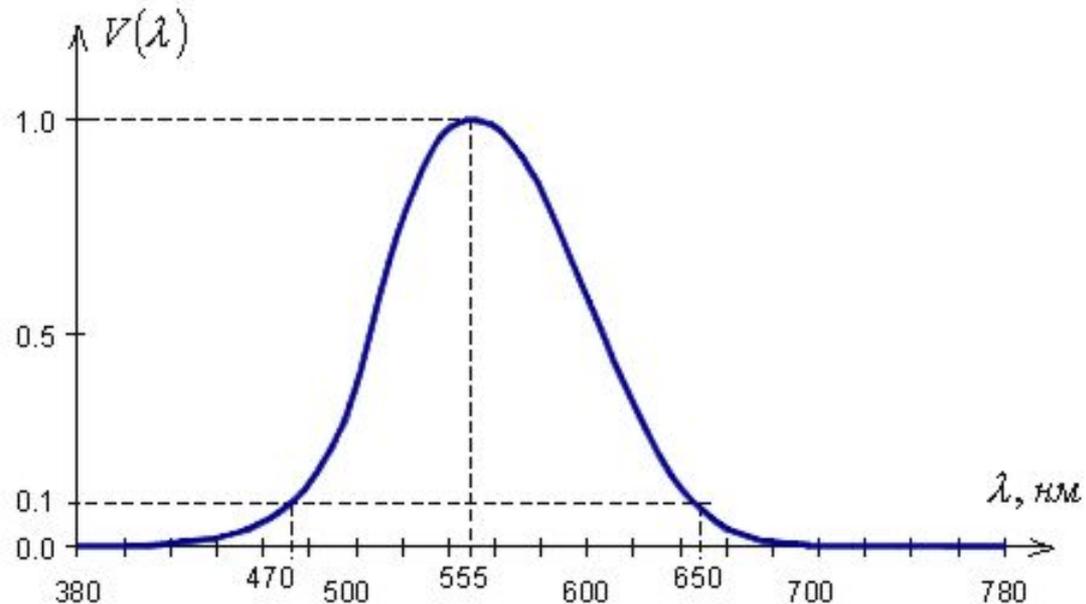
Связь световых и энергетических величин

Связь световых и энергетических величин устанавливается через зрительное восприятие.

Функция видности – это относительная спектральная кривая эффективности монохроматического излучения. Она показывает, как глаз воспринимает излучение различного спектрального состава. – величина, обратно пропорциональная монохроматическим мощностям, дающим одинаковое зрительное ощущение, причем воздействие потока излучения с длиной волны 555нм условно принимается за единицу. Функция видности глаза максимальна в области желто-зеленого цвета (550–570 нм) и спадает до нуля для красных и фиолетовых лучей

$$Q = 680 \int_{0,38}^{0,77} V(\lambda) Q_{e\lambda}(\lambda) d\lambda$$

Q – любая величина



Другие единицы измерения

сила света	1 свеча	1.0005 кд
яркость	1 нит = 10^{-4} стильб	1.0005 кд / м ²
освещенность	1 люкс (старый)	1.0005 лк (новый)

Сопоставление энергетических и световых единиц:

Энергетические		Световые	
Наименование и обозначение	Единицы измерения	Наименование и обозначение	Единицы измерения
поток излучения Φ_e	Вт	световой поток Φ	лм
энергетическая сила света I_e	Вт / ср	сила света I	кд
энергетическая освещенность E_e	Вт / м ²	освещенность E	лк
энергетическая светимость M_e	Вт / м ²	светимость M	лм / м ²
энергетическая яркость L_e	Вт / ср · м ²	яркость L	кд / м ²

Практические световые величины и их примеры

Световая экспозиция – это величина энергии, приходящейся на единицу площади

за некоторое время (освещенность, накопленная за время от t_1 до t_2):

$$H = \int_{t_1} E(t) dt, [лк \cdot c]$$

$H = E \cdot t$ - для постоянного

для протяженного источника характеристика, воспринимаемая глазом – яркость.

Для точечного источника характеристика, воспринимаемая глазом – блеск (чем больше блеск, тем больше кажется яркость). Блеск – это величина, применяемая при визуальном наблюдении точечного источника света.

Блеск E_M – это освещенность, создаваемая точечным источником в плоскости зрачка наблюдателя [E_M]=лк

Видимый блеск небесных тел оценивается в **звездных величинах** .

Шкала звездных величин устанавливается следующим экспериментальным

соотношением: 13,89

$E_1 = 1,11 \cdot 10^{-6}$ лк – блеск, создаваемый звездой первой величины,

$E_2 = 1,75 \cdot 10^{-7}$ лк – блеск, создаваемый звездой второй величины.

Яркость некоторых источников, $\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$:

$1.5 \cdot 10^9$ – поверхность солнца,

$2.5 \cdot 10^3$ – поверхность луны,

$1.5 \cdot 10^3$ – ясное небо,

$5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$ – нить лампы накаливания,

10^{-4} – ясное безлунное ночное небо,

10^{-6} – наименьшая различимая глазом яркость.

Освещенность, лк:

10^5 – освещенность, создаваемая солнцем на поверхности Земли (летом, днем, при безоблачном небе),

$10^2 - 5 \cdot 10^3$ – освещенность рабочего места,

0.2 – освещенность от полной луны,

10^{-9} – порог блеска (примерно 8-ая звездная величина).

Модели источников излучения

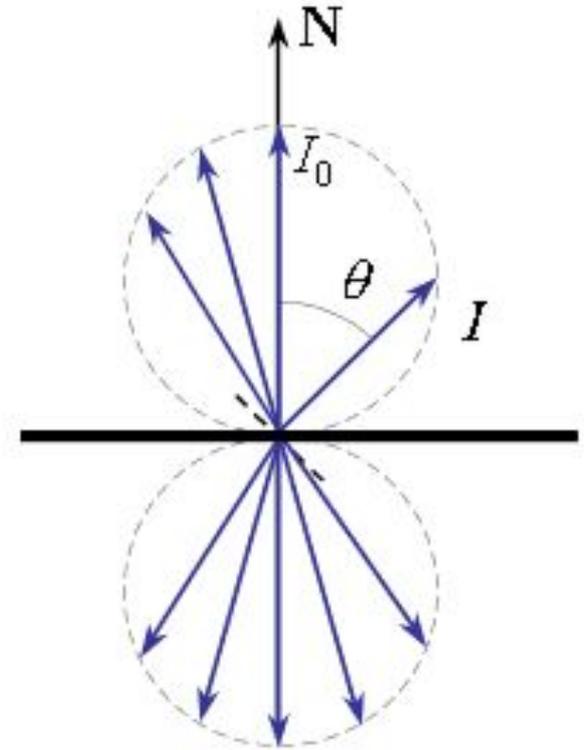
Плоский ламбертовский излучатель

Силу света от такого источника можно вычислить, зная яркость источника:

$$I = L \cdot S = LS_0 \cos \theta = I_0 \cos \theta$$

Закон Ламберта (закон косинусов):

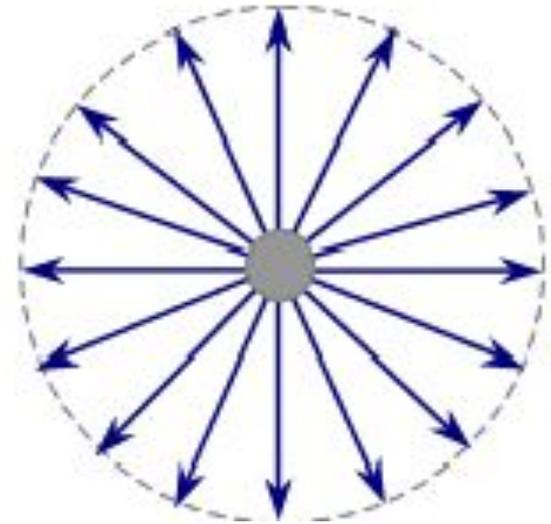
Плоская поверхность, имеющая одинаковую яркость по всем направлениям, излучает свет, сила которого изменяется по закону косинуса:
 $I = I_0 \cos \theta$



Сферический ламбертовский излучатель

Сила света от сферического ламбертовского источника постоянна во всех направлениях:

$$I = I_0 = \text{const}$$



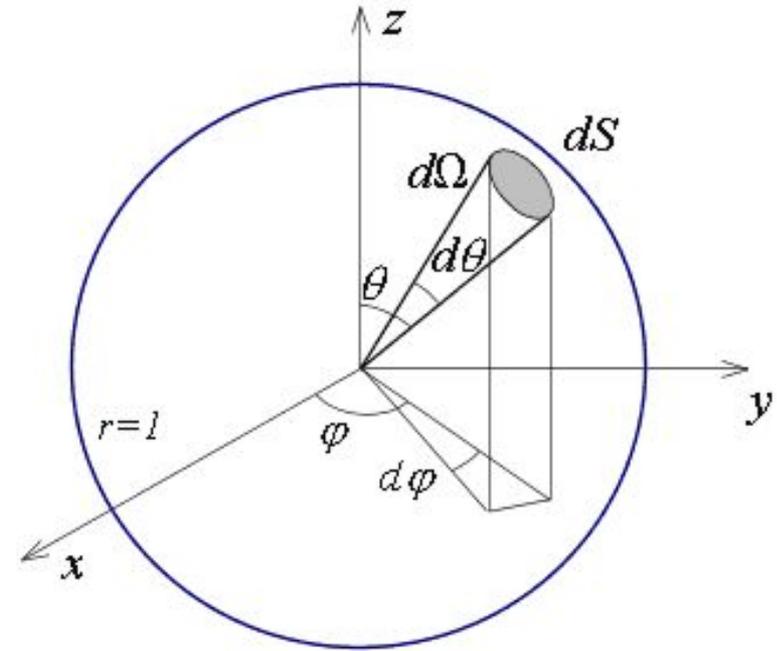
Поток от излучателей различной формы

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = dS = (r \cdot d\theta)(r \cdot \sin \theta \cdot d\varphi) =$$

$$= r^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

$$d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

$$d\Phi = I \cdot d\Omega$$



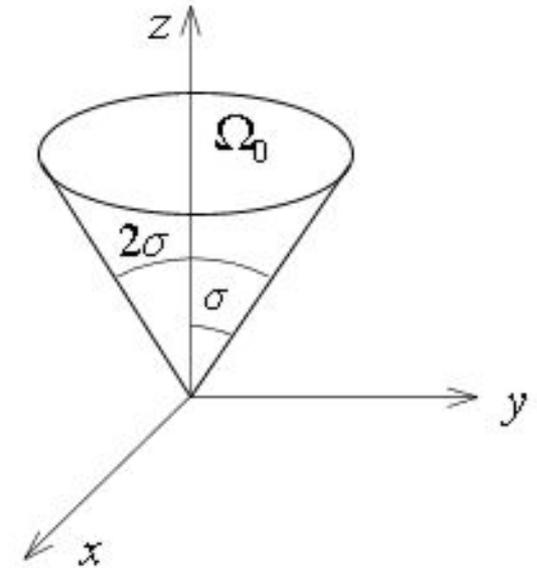
$$\Phi = \iint_{\Omega_0} I(\varphi, \theta) d\Omega = \iint_{\Omega_0} I(\varphi, \theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$
 - общий поток от произвольного излучателя в произвольном телесном угле

Сферический ламбертовский излучатель

$$\Phi = \iint_{\Omega_0} I(\varphi, \theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = I_0 \iint_{\Omega_0} \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = I_0 \Omega_0$$

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= \int_0^\sigma \int_0^{2\pi} \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = 2\pi \int_0^\sigma \sin \theta \cdot d\theta = 2\pi (-\cos \theta \Big|_0^\sigma) = \\ &= 2\pi(1 - \cos \sigma) = 4\pi \sin^2 \frac{\sigma}{2} \end{aligned}$$

$$\Phi = I_0 \Omega_0 = 4\pi I_0 \sin^2 \frac{\sigma}{2} \quad \text{- полный поток от сферического ламбертовского излучателя}$$



Плоский ламбертовский излучатель

$$\Phi = \iint_{\Omega_0} I(\varphi, \theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = I_0 \iint_{\Omega_0} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = \frac{I_0}{2} \int_0^\sigma \int_0^{2\pi} \sin 2\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = \pi I_0 \int_0^\sigma \sin 2\theta \cdot d\theta =$$

$$= \frac{\pi I_0}{2} \left(-\cos 2\theta \Big|_0^\sigma \right) = \frac{\pi I_0}{2} (1 - \cos 2\sigma) = \pi I_0 \sin^2 \sigma$$

$\Phi = \pi I_0 \sin^2 \sigma$ - поток от плоского ламбертовского
излучателя

Яркость рассеивающей поверхности

Рассмотрим **ламбертовское рассеяние**: рассеяние света плоской поверхностью происходит по всем направлениям, и не зависит от **телесного угла**, в пределах которого падает световой поток. Световой поток выходит после такого рассеивателя равномерно распределенным в пределах телесного угла. Примером может служить белая бумага или молочное стекло. **Яркость** такой поверхности постоянна по всем направлениям и не зависит от направления падающего света, то есть полностью подчиняется **закону Ламберта**. Кривая распределения силы света таких поверхностей имеет форму окружности

$$\Phi' = \alpha\Phi$$

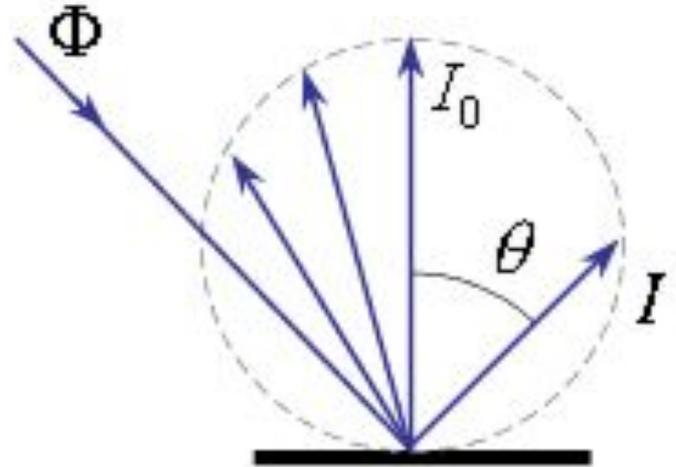
Коэффициент

альбедо α определяет степень белизны поверхности.

$$E = \frac{\Phi}{dS}$$

$$\Phi' = I_0\pi = LdS\pi \xrightarrow{\Phi' = \alpha\Phi} LdS\pi = \alpha \cdot (EdS)$$

$$L = \frac{\alpha E}{\pi} \quad \text{- яркость идеального рассеивателя}$$



Освещенность, создаваемая ТОЧЕЧНЫМ ИСТОЧНИКОМ

Точечный источник – это источник, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до него, и который излучает поток, равномерный по всем направлениям.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I d\Omega}{dS} = \frac{I \cos \Omega}{r^2}$$

Освещенность, создаваемая точечным источником обратно пропорциональна расстоянию от источника до поверхности и прямо пропорционально косинусу угла, между направлением светового потока и нормалью к освещаемой поверхности:

