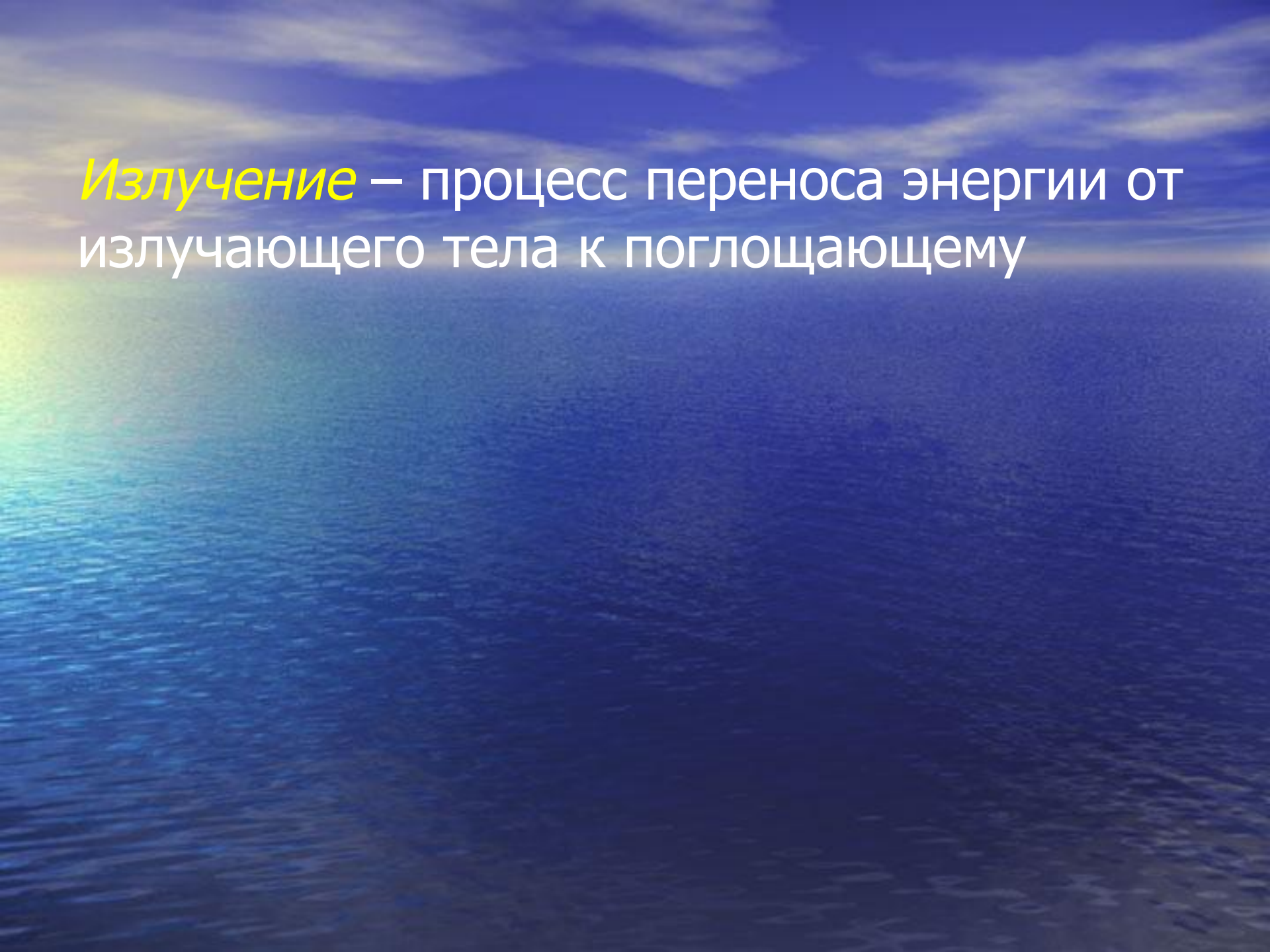


# Основы светотехники

## Практические занятия

Осенний семестр 2017 г.



*Излучение* – процесс переноса энергии от излучающего тела к поглощающему

*Излучение* – процесс переноса энергии от излучающего тела к поглощающему

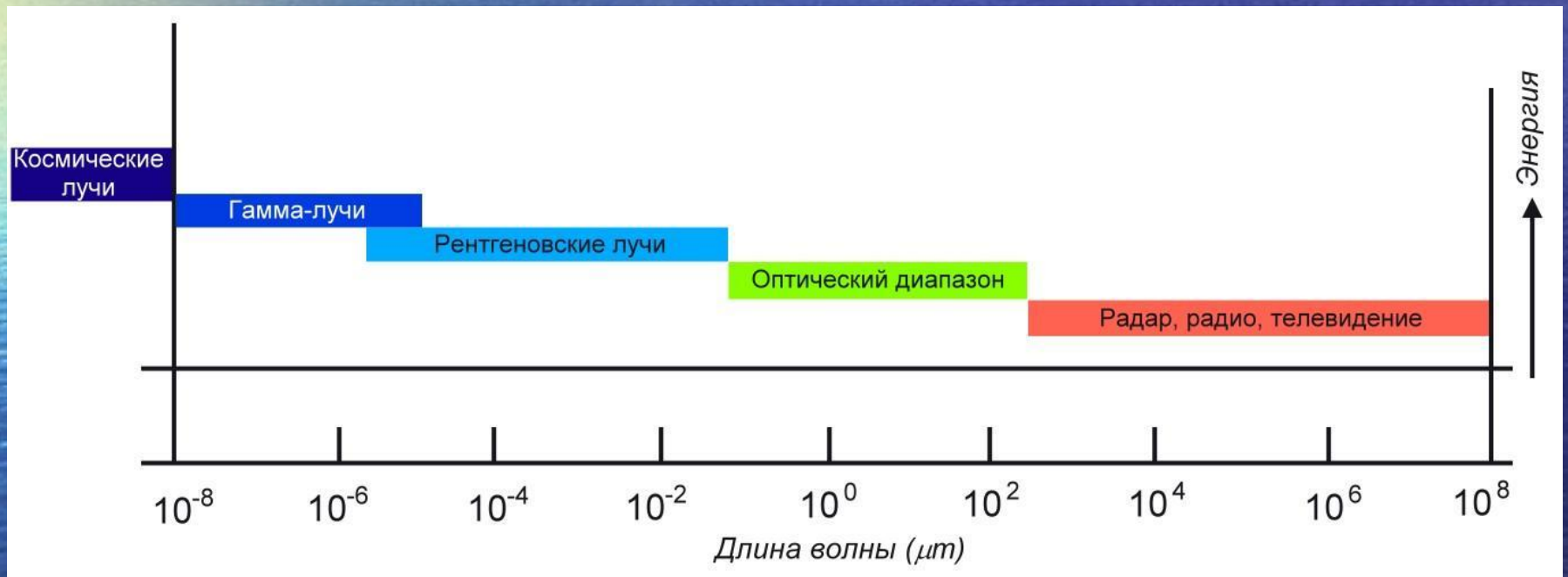
*Энергия* – количественная мера движения материи

*Излучение* – процесс переноса энергии от излучающего тела к поглощающему

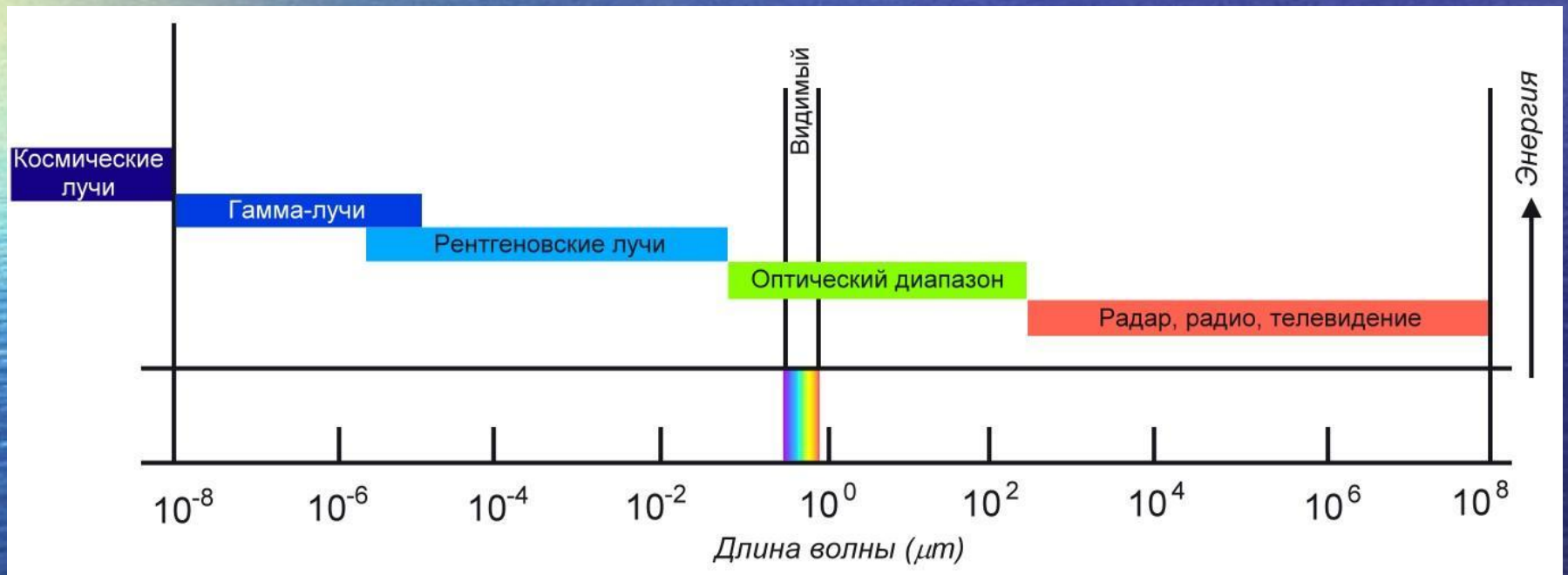
*Энергия* – количественная мера движения материи

*Материя излучения* – материя особой формы, отличающаяся от вещества тем, что её масса покоя равна нулю

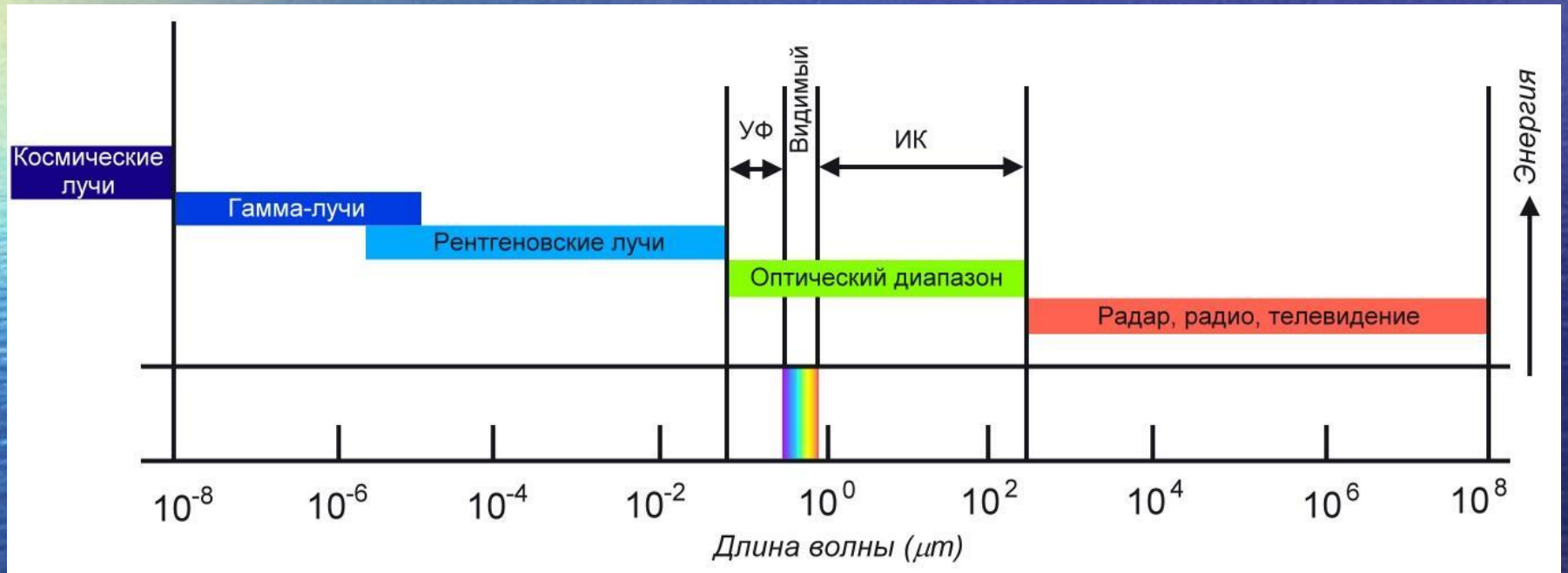
# Пространство электромагнитных излучений



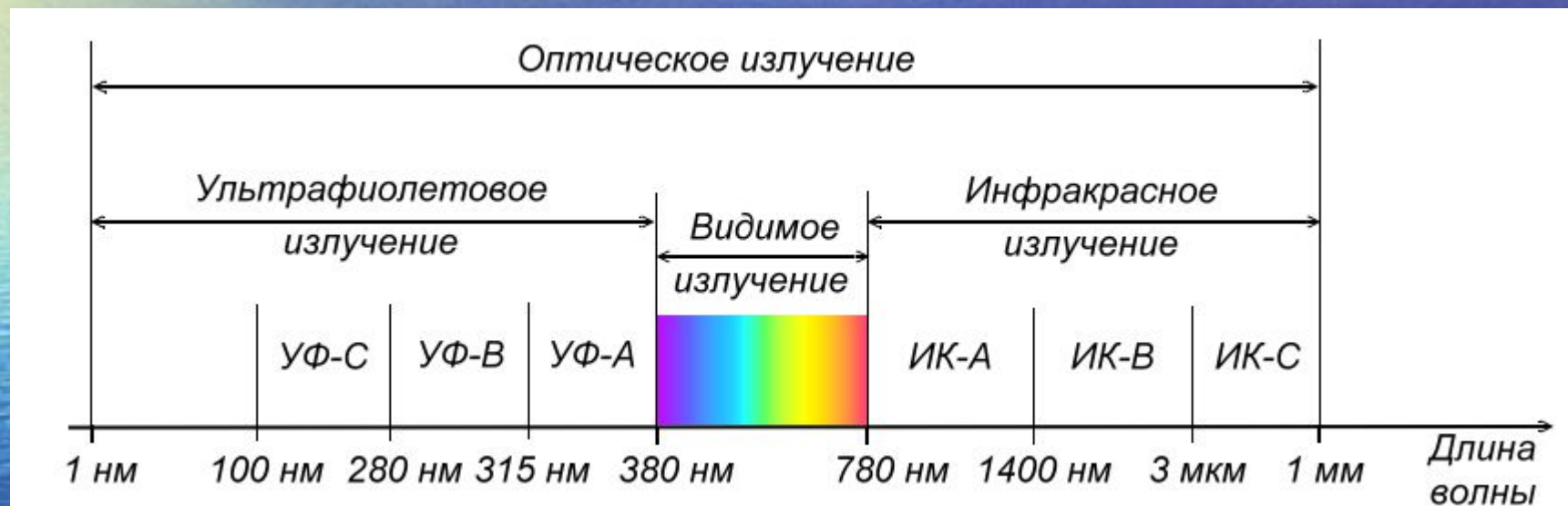
# Пространство электромагнитных излучений



# Пространство электромагнитных излучений

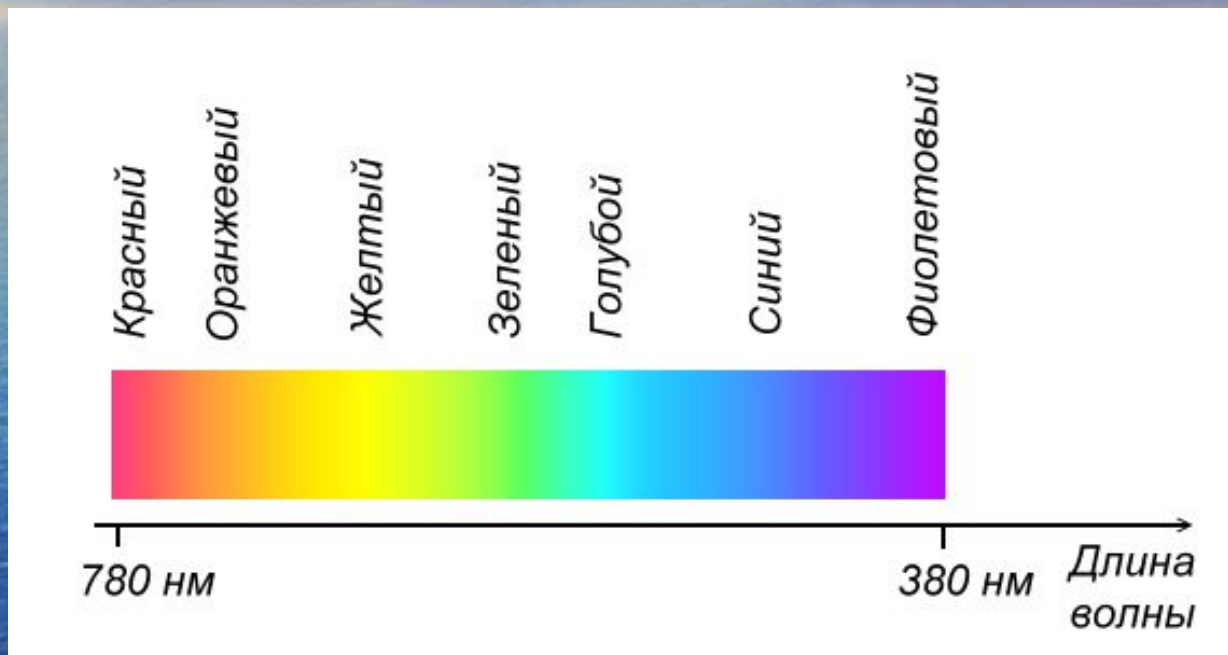


# Излучения оптического диапазона





# Видимое излучение (видимый свет)



**Видимое излучение** – оптическое излучение, непосредственно вызывающее зрительное ощущение

# Квантовые свойства излучения

*Квант энергии (энергия фотона)* – минимальная порция энергии монохроматического излучения

$$Q_{\text{эф}} = h\nu$$

# Квантовые свойства излучения

*Квант энергии (энергия фотона)* – минимальная порция энергии монохроматического излучения

$$Q_{\text{эф}} = h\nu$$

*Импульс фотона*  $p_{\text{ф}} = h\nu/c$

*Масса фотона*  $m_{\text{ф}} = h\nu/c^2$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

# Энергетические характеристики излучения

- *Энергия излучения* – его количественная мера

$$Q_e \text{ [Дж]}$$

Дополнительная единица измерения – электрон-вольт [эВ]

$$1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ Дж} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$$

# Энергетические характеристики излучения

- *Поток излучения (лучистый поток)* – мощность переноса энергии излучения (энергия, переносимая излучением в единицу времени)

$$\Phi_e \text{ [Вт]}$$

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad \Phi_{e, \text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_e(t) dt \quad Q_e = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_e(t) dt$$

# Энергетические характеристики излучения

- *Поток излучения (лучистый поток)* – мощность переноса энергии излучения (энергия, переносимая излучением в единицу времени)

$$\Phi_e \text{ [Вт]}$$

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad \Phi_{e, \text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_e(t) dt \quad Q_e = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_e(t) dt$$

Поток излучения характеризуется распределением:

# Энергетические характеристики излучения

- *Поток излучения (лучистый поток)* – мощность переноса энергии излучения (энергия, переносимая излучением в единицу времени)

$$\Phi_e \text{ [Вт]}$$

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad \Phi_{e, \text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_e(t) dt \quad Q_e = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_e(t) dt$$

Поток излучения характеризуется распределением:

- в пространстве

# Энергетические характеристики излучения

- *Поток излучения (лучистый поток)* – мощность переноса энергии излучения (энергия, переносимая излучением в единицу времени)

$$\Phi_e \text{ [Вт]}$$

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad \Phi_{e, \text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_e(t) dt \quad Q_e = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_e(t) dt$$

Поток излучения характеризуется распределением:

- в пространстве
- во времени



# Энергетические характеристики излучения

- *Поток излучения (лучистый поток)* – мощность переноса энергии излучения (энергия, переносимая излучением в единицу времени)

$$\Phi_e \text{ [Вт]}$$

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad \Phi_{e, \text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_e(t) dt \quad Q_e = \int_{t_1}^{t_2} \Phi_e(t) dt$$

Поток излучения характеризуется распределением:

- в пространстве
- во времени
- по спектру

# Энергетические характеристики излучения

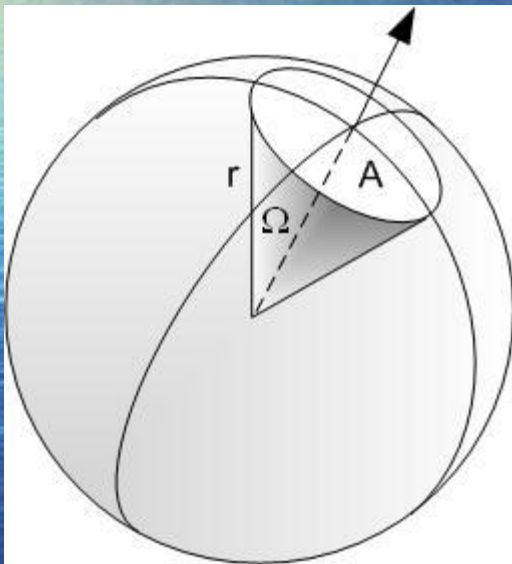
- *Сила излучения* – пространственная плотность потока излучения

$$I_e \text{ [Вт/ср]}$$

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$$

**Телесный угол** – часть пространства, ограниченная конической поверхностью с вершиной в данной точке

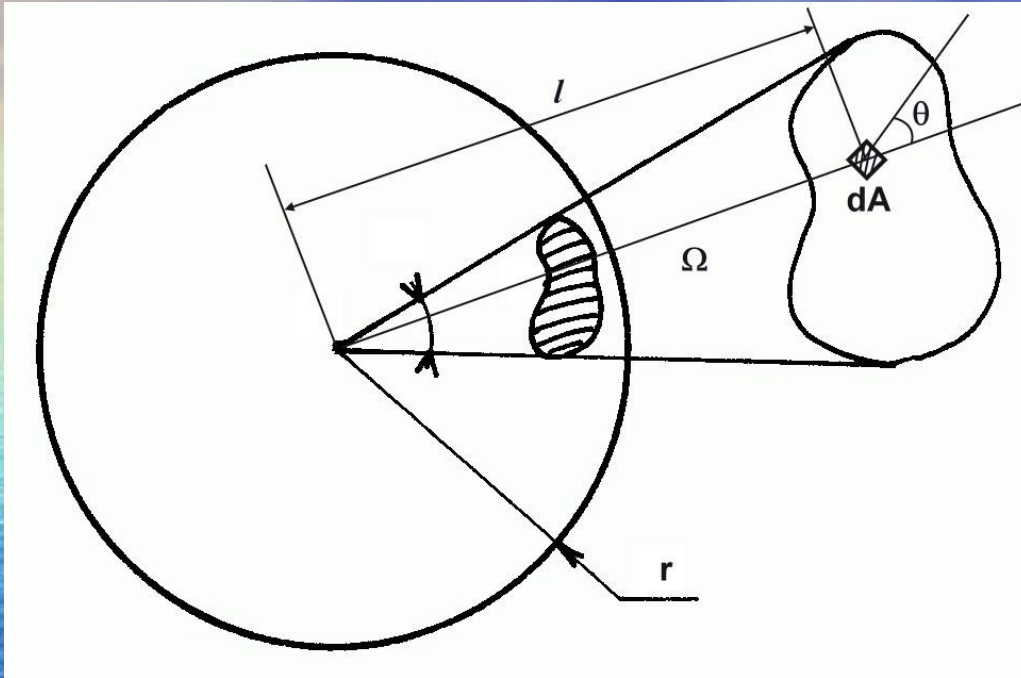
$\Omega$  [ср]



Телесный угол определяется отношением площади сферической поверхности, заключённой внутри конуса с вершиной в центре сферы, к квадрату радиуса этой сферы

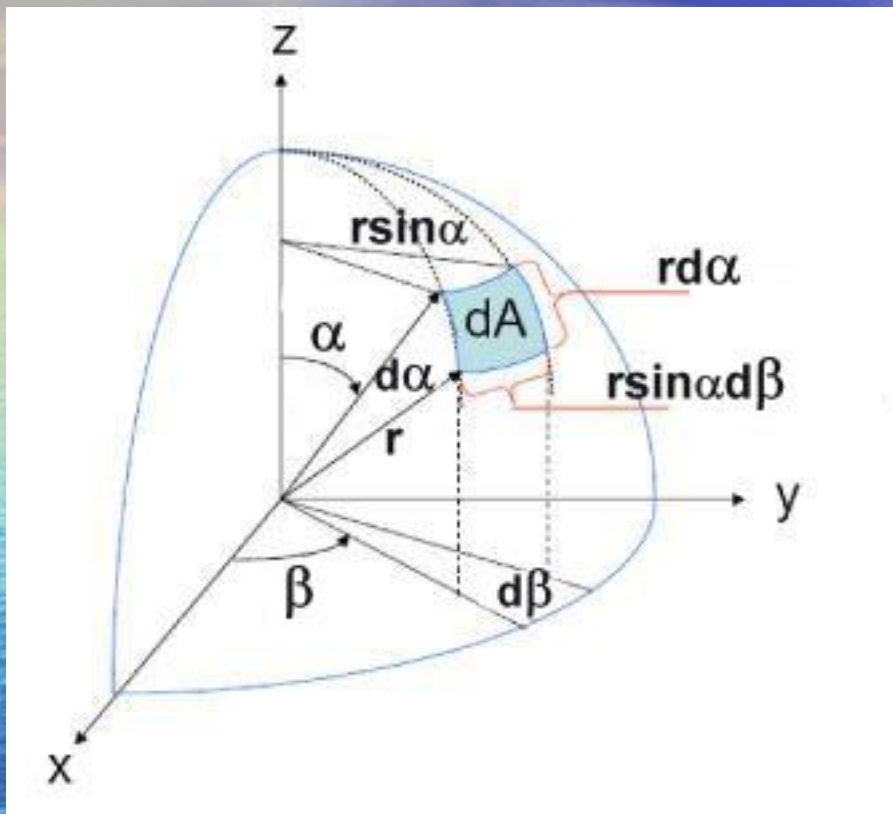
$$\Omega = \frac{A_{сф}}{r^2}$$

Для произвольной (несферической) поверхности



$$\Omega = \int_{(A)} \frac{\cos \theta}{l^2} dA$$

## Расчёт телесного угла



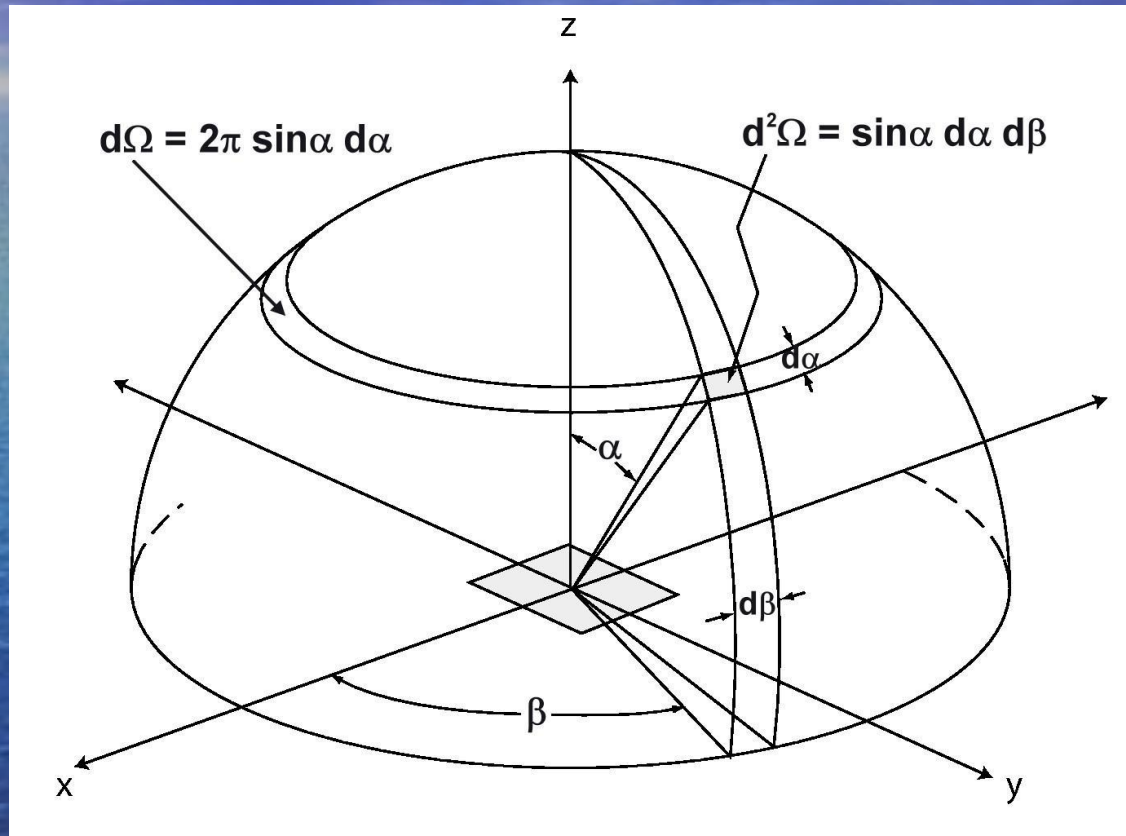
$$d^2\Omega = \sin \alpha \cdot d\alpha \cdot d\beta$$

$$\Omega = \int_{(\alpha)} \int_{(\beta)} \sin \alpha d\alpha d\beta$$

Полный телесный угол,  
охватывающий всё  
пространство, равен

**$4\pi$**  стерадиан

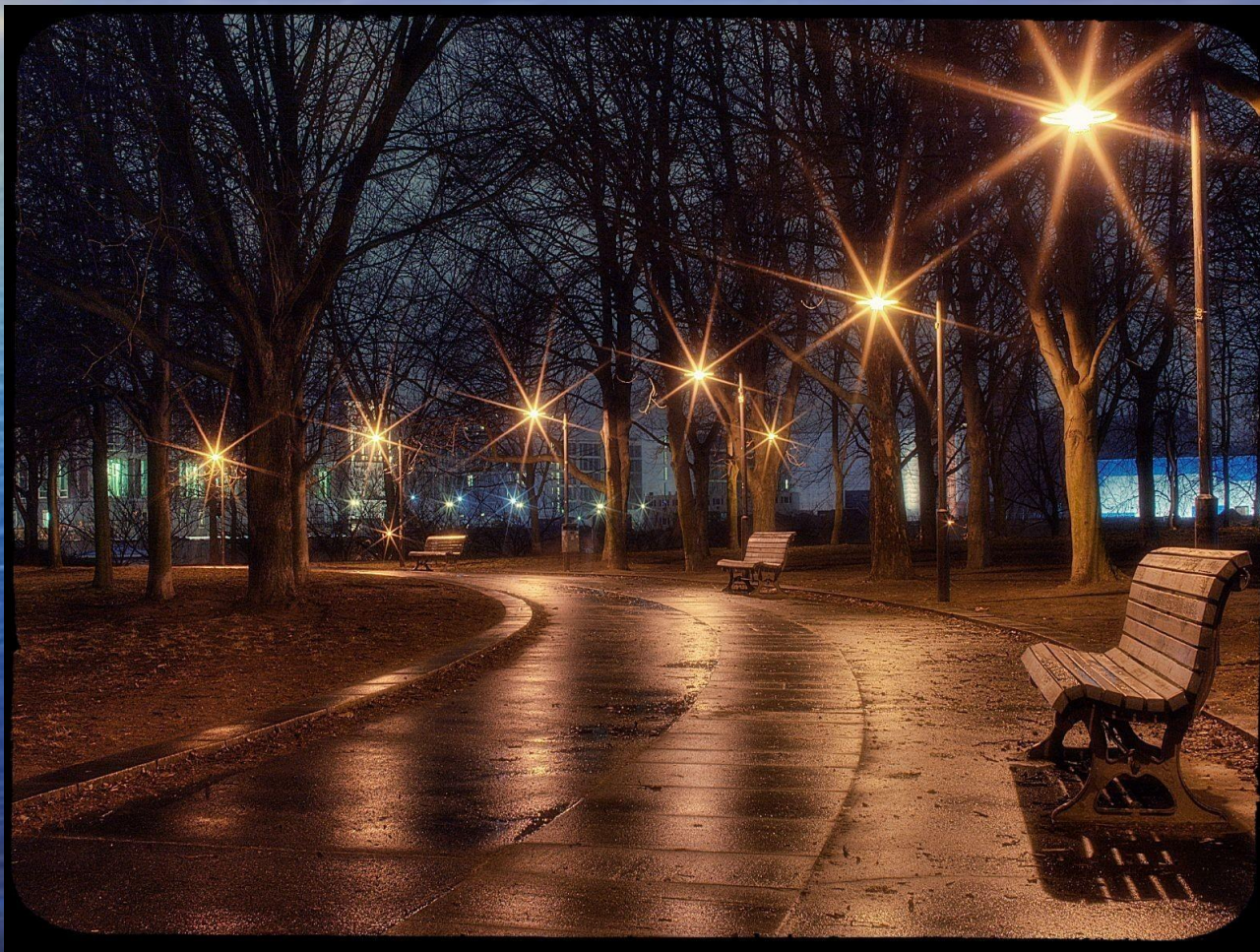
**Зональный телесный угол** – часть пространства, заключённая между двумя круглыми коническими поверхностями с общей осью



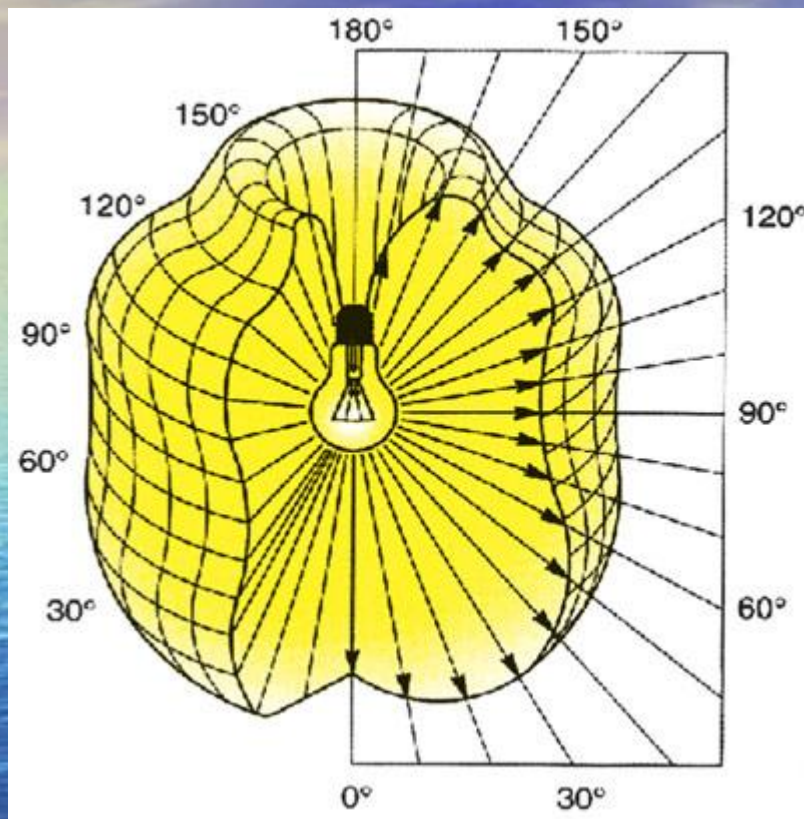
$$d\Omega = \int_{\beta=0}^{\beta=2\pi} \sin\alpha d\alpha d\beta = 2\pi \sin\alpha d\alpha$$

# *Точечный источник излучения* –

излучатель, размеры которого намного меньше расстояния от него до данной точки



## Распределение силы излучения в пространстве



Сила излучения реальных источников зависит от направления в пространстве, задаваемого углами  $\alpha, \beta$

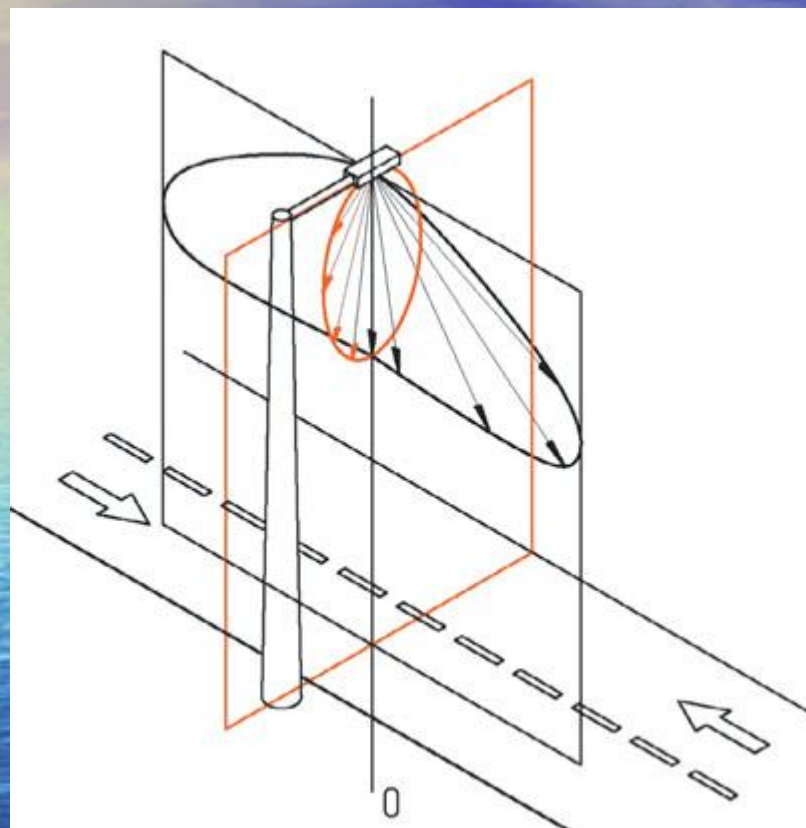
$$I_{e\alpha\beta} = \frac{d\Phi_e}{d\Omega_{\alpha\beta}}$$

$$\Phi_e = \int_{4\pi} I_e(\alpha, \beta) d\Omega$$

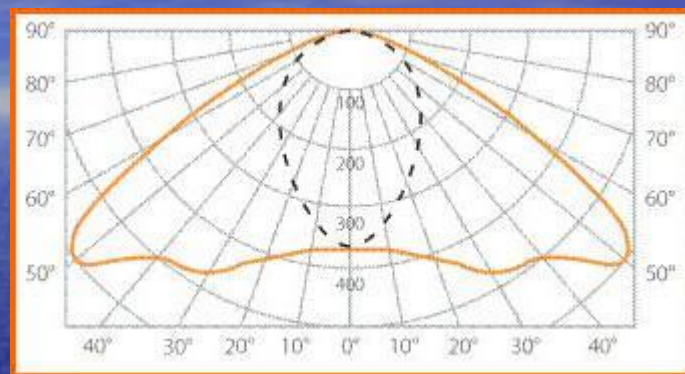
**Фотометрическое тело** – часть пространства, содержащая вершины радиус-векторов силы излучения по различным направлениям  $I_e(\alpha, \beta)$



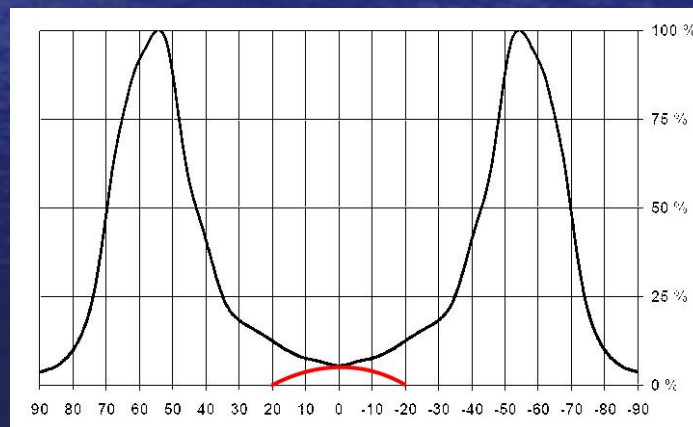
# Кривая силы излучения



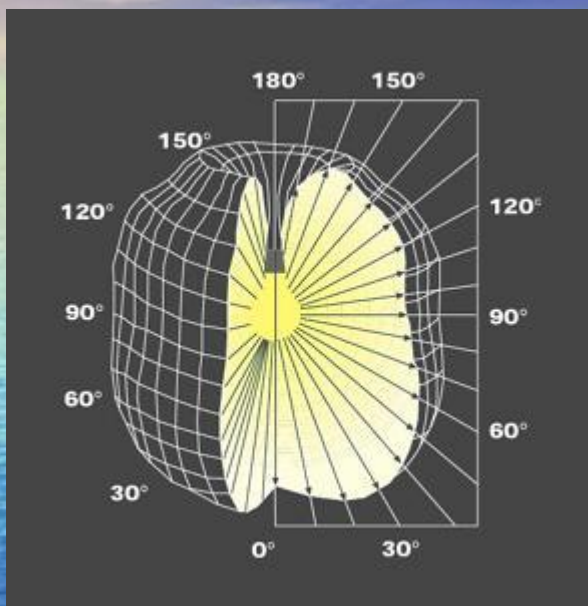
В полярных координатах



В декартовых координатах



**Круглосимметричный источник** – излучатель, обладающий одинаковыми значениями силы излучения  $I_e(\alpha)$  для всех направлений, равноудалённых от его оси



# Энергетические характеристики излучения

- *Энергетическая светимость* –  
поверхностная плотность потока излучения

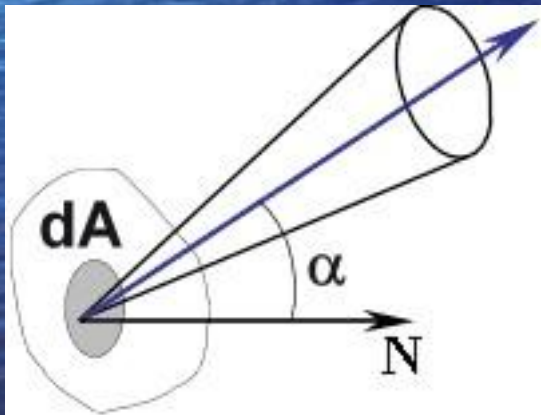
$$M_e \text{ [Вт/м}^2\text{]}$$

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_u} \quad M_{e,cp} = \frac{\Phi_e}{A_u}$$

# Энергетические характеристики излучения

- **Энергетическая яркость** – сила излучения с единицы площади проекции поверхности излучателя на плоскость, перпендикулярную направлению излучения

$$L_e \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{ср]}$$



$$L_{e\alpha\beta} = \frac{dI_{e\alpha\beta}}{\cos \alpha dA} = \frac{d^2\Phi_{e\alpha\beta}}{\cos \alpha dA d\Omega_{\alpha\beta}}$$

**Равнояркие излучатели** – источники излучения, яркость которых не зависит от направления наблюдения

$$L_e = \frac{I_{e\alpha\beta}}{A_{\alpha\beta}}$$

Сила излучения элементарного участка равнояркой поверхности

$$dI_{e\alpha\beta} = L_{e\alpha\beta} \cos \alpha dA = L_e \cos \alpha dA$$

Поток, излучаемый элементарным участком равнояркой поверхности

$$d\Phi_e = 2\pi L_e dA \int_{\alpha=0}^{\alpha=\pi/2} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha = \pi L_e dA$$

Для равнояркой поверхности конечных размеров

$$\Phi_e = \pi L_e A \quad L_e = \frac{M_e}{\pi} \quad M_e = \pi L_e$$

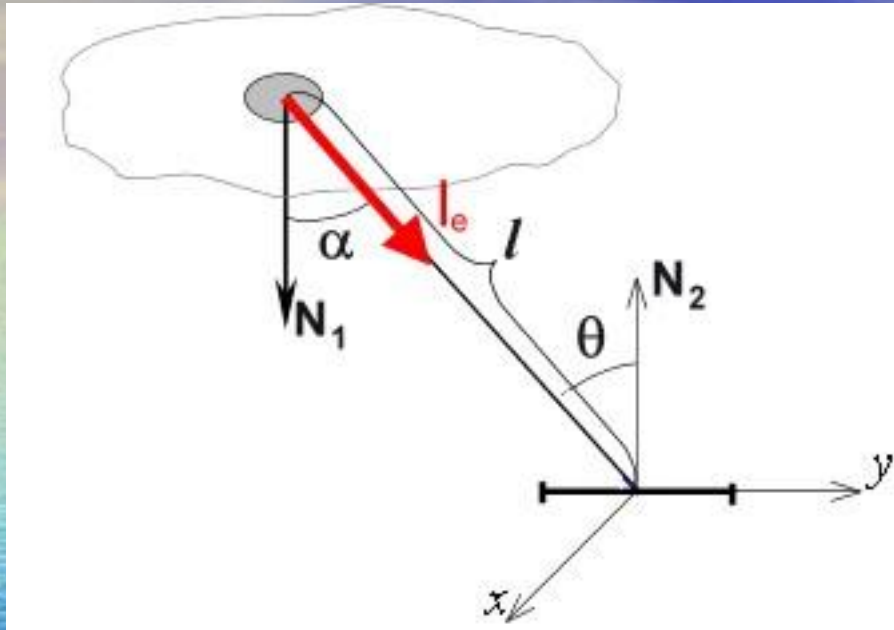
# Энергетические характеристики излучения

- *Энергетическая освещённость (облучённость)* – плотность падающего потока излучения по облучаемой поверхности

$$E_e \text{ [Вт/м}^2\text{]}$$

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_o} \quad E_{e,cp} = \frac{\Phi_e}{A_o}$$

## Закон квадрата расстояния



$$E_e = \frac{l_e}{l^2} \cos \theta$$

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \frac{d\Phi_e}{l^2 d\Omega} = \frac{l_e}{l^2} \cos \theta$$

# Энергетические характеристики излучения

- **Энергетическая экспозиция** – энергия излучения, упавшая на единицу площади облучаемой поверхности за определённое время

$$H_e \text{ [Дж/м}^2\text{]}$$

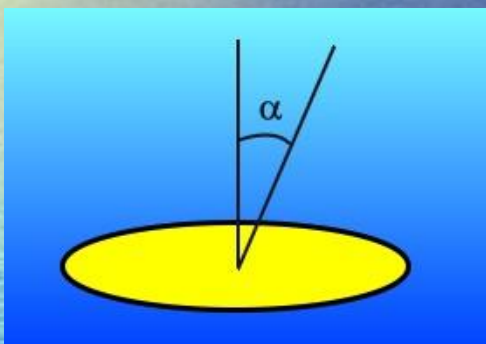
$$H_e = \frac{dQ_e}{dA_o} \quad H_e = \int_{t_1}^{t_2} E_e(t) dt$$

Если  $E_e(t) = \text{const}$ :  $H_e = E_e t$



# Стандартные равнояркие источники

- *Односторонний диск/плоскость*



$$I_{\alpha} = LA_{\alpha} = LA_0 \cos \alpha = I_0 \cos \alpha$$

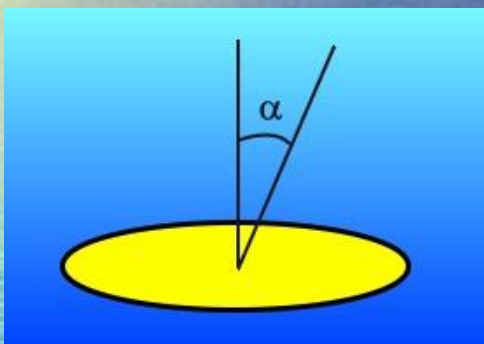
$$\Phi_{\Omega} = \int_{(\Omega)} I(\alpha) d\alpha = 2\pi \int_0^{\alpha_K} I(\alpha) \sin \alpha d\alpha =$$

$$= 2\pi I_0 \int_0^{\alpha_K} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha = 2\pi I_0 \int_0^{\sin \alpha_K} \sin \alpha d(\sin \alpha) =$$

$$= \pi I_0 \sin^2 \alpha_K$$

# Стандартные равнояркие источники

- *Односторонний диск/плоскость*



$$I_{\alpha} = LA_{\alpha} = LA_0 \cos \alpha = I_0 \cos \alpha$$

$$\Phi_{\Omega} = \int_{(\Omega)} I(\alpha) d\alpha = 2\pi \int_0^{\alpha_K} I(\alpha) \sin \alpha d\alpha =$$

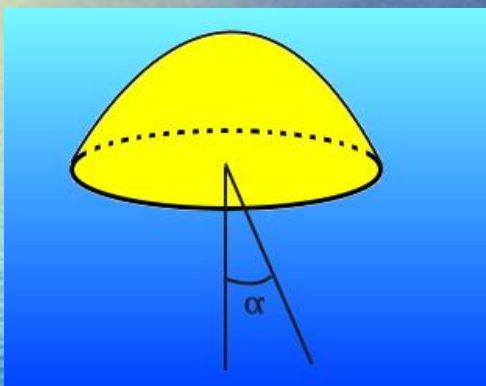
$$= 2\pi I_0 \int_0^{\alpha_K} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha = 2\pi I_0 \int_0^{\sin \alpha_K} \sin \alpha d(\sin \alpha) =$$

$$= \pi I_0 \sin^2 \alpha_K$$

$$\Phi_{2\pi} = \pi I_0$$

## Стандартные равнояркие источники

- Полусфера (внешняя поверхность)



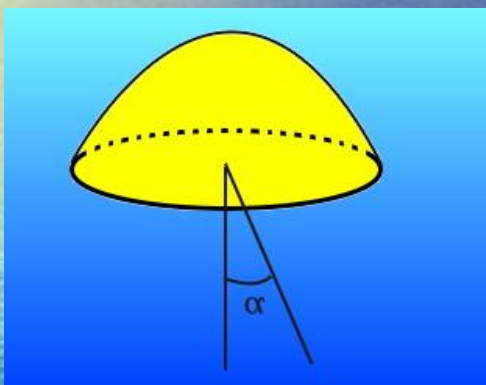
$$I_{\alpha} = LA_{\alpha} = LA_{180} \frac{1 - \cos \alpha}{2} = I_{180} \frac{1 - \cos \alpha}{2}$$

$$\Phi_{\Omega} = \pi I_{180} \left[ 1 - \cos \alpha_{\kappa} - \frac{1}{2} \sin^2 \alpha_{\kappa} \right]$$

$$\Phi_{4\pi} = 2\pi I_{180}$$

## Стандартные равнояркие источники

- *Полусфера (внешняя поверхность)*



$$I_{\alpha} = LA_{\alpha} = LA_{180} \frac{1 - \cos \alpha}{2} = I_{180} \frac{1 - \cos \alpha}{2}$$

$$\Phi_{\Omega} = \pi I_{180} \left[ 1 - \cos \alpha_{\kappa} - \frac{1}{2} \sin^2 \alpha_{\kappa} \right]$$

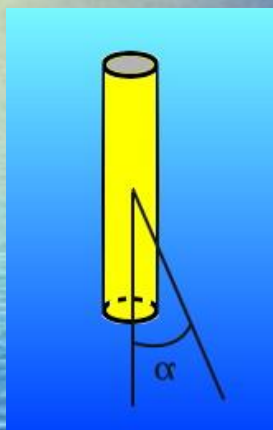
$$\Phi_{4\pi} = 2\pi I_{180}$$

- *Полушар (обе поверхности)* = полусфера (внешняя поверхность) + диск

$$\Phi_{4\pi} = 3\pi I_{0/180}$$

# Стандартные равнояркие источники

- Цилиндр (боковая поверхность)



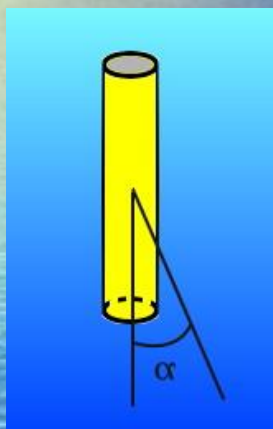
$$I_{\alpha} = LA_{\alpha} = LA_{90} \sin \alpha = I_{90} \sin \alpha$$

$$\Phi_{\Omega} = \pi I_{90} \left[ \alpha_K - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_K \right]$$

$$\Phi_{4\pi} = \pi^2 I_{90}$$

## Стандартные равнояркие источники

- **Цилиндр (боковая поверхность)**



$$I_{\alpha} = LA_{\alpha} = LA_{90} \sin \alpha = I_{90} \sin \alpha$$

$$\Phi_{\Omega} = \pi I_{90} \left[ \alpha_K - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_K \right]$$

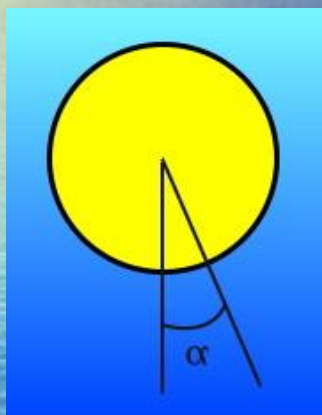
$$\Phi_{4\pi} = \pi^2 I_{90}$$

- **Цилиндр (вся поверхность)** = цилиндр (боковая поверхность) + 2 диска

$$\Phi_{4\pi} = \pi^2 I_{90} + 2\pi I_0$$

# Стандартные равнояркие источники

- Шар



$$I_{\alpha} = LA_{\alpha} = LA_0 = I_0 = \text{const}$$

$$\Phi_{\Omega} = \int_{(\Omega)} I_0 d\Omega = I\Omega$$

$$\Phi_{4\pi} = 4\pi I_0$$