



ФИЗИКА КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

Лекция 1

***Постникова Екатерина Ивановна,
доцент кафедры экспериментальной физики***



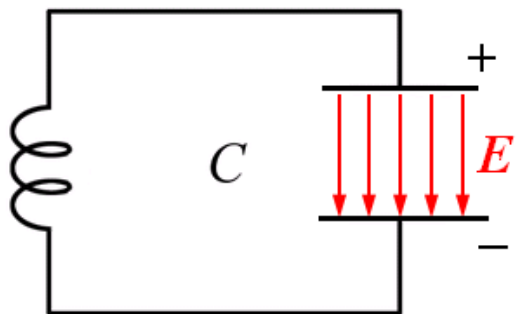
Электромагнитные волны

Процесс образования электромагнитных волн. Волновое уравнение для электромагнитных волн

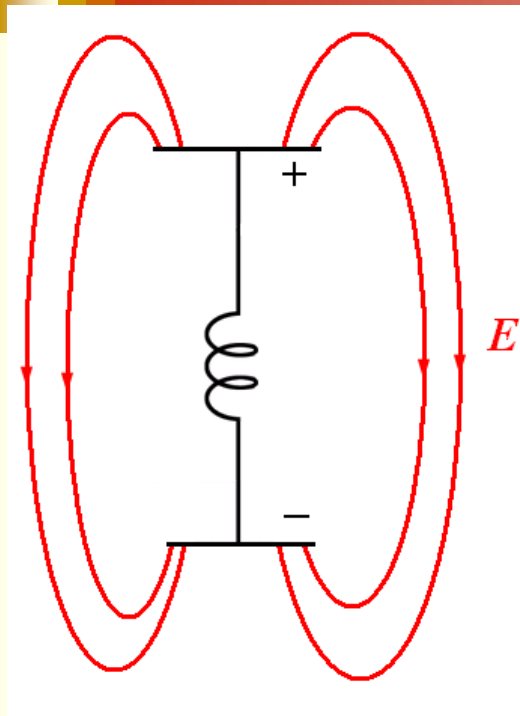
Электромагнитная волна – процесс распространения электромагнитного поля в пространстве с конечной скоростью.

Закрытый колебательный контур.

Переменное электрическое поле сосредоточено в конденсаторе.



Переменное магнитное поле сосредоточено в катушке индуктивности. Следовательно, он не пригоден для получения электромагнитных волн.



Вибратор Герца – открытый колебательный контур.

Переменное электрическое поле заполняет окружающее пространство и порождает переменное магнитное поле и т.д.

Существование электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла.

Пусть среда, в которой распространяются электромагнитные волны,

- однородная и нейтральная, $\rho = 0$,

- непроводящая, $j = 0$.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \underbrace{\vec{j}}_0 = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \underbrace{\rho}_0 = 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

Если среда – однородный и изотропный диэлектрик, то

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}.$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = [\nabla \vec{E}] = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \vec{H} = [\nabla \vec{H}] = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t};$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \nabla \vec{E} = 0; \quad \operatorname{div} \vec{H} = \nabla \vec{H} = 0.$$

Возьмем ротор от обеих частей 1-го уравнения

$$[\nabla, [\nabla \vec{E}]] = -\mu\mu_0 \left[\underbrace{\nabla}_{\substack{\text{диф. по} \\ \text{координате}}} , \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right].$$

Меняем местами дифференцирование по координате и времени:

$$\left[\nabla, \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial t} [\nabla \vec{H}],$$

$$[\nabla \vec{H}] = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad \Rightarrow$$

$$[\nabla, [\nabla \vec{E}]] = -\mu \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = -\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

$$[\nabla, [\nabla \vec{E}]] = \text{rot rot } \vec{E} = \nabla \left(\underbrace{\nabla \vec{E}}_{\text{yp. (2)}} \right) - \Delta \vec{E} = \text{grad div } \vec{E} - \Delta \vec{E} = 0 - \Delta \vec{E}.$$

Приравняем правые части уравнений

$$\Delta \vec{E} = \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Скорость света в вакууме

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

$$\Delta \vec{E} = \varepsilon \mu \underbrace{\varepsilon_0 \mu_0}_{\frac{1}{c^2}} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Аналогично:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \frac{\varepsilon\mu}{\underbrace{c^2}_{1/v^2}} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.$$

Волновые уравнения определяют изменение векторов \vec{E} и \vec{H} в пространстве и времени.

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

– фазовая скорость.

В вакууме $\varepsilon = 1, \quad \mu = 1 \quad \Rightarrow \quad v = c.$

Свойства электромагнитных волн (вытекают из уравнений Максвелла):

1. Скорость распространения электромагнитных волн

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n}, \quad \text{где } n \text{ — показатель преломления среды.}$$

Т.е.

- скорость распространения электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме,
- среда влияет на распространение электромагнитных волн, они преломляются, отражаются, поглощаются.

2. Электромагнитная волна – поперечная, вектора E и H лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, т.е. к вектору v в рассматриваемой точке поля.

3. Вектора E и H взаимно перпендикулярны, причем вектора E , H и v образуют правовинтовую тройку.

4. Вектора E и H колеблются в одной фазе – одновременно обращаются в нуль и одновременно достигают *max*.

5. Мгновенные значения векторов E и H связаны соотношением

$$\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H .$$

Для вакуума соотношение

$$\frac{E_0}{H_0} \approx 377 .$$

Дифференциальное уравнение электромагнитной волны (плоской), распространяющейся вдоль оси x можно представить в виде

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}.$$

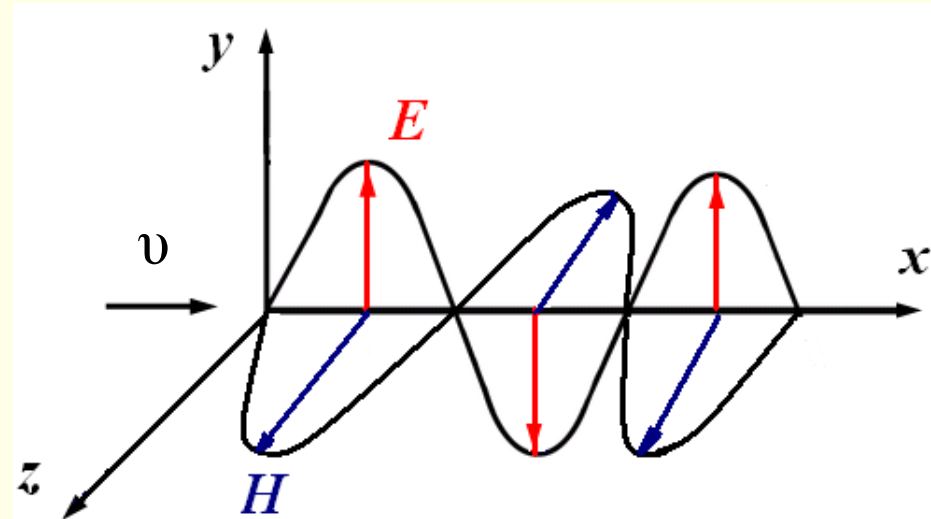
$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}.$$

Этим уравнениям удовлетворяет, в частности, плоская монохроматическая электромагнитная волна:

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx),$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx).$$

$$k = \frac{\omega}{v} \quad \text{— ВОЛНОВОЕ ЧИСЛО.}$$



6. Электромагнитная волна переносит энергию (т.к. мы можем обнаружить электромагнитную волну)

7. Электромагнитная волна оказывает на тело давление, т.к. заряженные частицы тела в магнитном поле волны начинают двигаться под действием силы Лоренца

$$\vec{F}_L = q [\vec{v}, \vec{B}].$$

Энергия электромагнитной волны. Вектор Умова – Пойтинга

Объемная плотность энергии электромагнитной волны

$$\left\{ \begin{array}{l} w = w_E + w_H = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} \\ \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H, \\ v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \end{array} \right.$$
$$w = 2w_E = 2w_H = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2 =$$
$$= \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0 \mu\mu_0} EH = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} EH = \frac{1}{v} EH$$

Плотность потока энергии равна плотности энергии умноженной на скорость волны:

$$j = S = w v = EH .$$

Вектора E , H , v образуют правовинтовую тройку, следовательно, векторное произведение $[\vec{E}, \vec{H}]$ совпадает с направлением переноса энергии, т.е. с вектором v .

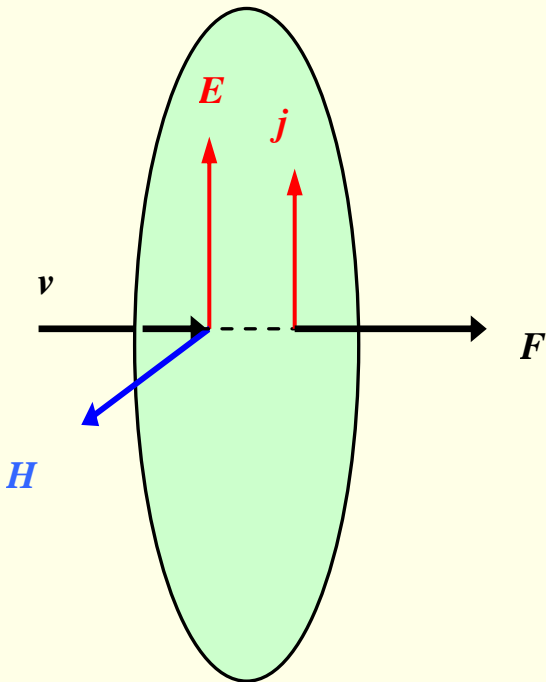
Запишем плотность потока энергии, как векторную величину $\vec{S} = \omega \vec{v}$.

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$$

– **вектор Умова-Пойтинга** – энергия, переносимая электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Давление электромагнитных волн

Поглощаясь каким-либо телом, электромагнитная волна сообщает этому телу некоторый импульс, т.е. оказывает на него давление.

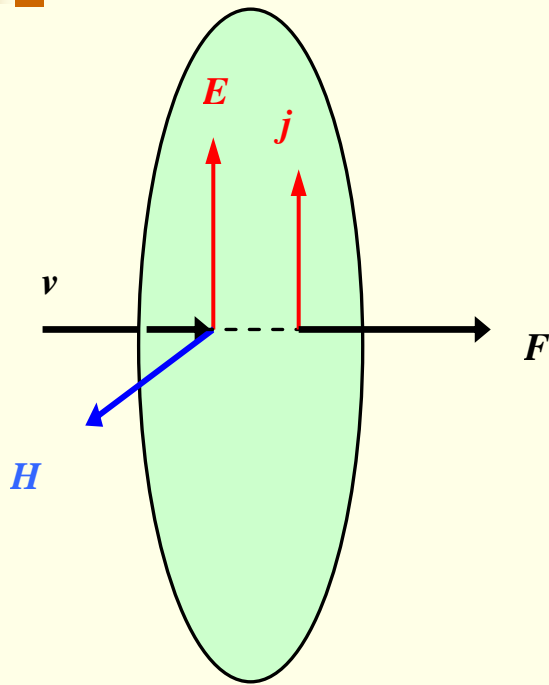


Плоская волна нормально падает на поверхность тела с $\varepsilon = 1$, $\mu = 1$.

Электрическое поле волны возбуждает в теле ток

плотности $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, где $\sigma = \frac{1}{\rho}$

σ – удельная проводимость,
 ρ – удельное сопротивление.



Магнитное поле волны действует на этот ток силой Лоренца.

$$\vec{F} \uparrow\uparrow \vec{v}_{\text{волны}} .$$

Сила Лоренца, действующая на единицу объема

$$\vec{F}_{\text{ед.}V} = [\vec{j}, \vec{B}] = [\vec{j}, \mu\mu_0 \vec{H}] = \mu_0 [\vec{j}, \vec{H}] . \quad (1)$$

$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$ – сила Лоренца, действующая на точечный заряд q .

$\vec{F}_L = dq[\vec{v}, \vec{B}]$ – сила Лоренца, действующая на заряд dq в объёме dV .

$$\vec{F}_{\text{ед.}V} = \frac{dq}{dV} [\vec{v}, \vec{B}] = \frac{dq}{dSdl} \cdot \frac{dt}{dt} [\vec{v}, \vec{B}] = \frac{dq}{\underbrace{dtdS}_j} \left[\overbrace{\frac{dl}{\vec{v} dt}}^{\vec{j}}, \vec{B} \right] = [\vec{j}, \vec{B}] .$$

Поверхностному слою $dV = \underbrace{dS}_1 \cdot dl$ в единицу времени сообщается импульс

$$\left. \begin{aligned} dp &= F_{e\partial.V} dl \cdot \underbrace{dS}_1 \cdot \underbrace{dt}_1 \\ \angle \vec{j}, \vec{H} &= \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} dp = \mu_0 jHdl \quad (2)$$

В объеме dV за единицу времени поглощается энергия

$$dW = jEdl \quad (3)$$

Делим уравнение (2) на (3):

$$\frac{dp}{dW} = \frac{p}{W} = \frac{\mu_0 jHdl}{jEdl} = \mu_0 \frac{H}{E} \quad \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H \quad \Rightarrow$$

$$\frac{H}{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}}$$

$$\frac{p}{W} = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \frac{1}{c}. \quad (4)$$

$$p = \frac{W}{c}. \quad (5)$$

$$\varepsilon = 1, \quad \mu = 1; \quad p = mc$$

$$W = mc^2$$

– СВЯЗЬ МАССЫ И
ЭНЕРГИИ.

Измеренное Лебедевым и рассчитанное в соответствии с теорией Максвелла значение импульса p мало.

Максвелл показал, что давление эл. магнитной волны

$$p = (1 + R)w$$

где R -коэффициент отражения, $R_z=1$, $R_q=0$

Для идеально отражающей поверхности импульс в два раза больше.

Излучение электромагнитных волн.

Излучение диполя

Процесс возбуждения электромагнитных волн какой-либо системой в окружающее пространство называется *излучением электромагнитных волн.*

Электромагнитные волны возбуждают

- электрические заряды, движущиеся с ускорением (электрическая цепь, ток в которой изменяется; электроны, ускоряемые в ускорителях),
- в веществе возможно излучение Вавилова-Черенкова (1934 г.) при движении частиц с фазовой скоростью большей скорости света в этом веществе.

Простейшая излучающая система – *электрический диполь*, дипольный момент p_1 которого изменяется с течением времени.

Такой диполь называется *осциллятором* или *элементарным вибратором*.

Осциллятором пользуются для моделирования и расчета полей реальных систем. Если размеры излучающей системы малы по сравнению с длиной λ излучаемых волн, то в *волновой зоне*, т.е. в точках, отстоящих от системы на $r \gg \lambda$, поле излучения близко к полю излучения осциллятора, имеющего такой же электрический момент, как и вся излучающая система.

Линейный гармонический осциллятор —

электрический диполь, момент \vec{p}_l которого изменяется по гармоническому закону

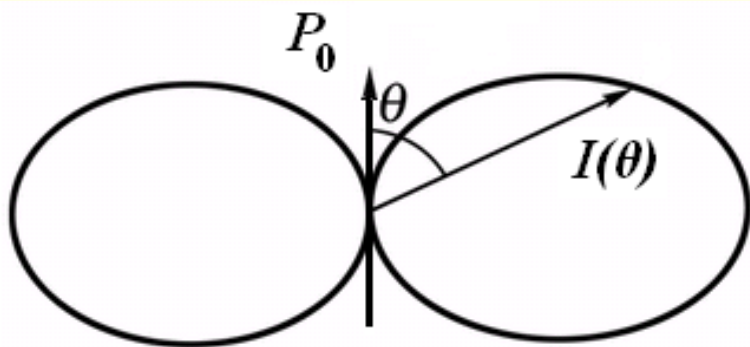
$$\vec{p}_l = \vec{p}_0 \cos \omega t; \quad |\vec{p}_0| = \text{const} = q \cdot l.$$

Если поле распространяется в однородной, изотропной среде, то во всех точках, находящихся на одинаковом расстоянии r от диполя, фаза гармонических колебаний одинакова. Следовательно, волновой фронт сферический, и волна, излучаемая диполем, *сферическая*.

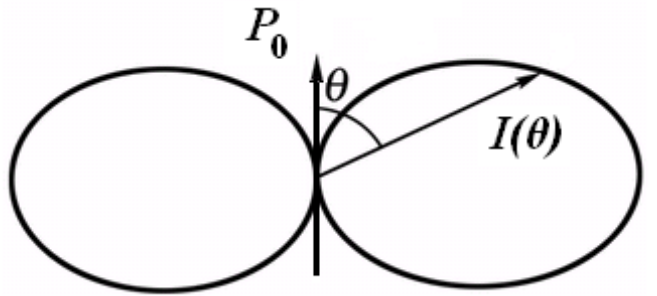
Амплитуда колебаний векторов E и H пропорциональна $\frac{1}{r} \sin \theta$, θ – угол между вектором

r и осью диполя.

Интенсивность излучения $I \sim A^2 \sim \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$.



В полярных координатах (\vec{r}, θ) зависимость интенсивности излучения от угла θ , называемая **диаграммой направленности излучения диполя**, приведена на рисунке.



Диполь сильнее всего излучает в направлении, составляющем угол

$\theta = \frac{\pi}{2}$, т.е. в плоскости,

проходящей через середину диполя перпендикулярно его оси.

Вдоль своей оси $\theta = 0; \pi$ диполь не излучает совсем.

Средняя мощность излучения диполя (энергия, излучаемая по всем направлениям в единицу времени)

$$\langle P \rangle \sim p_0^2 \omega^4.$$

Следовательно, при малой частоте колебаний ω (например, линии передач переменного тока) излучение электрических систем незначительно.

Шкала электромагнитных волн

В зависимости от частоты (или длины волны $\lambda = \frac{c}{\nu}$),

а так же способа излучения и регистрации, различают несколько видов электромагнитных волн.

- Радиоволны, $\lambda > 5 \cdot 10^{-5}$ м, $\nu < 6 \cdot 10^{12}$ Гц.
- Оптическое излучение (световые волны), условные границы λ : 10 нм ... 1 мм.
- Рентгеновское излучение, $\lambda = 10 - 100$ нм.
- Гамма-излучение, $\lambda < 0,1$ нм.

В связи с особенностями распространения и генерации весь диапазон радиоволн принято делить на 9 поддиапазонов:

- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| 1. сверхдлинные | $\lambda > 10^5$ м, |
| 2. длинные волны | $10^4 - 10^3$ м, |
| 3. средние волны | $10^3 - 10^2$ м, |
| 4. короткие волны | $10^2 - 10$ м, |
| 5. метровые | $10 - 1$ м, |
| 6. дециметровые | $1 - 0,1$ м, |
| 7. сантиметровые | $0,1 - 0,01$ м, |
| 8. миллиметровые | $10^{-2} - 10^{-3}$ м, |
| 9. субмиллиметровые | $10^{-3} - 5 \cdot 10^{-5}$ м. |

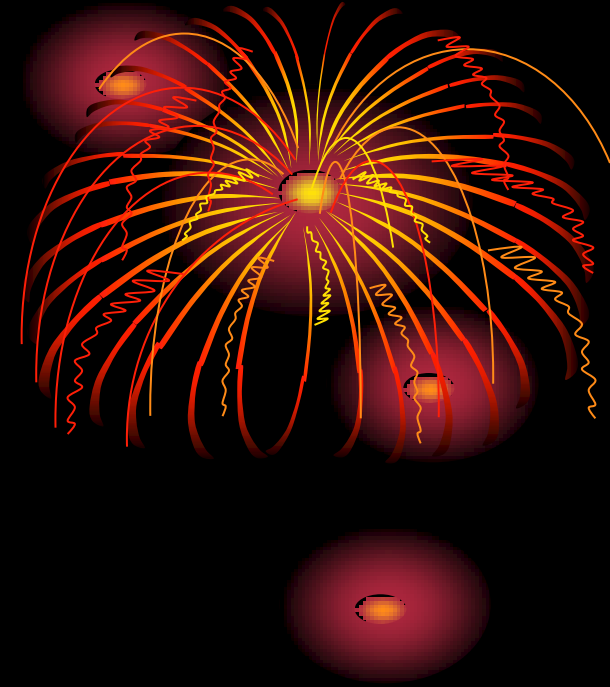
По международному регламенту радиосвязи радиочастоты делятся на 12 диапазонов.

Оптическое излучение:

- **инфракрасное излучение** – электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами, $\lambda = 1\text{мм} - 770\text{ нм}$.
- **видимое излучение** (видимый свет) способно вызывать зрительное ощущение в глазе, $\lambda = 770\text{ нм} - 380\text{ нм}$.
- **ультрафиолетовое излучение**, $\lambda = 380 - 10\text{ нм}$.

Рентгеновское излучение (рентгеновские лучи) – электромагнитное излучение, которое возникает при взаимодействии элементарных частиц и фотонов с атомами вещества, $\lambda = 10 - 100$ нм.

Гамма-излучение (гамма лучи) испускается возбуждёнными атомными ядрами при радиоактивных превращениях и ядерных реакциях, при распаде частиц, аннигиляции частица-античастица и других процессах, $\lambda < 0,1$ нм.



Конец лекции