

Электричество и магнетизм

Семестр 2

ЛЕКЦИЯ № 13

Электромагнитные волны

1. Дифференциальная форма уравнений Максвелла в вакууме. Волновое уравнение.
2. Плоская монохроматическая волна и её характеристики в вакууме.
3. Излучение электромагнитных волн электрическими зарядами.
4. Шкала длин волн электромагнитного излучения.

Единая теория электрических и магнитных явлений.

1. Переменное магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля.
2. Переменное электрическое поле вызывает появление магнитного поля.
3. Взаимно порождаясь они могут существовать независимо от источников заряда или токов которые первоначально создали одно из них.

В сумме это есть электромагнитное поле (ЭМП)

Превращение одного поля в другое и распространение в пространстве – есть способ существования ЭМП.

В 1860г. знаменитый английский физик Джеймс Клерк Максвелл создал единую теорию электрических и магнитных явлений, в которой он:

- использовал понятие ток смещения,
- дал определение ЭМП и
- предсказал существование в свободном пространстве электромагнитного излучения, которое распространяется со скоростью света.

Конкретные проявления ЭМП – радиоволны, свет, γ – лучи и т.д.

Дифференциальная форма уравнений Максвелла в вакууме. Волновое уравнение.

Существование электромагнитного поля следует из уравнений Максвелла.

Рассмотрим однородную нейтральную ($\rho = 0$) непроводящую ($j = 0$) среду, например, для простоты, вакуум. Для этой среды можно записать:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

В случае любой иной однородной нейтральной непроводящей среды, к записанным выше уравнения нужно добавить ε и μ .

Запишем дифференциальные уравнения Максвелла в общем виде:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

Для рассматриваемых свойств среды эти уравнения имеют вид:

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

Будем рассматривать поля \vec{E} и \vec{H} , зависящие только от одной координаты x и времени t . Это *одномерная задача*. Для этого конкретного случая уравнения Максвелла 4 и 2 можно упростить и записать в таком виде:

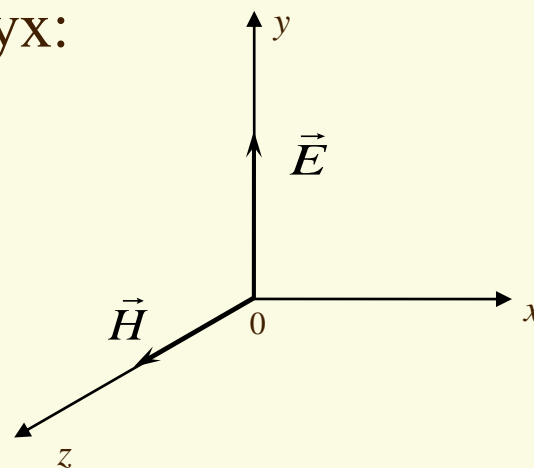
$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial D_y}{\partial t} &= -\frac{\partial H_z}{\partial x}, & \frac{\partial D_z}{\partial t} &= \frac{\partial H_y}{\partial x}, \\ -\frac{\partial B_y}{\partial t} &= -\frac{\partial E_z}{\partial x}, & -\frac{\partial B_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_y}{\partial x}. \end{aligned} \right\}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \vec{i} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \underbrace{\frac{\partial E_z}{\partial x}} \right) + \vec{k} \left(\underbrace{\frac{\partial E_y}{\partial x}} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right)$$

Эти уравнения означают, что изменяющееся во времени электрическое поле D_y порождает магнитное поле H_z , направленное вдоль оси z . Переменное магнитное поле B_y является источником электрического поля, меняющегося вдоль оси z . И так далее. В любом случае эти поля — \vec{E} и \vec{H} — перпендикулярны друг другу.

Примем, для определенности, что электрическое поле направлено вдоль оси y ($E = E_y$, $E_z = 0$), а магнитное — вдоль оси z ($H = H_z$, $H_y = 0$). Тогда последняя система четырех уравнений упростится до двух:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} &= -\frac{\partial H}{\partial x} \\ \frac{\partial B}{\partial t} &= -\frac{\partial E}{\partial x} \end{aligned} \right\}$$



Первое из этих уравнений продифференцируем по времени t , а второе — по координате x :

$$\begin{aligned}\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= -\frac{\partial^2 H}{\partial x \cdot \partial t}, \\ \mu\mu_0 \frac{\partial^2 H}{\partial x \cdot \partial t} &= -\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}.\end{aligned}$$

где в случае среды: $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$, $B = \mu\mu_0 H$.

Сравнивая эти два уравнения, приходим к выводу:

$$\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\mu_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}.$$

Или еще понятнее:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

Это *дифференциальное волновое уравнение*.

Таким образом, решая совместно уравнения Максвелла, мы пришли к выводу, что в однородной изотропной среде электрические (и магнитные!) поля распространяются в виде электромагнитной волны. Теперь известна и скорость этой волны:

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

Здесь:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \quad \text{— скорость электромагнитной волны в вакууме } (\varepsilon = 1 \text{ и } \mu = 1).$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

Это *скалярное волновое уравнение*.

Подобное уравнение можно получить и для магнитной составляющей волны H :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0$$

Это одномерный случай, волна распространяется только вдоль оси x .

Поскольку напряженности электрического и магнитного полей являются векторами, то их вектора \vec{E} и \vec{H} образуют **векторные волновые уравнения**:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \vec{H}}{dt^2} = 0$$

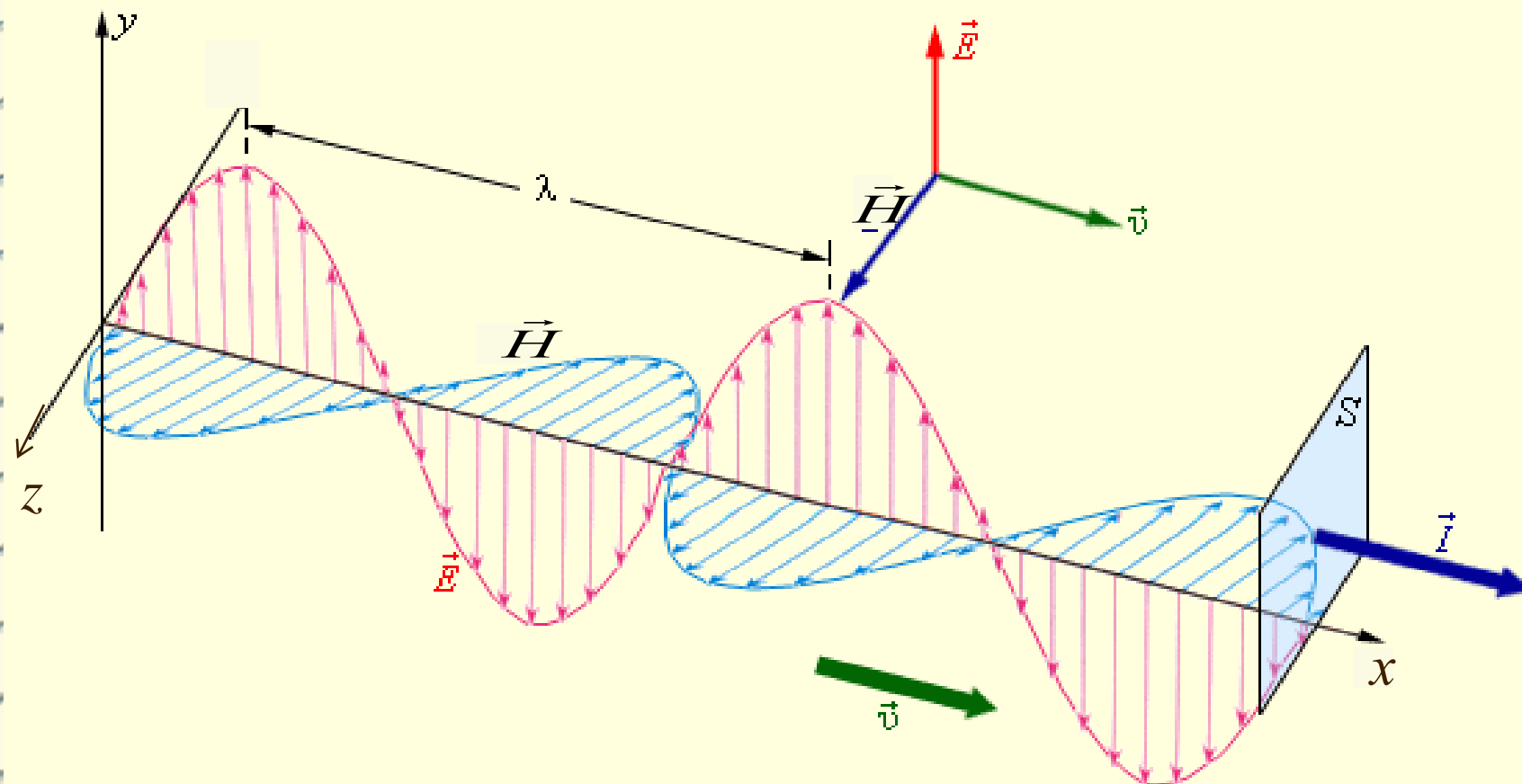
$$\nabla^2 = \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad - \text{ оператор Лапласа}$$

Решение волнового уравнения для плоской волны, т.е. распространяющейся вдоль одного направления x :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

где \vec{E}_0 и \vec{H}_0 - амплитуды напряженностей электрического и магнитных полей; φ_0 - начальная фаза колебаний; $k = \frac{\omega}{v}$ — волновое число.



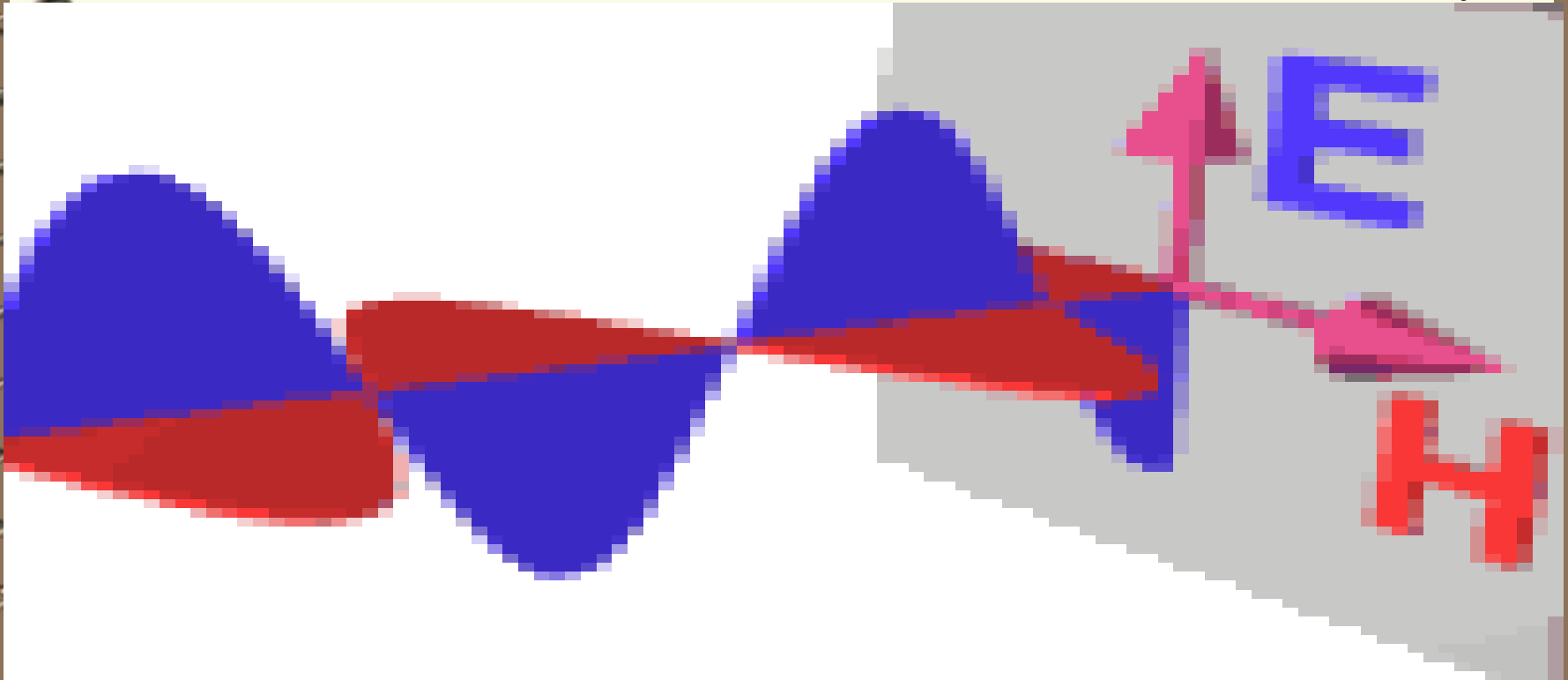
Синусоидальная (гармоническая) электромагнитная волна. Векторы \vec{E} , \vec{H} и \vec{v} взаимно перпендикулярны.

Строго *монохроматическая* волна представляет собой бесконечную во времени и пространстве последовательность «горбов» и «впадин» с одной частотой ω .

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

Фазовая скорость этой волны $v = \lambda \nu$ или $v = \frac{\omega}{k}$



В электромагнитной волне происходят взаимные превращения электрического и магнитного полей. Эти процессы идут одновременно, и электрическое и магнитное поля выступают как равноправные «партнеры». Поэтому объемные плотности электрической и магнитной энергии равны друг другу: $\omega_{\text{эл}} = \omega_{\text{маг}}$.

$$\frac{\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

Отсюда следует, что в электромагнитной волне модули напряженности магнитного поля H и напряженности электрического поля E в каждой точке пространства связаны соотношением :

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

Из теории Максвелла следовало, что электромагнитные волны должны оказывать давление на поглощающее или отражающее тело. Давление электромагнитного излучения объясняется тем, что под действием электрического поля волны в веществе возникают слабые токи, то есть упорядоченное движение заряженных частиц. На эти токи действует сила Ампера со стороны магнитного поля волны, направленная в толщу вещества. Эта сила и создает результирующее давление. Обычно давление электромагнитного излучения ничтожно мало. Так, например, давление солнечного излучения, приходящего на Землю, на абсолютно поглощающую поверхность составляет примерно 5 мкПа. Первые эксперименты по определению давления излучения на отражающие и поглощающие тела, подтвердившие вывод теории Максвелла, были выполнены П. Н. Лебедевым (1900 г.). Опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения электромагнитной теории Максвелла.

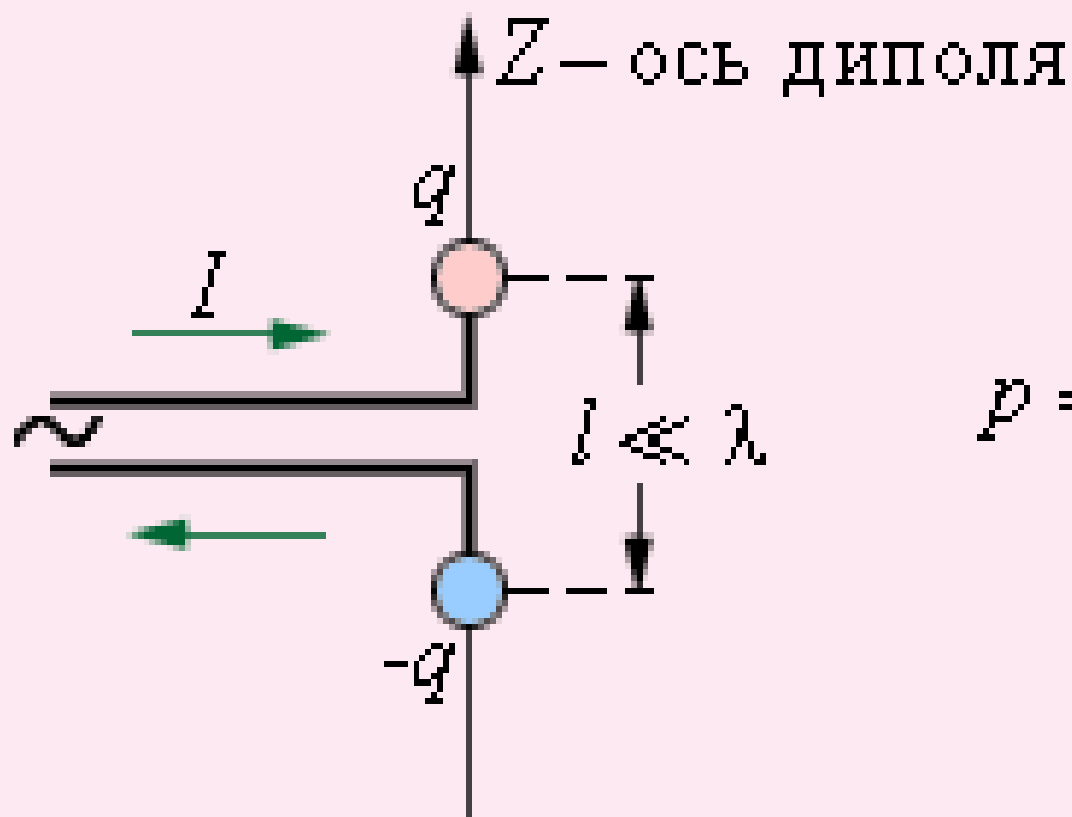
Излучение электромагнитных волн электрическими зарядами

Первое экспериментальное подтверждение электромагнитной теории Максвелла было дано примерно через 15 лет после создания теории в опытах Г. Герца (1888 г.). Герц не только экспериментально доказал существование электромагнитных волн, но впервые начал изучать их свойства – поглощение и преломление в разных средах, отражение от металлических поверхностей и т. п. Ему удалось измерить на опыте длину волны и скорость распространения электромагнитных волн, которая оказалась равной скорости света.

Опыты Герца сыграли решающую роль для доказательства и признания электромагнитной теории Максвелла. Через семь лет после этих опытов электромагнитные волны нашли применение в беспроводной связи (А. С. Попов, 1895 г.).

Электромагнитные волны могут возбуждаться только **ускоренно движущимися зарядами**. Цепи постоянного тока, в которых носители заряда движутся с неизменной скоростью, не являются источником электромагнитных волн. В современной радиотехнике излучение электромагнитных волн производится с помощью антенн различных конструкций, в которых возбуждаются быстропеременные токи. Простейшей системой, излучающей электромагнитные волны, является небольшой по размерам электрический диполь, **дипольный момент** $p(t)$ которого быстро изменяется во времени.

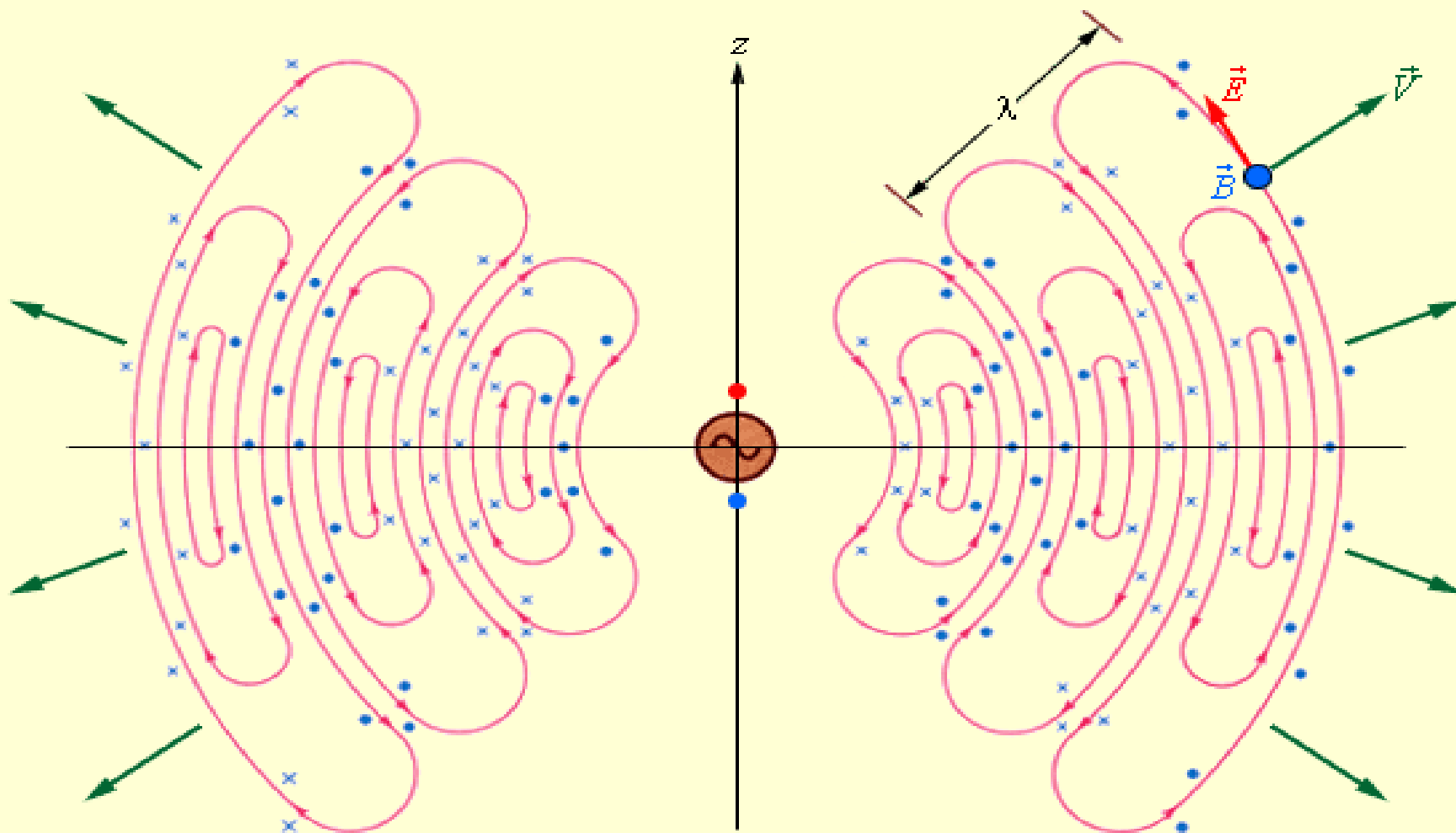
Такой элементарный диполь называют диполем Герца.
В радиотехнике диполь Герца эквивалентен небольшой антенне, размер которой много меньше длины волны λ



$$p = q(t)l = p_0 \cos \omega t$$

Элементарный диполь, совершающий гармонические колебания.

Рисунок дает представление о структуре электромагнитной волны, излучаемой таким диполем.



Излучение элементарного диполя.

Следует обратить внимание на то, что максимальный поток электромагнитной энергии излучается в плоскости, перпендикулярной оси диполя. Вдоль своей оси диполь не излучает энергии. Герц использовал элементарный диполь в качестве излучающей и приемной антенн при экспериментальном доказательстве существования электромагнитных волн.

Работы Герца в области электромагнитных волн имели основополагающее значение для дальнейшего развития в этой области физики. Его опыты были многократно повторены, усовершенствованы и в конечном итоге привели к изобретению радио и телевидения.

Изучение свойств электромагнитных волн, теоретически предсказанных М. Фарадеем и Д. Максвеллом и практически доказанных Г. Герцем, приводило к мысли о возможности их использования для организации беспроводной связи. Несколько исследователей попытались решить эту задачу. Добились успеха наш соотечественник А.С. Попов и итальянец Г. Маркони.



7 мая 1895г. **А. С. Попов** впервые продемонстрировал работу своего "прибора для обнаружения и регистрирования электрических колебаний" на заседании Русского физико-химического общества в ходе обстоятельного доклада. Прибор откликался на посылки волн от "герцевского вибратора", возбуждаемого катушкой Румкорфа, на расстоянии 25 метров. Это была демонстрация первого в мире радиоприёмника, открывшего эру радио.

А.С. Попов использовал удачный индикатор электромагнитных волн, основанный на использовании металлических опилок. Свойство металлических порошков менять свои электрические свойства под действием электромагнитных волн было использовано в приборе, который назывался когерер: в стеклянную трубочку насыпаны мелкие опилки и сделаны металлические выводы из нее. Приемник А.С. Попова выглядел так:



Внешний вид

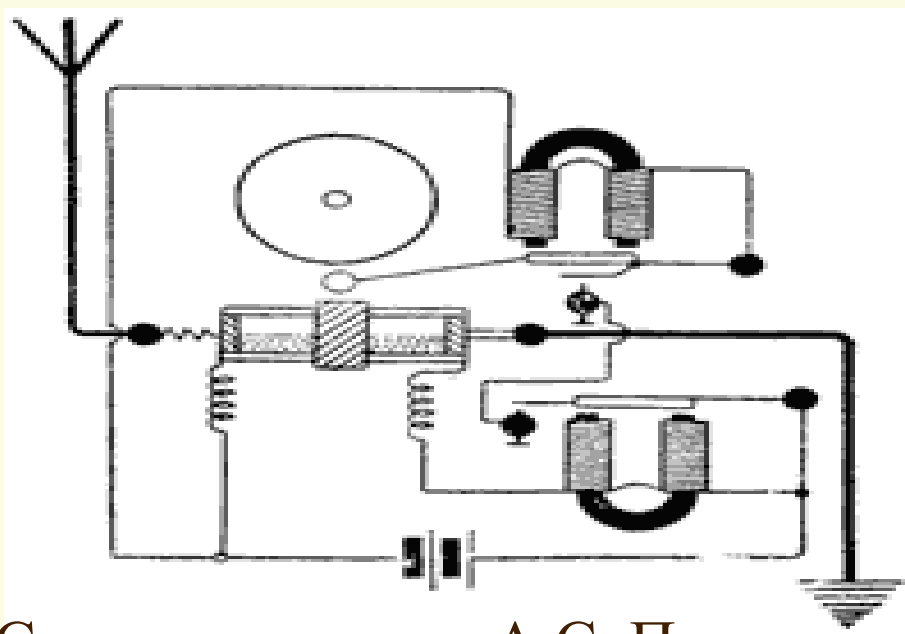


Схема приемника А.С. Попова

Первая в мире смысловая радиограмма,
осуществленная 7 марта 1895 года А.С.

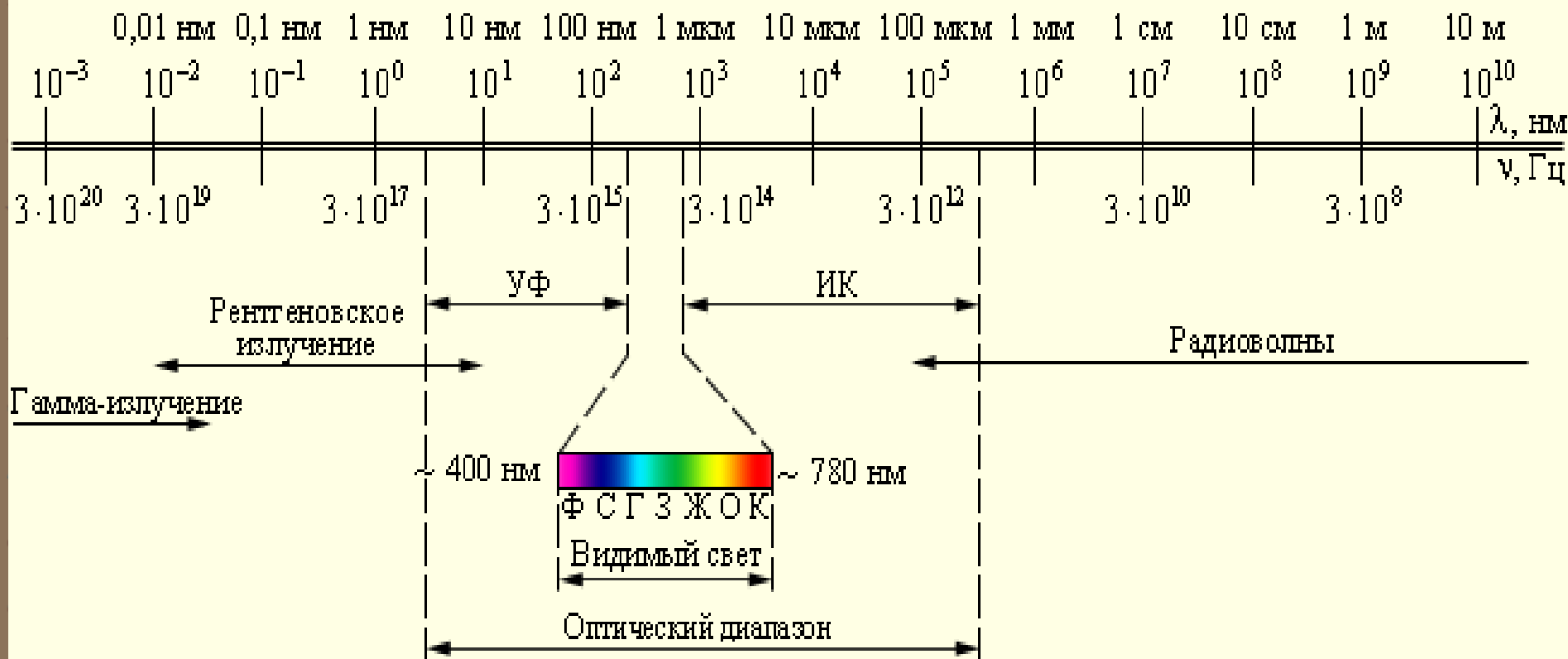
Поповым, содержала всего два слова:

"Генрих Герц" как дань уважения памяти
великого ученого, открывшего дверь в мир
радио.



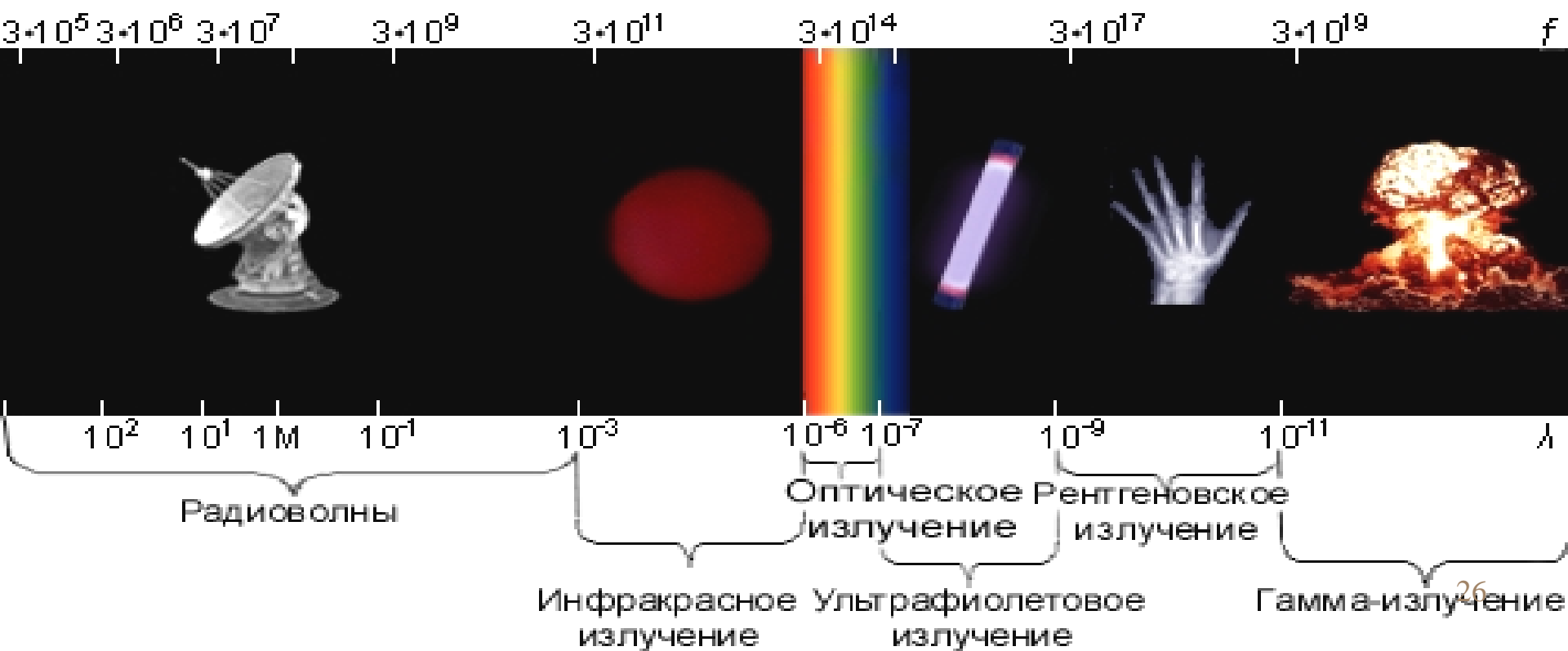
Когерер, используемый Поповым А.С. в радиоприемнике.

Шкала длин волн электромагнитного излучения



Шкала электромагнитных волн. Границы между различными диапазонами условны.

Оптический диапазон длин волн λ ограничен с одной стороны рентгеновскими лучами, а с другой – микроволновым диапазоном радиоизлучения. *Видимый свет (в вакууме): $\lambda = [400 \text{ нм (фиолетовый)} - 760 \text{ нм (красный)}]$*





Лекция закончена!



© САОРІА

Желаю приятного дня
и
хороших эмоций!