


Плотность потока электромагнитного излучения и свойства электромагнитных волн

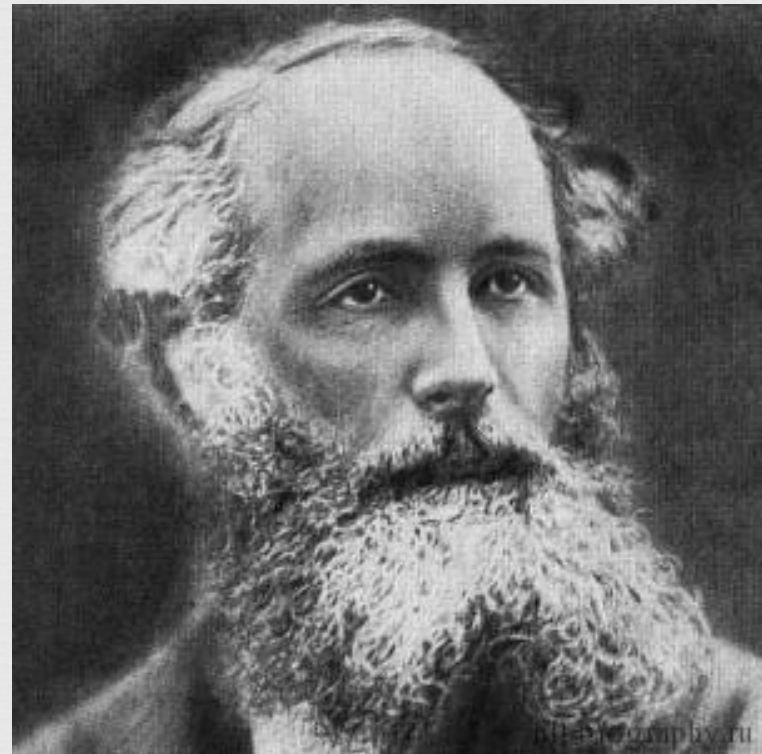


Излученные электромагнитные волны несут с собой энергию. Энергетические характеристики излучения играют важную роль, так как определяют воздействия источников излучения на его приемники.

Электромагнитные волны

- Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано великим английским физиком [Дж. Максвеллом](#) в 1864 году. Максвелл проанализировал все известные к тому времени законы электродинамики и сделал попытку применить их к изменяющимся во времени электрическому и магнитному полям. Он обратил внимание на асимметрию взаимосвязи между электрическими и магнитными явлениями. Максвелл ввел в физику понятие [вихревого электрического поля](#) и предложил новую трактовку закона [электромагнитной индукции](#), открытой [Фарадеем](#) в 1831 г. :

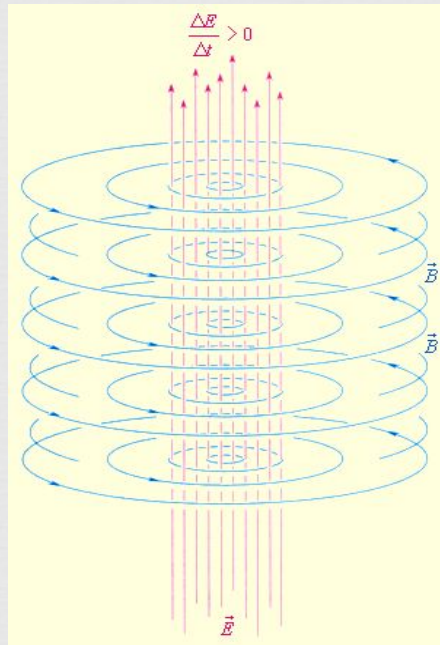
- Всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты.



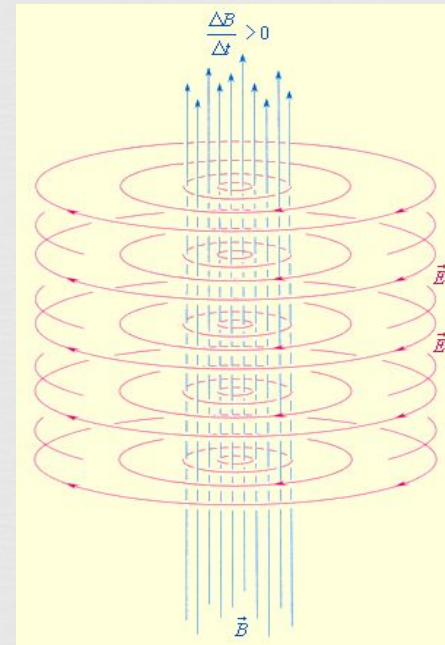
Максвелл высказал гипотезу о существовании и обратного процесса:
Изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.



Гипотеза Максвелла. Изменяющееся электрическое поле порождает магнитное поле



Закон электромагнитной индукции в трактовке Максвелла



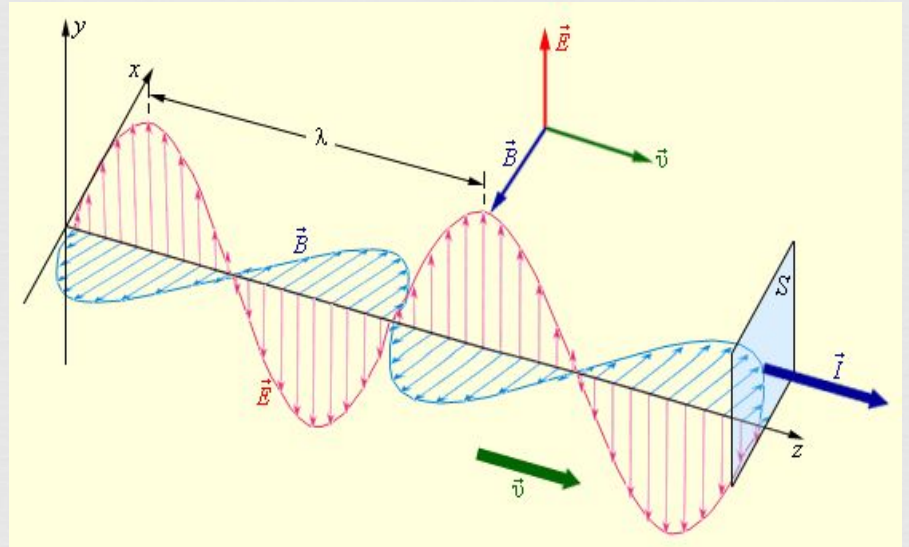
Эта гипотеза была лишь теоретическим предположением, не имеющим экспериментального подтверждения, однако на ее основе Максвеллу удалось записать непротиворечивую систему уравнений, описывающих взаимные превращения электрического и магнитного полей, т. е. систему уравнений **электромагнитного поля** (уравнений Максвелла).

I.

Из теории Максвелла вытекает ряд ВАЖНЫХ ВЫВОДОВ:



- Существуют электромагнитные волны, то есть распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Электромагнитные волны **поперечны** – векторы и перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны



Синусоидальная (гармоническая) электромагнитная волна. Векторы B , E , и V взаимно перпендикулярны

II

Электромагнитные волны распространяются в веществе
с конечной скоростью

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



- Здесь ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные: $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 1,25664 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.
- Длина волны λ в синусоидальной волне связана со скоростью v распространения волны соотношением $\lambda = vT = v / f$, где f – частота колебаний электромагнитного поля, $T = 1 / f$.
- Скорость электромагнитных волн в вакууме ($\varepsilon = \mu = 1$): $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8$ м/с $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с.
- Скорость c распространения электромагнитных волн в вакууме является одной из фундаментальных физических постоянных.
- Вывод Максвелла о конечной скорости распространения электромагнитных волн находился в противоречии с принятой в то время *теорией дальнего действия*, в которой скорость распространения электрического и магнитного полей принималась бесконечно большой. Поэтому теорию Максвелла называют теорией **близкого действия**.

III



- 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: $w_э = w_м$.

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

- Отсюда следует, что в электромагнитной волне модули индукции магнитного поля B и напряженности электрического поля E в каждой точке пространства связаны соотношением

$$B = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} E.$$

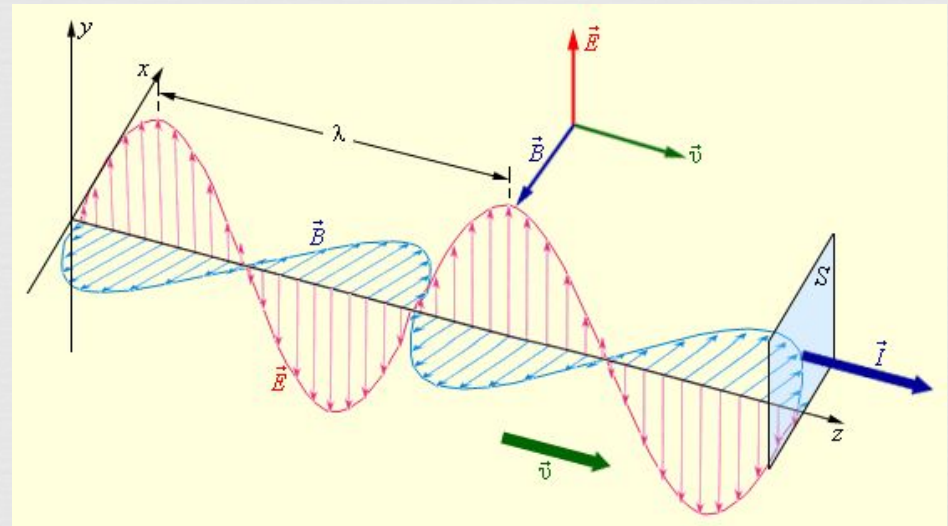
IV



- Электромагнитные волны переносят энергию.
- При распространении волн возникает поток электромагнитной энергии.

Если выделить площадку S , ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны, то за малое время Δt через площадку протечет энергия $\Delta W_{\text{эм}}$, рав

$$\Delta W_{\text{эм}} = (w_{\text{э}} + w_{\text{м}})vS\Delta t$$



Плотностью

потока или интенсивностью I называют

электромагнитную энергию, переносимую волной за единицу времени через поверхность единичной площади:

$$I = \frac{1}{S} \frac{\Delta W_{\text{эм}}}{\Delta t} = (w_{\text{э}} + w_{\text{м}})v.$$



- Подставляя сюда выражения для $w_{\text{э}}$, $w_{\text{м}}$ и v , можно получить:

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} \cdot E^2 = \frac{EB}{\mu\mu_0}.$$

- Поток энергии в электромагнитной волне можно задавать с помощью вектора \vec{I} направление которого совпадает с направлением распространения волны, а модуль равен $EB / \mu\mu_0$. Этот вектор называют вектором Пойнтинга.
- В синусоидальной (гармонической) волне в вакууме среднее значение $I_{\text{ср}}$ плотности потока электромагнитной энергии равно

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_0^2$$

- где E_0 - амплитуда колебаний напряженности электрического поля.
- Плотность потока энергии в СИ измеряется в **ваттах на квадратный метр** (Вт/м²).

V.



- Из теории Максвелла следует, 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](#) в 1900 г. Опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения электромагнитной теории Максвелла

Существование давления электромагнитных волн позволяет сделать вывод о том, что электромагнитному полю присущ **механический импульс**. Импульс электромагнитного поля в единичном объеме выражается соотношением

$$g = \frac{w_{\text{эм}}}{c},$$



- где $w_{\text{эм}}$ - объемная плотность электромагнитной энергии, c - скорость распространения волн в вакууме. Наличие электромагнитного импульса позволяет ввести понятие электромагнитной массы.

- Для поля в единичном объеме $\rho_{\text{эм}} = \frac{g}{c} = \frac{w_{\text{эм}}}{c^2}$.

- Отсюда следует: $w_{\text{эм}} = \rho_{\text{эм}} c^2$.

- Это соотношение между массой и энергией электромагнитного поля в единичном объеме является универсальным законом природы. Согласно [специальной теории относительности](#), оно справедливо для любых тел независимо от их природы и внутреннего строения.

- Таким образом, электромагнитное поле обладает всеми признаками материальных тел - энергией, конечной скоростью распространения, импульсом, массой. Это говорит о том, что электромагнитное поле является одной из форм существования материи.

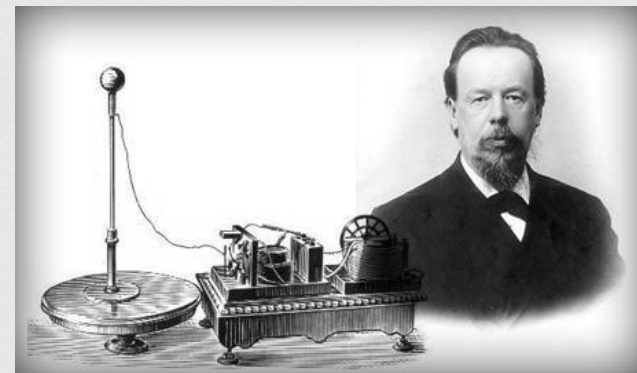
VI.



□ 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.



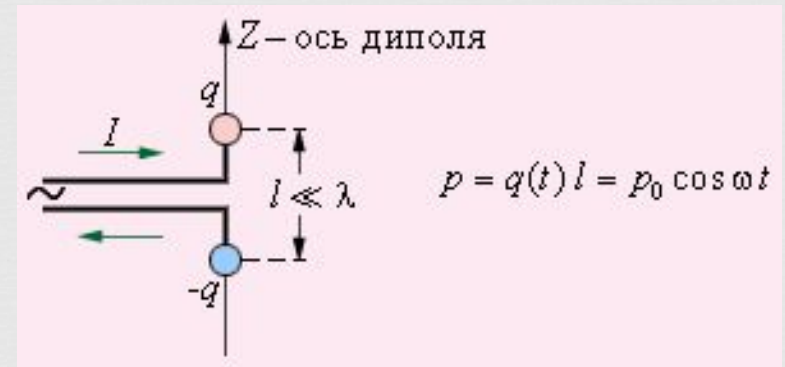
□ Опыты Герца сыграли решающую роль для доказательства и признания электромагнитной теории Максвелла. Через семь лет после этих опытов электромагнитные волны нашли применение в беспроводной связи



VII

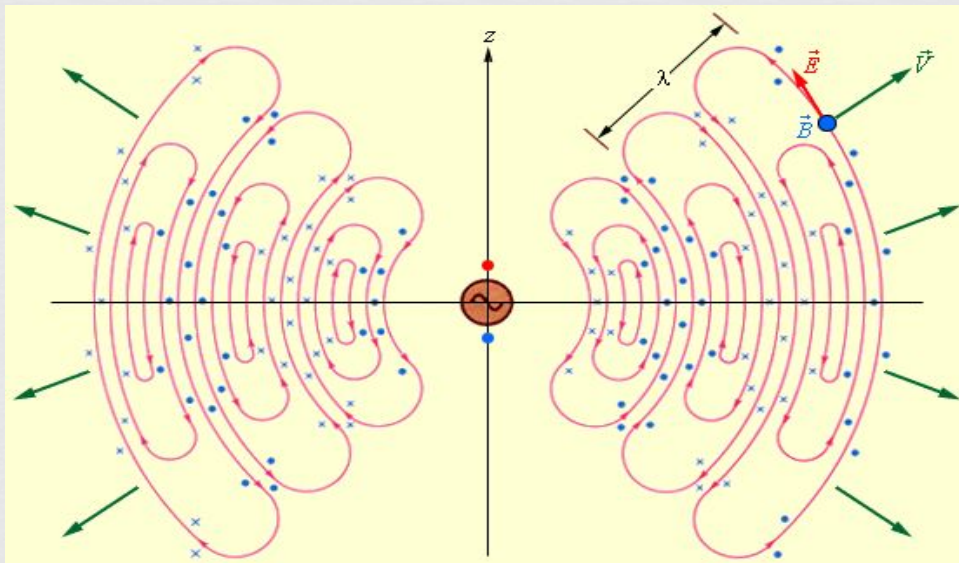


- Электромагнитные волны могут возбуждаться только **ускоренно движущимися зарядами**. Цепи постоянного тока, в которых носители заряда движутся с неизменной скоростью, не являются источником электромагнитных волн. В современной радиотехнике излучение электромагнитных волн производится с помощью антенн 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



- Элементарный диполь, совершающий гармонические колебания

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.



**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**