

# Электромагнитные волны.

## Лекция 9

# Электромагнитная теория

- В XIX веке развитие **электромагнитной теории** привело к предсказанию, а в последствии и экспериментальному подтверждению способности электромагнитных полей распространяться в пространстве. Это достижение открыло возможность создания новых средств связи: вначале беспроводного телеграфа, затем радио и телевидения.

# Электромагнитные волны

- Существование электромагнитных волн теоретически предсказал великий английский физик Джеймс Клерк Максвелл в 1864 году.

# *Уравнения Максвелла.*

- Максвелл проанализировал все известные к тому времени законы электродинамики и показал, что все электрические и магнитные явления можно описать **всего четырьмя уравнениями**. Эти уравнения также фундаментальны, как и законы Ньютона. На их основе было предсказано существование электромагнитных волн.

# 1. Теорема Гаусса для электрического поля.

- Поток вектора напряженности электрического поля через площадку площади  $\Delta S$  равен

$$\Delta\Phi_{\mathbf{E}} = (\mathbf{E}, \mathbf{n})\Delta S$$

- где  $\mathbf{n}$  – нормаль к площадке.
- Обозначим поток напряженности электрического поля через любую замкнутую

поверхность  $S$

$$\Phi_{\mathbf{E}} = \oint_S (\mathbf{E}, \mathbf{n}) dS$$

Тогда теорема Гаусса для электрического поля

имеет вид:  $\oint_S (\mathbf{E}, \mathbf{n}) dS = \frac{q_{\text{внутр.}}}{\epsilon_0}$

(первое уравнение Максвелла)

## 2. Теорема Гаусса для магнитного поля.

- Поток вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  через произвольную замкнутую поверхность обозначим аналогично потоку вектора напряженности  $\mathbf{E}$

$$\Phi_{\mathbf{B}} = \oint_S (\mathbf{B}, \mathbf{n}) dS$$

- Тогда теорема Гаусса для магнитного поля представляется в виде

$$\Phi_{\mathbf{B}} = \oint_S (\mathbf{B}, \mathbf{n}) dS = 0 \quad \begin{array}{l} \text{второе уравнение} \\ \text{Максвелла} \end{array}$$

### 3. Закон электромагнитной индукции.

$$E_u = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- Как известно, вследствие явления электромагнитной индукции изменение магнитного потока порождает вихревое электрическое поле. ЭДС индукции  $E_u$ , по определению, связана с работой сторонних сил по переносу электрического заряда  $q$  по произвольному замкнутому контуру  $L$ .

### 3. Закон электромагнитной индукции.

$$E_u = \frac{A_{\text{сторонних сил}}}{q} = \frac{\sum_{\Delta l_i \in L} (qE, \Delta l_i)}{q} = \oint_L (E, dl) = C_E$$

- Таким образом, ЭДС индукции равна циркуляции  $C_E$  вектора напряженности вихревого электрического поля  $E$ . В результате закон электромагнитной индукции можно записать в виде:

$$C_E = \oint_L (E, dl) = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

*(третье уравнение Максвелла).*



## 4. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции.

- Циркуляция вектора  $B$  в вакууме магнитного поля постоянных токов по любому замкнутому контуру  $L$  прямо пропорциональна алгебраической сумме токов, охватываемых ЭТИМ

**КОНТУРОМ**

$$C_B = \sum_{\Delta l_i \in L} (B, \Delta l_i) = \oint_L (B, dl) = \mu_0 I_{\text{полн.}}$$

- Максвелл обобщил теорему о циркуляции вектора магнитной индукции, добавив в правую часть уравнения еще одно слагаемое  $\mu_0 I_{\text{смещ.}}$ , где  $I_{\text{смещ.}}$  – так называемый, **ток смещения**, связанный с изменением электрического поля.

# Источники магнитного поля

- Максвелл предположил, что источником магнитного поля может служить не только **электрический ток**, но и изменяющееся во времени **электрическое поле** (по аналогии с тем, что изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле).

# Ток смещения

- Например, через конденсатор постоянный ток не течет, однако может течь переменный ток разряда, связанный с изменением электрического поля внутри конденсатора, т.е. “ток смещения”, который равен

$$I_{\text{смещ.}} = \frac{dq}{dt}$$

- Здесь  $q$  – изменяющийся заряд конденсатора, который выражается через напряженность  $E$  электрического поля внутри конденсатора.

$$q = CU = \frac{\varepsilon_0 S}{d} Ed = \varepsilon_0 ES$$

- где  $S$  – площадь пластин конденсатора.
- Т.к. вне конденсатора напряженность электрического поля  $E = 0$ , то поток вектора напряженности через любую замкнутую поверхность, внутри которой лежит одно из пластин конденсатора .

Тогда ток смещения равен

$$I_{\text{смещ.}} = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

*Четвертое уравнение  
Максвелла*

$$C_B = \oint_L (\mathbf{B}, d\mathbf{l}) = \mu_0 (I + I_{\text{смещ.}})$$

,  $\Rightarrow$

$$C_B = \oint_L (\mathbf{B}, d\mathbf{l}) = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

# Физический смысл уравнений Максвелла.

- 1 уравнение Максвелла является обобщением закона Кулона. Оно связывает электрическое поле с его источниками – электрическими зарядами. Это основное уравнение электростатики.

# Физический смысл уравнений Максвелла.

- 2 уравнение Максвелла – *есть математическое выражение факта отсутствия изолированных магнитных зарядов. Это основное уравнение магнитостатики.*

# Физический смысл уравнений Максвелла.

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



# Физический смысл уравнений Максвелла.

- 4 уравнение Максвелла.  
*Изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.*
- Уравнения Максвелла описывают всю совокупность электрических и магнитных явлений, а также оптические явления.

# Следствия из уравнений Максвелла.

- 1. Существует особая форма материи – *электромагнитное поле*, характеризующееся двумя векторами:  $E$  и  $B$ . В частном случае неизменных (стационарных) полей имеется либо только электрическое поле ( $B = 0, E \neq 0$ ), либо только магнитное поле ( $E = 0, B \neq 0$ ).

# Следствия из уравнений Максвелла.

- **2. Существуют электромагнитные волны**, то есть распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Это следует из третьего и четвертого уравнений Максвелла, т.к. переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, которое в свою очередь порождает переменное электрическое поле, и т.д., т.е. происходит периодический или волнообразный процесс.
- В электромагнитной волне происходят колебания полей, а не вещества, как в случае механических волн.

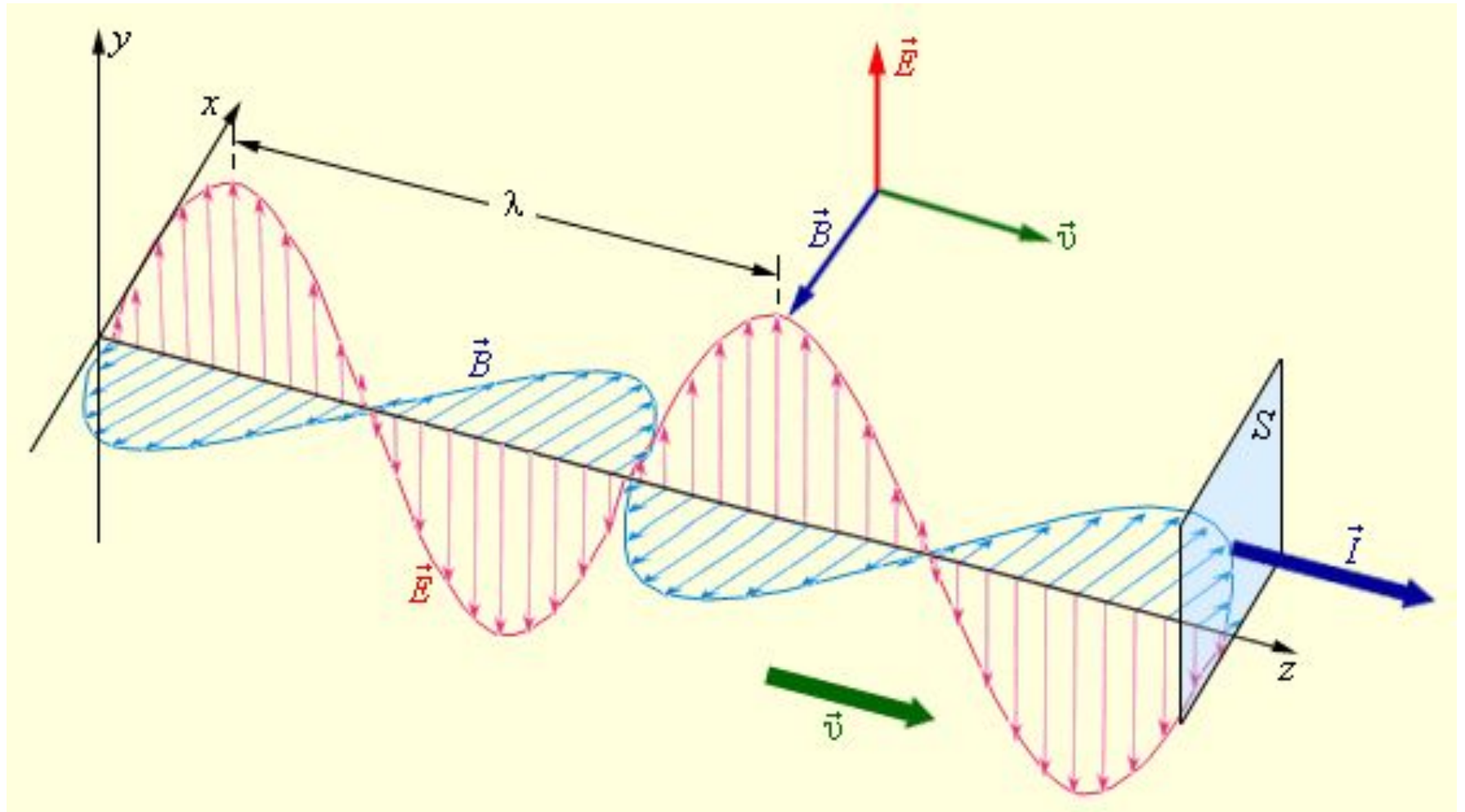
# Следствия из уравнений Максвелла.

- **3. Электромагнитные волны – поперечные волны**, т.е. векторы  $E$  и  $B$  в электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. При этом векторы  $V$ ,  $E$  и  $B$  образуют правую тройку.
- Уравнение электромагнитной волны, изображенной на рис. имеет вид:

$$E = E_y(z, t) = E_0 \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{V} \right) + \varphi_0 \right]$$

$$B = B_x(z, t) = B_0 \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{V} \right) + \varphi_0 \right]$$

# Связь векторов $\mathbf{B}$ и $\mathbf{E}$



- Т.к. электромагнитное поле в волне не связано с источником излучения, то векторы  $E$  и  $B$  могут изменяться в пространстве, как по величине, так и по направлению, при этом векторы  $E$  и  $B$  остаются взаимно перпендикулярными.
- Если каждый из векторов  $E$  и  $B$  остается все время в одной плоскости, то такая волна называется *линейно поляризованной (плоско поляризованной)*.
- Плоскость, проходящая через векторы  $V$  и  $E$  называется *плоскостью поляризации*.
- Возможны также и другие виды поляризации, например, *циркулярная поляризация*, когда вектор  $E$  вращается по кругу.

# Следствия из уравнений Максвелла.

- 4. Электромагнитные волны распространяются в веществе с конечной скоростью.
- Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

- Подставляя в эту формулу значения электрической и магнитной постоянных, получим  $V = \frac{\text{М}}{\sqrt{\left(8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{М}}\right) \cdot \left(4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{ГН}}{\text{М}}\right)}} = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \approx 3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} = c$

# Следствия из уравнений Максвелла.

- **Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна скорости света  $c$ . Отсюда Максвелл сделал вывод, что свет – это электромагнитная волна.**
- Скорость электромагнитной волны в среде зависит от диэлектрической и магнитной проницаемости среды  
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$
- Скорость  $c$  распространения электромагнитных волн в вакууме является одной из фундаментальных физических постоянных.



# Следствия из уравнений Максвелла.

- Приравнивая эти выражения, получим связь между напряженностью электрического поля  $E$  и индукцией  $B$  магнитного поля в электромагнитной волне.

$$B = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} E = \frac{E}{c}$$

- При распространении электромагнитной волны в среде эта связь имеет вид:

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

# Следствия из уравнений Максвелла.

- 5. 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:

формулам:

$$w_E = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$$

$$w_M = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

# Следствия из уравнений Максвелла.

- **6. Электромагнитные волны переносят энергию.** При распространении волн возникает поток электромагнитной энергии. Если выделить площадку  $S$  (см. рис. 4.1.1), ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны, то за малое время  $\Delta t$  через площадку протечет энергия  $\Delta W$ , равная
$$\Delta W_{\text{эм}} = (w_E + w_M) V \Delta t S$$

- *Плотностью потока энергии* или *интенсивностью*  $I$  называется электромагнитная энергия, переносимая волной за единицу времени через поверхность единичной площади:

$$I = \frac{\Delta W_{\text{эм}}}{\Delta t S} = (w_E + w_M) V$$

- Воспользуемся формулами для плотности энергии и скорости электромагнитной волны и получим следующие выражения для плотности

потока энергии:

$$I = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu \mu_0}} \cdot E^2 = \frac{EB}{\mu \mu_0}$$

- Поток энергии в электромагнитной волне можно задавать с помощью вектора  $I$ , направление которого совпадает с направлением распространения волны, а модуль равен плотности потока энергии, вычисляемой по формуле. Этот вектор называют *вектором Умова-Пойнтинга* (1885 г.).

$$I = \frac{1}{\mu\mu_0} [\mathbf{E}, \mathbf{B}]$$

- Плотность потока энергии в СИ измеряется в ваттах на квадратный метр ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

# Следствия из уравнений Максвелла.

- **7. Электромагнитные волны имеют такие же свойства, как и механические волны. Поэтому для них характерны такие явления, как отражение, преломление, интерференция и дифракция.**

# Следствия из уравнений Максвелла.

- **8. Электромагнитные волны оказывают давление на поглощающее или отражающее тело.** Давление электромагнитного излучения объясняется на основе теории Максвелла 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.
- Существование давления электромагнитных волн позволяет сделать вывод о том, что **электромагнитному полю присущ механический импульс**

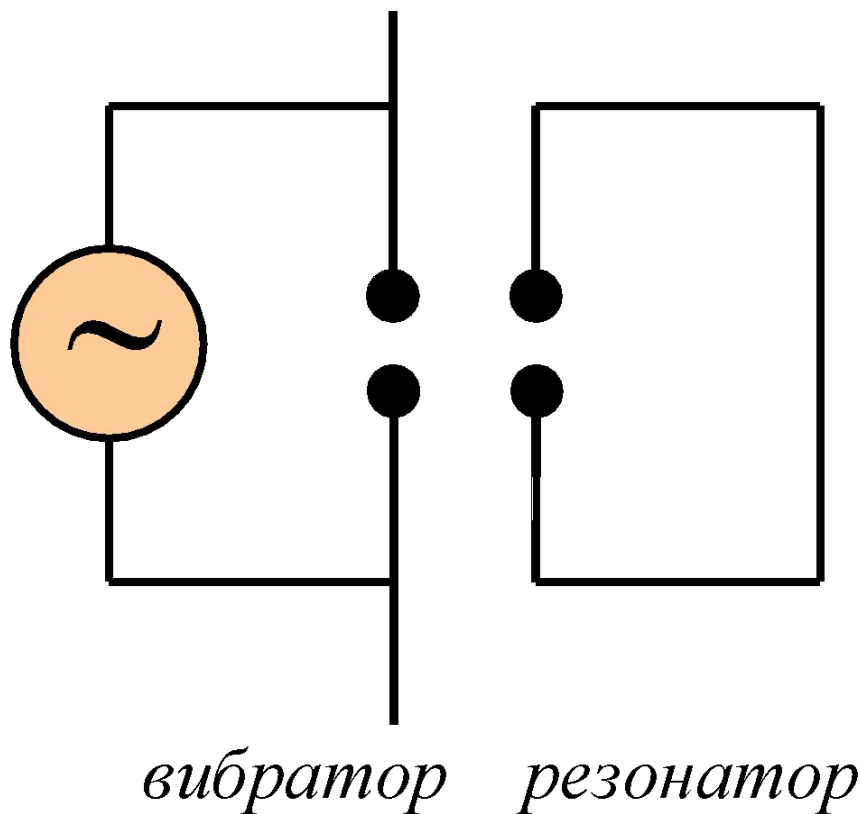


***§2. ГЕНЕРАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.***

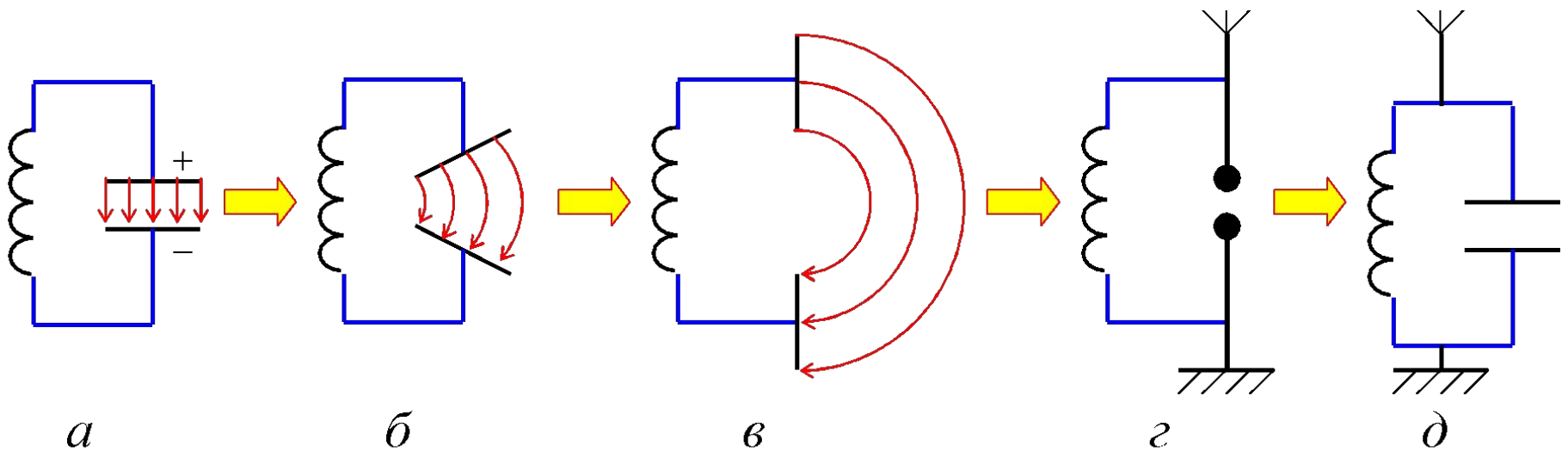
- Первое экспериментальное подтверждение электромагнитной теории Максвелла было получено спустя 10 лет после смерти Максвелла в 1887 году. Генрих Герц поставил ряд опытов, из которых было доказано существование электромагнитных волн и изучены их свойства, такие как – прямолинейность распространения, 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.).

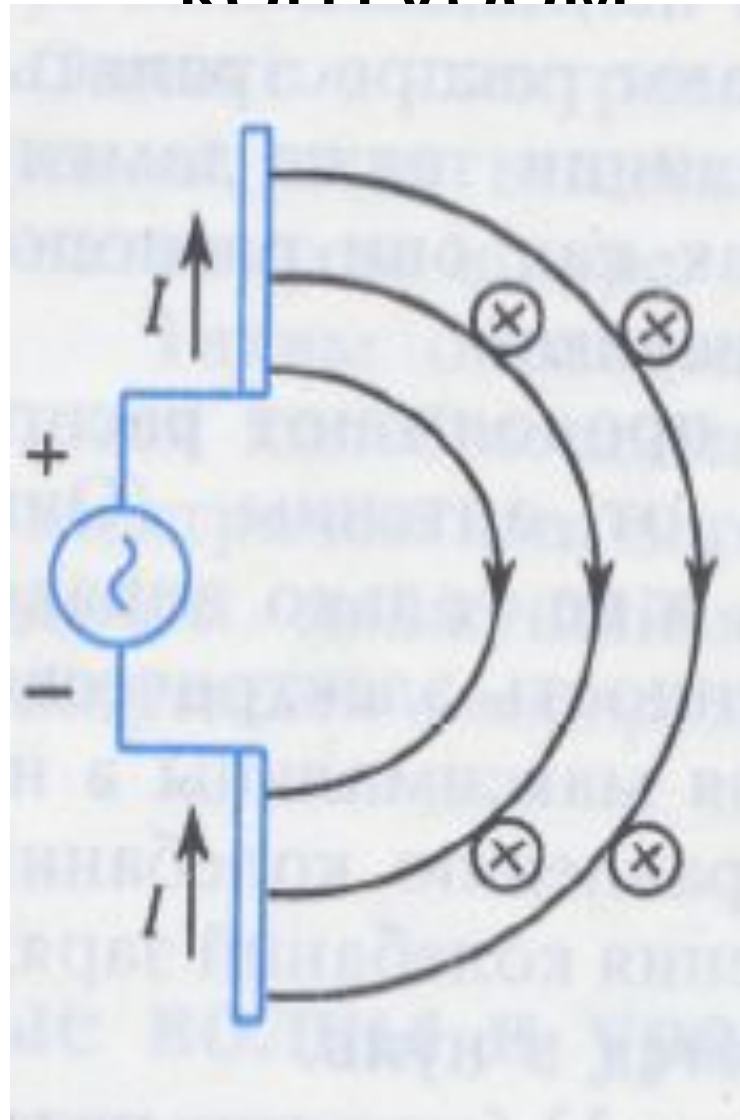
# Опыт Герца. *Вибратор Герца*



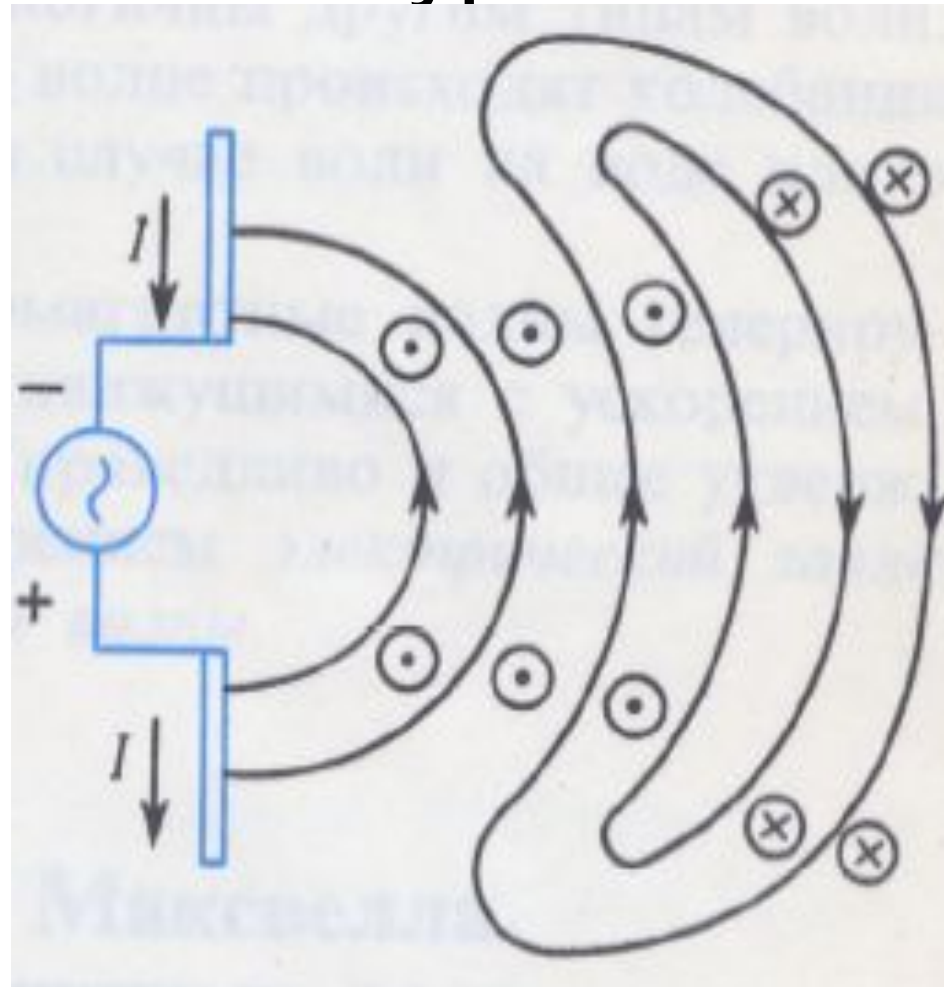
- Вибратор Герца это, по сути, *открытый колебательный контур*.



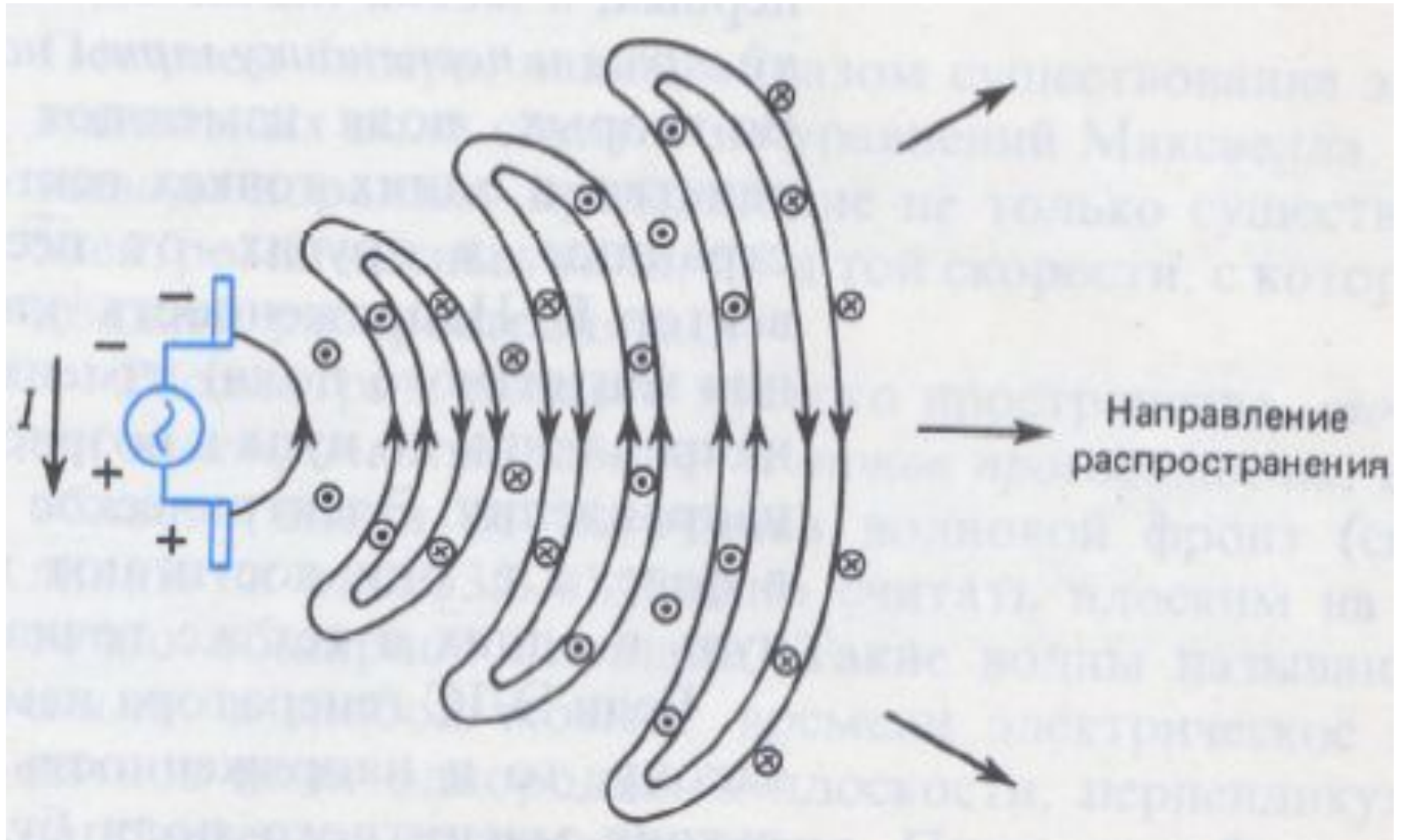
# Излучение электромагнитных волн открытым колебательным контуром



# Излучение электромагнитных волн открытым колебательным контуром



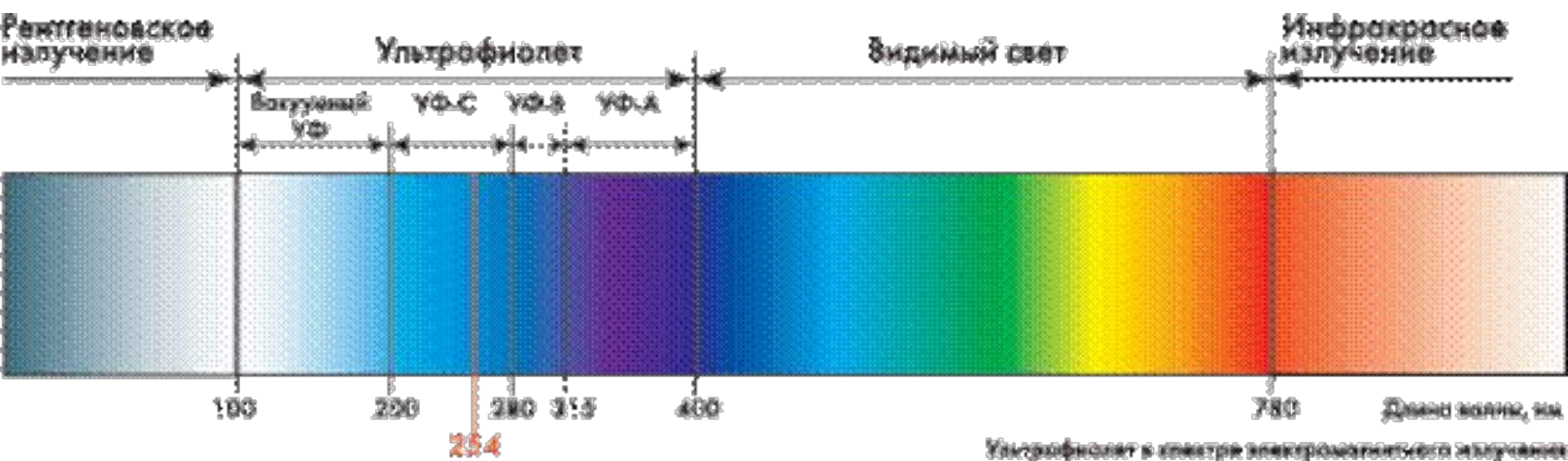
# Излучение электромагнитных волн открытым колебательным контуром





# Выводы

1. Электромагнитные волны – поперечные.
2. Электромагнитные волны **генерируются колеблющимися, т.е. движущимися с ускорением электрическими зарядами.**  
Справедливо и более общее утверждение: **движущийся с ускорением электрический заряд излучает электромагнитные волны.**



## §3. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.

# радиоволны

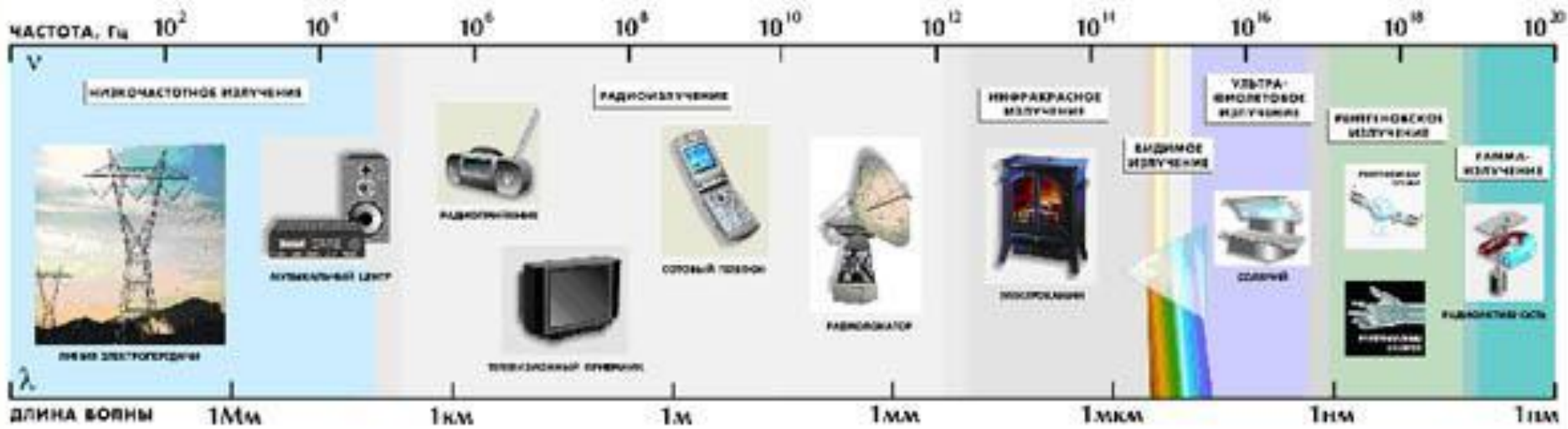
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

- **1. Радиоволнами** называются электромагнитные волны, длина волны которых в вакууме  $\lambda > 5 \cdot 10^{-5}$  м (соответственно частота  $\nu < 6 \cdot 10^{12}$  Гц).
- Здесь выделяют область **длинных волн**:  $\lambda > 1$  км ( $\nu < 3 \cdot 10^5$  Гц),
- **средних волн**:  $\lambda = 100$  м – 1 км ( $\nu = 3 \cdot 10^5$  –  $3 \cdot 10^6$  Гц),
- **коротких волн**:  $\lambda = 10$  м – 100 м ( $\nu = 3 \cdot 10^6$  –  $3 \cdot 10^7$  Гц),
- УКВ **ультракоротких волн**:  $\lambda < 10$  м ( $\nu > 3 \cdot 10^7$  Гц).

# Оптическое излучение

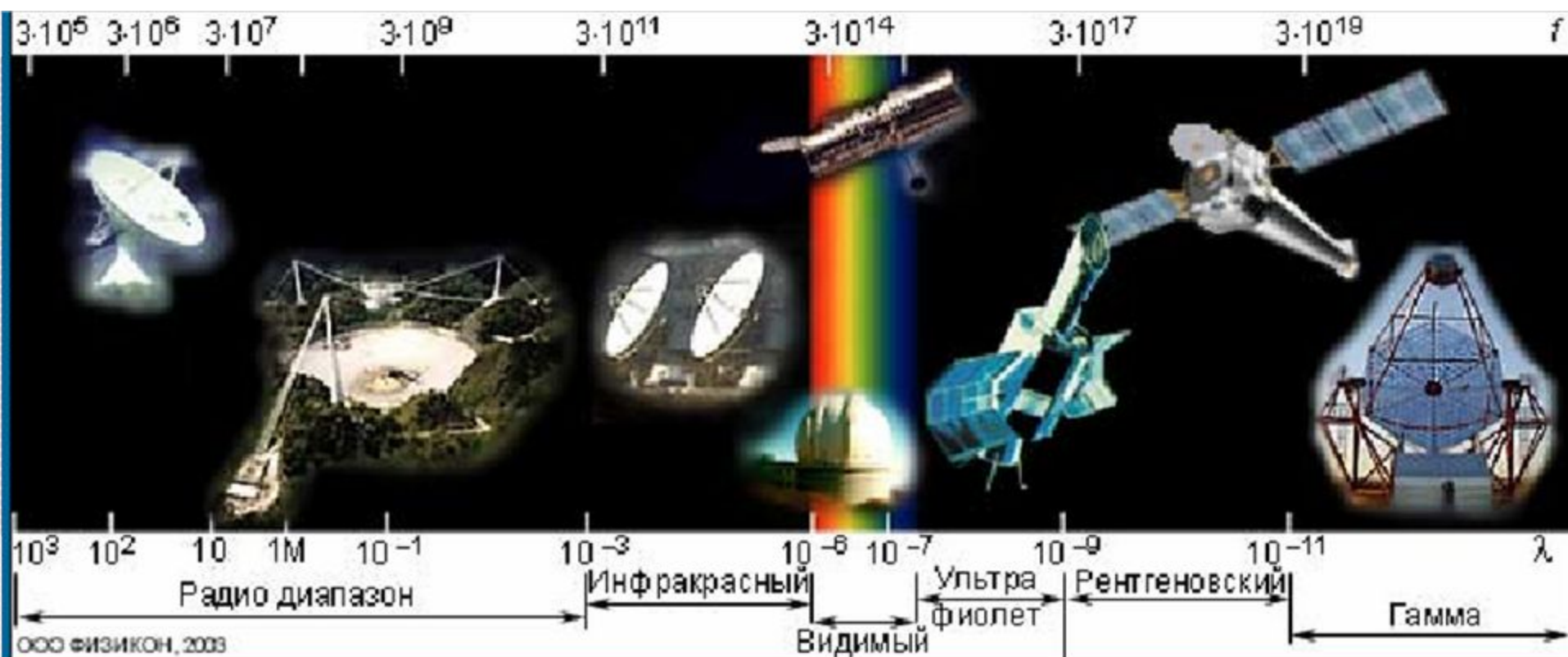
- 2. *Оптическим излучением, или светом*, называются электромагнитные волны, длины которых в вакууме лежат в интервале  $\lambda = 10 \text{ нм} - 1 \text{ мм}$  ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).
- Оптическое излучение разделяется на
- а) *инфракрасное излучение* – электромагнитное излучение, испускаемое нагретыми телами, длины волн которого в вакууме лежат в пределах  $\lambda = 770 \text{ нм} - 1 \text{ мм}$ ;
- б) *видимое излучение (видимый свет)* – электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме  $\lambda = 380 \text{ нм} - 770 \text{ нм}$ , которое способно непосредственно вызывать зрительное ощущение в человеческом глазе;
- в) *ультрафиолетовое излучение* – электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме  $\lambda = 10 \text{ нм} - 380 \text{ нм}$ . Ультрафиолетовое излучение получается с помощью тлеющего

# ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ



# Рентгеновское излучение

- *3. Рентгеновским излучением* называется электромагнитное излучение, которое возникает при взаимодействии заряженных частиц и фотонов с атомами вещества и характеризуется длинами волн в вакууме, лежащими в диапазоне  $\lambda = 0,01 \text{ нм} - 10 \text{ нм}$ .



# Гамма-излучение

- *Гамма-излучением (или гамма-лучами)* называется электромагнитное излучение с длинами волн в вакууме  $\lambda < 0,01$  нм, которое возникает при распаде частиц, аннигиляции пар частица-античастица, а также выделяется в ядерных реакциях и других процессах.



