



Колебания и волны.  
Геометрическая и волновая оптика

Кузнецов Сергей Иванович  
доцент кафедры  
ОФ ЕНМФ ТПУ

## **Тема 6 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ (ЭМВ)**

**6.1 Генерация ЭМВ**

**6.2 Дифференциальное уравнение ЭМВ**

**6.3 Экспериментальное исследование  
ЭМВ**

**6.4 Энергия и импульс ЭМП**

## 6.1 Генерация ЭМВ

Возможность существования электромагнитных волн предсказывал еще **Майкл Фарадей** в 1832 г., обобщая известные к тому времени данные по изучению электричества и магнетизма.

Теоретически обосновал это предположение **Дж. Максвелл**. С этим обоснованием мы познакомились в четвертой части курса.



**Максвелл Джеймс Клерк**  
(1831 – 1879) – *английский физик*, член Эдинбургского (1855) и Лондонского (1861) королевских обществ с 1871 г.

Работы посвящены электродинамике, молекулярной физике, общей статистике, оптике, механике, теории упругости.

Самым большим научным достижением Максвелла является созданная им в 1860 – 1865 *теория электромагнитного поля*, которую он сформулировал в виде системы нескольких уравнений (*уравнения Максвелла*), выражающих все основные закономерности электромагнитных явлений..

# Полная система уравнений Максвелла в

дифференциальной и интегральной формах имеет вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \oint_L (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = \int_S \left( \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}$$

- обобщенный закон Био-Савара-Лапласа

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \oint_L (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}$$

закон Фарадея

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}, \quad \oint_S (\mathbf{D}, d\mathbf{S}) = \int_V \rho dV$$

формула Гаусса

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \oint_S (\mathbf{B}, d\mathbf{S}) = 0$$

отсутствие магн. зарядов

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_{стр}$$

№	Название	Дифференциальная форма	Интегральная форма	Физический смысл
1	Закон индукции Фарадея	$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое электрическое поле порождается изменением магнитной индукции и наоборот
2	Обобщенный закон Био – Саварра – Лапласа	$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{encl}} + \oint_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое магнитное поле порождается электрическим током и изменением электрической индукции
3	Теорема Гаусса для вектора $\vec{D}$	$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q_{\text{encl}}$	Электрический заряд является источником электростатического поля
4	Теорема Гаусса для вектора $\vec{B}$	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$	Магнитная индукция не расходится (магнитных зарядов нет)
5	Электростатическая индукция	$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$	Связь электрической индукции с напряженностью электростатического поля	
6	Магнитная индукция	$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$	Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля	
7	Плотность тока	$\vec{j} = \sigma \vec{E}$	Связь плотности тока с напряженностью электростат. поля (Закон Ома в диф. форме)	



*Герц Генрих Рудольф* (1857 – 1894) – *немецкий физик*. Окончил Берлинский университет (1880 г.) и был ассистентом у Г. Гельмгольца. В 1885 – 89 гг. – профессор Высшей технической школы в Карлсруэ. Основные работы относятся к электродинамике, одним из основоположников которой он является, и механике.

В 1888г. экспериментально *доказал существование электромагнитных волн*, распространяющихся в свободном пространстве, предсказанных теорией Максвелла. Экспериментируя с электромагнитными волнами, наблюдал их отражение, преломление, интерференцию, поляризацию. Установил, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света. В 1887 наблюдал внешний фотоэффект. Исследования Герца посвящены также катодным лучам, теории удара упругих тел и т. п.

**В колебательном контуре**, образованном конденсатором  $C$  и катушкой  $L$  **электрическое поле сосредоточено в зазоре между обкладками**, а магнитное – **внутри катушки**.

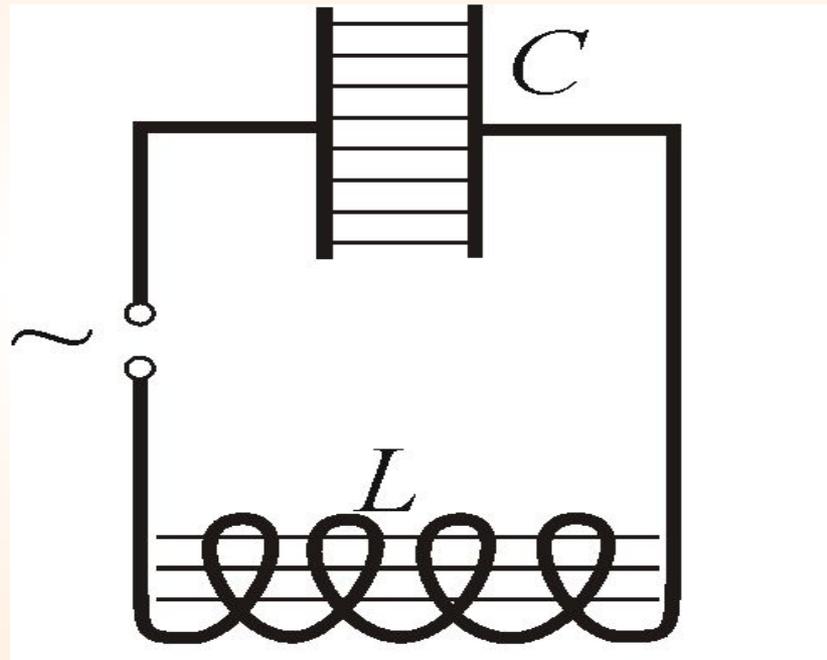
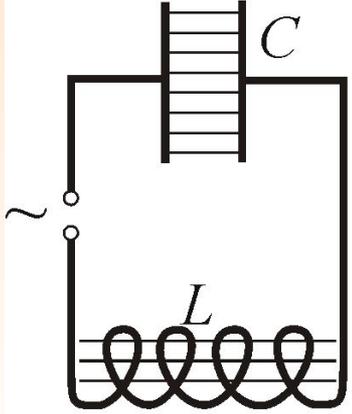
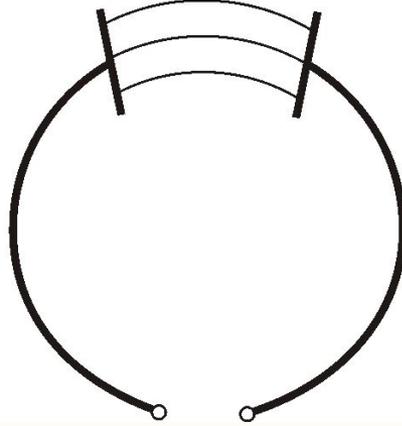


Рисунок 1

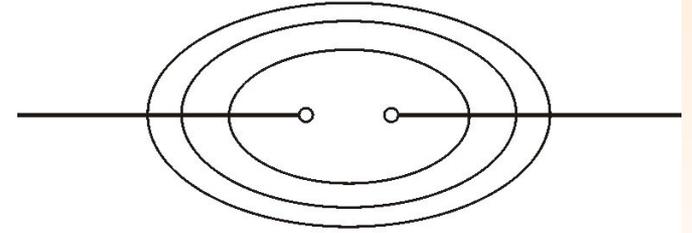
**В окружающем конденсатор и катушку пространстве поля практически равны нулю.**



a)



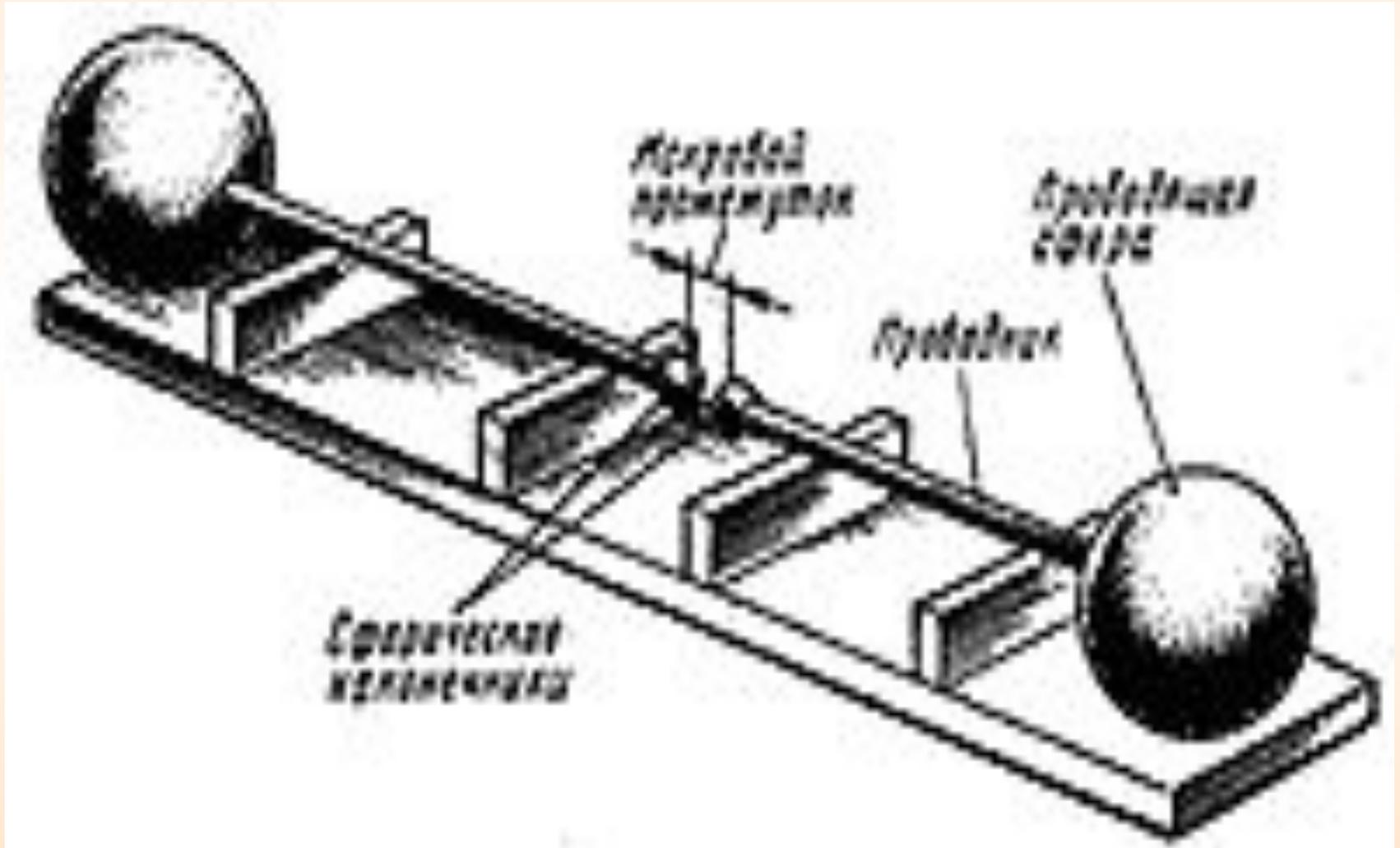
б)



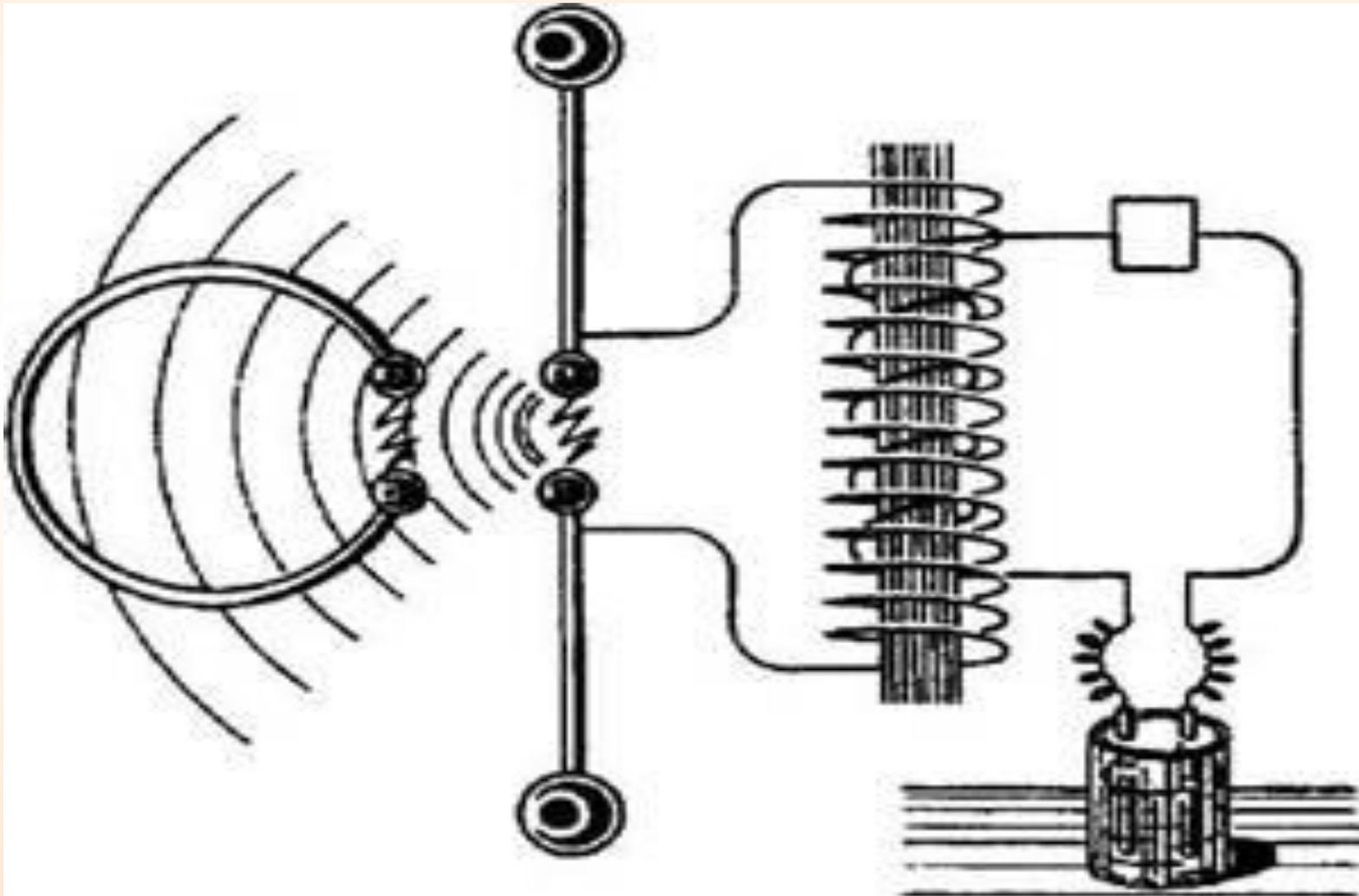
в)

*«вибратор Герца»*

Вибратор Герца имел несколько модификаций.



Вибратор Герца имел несколько модификаций.





Вибратор Герца

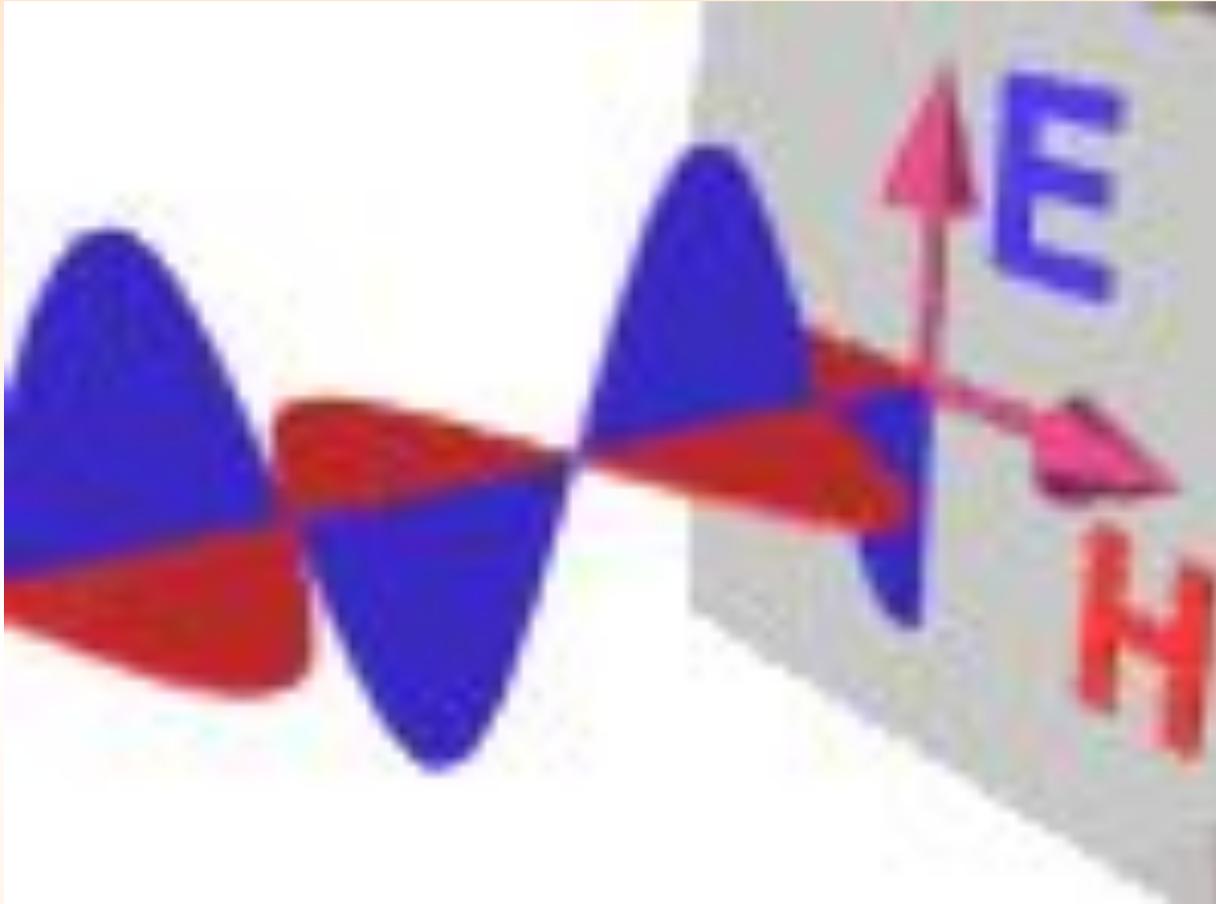
и приемник.



Вибратор

Резонатор

Рисунок 2

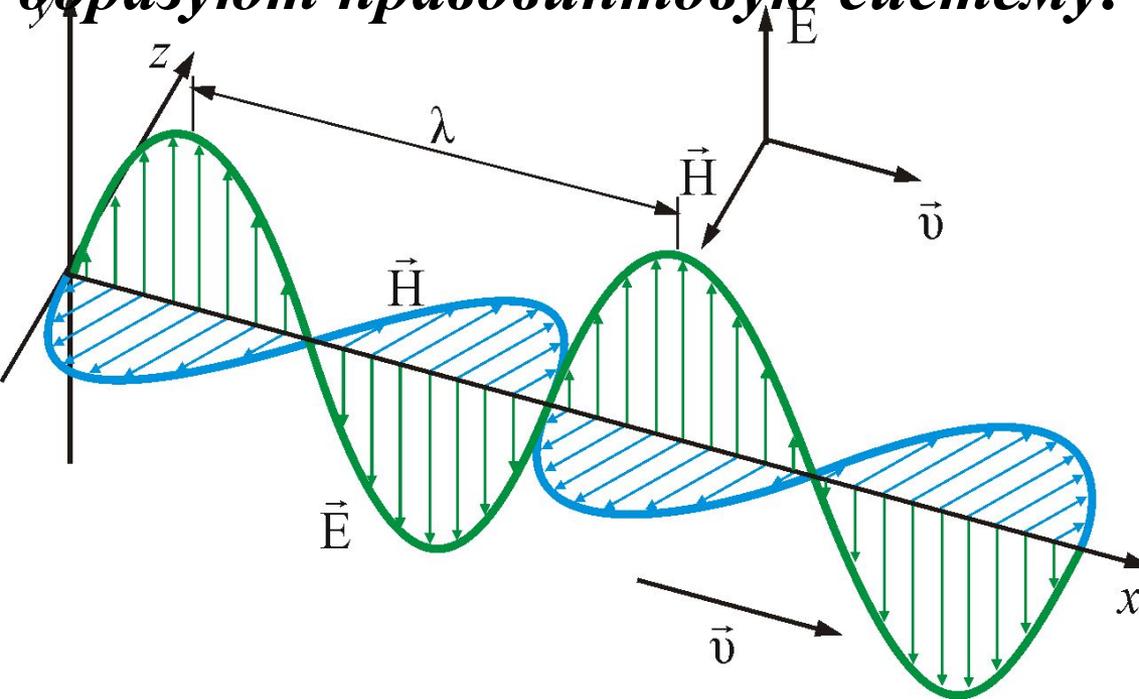


ЭМВ распространяются в пространстве,  
удаляясь от вибратора во все стороны

1. В любой точке **векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения**, т.е.

$$\vec{E} \rightarrow \vec{H} \rightarrow \vec{v}$$

образуют **правовинтовую систему**:



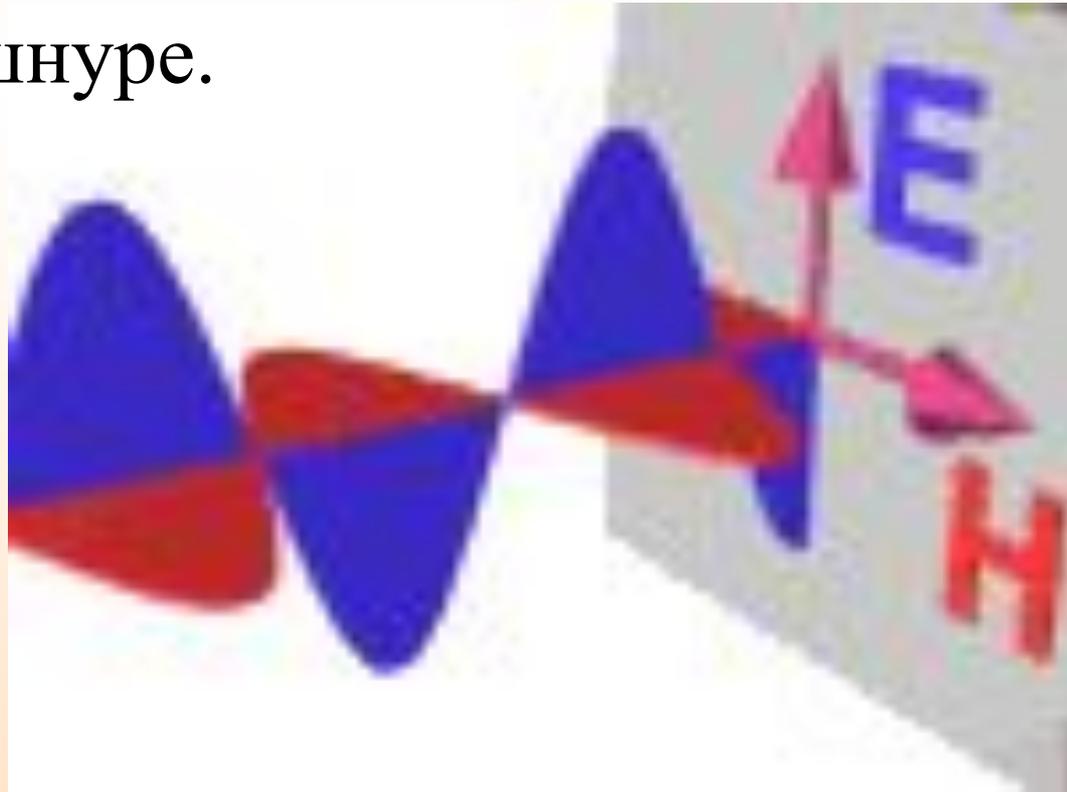
2. Поля **изменяют свое направление в пространстве**: в одних точках вектор  $\vec{H}$  направлен к плоскости страницы, в других – от нее; аналогично ведет себя и вектор  $\vec{E}$

3. **Электрическое и магнитное поля находятся в фазе**, т.е. они достигают максимума и обращаются в нуль в одних и тех же точках.

Движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.

ЭМВ представляют собой поперечные волны и аналогичны другим типам волн.

Однако *в ЭМВ происходят колебания полей, а не вещества*, как в случае волн на воде или в натянутом шнуре.



## 6.2 Дифференциальное уравнение ЭМВ

Векторы напряженности  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электромагнитного поля *удовлетворяют волновым уравнениям типа:*

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

Решение уравнений:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (6.2.1)$$

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

$$H = H_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (6.2.2)$$

$\phi$  – начальная фаза колебаний;  $k = \frac{\omega}{v}$  – волновое число;  
 $\omega$  – круговая частота

Оператор Лапласа -  $\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$

## ***Фазовая скорость ЭМВ:***

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \quad (6.2.3)$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$  – **скорость света в вакууме**

$$\varepsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1} \quad \text{находим}$$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

***В веществе скорость распространения электромагнитных волн меньше в  $n = \sqrt{\varepsilon \mu}$  раз.***

**Скорость** распространения электромагнитных волн в среде **зависит от ее электрической и магнитной проницаемостей.**

$n = \sqrt{\epsilon\mu}$  - **абсолютный показатель преломления.**

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{n} \quad \text{и} \quad n = \frac{c}{v} \quad (6.2.4)$$

Следовательно, **показатель преломления** есть **физическая величина, равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме к их скорости в среде.**

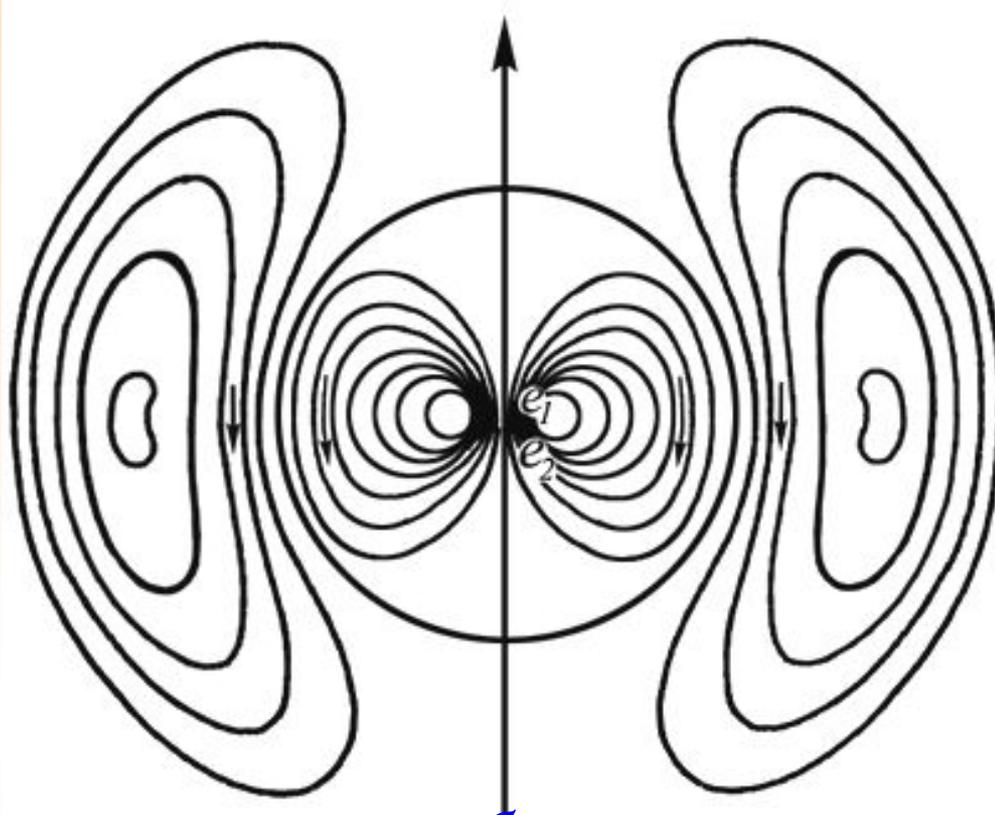
## *Заключение:*

- векторы  $\vec{E}$   $\vec{H}$   $\vec{v}$  взаимно перпендикулярны, т. к.  $\vec{k}$  и  $\vec{v}$  направлены одинаково;
- электромагнитная волна является поперечной;
- электрическая и магнитная составляющие распространяются в одном направлении;
- векторы  $\vec{E}$   $\vec{H}$  колеблются в одинаковых фазах;
- в ЭМВ происходят колебания полей, а не вещества

## 6.3 Экспериментальное исследование ЭМВ

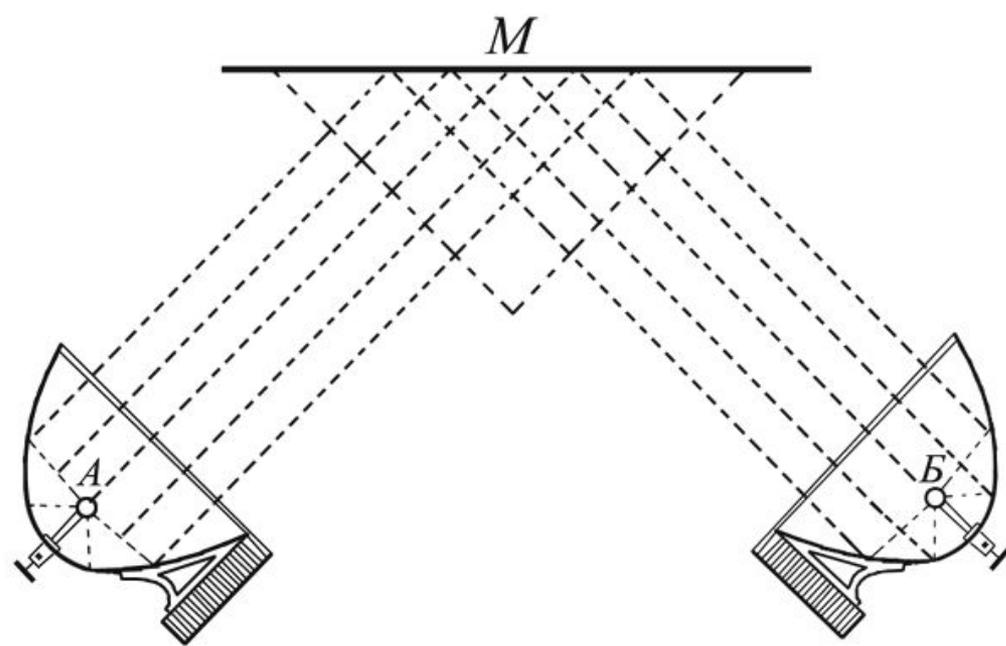
В ходе своих исследований Герц обнаружил, что *если расстояние между вибратором и приемником (резонатором) меньше одного метра, то поле вибратора* в этой области соответствует излучению поля диполем и *убывает обратно пропорционально кубу расстояния* (эту зону называли **ближней зоной**, здесь  $r \leq \lambda$





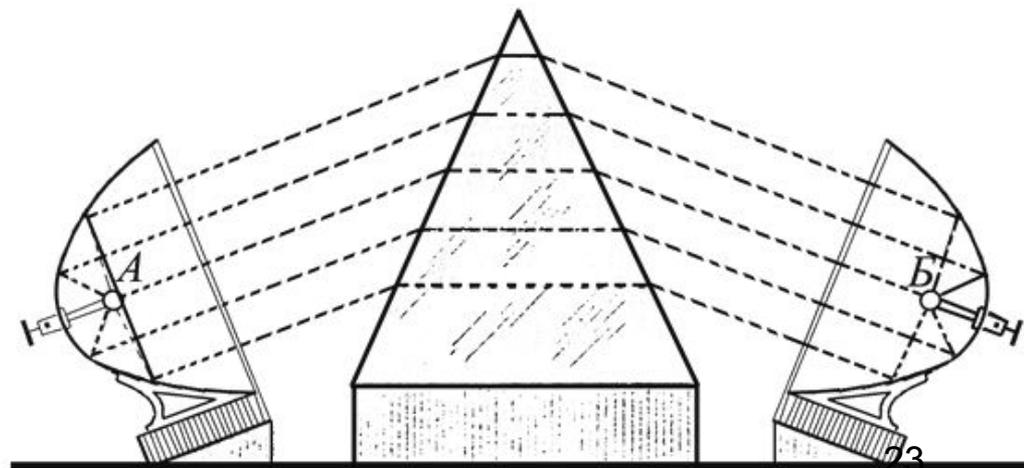
Однако *на расстояниях более трех метров поле убывает значительно медленнее* (это волновая зона  $r \geq \lambda$ ) и неодинаково в различных направлениях.

*В направлении оси вибратора поле практически исчезает на расстоянии четырех метров, а в направлении, перпендикулярном к оси вибратора, достигает расстояния двенадцати метров и более.*

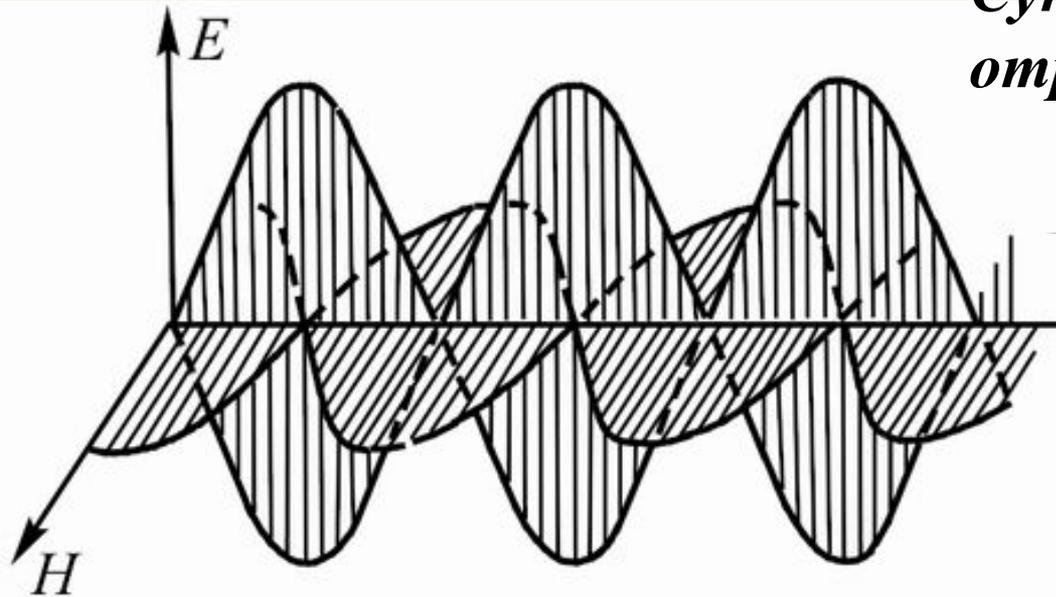


В своих опытах Герц установил *полную аналогию электромагнитных и световых волн*

Было показано, что для электромагнитных волн справедлив закон отражения и преломления



С помощью излучающего вибратора, помещенного в фокусе вогнутого зеркала и плоского зеркала Герц **получил стоячую волну.**



*Суперпозиция падающей и отраженной волн:*

$$E_y = 2E_0 \cos kx \cos \omega t$$

$$H_z = 2H_0 \sin kx \sin \omega t$$

*Стоячая электромагнитная волна состоит из двух стоячих волн – электрической и магнитной*

*Фазовый сдвиг на  $\frac{\pi}{2}$*

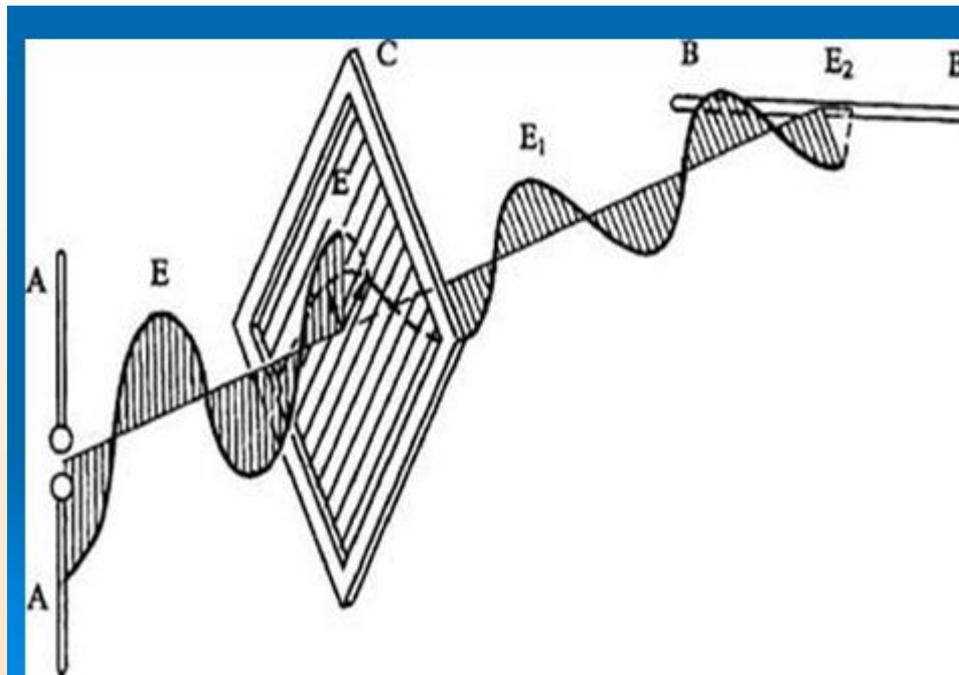
Измерив **расстояние между узлами и пучностями волны**, Герц нашел **длину волны  $\lambda$ .**

Произведение  $\lambda$  на частоту колебаний вибратора  $\nu$  **дало скорость ЭМВ**, которая оказалась близкой к  $c$ .

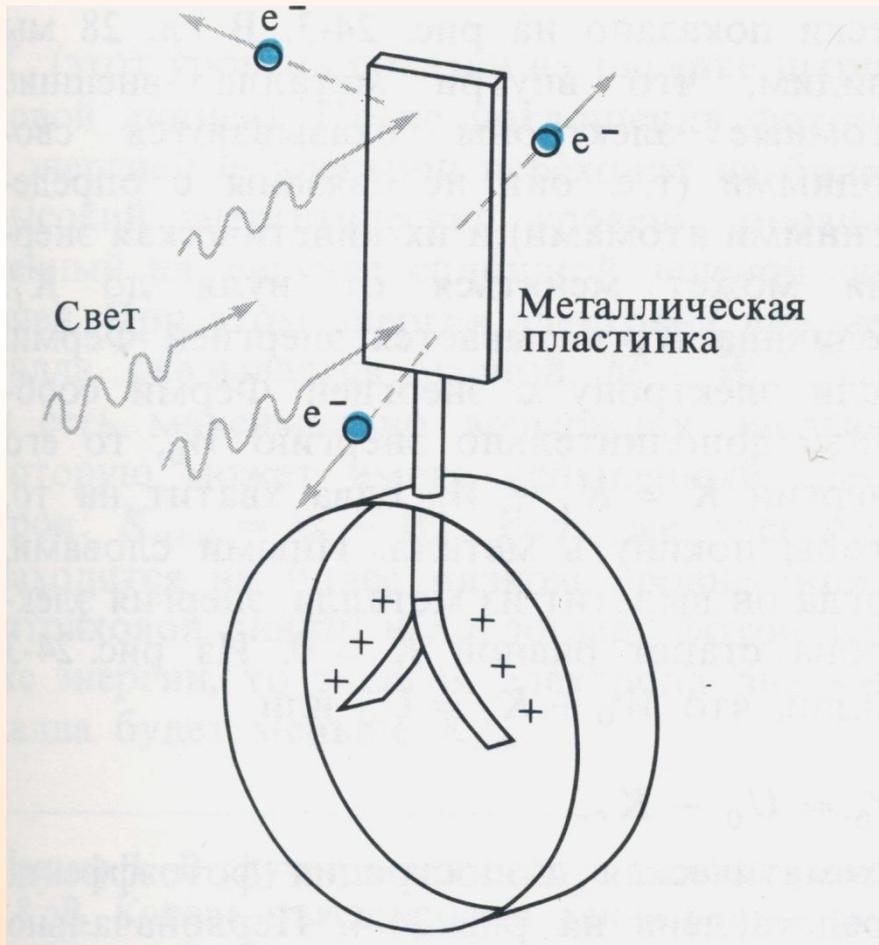
$$\lambda \nu = \nu = c$$

Кроме того, опыты *Герца подтвердили соотношение*  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  следующее из теории Максвелла.

*Была подтверждена поперечность ЭМВ:* располагая на пути волн решетку из параллельных друг другу медных проволок, Герц обнаружил, что при вращении решетки вокруг луча интенсивность волн, прошедших сквозь решетку, сильно изменяется.



Герц сделал еще одно **важнейшее открытие** — **фотоэлектрический эффект** (вырывание электрических зарядов с поверхности металлов под действием света).



Нейтральный электроскоп, соединенный с металлической пластинкой.

При освещении пластинки светом из нее выбиваются фотоэлектроны, и листочки заряжаются положительно

Опыты Герца были продолжены *П. Н. Лебедевым*, который в 1894 г. получил ЭМВ длиной 4 – 6 мм и исследовал прохождение их в кристаллах. При этом было обнаружено двойное преломление волн.

Дальнейшее развитие методики эксперимента продолжено в 1923 г. *А.А. Глаголева-Аркадьева* сконструировала массовый излучатель, в котором короткие ЭМВ, возбужденные колебаниями электрических зарядов в атомах и молекулах, генерировались с помощью искр, между металлическими опилками, взвешенными в масле.

Так были получены волны длиной  $\lambda$  от 50 мм до 80 мкм.

Усовершенствовав вибратор Герца и применив свой приемник, профессор Петербургского электротехнического института *А.С. Попов* 1896 г. впервые в мире наладил опытную радиотелеграфную связь и осуществил с помощью электромагнитных волн передачу сообщения на расстояние около 250 м (*были переданы слова «Генрих Герц»*).

Тем самым было положено основание радиотехнике.

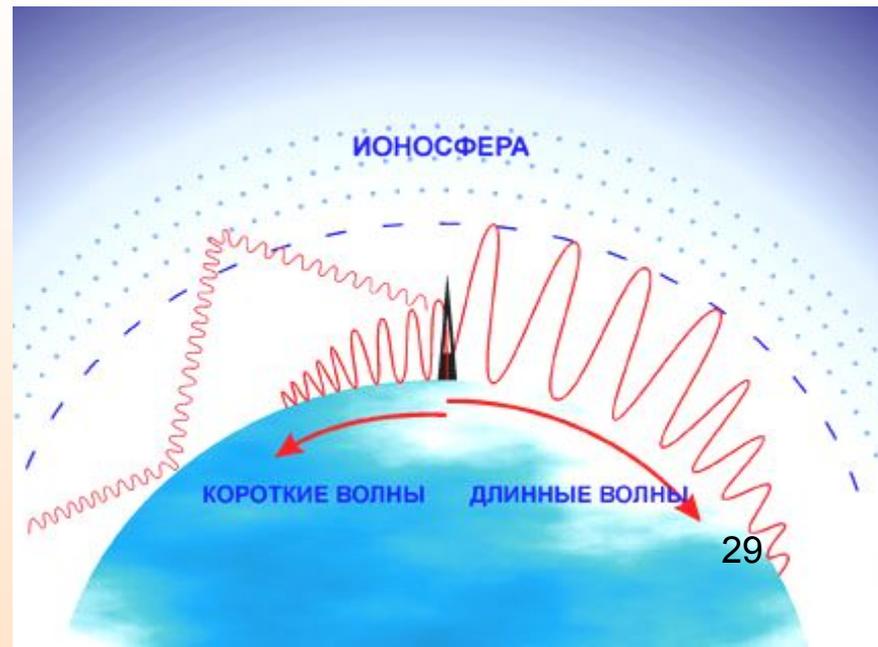
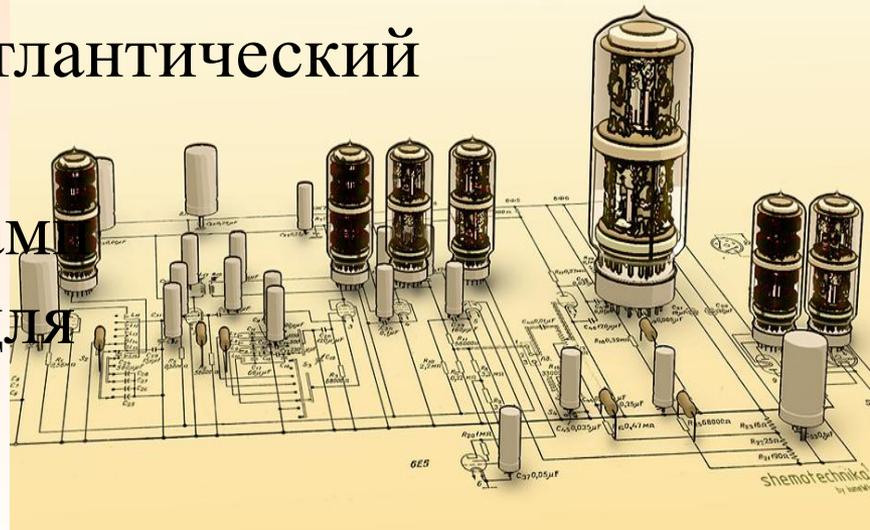
В 1899 г. Попов довел расстояние беспроволочной передачи сигналов *до 50 км*.

В 1901 г. была осуществлена радиотелеграфная связь через Атлантический океан.

Изобретение электронных ламп (1904 – 1907) и применение их для генерирования незатухающих колебаний (1913 г.) сделали возможным развитие радиотелеграфии и радиовещания.

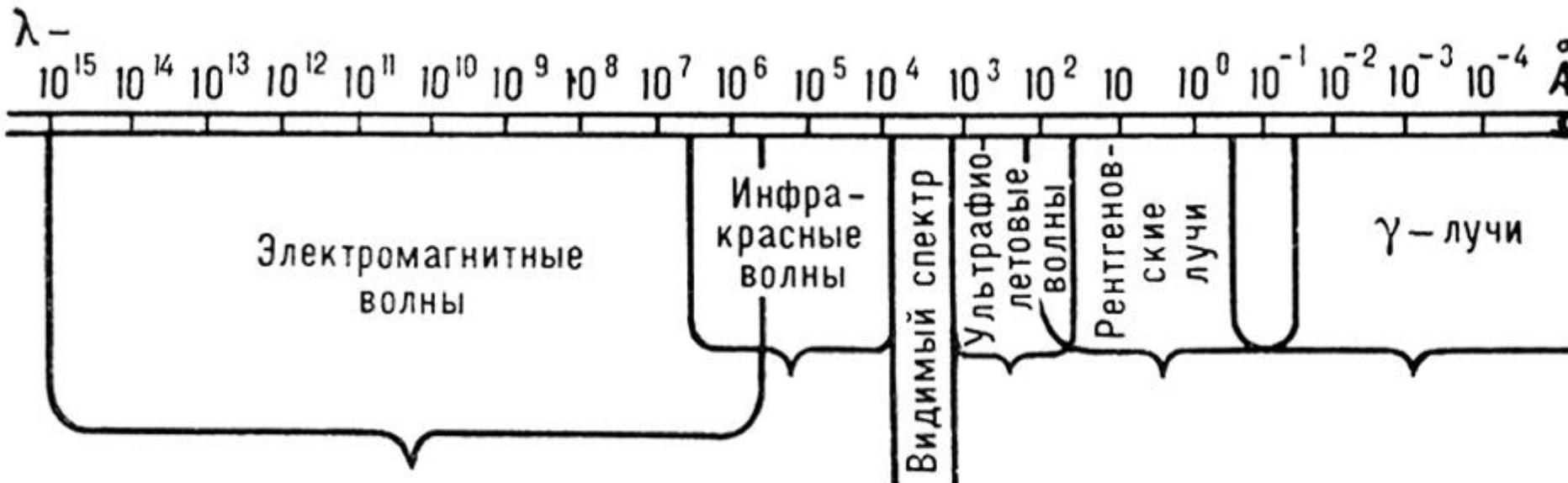
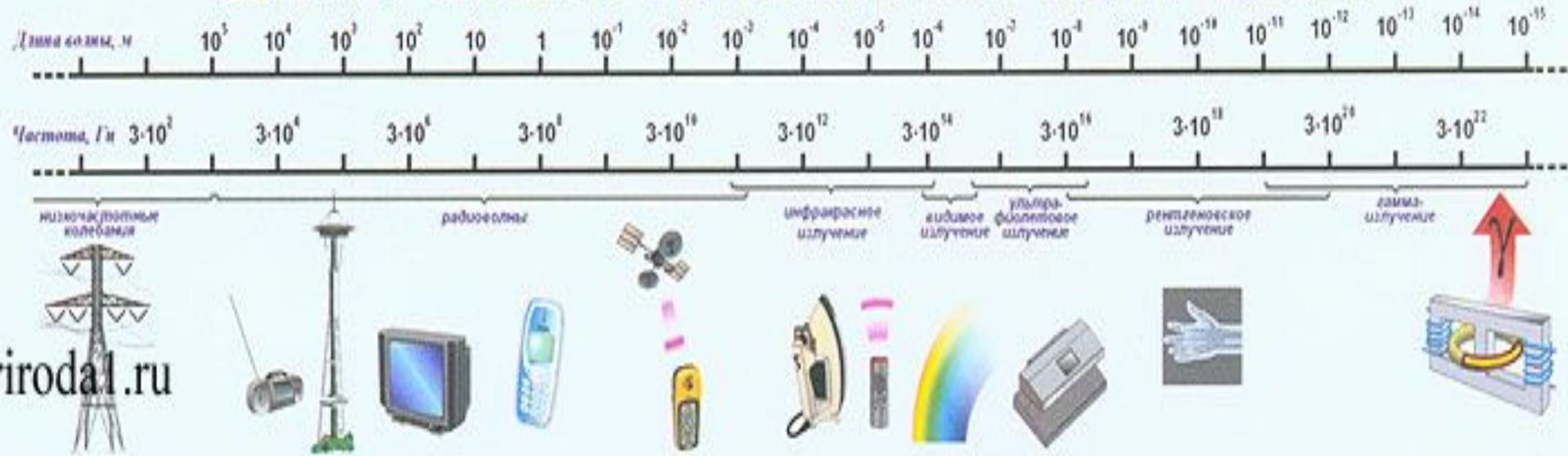
В 20 – 30-ых гг. весь мир покрылся сетью мощных радиопередающих станций.

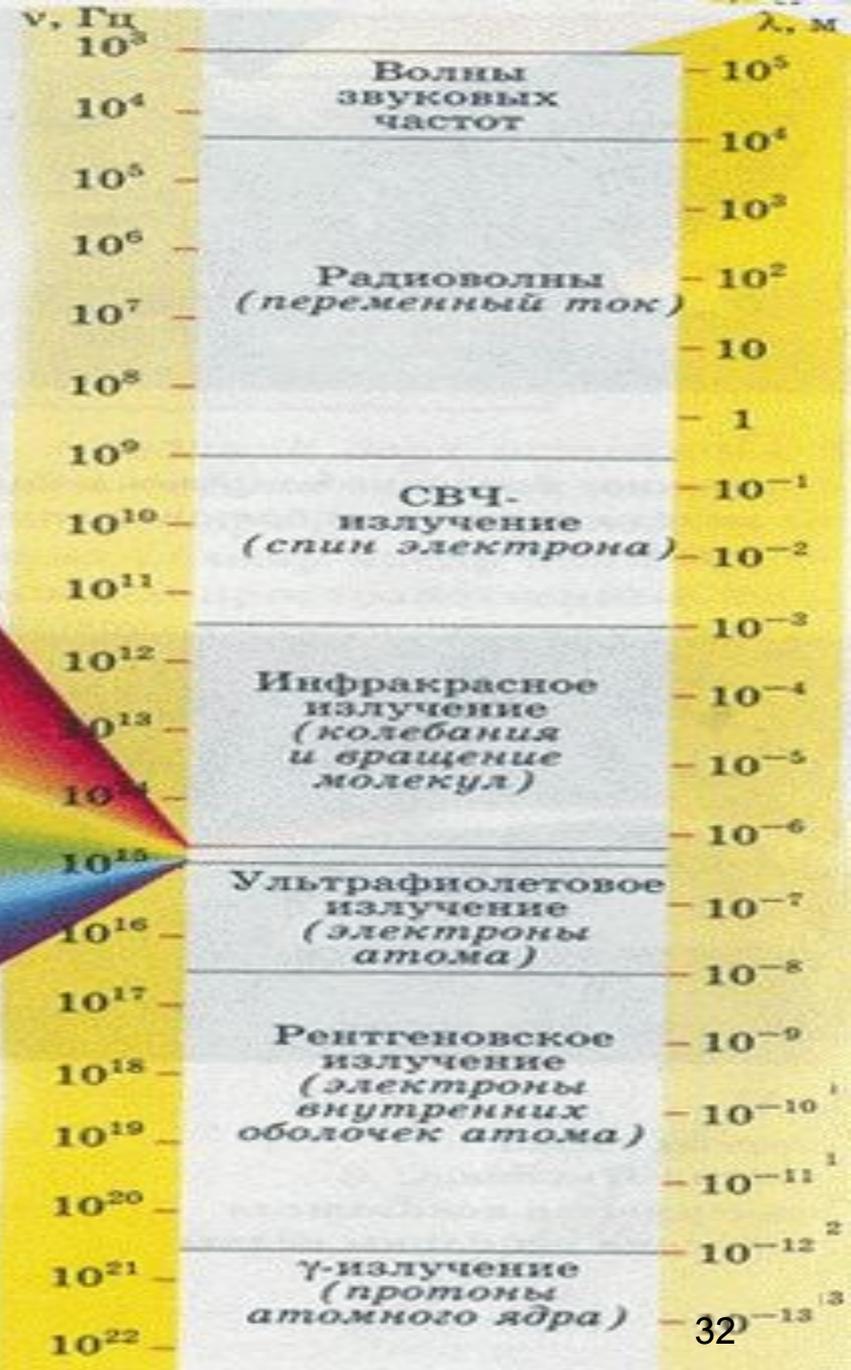
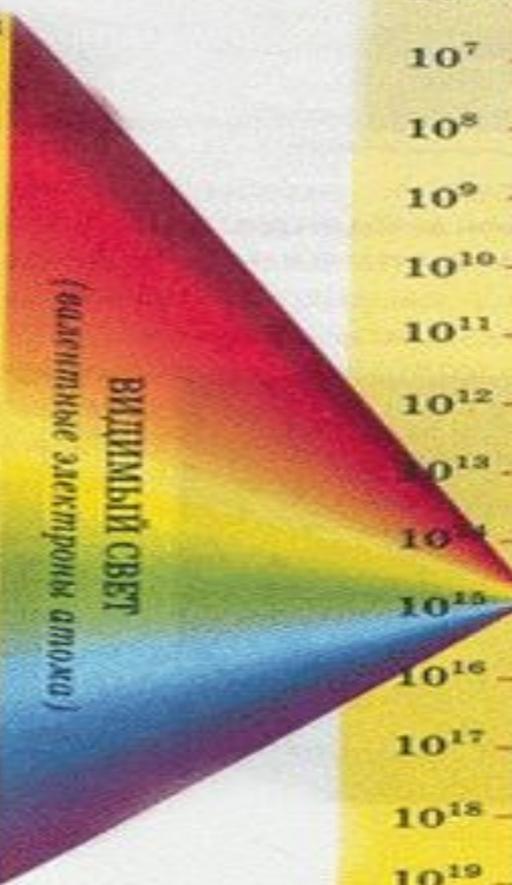
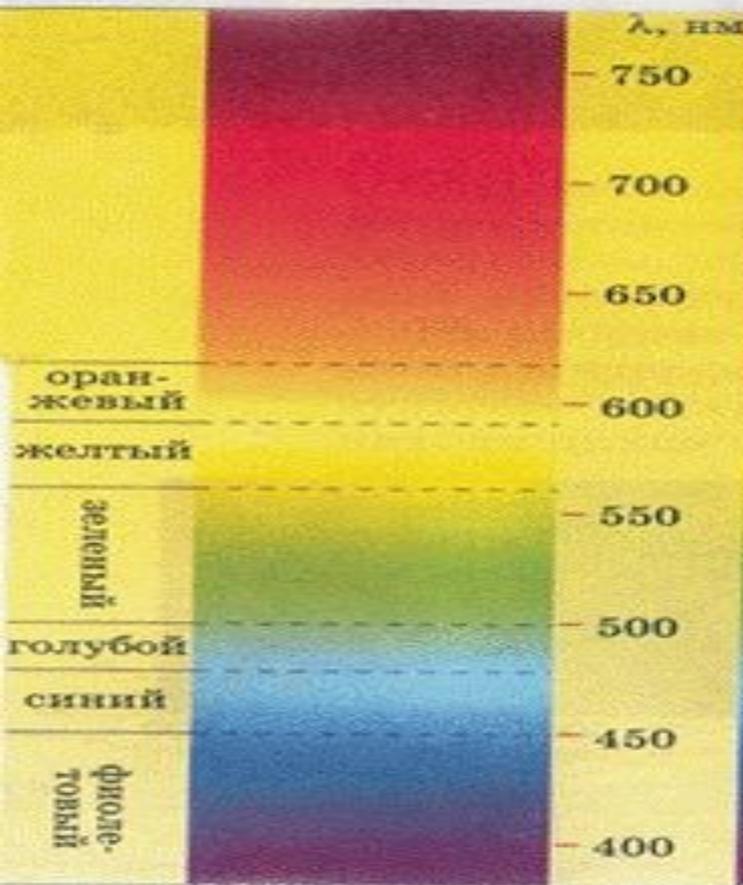
Человечество вступило в новую эру коммуникационных отношений.



Длина	Название	Частота
более 100 км	Низкочастотные электрические колебания	0 – 3 кГц
100 км – 1 мм	Радиоволны	3 кГц – 3 ТГц
100 – 10 км	мираметровые (очень низкие частоты)	3 – 3-кГц
10 – 1 км	километровые (низкие частоты)	30 – 300 кГц
1 км – 100 м	гектометровые (средние частоты)	300 кГц – 3 МГц
100 – 10 м	декаметровые (высокие частоты)	3 – 30 МГц
10 – 1 м	метровые (очень высокие частоты)	30 – 300 МГц
1 м – 10 см	дециметровые (ультравысокие)	300 МГц – 3 ГГц
10 – 1 см	сантиметровые (сверхвысокие)	3 – 30 ГГц
1 см – 1 мм	миллиметровые (крайне высокие)	30 – 300 ГГц
1 – 0.1 мм	децимиллиметровые (гипервысокие)	300 ГГц – 3 ТГц
2 мм – 760 нм	Инфракрасное излучение	150 ГГц – 400 ТГц
760 – 380 нм	Видимое излучение (оптический спектр)	400 - 800 ТГц
380 – 3 нм	Ультрафиолетовое излучение	800 ТГц – 100 ПГц
10 нм – 1 пм	Рентгеновское излучение	30 ПГц – 300 ЭГц
<10 пм	Гамма-излучение	>30 ЭГц

# ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ





# Электромагнитные излучения

радиоволны

Инфракрасное  
излучение

Видимый  
свет

Ультрафиолетовое  
излучение

Рентгеновское  
излучение

Гамма -  
излучение

# Шкала электромагнитных излучений.

Шкала электромагнитных волн простирается от *длинных радиоволн до гамма – лучей.*

Электромагнитные волны различной длины условно делят на диапазоны по различным признакам (способу получения, способу регистрации, характеру взаимодействия с веществом).



Все виды излучений  
имеют, по существу,  
одну и ту же  
физическую  
природу.

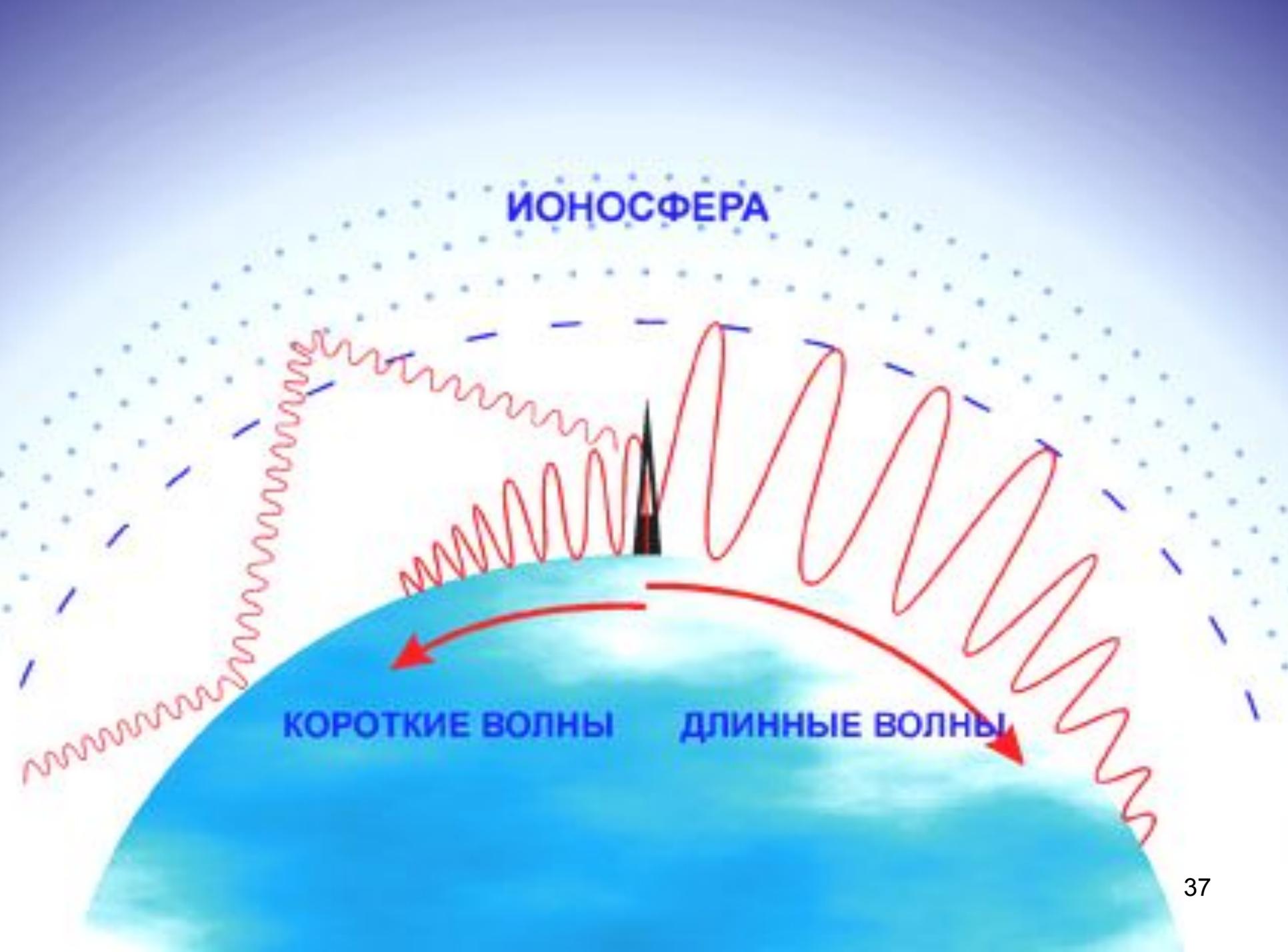
Луи де Бройль

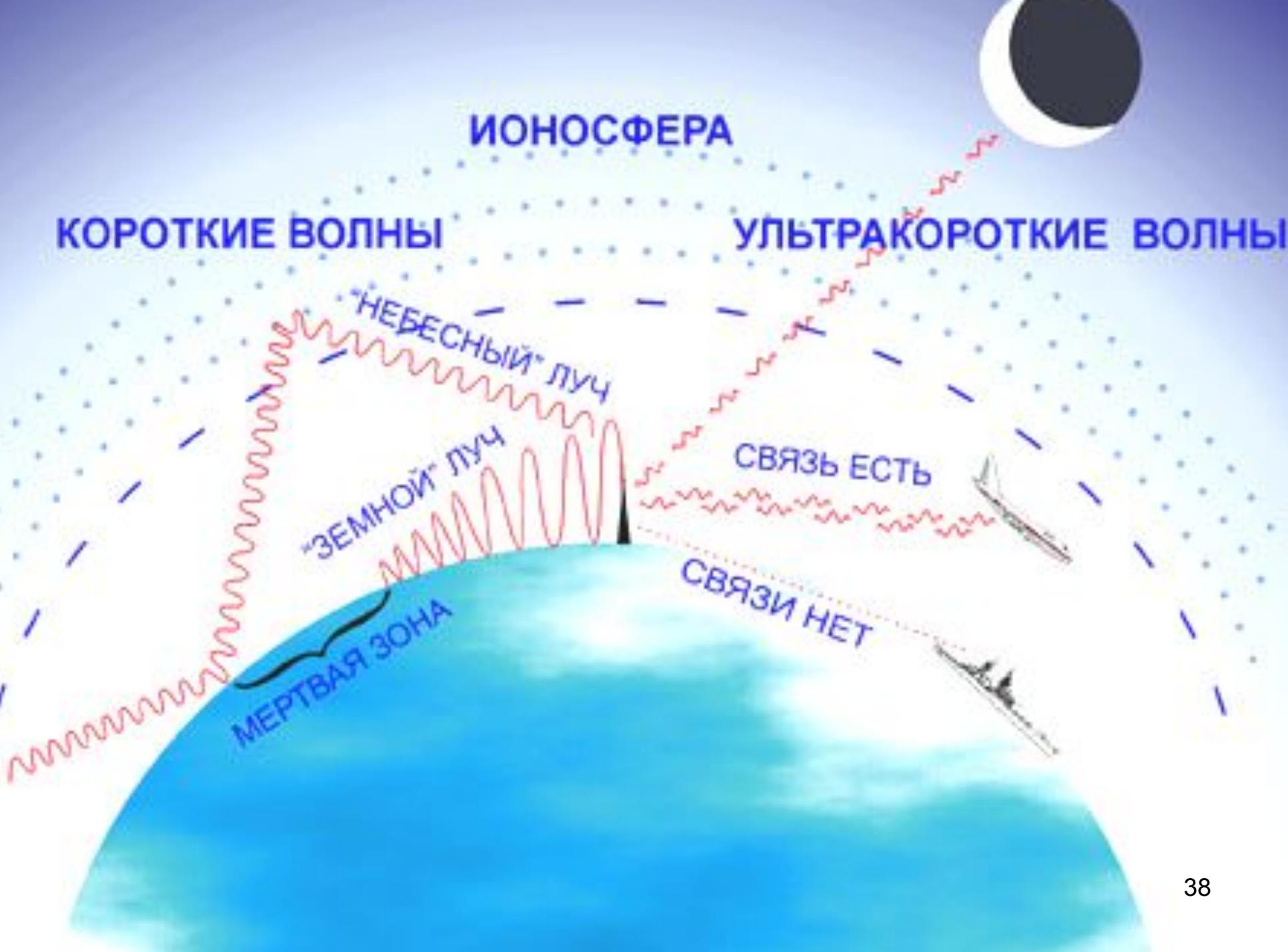
Виды излучений	Длина волны	Получение	Регистрация	Характеристика, свойства	Применение
<b>Радиоволны</b>	10 км ( $3 \times 10^4 - 3 \times 10^{12}$ Гц)	Транзисторные цепи	Резонатор Герца, Когерер, антенна	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Связь и навигация
<b>Инфракрасное излучение</b>	0,1 м – 770 нм ( $3 \times 10^{12} - 4 \times 10^{14}$ Гц)	Электрический камин	Болометр, Фотоэлемент термостолбик	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Приготовл. пищи Нагревание, сушка, фотокопирование
<b>Видимый свет</b>	770 – 380 нм ( $4 \times 10^{14} - 8 \times 10^{14}$ Гц)	Лампа накаливания Молнии, Пламя	Спектрограф, Болометр	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Наблюдение за видимым миром, путем отражения
<b>Ультрафиолетовое излучение</b>	380 – 5 нм ( $8 \times 10^{14} - 6 \times 10^{16}$ Гц)	Разрядная трубка, углеродная Дуга	Фотоэлемент Люминесценция, болометр	Фотохимические реакции	Лечение заболеваний кожи, уничтожение бактерий, сторож. устройства
<b>Рентгеновское излучение</b>	5 нм – $10^{-2}$ нм ( $6 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$ Гц)	Рентгеновская трубка	Фотопластинка	Проникающая способность Дифракция	Рентгенография, радиология, обнаружение подделок
<b>γ - излучение</b>	$5 \times 10^{-11} - 10^{-15}$ м	Циклотрон Кобальт - 60	Трубка Гейгера	Порождаются космическими объектами	Стерилизация Медицина, лечение рака

**ИОНОСФЕРА**

**КОРОТКИЕ ВОЛНЫ**

**ДЛИННЫЕ ВОЛНЫ**





ИОНОСФЕРА

КОРОТКИЕ ВОЛНЫ

УЛЬТРАКОРОТКИЕ ВОЛНЫ

"НЕБЕСНЫЙ" луч

"ЗЕМНОЙ" луч

МЕРТВАЯ ЗОНА

СВЯЗИ ЕСТЬ

СВЯЗИ НЕТ

# Давление света

Световое давление было впервые обнаружено и измерено в 1899 г. в Москве русским ученым П.Н. Лебедевым (1866–1912).

*Давление света* можно рассчитать по формуле:

$$P = J \frac{1 + K}{c}$$

интенсивность света,  
коэффициент отражения.

При наклонном падении волны:

$$P = \frac{J}{c} (1 + K) \cos \theta$$

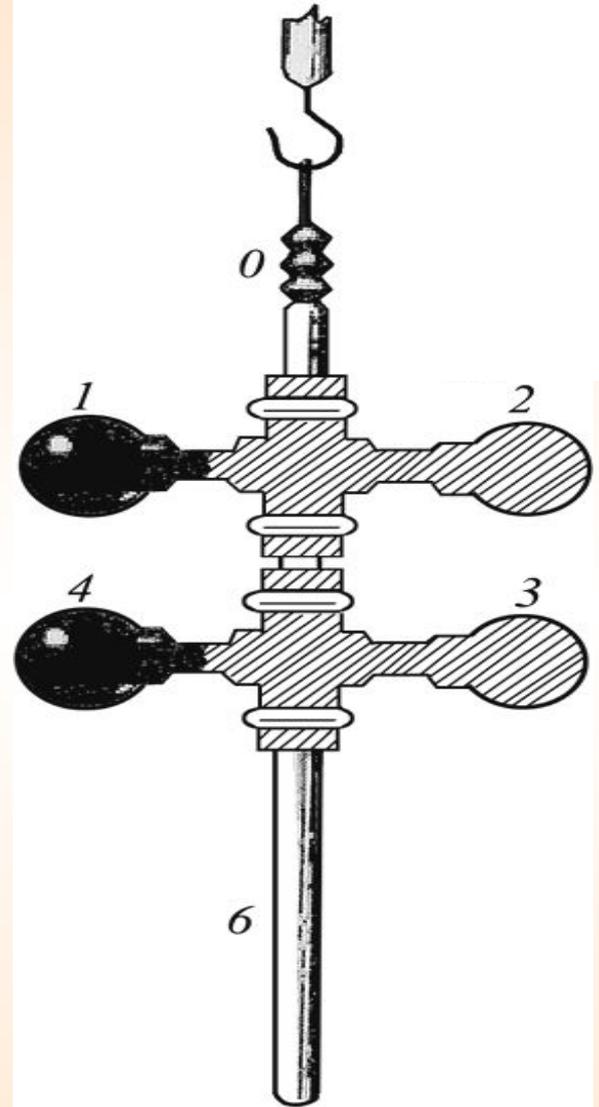
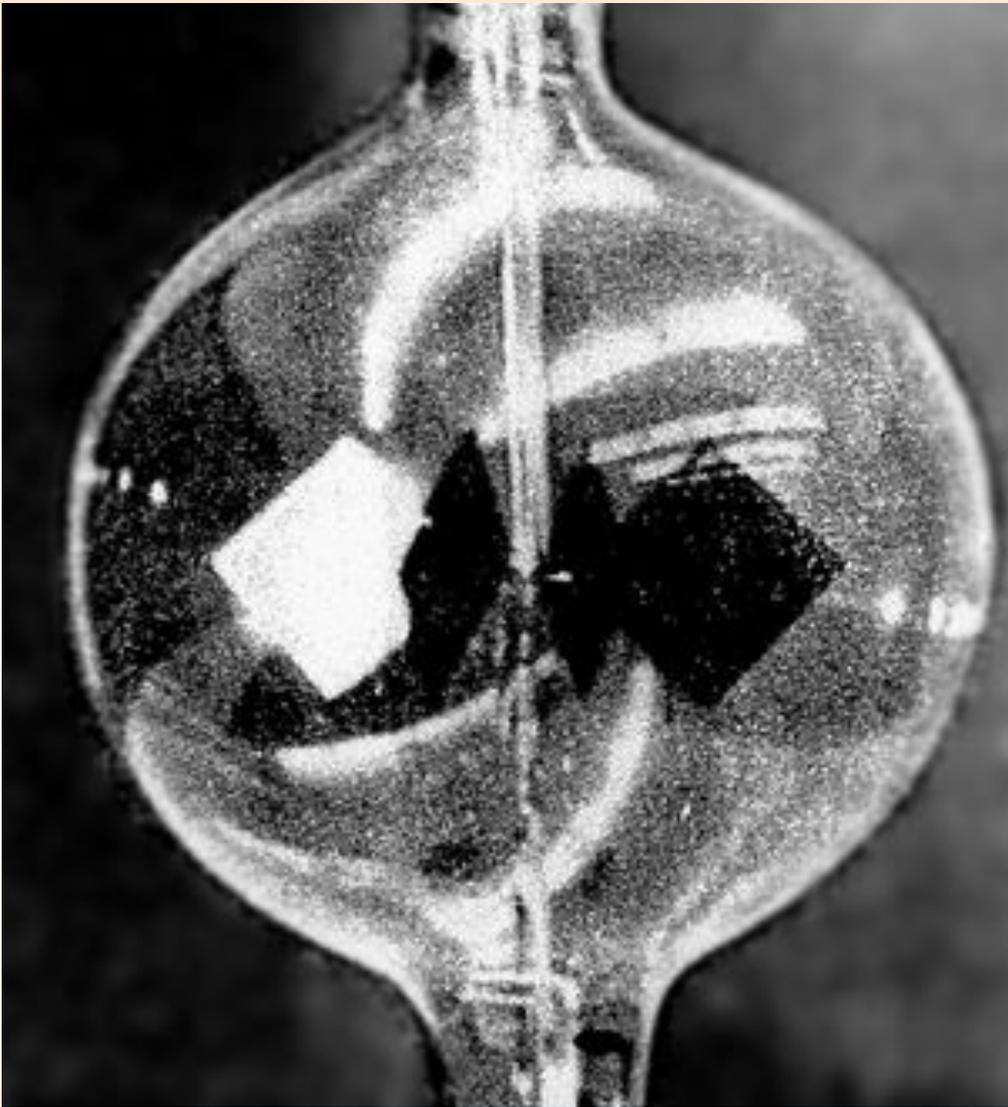


□ Давление света и электромагнитный импульс настолько малы, что непосредственное их измерение затруднительно.

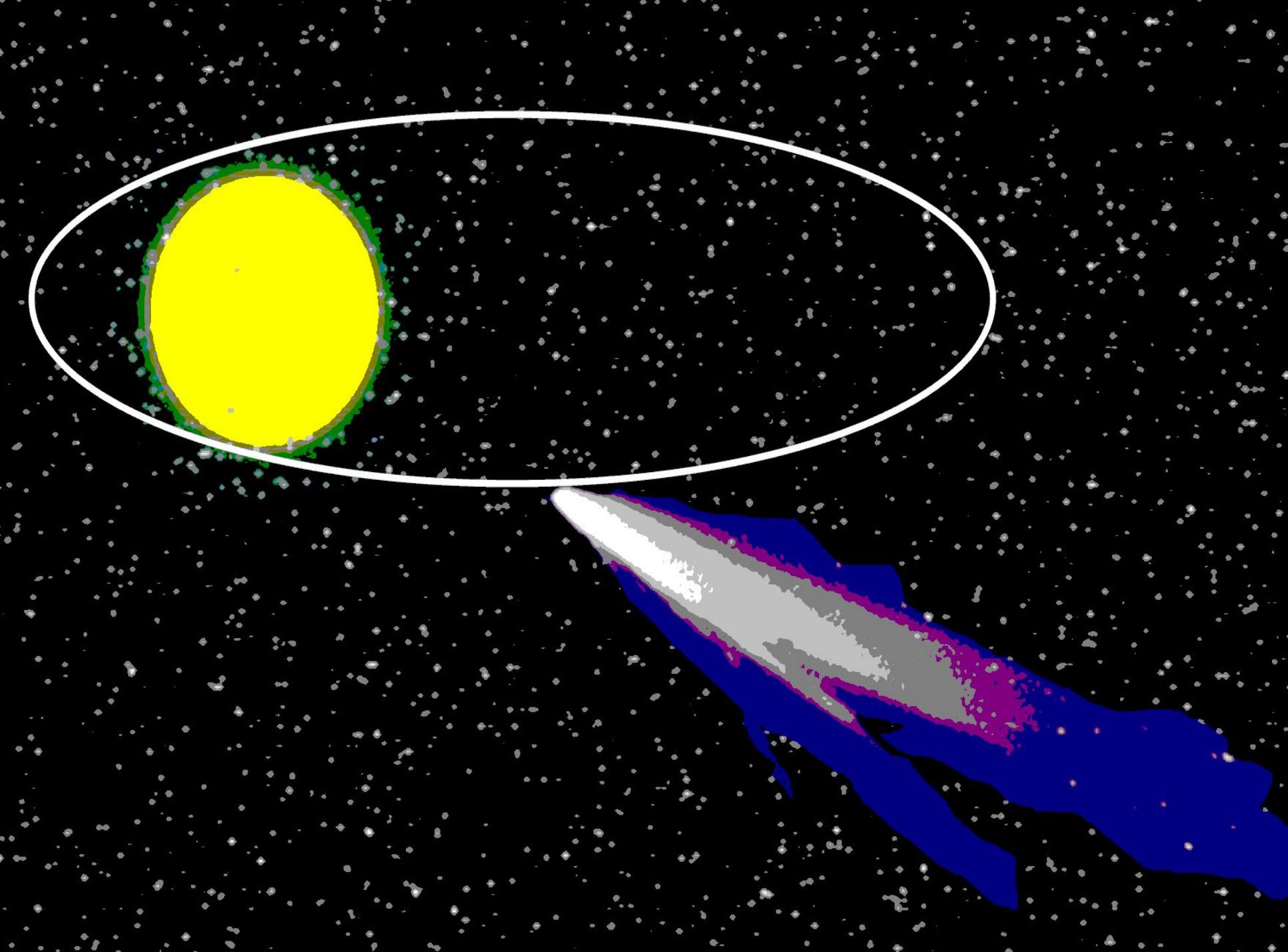
□ Так, зеркало, расположенное на расстоянии 1 м от источника света в миллион свечей (кандел), испытывает давление  $10^{-7}$  Н/м<sup>2</sup>.

□ Давление излучения Солнца на поверхность Земли равно  $4,3 \cdot 10^{-6}$  Н/м<sup>2</sup>

□ Общее давление излучения Солнца на Землю равно  $6 \cdot 10^8$  Н, что в  $10^{13}$  раз меньше силы притяжения Солнца.



Радиометр





## 6.4 Энергия и импульс ЭМП

*Распространение электромагнитных волн связано с переносом энергии* (подобно тому, как *распространение упругих волн в веществе связано с переносом механической энергии*). Сама возможность обнаружения ЭМВ указывает на то, что они *переносят энергию*.



Для характеристики переносимой волной энергии русским ученым **Н. А. Умовым** были введены понятия о скорости и направлении движения энергии, о потоке энергии. Спустя десять лет после этого, в 1884 г. английский ученый **Джон Пойнтинг** **описал** процесс переноса энергии с *помощью вектора плотности потока энергии.*

## *Объемная плотность энергии $w$*

*электромагнитной волны*

$$w = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

*Поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени:*

$$S = wv = EH \quad (6.4.1)$$

*Вектор плотности потока электромагнитной энергии называется вектором Умова - Пойнтинга:*

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

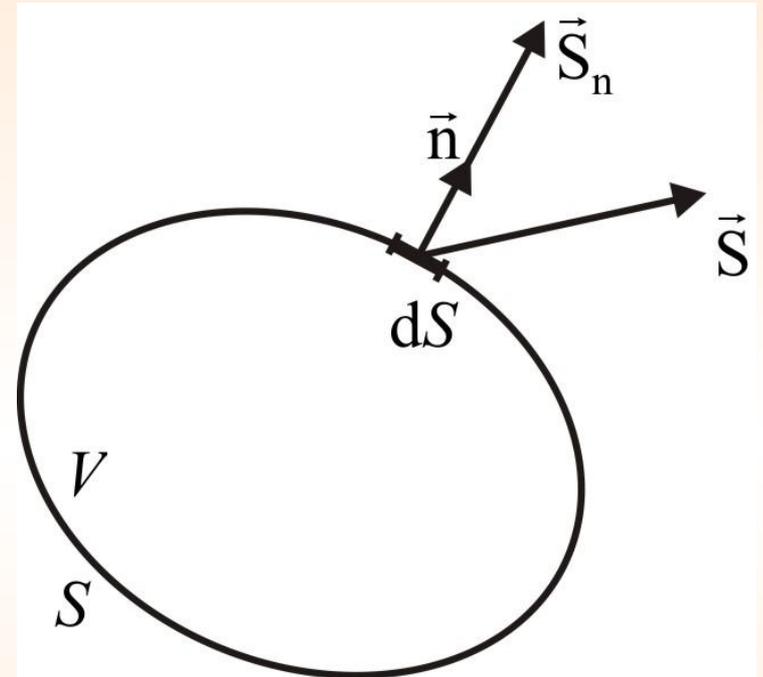
Поток энергии через площадку  $dS$ :

$$d\Phi = S_n \cdot dS$$

$$S_n = S \cdot \cos \alpha$$

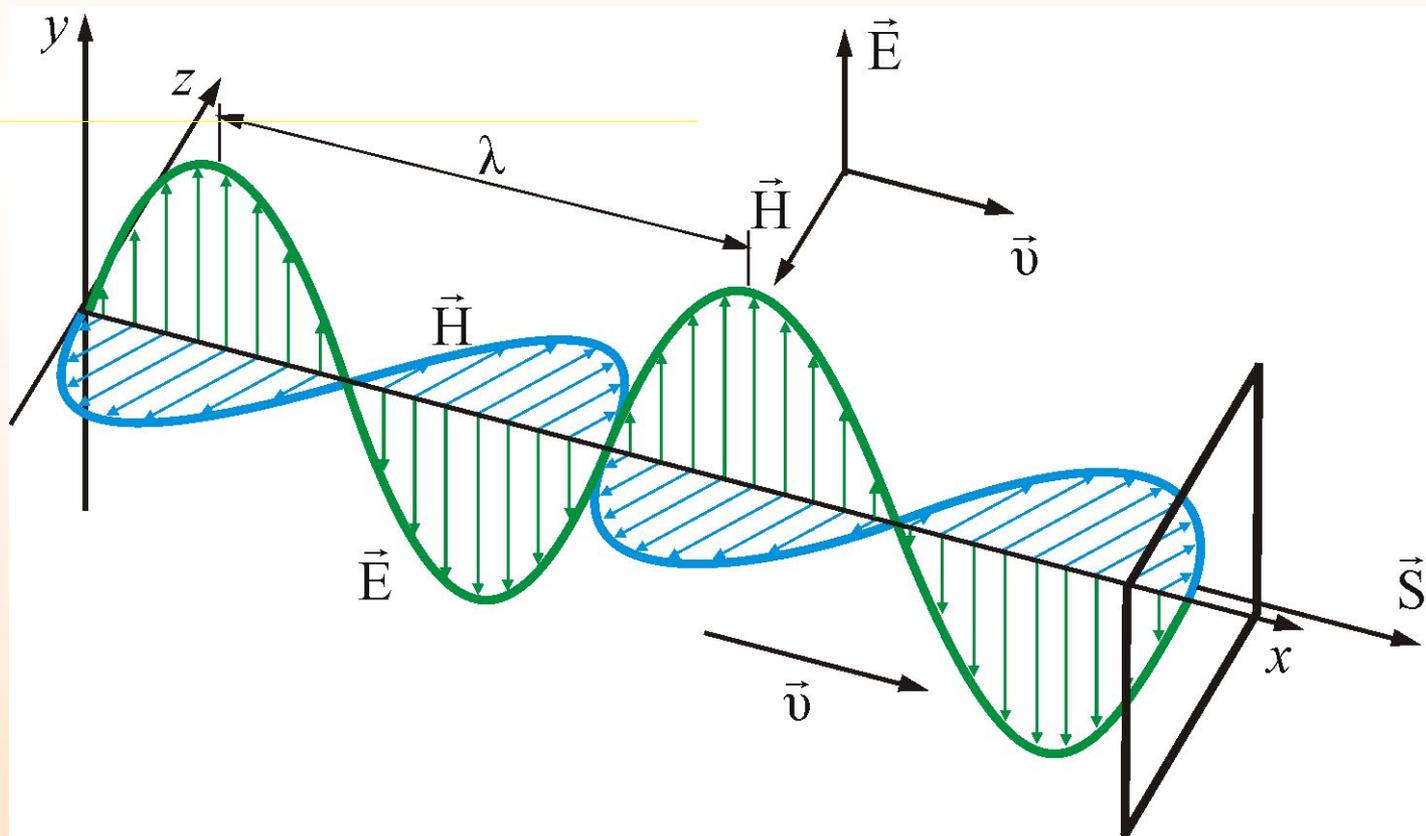
**Теорема Умова - Пойнтинга:**

$$-\frac{\partial W}{\partial t} = \oint_S \vec{S}_n dS$$



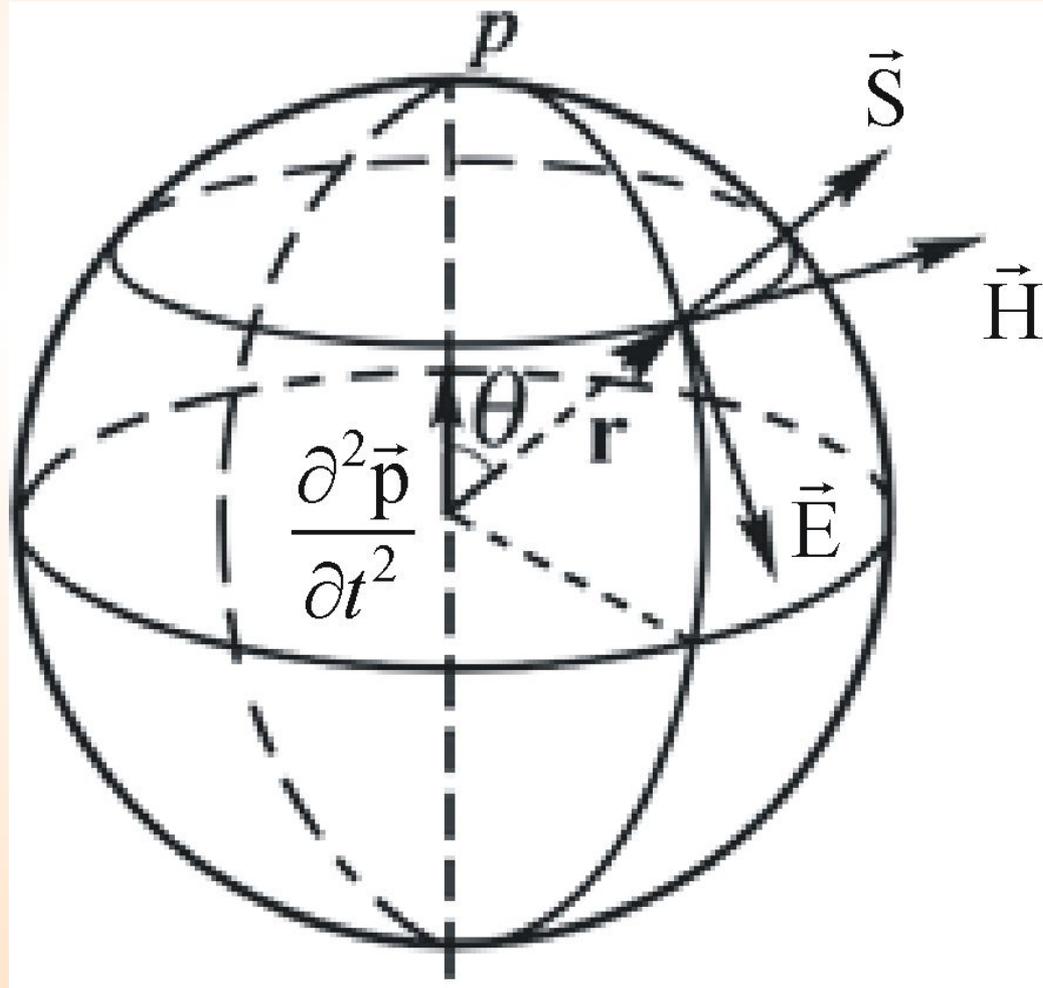
- уменьшение полной энергии внутри объема  $V$  за единицу времени должно быть равно энергии, выходящей через поверхность  $S$  за единицу времени наружу – **закон сохранения э/м энергии.**

**Вектор  $\vec{S}$  направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.**



# *В сферической электромагнитной волне,*

излучаемой ускоренно движущимися зарядами, векторы  $\vec{H}$  направлены по параллелям, векторы  $\vec{E}$  – по меридианам, а поток энергии  $\vec{S}$  – по нормали  $\vec{n}$

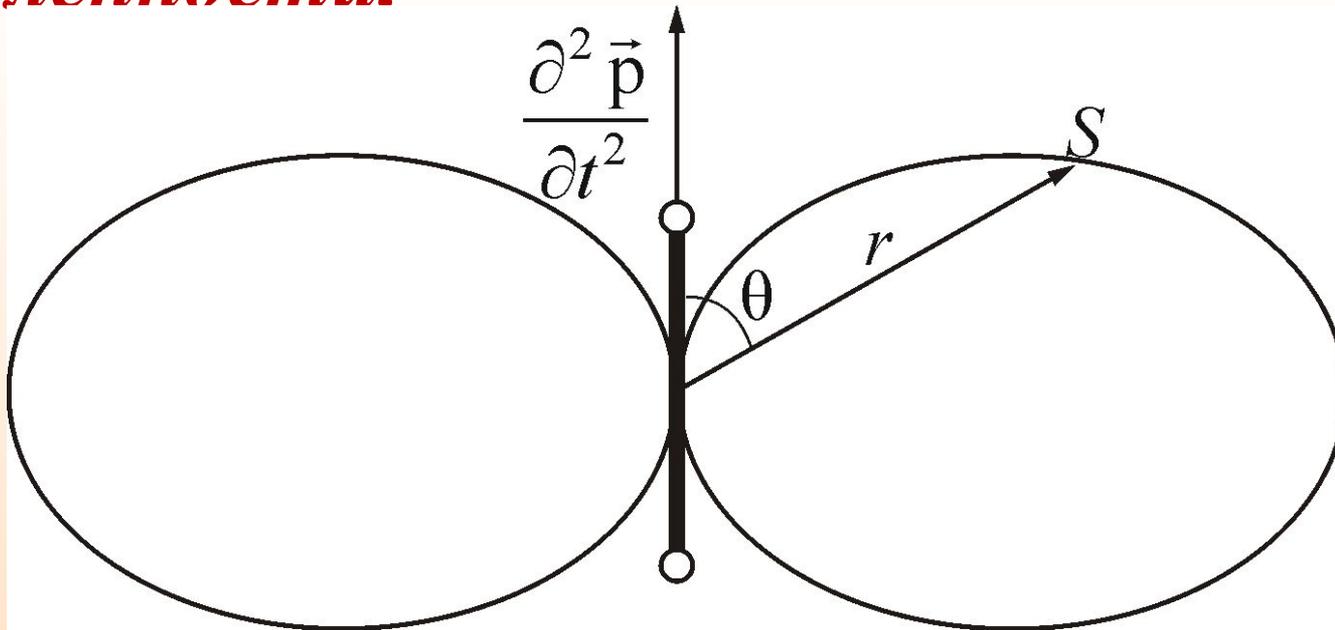


Модуль среднего значения вектора Умова-Пойнтинга называется **интенсивностью**  $J = |\langle \mathbf{S} \rangle|$

**Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды:**

$$J = \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$$

Зависимость интенсивности излучения от направления называют **диаграммой направленности**.



# Электромагнитная масса и импульс

Существование давления ЭМВ приводит к выводу о том, что *электромагнитному полю присущ электромагнитный импульс и масса.*

$$p = mc = \frac{E}{c} \quad m = m_{\text{мех}} + m_{\text{эл}}$$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$E = mc^2$$

## Электромагнитная масса

$$m_{\text{эл}} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0}$$

$e$  – заряд движ. частицы  
 $a$  – её радиус

Для **электромагнитного импульса**

получается релятивистски инвариантная формула:

$$\boxed{p} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0} \frac{\boxed{v}}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА!

