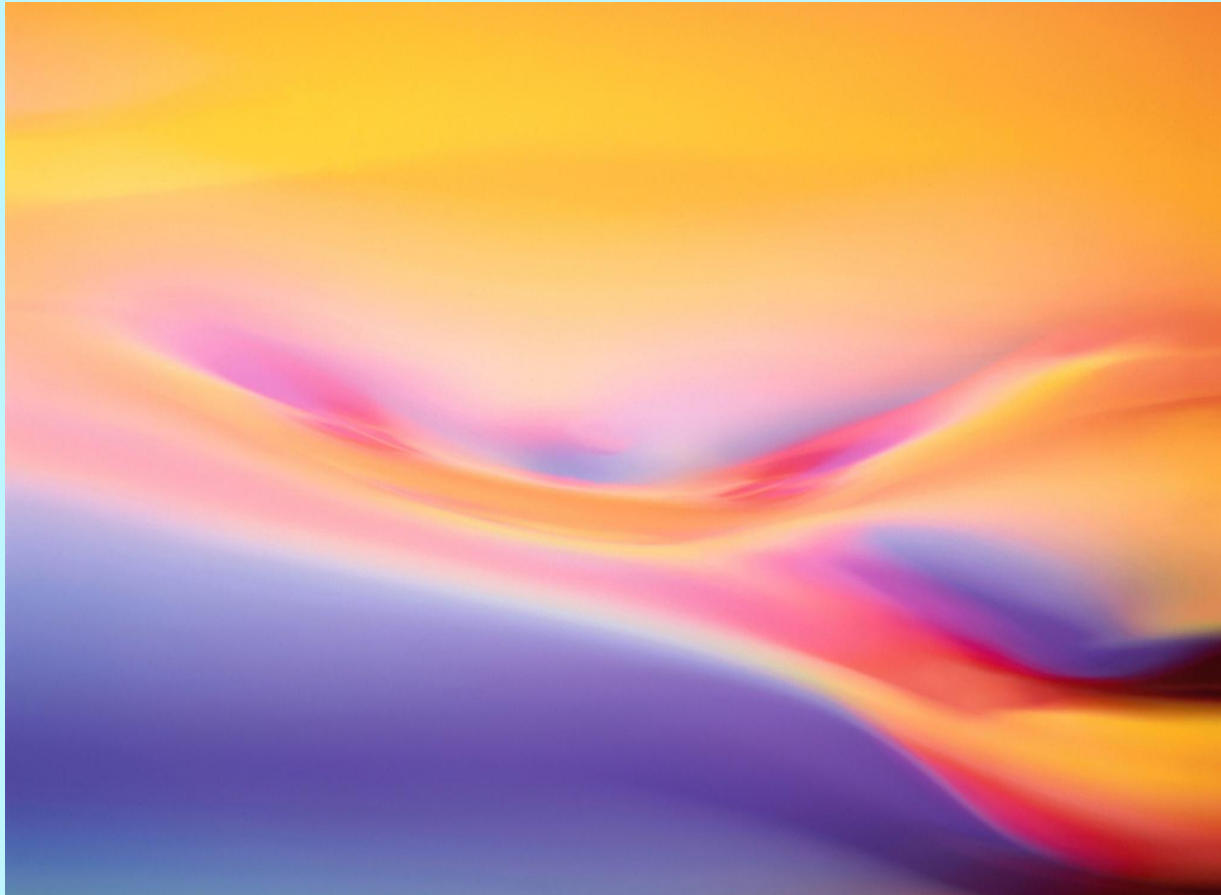


## Лекция № 1

# Формирование квантовых понятий о свете



*Н.В.НИКИТИН*



Т.Р.Шарапова

# Система единиц СГС

**СГС** - сантиметр, грамм, секунда

Сила: дина (дин)      1 дин =  $10^{-5}$  Н

Работа: эрг            1 эрг =  $10^{-7}$  Дж

Мощность: эрг/сек    1 эрг/сек =  $10^{-7}$  Вт

В механике системы СИ и СГС эквивалентны с точки зрения физики

В электромагнетизме СГС более физична, чем СИ

СГС — **абсолютная система**, т.е. рассматривает электрические и магнитные величины как производные от механических величин

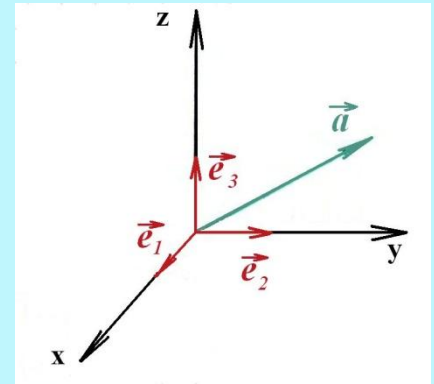
СИ — добавлена новая **независимая** единица: сила электрического тока (Ампер)

**СГС** -  $[E] = [D] = [B] = [H] = \frac{m^{1/2}}{l^{3/2}t}$

Закон кулона:  $F_q = -\frac{Q_1 Q_2 e^2}{r^2} \vec{n}$ , где  $\vec{n} = \frac{\vec{r}}{r}$  и  $e = +|e|$  - заряд протона,

$Q_1$  и  $Q_2$  - безразмерные постоянные, выражающие заряд в числах заряда протона. Например:  $Q_p = +1$   $Q_e = -1$   $Q_n = 0$

$\vec{F} = -\vec{\nabla} U$ , где  $\vec{\nabla} = \vec{e}_1 \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_2 \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_3 \frac{\partial}{\partial z} = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$



«набла» или оператор Гамильтона,

или градиент

$F_q = -\vec{\nabla} U_q \equiv -grad U_q \Rightarrow U_q = \frac{Q_1 Q_2 e^2}{r}$

Сила Лоренца:  $\vec{F} = Qe \left( \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v} \times \vec{B}] \right)$

Соответствие: **1 Кл  $\approx 3 \cdot 10^9$  ед. заряда СГС**

**СИ** -  $[E] \neq [D] \neq [B] \neq [H]$

и далее в вакууме:  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$

**НЕ ФИЗИЧНО!!**  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

$\epsilon_0$  и  $\mu_0$  - электрическая и магнитная постоянные.

# Электронвольт и его производные

**Электронвольт (эВ)** – внесистемная единица:

1 эВ – это энергия, которую приобретает микрочастица с зарядом, равным заряду электрона, при прохождении разности потенциалов в 1 В.

Удобно так как:

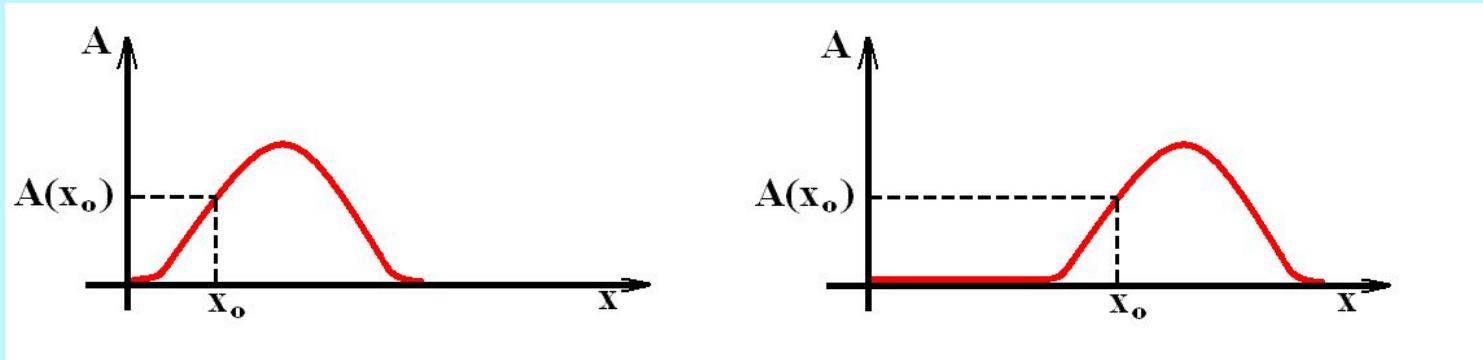
- 1) заряды микрочастиц кратны заряду электрона;
- 2) микрочастицы, в основном, взаимодействуют с электрическими и магнитными полями.

$$\begin{array}{ccc} 1\text{КэВ} = 10^3 \text{ эВ}, & 1\text{МэВ} = 10^6 \text{ эВ}, & 1\text{ГэВ} = 10^9 \text{ эВ} \\ \uparrow \text{ атом} & \uparrow \text{ ядра} & \uparrow \text{ элементарные} \\ & & \text{ частицы} \end{array}$$

$$1\text{эВ} = 1,602\,176\,487(40) \times 10^{-12} \text{ эрг},$$

$$1\text{эВ} = 1,602\,176\,487(40) \times 10^{-19} \text{ Дж}$$

# Волновое уравнение и комплексная экспонента



Волна характеризуется своей амплитудой  $A(x, t)$ . Если форма волны не меняется, то:  $A(x, t) = A(x_0) = A(x - vt)$  волна бежит вправо

волна бежит влево —  $A(x + vt)$

$v$  – скорость распространения волны .

$$\frac{\partial A(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial A(x, t)}{\partial x} \frac{\partial (x \mp vt)}{\partial t} = \mp v \frac{\partial A(x, t)}{\partial x}$$

Это уравнение не удобное, т.к. зависит от направления движения волны. Чтобы найти уравнение, справедливое для обоих случаев, продифференцируем второй раз:

$$\frac{\partial^2 A(x, t)}{\partial t^2} = \mp v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A(x, t)}{\partial t} \right) = (\mp)^2 v^2 \frac{\partial^2 A(x, t)}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 A(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A(x, t)}{\partial t^2} = 0 \leftarrow \text{волновое уравнение}$$

$$\frac{\partial^2 A(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 A(x, t)}{\partial t^2} = 0 \leftarrow \text{или в трех мерном случае,}$$

где оператор Лапласа  $\Delta = \left( \nabla \nabla \right) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ,  $r = (x, y, z)$ .

Для световой волны  $v \neq c$   $A = \left\{ \begin{array}{l} \text{По} \\ \text{Да} \\ \text{В} \\ \text{Н} \end{array} \right\}$  одномерного случая

$$\frac{\partial^2 A(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

Легко проверить, что решение волнового уравнения есть:

$$A(x,t) = A_0 \cos(\omega t - kx + \delta) = A_1 \cos(\omega t - kx) + A_2 \sin(\omega t - kx),$$

где  $\omega$  - частота волны,  $k$  - волновой вектор и  $k = \omega/c$

В трех мерном случае:  $A(\vec{r}, t) = A_0 \cos(\omega t - k\vec{r} + \delta)$ ,  $\vec{n} = \frac{\omega \vec{r}}{c}$  - единичный вектор в направлении движения фронта волны

вектор в направлении движения фронта волны

Воспользуемся формулой Эйлера:  $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$

Тогда, если  $\varphi = \omega t - k\vec{r} + \delta$   $A(\vec{r}, t) = \text{Re} \left( A_1 e^{i(\omega t - k\vec{r})} + A_2 e^{-i(\omega t - k\vec{r})} \right)$

Экспоненты проще дифференцировать и умножать, поэтому работают с ними.

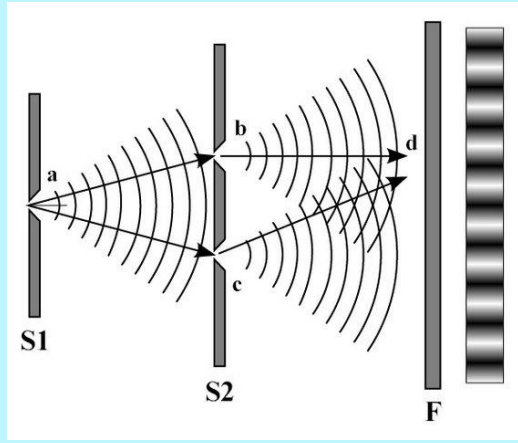
Обозначение **Re** убирают.

Часто вводят:  $kx \equiv \omega t - k\vec{r}$ ; тогда:  $A(\vec{r}, t) = A_1 e^{i(kx)} + A_2 e^{-i(kx)}$

отрицательно частотная часть

положительно частотная часть

# Свет как волна: опыт Томаса Юнга (1803)



Интерференция света от двух щелей – доказательство волновой природы света

$$A_b(t) = A_0 e^{-i\omega t + ik_1 r_d + i\varphi}, \quad A_c(t) = A_0 e^{-i\omega t + ik_2 r_d + i\varphi},$$

$$|A_0|^2 = I_0, \quad |k_1| = |k_2| = k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \leftarrow \text{длина волны}$$

Интенсивность света в точке **d**:

$$I = |A_b + A_c|^2 = |A_b|^2 + |A_c|^2 + A_b^* A_c + A_b A_c^* =$$

$$|A_0|^2 + |A_0|^2 + |A_0|^2 \left( e^{i r_d (k_2 - k_1)} + e^{-i r_d (k_2 - k_1)} \right) =$$

$$2|A_0|^2 \left[ 1 + \cos \left( r_d (k_2 - k_1) \right) \right] = 2|A_0|^2 \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi \Delta}{\lambda} \right) \right],$$

$\Delta$  -разность хода лучей по путям "bd" и "cd". Таким образом:  $I = 2I_0 \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi \Delta}{\lambda} \right) \right]$

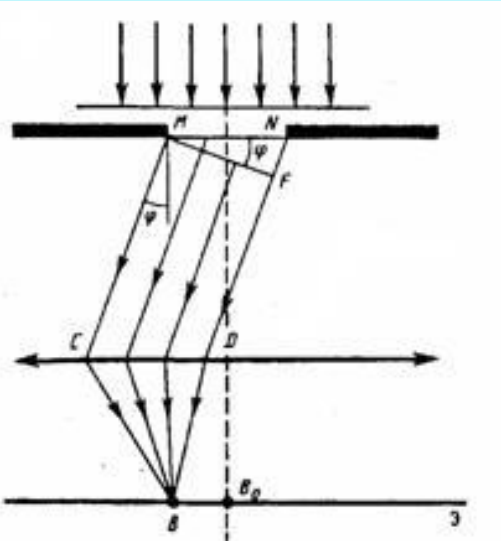
Условие максимумов:

$$\frac{2\pi \Delta}{\lambda} = 2\pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \Rightarrow \Delta = n\lambda$$

Если свет –корпускула, то  $I = |A_b|^2 + |A_c|^2$  и интерференции быть не должно!!!

# Свет как волна: дифракция Фраунгофера на щели (1821-1822 гг)

Дифракция света на щели – еще одно доказательство волновой природы света



$$dA = \frac{dx}{b} A_0 e^{-i\omega t + i k x \sin \varphi}$$

Амплитуда в точке "B"

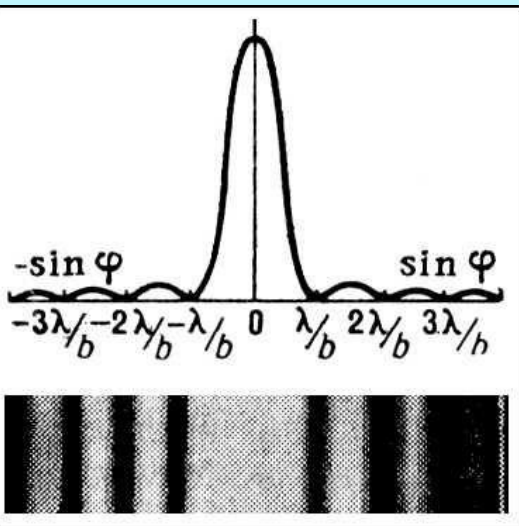
$$A_B = \int_0^b dA \sim \frac{\sin\left(\frac{bk}{2} \sin \varphi\right)}{\frac{bk}{2} \sin \varphi}$$

Интенсивность в точке "B"

$$I_B \sim |A_B|^2 \sim \frac{\sin^2\left(\frac{bk}{2} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{bk}{2} \sin \varphi\right)^2}$$

Условие максимумов:  $\frac{bk}{2} \sin \varphi = n\pi$ , где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$

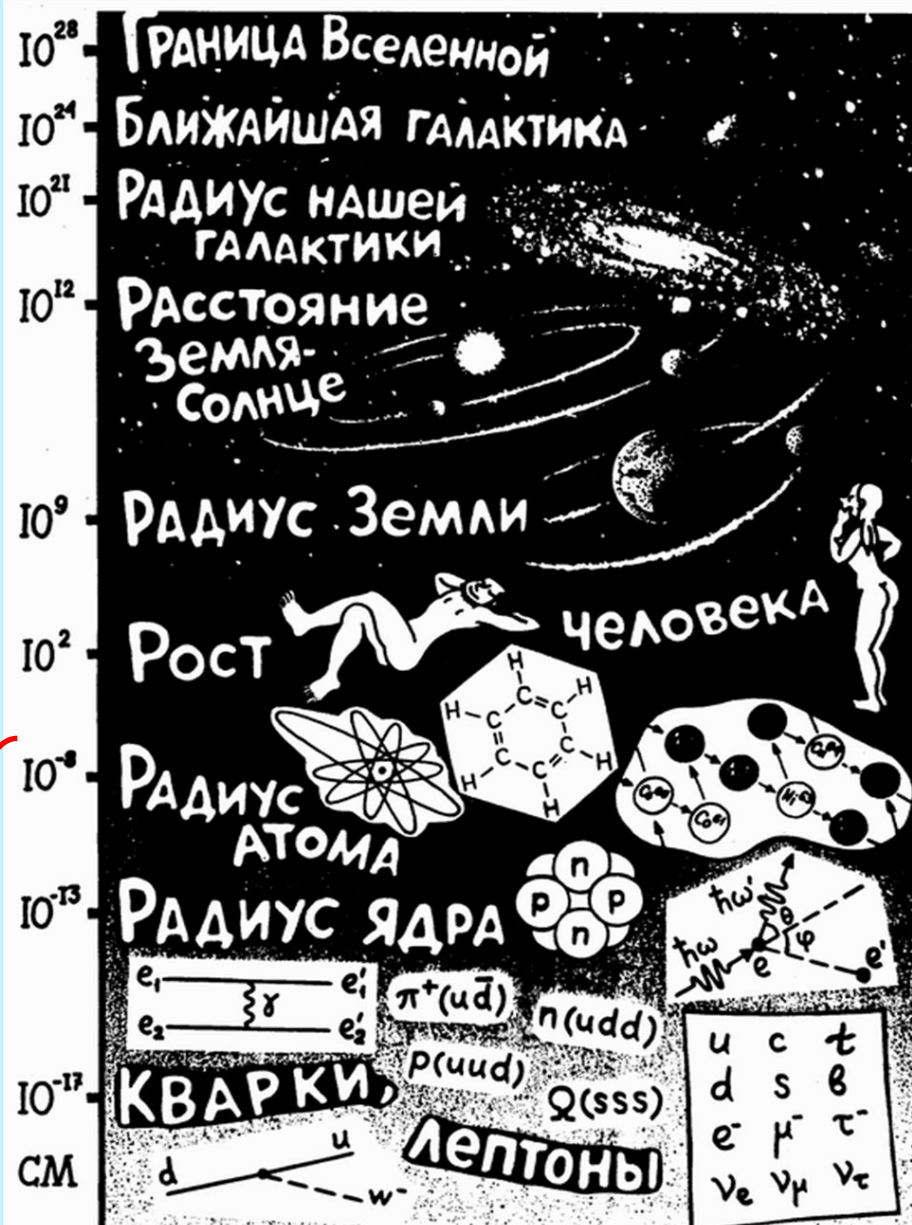
$n \neq 0$ , чтобы знаменатель в формуле для  $I_B$  не равнялся нулю.





# Масштаб квантовых явлений

Область применения квантовой теории



Начиная с масштабов  $\sim 10^{-6} - 10^{-8}$  см классическая физика перестаёт работать. В первой четверти XX-ого века это продемонстрировал ряд экспериментов:

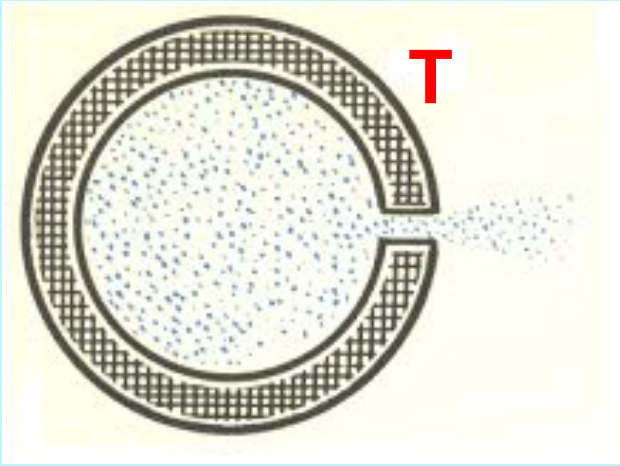
- спектр излучения абсолютно черного тела
- фотоэффект
- эффект Комптона
- опыты Э.Резерфорда по исследованию структуры атомов
- атомная спектроскопия
- взаимные превращения микрочастиц и множество других эффектов.

Микромир требует новых идей и нового математического аппарата:

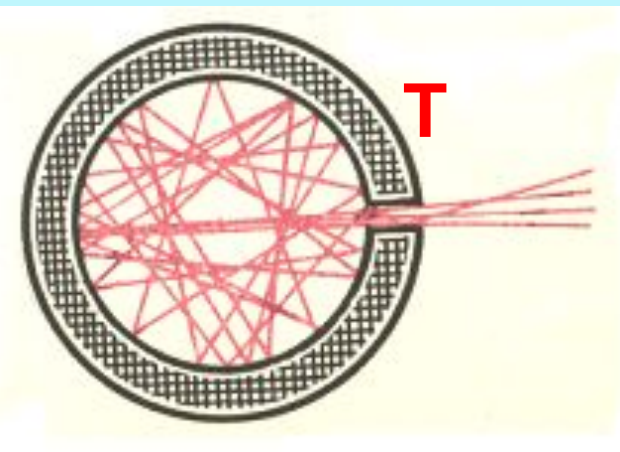
- **Нерелятивистская квантовая механика**
- **Квантовая теория поля**

описывают микромир только при помощи наблюдаемых величин. В теории сочетаются взаимоисключающие, с точки зрения классической механики, макроскопические понятия.

# Модель абсолютно черного тела (аналогия с идеальным газом)

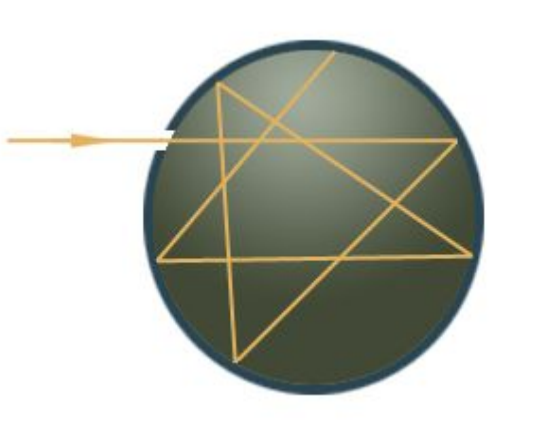


**Идеальный газ:** атомы сталкиваются со стенками, и в результате устанавливается тепловое равновесие между газом и сосудом. Газ приобретает температуру стенок. Число атомов при столкновениях не меняется. Чтобы измерить температуру газа, можно выпустить небольшую часть атомов через маленькое отверстие.



**Модель абсолютно черного тела:** световые волны много раз отражаются от стенок, при этом они поглощаются стенками и излучаются вновь. В результате устанавливается тепловое равновесие между излучением и стенками. В подобных процессах характеристики излучения полностью определяются температурой стенок. Свет, выходящий из маленького отверстия, сделанного в таком резервуаре, будет иметь энергетический спектр «абсолютно черного тела».

# Спектр излучения абсолютно черного тела: общие формулы (1)



**Задача:** описать излучение в замкнутой полости, стенки которой находятся при фиксированной температуре  $T$ .

Энергия в единице объёма: 
$$U = \int_0^{\infty} \rho_{\omega}(T) d\omega$$

↑  
Величина энергии поля в единице объёма

Очевидно, что: 
$$\rho_{\omega}(T) d\omega = \langle \varepsilon_{\omega}(T) \rangle dn_{\omega}$$

в интервале частот от  $\omega$  до  $\omega+d\omega$

$\langle \varepsilon_{\omega}(T) \rangle$  - средняя энергия полевой моды (колебания) с частотой  $\omega$

$dn_{\omega}$  - число полевых мод (колебаний) в интервале частот от  $\omega$  до  $\omega+d\omega$

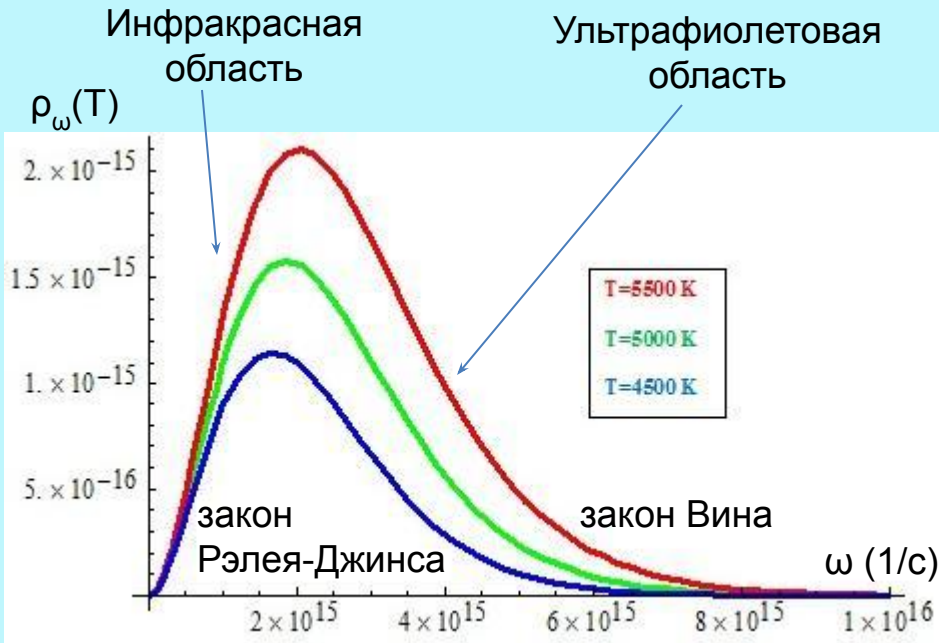
Согласно закону Больцмана, вероятность обнаружить колебание с энергией  $\varepsilon_{\omega}$  :

$$w(\varepsilon_{\omega}, T) = Ne^{-\varepsilon_{\omega}/kT}$$

В классическом случае:

$$\langle \varepsilon_{\omega}(T) \rangle = \frac{\int \varepsilon_{\omega} w(\varepsilon_{\omega}, T) d\varepsilon_{\omega}}{\int w(\varepsilon_{\omega}, T) d\varepsilon_{\omega}} = kT$$

# Спектр излучения абсолютно черного тела: общие формулы (2)



Число колебаний в интервале от  $\omega$  до  $\omega+d\omega$  :

$$dn_{\omega} = \frac{\omega^2 d\omega}{\pi^2 c^3}$$

Эта задача будет разобрана на семинаре

Из размерностей:

$$[dk] = [dk_x \ dk_y \ dk_z] = \frac{1}{l^3} \Rightarrow$$

$$dn_{\omega} \sim dk \sim k^2 dk = \frac{1}{c^3} \omega^2 d\omega$$

Но множитель  $\frac{1}{\pi^2}$  воспроизвести не просто!!!

Тогда:  $\rho_{\omega}(T) = \frac{kT}{\pi^2 c^3} \omega^3$  **закон Рэля-Джинса**. Энергия в единице объёма:

**Закон Вина**: анализ экспериментальных данных в ультрафиолетовой области (большие  $\omega$ ) привёл В.Вина в 1896 году к следующей **эмпирической** формуле для  $\rho_{\omega}(T)$

$$U \sim \int_0^{\infty} \omega^2 d\omega \rightarrow \infty$$

- "ультрафиолетовая катастрофа"

$$\rho_{\omega}(T) \sim -\exp\left(-\frac{const \omega}{kT}\right)$$



# Спектр излучения абсолютно черного тела: формула Планка

**Гипотеза М.Планка:** для каждого колебания существует минимальное значение энергии (квант энергии)  $\varepsilon_{\omega}^{(0)}$

Тогда каждое колебание содержит 0, 1, 2, ...,  $K$ , ... -квантов энергии. Вероятность для  $K$  квантов задается формулой Больцмана. Тогда:

$$\langle \varepsilon_{\omega} \rangle = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} (n\varepsilon_{\omega}^{(0)}) \cdot w(n\varepsilon_{\omega}^{(0)}, T)}{\sum_{n=0}^{\infty} w(n\varepsilon_{\omega}^{(0)}, T)} = \frac{\varepsilon_{\omega}^{(0)}}{\exp\left(\varepsilon_{\omega}^{(0)} / kT\right) - 1}$$

М. Планк  
(1858-1947)

В пределе больших энергий ( $\varepsilon_{\omega}^{(0)} \gg kT$ )  $\langle \varepsilon_{\omega} \rangle \sim -\exp\left(\varepsilon_{\omega}^{(0)} / kT\right) \Rightarrow \rho_{\omega}(T) \sim -\exp\left(\varepsilon_{\omega}^{(0)} / kT\right)$

По закону Вина  $\varepsilon_{\omega}^{(0)} \sim \omega$ . М.Планк предположил универсальность этой пропорциональности для любых энергий:

$$\varepsilon_{\omega}^{(0)} = \hbar\omega$$

# Постоянная Планка

# h

$$Дж \cdot с = 6,626\ 069\ 57(29) \times 10^{-34}$$

$$эВ \cdot с = 6,626\ 069\ 57(29) \times 10^{-27}$$

$$эВ \cdot с = 4,135\ 667\ 516(91) \times 10^{-15}$$

Используется «перечеркнутая» постоянная Планка:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$Дж \cdot с = 1,054\ 571\ 726(47) \times 10^{-34}$$

$$эВ \cdot с = 1,054\ 571\ 726(47) \times 10^{-27}$$

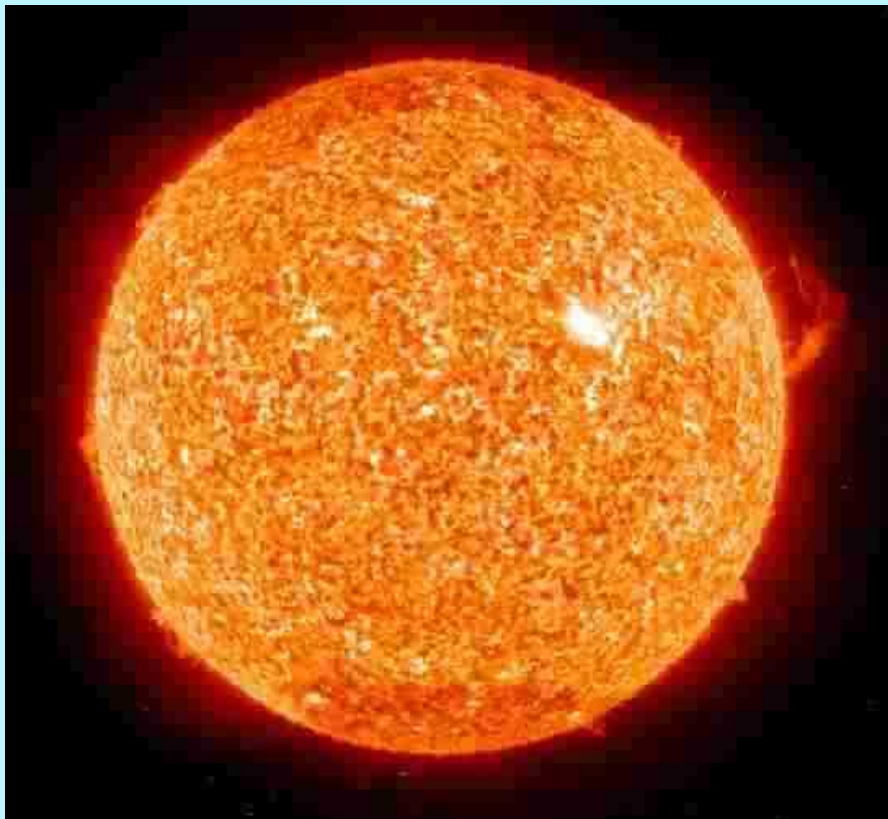
$$эВ \cdot с = 6,582\ 119\ 28(15) \times 10^{-16}$$

$$\varepsilon_{\omega}^{(0)} = \hbar\omega$$

М.Планк не вкладывал в это выражение никакого физического смысла, полагая его **математической абстракцией**, которая позволяет получить правильную формулу для спектра энергии абсолютно черного тела.

# Солнце как абсолютно черное тело

Абсолютно черное тело может быть совсем не черным, а даже очень ярким. По одному из определений абсолютно черное тело – это тело, которое поглощает все падающее на его поверхность излучение. Но, поскольку, такое тело не может бесконечно нагреваться, то оно **начинает ИЗЛУЧАТЬ**. Согласно закону сохранения энергии в состоянии термодинамического равновесия абсолютно черное тело излучает ровно столько энергии, сколько и поглощает.

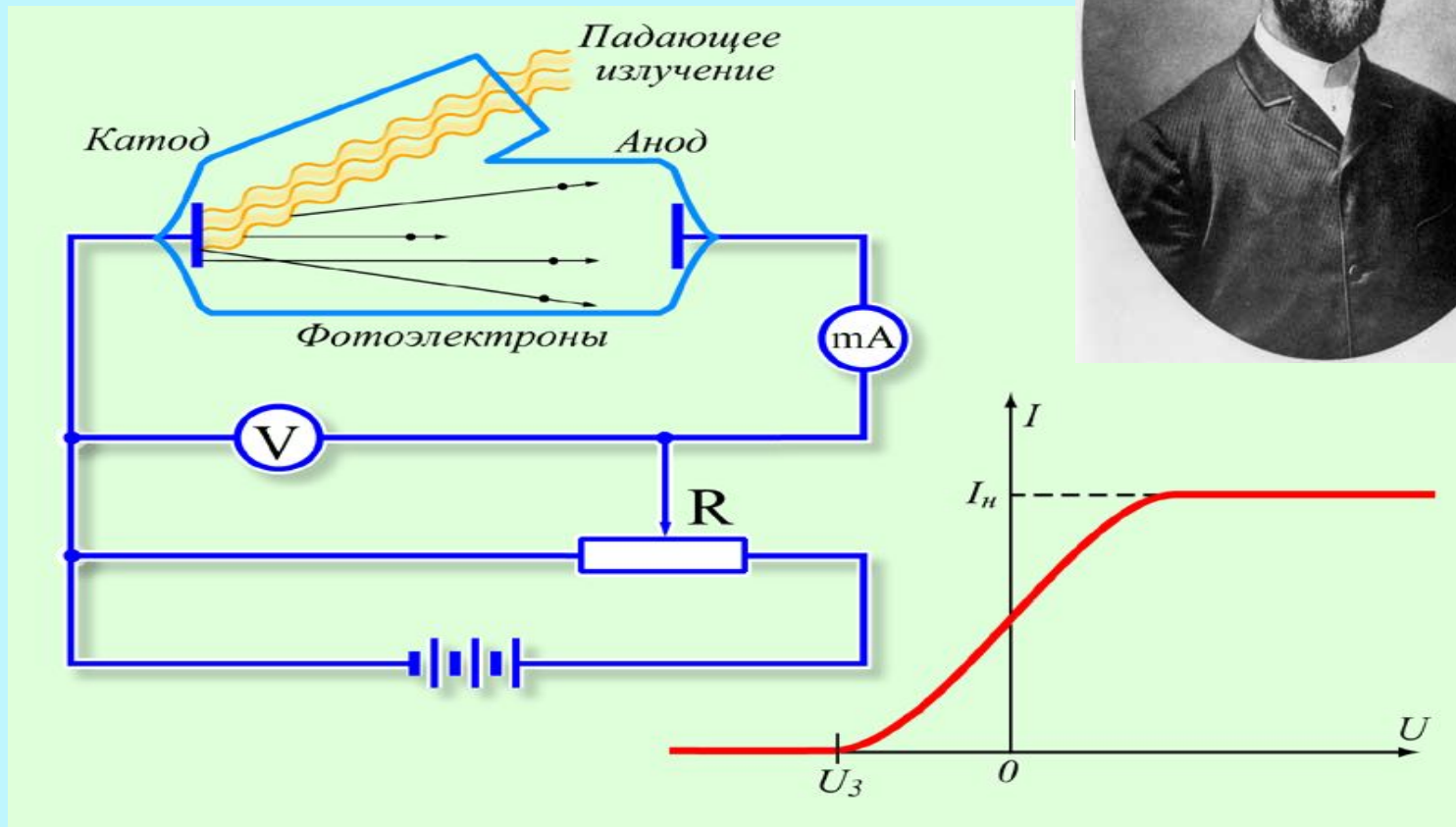


Характерным примером **ЯРКОГО** абсолютно черного тела является фотосфера (видимая поверхность) нашего Солнца, которая излучает энергию как абсолютно черное тело с  **$T \sim 6000^\circ \text{K}$** . Максимум излучения приходится на длину волны  **$\lambda \approx 550 \text{ нм}$** .



# Фотоэффект

Генрих Герц  
(1857-1894)



В 1887 г., изучая явление электрического пробоя газового промежутка, Герц обнаружил, что освещение ультрафиолетовым светом отрицательного электрода искрового промежутка, находящегося под напряжением, облегчает проскакивание искры между электродами.

# Сущность фотоэффекта

Процесс вырывания электронов из вещества под действием излучения получил название **фотоэлектрического эффекта** или, сокращенно, **фотоэффекта**. В результате фотоэффекта изначально нейтральное тело под действием излучения приобретает **положительный** заряд.

Фотоэлектрическими свойствами обладают металлы, диэлектрики, полупроводники и электролиты.

Чаще всего фотоэффект наблюдается при облучении образцов **ультрафиолетовыми** лучами. Причина этого станет понятна чуть позже. Именно такой тип фотоэффекта наблюдал Г.Герц. Однако, ряд щелочных металлов (*литий, натрий, калий, рубидий и цезий*) чувствительны к фотоэффекту от излучения в **видимой части** спектра.

В лекциях мы будем строить теорию **внешнего фотоэффекта**, когда электроны высвобождаются из **поверхностного слоя** образца и переходят в вакуум. Эта теория важна для экспериментального обоснования корпускулярных свойств света.

# Классическая теория фотоэффекта

С точки зрения классической теории, надо рассматривать колебания электрона в поле монохроматической волны:

$$m\ddot{\vec{r}} = eE \cos(\omega t - |\vec{k}|z)$$

Если в начальный момент времени электрон покоился, то максимальная кинетическая энергия электрона:

$$E_{\max} = \frac{m\dot{\vec{r}}^2}{2} \sim |\vec{E}|^2 \sim I$$

то есть должна быть прямо пропорциональна интенсивности излучения  $I$  и не зависеть от частоты. Это значит, что при любой частоте пучок света высокой интенсивности должен выбивать фотоэлектроны.

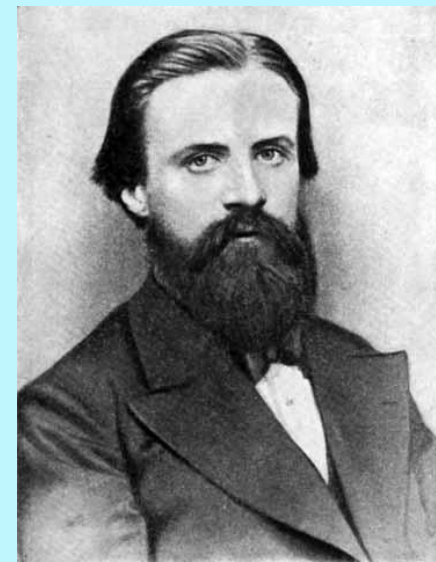
**Эксперименты ПРОТИВОРЕЧЯТ  
предсказаниям классической  
теории!**



# Закономерности фотоэффекта

Р.Э.Милликен  
(1886-1953)

А. Г. Столетов  
(1839-1896)



- Число высвобождаемых электронов прямо пропорционально интенсивности падающего света.
- Максимальная кинетическая энергия электронов  $E$  зависит от частоты  $\omega$  и не зависит от интенсивности падающего света.
- Энергия электронов  $E$  является линейной функцией частоты падающего света  $\omega$ .
- Существует граничная частота света  $\omega_0$ , ниже которой фотоэффект невозможен (**красная граница фотоэффекта**).

# 1905. Фотоэффект

Объяснение явления фотоэффекта дал Эйнштейн. Согласно Эйнштейну электромагнитное излучение состоит из квантов, названных позднее фотонами. Каждый фотон имеет определенную энергию

$$\varepsilon_{\omega}^{(0)} = \hbar \omega \quad \omega \text{ — частота фотона.}$$

Закон сохранения энергии приводит к очевидному соотношению

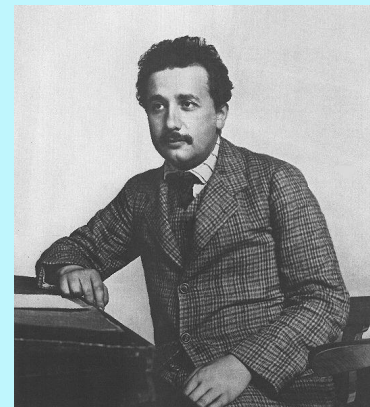
$$\hbar \omega = E + W$$

$E$  — кинетическая энергия электрона,  $\omega$  — частота света, падающего на мишень,  $W$  — работа выхода электрона из металла. На основе этого соотношения легко описать все наблюдаемые особенности фотоэффекта

**Нобелевская премия по физике**

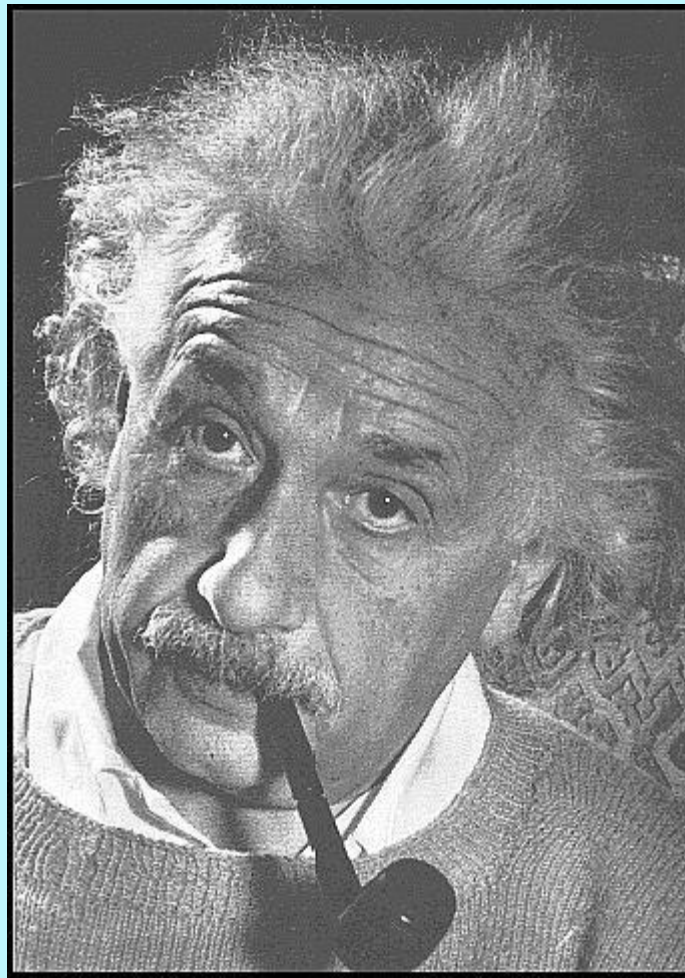
**1921 г. — А. Эйнштейн**

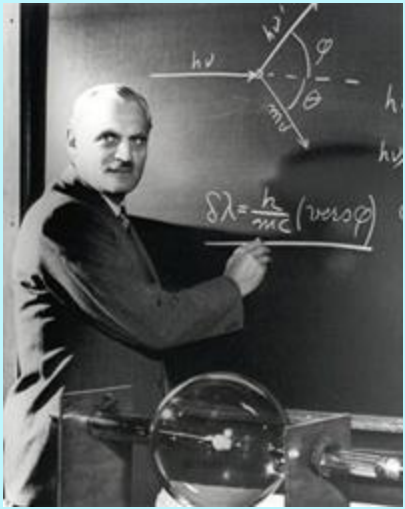
За вклад в теоретическую физику и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта.



А.Эйнштейн  
(1879-1955)

**Благодаря формуле Эйнштейна для фотоэффекта квант света превратился из математической абстракции Макса Планка в физическую реальность.**





А.КОМПТОН  
(1892-1962)

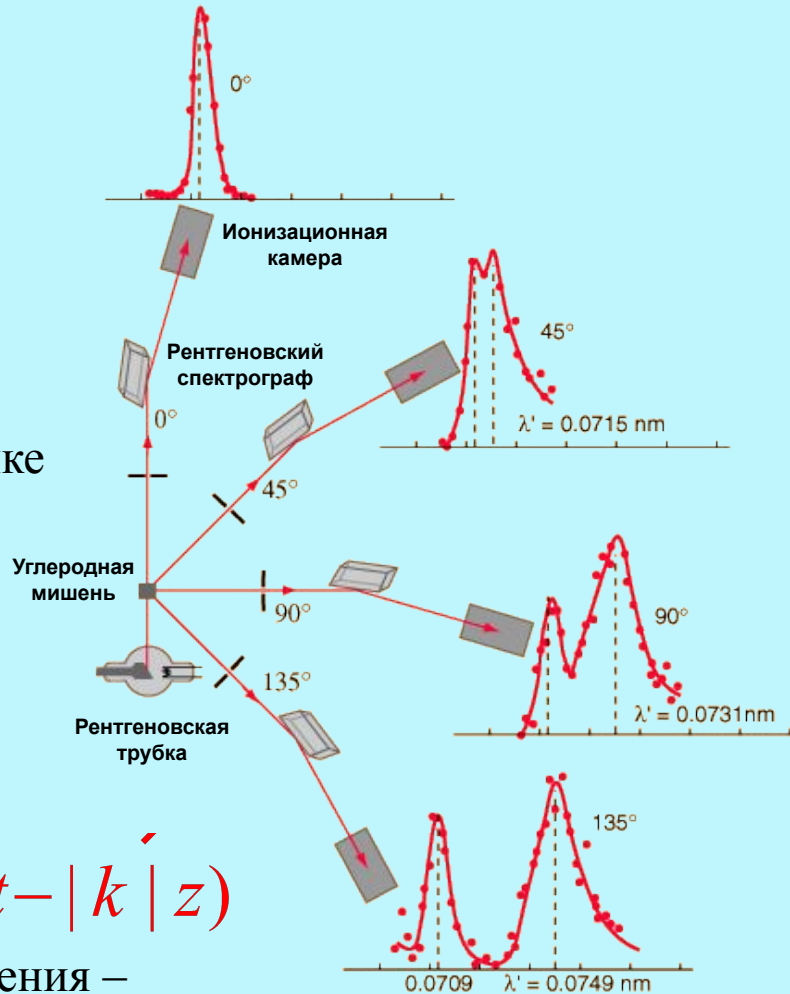
# Квант света как физическая реальность: эффект Комптона (1)

Комптон изучал рассеяние жесткого рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda$  на образцах, состоящих из легких атомов (графит, парафин и т.д.).

Он нашел, что рассеянное излучение помимо волн с  $\lambda$  содержит волны с  $\lambda' > \lambda$ . Разность  $\lambda' - \lambda$  не зависит от материала и  $\lambda$ , но зависит от угла  $\theta$ , под которым ведется измерения. Эта зависимость выражается формулой:

$$\lambda' - \lambda \sim 1 - \cos \theta$$

Данное явление называется **эффектом Комптона**.



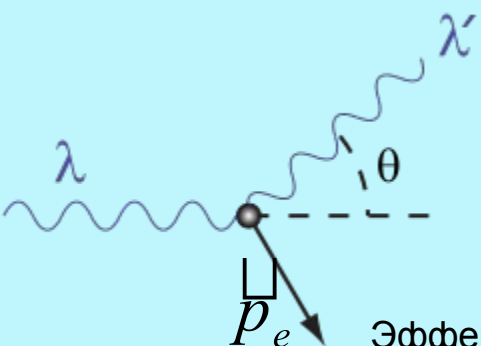
В классической физике взаимодействие электрона с монохроматической волной описывается уравнением **вынужденных колебаний**:

$$m\ddot{r} = eE \cos(\omega t - |k|z)$$

Решение этого уравнения – **рассеянная волна** – обладает:

$$\lambda' = \lambda$$

# Квант света как физическая реальность: эффект Комптона (2)



Классическая физика:

$$\lambda' = \lambda$$

Эксперимент (эффект Комптона):

$$\lambda' - \lambda \sim 1 - \cos \theta$$

Эффект можно объяснить, если предположить, что фотон – это частица с  $\varepsilon = \hbar \omega$  и  $p = \hbar k$  в этом случае:

$$\begin{cases} \hbar \omega + m_e c^2 = \hbar \omega' + E_e \\ \hbar k = \hbar k' + p_e \end{cases}$$

Напомним, что

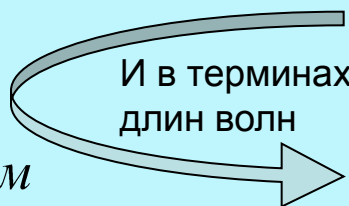
$$E_e^2 = p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4 \quad |k| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad |k'| = \frac{2\pi}{\lambda'} = \frac{\omega'}{c}$$

$$\begin{cases} \hbar(\omega - \omega') + m_e c^2 = E_e \\ \hbar(k - k') = p_e \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \hbar^2(\omega - \omega')^2 + 2m_e c^2 \hbar(\omega - \omega') + m_e^2 c^4 = E_e^2 \\ \hbar^2 \omega^2 + \hbar^2 \omega'^2 - 2\hbar^2 \omega \omega' \cos \theta = c^2 p_e^2 \end{cases}$$

Возводим в квадрат

Вычитаем второе равенство из первого:

$$\omega - \omega' = \frac{p_e}{m_e c^2} \omega \omega' (1 - \cos \theta)$$



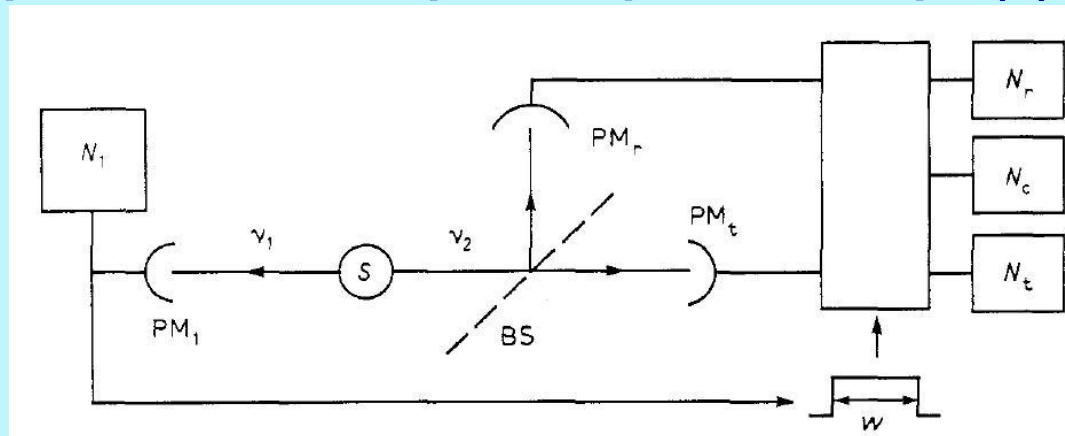
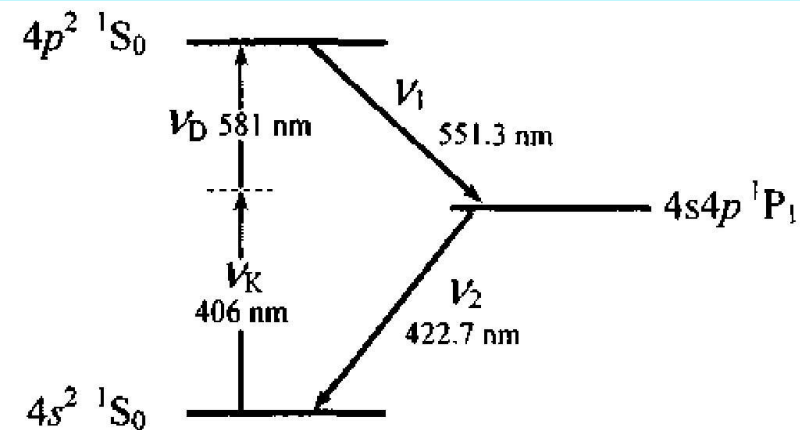
$$\lambda' - \lambda = \frac{2\pi \hbar}{m_e c} (1 - \cos \theta) \equiv \lambda_k (1 - \cos \theta)$$

Комптоновская  
длина волны  
электрона

$$\lambda_k = \frac{2\pi \hbar}{m_e c} = \frac{h}{m_e c} \approx 2.426 \cdot 10^{-10} \text{ см}$$

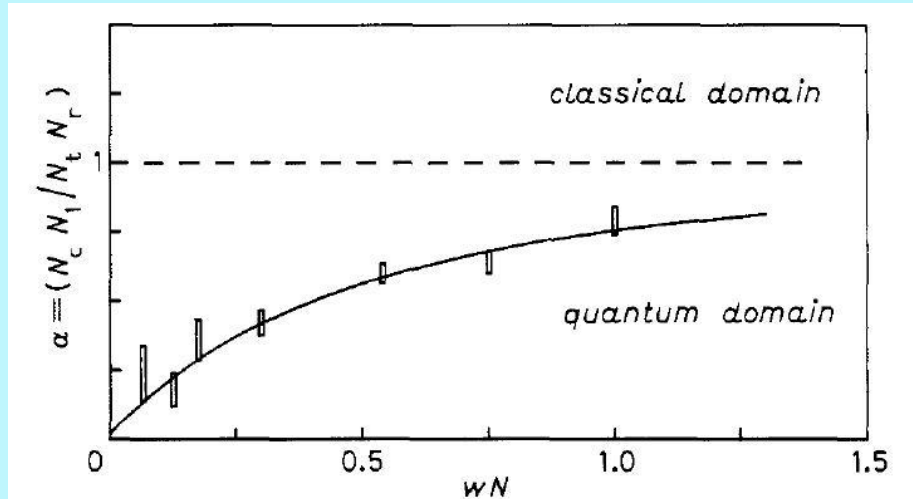
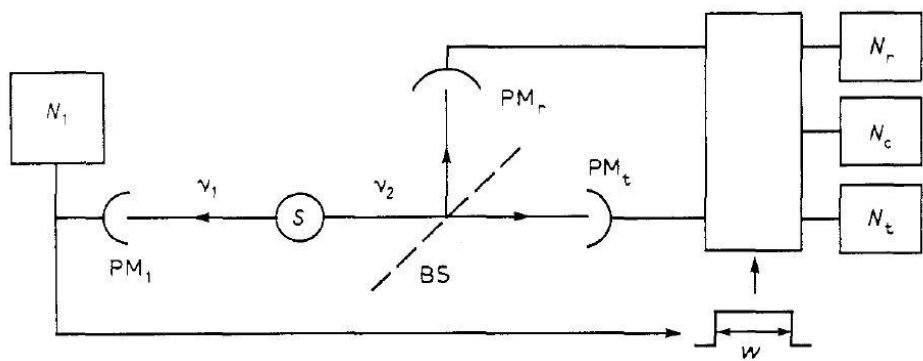


# Квант света как физическая реальность: одиночные фотоны в эксперименте Аспе, Гренджера и Роджера (1)



В опытах [А. Аспе](#), [П.Гренджера](#) и [Д.Роджера](#) использовался источник одиночных фотонов на основе возбуждённых состояний атома Ca. Переход с возбужденного  $s$ -уровня на промежуточный  $p$ -уровень ( $4p^2 \ ^1S_0 \rightarrow 4s4p \ ^1P_1$ ) сопровождается излучением фотона с частотой  $\nu_1 = 510 \text{ нм}$ . Этот фотон регистрируется счетчиком  $PM_1$ . Этот счетчик дает сигнал двум другим счетчикам  $PM_r$  и  $PM_t$ , чтобы они были готовы к регистрации второго фотона с частотой  $\nu_2 = 403 \text{ нм}$ , возникающего от перехода с промежуточного  $p$ -уровня на основной  $s$ -уровень ( $4s4p \ ^1P_1 \rightarrow 4s^2 \ ^1S_0$ ). Сигнал готовности действует в течение времени  $w$ , где  $w = 2\tau_s$  — время жизни промежуточного  $p$ -уровня. Вероятность регистрации фотона  $\nu_2$ , испущенного тем же атомом, что и фотон  $\nu_1$ , много больше, чем вероятность регистрации фотона от другого атома, если регистрация происходит за время  $w$ .

# Квант света как физическая реальность: одиночные фотоны в эксперименте Аспе, Гренджера и Роджера (2)



$N_t$  и  $N_r$  – число одиночных отсчетов детекторов  $PM_r$  и  $PM_t$  соответственно,  $N_c$  – число совпадений, когда оба детектора срабатывают за время  $\mathcal{W}$ .  $N_1$  - число возможностей срабатывания каждого из детекторов за время эксперимента ( $T$ ).

Вероятности:  $P_t = \frac{N_t}{N_1}$ ,  $P_r = \frac{N_r}{N_1}$  и  $P_c = \frac{N_c}{N_1}$ .

**Антикорреляционный параметр:**

$$A = \frac{P_c}{P_t P_r} = \frac{N_c N_1}{N_t N_r} \rightarrow 0, \quad \text{- если фотон это частица, а интенсивность света } j \text{ не большая}$$

$$\rightarrow 1, \quad \text{- интенсивность света } j \text{ большая}$$

Экспериментальные данные подтверждают ЭТО



Алан Аспе (р. 1947)

Это должен знать каждый  
ФНМэшник с середины февраля:

$$\hbar = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ эВ} \cdot \text{с}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} =$$
$$1,602 \cdot 10^{-12} \text{ эрг.}$$

В СГС скорость света в вакууме

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} \text{ а не } 1 !!!$$