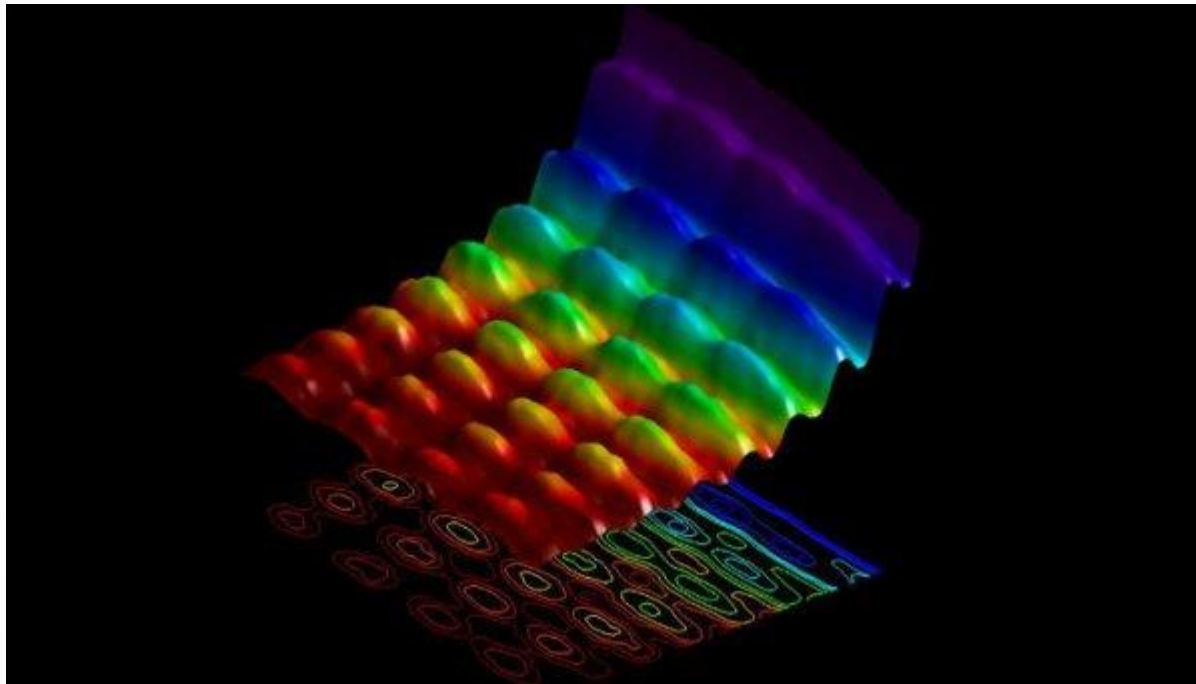




Корпускулярно-волновая двойственность света



ENERGY-SPACE PHOTOGRAPHY OF LIGHT CONFINED ON A NANOWIRE,
SIMULTANEOUSLY SHOWS BOTH SPATIAL INTERFERENCE AND ENERGY
QUANTIZATION

NATURE COMMUNICATIONS *Фабрицио Карбоне*

В конце 19 века считалось, что ответ на вопрос о природе света окончательно найден – **свет** представляет собой распространяющиеся в пространстве **электромагнитные волны**. Волновая теория хорошо объясняла и описывала такие оптические явления как интерференция, дифракция и поляризация света.

Однако, **в начале 20 века** при исследовании взаимодействия света с веществом были **обнаружены оптические явления, закономерности которых не смогла описать волновая теория**. Более того, предсказания волновой теории оказывались в противоречии с наблюдаемыми в экспериментах закономерностями этих явлений.

Объясняя эти явления, в 1905 г. А.Эйнштейн выдвинул **корпускулярную теорию света**, которая, развивая идеи Ньютона о световых corpusculis, рассматривала свет как поток большого числа частиц, названных **фотонами**. Фотонная теория света объяснила качественные и количественные закономерности явлений **квантовой оптики**.

Вопросы

1. Тепловое излучение. Проблемы волнового описания.
2. Формула и гипотеза Планка.
3. Фотоэффект и его закономерности.
4. Гипотеза и уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
5. Фотоны.
6. Эффект Комптона.
7. Корпускулярно-волновая двойственность света.

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

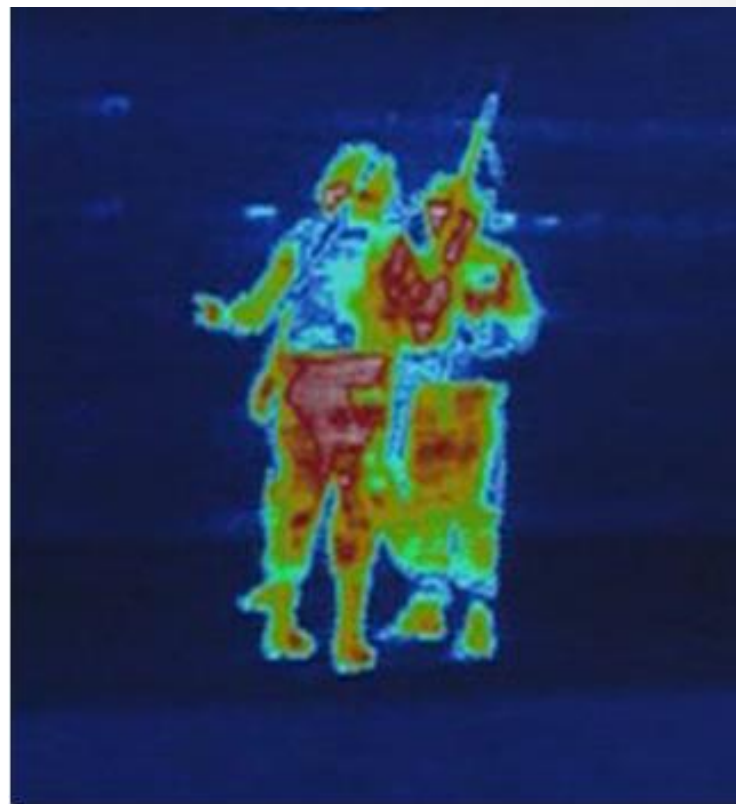
Любые тела, абсолютная температура которых $T > 0 \text{ K}$, являются источниками электромагнитного излучения.

Это излучение **связано с внутренней энергией** и называется **тепловым излучением** (ТИ).

Эксперименты показывают, что ТИ **имеет непрерывный спектр**. Это означает, что нагретое тело испускает некоторое количество энергии излучения в любом диапазоне частот или длин волн. Распределение энергии ТИ тела по спектру **зависит от температуры тела**. При этом для всех тел с **увеличением температуры максимум энергии ТИ смещается в коротковолновый участок спектра, а общая энергия излучения возрастает**.

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Регистрация теплового излучения инфракрасного диапазона



1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Регистрация теплового излучения инфракрасного диапазона

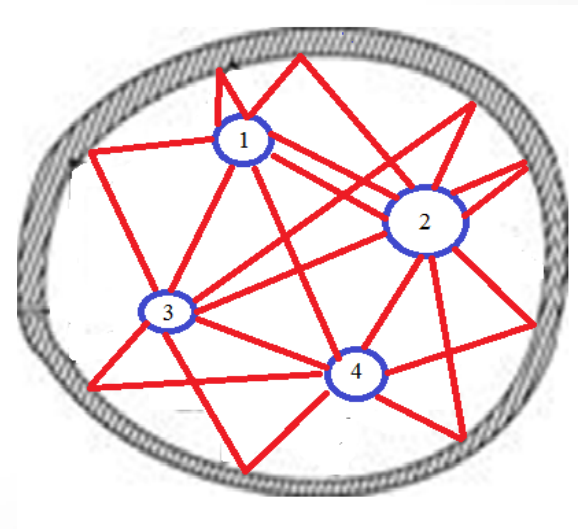


1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

ТИ может находиться в состоянии **термодинамического равновесия** с излучающими телами.

Способность ТИ находиться в равновесии с излучающими телами **отличает его от других видов** излучения тел. ТИ, находящееся в равновесии с излучающими телом, называют **равновесным ТИ**.

В системе "излучающие тела + излучение в полости" установится **термодинамическое равновесие**: температуры всех тел *выровняются*, а распределение энергии между телами и излучением *не будет изменяться со временем*.



1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Свойства равновесного ТИ

- **Равновесное ТИ однородное** - его плотность энергии одинакова во всех точках внутри полости.
- **Равновесное ТИ изотропное** - оно характеризуется всеми возможными направлениями распространения.
- **Равновесное ТИ неполяризованное** - оно характеризуется всеми возможными направлениями колебаний векторов E и H .

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Характеристики ТИ

Для описания спектрального состава ТИ рассмотрим энергию, *излучаемую единицей поверхности нагретого тела в единицу времени в узком диапазоне частот от*

ω до $\omega + d\omega$. Этот поток ЭМ энергии dR , испускаемый с единицы поверхности тела по всем направлениям, пропорционален ширине спектрального диапазона:
 $dR = r_{\omega,T} \cdot d\omega$. Значение спектральной испускательной способности тела или спектральной плотности энергетической светимости $r_{\omega,T}$ численно равно энергии, *излучаемой единицей поверхности нагретого тела в единицу времени в единичном диапазоне частот.*

1. Тепловое излучение. Проблемы волнового описания

Суммарная энергия, излучаемая единицей поверхности тела в единицу времени во всем диапазоне частот, называется интегральной испускательной способностью или энергетической светимостью:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega,T} d\omega .$$

В СИ энергетическая светимость измеряется в Вт/м², а спектральная испускательная способность в Дж/м².

Аналогично: $dR = r_{\lambda,T} \cdot d\lambda$ и $R = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda$.

$$r_{\lambda,T} \cdot d\lambda = r_{\omega,T} \cdot d\omega \rightarrow r_{\lambda,T} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} r_{\omega,T}$$

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

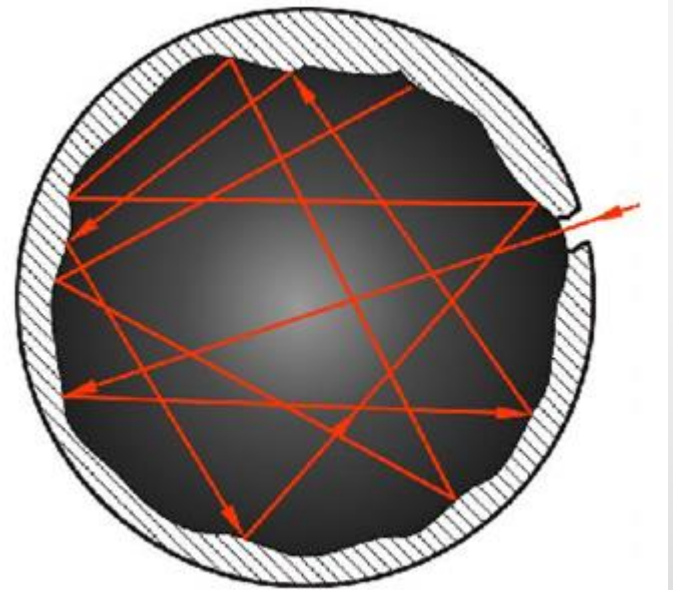
Для описания поглощения **ТИ** используется поглощательная способность, характеризующая долю энергии падающего на тело излучения частоты ω , поглощенную телом:

$$a_{\omega,T} = \frac{\Phi'_{\omega}}{\Phi_{\omega}}.$$

Абсолютно черное тело(АЧТ):

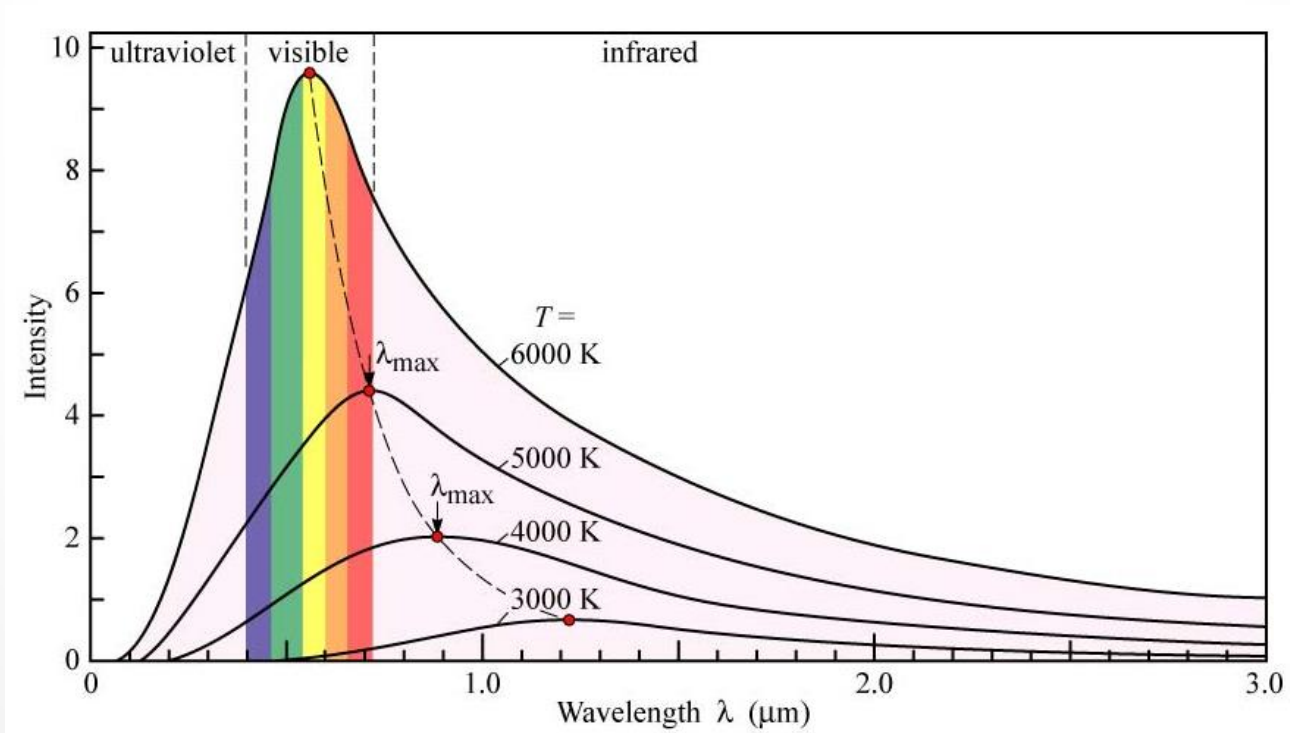
$$a_{\omega,T} = 1$$

АЧТ является эталонным телом в теории теплового излучения. Хотя в Природе нет АЧТ, достаточно просто реализовать его **модель**, для которой поглощательная способность на всех частотах будет близка к единице.



1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Если стенки полости поддерживать при температуре T , то *отверстие будет излучать*. С большой степенью точности это можно считать *ТИ АЧТ*. Исследуя спектр, экспериментально определили испускательную способность АЧТ.



1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Закон Кирхгофа

Между $r_{\omega,T}$ и $a_{\omega,T}$ любого тела должна существовать связь. В опыте с равновесным **ТИ** **равновесие может установиться** только в том случае, если каждое тело будет излучать в единицу времени столько же энергии, сколько оно поглощает.

Тела, интенсивнее поглощающие ТИ какой-либо частоты, будут это ТИ интенсивнее испускать.



Густав Кирхгоф
(1824 - 1887)

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Закон Кирхгофа

*В соответствии с принципом детального равновесия, **отношение** испускательной и поглощательной способностей одинаково для всех тел в Природе, включая АЧТ, и при данной температуре является одной и той же универсальной функцией частоты (длины волны):*

$$\left(\frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\omega, T}}{a_{\omega, T}} \right)_3 = \dots = \frac{r_{\omega, T}^*}{1} = f(\omega, T)$$

$$\left(\frac{r_{\lambda, T}}{a_{\lambda, T}} \right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda, T}}{a_{\lambda, T}} \right)_2 = \left(\frac{r_{\lambda, T}}{a_{\lambda, T}} \right)_3 = \dots = \frac{r_{\lambda, T}^*}{1} = \Phi(\lambda, T)$$

Универсальная функция является спектральной испускательной способностью АЧТ.

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Закон Стефана-Больцмана

Эксперимент Й. Стефана (1879 г) и
теория Л. Больцмана (1884 г) привели к
выводу закона для ТИ АЧТ:

$$R_{\text{АЧТ}} = \sigma T^4 .$$

Постоянная Стефана-Больцмана:

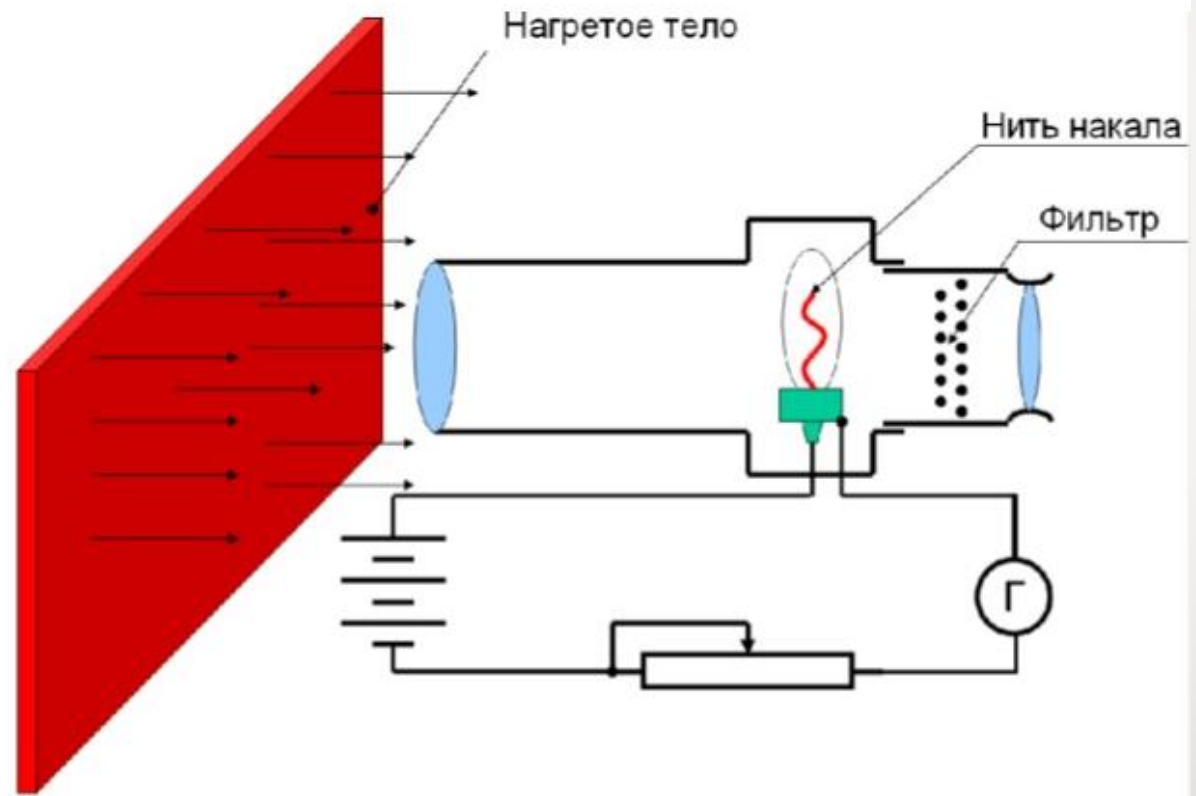
$$\sigma = 5.6686 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$



Людвиг Больцман
(1844-1906)

1. Тепловое излучение. Проблемы волнового описания

Измерение температуры нагретых тел



Пирометр с исчезающей нитью

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Закон смещения Вина

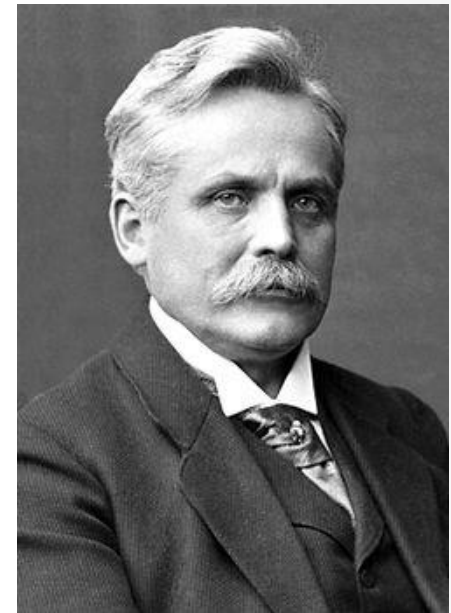
В 1893 г. немецкий физик **В.Вин** теоретически рассмотрел *термодинамический процесс* сжатия излучения, заключенного в полости с идеально зеркальными стенками.

В.Вин пришел к выводу, что **испускательная способность АЧТ** должна иметь вид:

$$r_{\omega, T}^* = \omega^3 f\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

ИЛИ

$$r_{\lambda, T}^* = \frac{(2\pi c)^4}{\lambda^5} f\left(\frac{2\pi c}{\lambda T}\right).$$



Вильгельм Вин
(1864-1928)

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Закон смещения Вина

Проанализировав вид функции, В.Вин приходит к выводу значения длины волны излучения для максимума функции испускательной способности АЧТ:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

Постоянная Вина

$$b = 2.898 \cdot 10^{-3} \quad \text{м} \cdot \text{K}$$

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

Формула Рэля-Джинса



Джеймс Холвуд Джинс
(1877-1946)



Джон Уильям Стретт,
третий барон Рэлей
(1842-1919)

1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

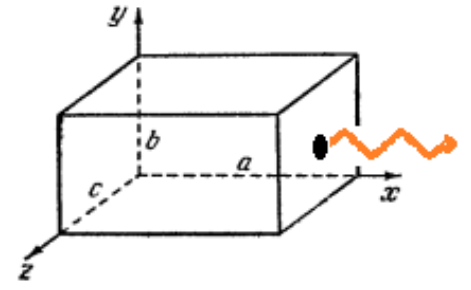
Формула Рэлея-Джинса

Объемная плотность энергии равновесного
ТИ в полости связана с испускательной
способностью АЧТ:

$$r_{\omega,T} = \frac{c}{4} u_{\omega,T}$$

Равновесное излучение в полости представляется как
система стоячих ЭМ волн:

$$\left. \begin{aligned} k_x &= m_1 \frac{\pi}{a}, & k_y &= m_2 \frac{\pi}{b}, & k_z &= m_3 \frac{\pi}{c} \\ (m_1, m_2, m_3 &= 0, 1, 2, \dots). \end{aligned} \right\}$$



1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

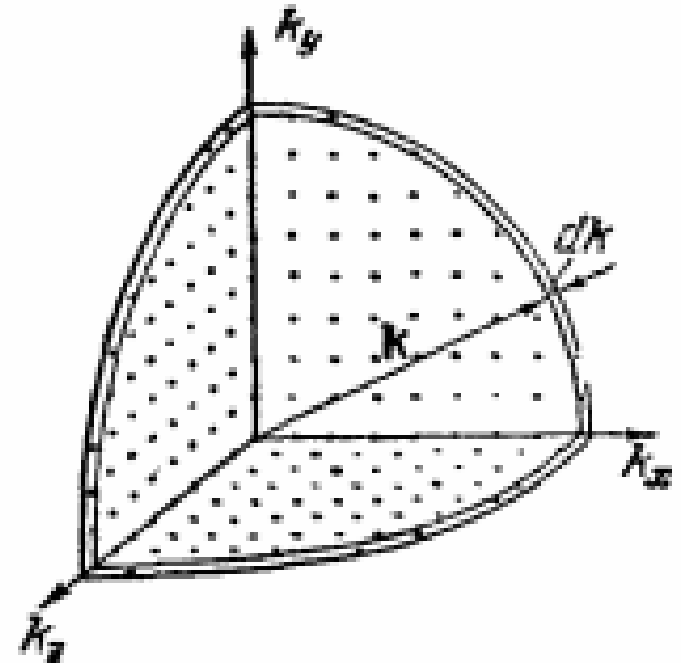
Формула Рэлея-Джинса

Объем одного состояния
в k - пространстве:

$$\Delta V_k = \frac{\pi^3}{V}.$$

Число состояний в слое dk :

$$dN_k = \frac{abc}{\pi^3} \cdot \frac{1}{8} 4\pi k^2 dk = V \frac{k^2 dk}{2\pi^2}$$



1. Тепловое излучение. Проблемы ВОЛНОВОГО ОПИСАНИЯ

С учетом $k = \frac{\omega}{c} \rightarrow dN_{\omega} = V \frac{\omega^2 d\omega}{2\pi^2 c^3} \rightarrow dn_{\omega} = \frac{\omega^2 d\omega}{\pi^2 c^3}$

Из закона равномерного распределения энергии по степеням свободы:

$$u(\omega, T)d\omega = kT \frac{\omega^2 d\omega}{\pi^2 c^3} .$$

Тогда:

$$f(\omega, T) = \frac{c}{4} u(\omega, T) = kT \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} .$$

Формула Рэлея-Джинса согласуется с экспериментом только при малых значениях частоты, и резко **расходится с экспериментом при больших частотах.**

1. Тепловое излучение. Проблемы волнового описания

Ультрафиолетовая катастрофа !

$$R_{\text{АЧТ}} = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega \rightarrow \infty$$



2. Формула и гипотеза Планка

Формула Планка

В 1900 году Макс Планк нашел вид универсальной функции, точно соответствующий результатам эксперимента.



Макс Планк
(1858-1947)

$$u_{\omega,T} = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\hbar \omega / kT} - 1}$$

При малых частотах переходит в формулу Рэлея-Джинса.

2.Формула и гипотеза Планка

Гипотеза Планка

При тепловом излучении энергия испускается и поглощается не непрерывно, а отдельными порциями - квантами. Каждая такая порция энергии пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu = \hbar\omega .$$

Постоянная Планка:

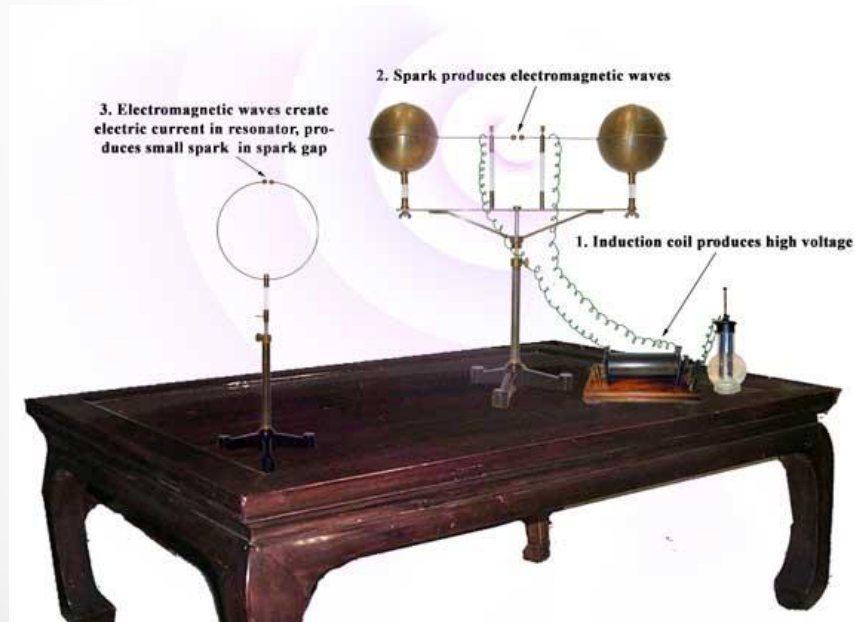
$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} ,$$

$$\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} .$$

3. Фотоэффект и его закономерности

Явление открыто **Генрихом Герцем** в 1887 году в ходе экспериментов по излучению электромагнитных волн.

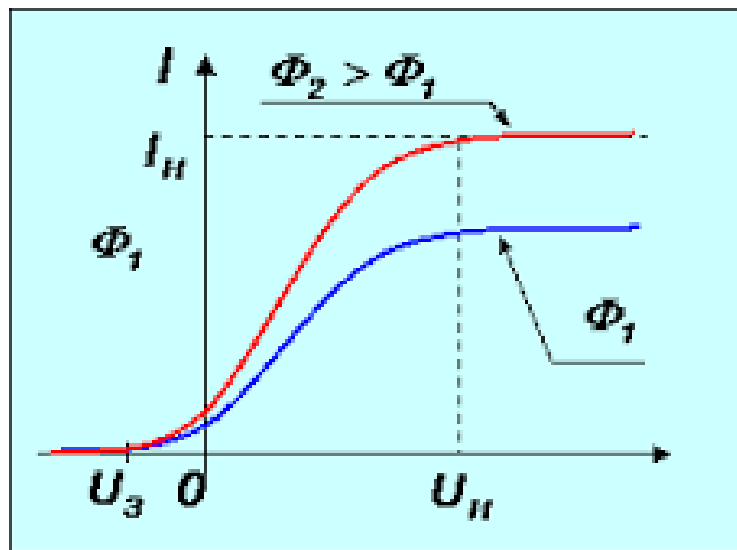
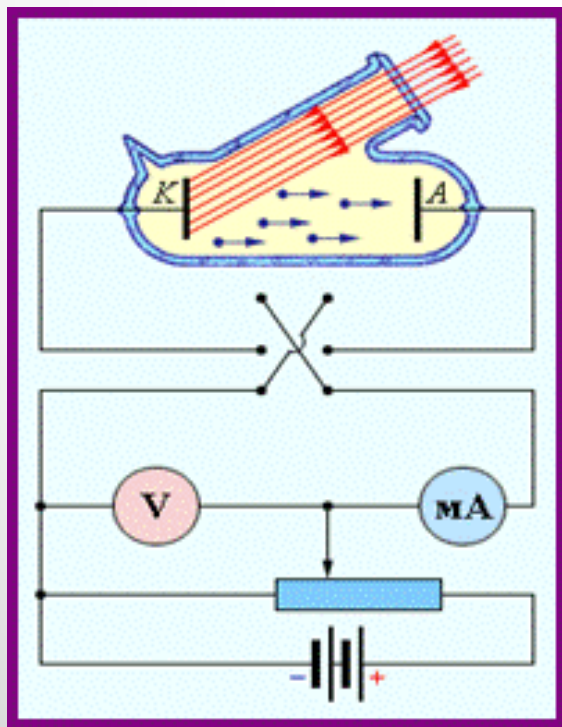
Фотоэффект (внешний) — это выбивание электронов из вещества падающим светом.



**Генрих Рудольф Герц
(1857-1894)**

3. Фотоэффект и его закономерности

Опыты А.Г. Столетова



А.Г. Столетов
(1839-1896)

3. Фотоэффект и его закономерности

Законы внешнего фотоэффекта:

1 закон: Сила фототока прямо пропорциональна световому потоку.

2 закон: Максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3 закон: Для каждого вещества существует граничная частота света, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая длина волны соответствуют красной границе фотоэффекта.

4. Гипотеза и уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Фотоэффект был **объяснён А. Эйнштейном** в 1905 году (1921г. – Нобелевская премия).

Эйнштейн предположил, что свет и существует только в виде квантов. Из закона сохранения энергии следует *уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:*

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

Красная граница:

$$h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{ВЫХ}}$$

5. ФОТОНЫ

Полевая безмассовая частица:

$$m=0$$

Энергия:

$$E_{\phi} = h\nu = \hbar\omega$$

Скорость в вакууме:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Импульс:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar k$$

5. ФОТОНЫ



5. ФОТОНЫ



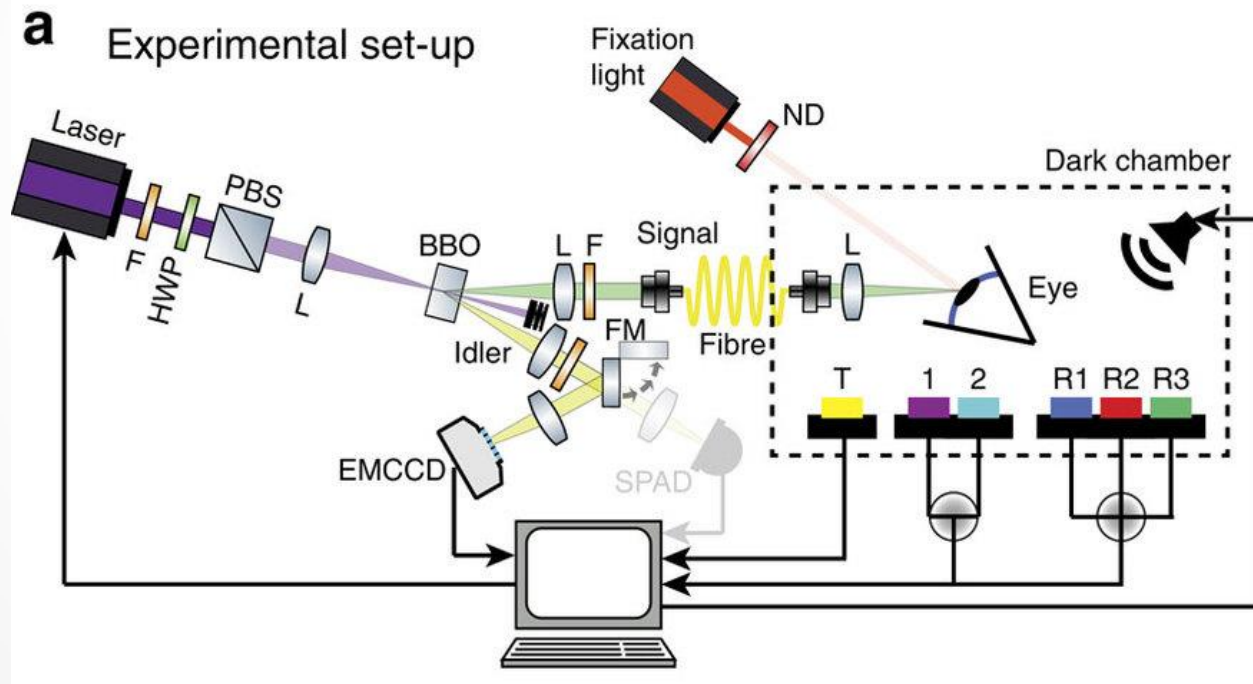
● *Жорж Сёра «Воскресный день на острове Гранд-Жатт»* ●

5. ФОТОНЫ

Direct detection of a single photon by humans

Jonathan N. Tinsley, Maxim I. Molodtsov, Robert Prevedel, David Wartmann, Jofre Espigule'-Pons, Mattias Lauwers & Alipasha Vaziri

Nature Communications 7, Article number: 12172 (2016)

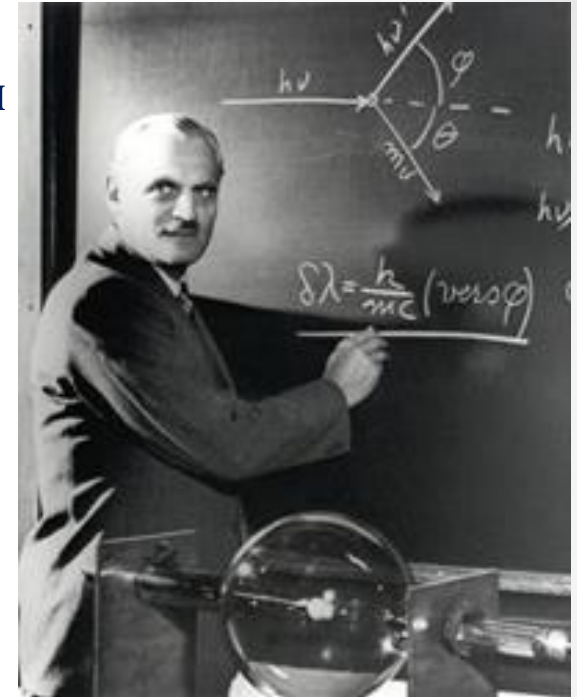
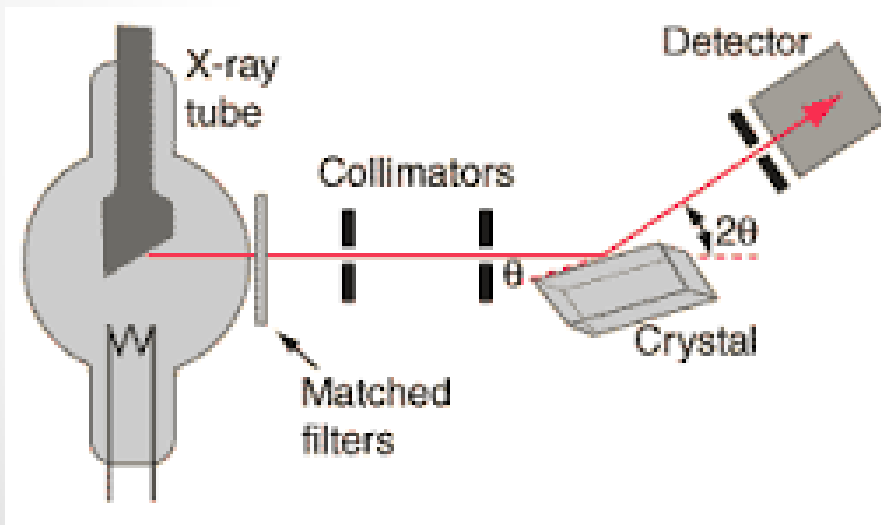


Человеческий глаз может зарегистрировать отдельный фотон!

6. Эффект Комптона

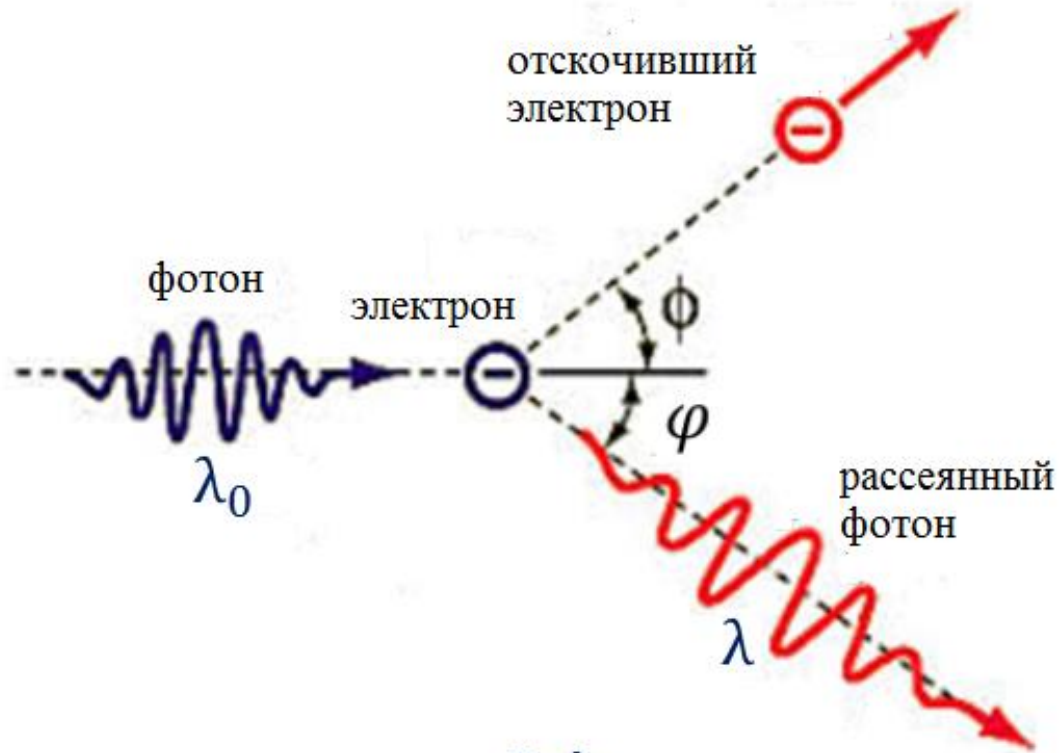
Некогерентное рассеяние фотонов на свободных электронах. Эффект сопровождается уменьшением частоты фотонов, часть энергии которых при рассеянии передается электронам.

1927 г Нобелевская премия.



Артур Холли Комптон
(1892-1962)

6. Эффект Комптона



$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\varphi)$$

6. Эффект Комптона

Из законов сохранения энергии и импульса следует:

$$\begin{aligned}\hbar\omega_0 + mc^2 &= \hbar\omega + c\sqrt{p^2 + m^2c^2}, \\ \hbar\vec{k}_0 &= \vec{p} + \hbar\vec{k}.\end{aligned}$$

Преобразуем:

$$\hbar\frac{\omega_0}{c} - \hbar\frac{\omega}{c} + m_0c = \sqrt{p^2 + m_0^2c^2},$$

$$\hbar(\vec{k}_0 - \vec{k}) = \vec{p},$$

$$\hbar^2(k_0 - k)^2 + 2\hbar(k_0 - k)m_0c = p^2$$

$$\hbar^2(\vec{k}_0 - \vec{k})^2 = p^2.$$

6. Эффект Комптона

Приравниваем левые части:

$$-\hbar^2 2k_0 k + 2\hbar (k_0 - k) m_0 c = -2\hbar^2 \vec{k}_0 \vec{k} .$$

Преобразуем:

$$(k_0 - k) m_0 c = \hbar (k_0 k - \vec{k}_0 \vec{k}) ,$$

$$(k_0 - k) m_0 c = \hbar k_0 k (1 - \cos \varphi) ,$$

$$\frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} = \frac{\hbar}{m_0 c} (1 - \cos \varphi)$$

6. Эффект Комптона

Окончательно получаем:

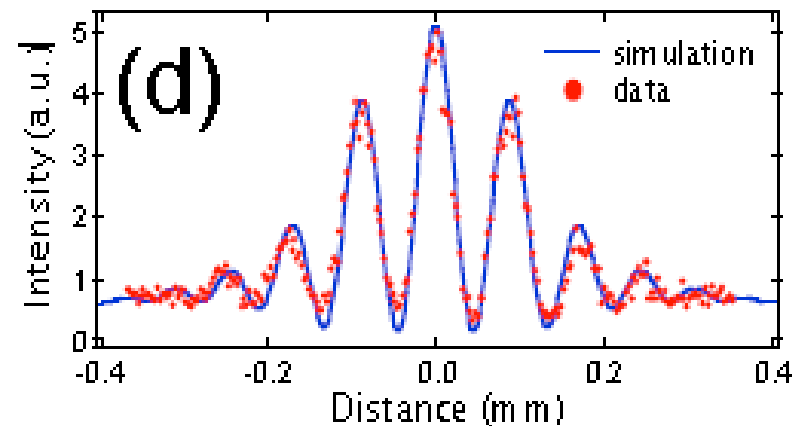
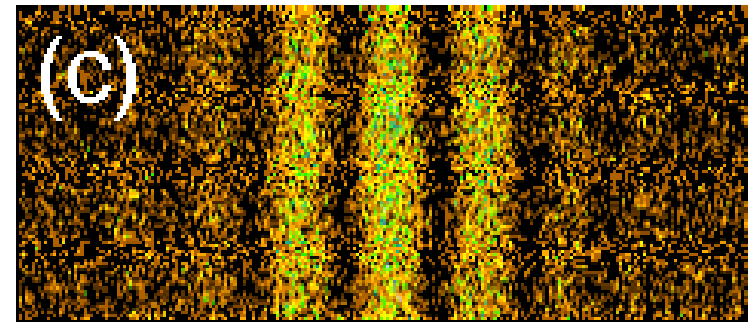
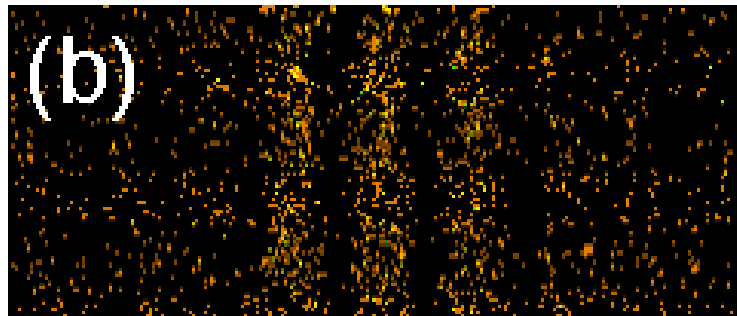
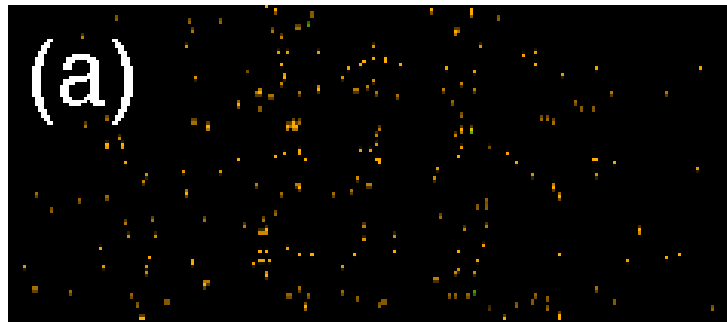
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \Lambda(1 - \cos \varphi),$$

Комптовская длина волны электрона:

$$\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc} = 0.243 \text{ \AA}$$

7. Корпускулярно-волновая двойственность света

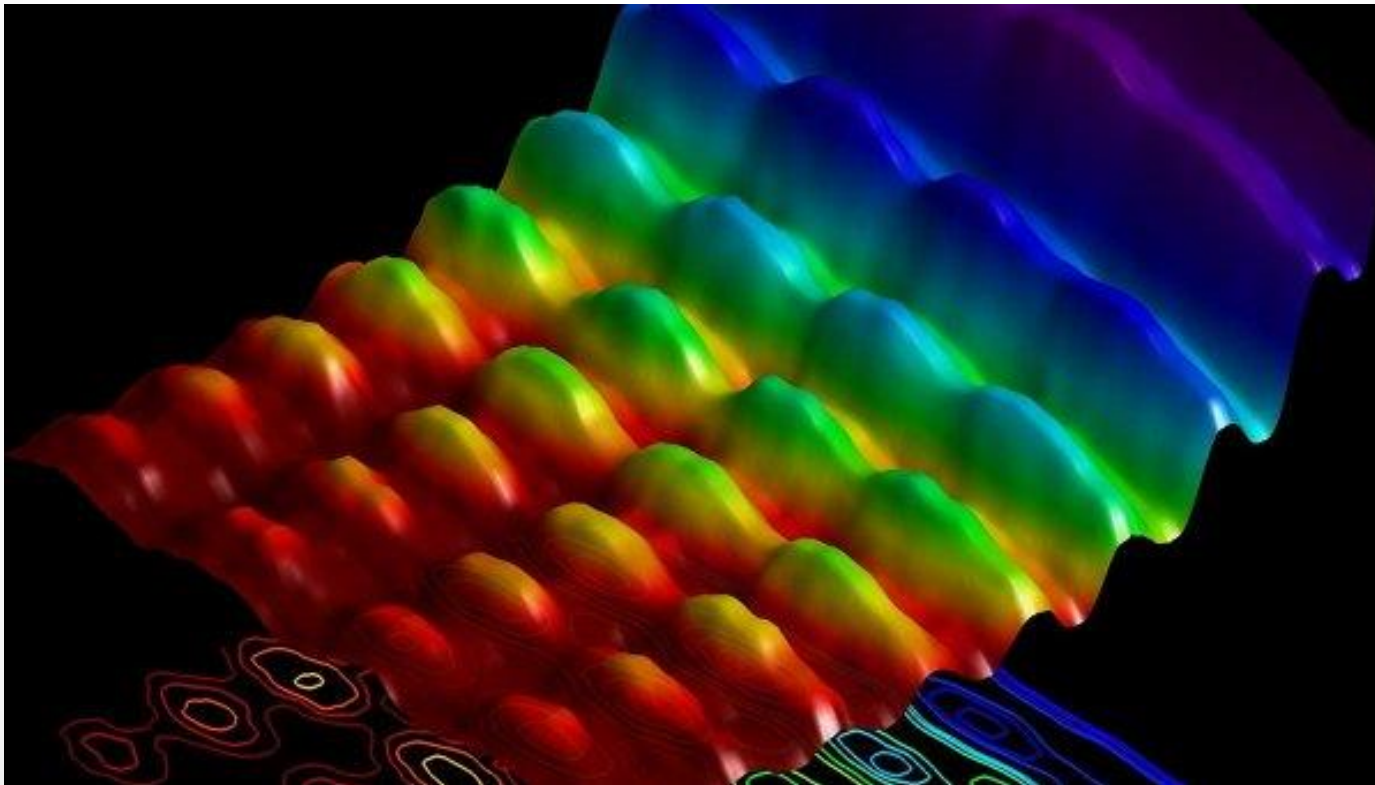
V. Jacques et al. Single-photon wavefront-splitting interference // Eur. Phys. J. D 35, 561–565 (2005)



Экспериментальное наблюдение однофотонной интерференции.

7. Корпускулярно-волновая двойственность света

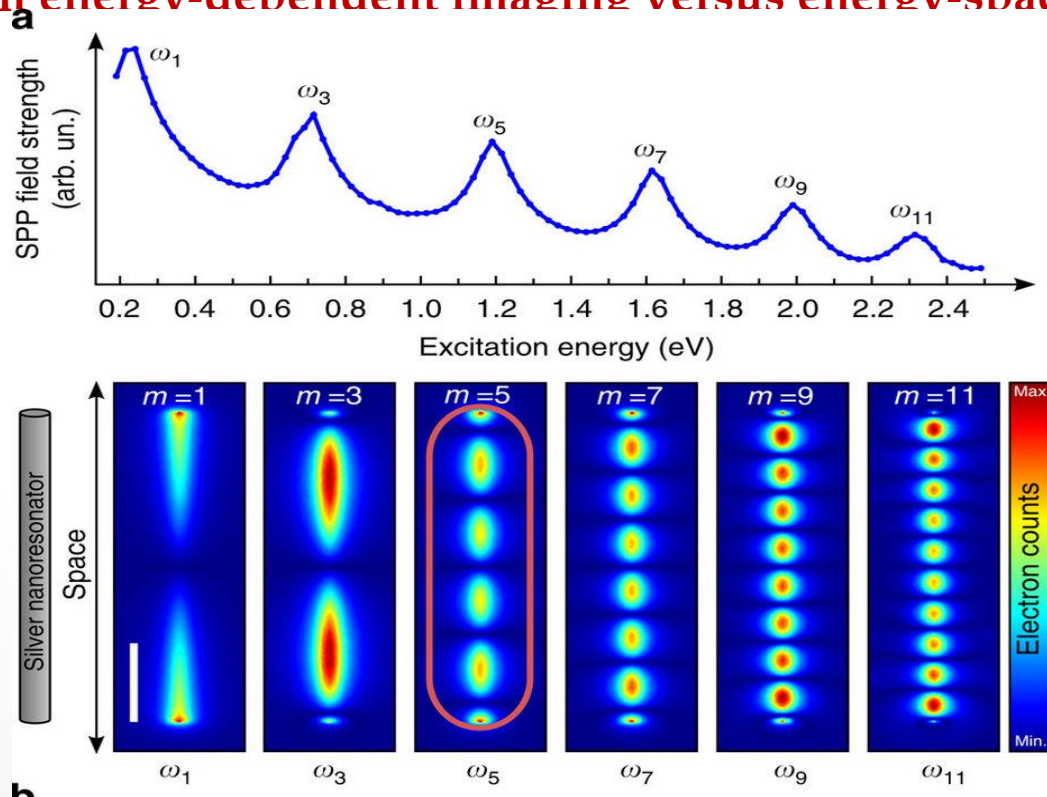
Швейцарские физики из Федеральной политехнической школы Лозанны под руководством Фабрицио Карбоне (Fabrizio Carbone) смогли заставить свет вести себя одновременно и как частица, и как волна



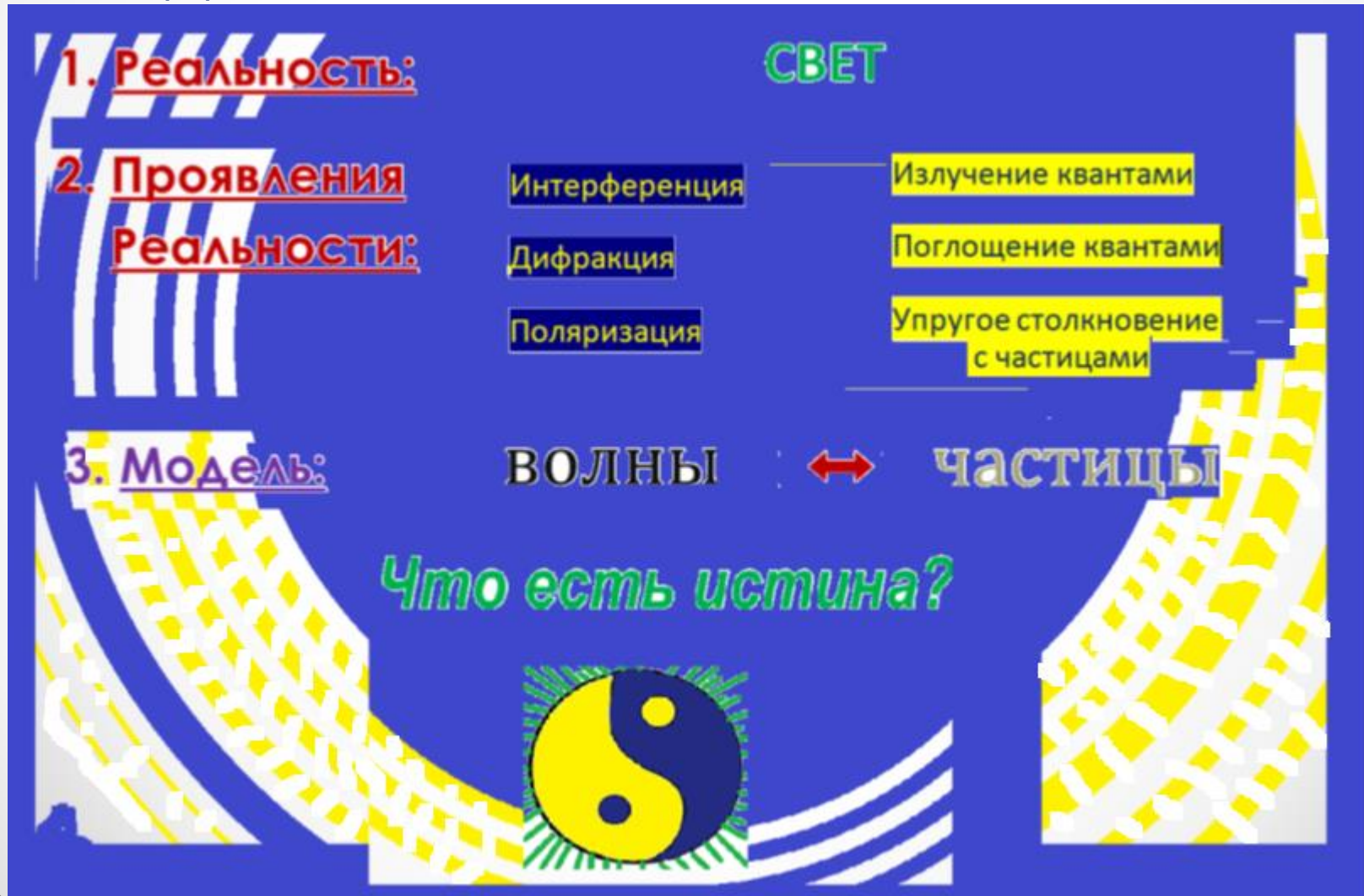
7. Корпускулярно-волновая двойственность света

Piazza, L. et al. Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field. Nat. Commun. 6:6407 doi: 10.1038/ncomms7407 (2015).

Excitation energy-dependent imaging versus energy-space imaging



7. Корпускулярно-волновая двойственность света



Спасибо за внимание!