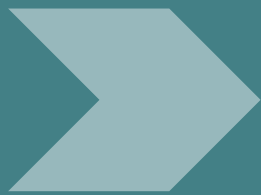


А.В. Новиков-Бородин

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВО-ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ • МИКРООБЪЕКТОВ

Семинар ОЭФ ИЯИ РАН, 22 мая 2014

План доклада



Фундаментальные физические эксперименты XIX-XX веков и формирование квантово-механического подхода



Совместимость классического и квантово-механического подходов



Современные эксперименты по изучению квантово-механических свойств микрообъектов



Предлагаемые установки - база для изучения квантово-механических свойств микрообъектов (фотонов, электронов и нейтронов) в ИЯИ РАН.



Исследование взаимодействия квантово-механических объектов с классическими полями в микро-масштабе (эффект АБ, COW-эффект и др.)

Фундаментальные физические теории

1. Механика

2. Электродинамика

3. Теория относительности (СТО, ОТО)

Классические
теории

4. Квантовая механика

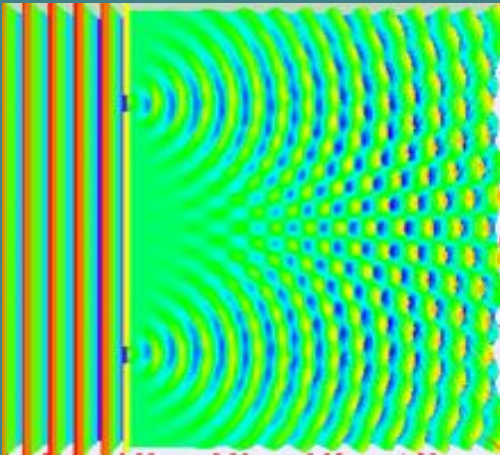
Квантово-полевые
теории

квантование
физических величин

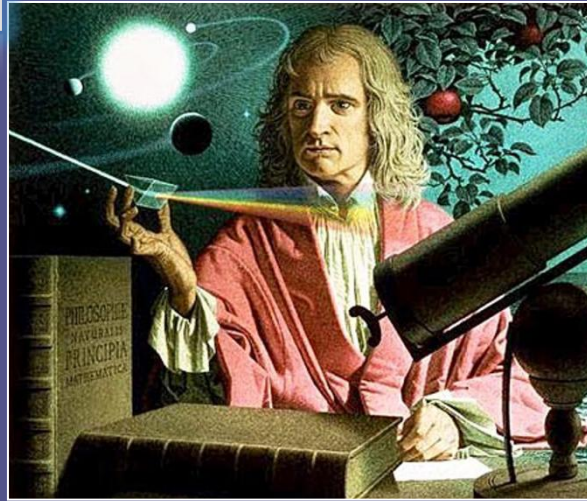
корпускулярно-
волновой дуализм

Природа света

Р.Гук, Ч.Гюйгенс
Т.Юнг, Ж.Френель



Дифракция
Интерференция



Исаак НЬЮТОН
(1643 — 1727)

Волна?



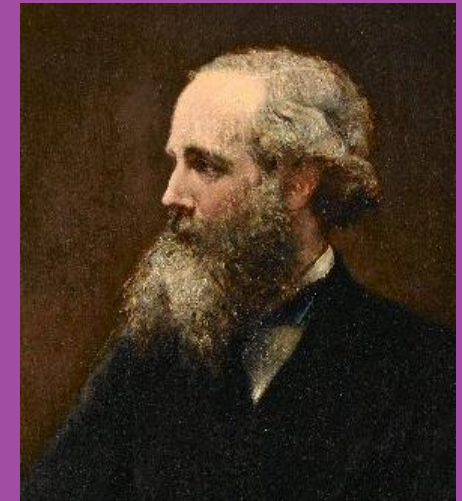
Среда



Движение
планет?

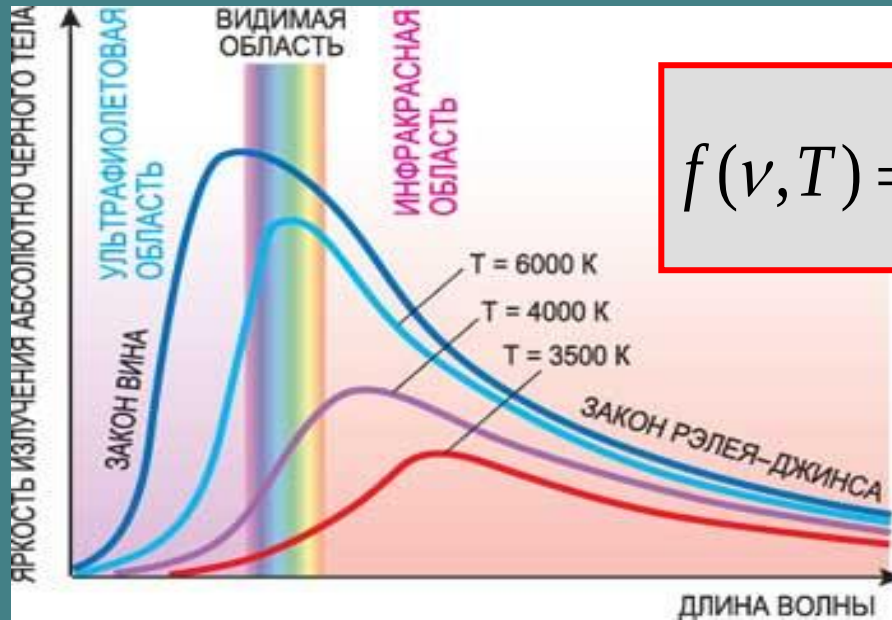
Джеймс МАКСВЕЛЛ
(1831-1879)

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \nabla \vec{D} = \rho$$
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \nabla \vec{B} = 0$$



Корпускулярная природа света

1900: Макс Планк: квантование энергии осциллятора



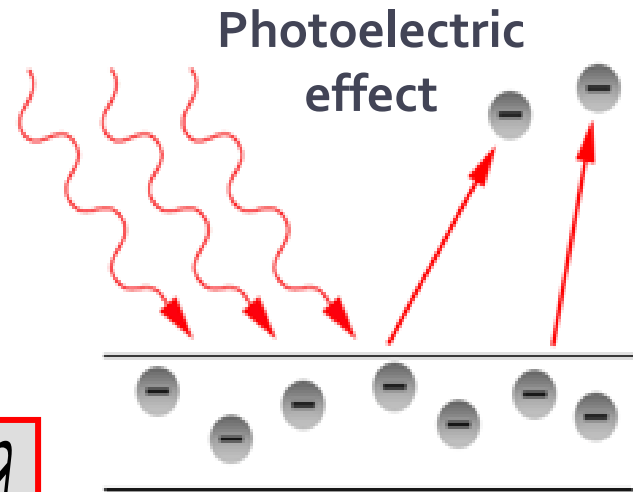
$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$h\nu = A_{out} + mv^2 / 2$$

1905: А.Эйнштейн:
квант света (фотон).

$$\varepsilon = h\nu$$

$$p = \varepsilon / c = h / \lambda$$



Дуализм частиц

1924: Гипотеза Л.де Бройля:
корпускулярно-волновой
дуализм частиц (электрон)

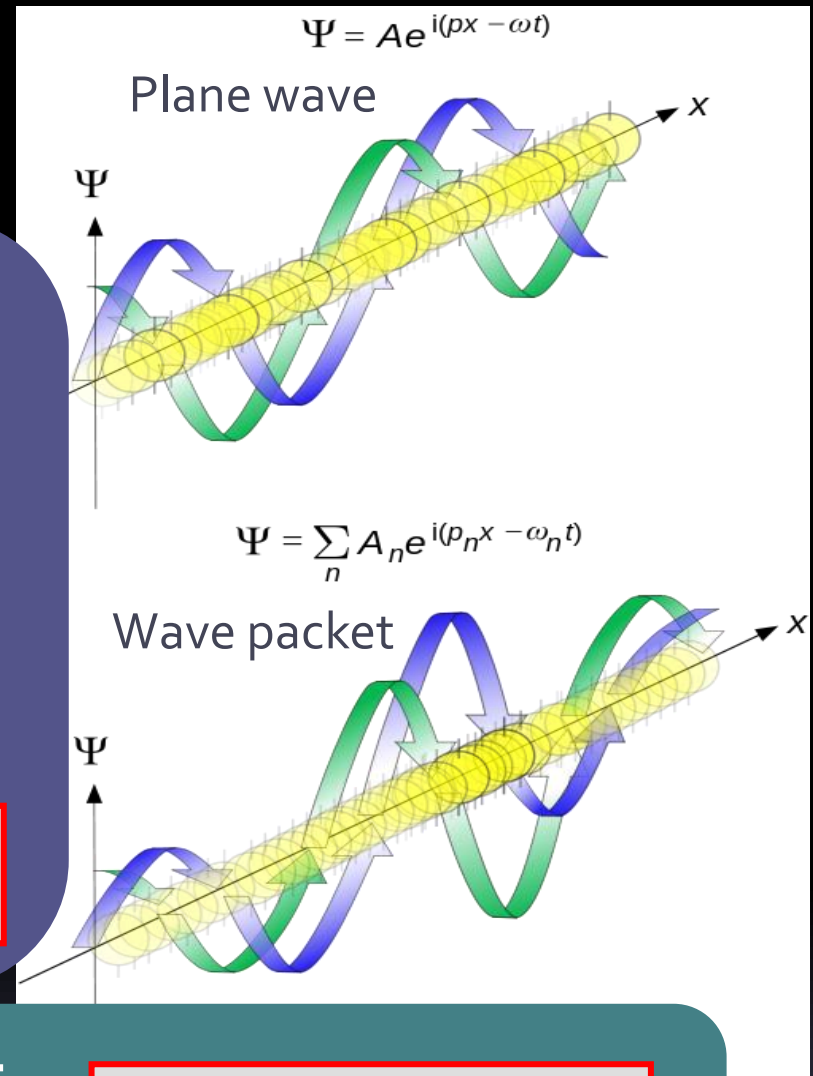
$$\varepsilon = h\nu$$

$$p = h / \lambda$$

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_0(\vec{r}, t) e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} =$$

$$= \psi_0(\vec{r}, t) e^{i(\varepsilon t - \vec{p}\vec{r}) / \hbar}$$

1925: Э.Шрёдингер:
Основное уравнение
квантовой механики



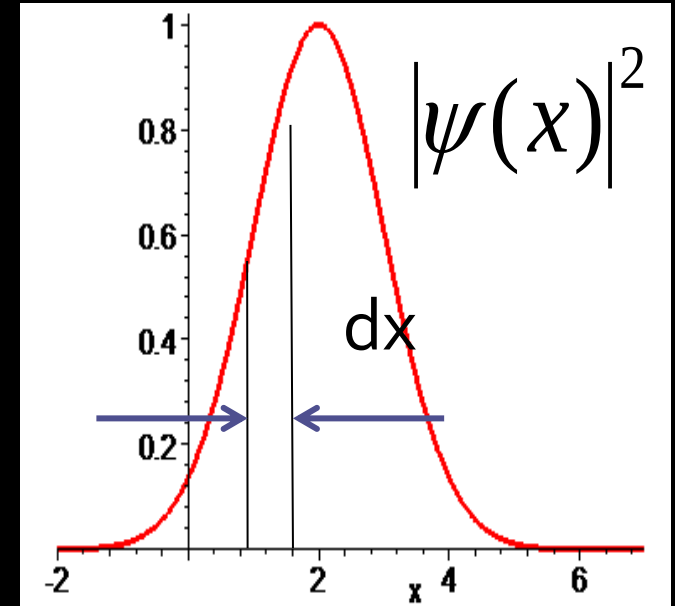
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$

Интерпретация волновой функции

$$\rho = \psi^* \psi = |\psi|^2; \langle x \rangle = \langle \psi | x | \psi \rangle$$

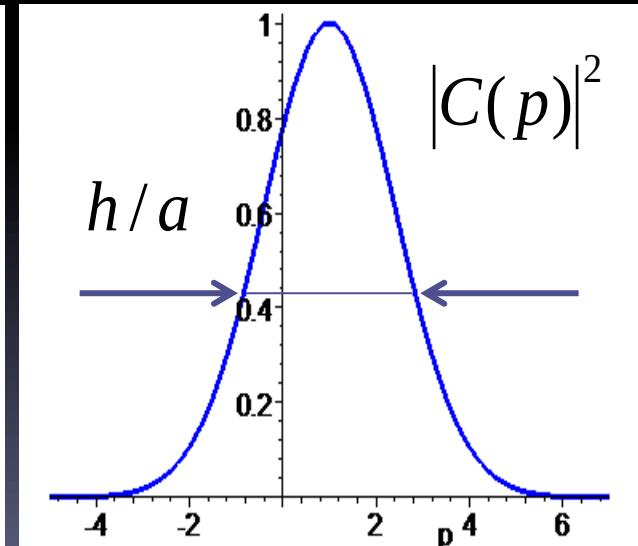
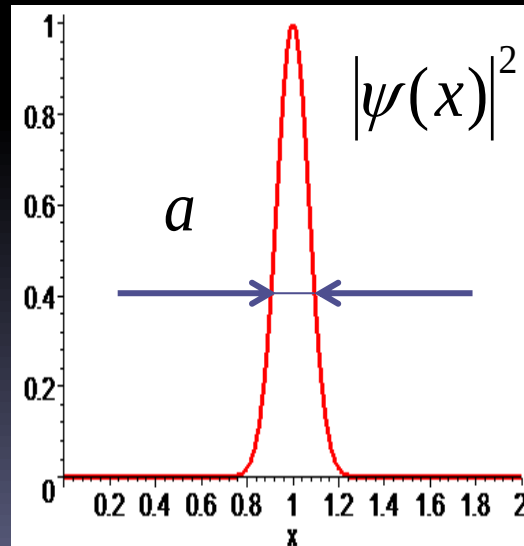
$$\langle \vec{p} \rangle = \langle \psi | -i\hbar \nabla | \psi \rangle; \langle \varepsilon \rangle = \left\langle \psi \left| -i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \right| \psi \right\rangle$$

$$\Delta p_x \Delta x \geq h/2, \dots, \Delta \varepsilon \Delta t \geq h/2$$

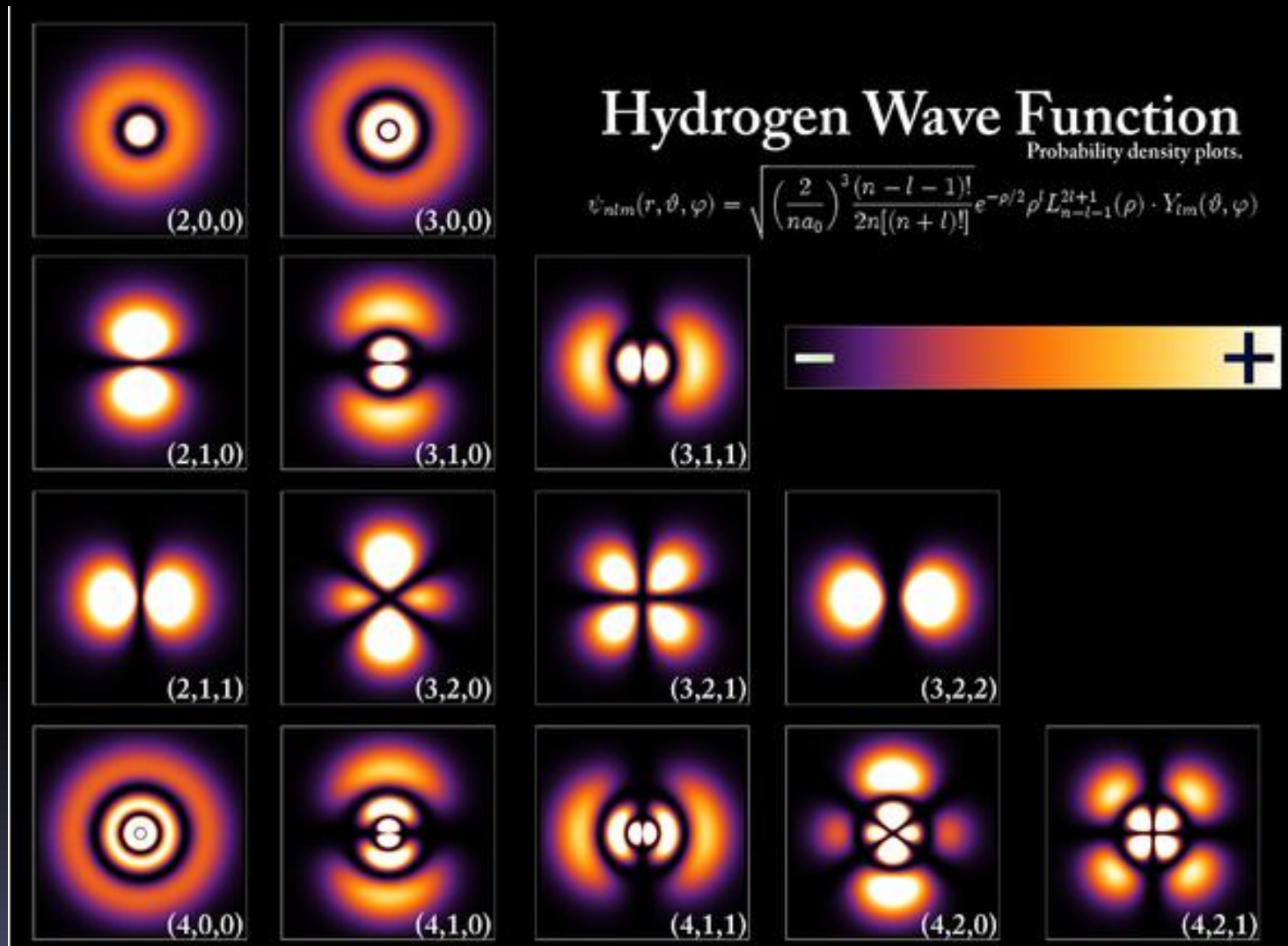


$$\psi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(q) e^{iqx} dq$$

$$\varphi(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) e^{-iqx} dx$$



Интерпретация волновой функции



Проблемы понимания

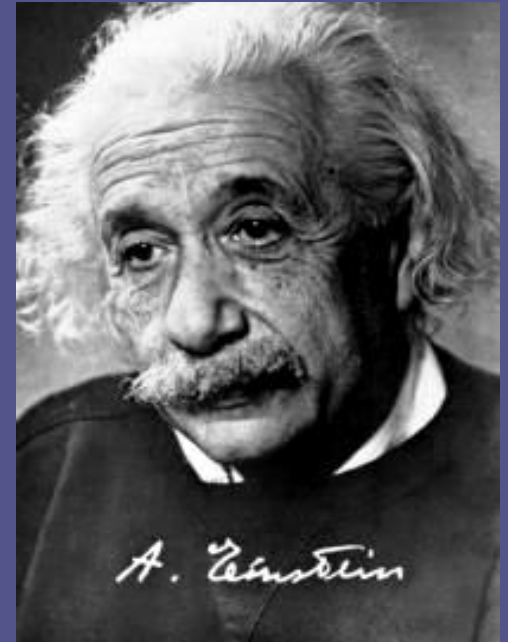
$$\rho(\vec{r}, t) = \psi^* \psi = |\psi(\vec{r}, t)|^2$$



А.Эйнштейн:

"Бог не играет в кости"

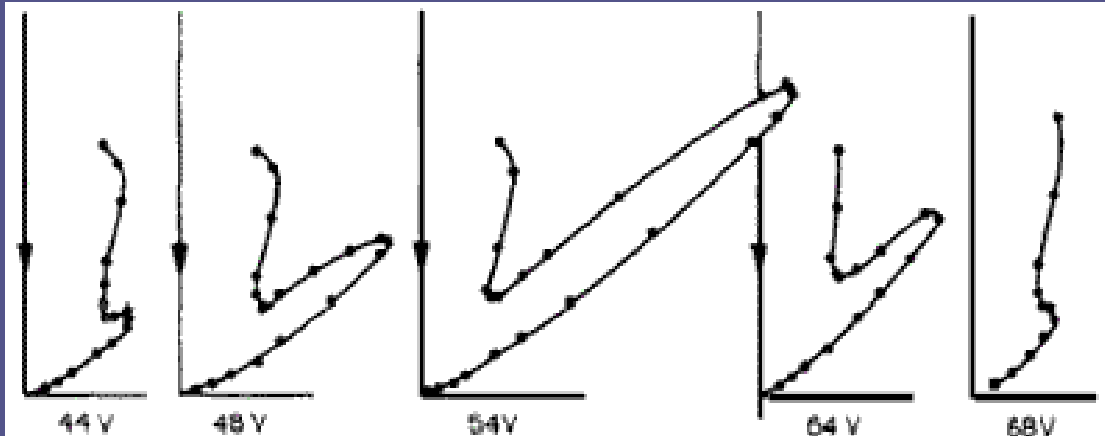
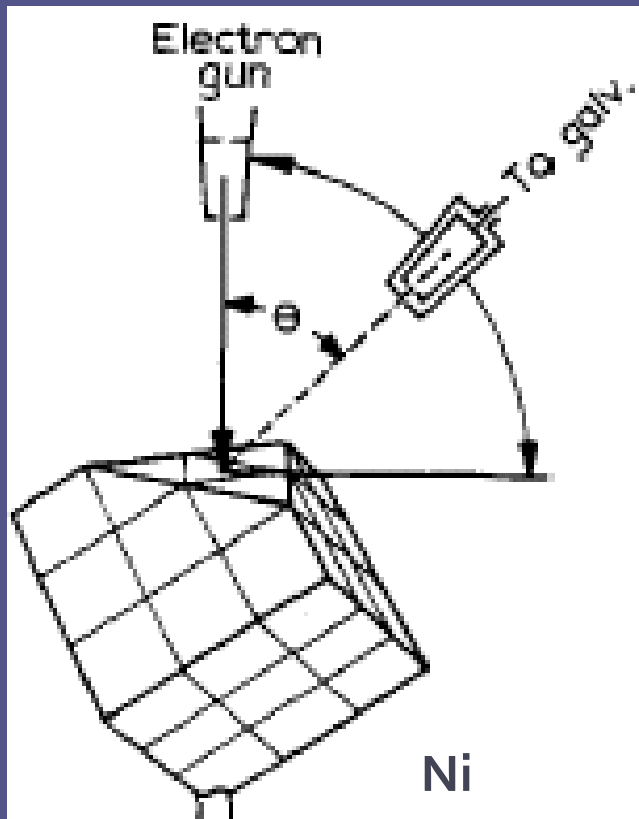
Н.Бор: *"Не надо указывать Богу, что ему делать"*



$$\Delta p_x \Delta x \geq h/2, \dots, \Delta \varepsilon \Delta t \geq h/2$$

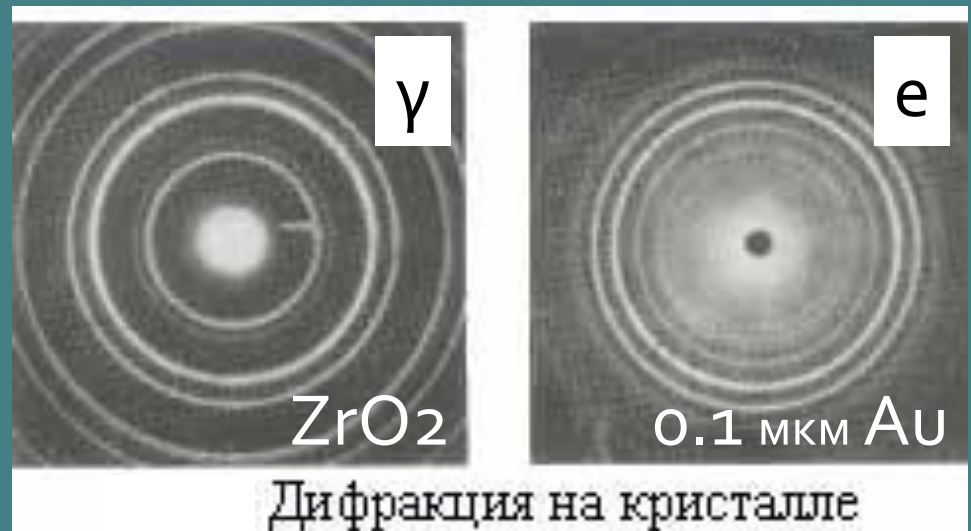
Дифракция электронов

1927: К.Девиссон и Л.Джермер



Полярные диаграммы интенсивности упруго рассеянных электронов для ряда энергий первичного пучка

1927: Дж.П.Томсон

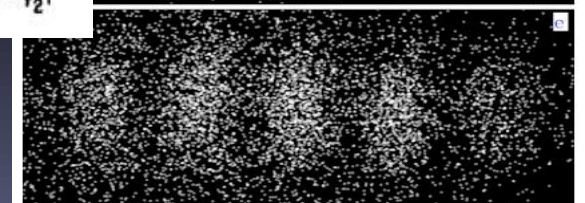
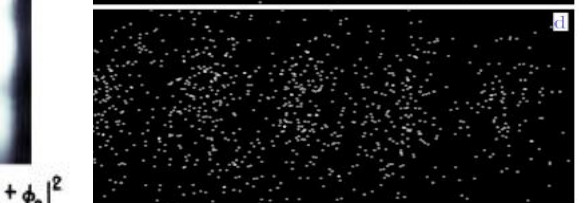
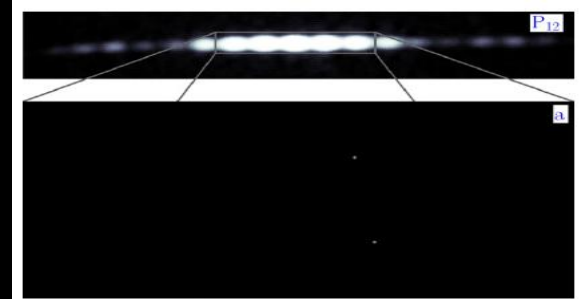
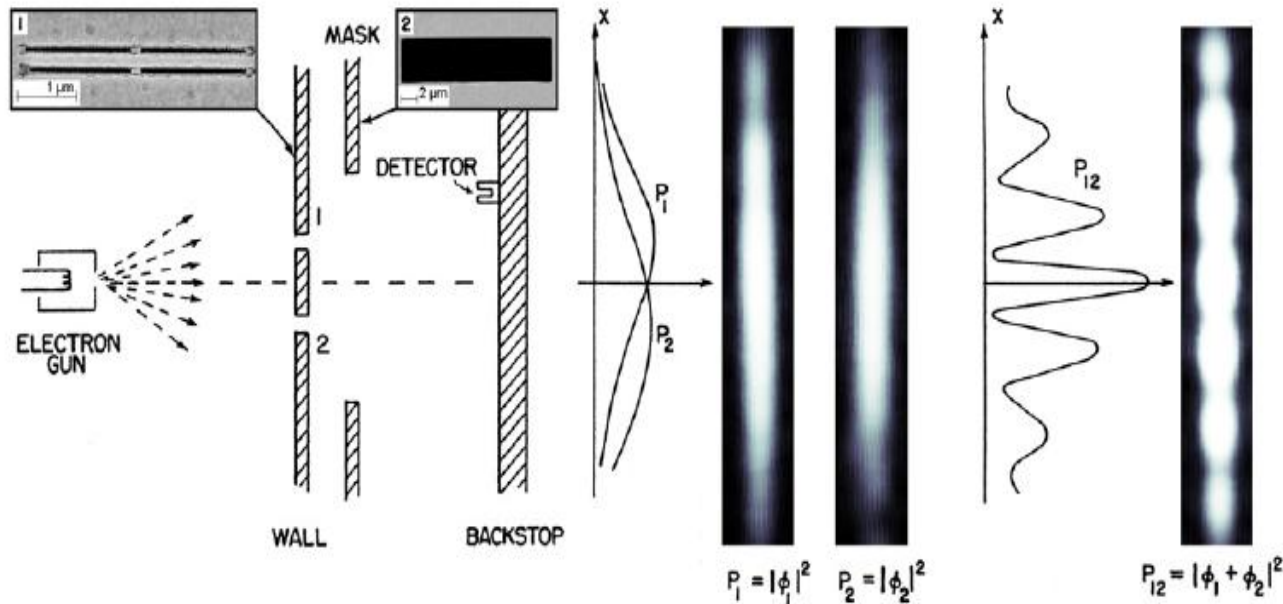


Дифракция на кристалле

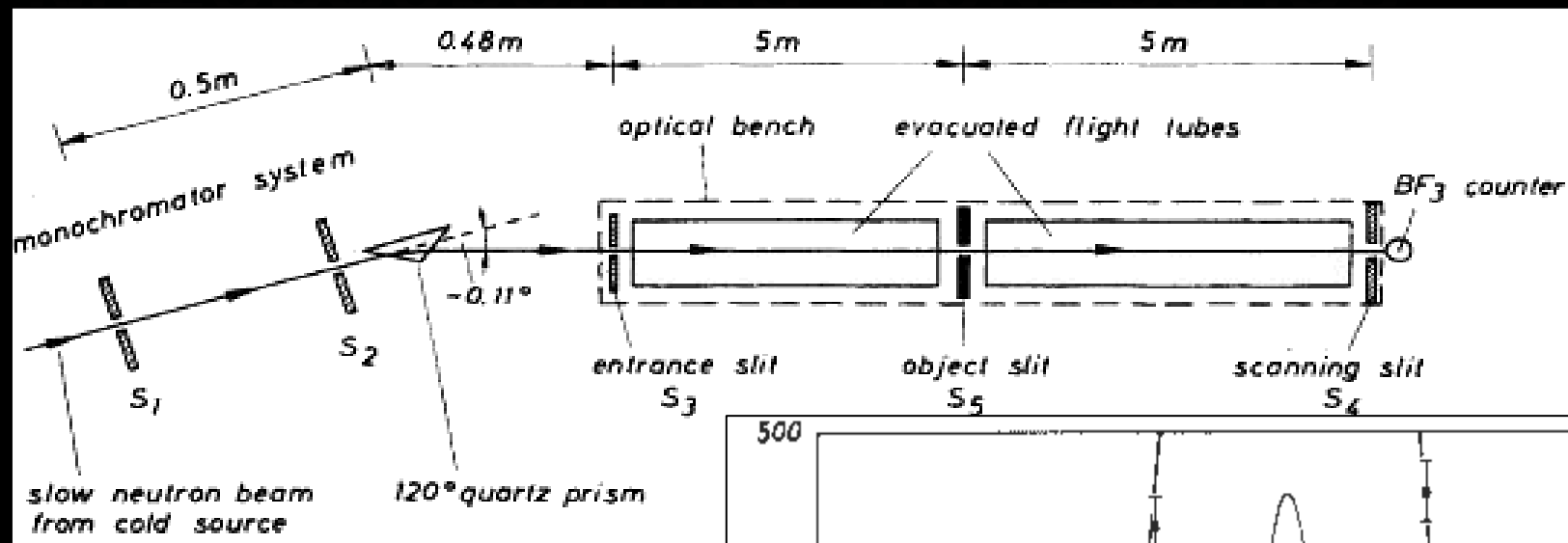
Интерференция электронов

1961: К.Йенсон

2013: R.Bach, D.Pope, S-H.Liou, H.Batelaan

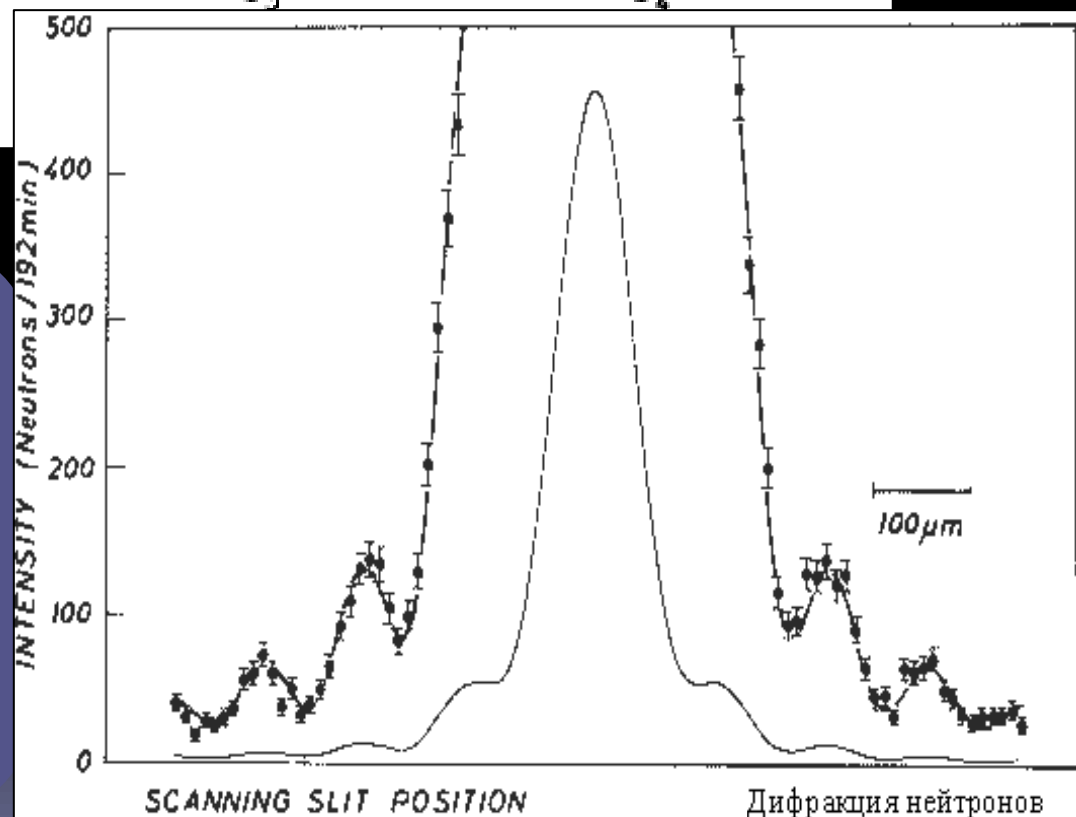


Интерференция нейтронов



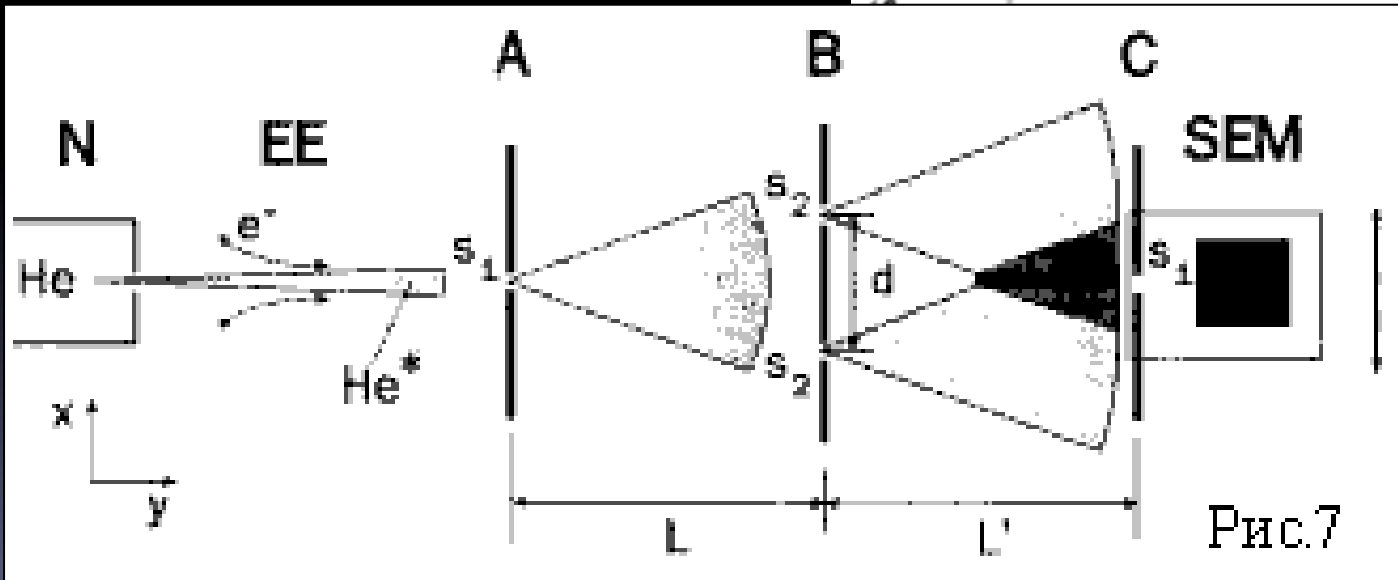
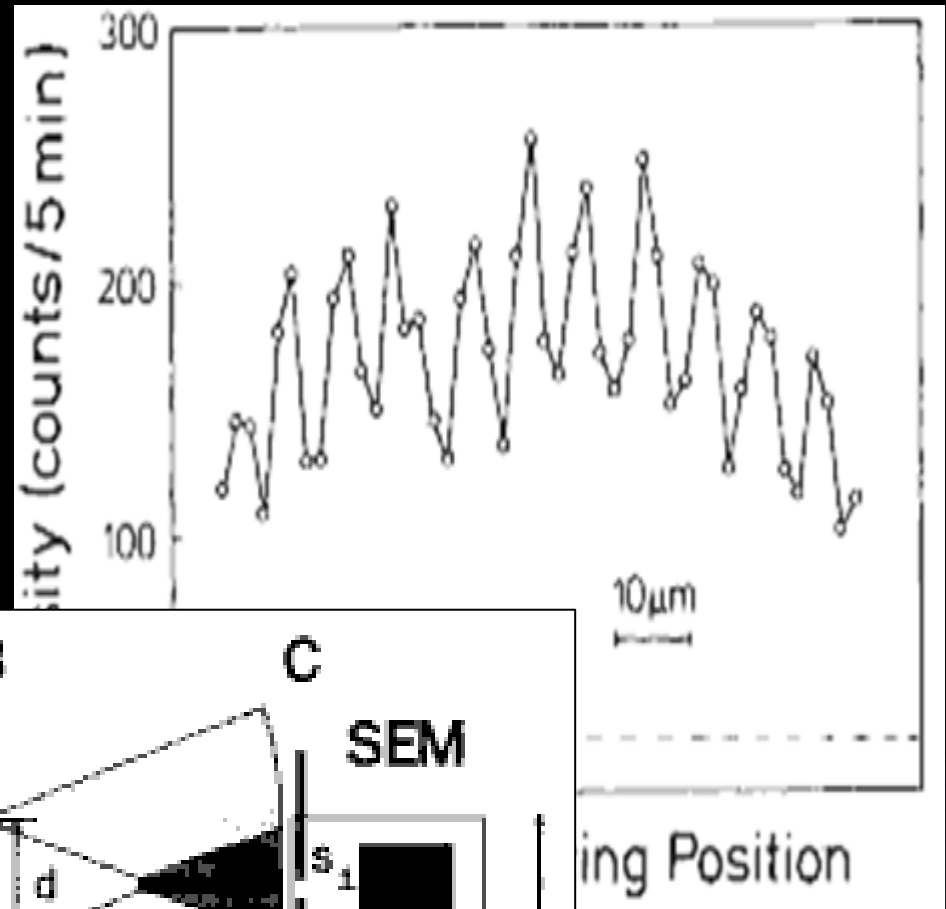
$\lambda \sim 2 \text{ nm}$, $\delta \sim 20 - 100 \text{ mkm}$

1988: A. Zeilinger,
R. Gähler, C. G. Shull,
W. Treimer, W. Mampe
Single- and double-slit
diffraction of neutrons -
Rev. Mod. Phys. 60.



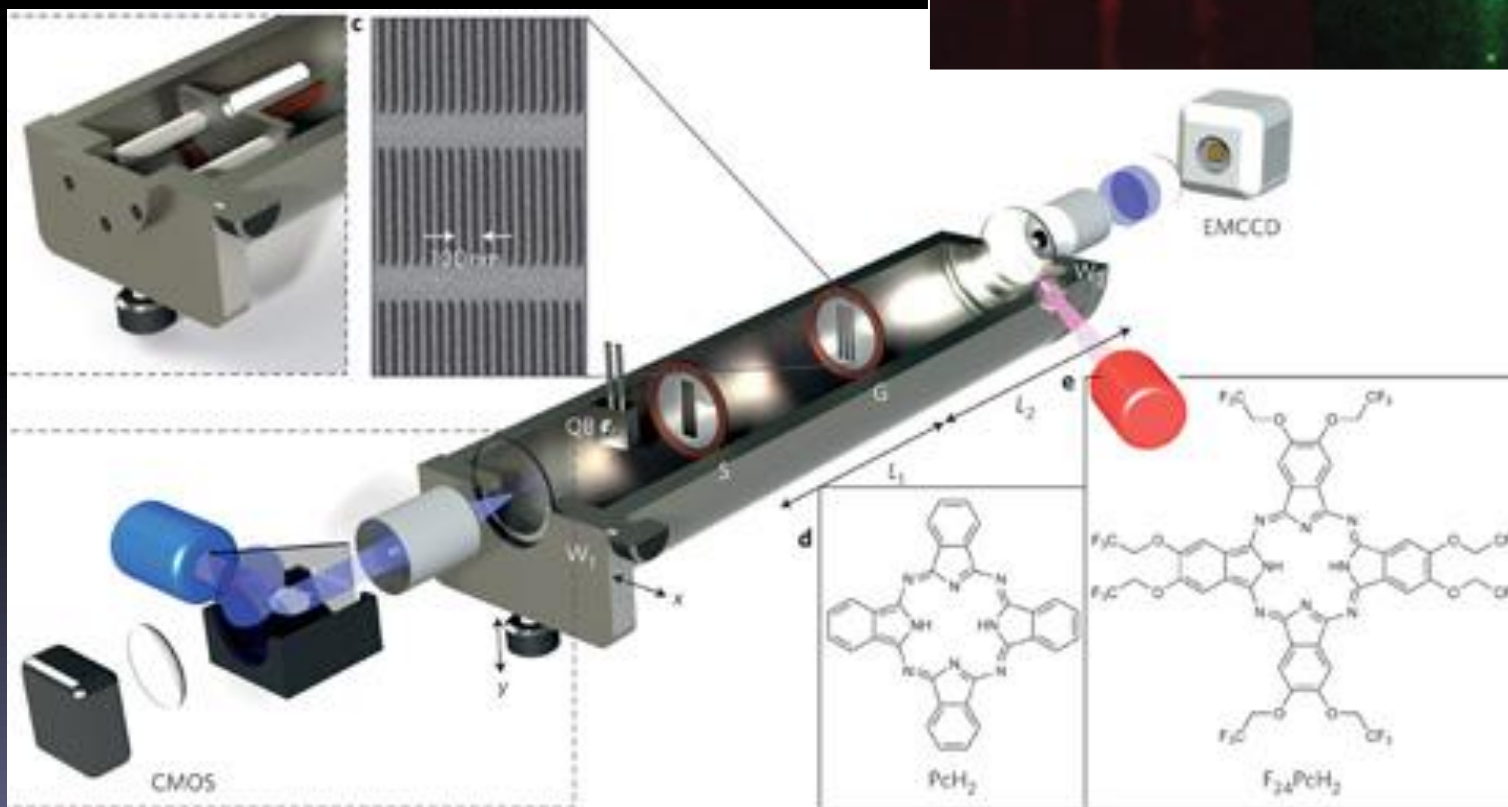
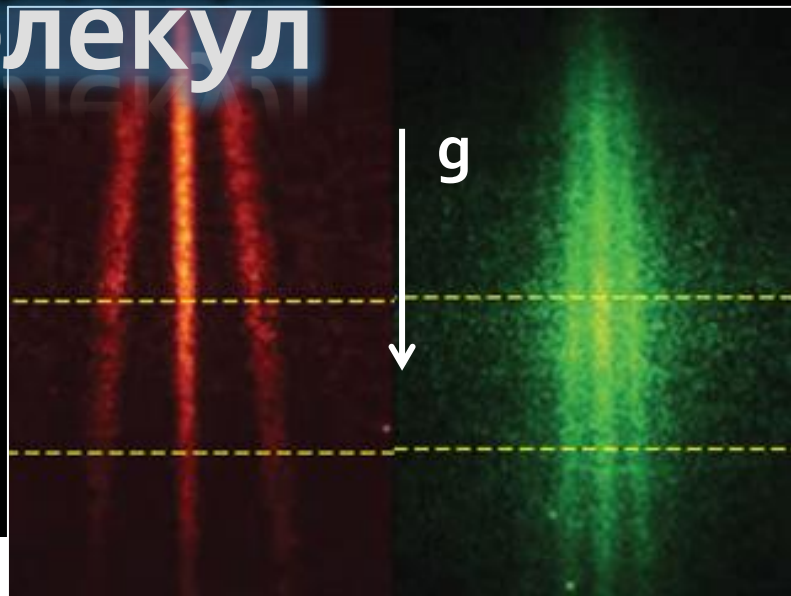
Интерференция атомов

1991: O. Carnal, J. Mlynek
"Young's double-slit
experiment with atoms: A
simple atom interferometer"



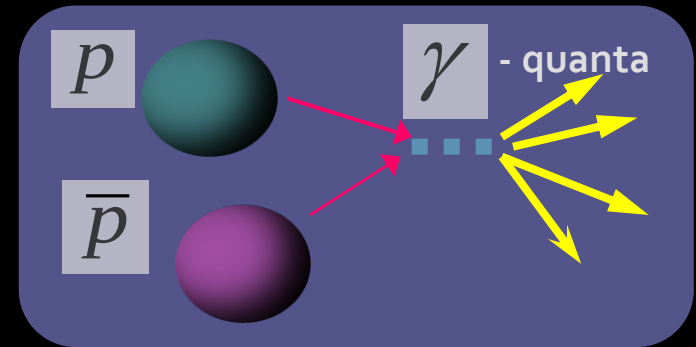
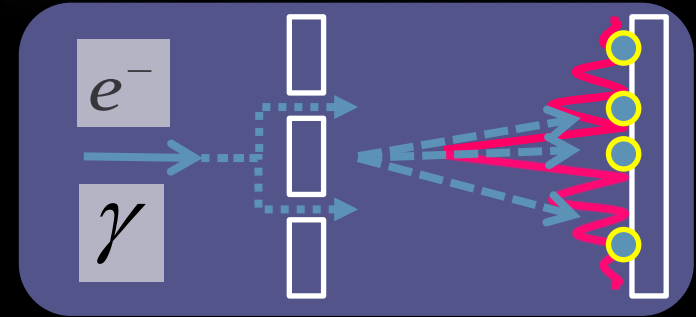
Интерференция молекул

2012: T.Juffmann et al./Nature Nanotechnology: Интерференция молекул фталоцианина и его производных, до 1298 а.е.м.



Интерпретация волновой функции

1. Де Бройль: волна-пилот
2. «Фундаментальные» взаимодействия,
3. Единственность и полнота представления



1. КМ объекты «вне житейской логики», мы не в состоянии их представить →
2. Аксиоматический подход →
3. Догматизм...

Фундаментальные физические теории

1. Механика

2. Электродинамика

3. Теория относительности (СТО, ОТО)

Классические
теории

4. Квантовая механика

Квантово-полевые
теории

- ? Дуальная картина мира
- ? Смысл волновой функции - Соответствие объектов
- ? Проблема измерений, соотношение неопределённостей
- ? Применимость «классических рамок»
- ? Детерминизм, причинность - Познаваемость

Проблемы понимания

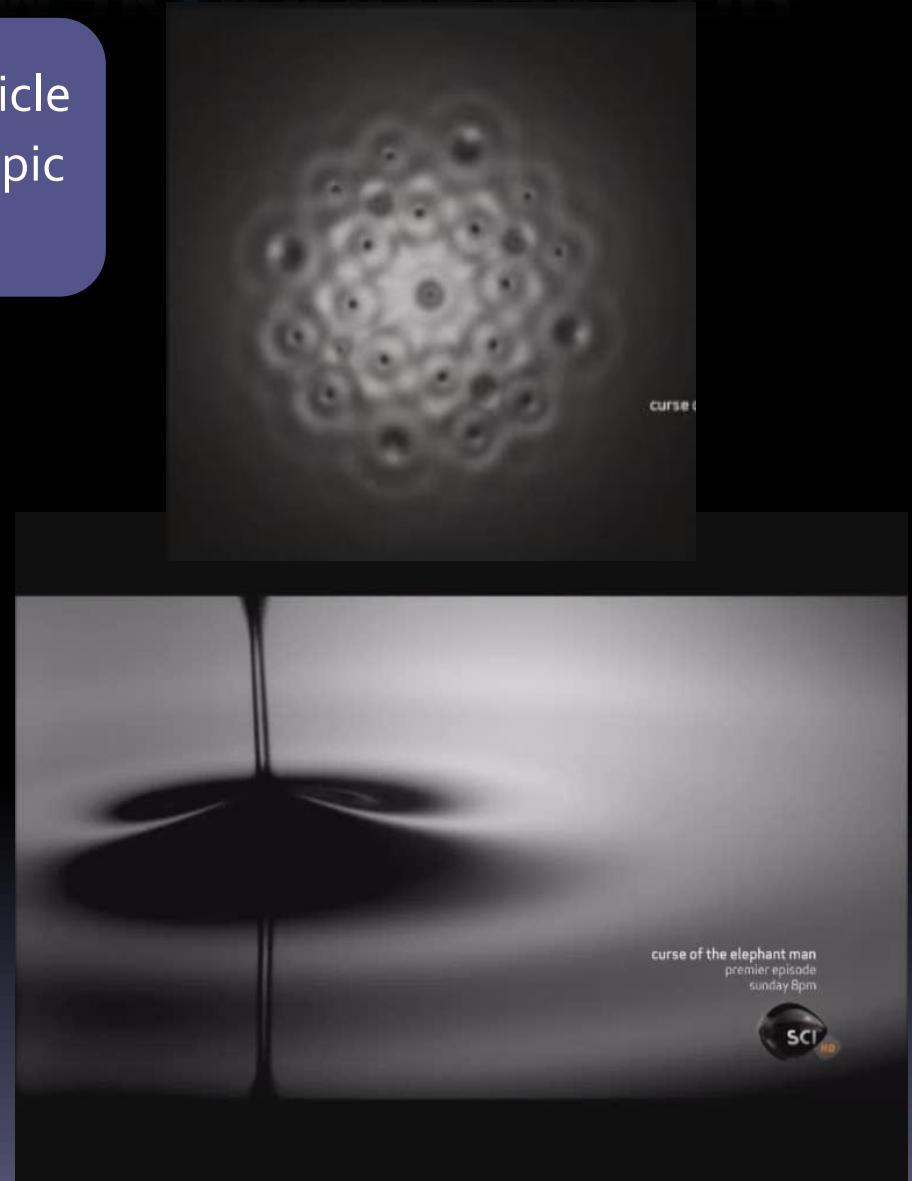
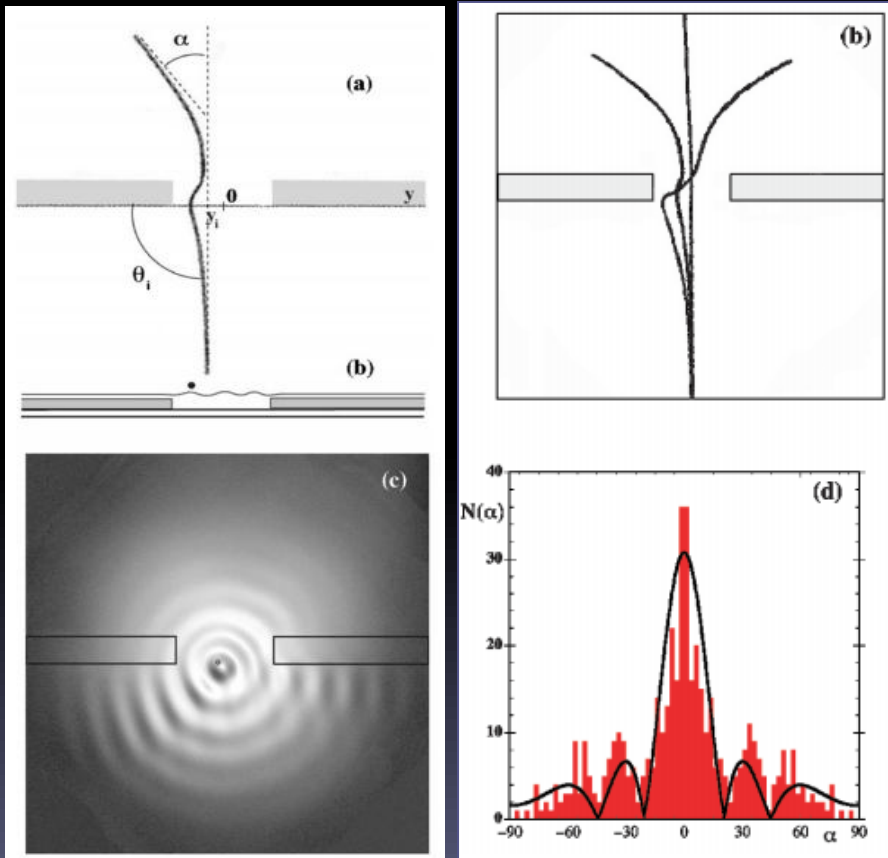


М. Гелл-Манн, 1981:

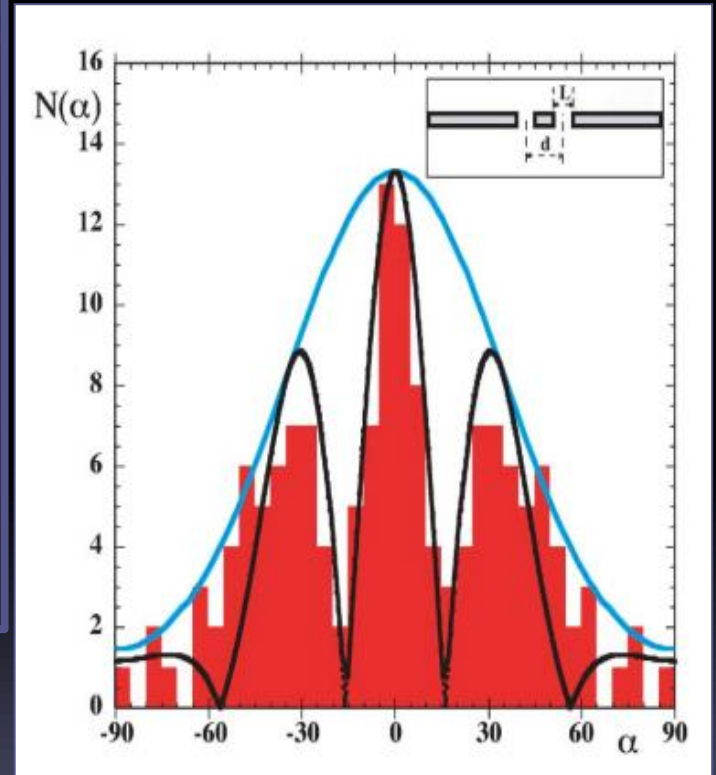
"Квантовая механика – это антиинтуитивная дисциплина, ... полная загадок и парадоксов, которую мы не понимаем до конца, но умеем применять ... Это рамки, внутри которых любая корректная теория должна быть включена"

Интерференция макрообъектов

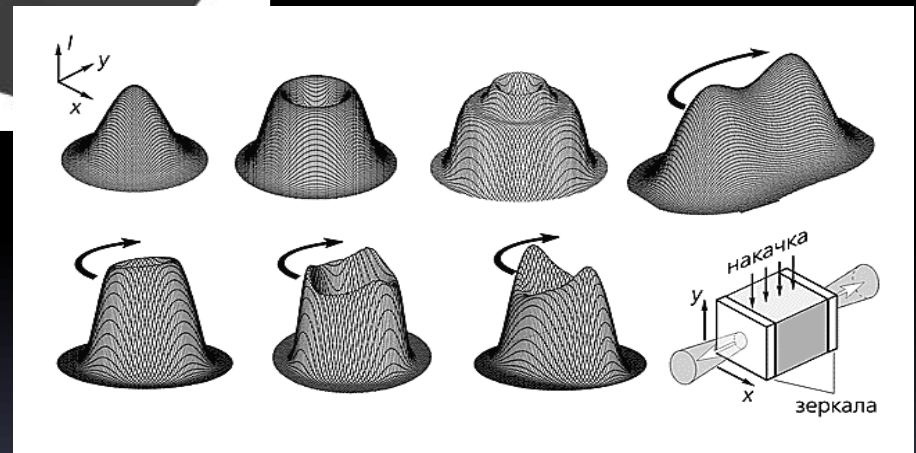
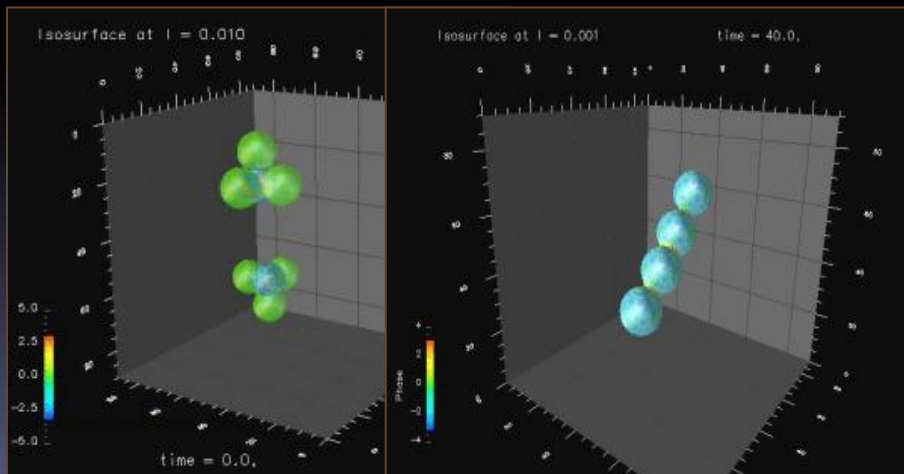
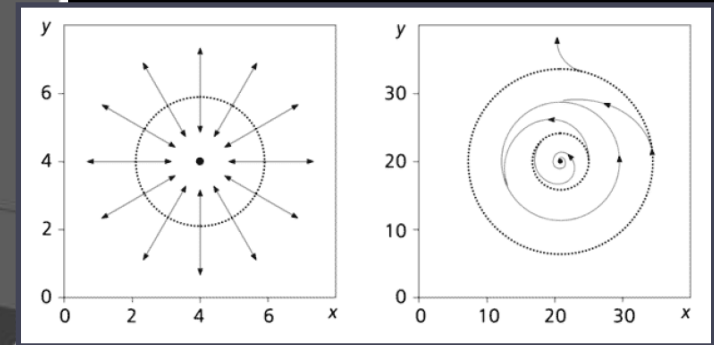
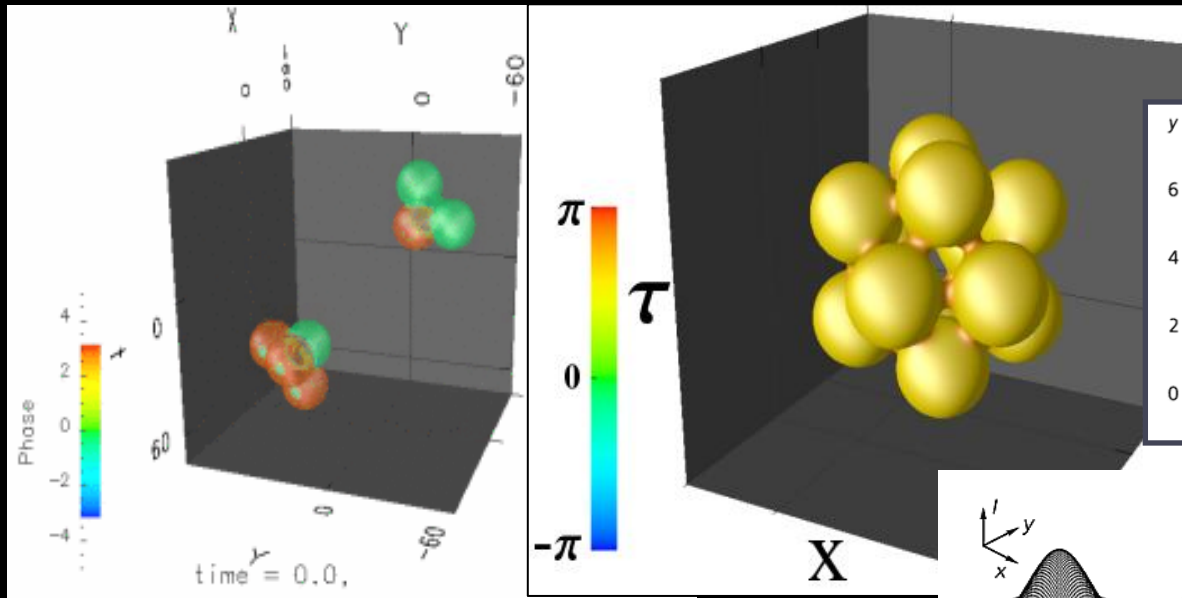
2006: Y.Coder, E.Fort. Single-Particle Diffraction and Interference at Macroscopic Scale. – PRL 97, 154101, 2006



Интерференция макрообъектов



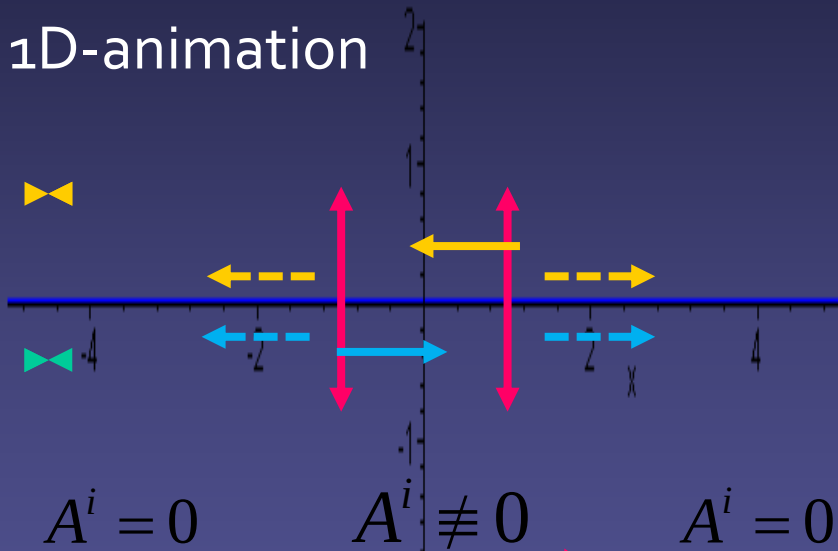
«Компактные» ЭМ поля: Солитоны



Розанов Н.Н. Мир лазерных солитонов. – Природа, 6, 2007.

«Самосогласованные» поля

1D-animation

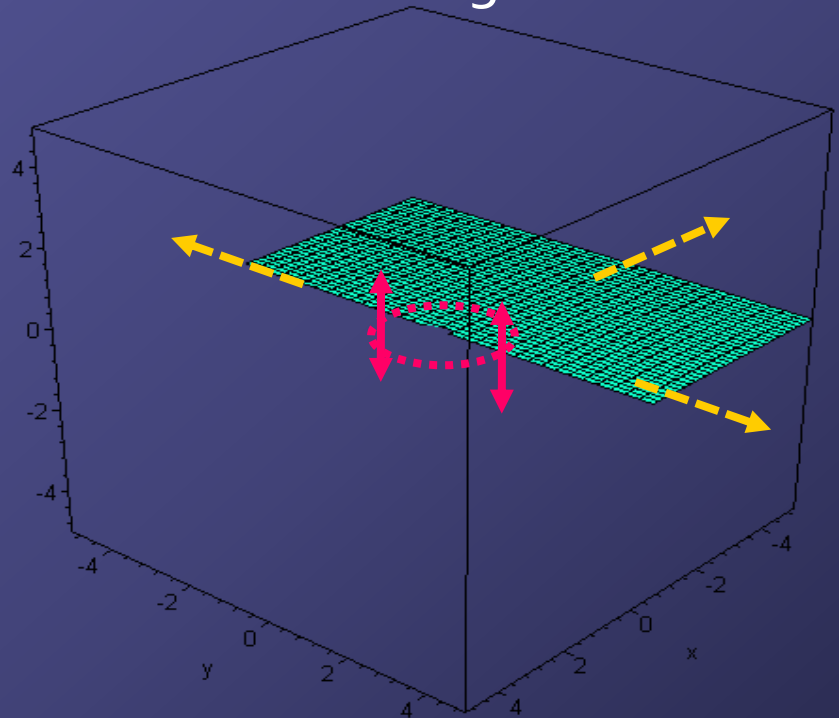


$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} - \nabla^2 \right) A^i = \alpha j^i$$

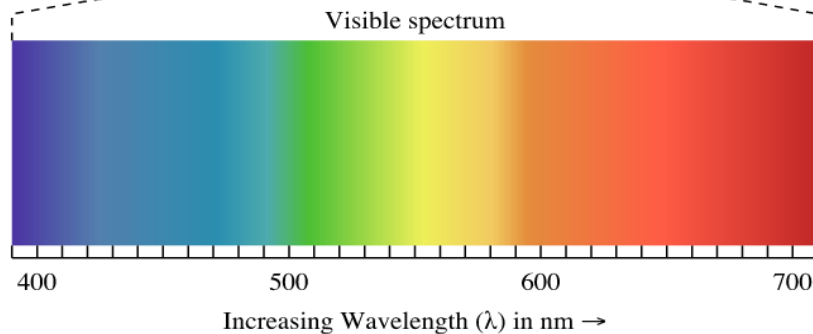
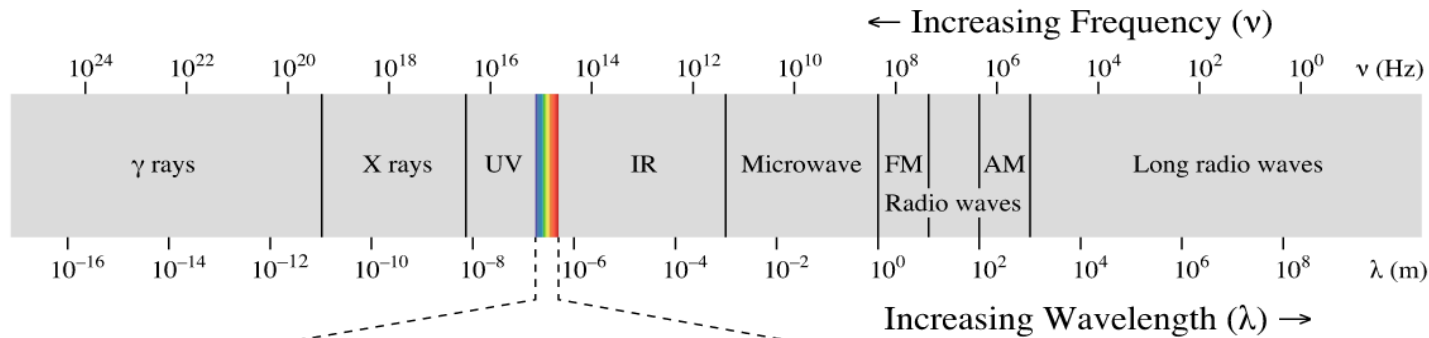
$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} - \nabla^2 \right) \Psi = -\beta m_0^2 \Psi$$

2012: Novikov-Borodin A.V.
Multi-Space Structure of the
Universe. - [arXiv: 1206.5993 v3](#)

3D-animation

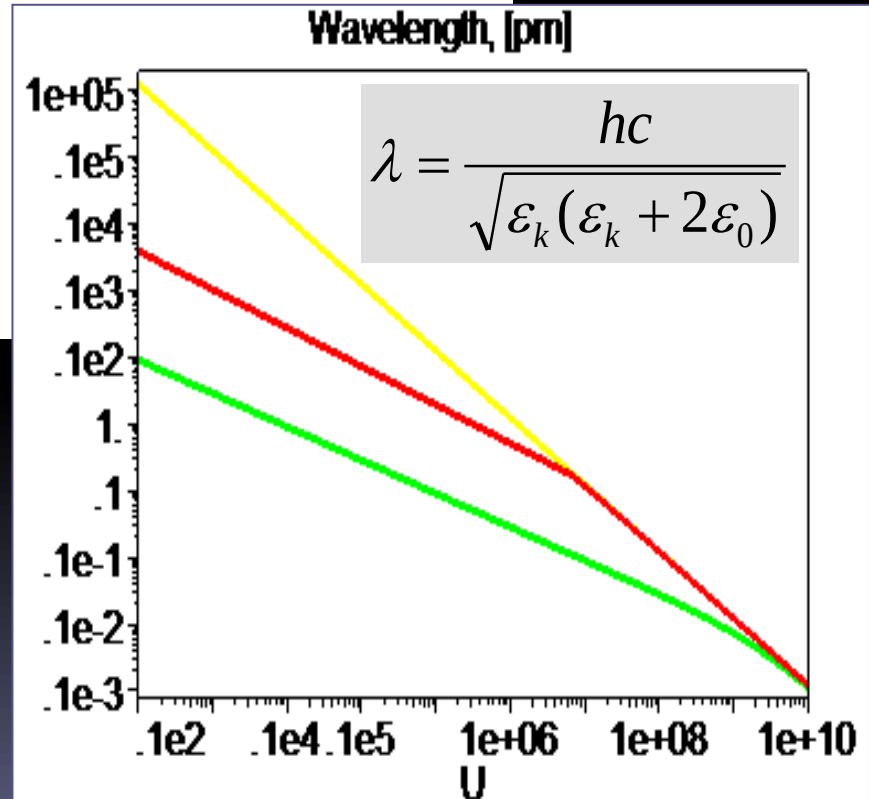


ФОТОНЫ, электроны и нейтроны



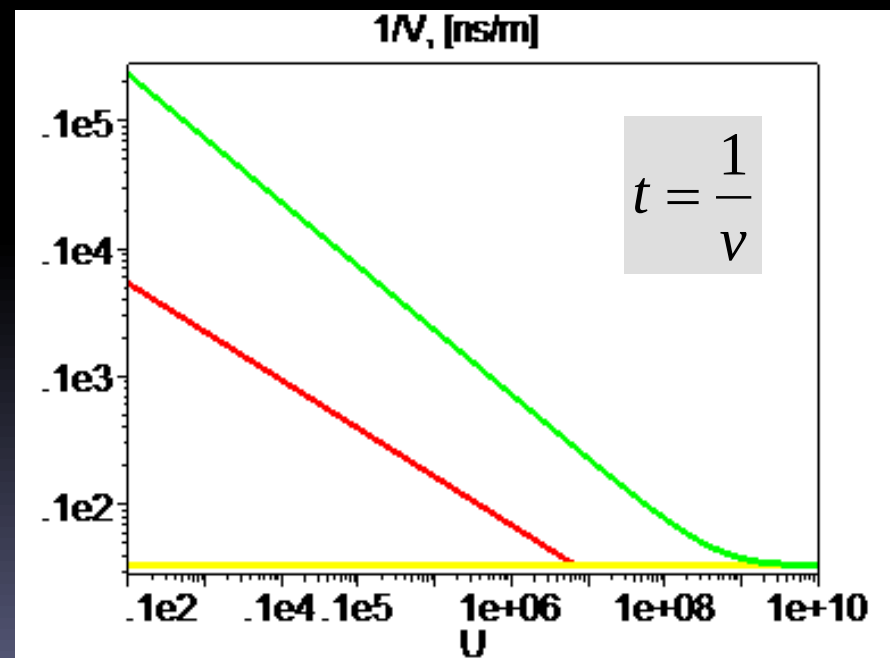
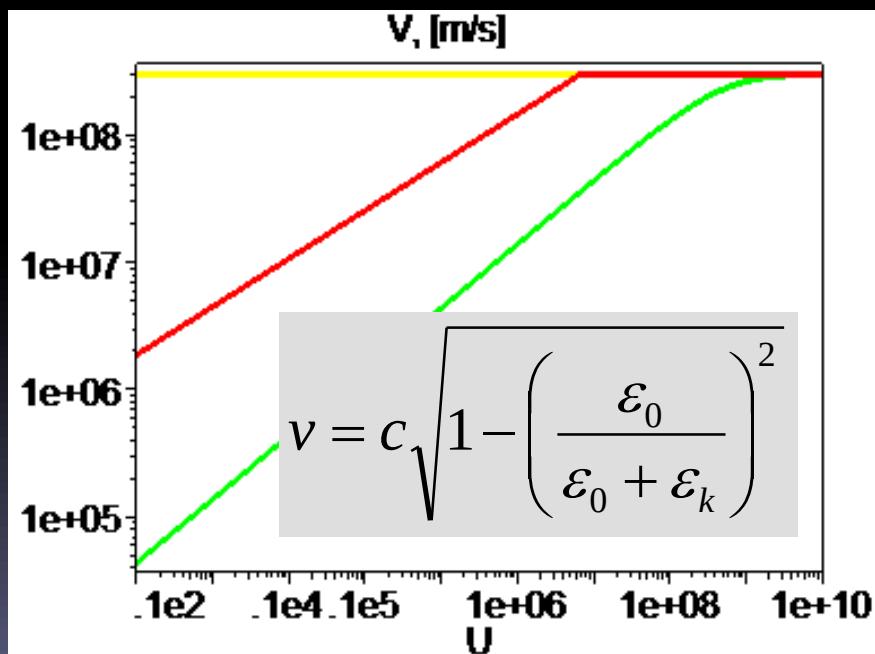
λ , nm	E_e , eV	E_n , eV
0,05	600	0,0033

XFEL (DESY, Hamburg) –
0,05 ÷ 6 nm (17,5 GeV)



ФОТОНЫ, ЭЛЕКТРОНЫ И НЕЙТРОНЫ

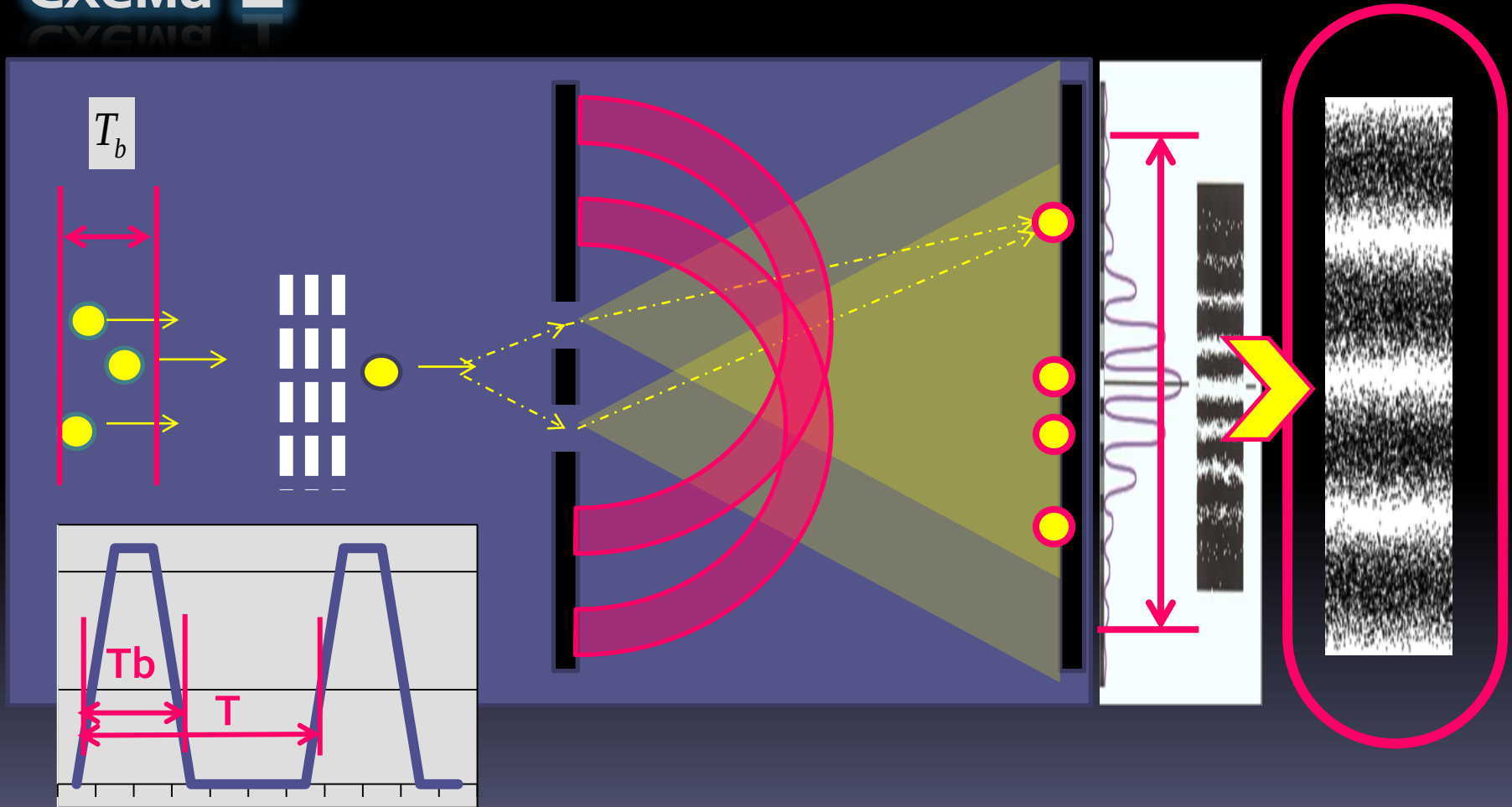
$E_k, \text{ eV}$	$\Lambda_e, \text{ nm}$	$1/V_e, \text{ ns/m}$	$\Lambda_n, \text{ pm}$	$1/V_n, \text{ mks/m}$
10	0,39	533,57	9,06	22,86
100	0,12	168,75	2,87	7,23
600	0,05	68,94	1,17	2,95
$1,2 \cdot 10^6$	$0,76 \cdot 10^{-3}$	3,50	0,026	0,07



Пространственный коллапс

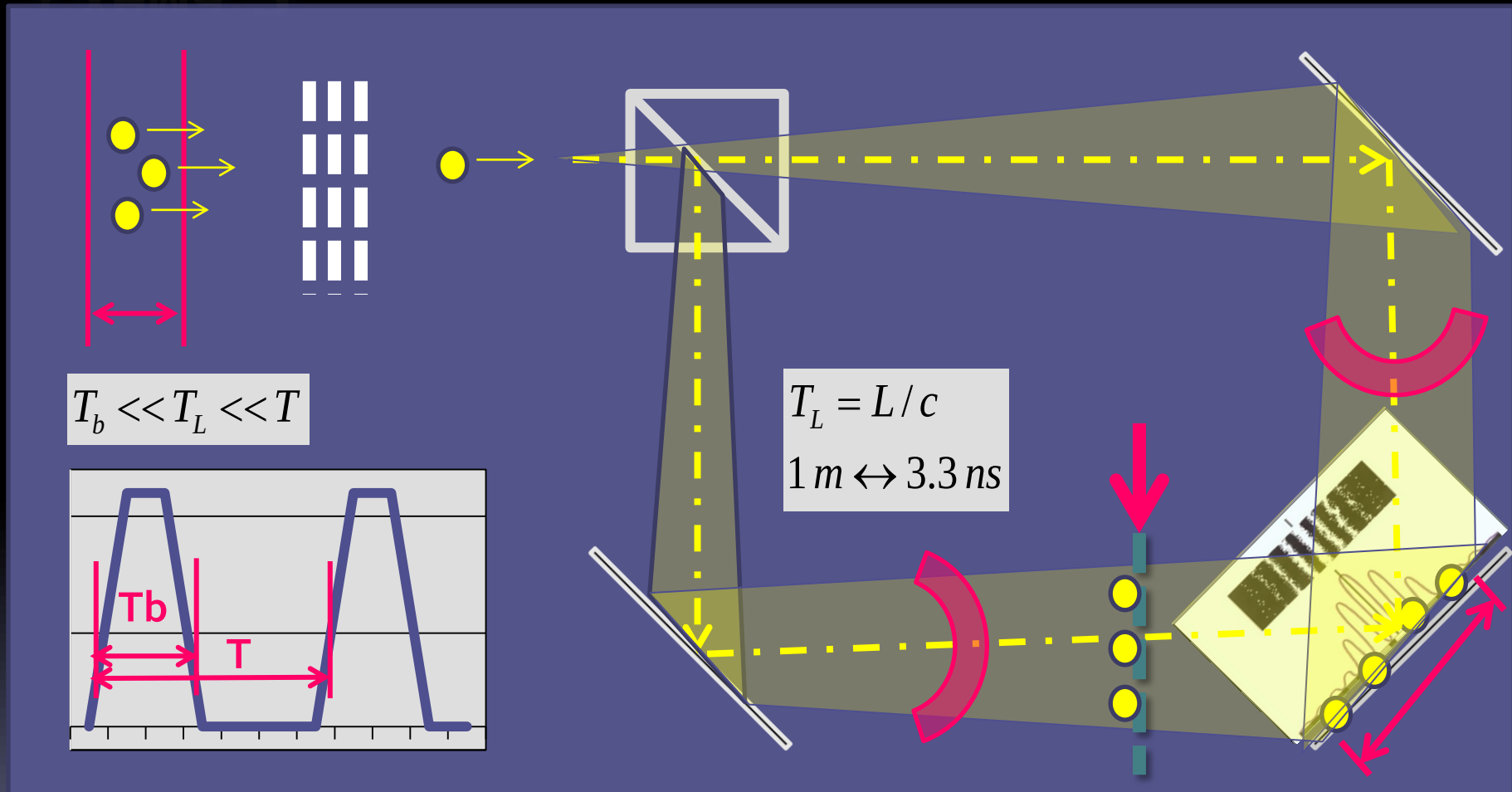
(Двухщелевой эксперимент)

Схема 1



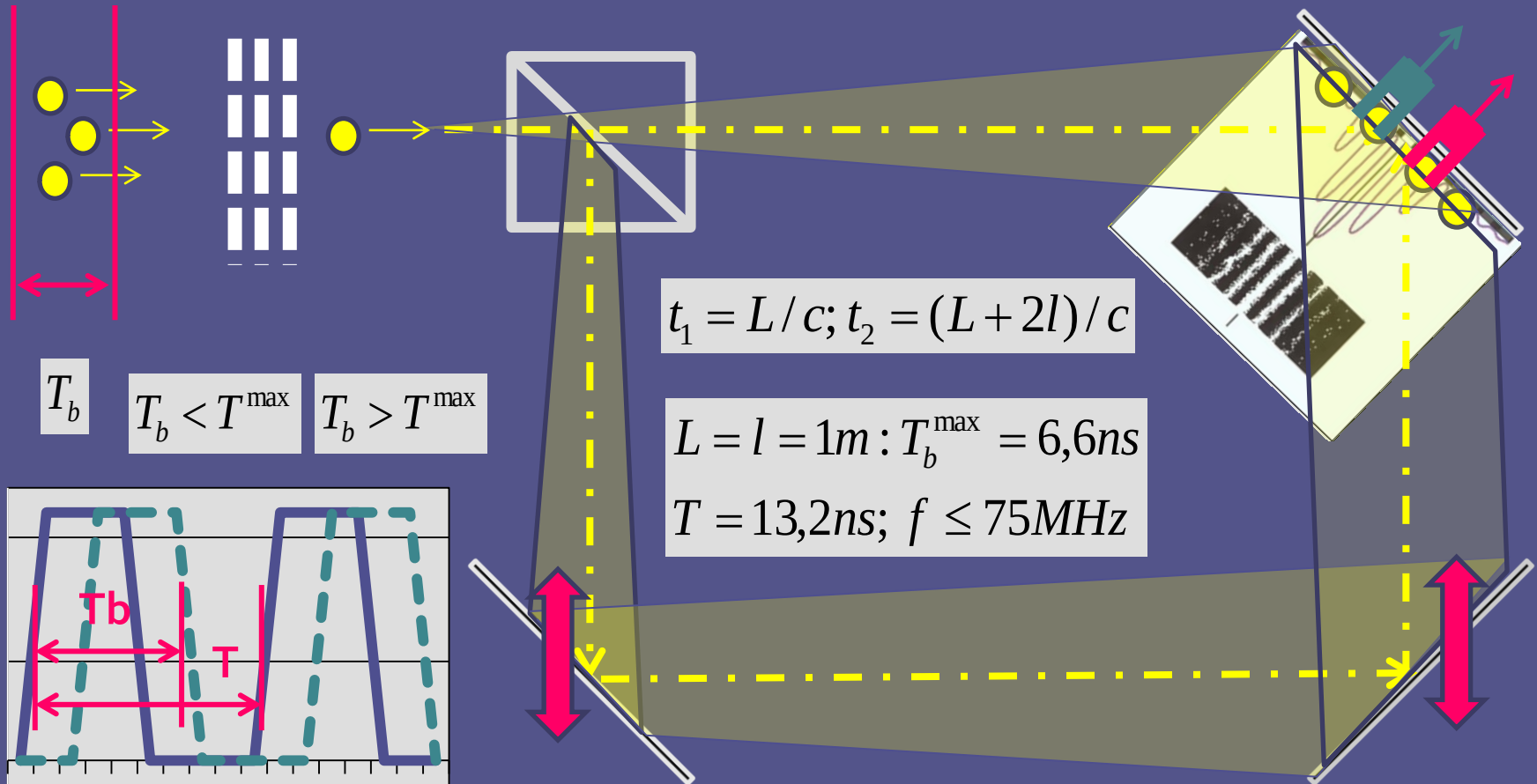
Пространственно-временной коллапс (голографическое изображение)

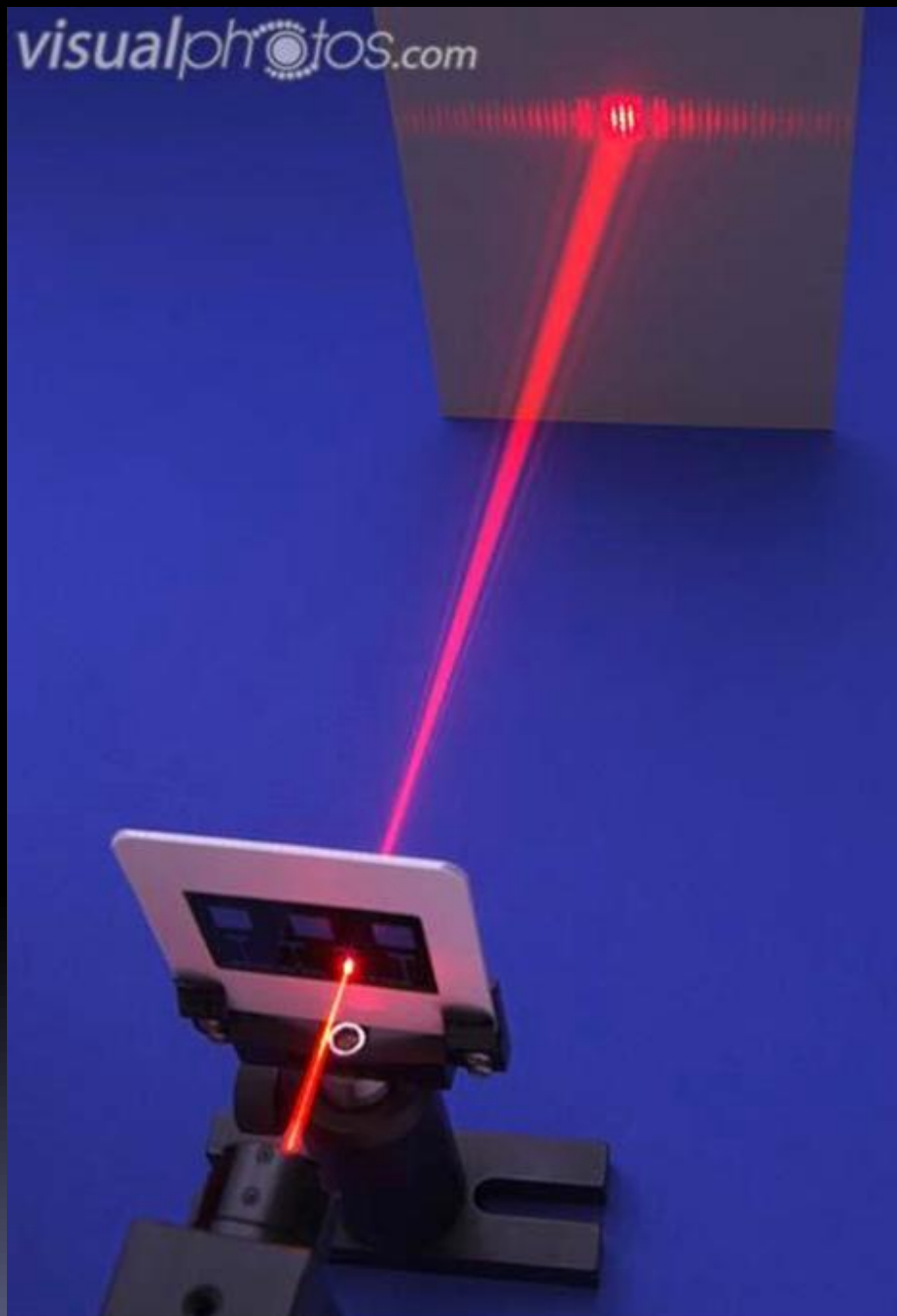
Схема 2



Пространственно-временной коллапс (комбинированное изображение)

Схема 3



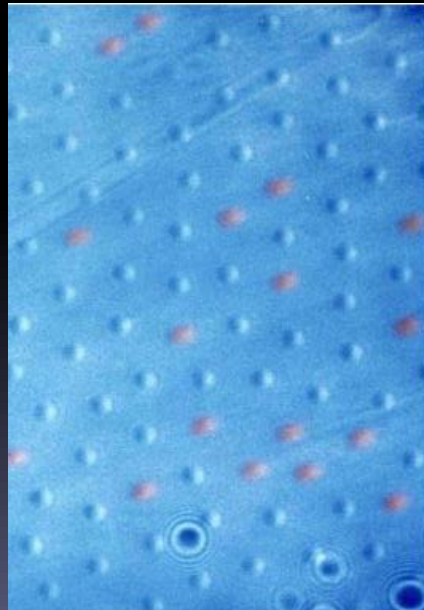
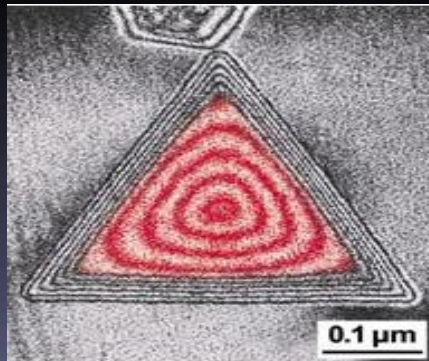
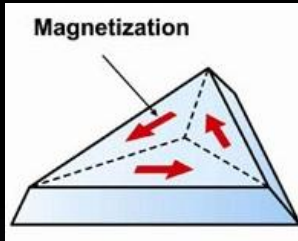
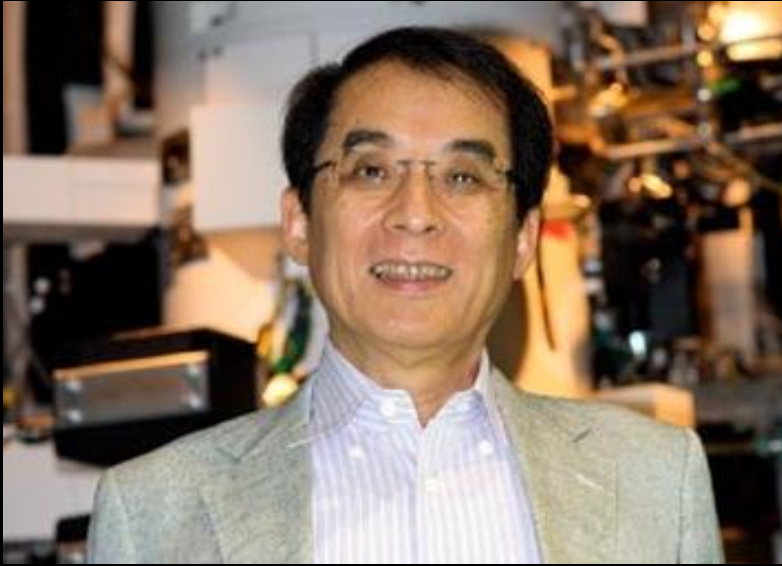


ОБОРУДОВАНИЕ

1. Импульсный регулируемый лазер
2. Атенюатор (управляемый)
3. Микроканальные пластины
4. Компьютер с устройством ввода/вывода
5. Устройства формирования (бипризма, зеркала, крепления)

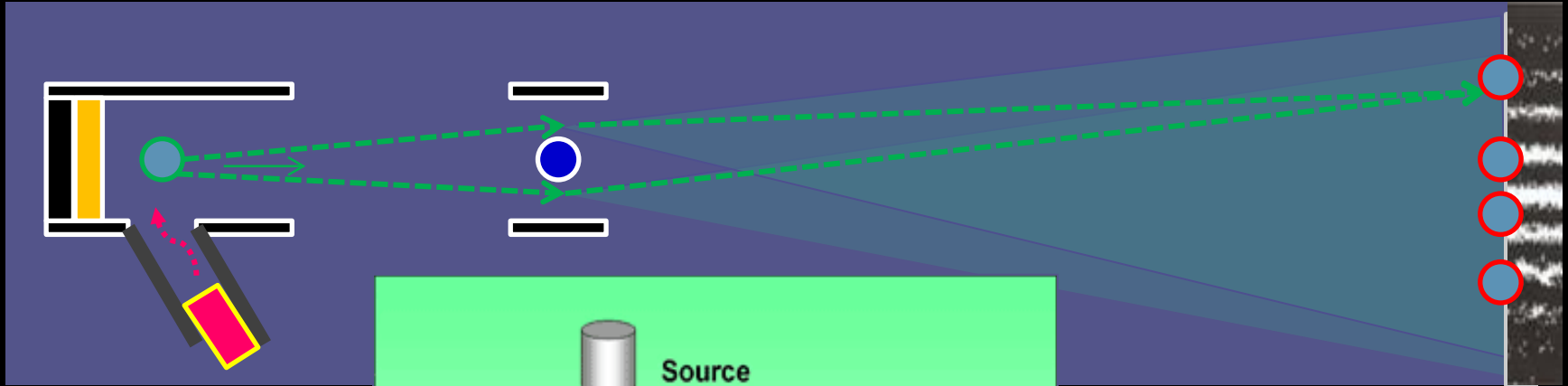
~10-25 тыс. \$

Голографический эл. микроскоп

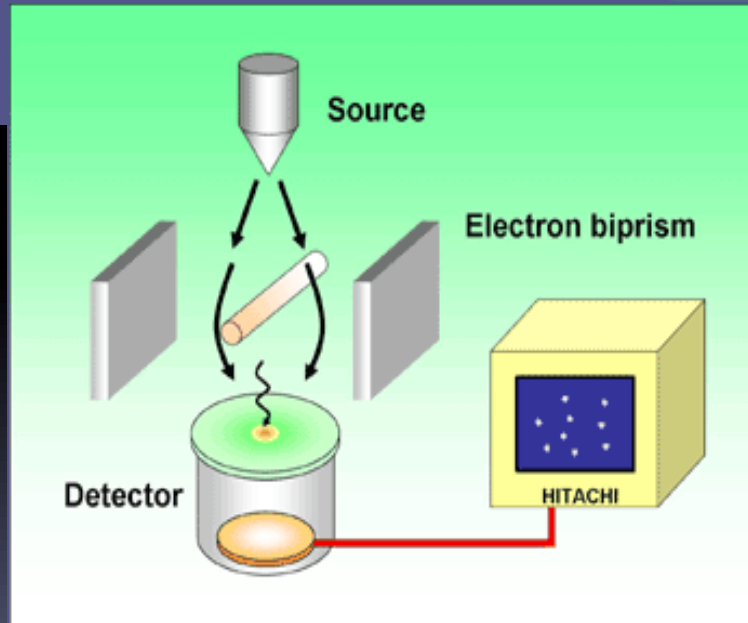


Интерферометр электронов (голографическое изображение)

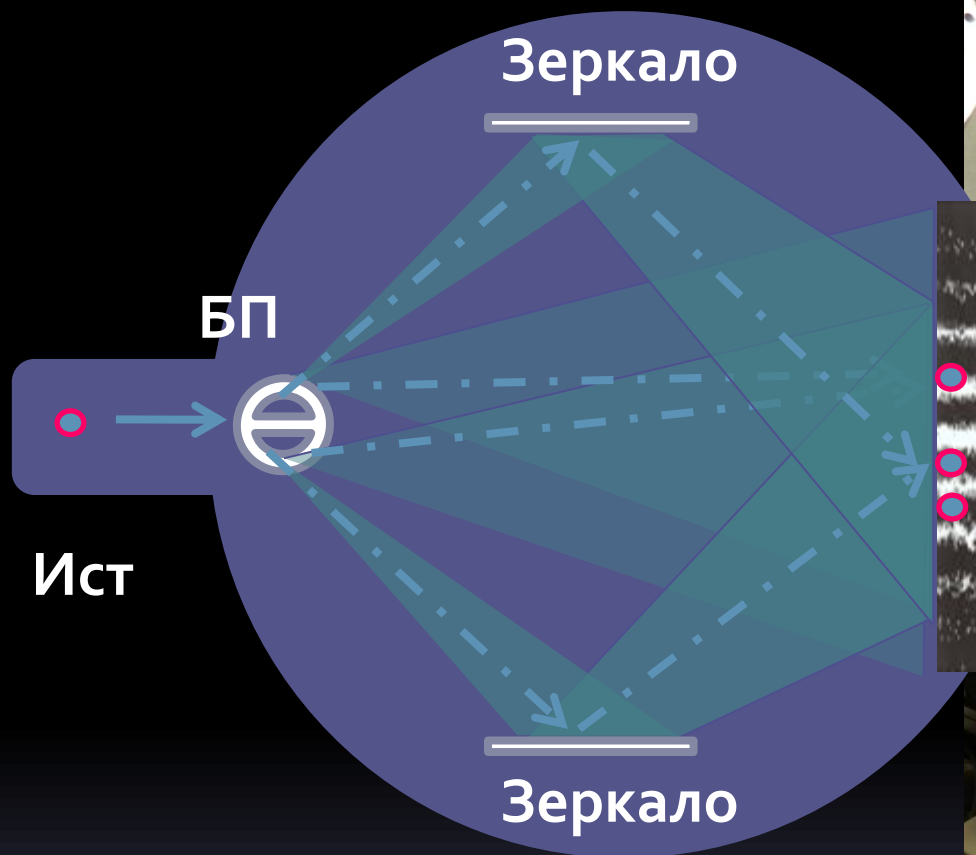
Источник Бипризма



Лазер



Электронный интерферометр

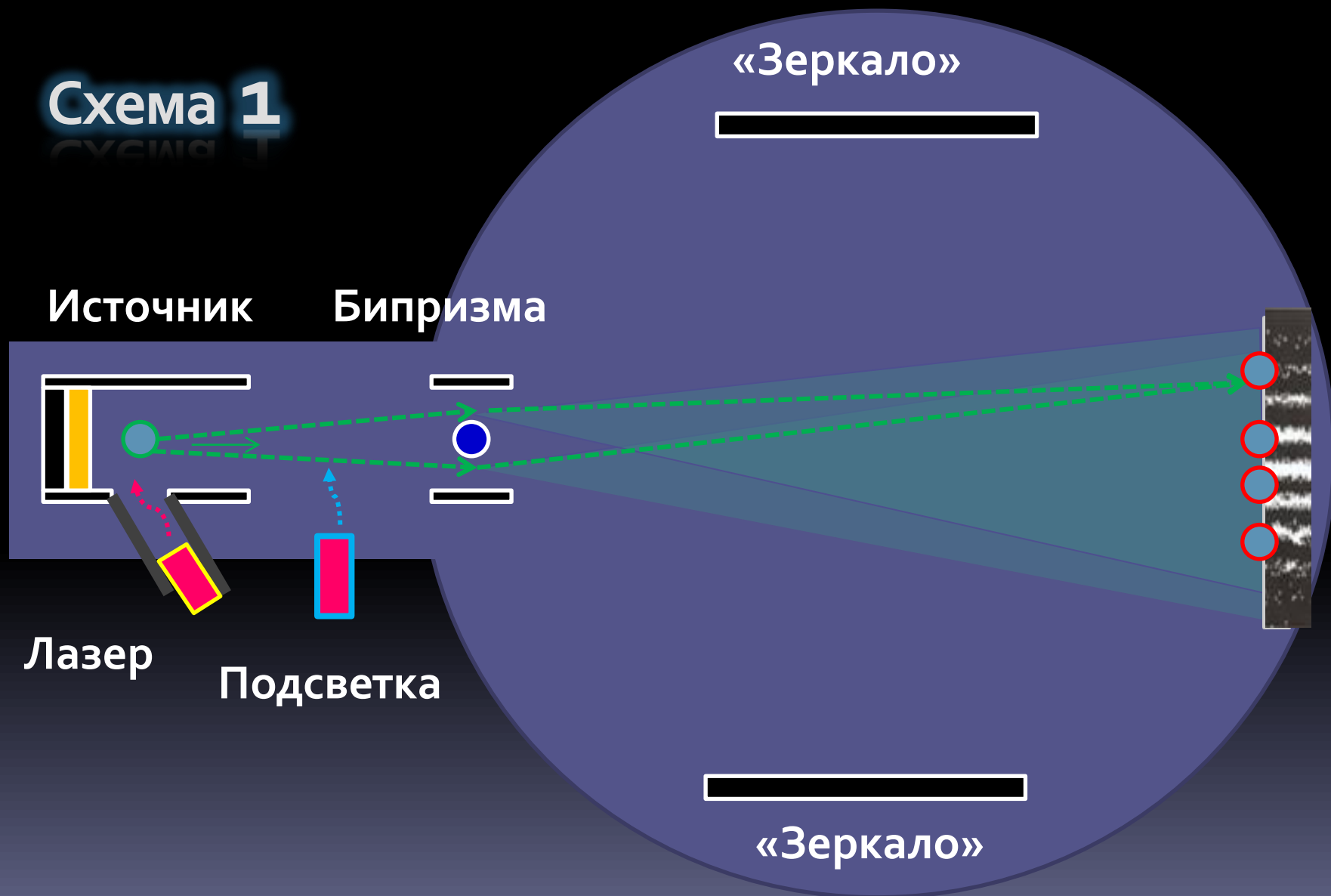


Ист – Источник электронов
БП – Бипризма



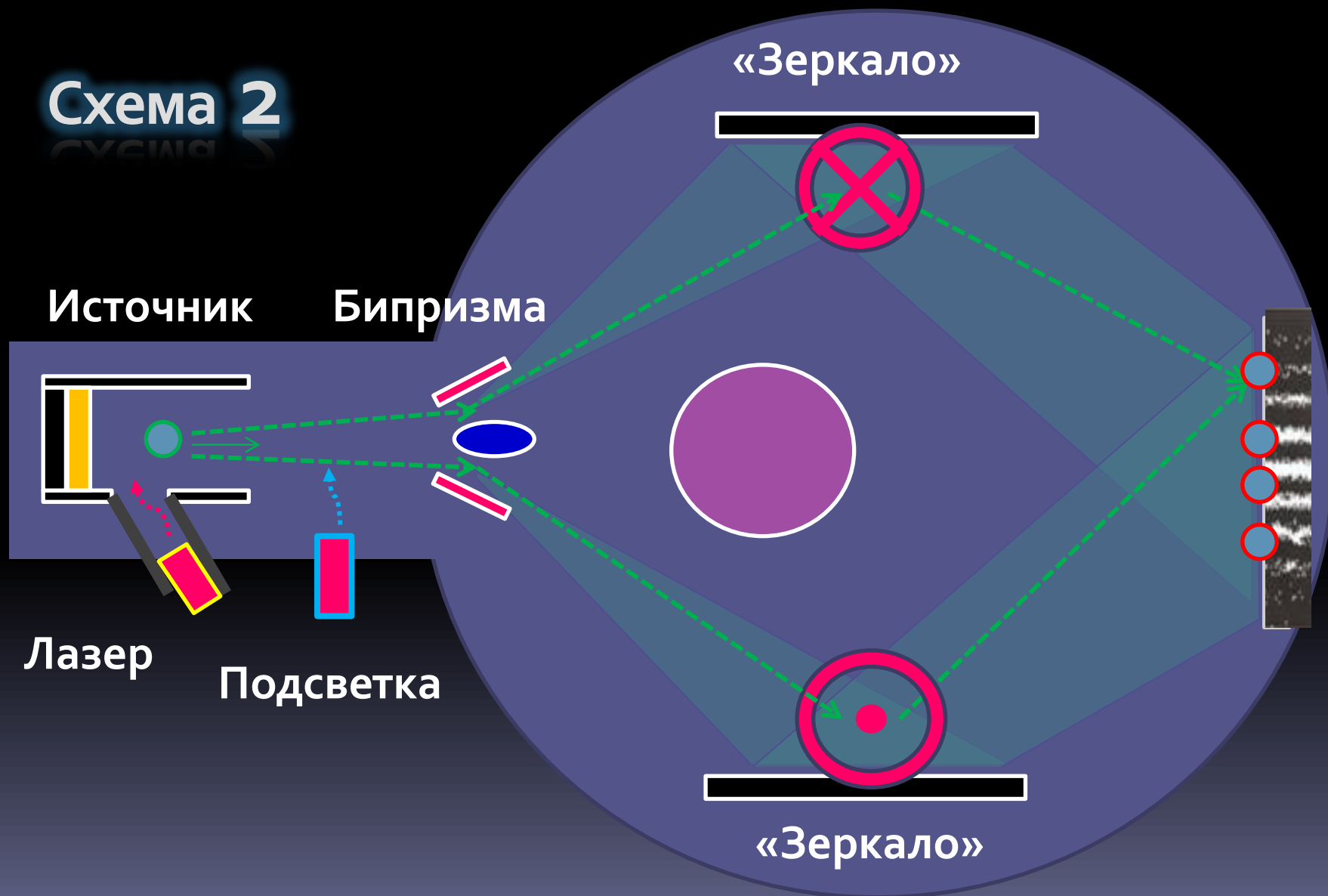
Интерферометр электронов

Схема 1



Интерферометр электронов

Схема 2



Интерферометр электронов

Схема 3



Голографический эл. микроскоп

Схема 1

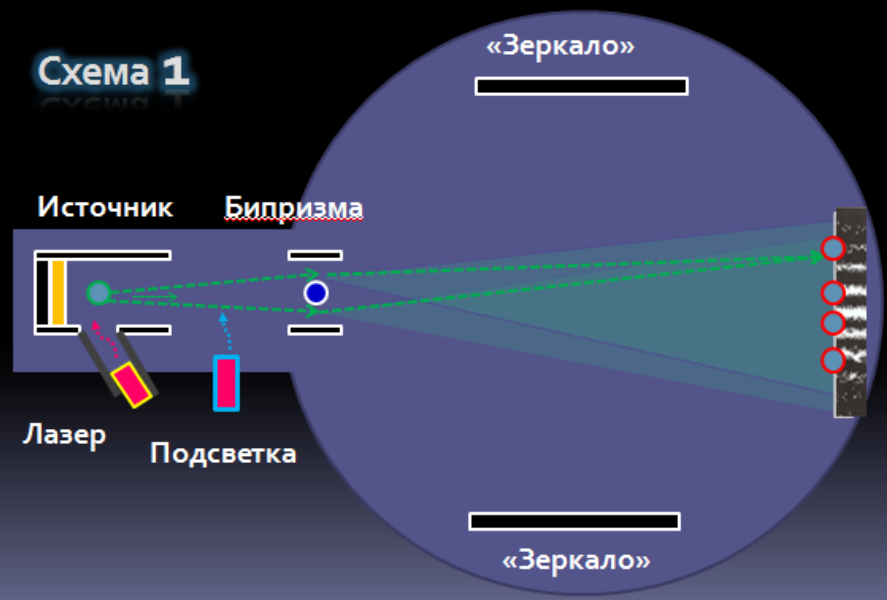


Схема 2



Схема 3



Нейтроны в гравитационном поле



Созданы многоцелевые гравитационные монохроматоры нейтронов, которые позволили измерить ускорение силы тяжести свободно падающих нейтронов с точностью 0.1 % и определить верхний предел электрического заряда нейтрона на уровне $Q_n \leq 10^{-15} Q_e$ (Q_e - заряда электрона). Впервые предложен монохроматор нейтронов на основе использования эффекта силы Кориолиса.

Нейтроны в гравитационном поле

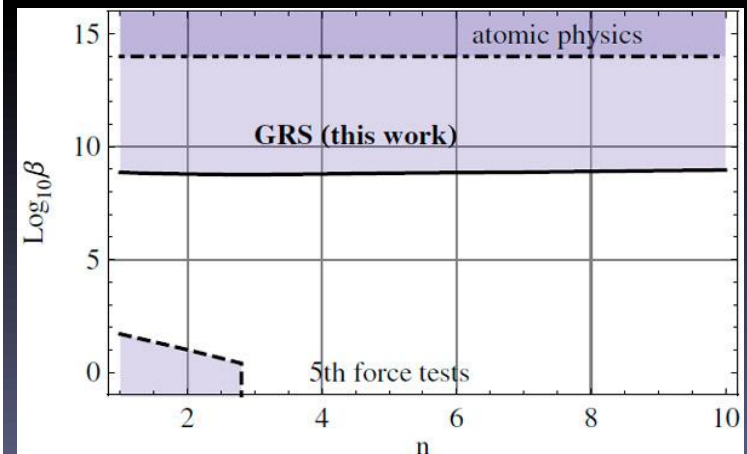
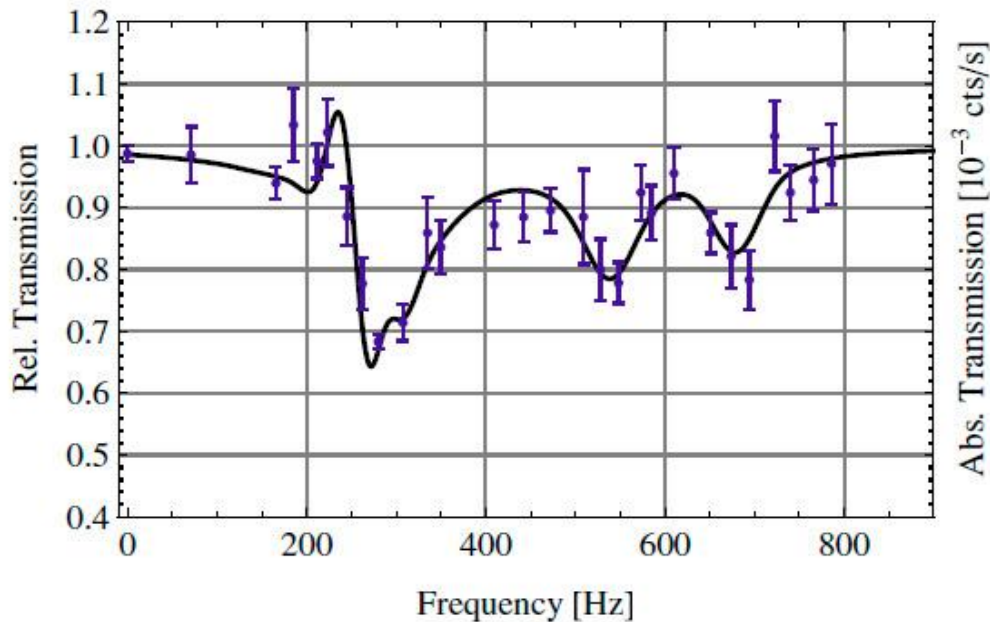
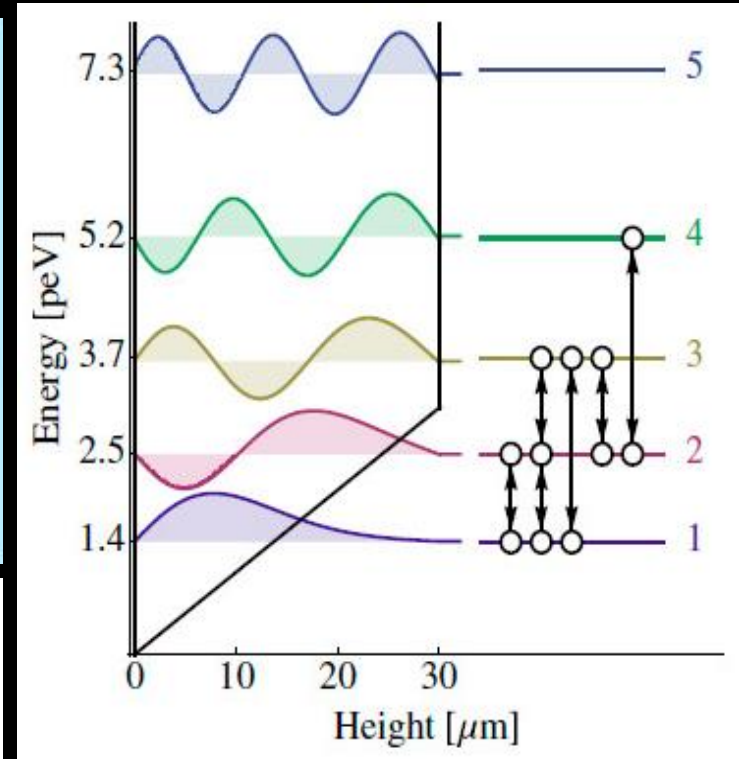
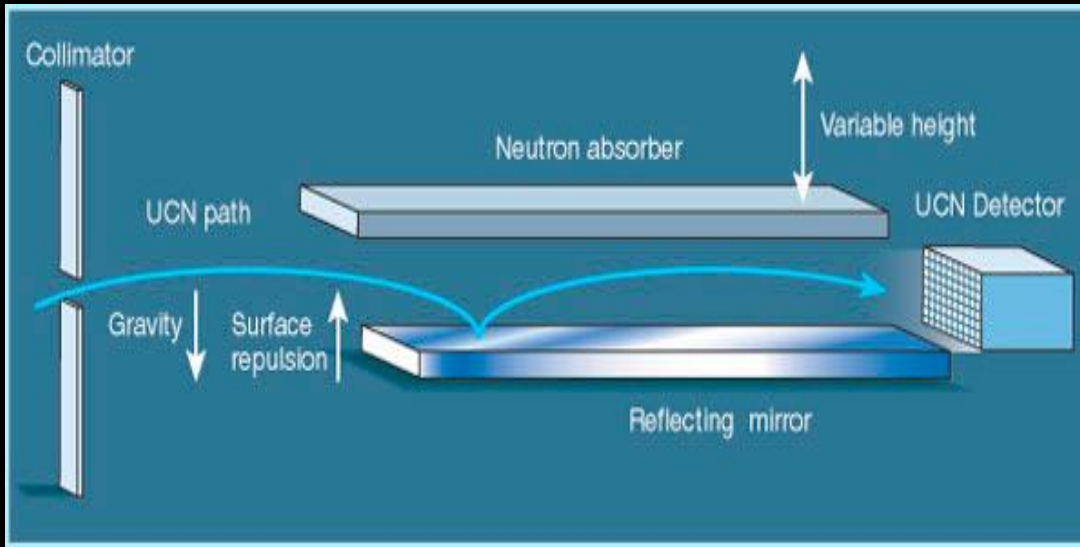
Gravity Resonance Spectroscopy Constrains Dark Energy and Dark Matter Scenarios

Phys. Rev. Lett. 112, 151105 – Published 16 April 2014

T. Jenke, G. Cronenberg, J. Burgdörfer, L. A. Chizhova, P. Geltenbort, A. N. Ivanov, T. Lauer, T. Lins, S. Rotter, H. Saul, U. Schmidt, H. Abele

ABSTRACT. We report on precision resonance spectroscopy measurements of quantum states of ultracold neutrons confined above the surface of a horizontal mirror by the gravity potential of Earth. Resonant transitions between several of the lowest quantum states are observed for the first time. These measurements demonstrate that Newton's inverse square law of gravity is understood at micron distances on an energy scale of 10^{-14} eV. At this level of precision, we are able to provide constraints on any possible gravitylike interaction. In particular, a dark energy chameleon field is excluded for values of the coupling constant $\beta > 5.8 \times 10^8$ at 95% confidence level (C.L.), and an attractive (repulsive) dark matter axionlike spin-mass coupling is excluded for the coupling strength $g_s \cdot g_p > 3.7 \times 10^{-16}$ (5.3×10^{-16}) at a Yukawa length of $\lambda = 20 \mu\text{m}$ (95% C.L.).

Нейтроны в гравитационном поле



Предлагаемые установки в ИЯИ РАН



ОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

- учебно-методический характер
- исследование динамических свойств волновых пакетов
- проверка интерпретаций волновых функций
- исследование эффектов типа ЭПР



ЭЛЕКТРОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

- учебно-методический характер
- исследование проблемы измерений в квантовой механике
- исследование эффектов типа АБ
- исследование вариантов схем голографических электронных микроскопов



НЕЙТРОННЫЙ ДИФРАКТОМЕТР

- исследование гравитации в микро-масштабе
- исследование эффектов типа COW, систем вращения
- исследование возможности регистрации влияния на гравитацию «тёмных» составляющих

А.В. Новиков-Бородин

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВО-ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ МИКРООБЪЕКТОВ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

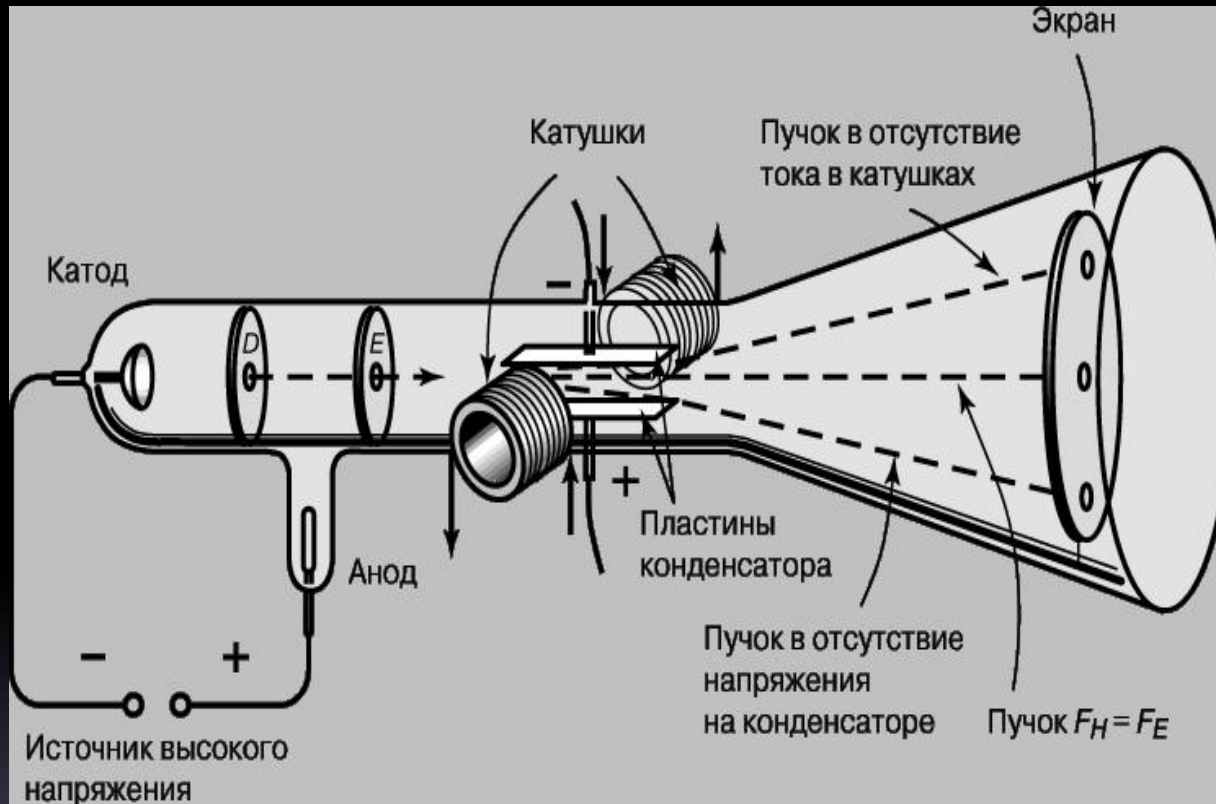
Семинар ОЭФ ИЯИ РАН, 22 мая 2014

Волновая и корпускулярная природа частиц

год	Эксперимент/гипотеза/открытие	Осн. принципы
1897	Опыт Дж.Дж.Томсона: открытие электрона	квантование заряда
1900	Излучение абсолютно чёрного тела (законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина). Гипотеза М. Планка.	квантование электромагнитного излучения
1905	Фотоэффект. Гипотеза А.Эйнштейна.	корпускулярная природа света (фотон)
1924	Гипотеза Л.де Бройля: волновая природа частиц	корпускулярно- волновой дуализм частиц
1925-6	Уравнение Э.Шрёдингера	Основное уравнение квантовой механики
1927	Модель атома Н.Бора Соотношение неопределённостей В.Гейзенберга	Квантовые постулаты Индетерминизм

ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

1897 г.: Открытие электрона
(опыт Джозефа Джона Томсона).



$$\frac{e}{m_e} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

$$\frac{e}{m_H} = 9.65 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

$$\frac{m_H}{m_e} \approx 1836$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

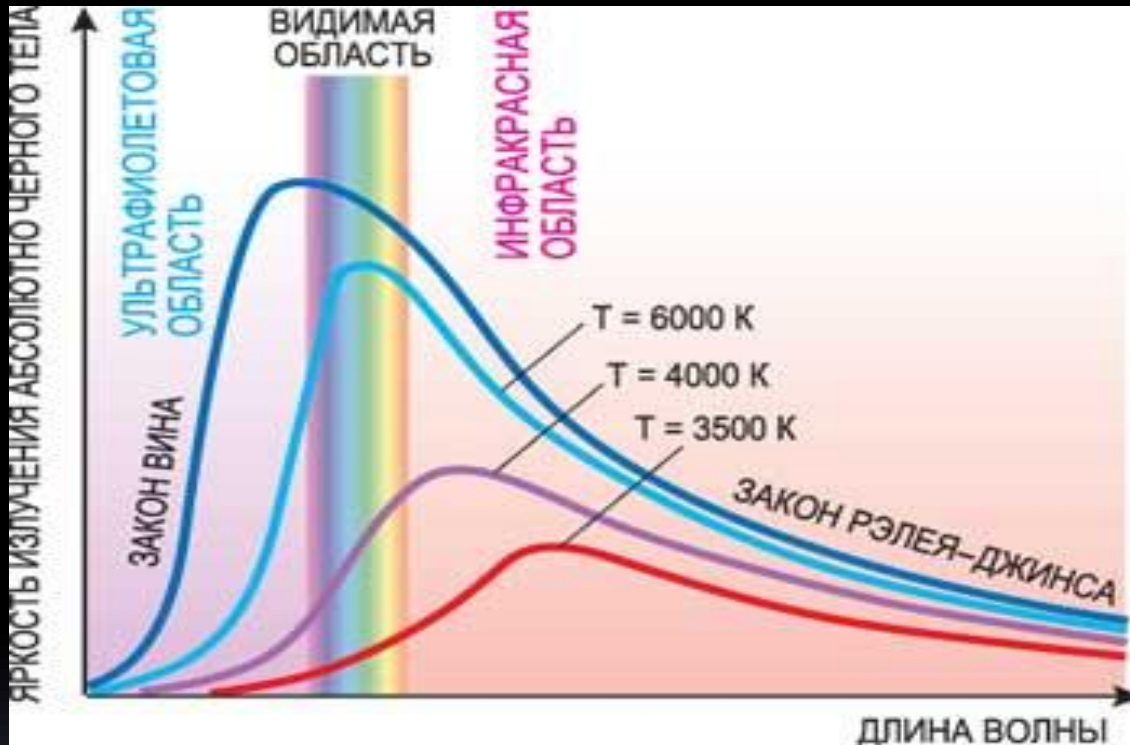
$$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$m_H = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Наименьший, элементарный
заряд (квантование заряда):

$$q = \pm n \cdot e$$

1900 г.: гипотеза Макса Планка: квантование электромагнитного излучения.



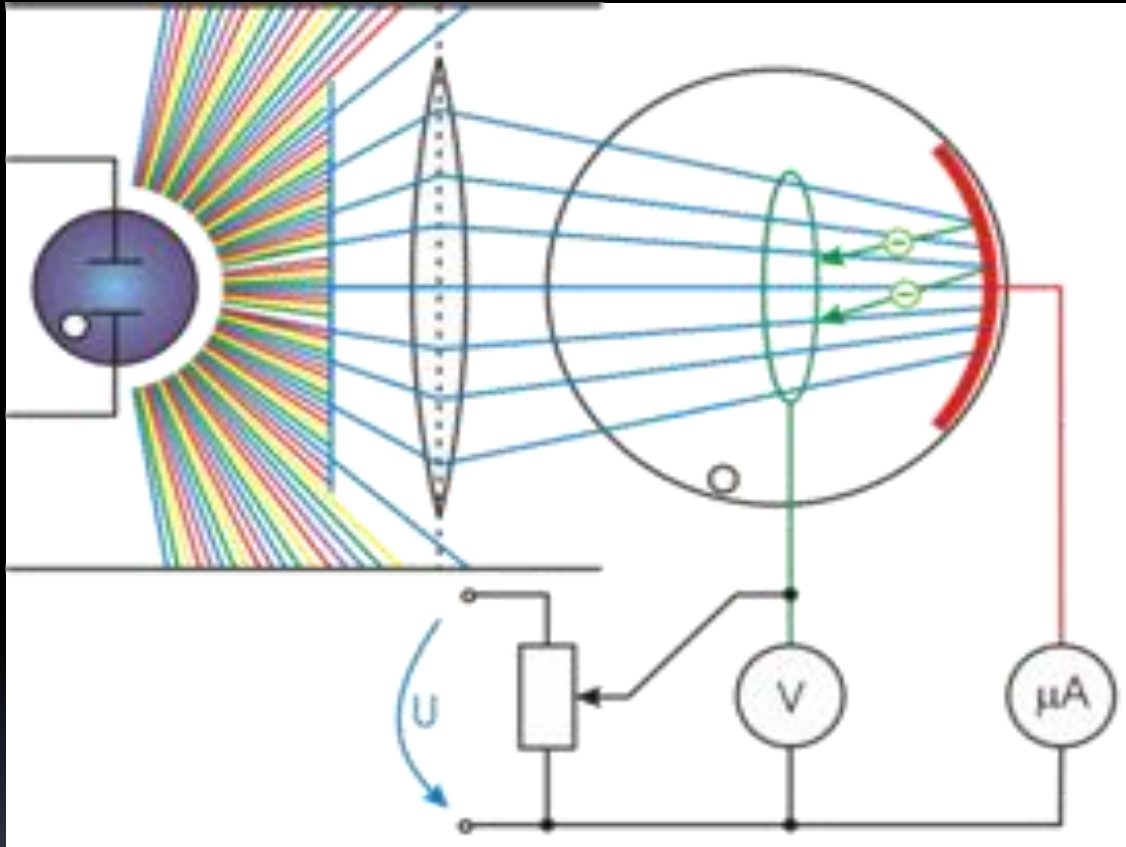
$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

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

$$\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

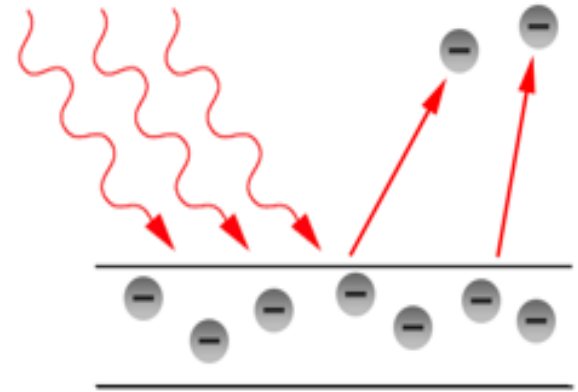
«электромагнитное излучение испускается отдельными порциями – квантами, величина которых пропорциональна частоте излучения»

1905 г.: открытие А.Эйнштейна: квантование света (существование частиц света - фотонов).



фотоэффект

$$h\nu = A_{out} + mv^2 / 2$$



$$\varepsilon = h\nu = m_{ph}c^2$$

$$p = m_{ph}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$m_{0ph} = 0$$

Оптико-механическая аналогия

Вариационные принципы

Принцип Ферма (1662):

$$S = \int_A^B n(\vec{r}) dl$$

Принцип наименьшего действия (Мопертюи, 1744):

$$S = \int_A^B \sqrt{2m(E - U(\vec{r}))} dl$$
$$= \int_A^B p(\vec{r}) dl$$

$$p \sim n$$

$$n = \frac{ck}{\omega}$$



$$p = \hbar k = h / \lambda$$

$$E = \hbar \omega$$

Волна де Бройля, 1924:

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_0 \exp \left[-\frac{i}{\hbar} (Et - \vec{p}\vec{r}) \right]$$

Соотношение неопределённостей

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_0(\vec{r}, t) e^{i(\omega t - \vec{k} \vec{r})} = \psi_0(\vec{r}, t) e^{i(\varepsilon t - \vec{p} \vec{r}) / \hbar}$$

$$\psi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(q) e^{iqx} dq; \quad \varphi(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) e^{-iqx} dx$$

$$\psi(x) = \delta(x) \leftrightarrow \varphi(q) = \frac{1}{2\pi}; \quad \varphi(q) = \delta(q) \leftrightarrow \psi(x) = \frac{1}{2\pi}$$

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta p_y \Delta y \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta p_z \Delta z \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta \varepsilon \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Коллапс волновой функции (пространственно-временной)

