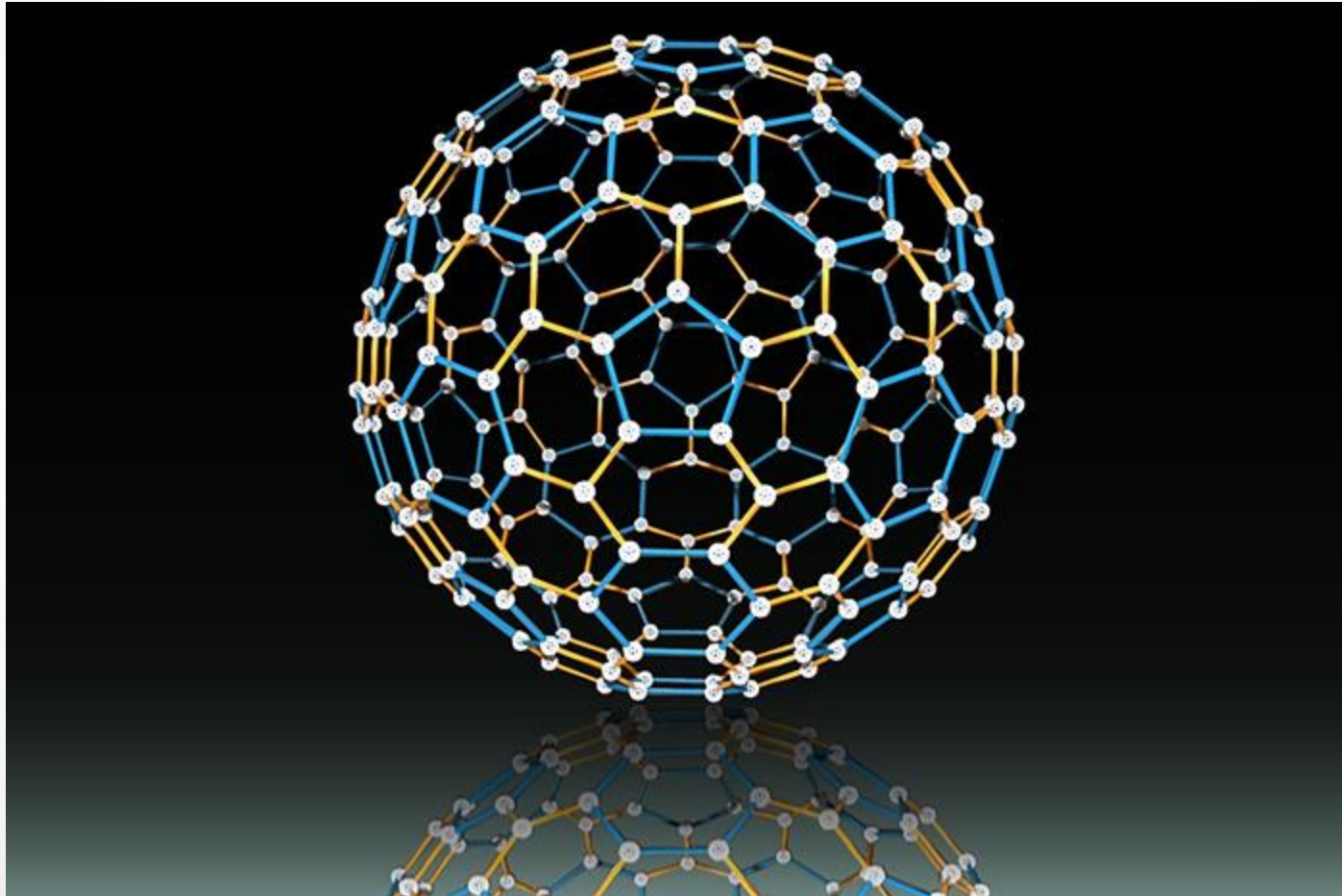




Волновые свойства частиц вещества

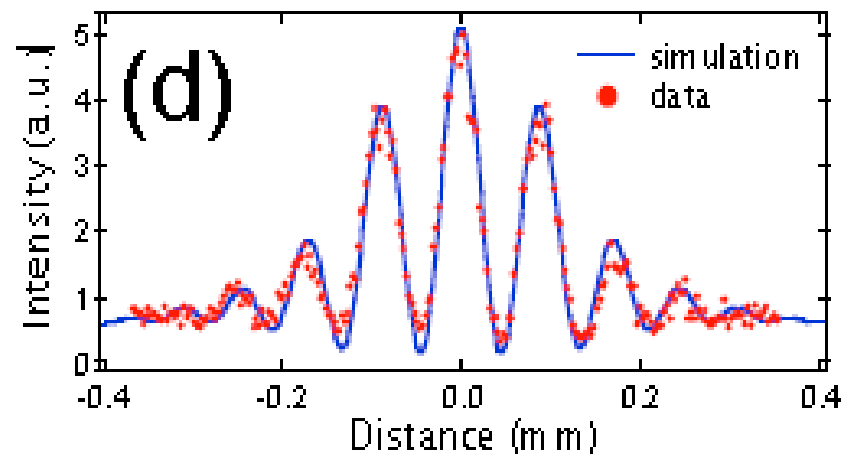
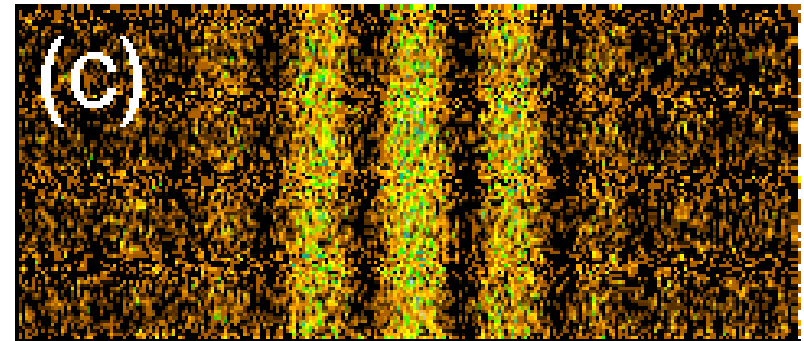
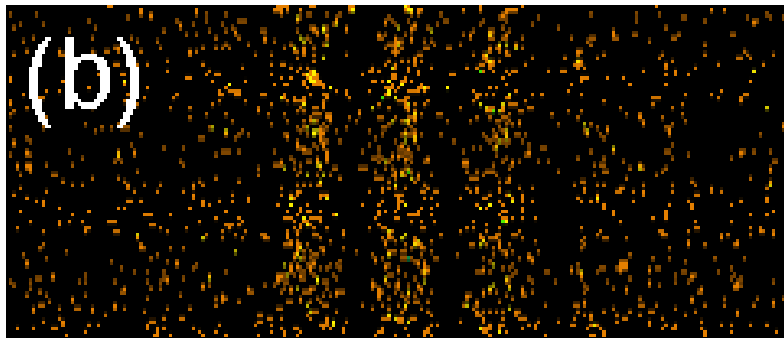
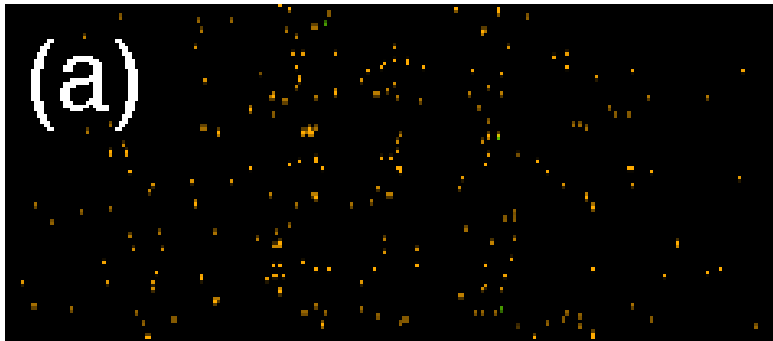


Вопросы

1. Корпускулярно-волновая двойственность света.
2. Гипотеза Луи де Бройля.
3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля.
4. Волновая функция.
5. Принцип неопределенности Гейзенберга.

1. Корпускулярно-волновая двойственность света

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



2. Гипотеза Луи де Бройля

«В оптике в течение столетия слишком пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым; не делалась ли в теории материи обратная ошибка?»

Не думали ли мы слишком много о картине "частиц" и не пренебрегали ли чрезмерно картиной волн?»

Частицы вещества должны
демонстрировать
волновые проявления!



Луи де Бройль

*(Луи Виктор Пьер Раймон,
7-й герцог Брольи)*

Нобелевская премия 1929 г

2. Гипотеза Луи де Бройля

Луи де Бройль проделал по отношению к частицам работу, обратную той, которую А.Эйнштейн провел для волн света: Эйнштейн связал электромагнитные волны с частицами света; де Бройль связал движение частиц вещества с распространением волн, которые он назвал волнами материи.

Корпускулярно-волновой дуализм является универсальным проявлением материи и характерен не только для фотонов, но и для других частиц.

Связь корпускулярных и волновых характеристик должна носить универсальный характер. Количественные соотношения, известные для фотонов, постулируются де Бройлем как фундаментальные для любых частиц материи:

$$E = h\nu , \quad p = h/\lambda .$$

2. Гипотеза Луи де Бройля

Гипотеза о наличие у частиц вещества *волновых свойств* не соответствовала традиционным представлениям классической физики.

Гипотеза Луи де Бройля требовала экспериментального подтверждения.

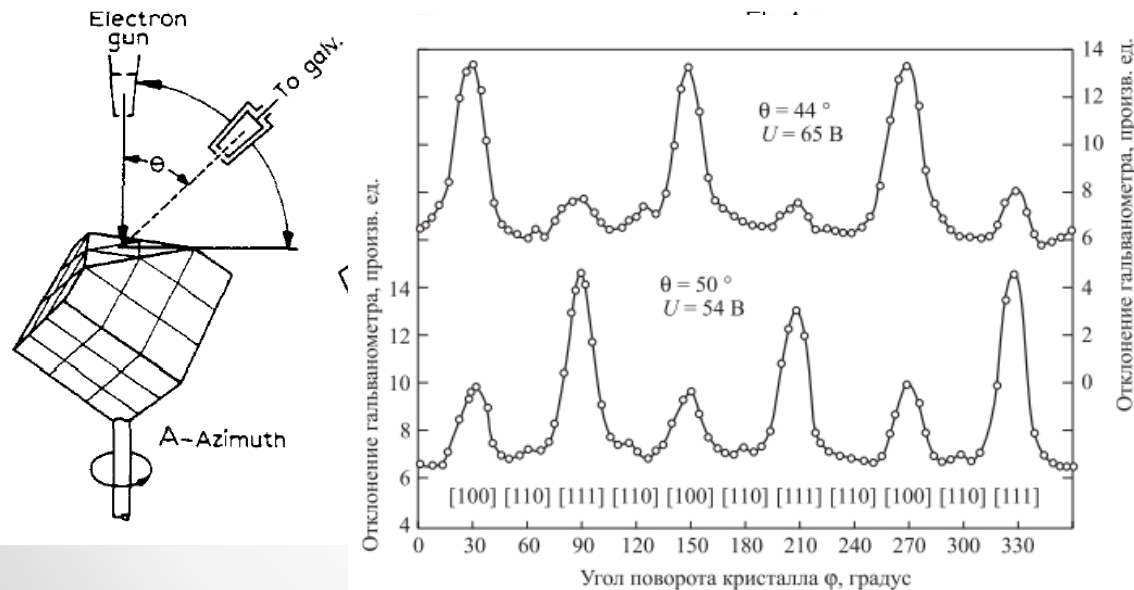
В экспериментах с частицами вещества должны обнаружиться проявления и закономерности, *характерные для волновых процессов*.

К ним относятся явления *интерференции и дифракции*. Волновые проявления должны касаться *отдельно взятых частиц*, а не быть коллективным эффектом!

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Эксперимент Девиссона и Джермера

В 1927 году К.Девиссон и Л.Джермер впервые наблюдали дифракцию электронов на кристалле никеля.



К. Девиссон (Нобелевская премия 1937 год) и Л. Джермер

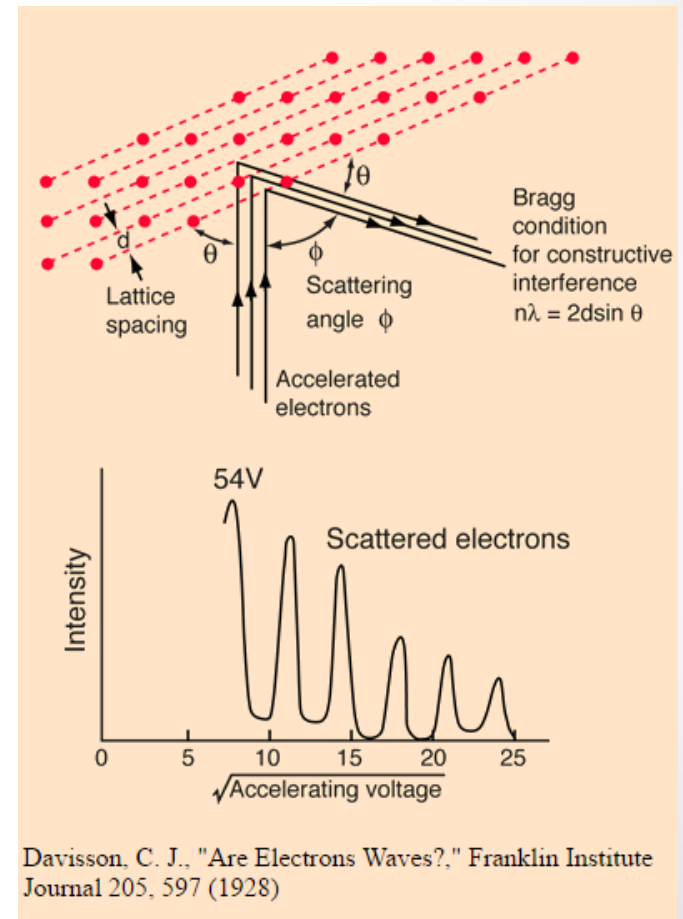
3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Электронный пучок, отраженный от монокристалла давал дифракционную картину, подобную картине дифракции рентгеновского излучения.

Угловые положения максимумов и минимумов зависели от ускоряющего напряжения.

Как и в случае рентгеновского излучения, кристалл сыграл для электронов роль естественной дифракционной решетки.

Значения длин волн, рассчитанных из условий дифракционных максимумов, согласуются с формулой де Бройля, связывающей длину волны с импульсом электронов!



3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

В 1928 году английский физик Дж.П. Томсон и советский физик П.С. Тартаковский получили новое подтверждение справедливости гипотезы де Бройля. В экспериментах наблюдалась дифракционная картина после прохождения пучка электронов через тонкую металлическую фольгу.

В 1930 году О. Штерн и И. Эстерман провели опыты по дифракции атомов гелия, неона, молекул водорода и дейтерия на кристаллах. В этих экспериментах был установлен факт, что *волновые свойства характерны не только для элементарных частиц, но проявляются у атомов и даже молекул.*

Открытым оставался вопрос о коллективном или индивидуальном характере волновых проявлений частиц!

В 1949 году советские физики Л. Биберман, Н. Сушкин и В. Фабрикант провели эксперименты по дифракции отдельных электронов.

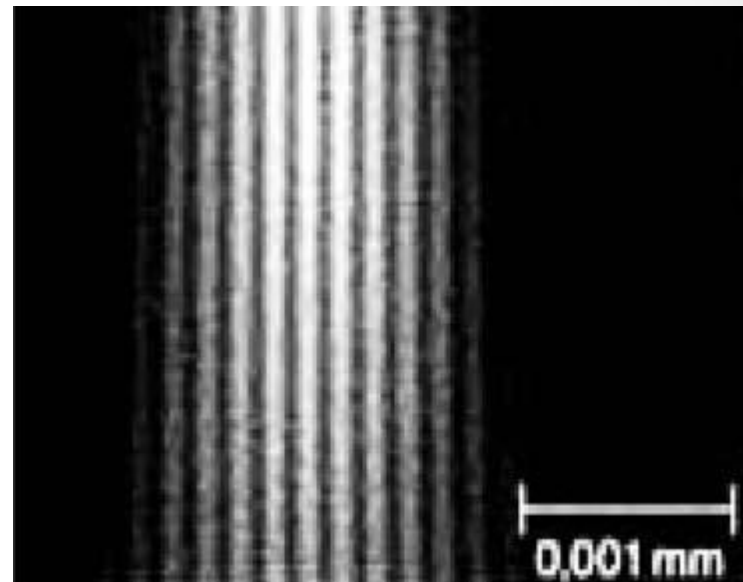
Эксперименты продемонстрировали, что волновые проявления не являются коллективным эффектом пучка частиц, а представляют собой индивидуальное свойство отдельных электронов.

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

**Эксперимент К. Йенсена (1961 г) –
аналог эксперимента Т. Юнга
со светом.**

Первый эксперимент по дифракции
электронов на двух щелях .

Дифракция электронов с $E=50$ кэВ
и дебройлевской дл. волны 5 пм
на двух щелях шириной 0,3 мкм.

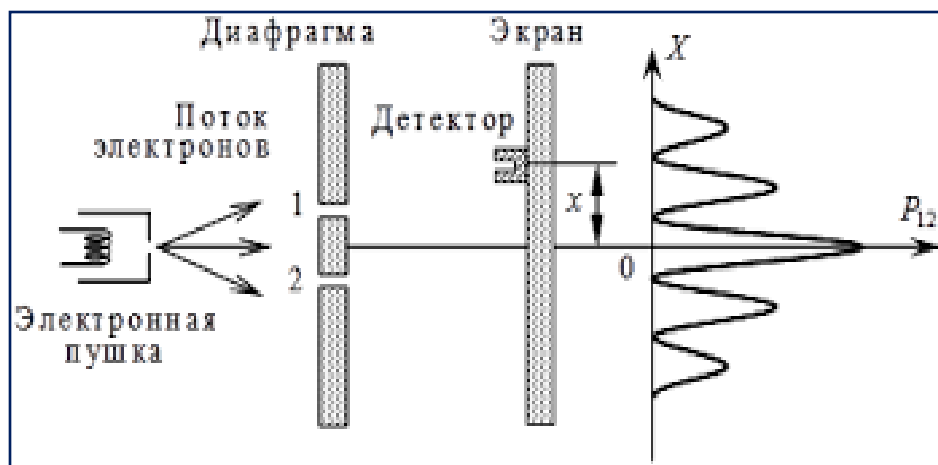


Jönsson C. Elektroneninterferenzen an mehreren kunstlich hergestellten Feinspalten // Zeitschrift für Physik. – 1961. – V.161 - P. 454-474. Reprinted in English as “Electron diffraction at multiple slits” // Am. J. Phys. – 1974. – V. 42. – P.4-11.

В опросе американских физиков, опубликованном в 2010 году, опыт К. Йенсена был назван первым в числе десяти наиболее красивых экспериментов в истории физики.

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Дифракция пучка электронов на двух щелях



На экране наблюдается распределение электронов в виде типичной дифракционной картины с чередующимися максимумами и минимумами.

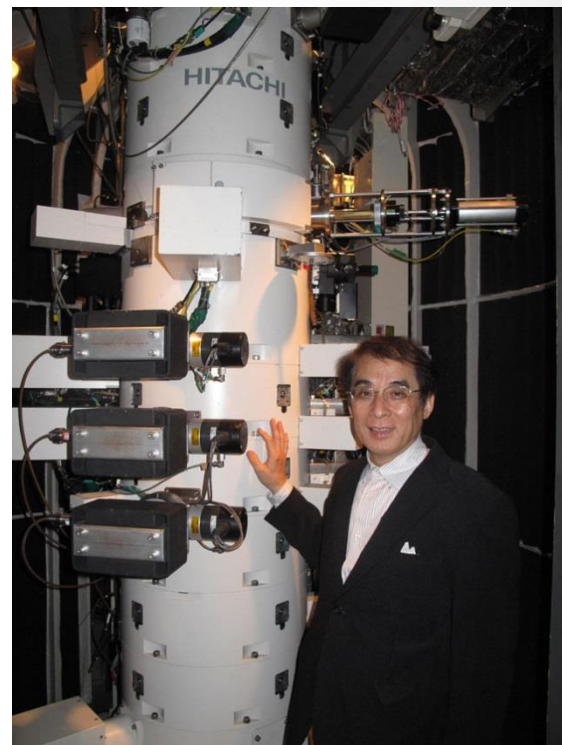
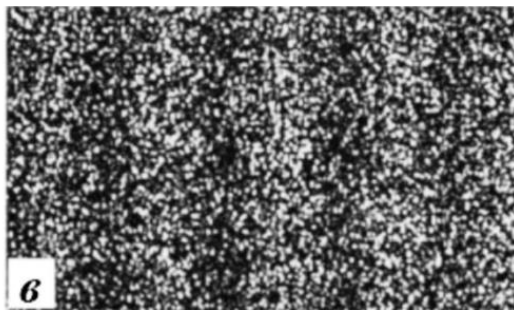
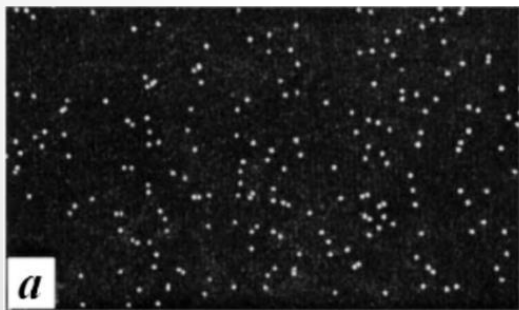
Полученное в эксперименте распределение хорошо описывается с помощью известного в оптике приближения **фраунгоферовой дифракции плоских волн** с использованием **формулы де Бройля, связывающей длину волны с импульсом электрона.**

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Эксперимент А.Тономуры

В 1989 году группа японских исследователей под руководством А.Тономуры опубликовала результаты экспериментов с дифракцией одиночных электронов на двух щелях.

Зарегистрирована динамика формирования дифракционной картины по мере увеличения числа дифрагированных электронов.



Акира Тономура

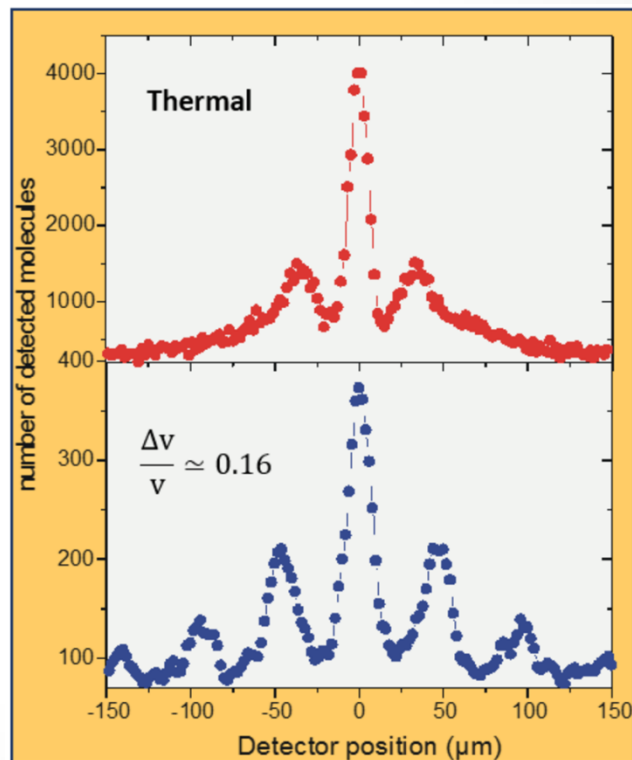
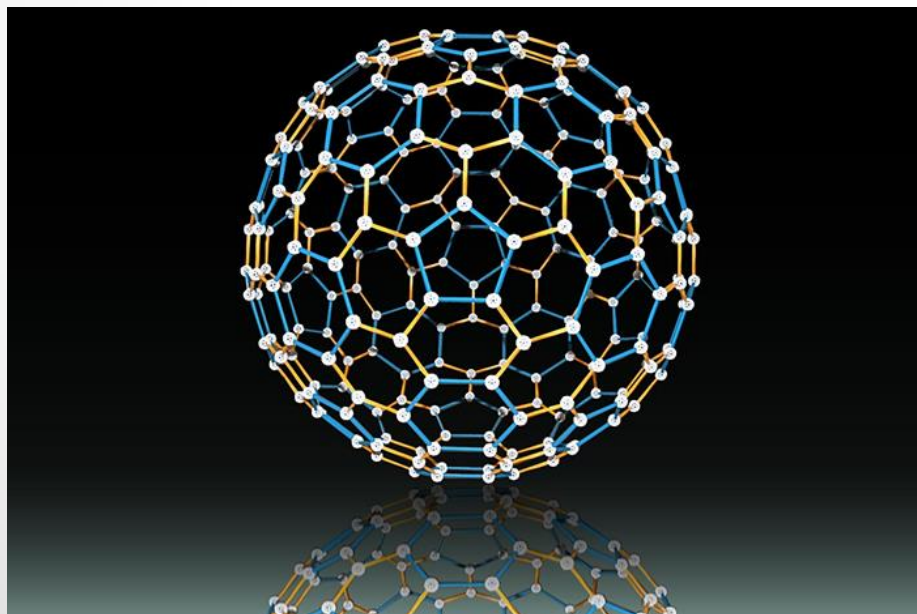
A.Tonomura et al., Am. J. Phys., Vol. 57, pp. 117-120 (1989).

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Эксперимент группы М.Арндта и А.Цайлингера

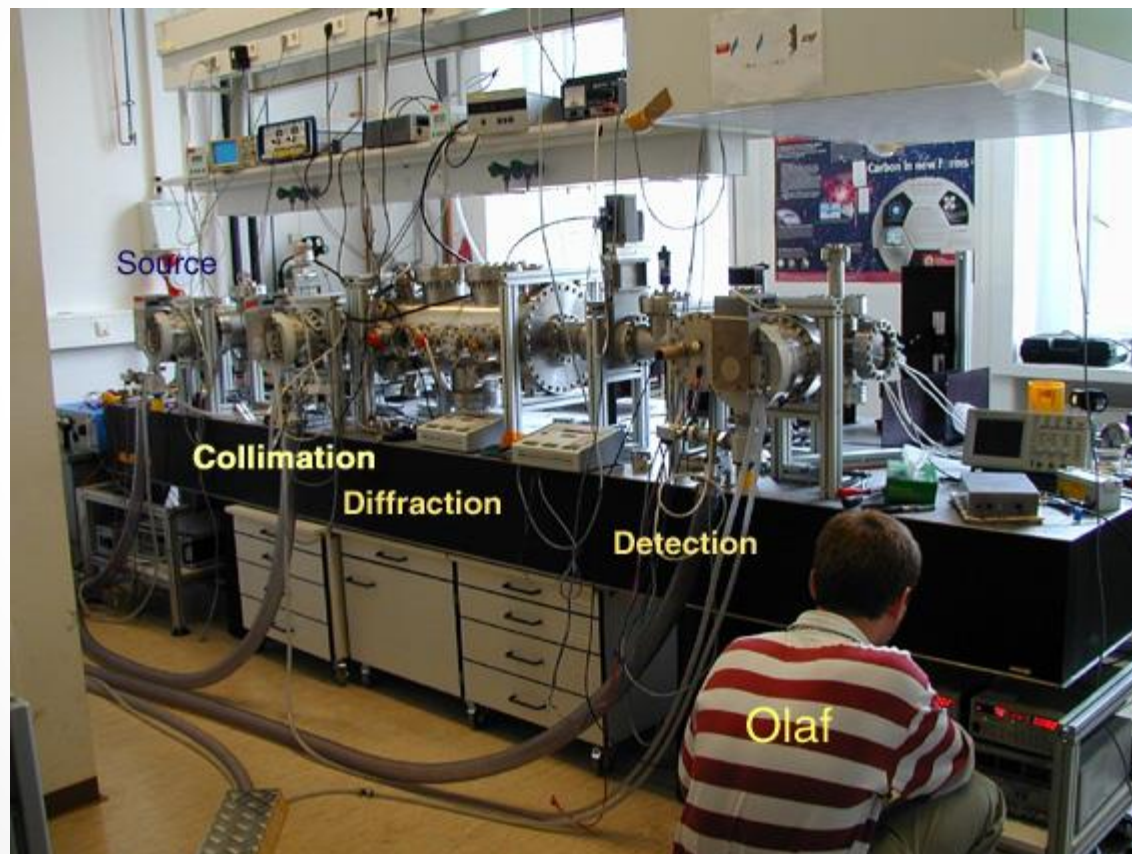
"Wave-particle duality of C_{60} "

Markus Arndt , Olaf Nairz, Julian Voss-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw, and Anton Zeilinger *Nature* 401, 680-682, 14.October 1999



3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Эксперимент группы М.Ардта и А.Цайлингера



3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля



Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. Физика квантовой информации М: Постмаркет. 2002

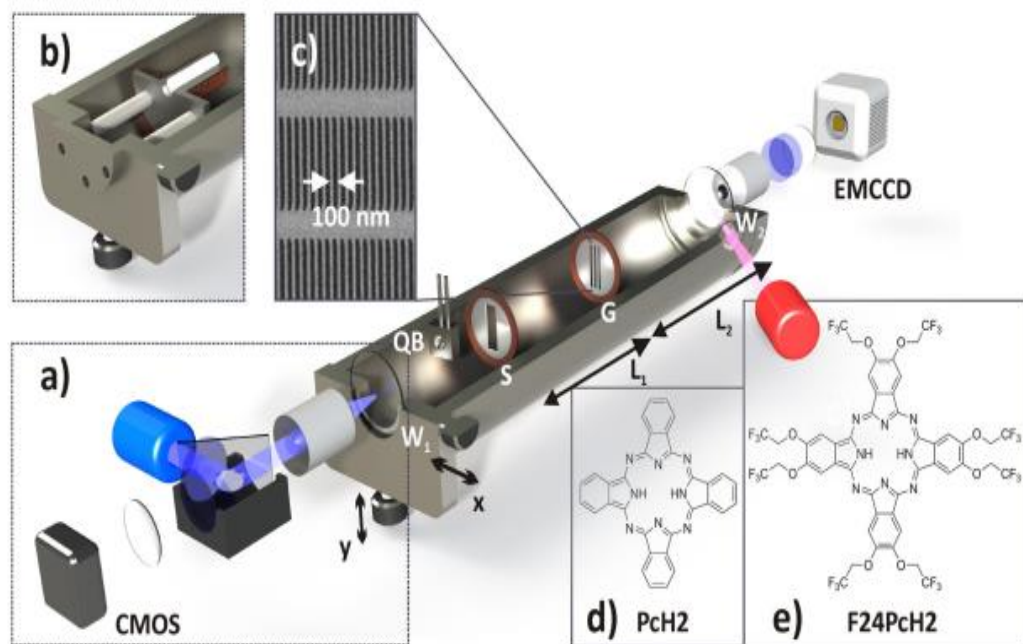
3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Эксперимент группы М.Арндта

В 2012 году группа европейских исследователей под руководством М.Арндта продемонстрировала результаты исследований по

дифракции тяжелых молекул органических флуоресцентных красителей:

$C_{32}H_{18}N_8$ и $C_{48}H_{26}F_{24}O_8$.



Juffmann T., Milic A., Mullneritsch M., Asenbaum P., Tsukernik A., Tuxen J., Mayor M., Cheshnovsky O., Arndt M. Real-time single-molecule imaging of quantum interference // Nature Nanotechnology. – 2012. – V.7, No7. - P.297-300.

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Эксперимент группы М.Ардта

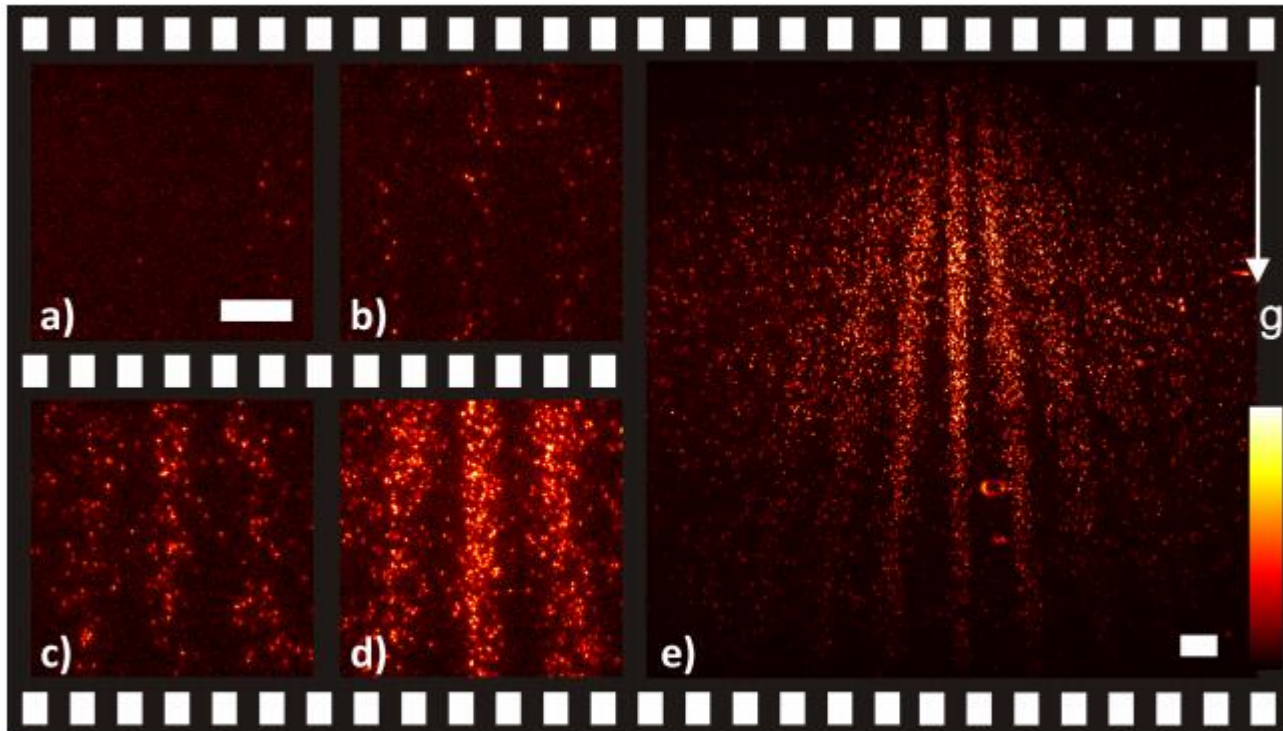


Figure 3: Selected frames of the quantum molecular movie

3. Экспериментальное подтверждение гипотезы Луи де Бройля

Эксперимент группы М.Ардта

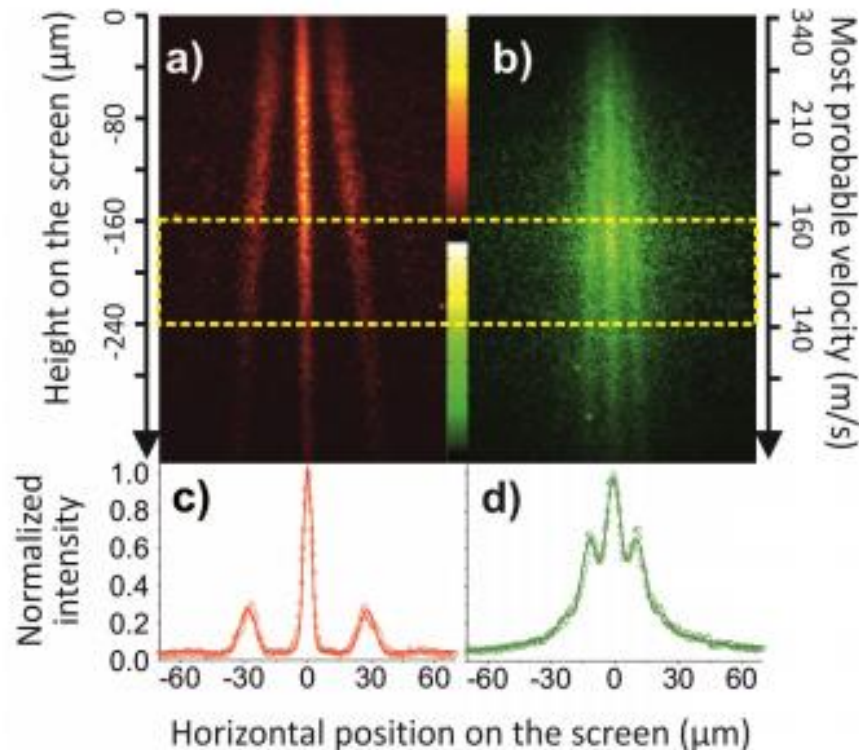
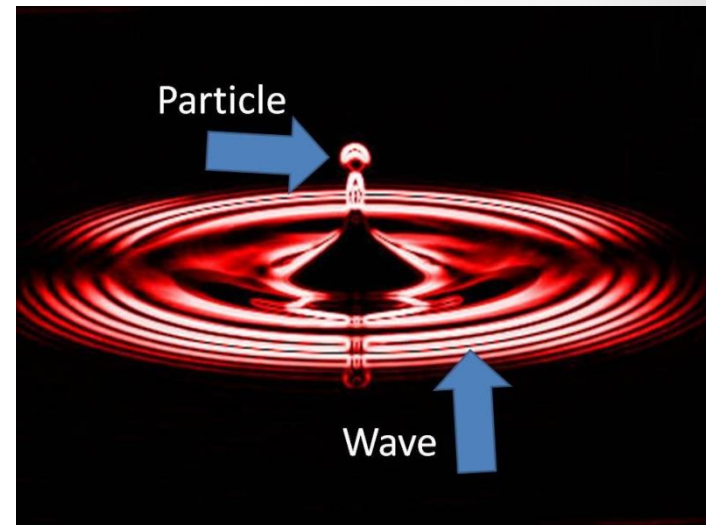


Figure 4: Comparison of the interference patterns of Pch2 and F24Pch2

4. Волновая функция

Гипотеза Луи де Бройля получила экспериментальное подтверждение.

Объекты, которые описывали как частицы(корпускулы), демонстрируют волновые свойства!



Это экспериментальный факт!

Корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) является универсальным проявлением материи!

Современная трактовка дуализма : «Можно сказать, что для атомного объекта существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от внешних условий, либо как волна, либо как частица, либо промежуточным образом. Именно в этой потенциальной возможности различных проявлений свойств, присущих микрообъекту, и состоит дуализм волна - частица. Всякое иное, более буквальное, понимание этого дуализма в виде какой-нибудь модели неправильно». Академик В.А. Фок

4. Волновая функция

Волновые свойства частицы описываются с помощью волновой функции.

Например, для свободно движущейся частицы (см. опыт Девиссона и Джермера) можно использовать уравнение плоской волны:

$$\Psi = \Psi_0 \cos(\omega t - kx),$$

где ω и k определяются энергией и импульсом частицы:

$$E = \hbar\omega, p = \hbar k.$$

Вероятностная интерпретация волновой функции (М.Борн):

$$dP = \Psi \cdot \Psi^* dV = \Psi^2 dV$$

Плотность распределения вероятности: $\Psi^2 = \frac{dP}{dV}$

$$\iiint_V \Psi^2 dV = 1$$

4. Волновая функция

Согласно статистической интерпретации М.Борна, квадрат волновой функции (произведение функции на комплексно сопряженную) позволяет определить вероятность dP нахождения частицы в малом объеме пространства dV :

$$dP = \Psi\Psi^* dV .$$

В данной интерпретации $\Psi\Psi^*$ является функцией плотности пространственного распределения вероятности.

Вероятность P нахождения частицы в произвольном объеме V пространства определяется интегрированием функции плотности по данному объему:

$$P = \iiint \Psi\Psi^* dV .$$

Интегрирование по всему доступному для частицы объёму пространства приводит к очевидному условию (условие нормировки волновой функции):

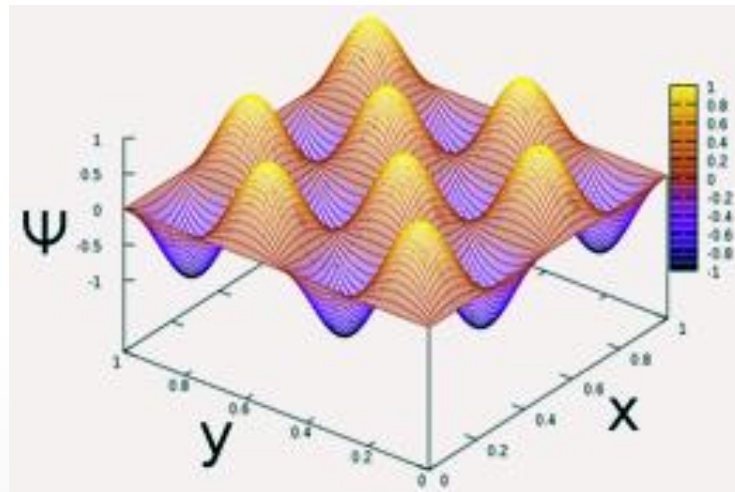
$$P = \iiint \Psi\Psi^* dV = 1.$$

4. Волновая функция

Пришли к принципиально новому подходу для описания механического движения частиц – квантовой механике!

В классической механике: определение траектории движения частицы.

В квантовой механике: определение волновой функции и распределения вероятности нахождения частицы в различных областях пространства.



5. Принцип неопределенности Гейзенберга

В классической механике состояние движения материальной точки (модель тела!) в любой момент времени определено однозначно и одновременно характеризуется точными значениями координат и проекций импульса на координатные оси. Поэтому для материальной точки однозначно определяется траектория движения.

В квантовой механике для частиц существуют **принципиальные ограничения** на одновременное определение точных значений некоторых пар физических величин - сопряжённых переменных.

В качестве сопряженных, например, выступают значения координаты частицы и проекции её импульса на данное направление.



Вернер Гейзенберг
(1901-1976)

**Нобелевская премия
1932 г**

5. Принцип неопределенности Гейзенберга

Соотношение неопределенностей «координата-импульс»

Формула де Бройля $p = \frac{h}{\lambda}$

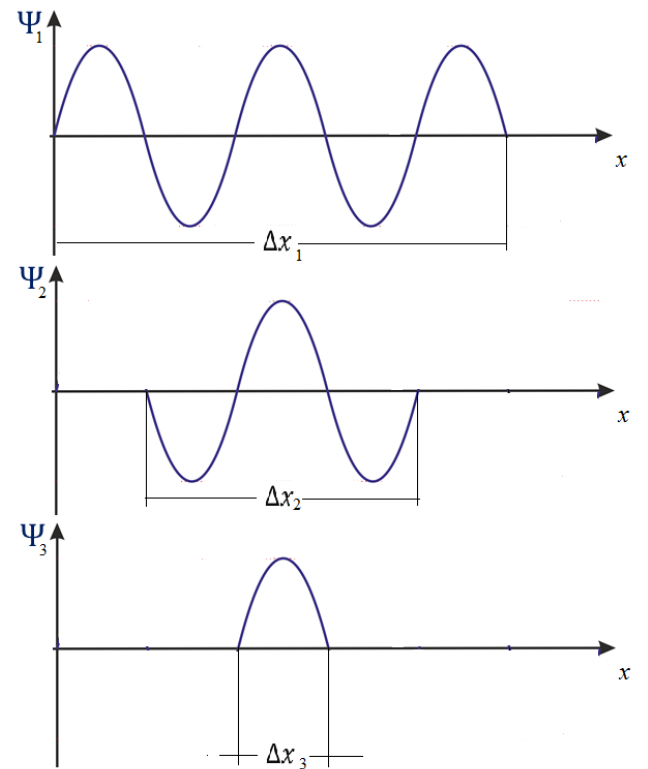
Чем меньше неопределенность координаты Δx , тем больше неопределенность проекции импульса Δp_x .

Определяем: $\Delta x = n\lambda$, $\frac{\Delta p_x}{p_x} = \frac{\Delta \lambda_x}{\lambda_x} = \frac{1}{n}$

Тогда $\Delta x \Delta p_x = h \Rightarrow \Delta x \Delta p_x \geq h$

“Более точно”:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$



5. Принцип неопределенности Гейзенберга

Для любого выделенного направления в пространстве нельзя характеризовать состояние движения частицы точными значениями проекции импульса ($\Delta p_x = 0$) и координаты ($\Delta x = 0$) одновременно.

Для выделенного направления в пространстве чем точнее определяется координата частицы, тем менее точно определяется значение проекции импульса частицы и наоборот.

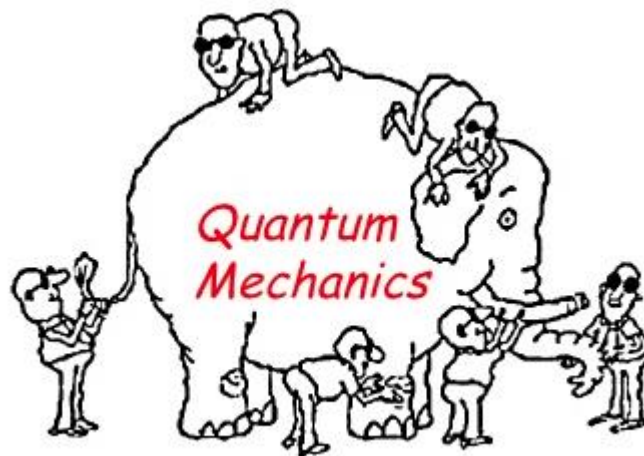
В квантовомеханическом описании движения частиц невозможно строго говорить о траекториях в отличие от классического описания движения материальных точек.

5. Принцип неопределенности Гейзенберга

Наряду с координатой и проекцией импульса существуют еще пары физических величин, которые не могут одновременно иметь точные значения. Для них также выполняются соотношения неопределенностей. Из этих соотношений наиболее важное значение имеет соотношение неопределенностей, связывающее неопределенность энергии ΔE и неопределенность времени Δt :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}.$$

По одной из интерпретаций: ΔE – неопределенность энергии состояния частицы, Δt – время пребывания частицы в этом состоянии.



Спасибо за внимание!