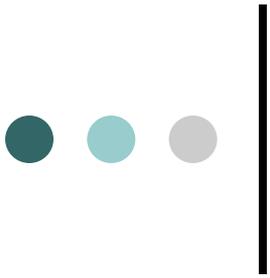


Квантовая физика

Лекция 13

Лектор: к.т.н., доц. Якимов А.Н.



Часть 1.

Физические основы квантовой теории

План:

1. Зарождение квантовой физики.
2. Корпускулярные свойства электромагнитного излучения (фотоэффект, опыт Боте, эффект Комптона)
3. Корпускулярно волновой дуализм.

1. Зарождение квантовой физики



Макс Планк (1858-1947) –
один из основателей
квантовой физики

Трудности классической электродинамики в конце XIX века:

- стабильность орбит электронов
- дискретные спектры атомов
- построение теории излучения абсолютно черного тела;
- объяснение экспериментов по фотоэффекту

Гипотеза Планка (1900):

Свет излучается и поглощается не непрерывно, а порциями - квантами. Энергия каждого кванта зависит от частоты.

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

- постоянная Планка

$$E = h\nu$$

- формула Планка

2. Корпускулярные свойства электромагнитного излучения, фотоэлектрический эффект



Генрих Герц
(1857-1894)

Фотоэлектрический эффект (фотоэффект) – явление вырывания электронов из вещества под действием света.

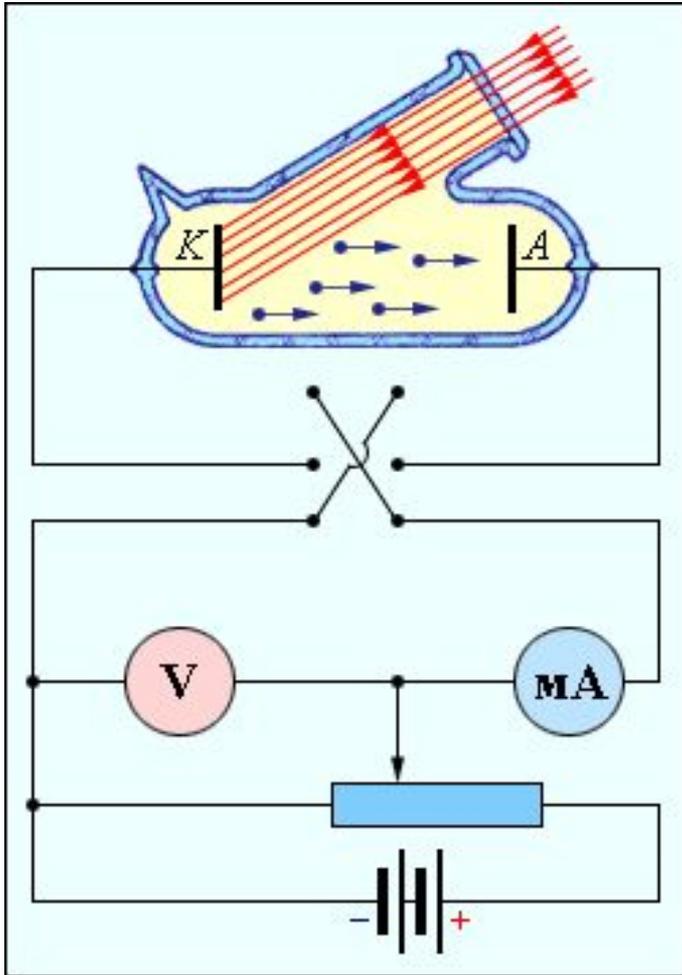
Фотоэффект открыт в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем.



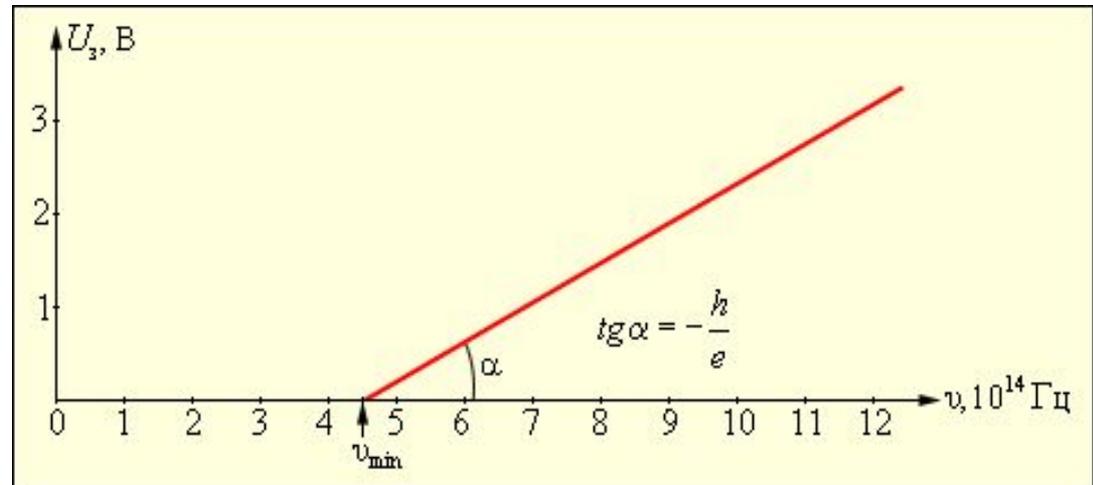
Александр Григорьевич Столетов
(1839-1896)

Детальное изучение явления фотоэффекта проведено в 1888-1889 гг. русским физиком А.Г. Столетовым и в 1900 г. Ф. Ленардом

Законь фотоэффекта



1. Фототок насыщения пропорционален интенсивности падающего света: $I_n \sim I_{св}$
2. Для каждого вещества существует минимальная частота света, при которой вырывание еще происходит (т.е. существует красная граница фотоэффекта): $\lambda < \lambda_{кр} \quad (\nu > \nu_{кр})$
3. Максимальна кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты света и не зависит от его интенсивности: $E_k \sim \nu, \quad E_k \neq E_k(I_{св})$



Квантовая теория фотоэффекта



Альберт
Эйнштейн
(1879-1955)

Объяснение фотоэффекта на основе представлений о квантах дано А. Эйнштейном в 1905 г.

(Нобелевская премия по физике 1921 г. «за заслуги перед теоретической физикой, и особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта»)

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}$$

Основное уравнение
фотоэффекта

$A_{\text{вых}}$ - работа выхода – энергия, которую должен затратить электрон, чтобы выйти из вещества

$$eU_3 = \frac{mV^2}{2} \quad eU_3 = h\nu - A_{\text{вых}} \quad \Longrightarrow \quad U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e}$$

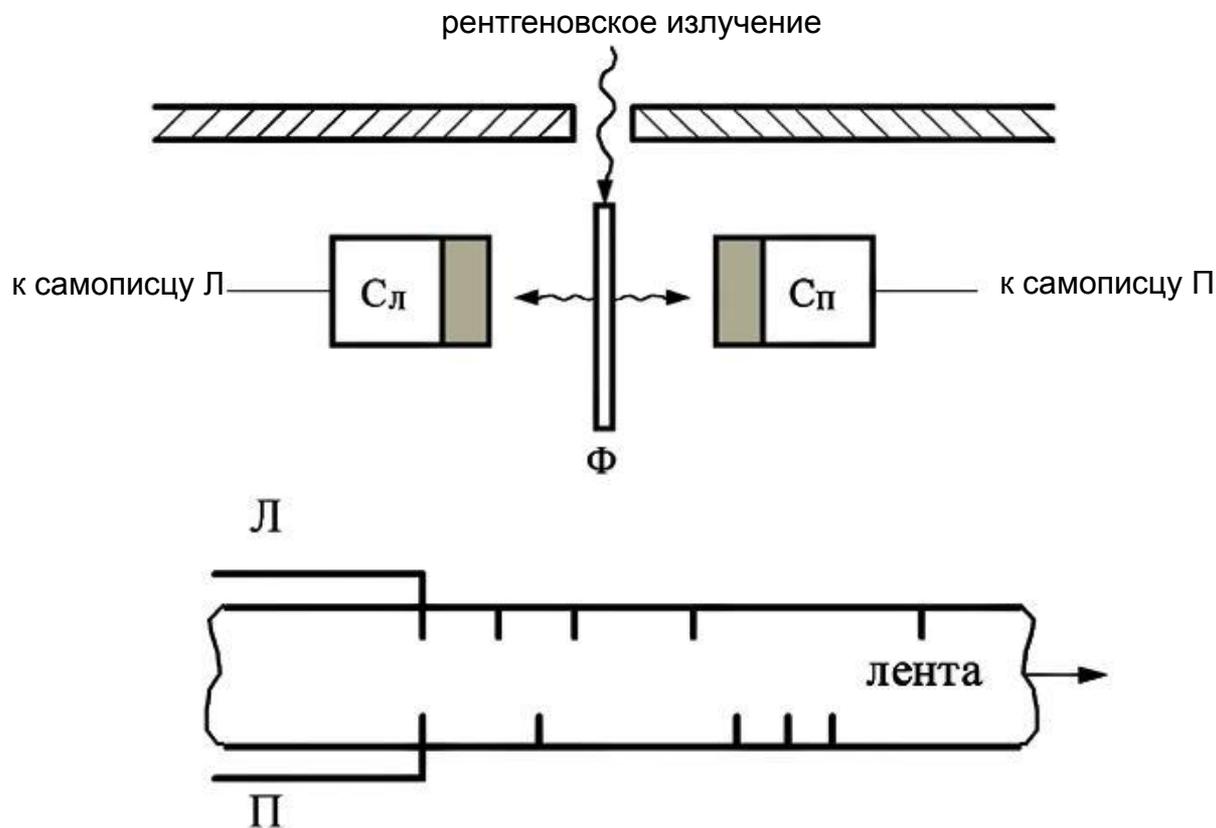
Опыт Боте



Вальтер Боте
(1891-1957)

Одним из подтверждений гипотезы Планка является опыт Боте (1925 г.)

(Нобелевская премия по физике 1954 г. «За метод совпадений и сделанные в связи с этим открытия»)



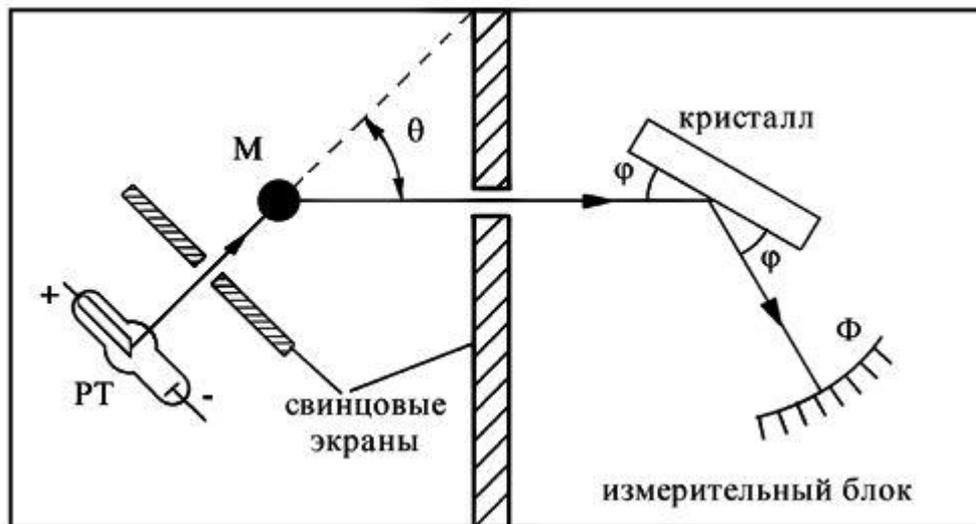
Эффект Комптона

Столкновение квантов света – фотонов с электронами приводит к эффекту Комптона (1923 г.)

(Нобелевская премия по физике 1927 г. «За открытие эффекта изменения длины волны фотона при рассеянии на электроне»)



Артур Комптон
(1892-1962)

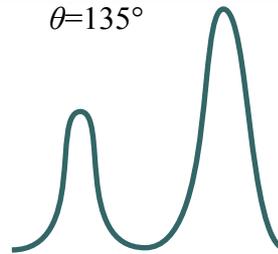
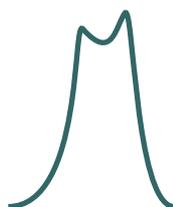
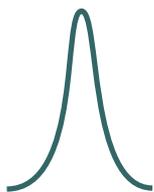


$\theta=0^\circ$

$\theta=45^\circ$

$\theta=90^\circ$

$\theta=135^\circ$



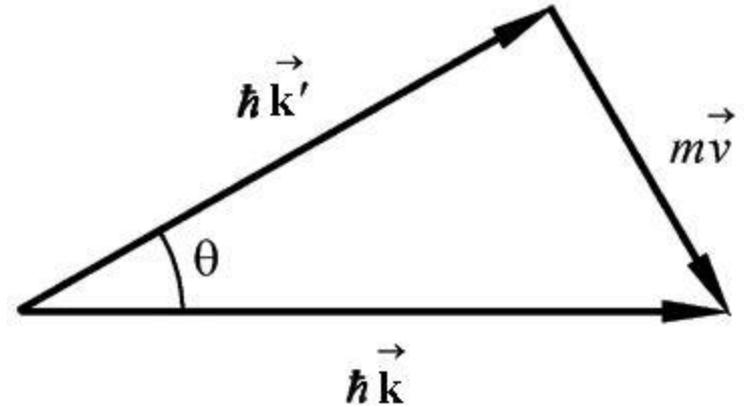
Эффект Комптона

Эффект Комптона объясняется рассеянием квантов света на свободных электронах вещества



Закон сохранения энергии

$$\hbar \frac{2\pi c}{\lambda} + m_e c^2 = \hbar \frac{2\pi c}{\lambda'} + E_e$$



Закон сохранения импульса

$$\hbar \vec{k} = \hbar \vec{k}' + m\vec{v} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 4 \cdot 10^{-13} \text{ м}$$

КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ ЭЛЕКТРОНА

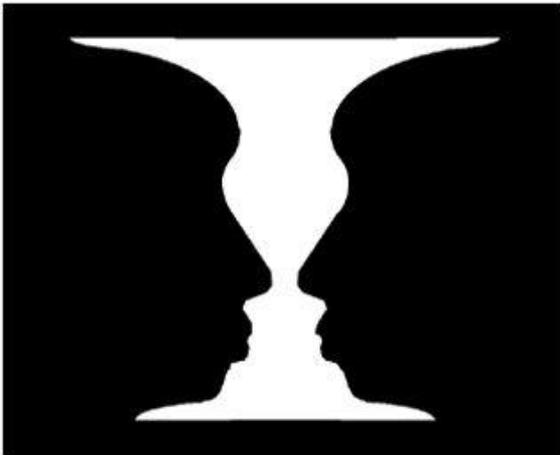
Закон изменения длины волны при комптон-эффекте

3. Корпускулярно-волновой дуализм

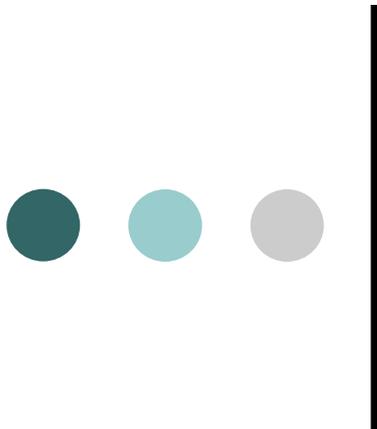
Что такое свет? Какова его физическая природа?

Электромагнитное излучение есть материальный объект, обладающий как волновыми, так и корпускулярными свойствами. В различных физических процессах эти свойства могут проявляться в различной степени. При определенных условиях, то есть в ряде оптических явлений (интерференция, дифракция, дисперсия) свет проявляет свои **волновые свойства**. В этих случаях мы должны рассматривать свет как электромагнитные волны. В других оптических явлениях (фотоэффект, эффект Комптона, фотохимические реакции) свет проявляет свои **корпускулярные свойства**, и тогда его следует представлять как поток фотонов.

Существуют оптические явления, которые могут быть объяснены качественно и количественно как волновой, так и корпускулярной теорией. Тем не менее, обе эти теории приводят к одинаковым результатам, что не объясняется тем, что любая модель, и волновая, и корпускулярная, предполагает наличие у света таких материальных свойств, как масса, импульс.



Один рисунок – два изображения
(дуализм)



Часть 2.

Волны де Бройля.

Соотношение неопределенностей.

План:

1. Гипотеза де Бройля.
2. Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля. Опыты Девиссона-Джермера и Дж. Томсона.
3. Понятие волновой функции.
4. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Гипотеза де Бройля

Гипотеза де Бройля (1924):

каждая материальная частица обладает волновыми свойствами, причем соотношения, связывающие волновые и корпускулярные характеристики частицы остаются такими же, как и в случае электромагнитного излучения.



Луи де Бройль
(1892-1987)

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \text{Связь частоты и энергии}$$

$$k = \frac{p}{\hbar} \quad \text{Связь волнового числа и импульса}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Длина волны де Бройля

Длина волны де Бройля для электрона, прошедшего разность потенциалов U

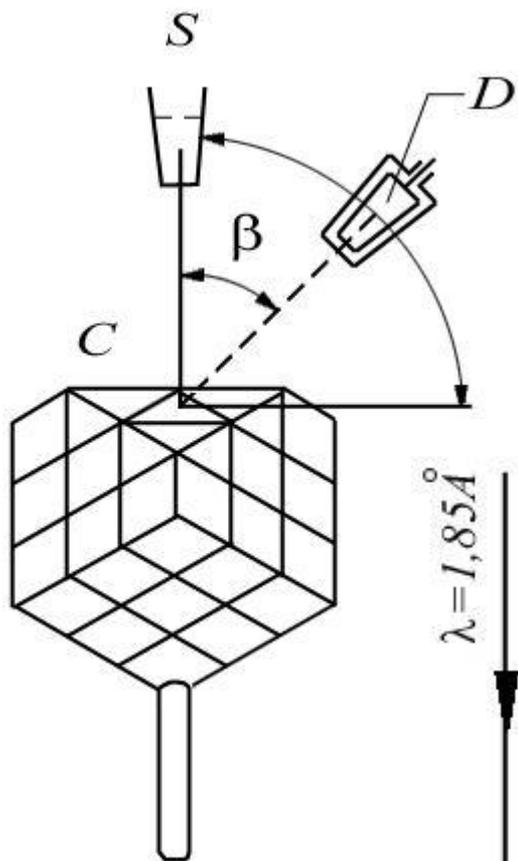
$$\lambda_B = \frac{h}{p}$$

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}}$$

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

Подтверждение гипотезы де Бройля

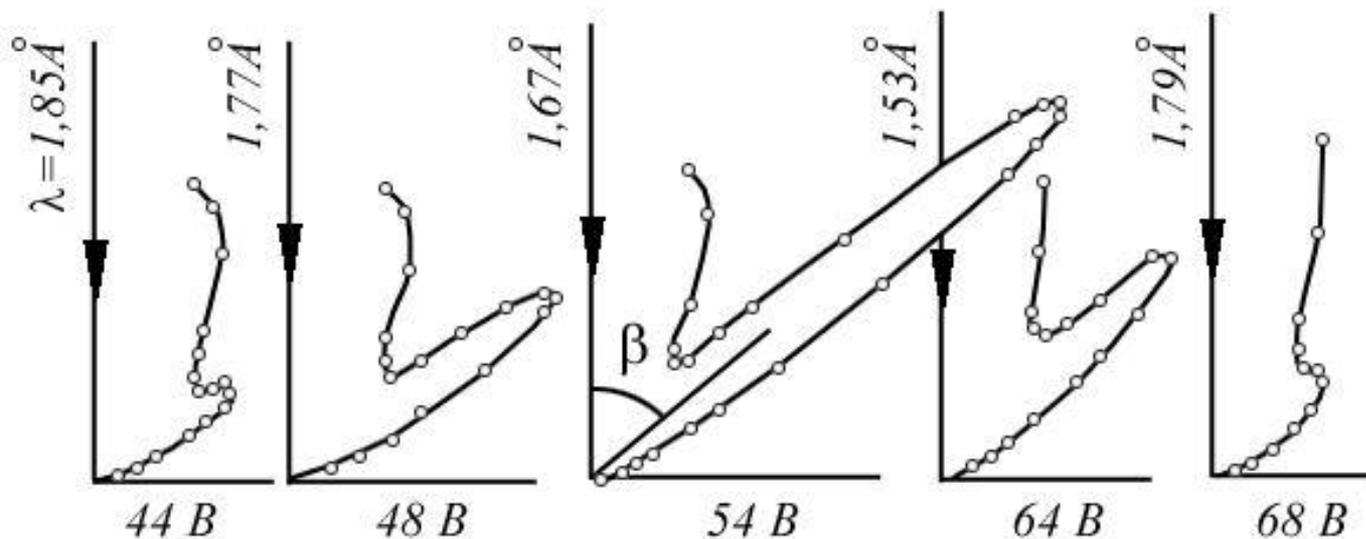
Опыт Девиссона и Джермера (1927) – дифракция электронов при их рассеянии на кристалле.



S – электронная пушка

D – детектор электронов

C – шлифованная поверхность кристалла никеля





ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

- прибор, который позволяет получать сильно увеличенное изображение объектов, используя для их освещения электроны. Электронный микроскоп (ЭМ) дает возможность видеть детали, слишком мелкие, чтобы их мог разрешить световой (оптический) микроскоп. ЭМ – один из важнейших приборов для фундаментальных научных исследований строения вещества, особенно в таких областях науки, как биология и физика твердого тела.
- Существуют три основных вида ЭМ. В 1930-х годах был изобретен обычный просвечивающий электронный микроскоп (ОПЭМ), в 1950-х годах – растровый (сканирующий) электронный микроскоп (РЭМ), а в 1980-х годах – растровый туннельный микроскоп (РТМ). Эти три вида микроскопов дополняют друг друга в исследованиях структур и материалов разных типов.

ОБЫЧНЫЙ ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП



● ● ● | **ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ
МИКРОСКОП SEO TEM 100 kV**

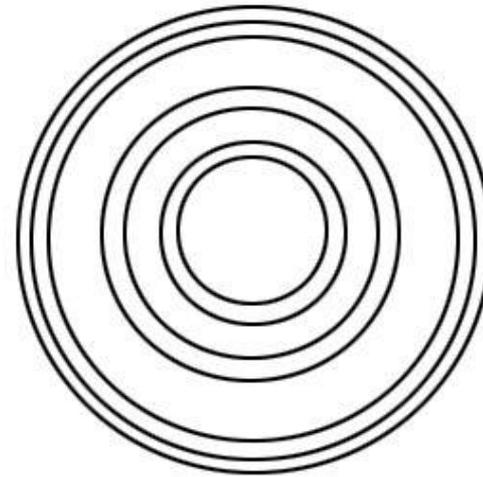
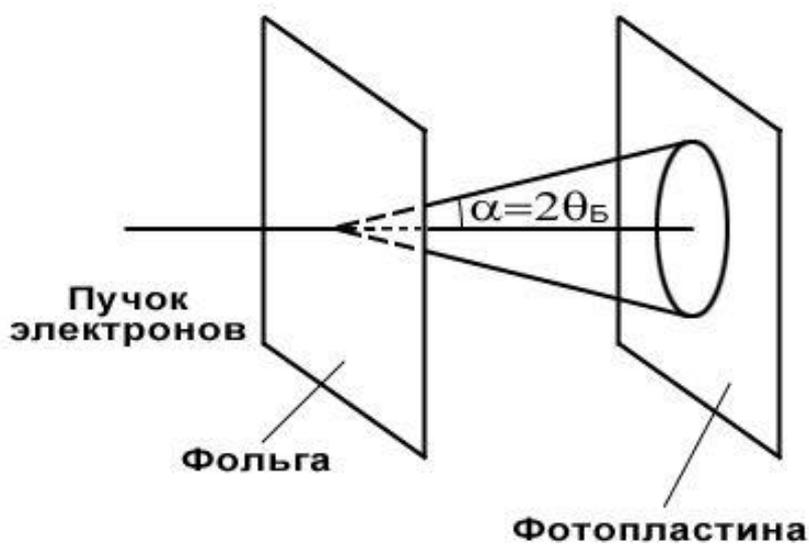


Просвечивающие электронные микроскопы Technai 12

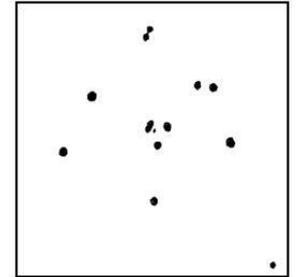


Подтверждение гипотезы де Бройля

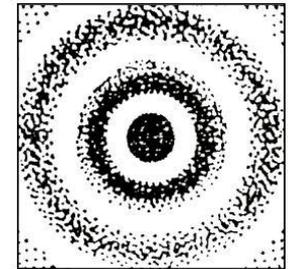
Опыт Дж. Томсона (1927) – дифракция электронов при их прохождении через кристалл.



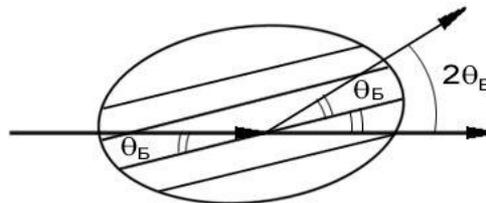
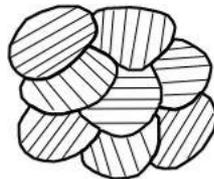
Пучок высокой интенсивности (Томсон)



Пучок низкой интенсивности (Фабрикант)



Характер дифракции в поликристалле



Понятие волновой функции

Волна, распространяющаяся вдоль оси x , может быть представлена в комплексной форме (A – амплитуда волны).

$$\xi(x,t) = A \exp[-i(\omega t - kx)],$$

$$\Psi(x,t) = A \exp\left[-\frac{i}{\hbar}(Et - px)\right],$$

Волна де Бройля

Найдем групповую скорость волны де Бройля

$$v_{gp} = \frac{d\omega}{dk} \quad v_{gp} = \frac{d(\hbar\omega)}{d(\hbar k)} = \frac{dE}{dp} \quad E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$2EdE = 2pc^2 dp \quad \Rightarrow \quad \frac{dE}{dp} = \frac{pc^2}{E} \quad v_{gp} = \frac{pc^2}{E} = \frac{pc^2}{mc^2} = \frac{p}{m}$$

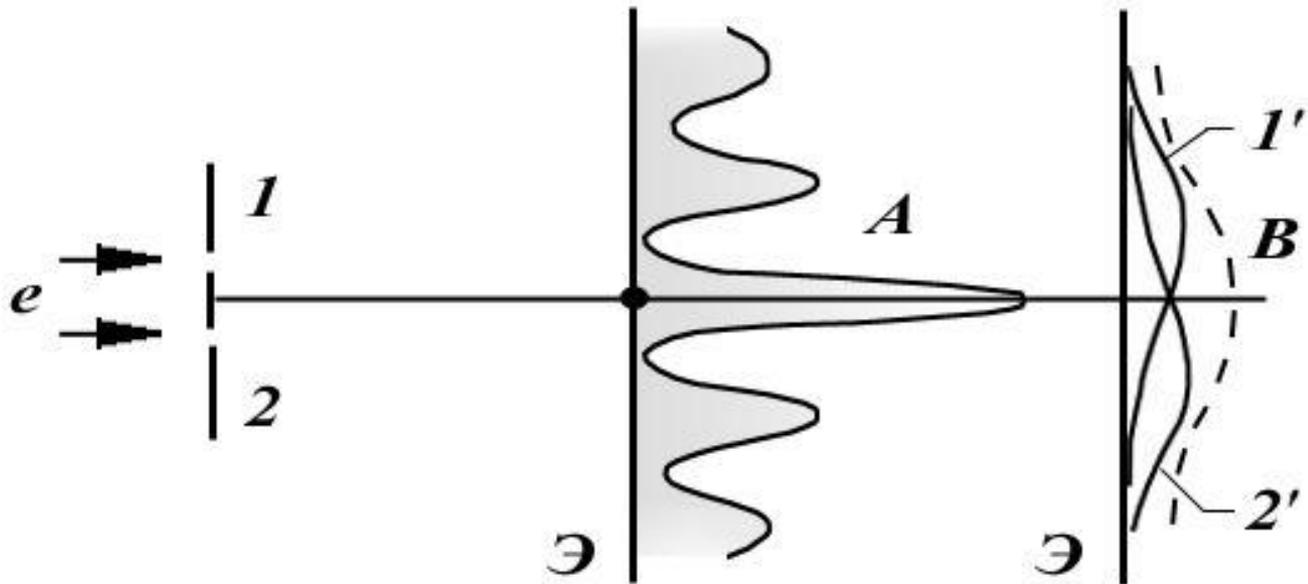
$v_{gp} = v$ групповая скорость волны де Бройля равна скорости частицы

Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Мысленный эксперимент по дифракции электронов на двух щелях



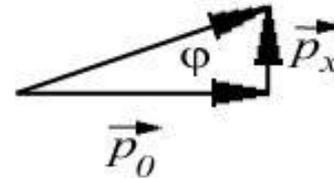
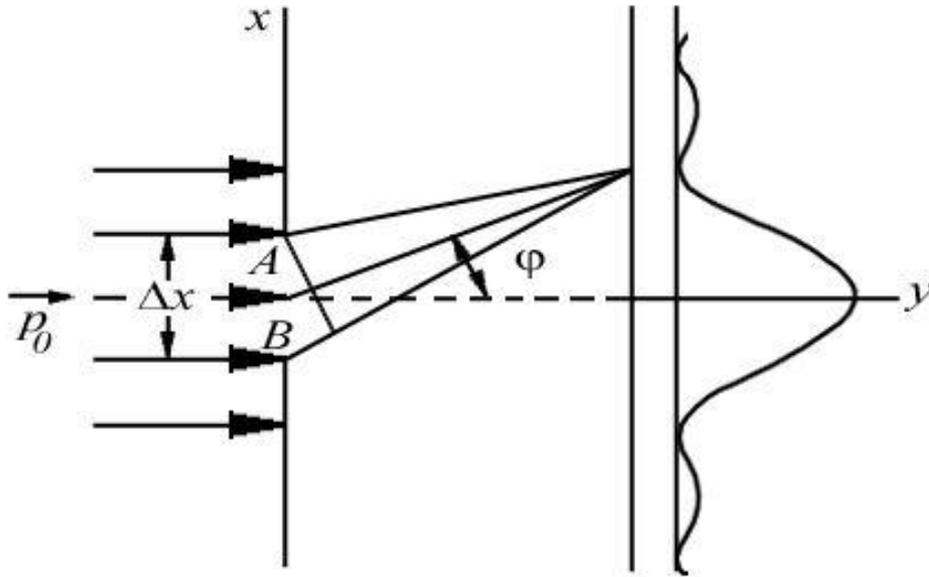
Вернер Карл
Гейзенберг
(1901-1976)



Для микрочастиц (в т.ч. электронов) неприменимо понятие траектории. Согласно квантовым представлениям микрочастица в силу своих волновых может быть обнаружена в один и тот же момент времени в разных точках пространства.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Рассмотрим эксперимент по дифракции электронов на щели



$$\Delta x \sin \varphi_1 = \lambda_B$$

При малом угле ϕ

$$\sin \varphi_1 \approx \operatorname{tg} \varphi_1$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{p_x}{p_0}$$

$$\Delta p_x \approx p_x \quad \operatorname{tg} \varphi_1 \approx \frac{\Delta p_x}{p_0}$$

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = \lambda_B p_0$$

$$\lambda_B = \frac{h}{p_0}$$

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$$



Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Строгие выражения для соотношений неопределенности

$$\begin{cases} \Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2} \\ \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{h}{2} \\ \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{h}{2} \end{cases}$$

Согласно соотношению неопределенностей в природе не существует состояния частицы с точно определенными значениями координаты и проекции импульса на эту координатную ось. В квантовой механике соотношение неопределенностей имеет фундаментальное значение. Оно позволяет получать важные физические результаты, а также проводить численные оценки, не прибегая к точному, иногда достаточно трудоемкому, решению квантово-механической задачи.

$$\Delta v_x \geq \frac{h}{2m\Delta x}$$

Пылинка размером 1 мкм и массой 1 мкг $\Delta v_x \sim 10^{-22} \text{ м/с}$

Электрон в атоме (0,1 нм)

$$\Delta v_x \sim 10^6 \text{ м/с}$$



Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Соотношение неопределенностей для энергии и времени

Рассмотрим фотон

$$x = c \cdot t$$

$$\Delta x = c \cdot \Delta t$$

$$E = c \cdot p$$

$$\Delta E = c \cdot \Delta p$$

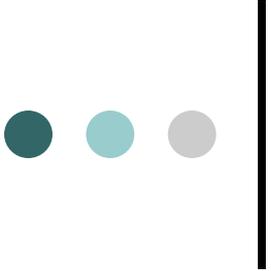
$$\Delta E \cdot \Delta t \sim h$$

Смысл соотношения неопределенностей для энергии и времени:

1. Если система находится в стационарном состоянии, то её энергию нельзя измерить с точностью большей, чем

$$\Delta E = \frac{h}{2\Delta t} \quad \Delta t - \text{длительность процесса измерения}$$

2. Если система находится в нестационарном состоянии, то ΔE имеет смысл неопределенности в энергии (ширина энергетического уровня), а Δt – время жизни в этом состоянии.



Выводы:

1. Микрообъекты обладают свойствами волн и свойствами частиц одновременно и поэтому не являются ни волнами не частицами в классическом смысле слова.
2. Состояния частиц описываются волновыми функциями. Квадрат модуля волновой функции определяет вероятность нахождения частицы в данной точке пространства.
3. К микрочастицам не применимо понятие траектории в классическом смысле слова.
4. Невозможно точно определить координату и соответствующую проекцию импульса частицы. Минимальная неопределенность в этих значениях определяется соотношениями Гейзенберга.
5. Отличительной особенностью микромира является новое понимание опыта. Провести опыт над микрочастицей – значит изменить состояние частиц, подвергшихся исследованию. Волновые функции частиц в ходе опыта изменяются.