

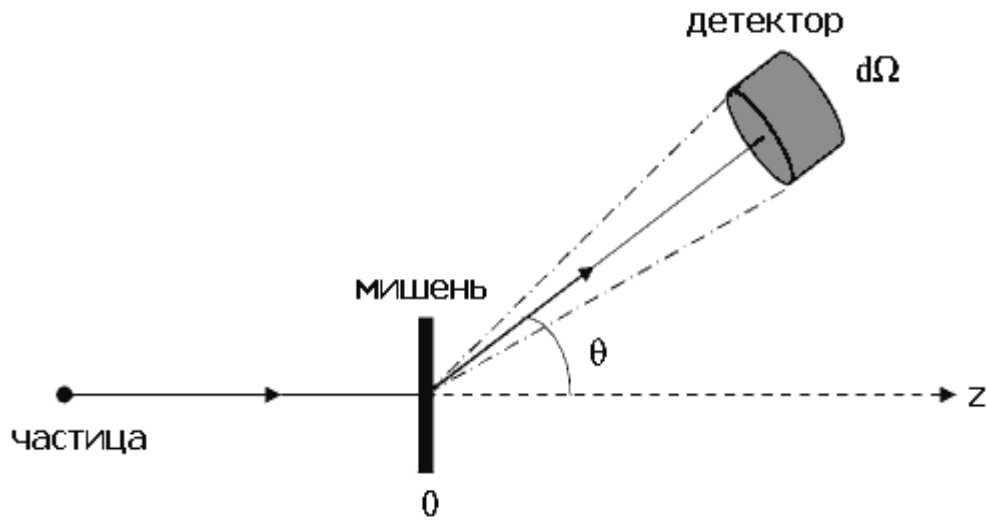
Атомная физика

Лекция 2

проф. Попов Александр Михайлович

Некоторые принципиальные проблемы теории

Эффект Комптона (1923)



$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \Lambda_e (1 - \cos \theta)$$

$$\Lambda_e = 2\pi\hbar/mc = h/mc \approx 2.42 \cdot 10^{-10} \text{ см}$$

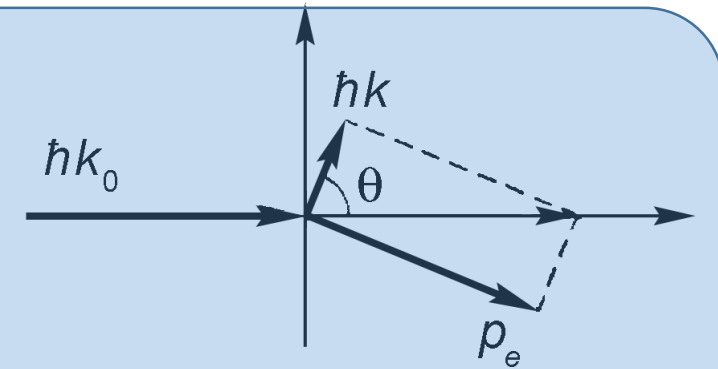
- 1) Почему опыты Комптона можно интерпретировать как рассеяние света на свободных зарядах?
- 2) Рассеяние фотона на свободном неподвижном электроне

$$\hbar\omega_0 + mc^2 = \hbar\omega + E_e$$

$$E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Импульс фотона?

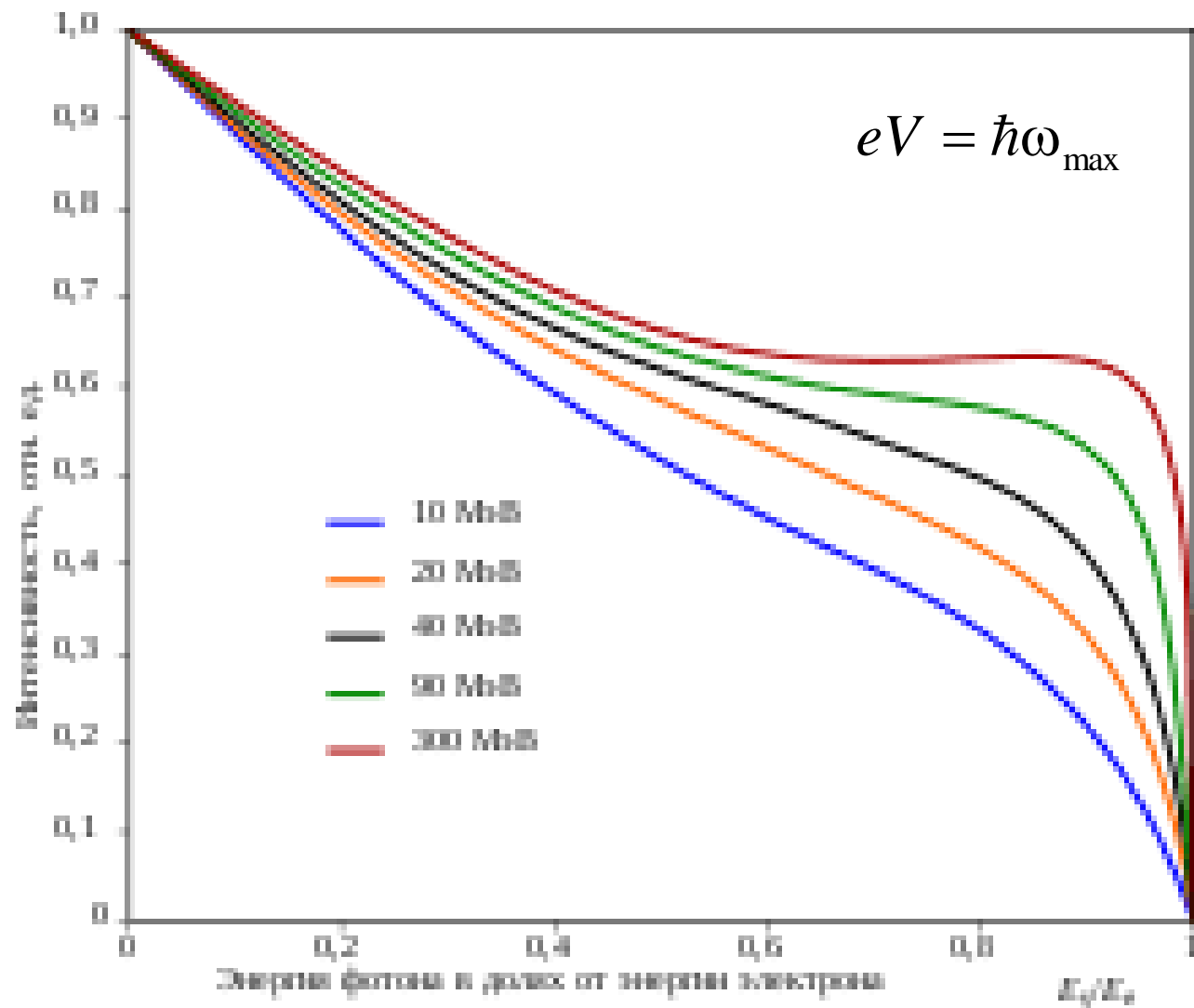
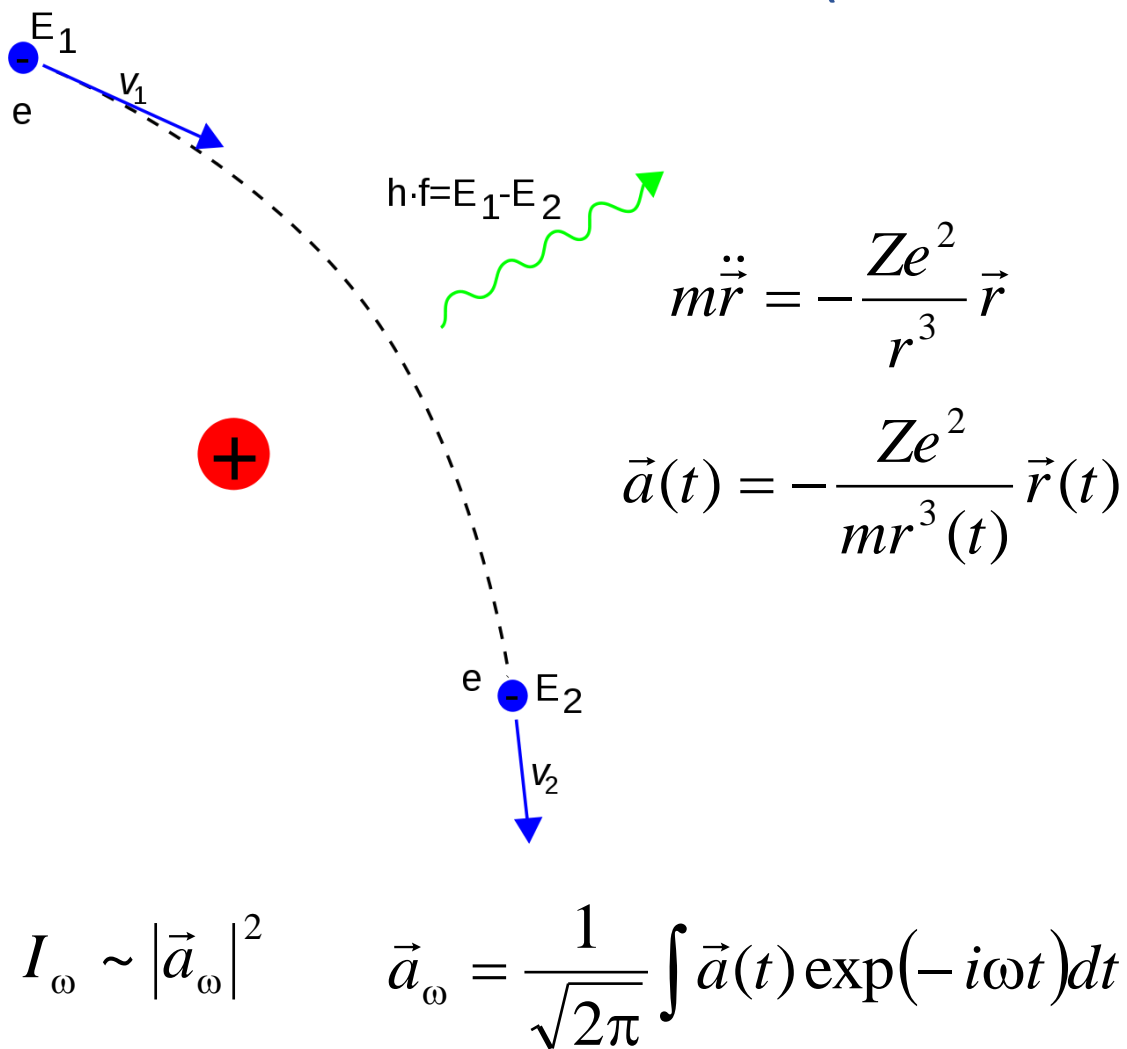
$$\hbar\vec{k}_0 = \hbar\vec{k} + \vec{p}_e$$



$$\omega_0 - \omega = \frac{\hbar}{mc^2} \omega_0 \omega (1 - \cos \theta) \longrightarrow \lambda - \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{mc} (1 - \cos \theta)$$

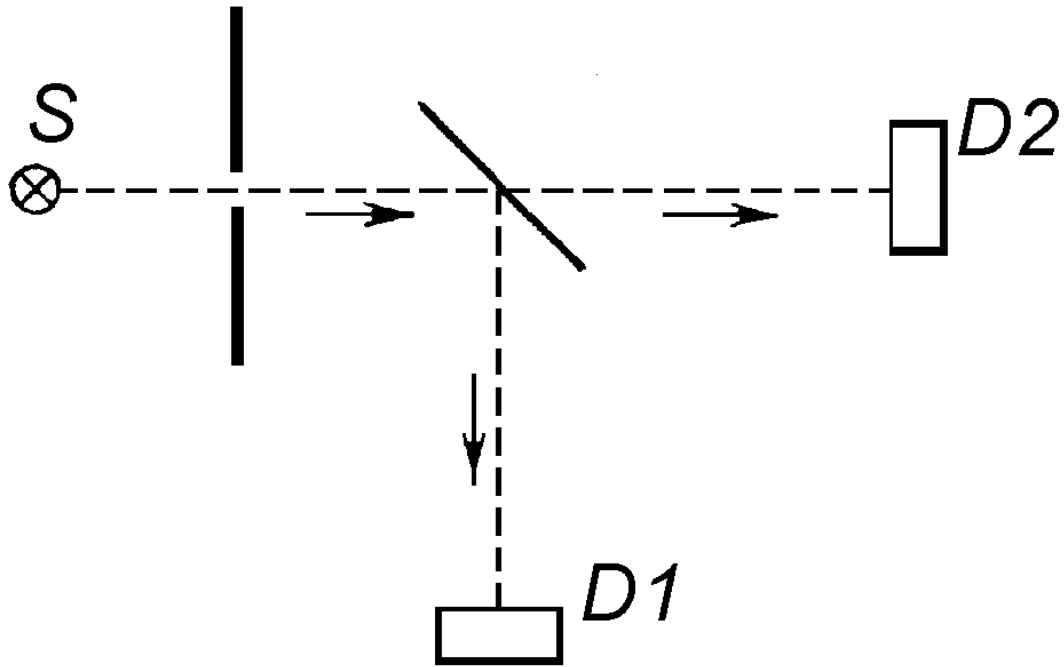
Комптовская длина волны – один из фундаментальных масштабов длины в физике. Она определяет область применимости классической электродинамики.

Спектр тормозного электромагнитного излучение (Квантовый предел)



Свет: волна или поток частиц? ФОТОН

Схема опыта по делению фотона (цуга волн) на две части

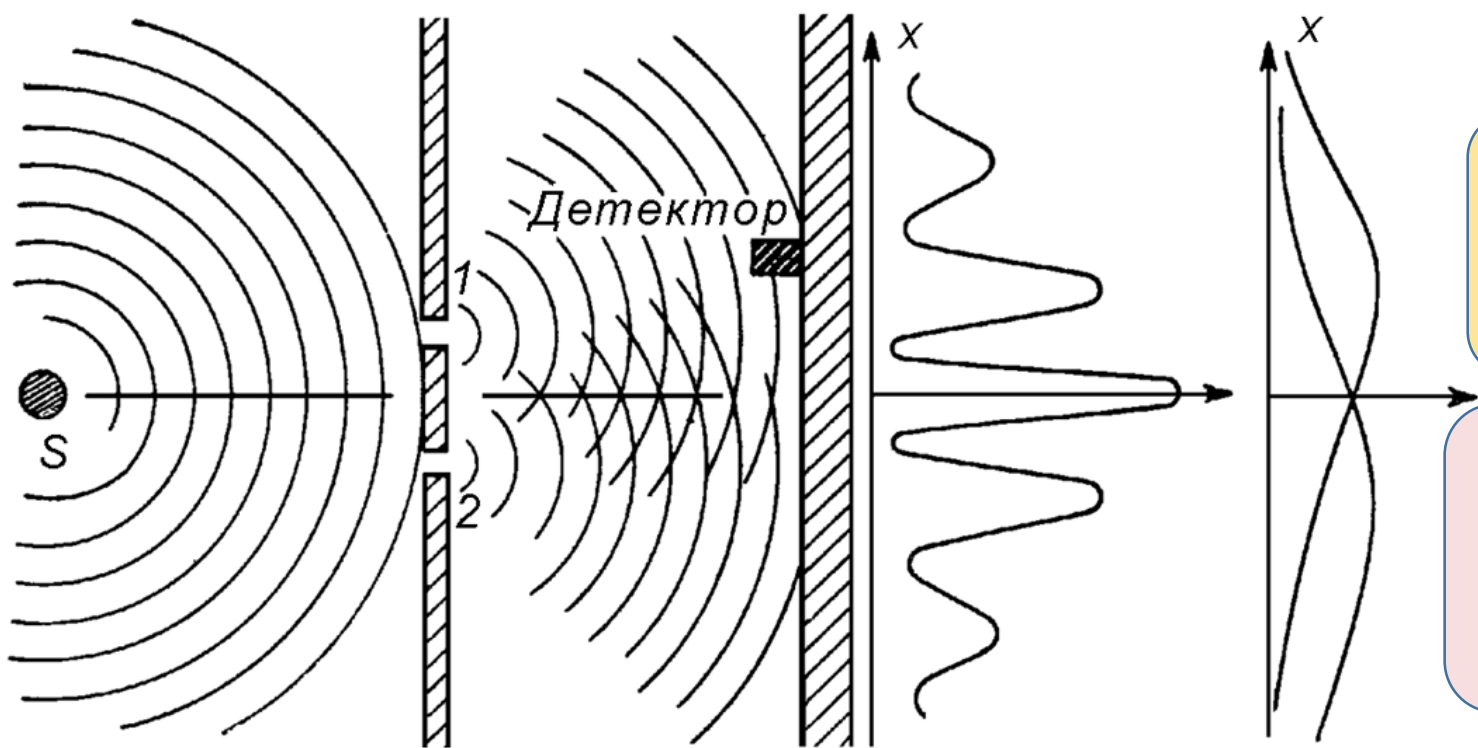


Вероятностное описание процесса и нерасщепляемость фотона

Свет: волна или поток частиц?

ФОТОН

Интерференционные опыты. Волновая и корпускулярная картина процесса



$$I_0(\theta) = |A_0(\theta)|^2$$

Корпускулярные представления

$$I^*(\theta) = 2I_0(\theta)$$

Волновые представления

$$I(\theta) = |A(\theta)|^2 = 4I_0(\theta) \cos^2\left(\frac{\omega}{c} d \sin \theta\right)$$

$$A(\theta) = A_0(\theta) + A_0(\theta) \cdot \exp\left(2i \frac{\omega}{c} d \sin \theta\right) = 2A_0(\theta) \cdot \exp\left(i \frac{\omega}{c} d \sin \theta\right) \cos\left(\frac{\omega}{c} d \sin \theta\right)$$

Свет: **и** волна **и** поток частиц

Возникающая в интерференционных экспериментах картина не зависит от интенсивности света и соответствует предсказаниям волновой теории, основанной на представлении о поле, распространяющемся в пространстве. В то же время неоспоримо утверждение, что это поле состоит из отдельных порций, квантов света, которые не могут быть расщеплены на части и регистрируются как единое целое. Величину объемной плотности энергии поля в классической теории следует связать с плотностью вероятности нахождения фотона в данной точке пространства.

Корпускулярно – волновой дуализм

Корпускулярно-волновой дуализм

- Волны де Бройля (1924)

$$\vec{p} = \hbar \vec{k} \quad \lambda_D = h/p = 2\pi\hbar/p \quad \lambda_D = h/p = 2\pi\hbar/p \quad \lambda_D = \frac{h\sqrt{1-(v/c)^2}}{mv}$$

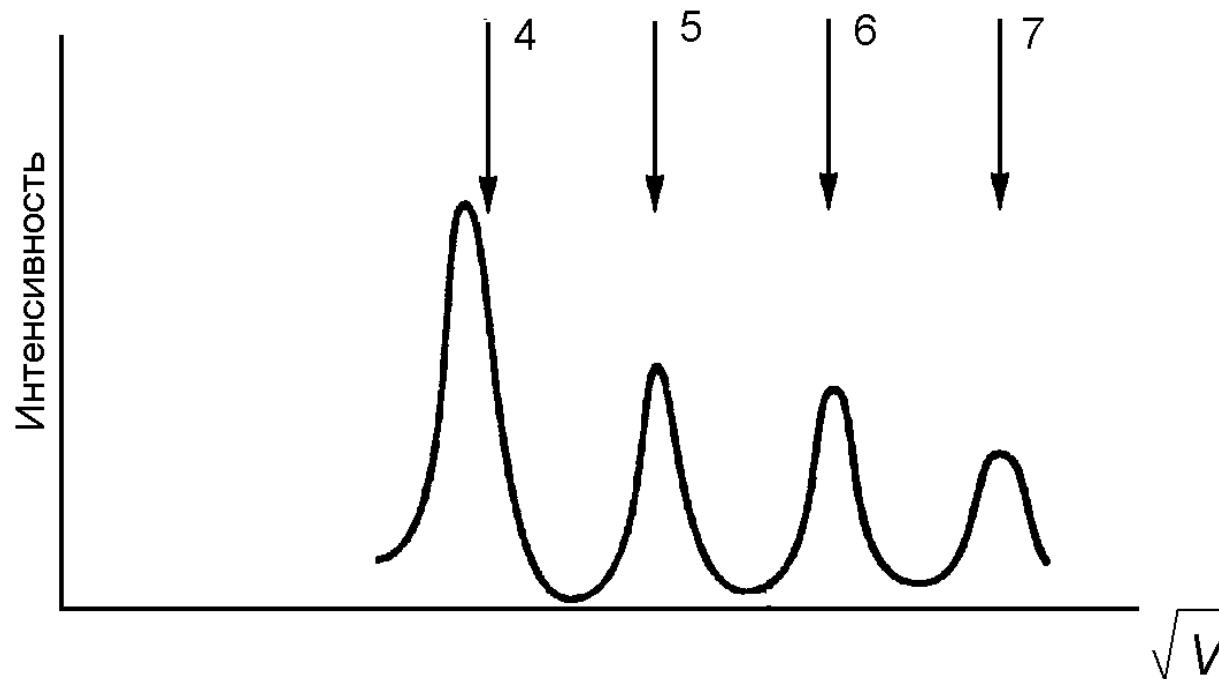
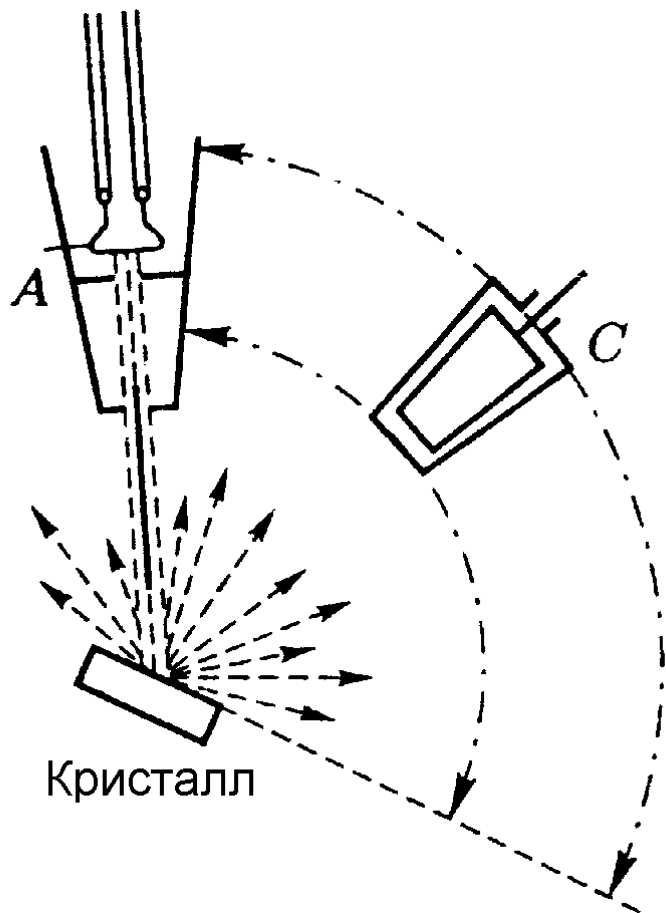
Частота волны де Бройля (неоднозначность выбора)

$$E = \hbar\omega \quad E = p^2/2m \quad E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

- Электрон с импульсом p :
 $\psi(x, t) = A \exp(i(kx - \omega t))$
 $\psi(x, t) = A \exp\left(\frac{i}{\hbar}(px - Et)\right)$

Корпускулярно-волновой дуализм II

Дифракционные опыты с электронами (Девиссон и Джермер, 1927)

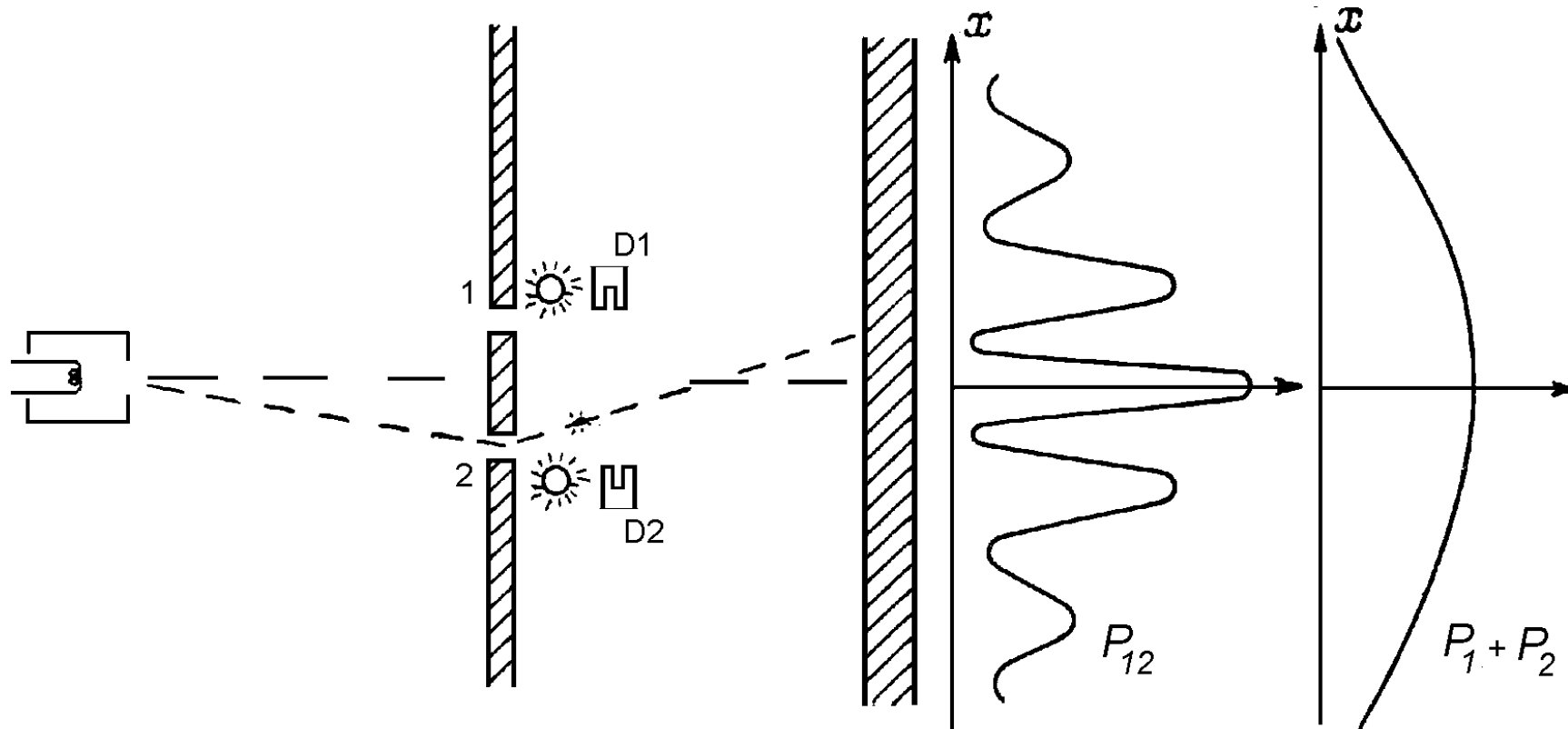


Условие Вульфа-Брэгга: $2d \cos \theta = n \lambda_D$

$$\lambda_D = h / \sqrt{2meV} \longrightarrow \sqrt{V} d \cos \theta = A \cdot n$$

О дифракции тяжелых частиц

Дифракционные опыты с электронами

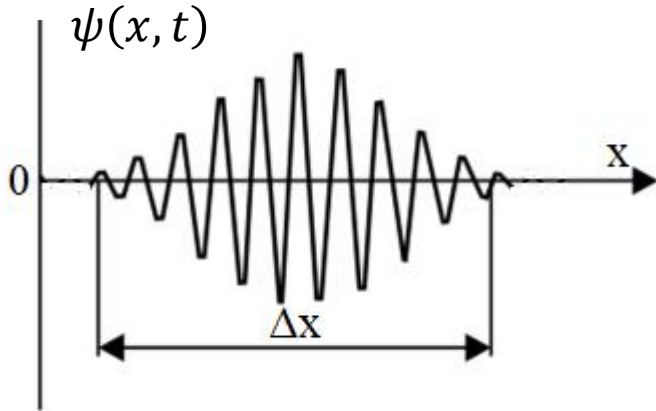


Можно ли увидеть через какую щель прошел электрон, не нарушая интерференционную картину?

Влияние процесс измерения на протекание процесса

Корпускулярно-волновой дуализм III

Волновой пакет: фазовая и групповая скорости



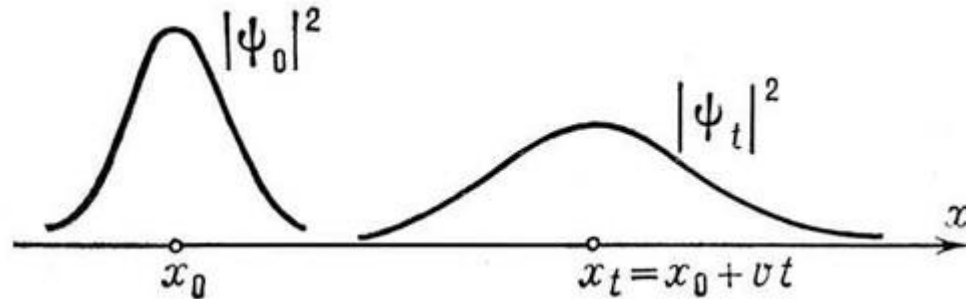
$$v_g = d\omega/dk$$

$$v_g = dE/dp = p/m$$

Верно и в релятивистской и в нерелятивистской областях

Расплывание пакета, как результат наличия дисперсии (разные частоты распространяются с разными скоростями)

$$v_{ph} = \omega/k = E/p \sim k$$



В электромагнетизме для волны, распространяющейся в вакууме дисперсии нет $\omega/k = c$

Смысл волновой функции $\psi(x, t)$ (М Борн, 1926) – ее квадрат модуля есть плотность вероятности обнаружить частицу в некоторой точке пространства в данный момент времени

Частица в прямоугольной потенциальной яме

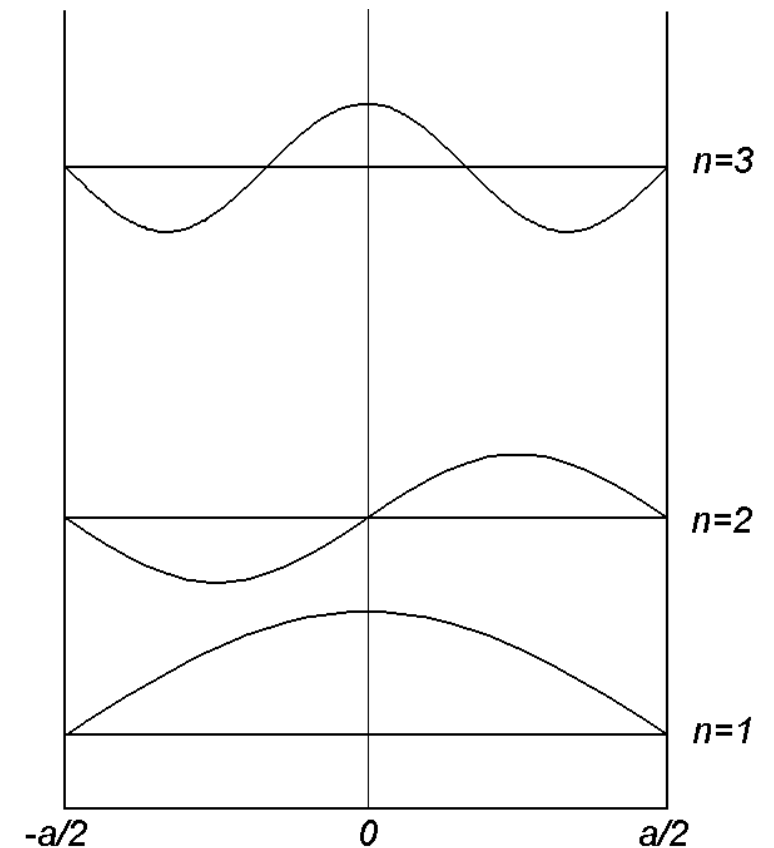
Оптика: собственные частоты резонатора с зеркальными стенками

$$n \lambda / 2 = L \longrightarrow \omega_n = n \pi c / L, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Для волн де Бройля $n \lambda_D / 2 = L$

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2ma^2} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Мы предсказали наличие дискретного спектра состояний частицы в потенциальной яме



Соотношения неопределенностей

1. Импульс - координата

Пакет конечной пространственной протяженности Δx

$$\Delta k_x \Delta x \sim 1 \qquad \Delta p_x \Delta x \sim \hbar$$

Аналогично для других проекций

Связь пространственного и энергетического масштабов $E = \frac{p^2}{2m} \sim \frac{\hbar^2}{2ma^2}$

Атомная физика: ангстремы \rightarrow эВ, ядерная физика: Ферми \rightarrow МэВ

Отсутствие траектории у микрообъекта
и необходимость переформулировки основной задачи механики

2. Энергия - время

$$\Delta \nu \tau \sim 1 \qquad \Delta E \tau \sim \hbar$$

Примеры задач

- 1) Исходя из соотношения неопределенностей оценить минимальную энергию частицы – гармонического осциллятора
- 2) Исходя из соотношения неопределенностей оценить размер атома водорода в основном состоянии