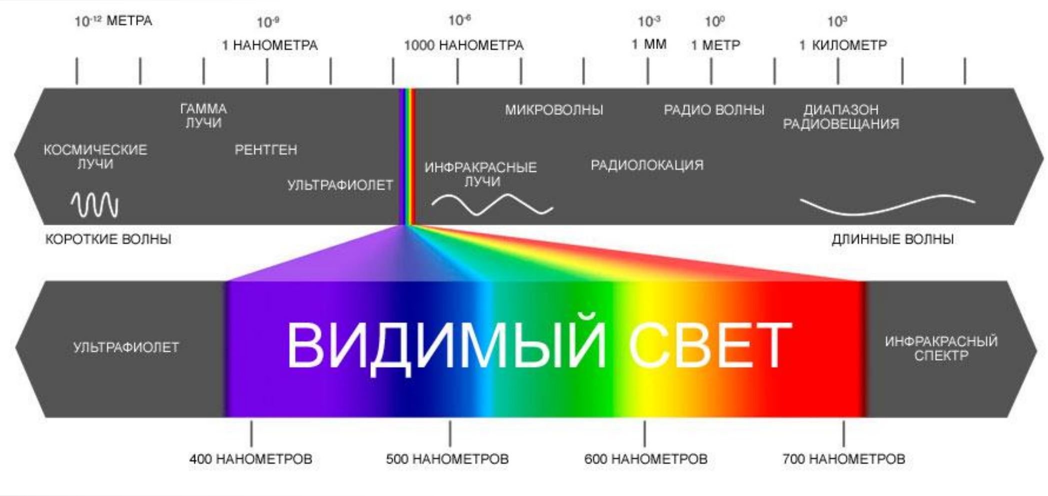
Сегодня:
воскресенье, 18 февраля 2024 г.

Лекция 4. Квантовые представления о свете



- ✓ Давление света
- ✓ Импульс
- ✓ Момент импульса света
- ✓ Интерференция

доцент КОФ ФТИ ТПУ, к.физ.-мат.н Купрекова Елена Ивановна

Поток энергии в квантовом представлении

Световая волна переносится фотонами (квант света). Связь между энергией фотона ε и частотой колебаний ν электромагнитной волны задается формулой Планка

$$\boxed{\varepsilon = h\nu}$$

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}$$

Постоянная Планка

Принцип соответствия классической и квантовой теории света: законы квантовой теории должны переходить в классические, когда энергия системы превосходит энергию отдельных квантов при элементарных процессах в системе.

В квантовом представлении интенсивность волны

$$\boxed{I = nc\varepsilon = nch\nu}$$

n **– среднее число фотонов в единице объема**

$$\boxed{I = nc\varepsilon = nch\nu}$$

$$\boxed{I = \frac{1}{2} c\varepsilon_0 E_{0x}^2}$$

$$\boxed{E_{0x} = \sqrt{\frac{2nh\nu}{\varepsilon_0}}}$$

Связь амплитуды и частоты колебаний с числом фотонов в единице объема

- ✓**Для фиксированной частоты амплитуда может принимать дискретные значения.**
- ✓**Если число фотонов велико, то амплитуда может принимать любое значение и применимо классическое описание ЭМВ.**
- ✓**Если интенсивность мала, то единственно возможным является квантовое представление**

Световое давление

Вместе с энергией волна переносит импульс.

Импульс целиком или частично передается телу. По второму закону Ньютона – свет действует на тело с некоторой силой, оказывая световое давление.

$$\text{импульс}(p) = \frac{W}{c} = \frac{dF}{dt}$$

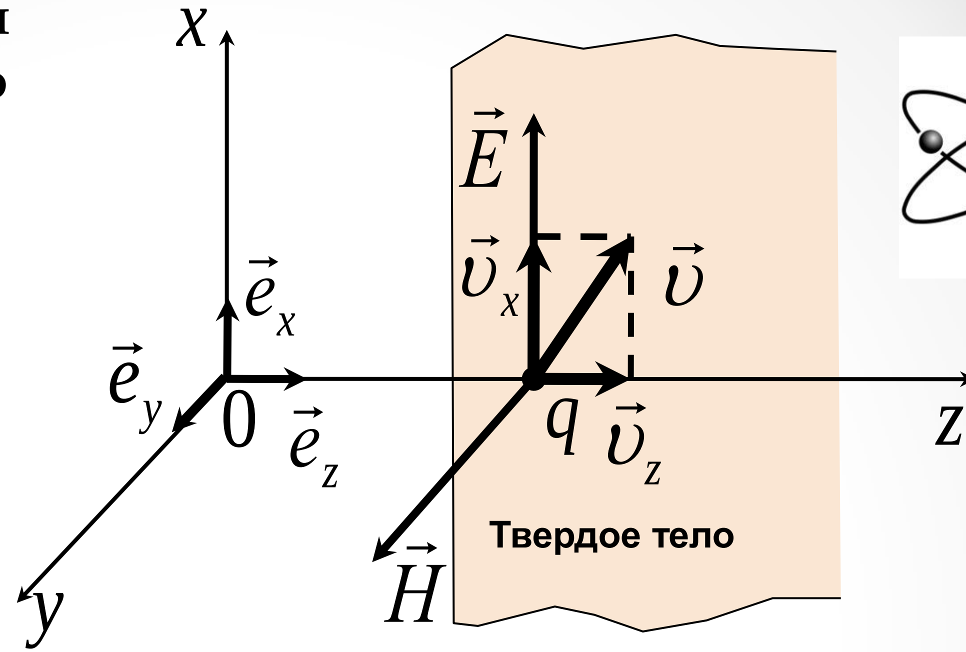
$$\text{давление}(p) = \frac{dF}{dS}$$

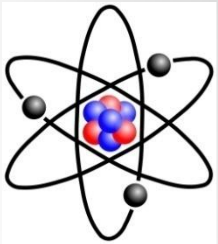
Теория Дж. Максвелла (1873):
световое давление – результат действия пондемоторных сил со стороны ЭМП на движущиеся заряды в материальном теле.

Дж. Максвелл

П. Лебедев

Линейно поляризованная плоская волна нормально падает на поверхность твердого тела





При воздействии ЭП на частицу, входящую в состав атома, она приобретает скорость υ_x.

$$F_x = eE_x = m\frac{d\upsilon_x}{dt}$$

Магнитное поле начнет заталкивать частицу внутрь тела.
У частицы появится вторая компонента скорости υ_z.
Через полпериода изменяться направления векторов E, H и υ_x на противоположные, но магнитное поле по прежнему будет «заталкивать» частицу вдоль оси z внутрь тела.
Это и является причиной светового давления

Посчитаем среднюю за период силу Лоренца, действующую на заряд:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\left[\vec{\upsilon}, \vec{B}\right] =$$

$$= qE_x\vec{e}_x + q\left[\left(\upsilon_x\vec{e}_x + \upsilon_y\vec{e}_y + \upsilon_z\vec{e}_z\right), B_y\vec{e}_y\right]$$

Считаем векторное произведение и усредняем по времени:

$$\left\langle \vec{F} \right\rangle = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau F(t)\,dt = q\left\langle E_x\right\rangle \vec{e}_x - q\left\langle \upsilon_z B_y\right\rangle \vec{e}_y + q\left\langle \upsilon_x B_y\right\rangle \vec{e}_z$$

$$= \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \upsilon_x & \upsilon_y & \upsilon_z \\ 0 & B_y & 0 \end{vmatrix}$$

$$\left\langle E_x \right\rangle = 0.$$

Предположим, что

$$\left\langle \upsilon_z B_y \right\rangle \approx \upsilon_z \left\langle B_y \right\rangle = 0$$

Т.к. υ_z за период изменяется незначительно,
а B_y - быстро осциллирующая функция.

Таким образом, вектор средней силы направлен вдоль оси z

$$\langle \vec{F} \rangle = q \langle \upsilon_x B_y \rangle \vec{e}_z$$

С другой стороны ЭП совершает работу на зарядом. Мощность силы *F* равна энергии *W*, передаваемой от волны к заряду в единицу времени

$$\frac{dW}{dt} = (\vec{F}, \vec{\upsilon}) = qE_x \upsilon_x$$

$$= \left\{ E_x = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} H_y = cB_y \right\} = cq\upsilon_x B_y$$

Усредняем по времени

$$\langle \vec{F} \rangle = \frac{1}{c} \left\langle \frac{dW}{dt} \right\rangle \vec{e}_z$$

При переходе к единице площади среднее значение силы можно заменить давлением, а энергии - интенсивностью

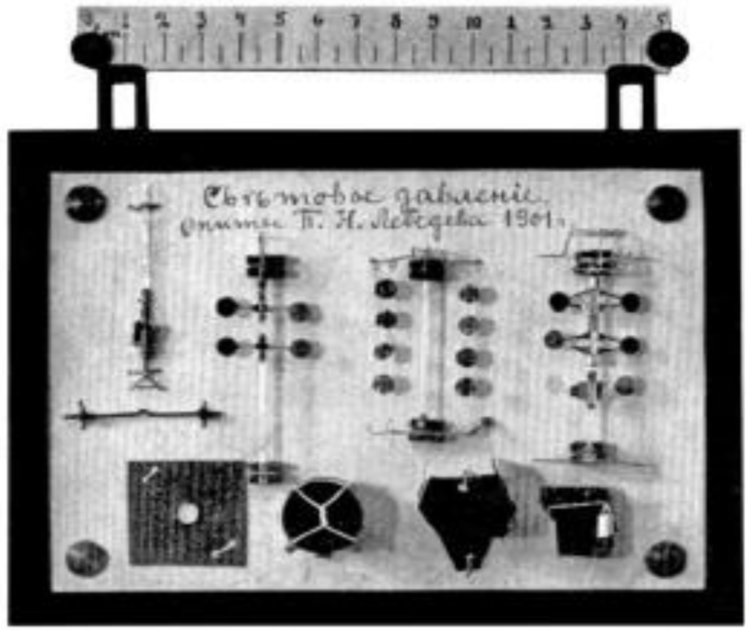
$$p = \frac{I}{c}$$

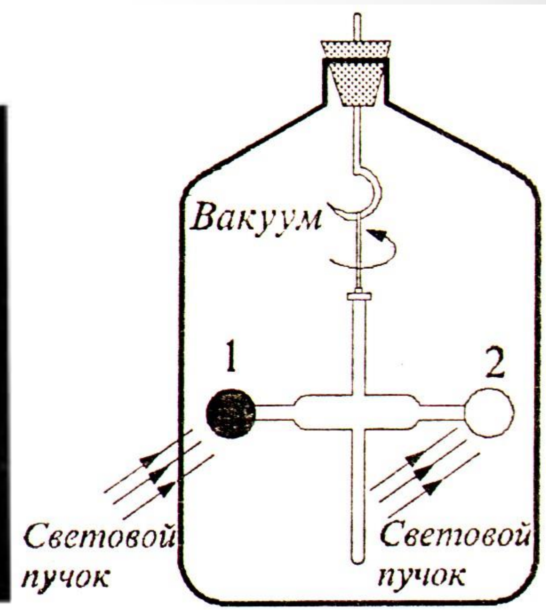
$$p = \frac{I}{c}(1 + R)$$

При падении на частично отражающую поверхность давление увеличивается, так как часть импульса волны уносится в обратном направлении: давление будет зависеть от коэффициента отражения

R = 1 для зеркальной поверхности

Опыты Лебедева





Пётр Николаевич Лебедев
(1866-1912)

Импульс фотона

Давление численно - средний импульс, передаваемый волной единице площади за единицу времени

$$p = \frac{dP}{dt}$$

$$P = \frac{1}{c}\int I(t)dt$$

импульс, переносимый волной за конечное время

В квантовом представлении (при *I* = *const*)

$$P = \frac{1}{c} nch\nu t$$

Допустим, что импульс равен сумме импульсов отдельных фотонов, число которых *nct.* Тогда на каждый фотон приходится импульс

$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c}$$

Импульс фотона равен его энергии, деленной на скорость света и сонаправлен с вектором скорости фотона.

Момент импульса волны

Эллиптически поляризованная волна обладает моментом импульса.

У частицы m, вращающейся вокруг оси $0z$ со скоростью υ по окружности радиусом r_0 момент импульса

$$\boxed{\vec{L} = m\upsilon r_0 \vec{e}_z = \frac{m\upsilon^2}{\omega}\vec{e}_z}$$

Заменим $m\upsilon^2$ объемной плотностью энергии электромагнитного поля u. Тогда момент импульса, переносимый волной через единичную площадку в единицу времени

$$\boxed{\vec{L} = \frac{cu}{\omega}\vec{e}_z}$$

момент импульса одного фотона (спин)

$$\boxed{\vec{l}_\phi = \frac{\vec{L}}{N_\phi} = \left\{N_\phi = nc, u = nh\nu\right\} = \frac{cnh\nu}{nc\omega}\vec{e}_z = \frac{h}{2\pi}\vec{e}_z}$$

Фотон обладает энергией, импульсом и моментом импульса. Он имеет не имеет массы, электрического заряда, электрического и дипольного моментов. Его время жизни в вакууме не ограничено, поэтому фотон устойчив и самопроизвольно не распадается.

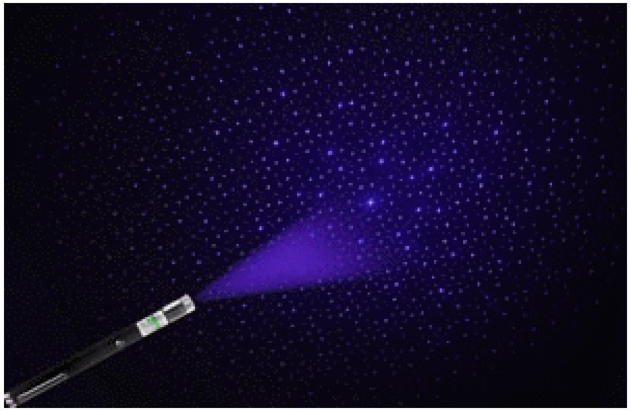
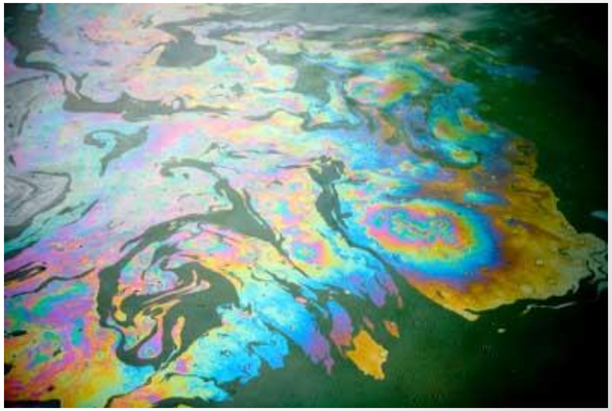
- ✓ **У волны с левой эллиптической (круговой) поляризацией спины фотонов ориентированы преимущественно вдоль направления распространения,**
- ✓ **у волны с правой эллиптической (круговой) поляризацией преимущественная ориентация спинов становится противоположной.**
- ✓ **Если спины с равной вероятностью ориентируются в обоих направлениях, то волна плоскополяризована**

Интерференция квазимонохроматических волн

– явление наложения волн, приводящее к перераспределению плотности энергии ЭМП в пространстве

Интерференция световых волн

Явление устойчивого во времени усиления или ослабления колебаний в разных точках пространства, которое происходит при наложении двух или нескольких волн.

Принцип суперпозиции: результирующая напряженность ЭП двух световых волн, проходящих через одну точку, равна векторной сумме напряженностей электрического поля каждой волны в отдельности.

Рассмотрим две ЭМВ одинаковой частоты, которые возбуждают в некоторой точке пространства два колебания одинакового направления:

$$E_1 = E_{01}\cos(\omega t - kr_1 + \varphi_{01})$$

$$E_2 = E_{02}\cos(\omega t - kr_2 + \varphi_{02})$$

Амплитуду результирующего колебания в данной точке находим с помощью векторной диаграммы:

$$E_{1+2}^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$\boxed{\text{д.б.} \quad \omega_1 = \omega_2 = \omega(!) \quad \text{и} \quad (\varphi_1 - \varphi_2) = \text{const}(!)}$$

Если разность фаз возбуждаемых колебаний не изменяется во времени, то волны когерентные.

Когерентность – согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.

Любой приемник реагирует на среднюю величину

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{\tau_{пр}} \int_0^{\tau_{пр}} E^2(t)\,dt$$

$$\langle E_{1+2}^2 \rangle = \langle E_{01}^2 \rangle + \langle E_{02}^2 \rangle + \underbrace{2\langle E_{01} E_{02} \rangle}_{\text{интерферен ционный член}}$$

$$\boxed{I \approx \frac{E_{1+2}^2}{2} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\,\mathbf{cos}\left[(\varphi_{01} - \varphi_{02}) + k\underbrace{(r_2 - r_1)}_{\text{Геометрическая разность хода}}\right]}$$

Необходимым условием интерференции является отличие от нуля интерференционного члена

Когерентность световых волн

Если бы разность фаз (φ_{02} - φ_{01}) не изменялась со временем, то картина была бы неподвижной. Реально разность изменяется случайным образом, поэтому интерференционная картина будет хаотически двигаться в разные стороны.

Условия для фиксации динамической интерференционной картины?

Монохроматическая плоская ЭМВ

$$E = E_0 \cos\left(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0\right)$$

E_0, ω, φ_0 и $k = \omega / c$ – постоянные

Реальная световая волна образуется наложением колебаний различных частот $\Delta\omega$. Разбросу частот соответствует разброс Δ k

1. Временная когерентность

Связана с разбросом частот Δω

Случай наложения световых колебаний с различающимися частотами $\omega_1 \neq \omega_2$:

$$E_1 = E_0(t)\cos(\omega_1 t + \varphi_{01})$$

$$E_2 = E_0(t)\cos(\omega_2 t + \varphi_{02})$$

Интерференционный член зависеть от времени и разности частот:

$$\varPhi = 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi)$$

$$\Delta\omega = |\omega_1 - \omega_2|$$

Всякий оптический прибор (фотопленка, человеческий глаз) регистрирует усредненную картину, т.к. обладает инертностью, которая характеризуется

$t_{приб}$ – время регистраци и прибором интерферен ционной картины.

1. Если за $t_{приб}$ время $\cos(\Delta\omega t+\Delta\varphi)$ с равной вероятностью принимает все значения от -1 до +1, то <Φ> = 0 - **интерференционная картина не видна**, т.е. регистрируемая прибором интенсивность окажется равной сумме интенсивностей, создаваемых в данной точке каждой волной в отдельности.

2. Если за $t_{прибор}$ время $\cos(\Delta\omega t+\Delta\varphi) \approx const$, то прибор зарегистрирует интерференцию.

Время когерентности - время, за которое изменение разности фаз волн, накладывающихся в данной точке пространства, не превышает π:

$$\boxed{t_{ког} \approx \frac{\pi}{\Delta\omega}}$$

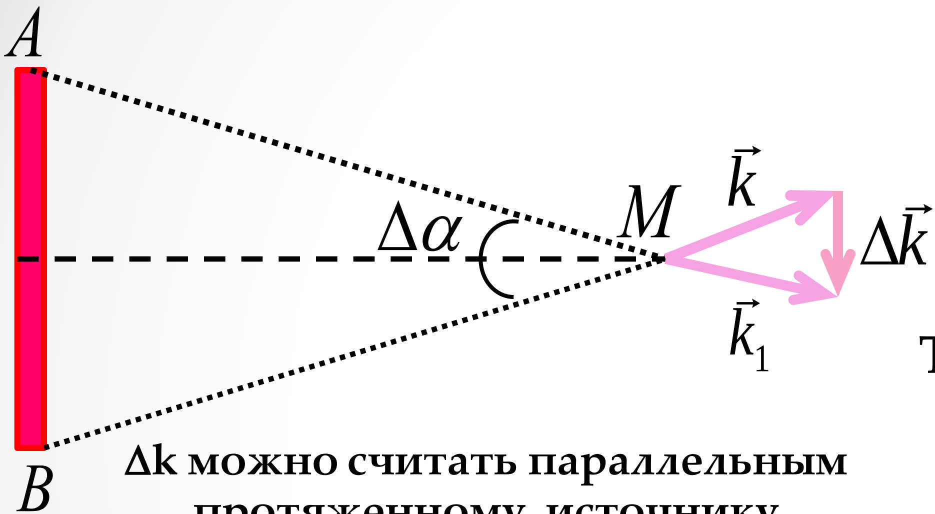
1. При $t_{приб} > t_{ког}$ прибор не зафиксирует интерференцию.

2. При $t_{приб} \ll t_{ког}$ прибор обнаружит интерференционную картину.

$l_{ког} = ct_{ког}$ – **длина когерентности**

2. Пространственная когерентность

Связана с разбросом значений волновых векторов Δk



Рассмотрим светящийся диск АВ, который из точки М виден под углом Δα.

Δα характеризует разброс Δk.

Т.е., в фазу ЭМВ

$$\varphi(t) = \omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + \varphi_0$$

Δk можно считать параллельным протяженному источнику (фронту волны).

Надо подставить:

$$\vec{k}_1 = \vec{k} + \Delta\vec{k},\ k = \frac{\omega}{\upsilon} = \frac{2\pi}{\lambda},\ \left|\Delta\vec{k}\right| = k\Delta\alpha$$

$$\varphi_1(t) = \omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} - k\Delta\alpha\rho + \varphi_0$$

$\rho -$ проекция $\vec{\mathrm{r}}$ на направлени е $\Delta\vec{\mathrm{k}}$

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_1 = k\Delta\alpha\rho$$

Следовательно, фаза колебаний при переходе от одной точки волновой поверхности к другой изменяется.

Радиус когерентности – расстояние, при смещении на которое вдоль волновой поверхности изменение фазы достигает значения π - максимальное, поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции.

$$\boxed{\rho_{ког} \approx \frac{\pi}{k\Delta\varphi} = \frac{\lambda}{2\Delta\varphi}}$$

Чтобы наблюдать интерференционную картину, необходимо, чтобы оптическая разность хода была много меньше длины когерентности для данного источника света $\Delta \ll l_{ког}$

Функция видности

А. Майкельсон ввел для описания качества картины

$$V(\tau) = \frac{I_{\max}(\tau) - I_{\min}(\tau)}{I_{\max}(\tau) + I_{\min}(\tau)}$$

I_{min} и I_{max} - интенсивность в интерференционном максимуме и ближайшем к нему минимуме