

Урок №8 (18.02.2013)

Основные идеи квантовой механики

Полную лекцию пока не придумал, так что ниже только тезисы.

- Ужасная ситуация в физике в начале XX века: только-только Максвелл доказал заблуждение приверженцев корпускулярной теории света, построил законченную теорию электромагнитного волнового излучения, были объяснены все дифракционные эффекты... и тут Эйнштейн начинает всерьёз доказывать, что свет – это поток частиц, которые выбивают электроны в фотоэффекте! Будем разбираться.
- Нулевая энергия массы: $E_0 = mc^2$. Формула выведена Эйнштейном в результате перехода в Общей теории относительности (ОТО) от классической кинетической энергии к релятивистской: $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$. При нулевой скорости энергия становится равной как раз mc^2 . Поэтому кинетической энергией в релятивистском случае называют величину $T = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - mc^2$.
- Из той же ОТО следует, что $E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m^2 c^4$, и $\vec{p} = \frac{E\vec{v}}{c^2}$. Для безмассовой частицы из этого следует, что $E = pc$ и $v = c$, т.е. скорость безмассовой частицы всегда равна скорости света, а её энергия и импульс равны с точностью до константы.

Любителям фантастики: термин «масса покоя» можно применять только в смысле возрастания инерционных свойств при релятивистских скоростях. Обратное не верно, т.е. нельзя, например, фотону, имеющему энергию E приписать «эффективную массу» $m_\gamma = \frac{E}{c^2}$. Абсурдность такого подхода проявляется в рассмотрении силы, действующей на фотон: с одной стороны, если на фотон действует сила вдоль его движения, его импульс не меняется (он не «разгоняется»), если же поперёк, – импульс меняется (фотон «поворачивает»), т.е. получается, что у фотона две разные эффективные массы – продольная и поперечная.

- Итак, при некотором «переизбытке» энергии может родиться масса. Запомним на будущее.
- 14 декабря 1900 года Макс Планк на заседании Немецкого физического общества зачитывает статью «К теории распределения энергии излучения в нормальном спектре» в которой он показывает, что для избежания ультрафиолетовой катастрофы необходимо, чтобы любая энергия передавалась от тела к телу только дискретными порциями (квантами). Причём крайне важной была связь этой энергии с частотой излучения: $E = h\nu$.
- Эйнштейн показал, что фотона должен обладать импульсом: $p = h/\lambda = \frac{h\nu}{c}$. Артур Комптон экспериментально обнаружил это в 1922 году (изменение длины волны рентгеновского излучения вследствие рассеяния его электронами вещества).
- Законы фотоэффекта:
 - 1. Сила фототока прямо пропорциональна плотности светового потока до определённого предела, после которого наступает насыщение.

- 2. Максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.
- 3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота света ν_0 , при которой ещё возможен фотоэффект.
- Корпускулярно-волновой дуализм. С одной стороны явления дифракции и интерференции, даже в том случае, если мы берём источник, в котором фотоны излучаются крайне редко. С другой стороны процессы излучения и поглощения показывают фотоны как отдельные частицы.
- Что такое измерение? Важно понимать эти два понятия: *измерение* и *состояние*. Предположим, что частица движется с точно определённым импульсом \vec{p} . Значит, у неё есть определённое на данный момент состояние с импульсом \vec{p} . Попытаемся теперь точно измерить положение частицы \vec{r} (как это можно сделать?). Мы это можем сделать, но при этом импульс частицы обязательно изменится! В итоге мы получим состояние с положением частицы \vec{r} .
- Гейзенберг показал, что принципиально невозможно измерить эти две величины точно: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$. Аналогично невозможно одновременно точно измерить другие сопряжённые величины: ток и напряжение, значение электрического и магнитного поля волны, энергии и времени. Всё в целом это называется *принципом неопределённости Гейзенберга*. Из принципа неопределённости в том числе следует возможность возникновения *виртуальных частиц*, время жизни которых столь мало, что $m_x c^2 \cdot \Delta t \leq \hbar/2$.
- Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена: Согласно соотношению неопределённостей Гейзенберга, нет возможности одновременно точно измерить координату частицы и её импульс. Предполагая, что причиной неопределённости является то, что измерение одной величины вносит принципиально неустранимые возмущения в состояние и производит искажение значения другой величины, можно предложить гипотетический способ, которым соотношение неопределённостей можно обойти. Допустим, две одинаковые частицы A и B образовались в результате распада третьей частицы. В этом случае, по закону сохранения импульса, их суммарный импульс $p_A + p_B$ должен быть равен исходному импульсу третьей частицы, то есть, импульсы двух частиц должны быть связаны. Это даёт возможность измерить импульс одной частицы (A) и по закону сохранения импульса рассчитать импульс второй (B), не внося в её движение никаких возмущений. Теперь, измерив координату второй частицы, можно получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно. Но если это невозможно, то измерение координаты второй частицы мгновенно изменит импульс первой!
- Тождественность элементарных частиц. Этот принцип утверждает, что все элементарные частицы одного типа совершенно неотличимы. Поэтому, например, измерение импульса электрона и положения позитрона только что родившейся электрон-позитронной пары не даст абсолютного знания, т.к. мы, возможно, измерили какой-то другой электрон или позитрон.
- Волновая функция. Некая довольно сложная комплексная функция $\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$, квадрат абсолютного значения которой даёт вероятность нахождения частицы в данной точке в данный момент времени. Таким образом, зная волновую функцию частицы, можно посчитать вероятность нахождения частицы в определённом объёме пространства. Волновая функция может быть определена не

только для одной частицы, но и для системы частиц и вообще для любой *квантовой системы*.

- Окончательно отказались от полуклассических теорий лишь в 70-х – 80-х годах XX века! Последними сдались химики. 😊