

## КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

---

На экзамене.

Дж. Дж. Томсон (*студенту*): «Что такое электрон?»

Студент: «Простите, профессор, Я знал, но забыл».

Дж. Дж. Томсон: «Как Вы посмели забыть!? Вы были единственным, кто это знал!»

Студенческий фольклор

### Загадки электрона

К концу XIX в. целостная картина взаимосвязи частиц, зарядов и полей завершилась открытием электрона. Катодные лучи наблюдались с середины XIX в., но только к концу века было установлено, что эти лучи — поток элементарных составляющих атомов — *электронов* \*). Казалось, можно было подвести итоги и завершить здание классической физики.

Вырисовывалась такая картина. Вещество состоит из атомов. В состав атомов входят электроны, обладающие единичным электрическим зарядом. Существуют и свободные электроны. Электроны окружает особое состояние пространства — электромагнитное поле. Это поле обеспечивает связь электронов в атомах. Электрический заряд электрона — мера его электрического взаимодействия. Электрон неуничтожим, поэтому сохраняется электрический заряд. Все многообразие форм окружающей нас Природы — результат перемещений, соединений и перераспределений электронов.

Итак, картина мира сводилась к единому началу. Найден был единый кирпичик всего сущего. Развитие физики, казалось, подошло к концу... Оставалось всего несколько уточнений.

Но в конце XIX в. была открыта *радиоактивность*. Радиоактивные элементы стали использовать как источники энергичных частиц, способных проникать в глубь атома. И в XX в. глубины атома стали исследоваться.

---

\*) Действие этих лучей мы наблюдаем ежедневно в трубке телевизора (если, конечно, наш телевизор работает).

Электрон имеет отрицательный электрический заряд, а атом электронейтрален. Поэтому в атоме должен присутствовать и положительный заряд, компенсирующий заряд электронов. Томсон полагал, что положительный заряд однородно распределен по всему атому. В этой модели атом был подобен пудингу с изюмом. В роли изюма выступали электроны.

В опытах Резерфорда, бомбардировавшего атомы  $\alpha$ -частицами, было установлено, что внутри атома имеется плотное ядро, размером в десять тысяч раз меньше размера атома, и именно в этом плотном положительно заряженном ядре и сосредоточена почти вся масса атома. Этот результат противоречил модели Томсона. Получалось, что атом неоднороден, и скорее похож на Солнечную систему. Ведь Солнце с радиусом в несколько тысяч раз меньшим орбиты Плутона имеет массу, в тысячу раз превосходящую сумму масс всех планет Солнечной системы. Возникла простая аналогия: Солнце — ядро атома, планеты — отрицательные электроны. Нильс Бор так и назвал такую модель атома — *планетарная*. Но имелось одно существенное отличие атома от Солнечной системы. Вращение электрона вокруг ядра должно было бы, казалось, приводить к излучению электромагнитных волн. Вращающийся электрон должен был бы терять энергию на излучение, переходя на все более близкую к ядру орбиту. Интенсивность излучения при этом только возрастала бы, ускоряя падение электрона на ядро. Можно рассчитать, что если бы такое падение действительно происходило, атом не просуществовал бы и миллиардной доли секунды. Чтобы устранить это противоречие в теории атома, Бор постулировал, что есть такие орбиты, находясь на которых электрон не излучает. При этом атомы, в которых электроны находятся на одинаковых стационарных орбитах, неотличимы друг от друга, тождественны.

Стационарная орбита отвечает определенной энергии взаимодействия электрона и ядра. Разные орбиты отвечают разным значениям этой энергии. Если электрон оказывается на более удаленной орбите, он может перескочить на более низколежащую орбиту, и при этом его энергия изменяется на определенную порцию энергии, равную разности энергии конечной и начальной орбит. Существует самая низколежащая орбита, отвечающая нижнему основному состоянию



атома. В теории Бора переход с одной стационарной орбиты на другую сопровождался испусканием кванта электромагнитного излучения. (Из нижнего основного состояния такой переход невозможен.) Но уже существовала формула Планка, связывавшая энергию кванта излучения  $E$  с его частотой  $\omega$ . Зная разность энергий начальной и конечной орбит, можно было определить частоту излучения. Это сразу давало объяснение спектров излучения атомов. Атомная спектроскопия становилась понятней \*). Тем самым теория атома связывалась с теорией квантов излучения, предложенной за десятилетие до теории Бора. *Атомная физика оказывалась физикой квантовой!* Подчеркнем гигантское различие с классическими представлениями для основного состояния атома: находясь на самой низколежащей орбите электрон не излучает! Для более удаленных орбит различие более тонкое: в классической теории электроны должны были бы излучать, находясь на этих орбитах. В теории Бора излучение возможно только при переходе с одной орбиты на другую, находясь на орбите электрон не излучает.

Теория квантов была предложена Планком в 1900 г. для объяснения термодинамических свойств абсолютно черного тела. Разумное описание таких свойств получалось только в предположении, что излучаться может только определенная порция — квант энергии излучения, причем энергия кванта  $E$  связывалась с частотой (или длиной волны) излучения, а импульс  $p$ , как показал Эйнштейн, связывался с волновым вектором  $k$  (длиной волны  $\lambda = 2\pi/k$ ) универсальным законом

$$E = h\nu, \quad p = hk. \quad (C)$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  являлся, по предположению Планка, новой фундаментальной постоянной. Как показал Эйнштейн в 1905 г., теория квантов объясняла не только термодинамику излучения, но и явления фотоэффекта. Для этого нужно было только предположить, что соотношение (C) не является свойством процесса излучения. Это соотношение должно было описывать свойства самого излу-

---

\*) Полное понимание структуры многоэлектронных атомов пришло только после привлечения принципа Паули (см. ниже).

чения. Само электромагнитное излучение должно было обладать квантовой природой. Электромагнитное излучение должно было, по предположению Эйнштейна, состоять из частиц — *фотонов* — квантов электромагнитных волн. Электромагнитные волны приобретали свойства частиц.

С другой стороны, частицы все более явно проявляли волновые свойства.

Де Бройль выдвинул смелое предположение, что электроны представляют собой волны материи, вместо частицы — электрона с импульсом  $p$  — надо рассматривать волну с длиной волны  $\lambda = 2\pi\hbar/p$ , где  $2\pi\hbar = h$  — та самая фундаментальная постоянная, которая была введена Планком в теории квантов излучения. Свободно движущийся электрон рассматривался как волна бегущая (как, например, волна на поверхности воды), а электрон, связанный в атоме, — как собственные колебания определенной частоты. Пример таких колебаний дают колебания веревки с жестко закрепленными концами. При расстоянии  $L$  между концами веревки устойчиво возбуждаются только колебания длиной волны  $\lambda = L/2\pi n$ . Поэтому у веревки с неподвижными концами волновое число  $k = 1/\lambda$  может иметь только дискретные значения  $k = \frac{2\pi n}{L}$ , где  $n$  — целое число. В атоме волна бежит по орбите и должна для стационарности картины удовлетворять условию  $\lambda = 2\pi r \cdot n$ . Так на основе волновой теории объяснялась природа стационарных электронных оболочек в атоме.

Достоинством волновой теории было и то, что она могла явно учесть соотношения специальной теории относительности. Энергия частицы  $E$  и импульс  $p$  составляют 4-вектор. В волновой теории 4-вектор составляют частота  $\omega$  и волновой вектор  $k$  (о 4-векторах см. Математическое дополнение, с. 188).

Но ведь электрон обладает электрическим зарядом. Как распределен электрический заряд в электронной волне? В процессах рассеяния жесткого рентгеновского излучения на атомах наблюдался эффект Комптона: рассеяние электромагнитного кванта на электроне в атоме. Комптоновское рассеяние происходило всегда так, как если бы электроны взаимодействовали с фотоном как точечный заряд. Попытки описать электронную оболочку как размазанное в объеме

атома «вещество электрона» оказались безуспешными. По предположению М. Борна волнам материи была дана иная интерпретация. Волна материи одиночного электрона отвечает «волне вероятности». Электрон описывался волновой функцией  $\psi$ , квадрат которой (точнее, квадрат модуля)  $|\psi|^2$  определял вероятность нахождения электрона в том или ином месте. Но это означает, что ответ на вопрос, где находится электрон, нельзя получить с определенностью. Может здесь, а может, и не здесь. Он может находиться в любом месте, где  $|\psi|^2 \neq 0$ . Физическое описание становится неопределенным. Более того, неопределенность возводилась в принцип — в *принцип неопределенности*, предложенный В. Гейзенбергом.

### Атом. Принцип Паули

Какова же вероятность нахождения электрона в данном месте? Как она меняется со временем? На эти вопросы отвечало основное уравнение квантовой механики — *уравнение Шредингера*.

Решив это уравнение, можно было получить ответы на многие вопросы, связанные с загадочным поведением электрона.

Квантовая механика дает уравнение для комплексной волновой функции  $\psi(r, t)$ . Квадрат модуля этой комплексной величины (см. Математическое дополнение, с. 221), т. е. величина  $\psi^*(r, t) \cdot \psi(r, t) = P(r, t) > 0$  определяет вероятность нахождения электрона в данной точке пространства в данный момент времени. В частности, известно, что если электрон или любая другая система микрочастиц находится в стационарном состоянии с определенной энергией  $E$ , то  $\psi(r, t) = \psi(r) e^{-iEt/\hbar}$  есть решение уравнения Шредингера. Из уравнения Шредингера можно определить энергию таких состояний. Например, энергию электрона, связанного в атоме. Оказалось, что при  $E < 0$  такие решения существуют лишь при определенных выделенных значениях  $E_0, E_1, E_2, \dots$  и все эти значения отрицательны. При этом квадрат модуля волновой функции электрона в атоме определяет вероятность нахождения электрона в том или ином месте внутри атома. Волновая функция свободного электрона отвечает бегущей волне.