

Л. И. Френкеля, Л. Де Бройля, Э. В. Шпольского и др.

Мы перескакиваем из эпохи 1905—1912 гг. сразу в 1928 г., хотя именно в 1912—1928 гг. были заложены все основы атомной физики, молекулярной физики, молекулярной биологии. Но наша тема другая.

Теория Дирака

В 1928 г. молодой английский теоретик П. А. М. Дирак предложил свое квантовое уравнение для описания движения электрона и его взаимодействия с электромагнитным полем, удовлетворяющее теории относительности. В теории атома эффекты теории относительности невелики — существование массивного ядра атома приводит к выделенной системе отсчета, связанной с ядром. Но на основе уравнения Дирака можно было рассчитать и поправки, обусловленные тем, что отношение скорости движения электрона к скорости света не равно нулю. Было у этого уравнения и еще одно преимущество: оно с неизбежностью однозначно требовало существования вполне определенного спина электрона и предсказывало вполне определенную величину его магнитного момента μ . Найденное из опыта значение μ совпадало с вычисленным с точностью 0,1%. «Внутреннее вращательное движение» электрически заряженного электрона определяло его магнитное взаимодействие — делало его элементарным магнитиком. Как показал Паули, чтобы учесть это свойство электрона в теории Шредингера, нужно было удвоить число электронных состояний — учесть, что электрон может находиться в двух состояниях: со спином, направленным «вверх» и со спином, направленным «вниз». В теории Дирака существование магнитного момента электрона получалось непосредственно как следствие наличия у электрона электрического заряда и спина. Но число состояний при этом не удваивалось, а учетверялось! Кроме двух состояний с направлением спина «вверх» и «вниз» у электрона предсказывалось еще два точно таких же состояния: «спин вверх» и «спин вниз», но с отрицательной энергией. Возникла проблема состояний с отрицательной энергией.

Ох, и странные должны были быть свойства у этих состояний! Вот хотя бы такое: у этих состояний отри-

цательна полная энергия, включающая энергию покоя ($E_0 = mc^2$), т. е. $E < -mc^2$ *).

Чтобы увеличить скорость такого электрона, у него нужно отнять энергию. И наоборот — сообщить энергию, чтобы его остановить. Было очевидно, что такого в Природе не бывает. От состояний с отрицательной энергией надо было избавиться. Из уравнения Дирака состояния с отрицательной энергией предсказывались для свободных, невзаимодействующих частиц. В классической физике от таких состояний избавиться было бы легко. У электрона ненулевая масса, и положительная энергия покоя $E_0 = mc^2$. В классической физике энергия меняется непрерывно. Задавшись положительным значением начальной энергии частицы, мы можем при ее непрерывном изменении дойти до величины энергии покоя $E_0 = mc^2$, которая никуда деться не может. В классической физике электроны с отрицательной энергией появиться не могли бы, если бы все электроны вначале обладали положительной энергией. Но уравнение Дирака — уравнение квантовое, оно описывает состояния электронов. И между этими состояниями могут происходить квантовые переходы с одного энергетического уровня на другой.

Электроны с положительной энергией должны бы были, таким образом, излучать. Их перескок с испусканием фотона в состояние с отрицательной энергией был бы возможен и как спонтанный (ср. с переходами в атоме), т. е. как самопроизвольный с испусканием фотонов.

Возникала проблема стабильности электронных состояний. И решая проблему состояний с отрицательной энергией, Дирак использовал результаты теории электронных оболочек атома: тут-то и пригодился принцип Паули.

Дирак использовал этот принцип для объяснения отсутствия переходов в состояния с отрицательной энергией. Ведь если переход в эти состояния происходит достаточно быстро, значит он уже давно произошел, значит переход в эти состояния уже невозможен.

*) Введем величину $m_3 = 9,8 \cdot 10^{-28}$ г, которая всегда положительна. Тогда окажется, что $m = \pm \sqrt{m_0^2} = \pm m_0$. Масса обычного электрона положительна. Масса нового странного состояния отрицательна.

Бесконечный резервуар состояний с отрицательной энергией заполнен бесконечным числом электронов. Избыточные электроны, которые уже не могли в него вместиться, поневоле оказываются электронами с положительной энергией. Это и есть те электроны, с которыми мы имеем дело в окружающем нас мире.

В теории Дирака даже совсем пустое пространство — совсем не пустое, что само по себе поразительно. Оно представляет собой *море электронов с отрицательной энергией* и бесконечной плотностью. Дирак предположил, что само это море ненаблюдаемо. Оно составляет однородный фон, не оказывающий влияния на протекание электромагнитных процессов. Но *изменения состояния моря*, «возмущения» его могли бы наблюдаться. Аналогия с заполнением электронных оболочек атомов указывала, что возможен процесс, аналогичный фотоэффекту. Электромагнитный квант с энергией, превышающей энергию связи электрона в атоме, может выбить электрон из атома: получают свободный отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный ион. Если же энергия кванта превышает $2mc^2$, то электрон с отрицательной энергией мог бы перейти в состояние с положительной энергией и наблюдаться как свободный электрон. Но в море отрицательно заряженных электронов при этом появилась бы «дырка» *). По предположению Дирака полный бесконечный заряд электронного моря с отрицательной энергией не наблюдаем, но вырывание из моря электрона оставляло море недозаполненным на один электрон. После выбивания электрона с зарядом $(-e)$ заряд моря становился равным $(-\infty) - (-e) = (-\infty) + e$. Бесконечный отрицательный заряд моря ненаблюдаем, но в море появилось состояние «дырки» с зарядом $+e$. Появилась возможность рождения пары: электрон $+$ «дырка». Возможность рождения обычного электрона и «дырки» — состояния с положительным электрическим зарядом. Это сейчас мы так легко говорим: «рождение пары». А какую сложную конструкцию: море электронов с ненаблюдаемым бесконечным отрицательным зарядом — придумал Дирак, чтобы этих слов избежать!

*) Сравните с «дырочной» проводимостью полупроводников — недостающие электроны в них эквивалентны «дыркам» с положительным зарядом.