

«Ядерные электроны»

В своей блестящей работе «18 брюмера Луи Бонапарта» Карл Маркс пишет: «История повторяется первый раз в виде трагедии, второй раз в виде фарса. Новое всегда рядится в старые одежды». История физики конца 20-х гг. дает тому яркие примеры. Старое представление о неуничтожимых и несотворимых частицах заставляло творцов новой физики облекать свои идеи в весьма причудливую форму. Одну такую конструкцию — море Дирака — мы только что обсудили. Другой пример — теория строения атомного ядра, выдвигавшаяся в то время.

Можно было объяснить α -радиоактивность вылетом из радиоактивного ядра α -частицы, т. е. вылетом комплекса из двух нейтронов и двух протонов, которые раньше существовали в ядре. В случае β -радиоактивности такое представление приводило к тяжелому противоречию. В духе этого представления следовало считать, что вылетающие из ядра β -частицы — электроны до распада должны были находиться в ядре. Существование электронов в ядре требовалось и теорией структуры ядра. Еще в 1814 г. Прout высказал догадку о существовании *протона* — частицы, определяющей массу атома. Эта гипотеза объясняла, почему массы ядер кратны целым числам*). И так, согласно Прoutу ядро состоит из протонов. Их суммарная масса и есть масса ядра, т. е. с точностью до дефекта массы, обусловленного энергией связи составляющих ядра, равна сумме масс протонов. После открытия протона эта гипотеза получила и экспериментальное подтверждение. Но для всех ядер (кроме ядра водорода — самого протона) сумма зарядов протонов, составляющих ядро, оказывалась больше, чем заряд ядра, равный числу электронов атома. Заряд части протонов должен был быть как-то скомпенсирован. Предполагалось, что β -частицы, т. е. электроны, должны находиться в ядре и компенсировать

*) Заметим, что гипотеза Прoutа получила подтверждение, когда были открыты изотопы. Так, например, атомная масса хлора 35,5 сильно отличалась от целого числа — однако, оказалось, что хлор состоит из двух изотопов, одного с атомным числом 37 и другого 35. Для отдельных изотопов отличие атомной массы от целого числа мало, гораздо меньше, чем у средней атомной массы.

своими отрицательными зарядами положительные заряды избыточных протонов. Но тут же — после создания квантовой механики — возникла проблема: легкие электроны должны были быть локализованы в малом объеме ядра. Принцип неопределенности приводил при такой локализации электронов к столь большой неопределенности их импульса, что становилось совсем непонятно, как при таких больших импульсах электроны вообще остаются в ядре. Проблема ядерных электронов становилась катастрофической. Возникла и другая неразрешимая проблема, менее яркая для неспециалиста, но столь же острая. Можно определить спин ядра. Он будет складываться из спинов и вращательных моментов отдельных составляющих ядра. Вращательный момент в единицах \hbar всегда целое число, а сумма спинов составляющих со спином $1/2$ (в единицах \hbar) будет целым или полуцелым числом в зависимости от того, четным или нечетным является число составляющих.

Таким образом, спин ядра является целым или полуцелым числом в единицах \hbar в зависимости от четности числа составляющих.

У ядра азота атомная масса 14. Это ядро должно состоять из 14 протонов. Заряд ядра атома 7. Заряд 7 из 14 протонов должен быть скомпенсирован 7 электронами, которые также должны входить в состав ядра. Поэтому в ядро азота должны входить 7 электронов и 14 протонов. Итого 21 частица. Число составляющих нечетное, поэтому спин ядра азота должен был быть полуцелым. А опыты указывали, что этот спин целочисленный. Возникла «азотная катастрофа».

Еще в 1920 г., обсуждая в своей лекции в Королевском обществе гипотезу о наличии электрона в составе ядра, Резерфорд высказывал мысль о возможности существования «атома» с массой равной единице и зарядом ядра равным нулю. В духе гипотезы «ядерных электронов» такое образование представлялось вполне возможным. Раз электроны в ядре атома компенсируют заряд части протонов ядра, почему не быть полной компенсации?

В том же 1920 г. гипотезу о существовании такого «Н-атома» высказали Харкинс в США и Мэссон в Австрии. Вскоре появился и термин «нейтрон» для обозначения электрически нейтральной системы связанных в ядре протона и электрона. Ясно, что су-

уществование такой системы не спасло бы от азотной катастрофы, так как ее полный спин был бы целочисленный. Но неправильная идея об «Н-атоме» (о нейтроне с целочисленным спином) стимулировала его поиск и привела к открытию настоящего нейтрона. Этот нейтрон в чем-то похож на «Н-атом», но во многом от него отличается: он — элементарная частица со спином $1/2$.

Ученик Резерфорда Чедвик предложил искать «нейтроны», образующиеся при бомбардировке α -частицами ядер алюминия. В 1929 г. Резерфорд вместе с Чедвиком предпринял попытку экспериментального обнаружения нейтрона.

Открытие нейтрона датируют 1932 годом, хотя наблюдался нейтрон и раньше. В 1930 г. Боте и Беккер в Германии обнаружили необычайно жесткое проникающее излучение*), образующееся при бомбардировке бериллия α -частицами. Они приписали эффект γ -излучению высокой энергии. В 1931, 1932 гг. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри исследовали это проникающее излучение и установили, что его взаимодействие с водородсодержащим веществом приводит к появлению протонов высокой энергии. Если бы это было γ -излучение, то протоны такой высокой энергии не могли бы образоваться. Жолио-Кюри предполагал, что открыт новый вид взаимодействия магнитного поля с веществом. Но Чедвик интерпретировал результаты их опытов иначе: «Эти экспериментальные результаты очень трудно объяснить на основании гипотезы, что излучение бериллия представляет собой квантовое**) излучение, но они непосредственно вытекают из предположения, что излучение состоит из частиц, которые имеют массу, приблизительно равную массе протона, но не имеют заряда». Оценка массы нейтрона подтверждалась измерениями пробегаываемых нейтронами протонов.

«Если бы мы с женой читали лекцию Резерфорда 1920 г., то вероятно, сами бы идентифицировали нейтрон», — отмечал впоследствии Фредерик Жолио. По-

*) Жестким называли излучение, почти без ослабления прошедшее через слой свинца в несколько миллиметров толщиной. Так характеризовали в начале века энергию («жесткость») рентгеновского излучения и еще более энергичных фотонов — гамма-излучения.

**) Речь идет об электромагнитных квантах.

мимо непосредственно наблюдения нового явления необходима была психологическая готовность его воспринять.

Необходимо было и общее физическое чутье к перспективам, которые новое явление открывало. О том, что А. Ф. Иоффе обладал таким чутьем, свидетельствует резолюция семинара, состоявшегося в Физико-техническом институте по получении телеграммы от Чедвика об открытии нейтрона. Эта резолюция нашла отражение в телеграмме, посланной Чедвику, что коллектив ФТИ, возглавляемый А. Ф. Иоффе, включается в исследования физики нейтронов. Иоффе, не занимавшийся лично частицами и ядром, проявил огромную интуицию и почувствовал общечеловеческое значение открытия нейтрона.

Нейтроны не нуждаются в преодолении кулоновского энергетического барьера для осуществления ядерных реакций. Поэтому, именно открытие нейтронов заложило основу атомной энергетики со всеми ее великими и ужасными следствиями. Это открытие радикально изменило творческую биографию и личную судьбу многих физиков.

Нейтрино

К началу 30-х гг. в физике возникла серьезная проблема, связанная с испусканием электронов при β -распаде. В этом процессе наблюдалось постоянное нарушение закона сохранения энергии: энергия электронов не была фиксированной, равной разности энергий покоя начального и конечного ядер E_{max} . В пределах от $E_0 = mc^2$ до максимального значения E_{max} вылетающие электроны обладали самыми разными значениями энергий — наблюдался непрерывный спектр энергий этих частиц. Это было совсем удивительно, особенно после того, как установили, что уменьшение энергии электронов по сравнению с ожидаемой величиной нельзя приписать взаимодействию электронов с электронами атома. Возникла проблема несохранения энергии в β -распаде.

Из закона сохранения энергии следовало, что электроны должны вылетать со строго определенной энергией, равной разности энергий покоя начального и конечного ядер. На опыте электроны никогда не обладали этой энергией, наблюдался непрерывный