

50 лет открытия нейтрона

К ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ НЕЙТРОНА

Л. А. ГЛЕБОВ, А. А. ШАРЦ, С. И. ЛАРИН,
Д. Н. ТРИФОНОВ

В истории открытия нейтрона можно выделить два периода. Первый из них — предыстория открытия — включает появление гипотезы о существовании нейтральной частицы (или нейтрального образования из протона и электрона) в ядрах, теоретические построения и поисковые экспериментальные исследования. Второй период включает исследования, непосредственно приведшие к открытию нейтрона.

В настоящей статье главное внимание уделяется работам, не получившим до сих пор достаточного освещения в историко-физической литературе или совсем не рассматривавшимся в ней. Что касается более известных исследований, то мы будем стараться уточнить место некоторых из них в развитии ядерной физики.

Предыстория открытия нейтрона, период догадок, гипотез и предварительных поисковых исследований менее известны; поэтому на ней мы остановимся подробнее.

1. Предыстория открытия нейтрона

Общеизвестно, что открытие нейтрона было совершено в 1932 г. Джеймсом Чадвиком. Здесь же мы будем больше говорить об исследователях, которые поставили эту проблему, подготовили это открытие и без работ которых не мог быть сделан окончательный шаг. При этом следует сразу же отметить постоянные многолетние усилия Чадвика по поиску нейтрона. Еще в 1912 г. Чадвик впервые обнаружил сильное проникающее излучение, возникающее при облучении ядер легких элементов α -частицами; исследование именно этого излучения в конечном счете привело к открытию нейтрона. Он писал: «Эксперименты были выполнены с использованием эманации, содержащейся в стеклянной трубке, достаточно тонкой, чтобы пропускать α -лучи, и было найдено, что измеримое количество γ -лучей несомненно было вызвано ударами α -лучей» [1, с. 600].

В историко-научной литературе широко распространено мнение, что идея нейтрона впервые была высказана Резерфордом в его известной Бейкерианской лекции 3 июня, опубликованной в июле 1920 г. [2]. Однако еще в феврале 1920 г. в «Physical Review» была опубликована статья американского химика В. Харкинса; в этой, а также в более ранних работах Харкинса, как будет показано ниже, тоже содержалась идея нейтрона. Резерфорд должен был знать об этой работе. Но в упомянутой лекции он вообще не ссылается на работы других авторов. Ближайший сотрудник Резерфорда Н. Фезер в своих воспоминаниях 1960 г. [3, с. 261] указывает, что независимо от Резерфорда почти в то же самое время аналогичные идеи разрабатывались О. Мессоном в Австралии и В. Харкинсом в США. Мессон прислал свою статью Резерфорду для обсуждения, и она появилась в печати в феврале 1921 г. с

примечанием Резерфорда, в котором он указывает на существование интересной работы Харкинса.

О. Мессон в качестве основных структурных единиц ядра рассматривает группы, состоящие из двух протонов и электрона (соответствующие дейтронам), и группы, состоящие из протонов и электронов (соответствующие нейтронам) [4, с. 282, 283]. Фезер пишет, что «присылка статьи Мессона была несколько обременительной для Резерфорда, но давала ему возможность написать примечание к ней, чтобы отдать должное ссылкой на параллельную работу Харкинса, которая не была им упущена. Затруднение возникло из того факта, что Резерфорд уже дал отчет о своих умозрительных построениях в его Бейкеррианской лекции» [3, с. 261].

Что касается Харкинса, то в биографии Резерфорда Фезер [5] указывает, что Харкинс сам написал Резерфорду 6 декабря 1920 г. длинное письмо, в котором, в частности, сказано: «Мне было очень интересно отметить, что Вы рассмотрели возможность существования элемента нулевого атомного номера в особенности потому, что я сделал это предположение в статье, посланной в „Physical Review“ более чем год тому назад. Было бы очень интересно, если бы Вы могли обнаружить такие частицы, которые едва ли могут быть очень распространены на земной поверхности» [5, с. 163].

К этому следует добавить, что под атомом нулевого номера Харкинс в своих работах понимал любое ядро с нулевым электрическим зарядом, состоящее из протонов и такого же числа внутриядерных электронов; такое ядро вследствие своей нейтральности не должно иметь электронной оболочки. Например, в статье, представленной в «Journal of American Chemical Society» 12 апреля 1920 г., он писал: «Атомы нулевого атомного номера могут существовать и играть важную роль в построении атома. Такие атомы могли бы иметь массы 4, 3, 2 и 1 и, возможно, другие значения, и они не должны содержать внеядерных электронов, а потому не должны иметь химических и почти ни одного из обычных физических свойств, кроме массы» [6, с. 1966].

Еще раньше в работе, представленной в «Physical Review» в ноябре 1919 г. и опубликованной в феврале 1920 г., Харкинс для объяснения существования изотопов предполагает, что ядра элементов содержат, кроме ядер гелия (α), ядер водорода (η) и электронов (β), еще частицы μ , представляющие собой группу ($\eta_2\beta_2$). «Если эта μ -частица, — пишет Харкинс, — существует изолированно, то она образует элемент нулевого атомного номера» [7, с. 88]. Основанием для предположения о существовании μ -частицы Харкинс считает факт наличия двух радиоактивных рядов — урана и тория, в каждый из которых входят изотопы одних и тех же элементов, отличающиеся массовым числом: изотопы с массовым числом типа $4n$ в случае ториевого ряда и типа $4n+2$ — уранового¹.

Мы хотим обратить внимание на то, что Харкинс раньше, чем это сделал Резерфорд, детально развил и опубликовал идею нейтрона как частицы, представляющей собой тесно связанные протон и электрон.

Соображения, на которых основывается Харкинс, весьма интересны. Начиная с 1915 г. он занимался классификацией ядер [9]. Харкинс связывал различную распространенность элементов в природе с устойчивостью ядер их атомов; таким путем он определил наиболее устойчивые элементы. Опираясь на эти данные, он в течение многих лет разрабатывал, все совершенствуя, классификацию ядер, исходя из представления, что составные части ядер — протоны и электроны — группируются не только в α -частицы, но и в другие устойчивые образования, из которых могут быть построены все атомные ядра.

¹ Подробнее об исследованиях Харкинса, относящихся к μ -частицам, см. в работе Ю. И. Лисневского [8].

Следует обратить внимание на то, что в процессе работы над этой классификацией Харкинс обнаружил, что из нее выпадает бериллий, и, основываясь на этом, пришел к идее нейтрона. В работе [7], представленной в журнал в окончательном варианте 14 ноября 1919 г. и опубликованной в феврале 1920 г. (т. е. задолго до того, как Резерфорд прочитал свою Бейкерманскую лекцию), Харкинс сформулировал постулаты, на которых покоится его классификация (всего 17 постулатов). При этом 12-й постулат гласит: «От трех до девяти ядер гелия могут объединяться без других связующих частиц; однако два ядра гелия одни не могут образовать стабильную структуру, исключая случай добавления **одного положительного² и одного отрицательного электронов** (ядро бериллия)» [7, с. 82] (подчеркнуто нами.— *Авторы*).

В примечании на с. 75 этой работы, видимо добавленном в окончательный текст, Харкинс говорит о нейтроне как о свободной частице: «Интересно отметить, что если в этих экспериментах (экспериментах Резерфорда по расщеплению азота.— *Авторы*) группа α_3 остается неповрежденной и выбрасывается $\eta_2\beta$ (выше в тексте пояснено: „... η^+ означает ядро атома водорода, а β^- — отрицательный электрон”), то атом формируется как углерод; если же выбрасывается $\eta^+\beta^-$ (т. е. нейтрон.— *Авторы*), то остающееся ядро есть изотоп азота с атомным весом 13, в то время как если испускается η^+ , то остающееся ядро будет изотопом углерода с атомным весом 13». Как теперь известно, в действительности осуществляется последняя из рассмотренных возможностей, и примечательно, что Харкинс ее не упустил из виду.

У Харкинса, как, впрочем, и у Резерфорда, не было твердой уверенности в существовании свободного нейтрона [10, с. 106]: «Нейтрон,— писал он,— ...может не существовать, так как отношение числа отрицательных электронов к числу положительных в нейтроне есть единица, что аномально велико для сложного ядра». Но в конце концов Харкинс пришел к заключению, что «элементарный нейтрон» (*ne*) представляет собой предельный случай, который вполне может быть исключением из правила» [11, с. 1288]. Правило, о котором здесь упоминает Харкинс, было сформулировано им так: «...отношение $\frac{\text{число отрицательных электронов}}{\text{число положительных электронов}}$ имеет фундаментальную важность в определении стабильности сложных ядер» [6, с. 1964].

К окончательному выводу о существовании нейтрона в ядре Харкинс пришел, по-видимому, в работе, представленной в «Journal of American Chemical Society» 12 апреля 1920 г. [6], в которой один из параграфов озаглавлен: «Группы, ответственные за существование изотопов (веса 4, 3, 2 и 1)» (подчеркнуто нами.— *Авторы*). В частности, в том параграфе он пишет: «...невероятно, что некоторые изотопы атомов формируются посредством прибавления группы ($\eta^+\beta^-$)». Здесь Харкинс в пользу существования нейтрона добавляет новую аргументацию, связанную с наличием изотопов, отличающихся друг от друга на одну единицу атомного веса. Значение этой работы подчеркивается самим Харкинсом тем, что впоследствии, в 1932 г., обозревая историю открытия нейтрона, он писал: «Существование нейтрона и его свойства были предсказаны в 1920 г. Харкинсом (12 апреля) и Резерфордом (3 июня)» [12, с. 914]. А несколько выше в этой же статье Харкинс указывает, что идея нейтрона возникла у него в связи с изучением ядра бериллия еще в 1915 г.: «Строение ядра бериллия было определено зимой 1915 г. в виде двух α -частиц, объединенных конденсированным ядерным водородным атомом, или нейтроном». Действительно, в работе 1915 г. Харкинс, обращая внимание на выпадающий из его классификации случай бериллия

² В то время Харкинс, как и другие физики, под положительным электроном понимал нынешний протон.

(если не принять существование «нейтрона»), приходит к выводу, что в ядре бериллия и, возможно, в других еще не открытых изотопах «содержится ядро водорода, которого нет в ядрах гелия, из которых построен атом, так что еще остается возможность, хотя вероятность этого и мала, что ядра водорода могут быть освобождены из атомов» [9, с. 1393]. Из таблицы, приведенной в этой статье на с. 1391, видно, что под «ядром» водорода здесь следует понимать нейтральное образование из протона и электрона.

Нам представляется, что исследования Харкинса в области классификации ядер, приведшие к гипотезе существования нейтрона, имеют большое значение не только потому, что он был первым. Чрезвычайно важно, что им, по существу, было предсказано на основе его классификации, что в ядре бериллий-9 один из нейтронов является более обособленным. Это подтверждалось впоследствии и тем фактом, что облучаемый α -частицами бериллий является наиболее эффективным источником нейтронов.

Но было бы неверным утверждать на этом основании, что работы Харкинса имели для открытия нейтрона большее значение, чем труды Резерфорда и его учеников. Прав был Резерфорд, когда в письме к Болтвуду от 27 февраля 1921 г. заметил: «Чрезвычайно легко писать об этих вопросах, но чрезвычайно трудно получить экспериментальное доказательство для формирования правильного заключения» [5, с. 163].

О том, насколько осторожно и ответственно он подходил к выводам о возможности существования новых частиц, может служить следующий интересный пример. Еще в 1922 г. в 13-й Кельвиновской лекции Резерфорд выдвинул предположение о возможности существования позитрона. «Априори может быть предположено,— говорил он,— что существует положительный электрон, соответствующий отрицательному электрону и имеющий такую же малую массу. Нет, однако, ни малейшего доказательства существования такого двойника. Так как можно предполагать, что положительная единица электричества, связанная с массой много меньшей, чем масса ядра водорода, может быть открыта, то, по видимому, желательнее не предрешать вопрос, называя ядро водорода положительным электроном. По этой причине, а также ради краткости предлагается, чтобы единице положительного электричества, связанной в свободном состоянии с массой ядра водорода, а именно около 1,007 (при приписывании кислороду массы 16), было дано название протон» [13, с. 183].

Резерфорд пришел к идее нейтрона на основе проведенных к лету 1920 г. Ф. Астоном экспериментов [14], согласно которым массы всех изотопов выражаются целыми числами, за исключением водорода, масса которого равна 1,008. Резерфорд сделал вывод, что «либо группировка ядер водорода и электронов такова, что средняя электромагнитная масса близка к единице, либо (что более вероятно) вторичные единицы, из которых главным образом построен атом ... имеют массу, близкую к целому числу, если массу кислорода принять за 16» [2, с. 312]. Основываясь на том, что масса этой структуры равна 1, а не 1,008, Резерфорд делает вывод, что электрон в этой структуре связан с ядром намного сильнее, чем в атоме, и образует «нечто вроде нейтрального дублета» (там же).

Огромной заслугой Резерфорда является то, что он вдохновил своих сотрудников на экспериментальные поиски нейтрона, которые и привели в конечном счете к его открытию. Самый упорный из них, Чадвик, писал об этих исследованиях в 1960 г. в своих воспоминаниях [15, с. 6]: «Сразу после упомянутой Бейкерманской лекции Резерфорд попросил Дж. Глэссона приступить к поискам нейтрона при пропускании электрического разряда через водород. А чуть позже подобный эксперимент проделал Дж. Робертс».

Глэссон использовал ионизационную камеру такого типа, какие применялись в то время для изучения рентгеновских лучей. Кроме того, использовался экран из сульфида цинка, поставленный вплотную к окну разрядной трубки, который рассматривался в микроскоп. Вывод Глэссона таков: «Не было получено никаких свидетельств радиации, пронизывающей более чем 0,05 см свинца» [16, с. 600].

Весьма остроумную попытку обнаружить процесс объединения протона и электрона в нейтрон при электрическом разряде в водороде предпринял в 1922 г. Робертс. «Эксперимент,— писал он,— был предложен сэром Э. Резерфордом как возможная проверка гипотезы, согласно которой он предполагал, что при подходящих условиях может встречаться гораздо более тесная комбинация электрона и ядра водорода, чем та, которая существует в атоме водорода» [17, с. 72]. Предполагалось, что такие условия реализуются в газоразрядной трубке с водородом. «Тесная связь электронов и положительных ядер вызывает уменьшение массы, обусловленное взаимодействием полей. Такое уменьшение массы можно ожидать, если имеет место предполагаемая тесная комбинация простого ядра водорода и электрона. Мы ожидаем, что это уменьшение массы будет сопровождаться выделением энергии» (там же). И далее: «...можно ожидать, что от такой разрядной трубки будет выделяться больше тепла, чем следует ожидать от подвода электрической энергии, измеряемой как произведение тока на разность потенциалов.

Чтобы испытать, действительно ли этот случай имеет место, разрядная трубка была помещена в калориметр; при этом сравнивались подводимая энергия и выделяемое тепло. Было обнаружено, что эти две величины согласуются не хуже чем до $1/2\%$, что равно ошибке эксперимента» [17, с. 73].

Эстафету исследований подхватил Дж. Чадвик. В воспоминаниях 1960 г. он пишет: «В 1923 г. с одобрения Резерфорда я попытался обнаружить γ -излучение как результат образования нейтронов в большой массе водорода, применяя в качестве средств обнаружения ионизационную камеру и точечный счетчик. Спустя несколько лет, в 1928 г., Гейгер и Мюллер изобрели прибор, в настоящее время повсюду известный как счетчик Гейгера, который чрезвычайно увеличил возможность обнаружения γ -излучения. Гейгер любезно прислал мне два своих счетчика, а также инструкции. Тотчас же Резерфорд и я воспользовались этими приборами для повторения эксперимента с водородом. Мы шли на все уловки, чтобы найти хоть какие-нибудь следы нейтрона» [15, с. 6].

Интересно, что уже на ранних стадиях исследований Чадвик особое внимание уделял бериллию. «Это вещество,— пишет он,— возбуждало во мне интерес на протяжении ряда лет. Я обстреливал бериллий α - и β -частицами, γ -лучами, используя обычный сцинтилляционный метод наблюдения» [15, с. 7].

В тех же воспоминаниях Чадвик пишет, что позднее, когда был разработан ламповый усилитель и когда удалось достать более мощный полониевый источник, «с Констеблем и Поллардом я снова исследовал бериллий и в какой-то короткий, но волнующий миг мы думали, что обнаружили признаки нейтрона. Но затем эти признаки исчезли. Я все еще бродил в темноте» (там же).

В 1924—1927 гг. Резерфорд вернулся к идее нейтрона в связи с попыткой построить теорию тяжелых ядер. В 1927 г. он так разъяснял свою точку зрения: «Мы придерживаемся концепции ядерной структуры, в которой центральное заряженное ядро окружено некоторым числом незаряженных частиц. В выступлении во Франклиновском институте в 1924 г. я выдвинул идею, что центральное ядро является тесно упорядоченным образованием из α -частиц и электронов в полукристаллическом состоянии; я показал, что некоторые простые структуры находятся в прекрасном согласии с зарядами и массами отдельных атомов. Какую

бы точку зрения по этому вопросу мы ни приняли, я склонен верить, что центральное ядро тяжелых элементов является очень компактной структурой, занимающей очень малый объем радиуса порядка $1 \cdot 10^{-12}$ см. Нейтральные спутники, циркулирующие вокруг этого ядра, могут простираться до расстояний, больших по сравнению с линейными размерами главного ядра» [18, с. 360].

В том же 1927 г. в другой статье [19, с. 605] Резерфорд уже прямо упоминает о нейтроне: «Из изучения Астоном относительных масс изотопов не кажется неправдоподобным, что в сильном электрическом поле центрального ядра могут существовать нейтральные спутники с массой 2 или 3 или даже 1 — нейтрон».

Чрезвычайно интересной на пути к открытию нейтрона была работа Резерфорда и Чадвика, опубликованная в 1929 г. [20]. В воспоминаниях 1960 г. Чадвик пишет: «Во время нашей работы по расщеплению легких элементов с помощью α -частиц Резерфорд и я не забывали о возможности испускания нейтронов, особенно из тех элементов, которые не испускали протонов. Мы искали слабые сцинтилляционные вспышки, вызванные радиацией, не отклоняемой магнитным полем. Единственная специальная ссылка на поиски нейтрона в процессе этих работ была сделана в статье, опубликованной в 1929 г. спустя несколько лет после экспериментов» [15, с. 7].

В этой работе Резерфорд и Чадвик облучали алюминий α -частицами от RaC' . Как известно, при достаточно большой энергии α -частиц (>4 Мэв) здесь действительно наблюдаются нейтроны. Резерфорд и Чадвик исследовали экспериментально обнаруженный в 1925 г. Блекеттом в камере Вильсона тип реакции, в которой падающая частица, попадая в ядро, поглощается им, а из перестроенного ядра вылетает протон. При этом само ядро, испытав отдачу, также движется в определенном направлении. Направления движения протона и перестроенного ядра определяются законами сохранения с учетом того, что часть энергии идет на перестройку ядра.

Проводя такие опыты с алюминием и наблюдая только протоны, вылетающие перпендикулярно к направлению падающих α -частиц, Резерфорд и Чадвик пришли к выводу, что «хотя условия эксперимента были разумными, результаты находятся в резко противоречии с тем, что мы ожидали из нашего предположения о таком механизме расщепления, при котором протон вылетает в точно определенном направлении с определенной скоростью» [20, с. 221]. Они решили проверить, не уносят ли часть энергии вылетающие из ядра нейтроны, которые вследствие малой ионизирующей способности предположительно могли составлять длиннопробежную часть испускаемого при этом излучения. (Аналогичным образом Паули позднее ввел гипотетическую частицу «нейтрино», уносящую часть энергии и импульса при β -распаде).

Для проверки этого предположения был поставлен следующий опыт. На достаточно большом от облучаемого α -частицами алюминия расстоянии, чтобы оставалась только та часть излучения, относительно которой можно было предполагать, что она состоит из нейтронов, располагалась щель, через которую пропускался узкий пучок исследуемого излучения. И было обнаружено, что «при приложении сильного магнитного поля частицы отклонялись примерно в такой же степени, в какой должны были отклоняться протоны, движущиеся со скоростью, соответствующей дальности их пробега. Таким образом, нет никаких оснований предполагать, что наблюдавшиеся в предшествующих экспериментах частицы не все были протонами» (там же).

Итак, в этих исследованиях Резерфорд и Чадвик еще не получили доказательств существования нейтрона. И только после обстоятельных исследований Г. Вебстера и обнаружения Ф. и И. Жолио-Кюри способности проникающего «бериллиевого» излучения выбивать протоны из

водородсодержащих веществ Чадвик, выполнив добавочные эксперименты, пришел к выводу, что в наблюдаемых экспериментах обнаруживает себя нейтрон.

2. Установление факта существования нейтрона

Эксперименты, которые в действительности привели к открытию нейтрона, были связаны с исследованием проникающего излучения, возникающего при облучении легких элементов α -частицами. В этой связи выше уже упоминалась работа Чадвика 1912 г.

В 1921 г. Ф. Слэтер предпринял исследование с целью «выяснить, действительно ли испускается какое-либо проникающее излучение, когда α -частицы затормаживаются веществом» [21, с. 905]. И он действительно обнаружил такое излучение при бомбардировке олова и свинца α -частицами.

Работа Слэтера привлекла внимание немецких ученых В. Боте и Г. Беккера [22], которые в 1930 г. показали существование проникающего излучения для целого ряда легких элементов, обстреливаемых α -частицами полония. Особенно интенсивным это излучение было в случае бериллия—на порядок выше, чем в случае следующего за ним бора. «Новое излучение имеет проникающую способность того же порядка величины, что и самые жесткие γ -лучи. Однако мы полагаем возможным заключить, что энергия $h\nu$ ни у бора, ни у бериллия не превосходит энергии α -частицы» [22, с. 300].

Эти работы Боте и Беккера заинтересовали Вебстера в Англии и супругов Жолио-Кюри во Франции.

В работе, представленной Чадвиком в журнал «Proceedings of Royal Society» 19 января 1932 г., сотрудник Чадвика Г. Вебстер очень близко подошел к открытию нейтрона. Вебстер провел систематическое и детальное исследование проникающего излучения, возбуждаемого α -частицами в легких элементах. При этом он учитывал возможность существования нейтрона как очень тесной комбинации протона и электрона; но ему все время мешало предположение о возможности обнаружить нейтрон по производимой им ионизации. На эту возможность указывали теоретики Р. Лангер и Н. Розен, рассматривавшие теоретическую модель нейтрона [23]. Вебстер ожидал, что «можно было бы обнаружить эти частицы с помощью камеры Вильсона. М-р Чэмпион любезно сделал 50 фотографий в камере, настроенной на следы β -лучей; обстреливаемый α -частицами бериллий помещался вблизи камеры... Если бы частицы производили 10 ионов на 1 см пути, то следовало бы ожидать, что на фотографиях будет зафиксировано около 10 следов. Так что справедливо предполагать, во всяком случае в настоящее время, что вторичное излучение является электромагнитным по своей природе» [24, с. 440].

Такие рассуждения, казалось бы, указывали на отсутствие нейтронов в этих процессах. Тем не менее Вебстер, переходя к обсуждению излучения, возникающего в бериллии под действием α -частиц, относительно которого он указывает, что здесь «были выполнены наиболее аккуратные измерения» [24, с. 447], при истолковании опытных данных приходит к результату, который мог привести к открытию нейтрона. В его работе на с. 437 приведена таблица коэффициентов поглощения нового излучения в свинце, железе и алюминии, из которой видно, что разница в проникающей способности в прямом и обратном (относительно движения α -частиц) направлениях составляет свыше 10%. В связи с этим Вебстер пишет: «Однако существует серьезное расхождение с теорией в разнице между излучением, испущенным в обратном направлении, и излучением, испущенным в прямом направлении, поскольку наблюдения проводились при практически идентичных условиях. Теория действи-

тельно предсказывает слегка более жесткое излучение в прямом направлении, нежели в обратном ($7,6 \cdot 10^6$ эВ против $7,4$), но этим не может быть объяснена наблюдавшаяся разница в коэффициентах поглощения» [24, с. 447].

Правда, Вебстер пытался развивать гипотезу о двухкомпонентном излучении, которая искусственным образом объясняла различие проникающей способности в прямом и обратном направлениях, однако он заканчивает свои рассуждения словами: «Не видно возможности получить какое-либо теоретическое подтверждение этих предположений» [24, с. 448].

Таким образом, Вебстер фактически отказывается от гипотезы, по которой излучение из легких элементов по своей природе электромагнитное, но не приходит еще к выводу об испускании нейтронов.

Однако чтобы сделать этот последний шаг, не требовалось значительных усилий, поскольку очевидно, что при одинаковой энергии фотон имеет гораздо меньший импульс E/c , чем частица, имеющая массу покоя и движущаяся с малой скоростью $v \ll c$, импульс которой равен $2E/v$.

Сделать этот шаг Резерфорду и Чадвику было легче, чем Вебстеру, поскольку они еще в 1922 г. столкнулись с аналогичной ситуацией для протонов [25], когда обнаружили, что прямой пробег протонов, испущенных азотом под действием α -частиц с 7-сантиметровым пробегом, составляет 40 см, в то время как в обратном — всего 18 см.

Результат, полученный Вебстером, наряду с работами супругов Жоллио-Кюри, которые будут рассмотрены ниже, явился толчком для работ Чадвика, в которых было установлено существование нейтрона. Чадвик указывает на это в своих воспоминаниях 1960 г. (но не в первой оригинальной статье об открытии нейтрона).

Интересно, что ровно через две недели после опубликования Чадвиком статьи об открытии нейтрона Вебстер опубликовал заметку под тем же названием («Возможность существования нейтрона»), в которой указывает, что обнаруженное им различие для излучения в прямом и обратном направлениях является подтверждением гипотезы существования нейтрона; при этом он добавляет, что «это наводит на мысль, что излучение из бора и фтора так же, как из бериллия, состоит, по крайней мере частично, из нейтронов» [26, с. 402].

Таким образом, сам Вебстер обратил внимание на то, что его опыты свидетельствуют в пользу существования нейтрона.

Поворотным пунктом в истории открытия нейтрона явилась работа Ирен и Фредерика Жоллио-Кюри [27], которая была доложена в Парижской академии 11 января 1932 г. После появления этой работы нейтрон должен был быть открыт если не Чадвиком, как это произошло в действительности, то самими супругами Жоллио-Кюри или кем-нибудь из исследователей, анализировавших результаты этой работы.

Как известно, в своей работе супруги Жоллио-Кюри пришли к выводу, что бериллиевое проникающее излучение выбивает ядра водорода из водородосодержащих веществ. Следует подчеркнуть, что в этой работе авторы не считали возможным дать свою интерпретацию наблюдаемого явления. Они писали: «Объяснение этого явления осложняется тем, что энергию фотонов, испускаемых бериллием и бором, можно оценить лишь очень приближенно. Если предположить, что фотоны могут сообщать протонам часть своей энергии в процессе, аналогичном испусканию комптоновских электронов, то оказывается, что энергия излучения бериллия и бора должна быть порядка $50 \cdot 10^6$ и $35 \cdot 10^6$ эВ соответственно. Заметное расхождение между этими значениями и значениями, которые мы приводили ранее (от 16 до $20 \cdot 10^6$ и $11 \cdot 10^6$ эВ), не является достаточным основанием для того, чтобы отбросить указанное предположение, так как возможны значительные ошибки при оценке энергии

квантов очень сильно проникающих излучений по коэффициенту поглощения этих излучений.

Какова бы ни была интерпретация, которая может быть дана этому явлению, весьма вероятно, что оно имеет место для всех излучений с большой энергией квантов, в частности для космических лучей, если по своей природе это электромагнитные лучи.

Следовательно, настоящие опыты позволяют установить, что электромагнитное излучение высокой частоты способно освобождать в водородосодержащих веществах протоны, сообщая им большую скорость» [27, с. 177].

Отсюда видно, что главным в этой статье является не выяснение характера проникающего излучения, которое авторы статьи вместе с предыдущими исследователями принимают за γ -излучение, а установление того факта, что выбиваемые этим излучением из водородосодержащих веществ частицы являются протонами.

Следует заметить, что 22 февраля 1932 г., т. е. еще до появления заметки Чадвика в «Nature» об открытии нейтрона, супруги Жолио-Кюри доложили в Академии, а затем опубликовали [28] сообщение об опытах с камерой Вильсона, наполненной гелием, в которой они наблюдали соударения ядер гелия с излучением из бериллия. Но никаких радикальных выводов супруги Жолио-Кюри здесь также не сделали.

Жолио-Кюри продолжал опыты в этом направлении. 2 апреля 1932 г. он пишет в письме Д. В. Скобельцыну: «Прежде всего сообщаю, что с 12 марта наша семья пополнилась сыном. Мадам Жолио чувствует себя хорошо, но все еще отдыхает в Париже. Последние месяцы мы много работали, и перед отъездом в Бретань я очень устал. Пришлось ускорить постановку опытов, потому что чувствовать, как тебя опережают другие, которые немедленно повторяют твои опыты, довольно неприятно. В Париже Морис де Бройль вместе с Тибо и двумя другими сотрудниками немедленно взялся за осуществление подобной идеи. В Кембридже Чадвик также ждал недолго. К тому же он высказал соблазнительную мысль о том, что проникающее излучение полоний + бериллий состоит из нейтронов» [29, с. 32].

Интересно, что упоминаемое в письме общеизвестное сообщение Чадвика об экспериментальном обнаружении нейтрона, опубликованное в «Nature» от 27 февраля 1932 г. (представлено в редакцию журнала 17 февраля), носило название «Возможность существования нейтрона» (подчеркнуто нами. — Авторы). Несмотря на введение гипотезы нейтрона, автор, в частности, пишет: «Следует ожидать, что прохождение нейтрона через вещество во многом должно напоминать прохождение кванта большой энергии, и нелегко сделать окончательный выбор между этими двумя гипотезами» [15, с. 144].

Резерфорд впервые высказал свое отношение к работе Чадвика в Фарадеевской лекции, прочитанной 18 марта 1932 г. Подробно описав опыты Чадвика, он отмечает: «Каким бы ни было окончательное объяснение интересных обнаруженных фактов, если оно обязано квантам излучения, то мы должны отказаться от законов сохранения энергии и импульса при взаимодействии этого излучения с материей. Если мы желаем сохранить эти законы, то гипотеза нейтрона является единственной альтернативой. В любом случае это доказывает, что новые открытия вводят в новую область исследований, которая очень интересна и важна» [41]. Отсюда видно, что для Резерфорда существование нейтрона на этом этапе исследований еще не очевидно.

Современному читателю может показаться, что вышеприведенная альтернатива (либо существование нейтрона, либо отказ от законов сохранения), на которую указывал Резерфорд, равносильна для него утверждению, что имеется одна возможность — существование нейтрона. Однако это не так. Незадолго до открытия нейтрона обсуждался вопрос

о том, что для объяснения законов β -распада, возможно, придется отказаться от закона сохранения энергии, причем на таком отказе настаивали столь авторитетные ученые, как Дж. Дж. Томсон и Н. Бор. Таким образом, результаты Чадвика могли еще рассматриваться также и через призму отказа от законов сохранения. Не останавливаясь далее на этой теме, мы отсылаем читателя к интересной статье Дж. Бромберг [30].

Факт существования нейтрона был признан, пожалуй, только после дискуссии, состоявшейся 28 апреля 1932 г. в Лондонском Королевском обществе. Во вступительном слове к ней Резерфорд еще говорил, что «если гипотеза о нейтронах будет подтверждена опытом, то она будет, очевидно, иметь большое влияние на наше понимание образования ядра и его состава». Однако уже из отчета об этой дискуссии, представленного в «Nature» Эллисом, видно, что только в ходе дискуссии факт существования нейтрона был признан учеными. Эллис указывает, что совокупность всех доказательств, приведенных в этой дискуссии, «оставляет мало сомнений, что нейтрон реально существует и был обнаружен» [31, с. 676].

Следует, однако, помнить, что во всех проведенных к тому времени исследованиях физики подразумевали под нейтроном не «элементарную» в современном смысле слова частицу, а систему, состоящую из протона и электрона, так близко находящихся и так тесно связанных друг с другом, что в изученных явлениях они ведут себя как единая нейтральная частица. Такой «нейтрон» существенно отличается от нейтрона в его современном понимании. Существование «нейтрона» как тесно связанной системы из протона и электрона противоречит принципам квантовой механики; так, его спин должен быть целым (единицей или нулем).

Может быть, именно этим и объясняется скептическая оценка положения вещей, данная в ноябре 1932 г. в письме Н. Бору С. Гаудсмитом: «Странно и прискорбно, что открытие нейтрона не дало каких-либо новых плодотворных идей для продвижения вперед. Во многих отношениях ситуация почти не изменилась по сравнению с Римской конференцией год назад; правда, теперь можно более точно сформулировать имеющиеся трудности» [32, с. 134].

Представление о нейтроне как элементарной частице последовательно проводил Д. Д. Иваненко. В его работе «Гипотеза о роли нейтронов», где была предложена протонно-нейтронная модель ядра, он обратил внимание, в частности, на то, что если считать нейтрон элементарной частицей со спином $1/2$, то окажется, что «в ядрах бериллия нет свободных протонов, а есть только α -частицы и нейтроны» [33, с. 798]. (См. также [42]).

Идею элементарности нейтрона Д. Д. Иваненко отстаивал и в своих последующих работах, в частности в докладе и в выступлениях в дискуссиях на I Всесоюзной конференции по атомному ядру, проходившей в сентябре 1933 г. в Ленинграде [34]. Естественность такой позиции для него вытекала из его предшествующих работ; еще в 1930 г., воспользовавшись идеей П. Дирака о вакууме, заполненном электронами в состояниях с отрицательными энергиями, В. А. Амбарцумян и Д. Д. Иваненко, по-видимому, первыми пришли к мысли, что электрон, не существуя в ядре, может рождаться в процессе ядерных превращений. «Известно, что энергия переходов в ядре часто имеет порядок величины m_0c^2 и даже больше (энергия выброшенных α - и β -лучей и γ -излучения). Совершенно аналогично обычным атомным переходам, при которых энергия может превращаться либо в излучение, либо в энергию возбуждения или ионизации, мы должны в ядре также разграничить различные возможности. Тем более энергия внутриядерных переходов может перевести электрон из отрицательного состояния в положительное и, таким образом, выбросить его из атома» [35, с. 418].

Сам Чадвик только в своей Бейкерианской лекции, прочитанной

25 мая 1933 г., под давлением теоретических аргументов склоняется к идее нейтрона как элементарной частицы (несмотря на то, что экспериментальные аргументы склоняли его к противоположной точке зрения): «...соображения, высказанные на основании знания массы нейтрона, может быть, и говорят в пользу сложного строения нейтрона, но они ни в коем случае не являются окончательными. Наиболее непосредственным доказательством служило бы расщепление нейтрона на протон и электрон при столкновении с каким-нибудь ядром, но как вычисления, так и опыт показывают, что это событие должно быть весьма редким. Некоторые соображения относительно сложного строения нейтрона или протона могут быть выведены из столкновений нейтронов с протонами.

С другой стороны, могут быть высказаны некоторые доводы в пользу того, что нейтрон является элементарной частицей. Согласно современной концепции квантовой механики, водородный атом является единственной возможной комбинацией протона и электрона. Однако энергия упаковки оказывается больше собственной массы электрона, и для описания взаимодействия требуется релятивистская механика. Следующий довод исходит из момента количества движения (спина) электрона... Если нейтрон рассматривать как комбинацию протона с электроном, то последний должен был бы иметь спин, равный нулю, и подчиняться статистике Бозе... Спин ядер легких элементов оказывается совместимым со статистикой, которой они подчиняются, только в случае, если предположить, что нейтрон есть элементарная частица.

Можно воспользоваться и более общим доводом. Если нейтрон является комбинацией протона и электрона, то почему водородный атом не может превратиться в нейтрон с излучением энергии? (Здесь Чадвик, по-видимому, имеет в виду упомянутые выше опыты Робертса.— *Авторы*).

Можно исчерпывающе показать, что такой процесс должен быть крайне редким. Это доказательство представляется мне сильным аргументом в пользу элементарной природы нейтрона. Предстоит еще выяснить эти трудности и, принимая пока для некоторых целей гипотезу сложного строения нейтрона, рассматривать его в других случаях как элементарную единицу структуры ядра» [36].

Если задаться вопросом, как все-таки победила точка зрения на нейтрон как на элементарную частицу, то, на наш взгляд, наиболее правильным будет ответ, который звучит несколько шутливо: сторонники составного нейтрона, в основном экспериментаторы, не находили проявлений его составного характера, а теоретики, используя нейтрон для объяснения свойств ядра, имели дело с нейтроном как элементарной частицей. Это последнее понимание нейтрона вытеснило первое, к нему привыкли. Здесь нашла проявление общая закономерность, которую Гёте сформулировал так: «Ложное обладает тем преимуществом, что о нем можно постоянно болтать, истинное надо сейчас же использовать, иначе оно исчезает» [37, с. 343].

Идея, что электронов нет в ядре и что они рождаются в процессе ядерных превращений, постепенно пробивала себе дорогу, и в 1932 г. В. Гейзенберг уже понимал эту возможность. В своих воспоминаниях 1972 г. В. Вайскопф пишет: «Я помню, что мы сидели в лейпцигском кафе, обращенном входом к плавательному бассейну; В. Гейзенберг смотрел на дверь. Мы рассуждали: как же может быть, что электрон выходит из ядра, если его до этого там не было. В. Гейзенберг сказал: „Все вы делаете неправильные выводы; посмотрите на дверь. Вы видите, что каждый входящий полностью одет и каждый выходящий тоже; делаете ли вы из этого вывод, что и в бассейне пловцы полностью одеты?“» [38, с. 22].

Переход к нейтрону как элементарной частице был труден и для теоретиков. Даже Гейзенберг, для которого в его теории изотопического

спина элементарность нейтрона была необходима, колебался в этом вопросе. Его колебания можно проследить по написанным им в 1932—1933 гг. трем статьям [39]. В § 3 второй статьи, озаглавленной «Свойства нейтрона», он пишет: «...все же требуется подробное теоретическое оправдание, если рассматривать нейтрон с его малым дефектом массы ~1 МэВ как прочную элементарную частицу в ядре, в котором обменные энергии частиц много больше 1 МэВ» [39, с. 163]. Даже в третьей из статей, где Гейзенберг как будто отходит от представления о составном нейтроне, он замечает: «...в тяжелых ядрах для существования радиоактивных элементов, которые испускают β -лучи, при предположении неразложимости нейтронов, и электроны также должны содержаться как элементарные» [39, с. 594] (что, как известно, противоречит принципам квантовой механики.— *Авторы*).

Таким образом, история открытия нейтрона показывает, сколь трудными были шаги, связанные с отказом от привычных представлений, на всех этапах экспериментальных поисков и исследований этой частицы и теоретического осмысления ее природы и роли в строении атомного ядра. Это и естественно, поскольку с этим фундаментальным открытием связан глубокий переворот в понимании структуры материи, приведший к становлению современной физики ядра и элементарных частиц. По существу, вместе с нейтроном в физику вошла фундаментальная идея о превращаемости элементарных частиц.

Открытие нейтрона фактически было подготовлено и осуществлено многими учеными. Пожалуй, точнее, чем обычно пишется об открытии нейтрона в историко-научных трудах, положение вещей отражается словами Э. Ферми, который в своих «Лекциях по атомной физике», прочитанных в 1949 г., сказал: «Нейтрон был открыт примерно в 1932 или 1933 годах в результате работ физиков, начало которым положил физик Боте, продолжили супруги Жолио-Кюри и закончил Чадвик» [40, с. 89].

После всего сказанного особенно понятными становятся слова, которыми Чадвик завершает свои «Воспоминания о поисках нейтрона» [15, с. 9]: «Нет необходимости говорить о моем удовлетворении и восторге в связи с тем, что продолжительные поиски нейтрона в конце концов увенчались успехом. Решающий шаг, однако, был сделан другими. В этом нет ничего необычного: прогресс знания в общем является результатом деятельности многих умов и рук».

Литература

1. *Chadwick J.* The γ -Rays Excited by the β -Rays of Radium.— *Philos. Mag.*, 1912, v. 24, p. 594—600.
2. *Резерфорд Э.* Избранные труды. М.: Наука, 1972.
3. *Fether N.* A History of Neutrons and Nuclei.— *Contemporary Physics*, 1960, v. 1.
4. *Masson O.* The Constitution of Atoms.— *Philos. Mag.*, 1921, v. 41, p. 281—285.
5. *Fether N.* Lord Rutherford. London, 1940.
6. *Harkins W. D.* The Stability of Atoms as Related to the positive and negative Electrons in their Nuclei.— *J. Amer. Chem. Soc.*, 1920, v. 42, p. 1956—1997.
7. *Harkins W. D.* The Nuclei of Atoms and the New Periodic System.— *Phys. Rev.*, 1920, v. 15, p. 73—94.
8. *Лисневский Ю. И.* Канд. дисс., М., 1978.
9. *Harkins W. D., Wilson E. D.* The Structure of Complex Atoms.— *J. Amer. Chem. Soc.*, 1915, v. 37, p. 1383—1396.
10. *Harkins W. D.* The Building of Atoms as Related to Nuclear Abundance and Stability.— *Phys. Rev.*, 1931, v. 37, p. 105—106.
11. *Harkins W. D.* The Periodic System of Atomic Nuclei and the Principle of Regularity and Continuity of Series.— *Phys. Rev.*, 1931, v. 38, p. 1270—1288.
12. *Harkins W. D.* The Neutron, the Element Neutron and a Nuclear Exclusions Principle.— *Phys. Rev.*, 1932, v. 42, p. 914—915.
13. *Rutherford E.* Electricity and Matter.— *Nature*, 1922, v. 110, p. 182—185.
14. *Aston F.* The Mass-Spectra of Chemical Elements.— *Philos. Mag.*, 1920, v. 39, p. 611—627.
15. Цит. по: *Нейтрон* (предыстория, открытие, последствия). М.: Наука, 1975.

16. *Glasson J. L.* Attempts to Detect the Presence of Neutrons in Discharge Tube.— *Philos. Mag.*, 1921, v. 42, p. 596—600.
17. *Roberts J. K.* The Relation between the Evolution of Heat and the Supply of Energy during the Passage of Electric Discharge through the Hydrogen.— *Proc. Roy. Soc. A*, 1922, v. 102, p. 72—88.
18. *Rutherford E.* Atomic Nuclei and Their Transformation.— *Proc. Roy. Soc.*, 1927, v. 39, p. 359—372.
19. *Rutherford E.* The Structure of Radioactive Atom and Origin of the α -Rays.— *Philos. Mag.*, 1927, v. 4, p. 580—605.
20. *Rutherford E., Chadwick J.* Energy Relation in Artificial Disintegration. (E. Rutherford Collected Papers. Cambridge, 1965).
21. *Slater F. P.* The Excitation of γ -Radiation by α -Particles from Radium Emanation.— *Philos. Mag.*, 1921, v. 42, p. 903—923.
22. *Bothe W., Becker H.* Künstliche Erregung von Kern γ -Strahlen.— *Z. Physik*, 1930, Bd 66, S. 289—306.
23. *Langer R. M., Rosen N.* The Neutron.— *Phys. Rev.*, 1931, v. 37, p. 1579—1582.
24. *Webster H. C.* The Artificial Production of Nuclear γ -Radiation.— *Proc. Roy. Soc. A*, 1932, v. 136, p. 428—453.
25. *Rutherford E., Chadwick J.* The Disintegration of Elements by α -Particles.— *Philos. Mag.*, 1922, v. 44, p. 417—432.
26. *Webster H. C.* Possible Existence of a Neutron, *Nature*, 1932, 5 March, v. 129, p. 402.
27. *Жолио-Кюри Ф.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
28. *Curie I., Joliot F.* Effect d'absorption de rayons γ de très haute fréquence.— *Compt. rend.*, 1932, 22 Fevrier, v. 194, p. 708—711.
29. *Бикар П.* Фредерик Жолио-Кюри и атомная энергия. М.: Атомиздат, 1962.
30. *Bromberg J.* The Impact of the Neutron: Bohr and Heisenberg, *Historical Studies in the Physical Science*, 1971, v. 3, p. 307—317.
31. *Ellis G. D.* Structure of Atomic Nuclei.— *Nature*, 1932, v. 129, p. 674—676.
32. *Вайнер Ч.* На пути к новой физике.— УФН, 1974.
33. *Iwanenko D.* The Neutron Hypothesis.— *Nature*, 1932, 28 May, v. 129, p. 798.
34. Атомное ядро. Л.— М.: ГТТИ, 1934.
35. *Амбарцумян В. А., Иваненко Д. Д.* Об одном следствии теории Дирака протонов и электронов.— Докл. АН СССР, 1930, т. А6. 153; Цит. по: В. А. Амбарцумян. Научные труды. Т. 1. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1960, с. 418—420.
36. *Chadwick J.* The Neutron.— *Proc. Roy. Soc. A*, 1933, v. 142, p. 1—25.
37. *Лихтенштадт В. О.* Гете. М.: ГИЗ, 1920.
38. *Вайскопф В.* Физика в двадцатом столетии. М.: Атомиздат, 1977.
39. *Heisenberg W.* Uber den Bau der Atomkerne.— *Z. Physik*, 1932, v. 77, p. 1—11, v. 78, p. 156—164; 1933, v. 80, p. 587—596.
40. *Ферми Э.* Лекции по атомной физике. М.: Изд-во иностр. лит., 1952.
41. *Rutherford E.* The Origin of the γ -Rays.— *Nature*, 1932, 26 March, v. 129.
42. *Iwanenko D.* *Compt. rend.*, 1932, v. 195, p. 439.

TO THE HISTORY OF NEUTRON'S DISCOVERY

L. A. GLEBOV, A. A. SCHARZ, S. I. LARIN,
D. N. TRIFONOV

The article is devoted to the 50th anniversary of the neutron discovery. On the base of the analysis of original publications the prehistory of neutron discovery is considered, the succession of events, which produced an experimental proof of neutron's existence and its understanding as an elementary particle is followed. Some details of the neutron's discovery are defined more exactly. A practical contribution to the process of the experimental discovery of neutron by different scientists is evaluated.