

50 лет

СОВРЕМЕННОЙ
ЯДЕРНОЙ
ФИЗИКЕ

50 лет

СОВРЕМЕННОЙ

ЯДЕРНОЙ

ФИЗИКЕ

50 лет современной ядерной физике: Сб. статей. — М.: Энергоатомиздат, 1982, — 256 с.

Опубликованы статьи, посвященные развитию ядерной физики в течение 50 лет после открытия нейтрона Чадвиком в 1932 г. Рассмотрено развитие представлений о строении ядра и ядерных силах; обсуждаются проблемы, связанные с космическим излучением, открытием искусственной радиоактивности и деления урана. В ряде статей содержатся воспоминания советских и зарубежных ученых, непосредственно участвовавших в первых исследованиях по ядерной физике. Изложены современные представления о строении ядра, основы теории элементарных частиц, проблемы ядерной энергетики. Обсуждается значение ядерной физики для познания материи.

Предназначен для физиков, астрономов, философов, историков науки, а также для преподавателей и студентов.

Ил. 22. Библиогр. 239.

Редакционная коллегия:

акад. Б.М. Кедров (главный редактор)

акад. АН УССР А.С. Давыдов

пред. Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР

чл.-кор. АН АрмССР А.М. Петросьянц

д-р физ.-мат. наук, проф. Д.Д. Иваненко (заместитель главного редактора, составитель)

Проникновение в структуру атомного ядра и, как результат этого, овладение ядерной энергией явились одними из важнейших направлений современного научно-технического прогресса. Быстрое и успешное развитие ядерной физики началось полвека тому назад в начале 1932 г. — с открытия нейтрона, которое позволило преодолеть трудности, стоявшие тогда на пути познания строения ядра, и вместе с тем поставило новые глубокие проблемы. Это поистине ключевое открытие, а также последовавшие за ним открытия позитрона и искусственной радиоактивности, установление протон-нейтронного состава ядра, создание теории β -превращений ядер и другие важнейшие открытия привели в конце концов к современным представлениям о структуре материи. Формирование физики атомного ядра и физики элементарных частиц оказало вместе с тем самое глубокое влияние на развитие многих смежных областей науки. Обнаружение в конце 1938 г. явления деления тяжелых ядер под действием нейтронов стало основой практического использования энергии атомного ядра.

В становление и развитие ядерной физики существенный вклад внесли советские ученые. Еще в довоенный период наши физики предложили экспериментальные методы исследования атомных частиц (фотоэмульсионный метод, метод камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле), открыли такие важные ядерно-физические явления, как следы ливней в космическом излучении, изомерия искусственно-радиоактивных ядер, спонтанное деление ядер урана. Работы советских физиков-теоретиков решающим образом способствовали становлению современных представлений о строении ядра и ядерных силах, а в дальнейшем — о природе элементарных частиц. После открытия деления ядер и выяснения того факта, что оно сопровождается вылетом нейтронов, советские ученые сделали правильные оценки условий возникновения цепной реакции деления, наметили программу работ по созданию устройства для ее осуществления, т.е. ядерного реактора. Эти перспективные работы, как известно, были прерваны нападением фашистской Германии на нашу страну.

Высокий уровень развития теоретических и экспериментальных исследований по ядерной физике, достигнутый в нашей стране в 30-е годы, позволил советским ученым под руководством И.В. Курчатова в дальнейшем в самые короткие сроки успешно решить фундаментальную проблему овладения энергией атомного ядра. Тем самым была ликвидирована монополия США на ядерное оружие, обеспечена безопасность нашей страны и стран социалистического содружества. Развивая работы в области использования энергии атомного ядра, советские ученые заложили основы мирного использования ядерной энергии, создав первую в мире атомную электростанцию, широко развернули работы по осуществлению управляемой термоядерной реакции. В послевоенный период большое развитие получили в нашей стране дальнейшие исследования по различным направлениям физики ядра и элементарных частиц, квантовой теории поля с их выходом, в частности, в астрофизику.

Предлагаемый вниманию широких кругов читателей сборник содержит, прежде всего, воспоминания ряда ученых, трудами которых был открыт нейтрон, исследованы его основные свойства, выяснена роль этой частицы в структуре ядра. В сборник включены также статьи ведущих советских ученых о современном состоянии исследований по основным разделам ядерной науки и техники.

Сборник открывают воспоминания автора открытия нейтрона сотрудника Э. Резерфорда, английского физика Дж. Чадвика. Раннему периоду исследования косми-

ческого излучения посвящена статья Д.В. Скобельцына, работы которого оказали большое влияние на развитие ядерной физики. О создании модели ядра, советских и зарубежных конференциях по атомному ядру, а также о подходах к решению проблемы ядерных сил рассказывает Д.Д. Иваненко. Эта статья дополнена работами Дж. Чадвика, Д.Д. Иваненко, В. Гейзенберга, И.Е. Тамма, Х. Юкавы. Затем следуют воспоминания Н. Кеммера о восприятии мезонной теории ядерных сил Юкавы европейскими физиками. С воспоминаниями об открытии и исследовании искусственной электронной радиоактивности и свойств нейтрона под руководством Э. Ферми в "римский" период выступает его ближайший сотрудник — итальянский физик Э. Амальди.

Об обстоятельствах открытия деления ядер урана О. Ганом и Ф. Штрасманом вспоминает В. Герлах; его статья дополнена материалами из воспоминаний Л. Мейтнер, Ф. Штрасмана, Дж. А. Уилера и О. Фриша. О своем открытии спонтанного деления ядер и работах по синтезу ядер трансурановых элементов рассказывают К.А. Петржак и Г.Н. Флеров.

Развитию современных представлений о строении ядра, в частности оболочечной модели, посвящена статья А.С. Давыдова и Г.Ф. Филиппова. Проблемы новейшей физики элементарных частиц обсуждаются в статье С.С. Герштейна и А.А. Логунова. Современные проблемы нейтронной физики анализируются в статье В.М. Лобашова. О развитии ядерной энергетики рассказывается в статье А.М. Петросьянца.

В моей статье, заключающей сборник, вновь подчеркнуто epochальное значение открытия нейтрона, оценен вклад многих физиков, содействовавших этому открытию. В ней проанализирована роль эмпирического и теоретического этапов в открытии нейтрона, дано сравнение этого открытия с другими фундаментальными событиями в истории науки. Самое существенное значение следует придавать переходу к новейшему, ядерному этапу познания структуры материи, последовавшему за классическим механическим и электромагнитным этапами. Наряду с научно-историческим и философским значением открытие нейтрона и последовавшие открытия "великого трехлетия" 1932–1934 гг., а затем открытие деления урана в 1938 г. оказали самое глубокое влияние на мировую энергетику — началось строительство атомных электростанций; в недалеком будущем ожидается новый шаг громадного значения — осуществление управляемой термоядерной реакции. Вместе с тем достижения ядерной физики были использованы для атомной бомбардировки, и ныне главной задачей прогрессивных ученых всего мира является решительная борьба за исключительно мирное применение великих достижений науки.

Как воспоминания участников событий полувековой давности, когда рождались современные представления об атомном ядре, так и обзоры современного состояния основных разделов ядерной физики и ее приложений помогут читателям — физикам, историкам науки, студенческой молодежи — составить правильное представление о труднейших путях становления и развития ядерной науки и техники, о фундаментальном вкладе советской науки в этот процесс и, несомненно, будут способствовать последующим исследованиям главных проблем строения материи.

Б.М. Кедров

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА НАЧАЛА 30-х ГОДОВ

Первая часть сборника, посвященная начальному этапу развития современной ядерной физики, начинается публикацией воспоминаний Джеймса Чадвика, открывшего нейтрон 50 лет тому назад — в феврале 1932 г. Хотя, как известно, гипотеза о существовании "нейтрона" как некоторой более тесной комбинации протона и электрона, чем атом водорода, была высказана Резерфордом и американским ученым Харкинсом еще в 1920 г., только цепь экспериментов Боте и Беккера, а затем Ирен Кюри и Ф. Жолио, обнаруживших особое проникающее излучение, испускаемое при бомбардировке бериллия α -частицами, подвела вплотную к открытию нейтрона. Это открытие, конечно, сразу привлекло к себе внимание, но в работах, появившихся в первые месяцы после открытия, еще не чувствовалось начала перехода к каким-либо новым концепциям в понимании структуры ядер и элементарных частиц. Сам нейтрон по-прежнему считали состоящим из протона и электрона. Не обращая внимания на трудности модели протон-электронного строения ядер, обострившиеся в самом начале 30-х годов, и неясности с трактовкой β -распада, Перрен и Оже просто предположили, что ядра состоят из протонов, электронов, а также нейтронов. Переход к радикально новым концепциям наметился только после предложения рассматривать нейтрон как элементарную частицу, строить атомные ядра из одних протонов и нейтронов и трактовать β -распад как рождение электронов подобно фотонам. Дискуссии вокруг этой гипотезы, устранявшей трудности старой протон-электронной модели ядра и вместе с тем требовавшей построения теории совсем новых, специфических ядерных сил, обсуждаются в статье Д.Д. Иваненко, принимавшего непосредственное участие в разработке указанной гипотезы. Одним из дополнений к ней является статья В. Гейзенберга, внесшего большой вклад в теорию атомных ядер и открывшего новую главу физики элементарных частиц, введя понятие особой внутренней степени свободы — изоспина. Тем самым современная физика атомного ядра, требовавшая введения новой элементарной частицы — нейтрона — для объяснения структуры ядра и новой частицы — нейтрино — для объяснения β -распада, сама дала решающий импульс для развития всей квантовой релятивистской теории элементарных частиц (см. статью С.С. Герштейна и А.А. Логунова в третьей части настоящего сборника).

Различные подходы к теории ядерных сил, обсуждаемые в упомянутых выше статьях и в публикуемой работе И.Е. Тамма, привели к решающему шагу, сделанному Хидеки Юкавой в конце 1934 г., в виде гипотезы о совсем новом — мезонном — поле, реализующем взаимодействие про-

тонов и нейтронов. После знаменитой работы японского теоретика в сборнике следуют воспоминания Н. Кеммера о восприятии, сперва очень сдержанном, идеи Юкавы европейскими физиками. "Великое трехлетие", 1932–1934 гг. наряду с открытиями в физике ядра (к ним относится также открытие искусственной радиоактивности, об исследованиях которой группой Ферми рассказано в статье Э. Амальди) характеризует-ся также установлением тесной связи ядерной физики с областью физики космического излучения. Раннему этапу исследований в этой области посвящена статья Д.В. Скобельцына, освещающая на базе фундаментальных работ самого автора период, в известной мере завершившийся окончательным открытием позитрона и космических ливней Андерсоном, Блэккетом и Оккалини в самом начале 1933 г. В этих открытиях оказались связанными друг с другом три области физики – теория атомного ядра, релятивистская квантовая теория поля элементарных частиц и теория высокоэнергетических процессов в космическом излучении.

ВОСПОМИНАНИЯ О ПОИСКАХ НЕЙТРОНА

Дж. Чадвик*

В июне 1920 г. Э. Резерфорд прочел Бейкерианскую лекцию, в которой впервые высказал занимавшие его некоторое время мысли о возможном существовании нейтральной частицы, образованной в результате тесного соединения протона и электрона. Спустя несколько месяцев после этой лекции он пригласил меня продолжить вместе с ним проводившиеся им в Манчестере эксперименты по искусственному расщеплению ядер азота. Существовали некоторые, весьма приятные для меня, причины такого приглашения. Среди них – осуществленное мною усовершенствование метода подсчета сцинтилляций, состоявшее в улучшении оптического устройства и повышении точности измерений. Помимо того, ему хотелось иметь возможность с кем-то поговорить во время тоскливой работы в темноте.

Как раз в периоды ожидания, когда можно будет начинать отсчеты, он подробно излагал мне свои взгляды на проблему структуры ядра и, в частности, указывал на трудности в понимании строения ядра, полагая единственными существующими элементарными частицами протон и электрон, и на необходимость в связи с этим ввести понятие нейтрона. Резерфорд охотно допускал, что многое в этом было лишь чистым домыслом, и чуждый фантазерству, не основанному на эксперименте, редко, только в частных беседах, говорил об этом. Кажется, всего один раз

* ©Перевод на русский язык, "Наука", 1975.

Настоящая статья представляет собой дополненный автором перевод его доклада на X Международном конгрессе по истории науки в Итаке (США) в августе 1962 г. (Chadwick J. Actes du X Congrès International d'Histoire des Sciences. Ithaca N.Y., 1962. Vol. 1. Paris: Herman, 1964, p. 159). Пер. с англ. В.С. Логинова.

после Бейкеррианской лекции он снова публично высказал свои взгляды на роль нейтрона. Однако он не отказался от своей идеи и заразил ею меня. В течение последующих лет время от времени иногда вместе, порой я один, мы продолжали проводить эксперименты в надежде найти признаки существования нейтрона или в момент его образования, или в момент его испускания из ядра атома. Расскажу лишь о некоторых, наиболее заслуживающих внимания попытках такого рода; другие были настолько отчаянными, что их легко можно было бы отнести к временам алхимии.

Сразу после упомянутой Бейкеррианской лекции Резерфорд попросил Д. Глассона приступить к поискам нейтронов при пропускании электрического разряда через водород. А чуть позже подобный эксперимент сделал Д. Робертс. Хотя нельзя было надеяться обнаружить признаки нейтрона, идя по этому пути, они продолжали попытки. Как масса водорода, так и напряжение в этих экспериментах были обычными.

Мне представлялось бессмысленным изучать водород в нормальном состоянии, несмотря на его кажущуюся стабильность. Если соединение протона и электрона было вообще возможно, то оно могло происходить спонтанно, и образованный таким образом нейтрон мог снова распадаться под действием космического излучения. В 1923 г. с одобрения Резерфорда я попытался обнаружить γ -излучение как результат образования нейтронов в большом количестве 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. С его появлением чрезвычайно увеличилась вероятность обнаружить γ -излучение. Гейгер любезно прислал мне два своих счетчика, а также инструкции по их изготовлению. Тотчас же мы с Резерфордом воспользовались этими приборами для повторения эксперимента с водородом. Мы шли на все уловки, чтобы найти хоть какие-нибудь следы нейтрона. Тем же путем мы исследовали на всякий случай ряд редких газов и прочих элементов, которые могли достать, в надежде заметить хоть какое-нибудь проявление нейтрона. Я говорю об этих экспериментах лишь в общем плане, так как некоторые из них были совершенно абсурдными.

После первой подобного рода попытки я исследовал возможность образования или существования нейтрона в условиях сильного электрического поля, а также при бомбардировке протонами атомов, особенно с большим атомным номером, в которых электроны наиболее сильно связаны друг с другом. Эта идея неясно выражена в письме к Резерфорду и цитируется в книге Ива*: "Я считаю, что мы должны приступить к подлинным поискам нейтрона. Уверен, что располагаю действенной схемой работы ...". Я полагал, что понадобится напряжение по крайней мере 200 000 В для ускорения протонов. Однако мы не располагали нужным трансформатором и, несмотря на живой интерес Резерфорда, не могли осуществить этот сумасбродный план из-за отсутствия денег. Ассигнова-

* Eve A.S. Rutherford. Being the life and letters of the Rt. Hon. Lord Rutherford. Cambridge: Univ., 1939, p. 301.

ния на исследование, выделяемые из лабораторных фондов, в то время редко превышали 1000 фунтов стерлингов в год, а часто были значительно меньше; этого было недостаточно даже для проведения обычных работ. Год или два я упорно стоял на своем и в промежутках между другими исследованиями пытался найти способ применения трансформатора Тесла для ускорения ионов в разрядной трубке. Я еще не располагал удовлетворительными условиями и необходимым опытом и понапрасну тратил свое время, но не лабораторные деньги.

Во время нашей работы по разложению легких элементов с помощью α -частиц мы с Резерфордом не забывали о возможности излучения нейтронов, особенно из тех элементов, которые не испускали протоны. Мы искали слабые сцинтилляционные вспышки, вызванные излучением, не отклоняемым магнитным полем. Единственная специальная ссылка на поиски нейтрона в процессе этих работ была сделана в опубликованной в 1929 г. (спустя несколько лет после экспериментов) статье.

Случай с бериллием интересен по двум причинам. Во-первых, бериллий не выделял протонов в процессе бомбардировки α -частицами, во-вторых, хотя это и неверно, было известно, что минерал берилл содержит необычное количество гелия, что позволяло предположить возможность распада ядер бериллия под действием космического излучения на две α -частицы и нейтрон.

Это вещество возбуждало во мне интерес на протяжении нескольких лет. Я обстреливал бериллий α - и β -частицами, воздействовал на него γ -излучением, используя обычно сцинтилляционный метод наблюдения. В то время это был единственный метод, широко применявшийся в условиях сильного γ -излучения активных осадков радия — основного доступного мне источника излучения. Чуть раньше, а может и значительно раньше, я пробовал разработать подходящие электрические методы подсчета. Мне это не удалось. Позднее, когда Грейнахер разработал метод лампового усилителя, который в Кавендишской лаборатории применил Винн-Вильямс, мне удалось достать также полониевый источник, хотя и слабый, но достаточный для моей цели. С Констеблем и Поллардом я снова исследовал бериллий, и в какой-то короткий, но волнующий миг мы подумали, что обнаружили признаки нейтрона. Но затем эти признаки исчезли. Я все еще бродил в темноте.

Первое указание на нейтрон появилось в работе Г.Вебстера с γ -излучением, возбуждаемым в бериллии при облучении его α -частицами. О возможности возбуждения γ -излучения посредством бомбардировки легких элементов α -частицами я думал несколько лет. Попытку разработать ее предпринял Л. Бастингс, но его постигла неудача, так как полоний в качестве источника был слишком слабым, а средство обнаружения — электроскоп — слишком нечувствительным. Когда появился счетчик Гейгера, к поискам приступил Вебстер, но его первые попытки были не очень обнадеживающими — нам по-прежнему не хватало полония.

Этот недостаток был ликвидирован при посредничестве Фезера из Балтимора и благодаря любезности К. Бурнама и Веста из госпиталя Келли. Они прислали мне сначала через Фезера, а затем почтой несколько старых радоновых трубок, содержавших большое количество нужных мне ра-

дия D и продукта его распада — полония. Этот подарок был чрезвычайно ценен и тогда и позднее.

Между тем Боте и Беккер также приступили к исследованию этой проблемы и первыми опубликовали результаты. Но самое интересное наблюдение сделал все же Вебстер: он установил, что излучение бериллия в направлении падения α -частиц более проникающее, чем излучение в обратном направлении. Этот точно установленный факт взволновал меня: его можно было легко объяснить, лишь предполагая, что излучение состоит из частиц, судя по их проникающей силе, нейтральных. Уверенный в том, что и нейтральная частица должна производить хоть какую-нибудь ионизацию, я предложил Вебстеру пропустить излучение через камеру Вильсона. К нашему огорчению, ибо мы были убеждены, что речь идет о какой-то нейтральной частице, никаких следов не было обнаружено. Мы были очень озадачены и не знали, как увязать результаты наблюдений.

Этот первый выход на цель имел место в июне 1931 г. Вскоре Вебстер уехал из Кембриджа в Бристоль. Я решил снова взяться за дело, но мои приготовления, возможно, к счастью, были отложены в связи с переменой моего рабочего места в лаборатории. Однажды утром я прочел в "Comptes rendus" сообщение Ирен Кюри и Жолио о еще более удивительном свойстве излучения бериллия — о его способности выбивать протоны из веществ, содержащих водород, — свойстве, поистине поразительном. Через несколько минут ко мне пришел Фезер рассказать об этом сообщении, удивившем его так же, как и меня, а чуть позже в это утро я разговаривал с Резерфордом. Было уже так заведено, что около 11 часов я должен был приходить к нему, рассказывать об интересных новостях и обсуждать ведущиеся в лаборатории работы. Рассказав ему о наблюдении Кюри-Жолио и их истолковании своего наблюдения, я заметил на его лице растущее удивление; наконец, он воскликнул: "Я не верю этому!". Подобная вспыльчивость была не свойственна ему, и за все время моего продолжительного союза с ним я не припомню другого подобного случая. Я говорю об этом, чтобы подчеркнуть, насколько электризующим было воздействие сообщения Кюри-Жолио. Конечно, Резерфорд доверял их наблюдениям, но совсем другое дело — объяснение.

Так получилось, что я был готов начать эксперимент и уже приготовил прекрасный полониевый источник из балтиморского материала. Я беспристрастно приступил к работе, хотя мысли мои были, естественно, сосредоточены на нейтроне. Мне было ясно, что наблюдения Кюри-Жолио нельзя приписать эффекту Комптона, с исследованием которого мне не раз приходилось сталкиваться. Я был уверен, что здесь нечто новое и неизвестное. Нескольких дней напряженной работы оказалось достаточно, чтобы убедиться в том, что эти странные эффекты обязаны своим происхождением нейтральной частице; мне удалось также измерить ее массу. Нейтрон, существование которого предположил Резерфорд в 1920 г., наконец обнаружил себя.

Надеюсь, что я не буду неправильно понят, если добавлю послесловие к этой истории. 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. И все же я не могу избавиться от чувства, что должен был бы добиться цели быстрее. Я могу бы выдвинуть в свое оправдание ряд извиняющих обстоятельств: нехватку оборудования и т.д. Но, несмотря на все это, я должен признать, хотя бы для себя, что не смог достаточно глубоко продумать свойства нейтрона, особенно те из них, которые наиболее ясно свидетельствуют о его существовании. Это успокаивающая мысль. Утешаю себя тем, что всегда гораздо труднее сказать первое слово о предмете, каким бы очевидным он впоследствии ни оказался, чем последнее слово. Это известная истина, и, может быть, она послужит мне извинением.

К БИОГРАФИИ ЧАДВИКА

Д.Д. Иваненко

Этот краткий очерк составлен по материалам относительно обширной биографии Чадвика из серии жизнеописаний членов Лондонского Королевского общества его членами — Х. Мэсси (секретарем общества) и Н. Фезером.

Джеймс Чадвик родился в Боллингтоне (к югу от Манчестера) 20 октября 1891 г. Начальное образование получил в местной Манчестерской школе. В 16 лет он поступил в университет в Манчестере, куда еще раньше переехал его отец. В первый год обучения его разочаровали лекции по физике, но все резко изменилось на следующий год, когда начались лекции Резерфорда, энтузиазм которого в науке окончательно определил выбор жизненного пути Чадвика. 1911–1913 гг. были новыми вершинами в творческом пути Резерфорда, и молодому сотруднику посчастливилось присутствовать на заседании Манчестерского литературного и философского общества, где Резерфорд сделал доклад о планетарной модели. К школе Резерфорда в Манчестере принадлежали Гейгер, Марсен, Хевеши, Панет, Больтвуд, Фаянс, Дарвин, в течение нескольких месяцев в Манчестере работал Нильс Бор.

В 1913 г. Чадвик, закончив университет, был удостоен степени магистра и получил стипендию "Памяти выставки 1851 г.", подразумевавшую обязательную работу в одном из зарубежных центров, в качестве которого он выбрал лабораторию Гейгера в Берлине. Здесь он выполнил первую обратившую на себя внимание работу, показав (с помощью счетчика Гейгера), что непрерывный спектр β -излучения является его основным свойством, а не вызван добавочным рассеянием и др. Гейгер познакомил Чадвика с Эйнштейном, Ганом, Лизе Мейтнер.

Начало первой мировой войны застало Чадвика в Германии, где он был интернирован и жил в тяжелых лагерных условиях. Позднее, однако, с помощью Нериста и Рубенса Чадвик смог даже наладить некоторые эксперименты с примитивными приборами вместе с Эллисом, другим задержанным англичанином. Вот почему в 1930 г. второе переработанное издание книги Резерфорда, написанной в 1921 г. ("Излучение радиоактивных веществ"), было опубликовано под тремя фамилиями — Резерфорда, Чадвика, Эллиса.

Вернувшись в Англию, Чадвик переехал в Кембридж, где Резерфорд, сменив своего учителя Дж.Дж. Томсона, стал руководителем Кавендишской лаборатории, приобретшей значение мирового центра ядерной физики. Чадвик был ближайшим сотрудником Резерфорда и официальным заместителем директора лаборатории. Он не имел никакой лекционной нагрузки, но проводил со студентами (дипломантами и аспирантами) исследования.

Отношения с Резерфордом были самыми дружескими, и до своей женитьбы в 1925 г. Чадвик нередко проводил с ним свой отпуск. На "преднейтронный" период (1917–1932) приходится 10 совместных Чадвика с Резерфордом публикаций, посвященных расщеплению элементов α -частицам, проверке формулы Резер-

форда (и квантовых уточнений Мотта), рассеянию частиц ядром и др. Часть работ была проделана с Констэблем, Поллардом, Эллисом, Гамовым. Чадвику удалось также выяснить недоразумение с ошибочными результатами опытов венских физиков Кирша и Петтерсона, пытавшихся найти противоречия в данных Резерфорда и его сотрудников (приехав в Вену, он обнаружил ошибки, допущенные неопытными лаборантами, в счете сцинтилляций). В те годы Чадвик выдвинулся в первый ряд физиков-ядерщиков того времени.

По-видимому, всегда несколько замкнутый по натуре, Чадвик не любил больших конференций, предпочитал им дискуссии в узком кругу.

Не будем здесь останавливаться на вершине деятельности Чадвика, открывшего нейтрон в начале 1932 г., и отошлем читателя к его воспоминаниям и статье Б.М. Кедрова в настоящей сборнике. Сделав несколько докладов, посвященных открытию нейтрона и ряду его свойств, Чадвик совместно с Гольдхабером занялся исследованием фоторасщепления дейтрона γ -излучением.

Нельзя умолчать о малоизвестных расхождениях Чадвика с Резерфордом, обозначившихся вскоре после открытия нейтрона и совместного участия в работе Сольвеевского конгресса осенью 1933 г. в Брюсселе. (Несмотря на эти расхождения, Чадвик с большим уважением отзывался о своем учителе и написал о нем воспоминания.) На 7-м Сольвеевском конгрессе, как и на непосредственно предшествовавшей ему ленинградской конференции по атомному ядру, стало ясно, что речь идет не просто об открытии одной из новых частиц, а о том, что старые представления о структуре ядра как системе из протонов и электронов, представление о нейтроне как диполе из протона и электрона должны быть заменены новыми идеями о протон-нейтронном составе ядра, о нейтроне как элементарной частице. Одним словом, физика вступила в "ядерную эпоху", опираясь на новые теоретические релятивистско-квантовые представления, и требовала более мощных экспериментальных средств в виде ускорителей разного типа. Чадвик и раньше предлагал строить высоковольтные установки, более современные детекторы в Кембридже (вопреки возражениям Резерфорда, всегда предпочитавшего простейшие установки и слишком долгое время работавшего с сотрудниками, применяя по существу примитивный сцинтилляционный метод, приведший, однако, к эпохальным открытиям!). По возвращении из Брюсселя Резерфорд снова отказался от строительства циклотрона, и Чадвик (очевидно, чувствуя себя уже не "главным учеником", а одним из ведущих ученых новой эпохи в физике) решил покинуть Кембридж. Он принял в 1935 г. приглашение занять кафедру в университете Ливерпуля, с учеными которого он был уже знаком.

В Ливерпуле Чадвик сумел построить циклотрон, сыгравший большую роль в работах технического направления в начале войны. Он с большим успехом начал читать курс лекций и стал вести также биофизические исследования (интерес Чадвика к этому направлению в свое время вызвал негодование Резерфорда). После кончины Резерфорда в 1937 г. встал вопрос о его преемнике, но, к удивлению многих физиков, этот пост не был предложен Чадвику. Годы расцвета ядерной физики в Кембридже были уже позади: в конце 30-х годов центры ядерной физики продолжали развиваться во Франции и Германии, новые центры начали возникать в Советском Союзе, Италии, Японии.

Открытие деления урана в конце 1938 г. и возникшие перспективы осуществления цепной реакции, конечно, привлекли внимание всех специалистов по ядру, но любопытно, что Чадвик в октябре 1939 г., т.е. вскоре после начала второй мировой войны, не считал возможным реализацию цепной реакции в реакторе и использование ее для взрыва. В то время, используя ошибочные данные о вероятности деления, английские физики не учли уже проделанных советскими учеными работ по теории деления ядер. Однако, когда расчет Пайерлса и Фриша (оба эмигранты из Германии) с использованием теории деления ядер показал возможность реализации ядерного взрыва, в Великобритании развернулась довольно интенсивная деятельность, стимулированная прибывшими в 1940 г. из Франции Коварским и Хальбаном — сотрудниками Жолио-Кюри. Не останавливаясь на этих работах, заметим лишь, что по совокупности причин английские ядерные исследования технического направления были переведены в США и частично в Канаду. В ноябре

1943 г. Чадвик с женой и двумя дочерьми приехал в США, где он стал руководителем группы английских ученых (Пенни, Пайерлса, Фриша, Олифанта, Мэсси и др.).

По возвращении в 1946 г. в Ливерпуль Чадвик занимал высокие посты и активно участвовал в послевоенной организации науки и ядерной техники в Великобритании. В 1948 г. он возвратился в Кембридж, где стал деканом Гонвилл-Кайус колледжа, в возрасте 57 лет окупившись в педагогическую и организационную работу. Кроме публикаций о нейтроне 1932–1937 гг. и нескольких книг, где он выступал как соавтор или редактор, Чадвик напечатал статью о циклотроне в 1938 г. и дальше ограничился публикацией воспоминаний о Резерфорде и об открытии нейтрона.

Уйдя в отставку в 1958 г., Чадвик поселился в Северном Уэльсе. В 1969 г. он вновь переехал в Кембридж, где и провел последние годы жизни в кругу своих дочерей. Скончался Чадвик 24 июля 1974 г.

РАННЯЯ СТАДИЯ ИЗУЧЕНИЯ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.В. Скобельцын

Ниже кратко изложены "личные воспоминания", относящиеся к "доисторическому" периоду исследования космического излучения и написанные, вероятно, старейшим из живущих участников научных событий того времени.

В 1927 г. в работе [1] автора этой статьи были опубликованы фотографии треков вторичных электронов, образованных пучком γ -излучения в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле. На одной или двух из этих фотографий были обнаружены треки одной или двух частиц необычно высокой энергии, не связанные с пучком γ -излучения. Последующие наблюдения показали относительно частое появление подобных треков и крайне своеобразную особенность — появление групп одновременных, коррелированных треков.

Я начал изучение γ -излучения (а затем и космического излучения) в конце 1923 г. в лаборатории моего отца В.В. Скобельцына — профессора физики Ленинградского политехнического института.

Работа возникла спонтанно под влиянием выдающегося открытия того времени — открытия эффекта Комптона и в результате удачной моей идеи — исследовать электроны отдачи γ -излучения в камере Вильсона. Мои первые фотографии были получены в отсутствие магнитного поля.

Использование магнитного поля в сочетании с камерой Вильсона не было изобретением. Я ввел такое поле (1500–2000 Гс) как вспомогательное средство, для того чтобы отклонить вторичное β -излучение, образованное γ -излучением в стенке камеры Вильсона. Посторонний фон треков этого излучения затруднял наблюдение треков электронов отдачи, образуемых в газе камеры.

В то время космическое излучение меня не интересовало. Однако я знал о работах, которые выполнялись в этой области. Мой университетский коллега Л.В. Мысовский (он был старше меня) выполнил ряд важных экспериментов по изучению космического излучения, которое тогда называли "высотным излучением" (Hohenstrahlung). Ему и его сотруднику Тувиму принадлежит честь открытия "барометрического эффекта"

в явлениях космического излучения. Особое внимание в этой области исследований в то время привлекали результаты большого значения, полученные в экспериментах Р. Милликена с сотрудниками по измерению поглощения космического излучения в горных озерах, и его (необоснованная) гипотеза о природе и происхождении космического излучения как проникающего ультра- γ -излучения, образующегося в результате синтеза различных легких ядер атомов, таких, как ядра гелия, кислорода, кремния и т.д.

По-видимому, до опубликования моих вильсоновских фотографий никто не пытался наблюдать вторичные β -частицы, вызванные таким гипотетическим ультра- γ -излучением.

В этой связи я процитирую известного и очень компетентного экспериментатора — В.Боте. В его работе [2], появившейся в начале 1923 г., можно найти следующее удивляющее утверждение: "Приходится, очевидно, заключить, что β -луч, скорость которого приближается к скорости света, не может быть обнаружен вильсоновским методом вовсе или может быть обнаружен лишь с трудом" [2, с. 127].

К счастью, такое пессимистическое высказывание не могло произвести на меня впечатления, потому что, прежде чем приступить к моим наблюдениям, я основательно изучил фундаментальную работу Н. Бора [3] по теории ионизации, создаваемой быстрыми β -частицами. Боте, вероятно, упустил из виду этот существенный вклад Бора, который, видимо, был затенен его работой, содержащей знаменитые квантовые постулаты и появившейся практически в то же время.

После моих случайных наблюдений в 1927 г. [1] появления треков космического излучения* подробное изложение соответствующих результатов моей работы было опубликовано в 1929 г. [1].

Однако еще раньше материал, содержащий большую часть обнаруженных фактов, был мной представлен в ходе дискуссии, проведенной на "неформальной" конференции по проблемам γ - и β -излучения, состоявшейся в Кембридже с 23 по 27 июля 1928 г. под покровительством профессора Э. Резерфорда. Одно заседание конференции было предусмотрено для дискуссии по проблемам β -излучения. (На этом заседании, по-видимому, не было докладов.) Во время дискуссии я продемонстрировал коллекцию фотографий треков космического излучения. Могу сказать, что они произвели некоторое впечатление на аудиторию. Между прочим, в начале моего выступления я прокомментировал теорию Бора — ионизации, вызываемой очень быстрыми β -частицами.

Сразу же после моих импровизированных замечаний слово взял профессор Гейгер. Он заявил о том, что Боте и Кольхерстер разрабатывают метод регистрации космического излучения по совпадению импульсов в двух нитяных счетчиках и надеются получить возможность изучать этим методом проникающую способность такого излучения.

В связи с этим "спровоцированным" мной (как я думал) сообщением профессора Гейгера 25 июля я обращаю внимание на следующие даты.

* Термины "космическое излучение", который тогда еще не был принят, и даже "Hohenstrahlung" ("высотное излучение") не были мной тогда упомянуты.

Сообщение Гейгера и Мюллера об изобретении ими нитяных счетчиков было опубликовано в том же месяце — в июле 1928 г. [4]. Очень краткая заметка Боте и Кольхерстера информировала о том, что в результате использования метода совпадений они наблюдали ионизирующие частицы, проникающие через слой свинца толщиной 1 см. Заметка была датирована 2 ноября 1928 г. [5].

Подробное сообщение о моих результатах, опубликованное в журнале "Zeitschrift für Physik", датировано 23 февраля 1929 г. [1], тогда как статья Боте и Кольхерстера датирована 18 июня 1929 г.* [5].

Хорошо известно, какие результаты исключительно большого значения дало дальнейшее развитие техники — камера Вильсона плюс магнитное поле.

Следующим шагом, который естественно напрашивался, было использование существенно более сильного магнитного поля. Было много причин, в силу которых я никогда не пытался это сделать.

В 1929—1931 гг. я работал в лаборатории Кюри в Париже. П. Ожэ, который работал в соседнем институте (профессора Ж. Перрена), однажды (вероятно, это было в начале 1931 г.) спросил меня, собираюсь ли я предпринять такие исследования. Я ответил отрицательно, и тогда он тут же сказал, что возьмется выполнить эти эксперименты. Вскоре после этого П. Ожэ показал мне свою установку, которая была готова для работы. Его попытка, однако, оказалась неудачной и, вероятно, была им оставлена осенью 1931 г., когда (как увидим в дальнейшем) стало известно о том, что К. Андерсон уже получил тысячу прекрасных снимков треков частиц космического излучения в сильном магнитном поле (13 000 Гс).

По-видимому, что-то было неудачно с камерой Вильсона, которую сконструировал П. Ожэ. Мне сказали, что когда она весной 1931 г. была приведена в действие, никаких треков частиц космического излучения в ней не было обнаружено. Я получил эту информацию от одного сотрудника лаборатории Кюри (Жоржа Фурнье), который заключил из этого факта, что мои наблюдения 1927—1929 гг. были ошибочны. Однако в это время (1931) мои результаты были уже подтверждены в другой лаборатории [6]. В конце моего пребывания в Париже (1931) мне не представился случай встретиться с Ожэ, и я никогда после не слышал от него, что было причиной неудачи с его камерой в сильном магнитном поле.

В ноябре 1931 г. (я уже был в Ленинграде) Милликен посетил Европу и выступил с сенсационными лекциями в Париже и в Кембридже, показывая коллекцию фотографий Андерсона. Содержание этих лекций было опубликовано им и его соавтором К. Андерсоном позже (в мае 1932 г.) в журнале "Physical Review" [7]. Треки, которые наблюдал Андерсон, были приписаны протонам высокой энергии, созданным фотонами космического излучения. В ноябре—декабре 1931 г. я получил письма от Марии Кюри и Ф. Жолио-Кюри из Парижа и Л. Грея из Кембриджа, которые упоминали о том, что они присутствовали на лекциях Милликена и в нескольких строчках информировали меня о сообщенных им результатах.

* Даты поступления рукописей статей в редакцию журнала.

Несколько более подробную информацию давало письмо Грея, с которым в это время я переписывался, обсуждая некоторые проблемы исследования γ -излучения. Он писал (ноябрь 1931 г.): "Я думаю (выделено мной — Д.С.), что в каждом случае треки протонов были плотнее, чем треки электронов". Ему, вероятно, так показалось. Милликен демонстрировал своей аудитории 11 снимков хороших треков в пределах энергии 20–80 МэВ, т.е., скажем, $\xi \approx 50$ МэВ в среднем.

Плотность ионизации (удельная ионизация) зависит в основном от скорости частицы или от отношения ξ/mc^2 , где m — собственная масса частицы. При этом заданном отношении абсолютная величина массы частицы с заданным зарядом не существенна. Отсюда следует, что ионизация, производимая протоном энергией 50 МэВ ($\xi/mc^2 \approx 5 \cdot 10^{-2}$), практически такая же, как для электрона энергией примерно 25 кэВ. Но невозможно спутать удельную ионизацию такого медленного электрона и быстрого ("релятивистского") электрона энергией несколько мегаэлектронвольт или больше. Однако треки положительных частиц, показанные Милликеном, не отличались существенно от электронных треков на тех же снимках при $pc \approx 50$ МэВ (p — импульс). Однако профессор Милликен и его аудитория не заметили этого несоответствия. После того как я получил письмо Жолио, я написал ему сразу же о моих соображениях по этому поводу и высказал предположение, что, очевидно, что-то было ошибочно в фотографиях Милликена или в его интерпретации.

В заметке, опубликованной в мае 1932 г. [7], Милликен и Андерсон повторили ту же версию своей интерпретации. Милликен утверждал, что открытые ими протоны являлись продуктом взаимодействия ультра- γ -излучения с ядрами и даже усмотрел в этом явлении подтверждение старой своей гипотезы о происхождении космического излучения (ультра- γ -излучение как продукт синтеза определенных ядер). Прогресс в расшифровке Андерсоном его экспериментальных данных был медленным. Только в сентябре 1932 г. (спустя год после того, как им было получено более тысячи вильсоновских снимков в сильном магнитном поле) в короткой, осторожно отредактированной заметке в журнале "Science" [8] он сослался на удельную ионизацию треков с положительной кривизной и, учтя ее характер и другие факты, пришел к выводу о существовании положительно заряженных частиц, масса которых "должна быть мала в сравнении с массой протона".

Следующая статья Андерсона была озаглавлена "Положительный электрон" и содержала более определенные утверждения. Она появилась в "Physical Review" в феврале 1933 г. [9]. Когда Андерсон ее писал, он уже знал о выдающихся результатах работы Блэккетта и Оккиалини [10] (он ссылается на сообщения об этой работе в прессе). Статья Блэккетта и Оккиалини была получена для опубликования 7 февраля, даже немного раньше статьи Андерсона (полученной редактором "Physical Review" 28 февраля). Сейчас кажется странным, что, обсуждая свои эксперименты, авторы обеих статей не пытаются связать их результаты с теорией позитрона Дирака.

Верно и то, что сам Дирак [11] был склонен идентифицировать положительные частицы своей теории с протонами. Работа Дирака была, ко-

нечно, им известна (кембриджским физикам, во всяком случае). Андерсон в своей статье предложил далеко идущие, казавшиеся странными гипотезы, например, об индуцированном космическим излучением превращении протона в электрон. (Такие спекуляции, рассматриваемые теперь на фоне новейшей субъядерной физики, представляются, может быть, менее странными?)

Через несколько месяцев после открытий Андерсона и Блэкетта — Оккиалини результаты экспериментов, полученные многими авторами одновременно в области исследования γ -излучения, показали, что представления теории Дирака им адекватны. Выводы из данных этих экспериментов были резюмированы Блэкеттом на заседании 7-го Сольвеевского конгресса 22 октября 1933 г. Дискуссия, которая за этим последовала, представляет несомненный исторический интерес. В стенограмме этой дискуссии [12] можно, между прочим, найти следующее характерное замечание Резерфорда: "По-видимому, в какой-то степени жаль, что мы имели теорию положительного электрона до начала экспериментов. . . Я был бы более доволен, если бы теория появилась после того, как экспериментальные факты были бы установлены"*.

Я остановился на изложении фактов, приведенных на предыдущих страницах, потому, что они дают представление о психологических барьерах на пути к открытию первой новой частицы в последовательности многих поколений частиц, которые вскоре появились.

Есть еще другое важное направление развития, которое последовало (с некоторым опозданием) вслед за моими первыми наблюдениями треков космического излучения. Я ссылаюсь на появление групп одновременных треков (до четырех в моих последующих наблюдениях) и "ливней" (до 20 частиц) на фотографиях Блэкетта и Оккиалини (1933), полученных с камерой Вильсона, управляемой счетчиками [10].

Это явление сразу же привлекло внимание физиков, работающих в данной области. Но, возможно, тогда еще не предвидели его значения как ведущего, может быть, к наиболее интересной главе истории данной ветви науки. В действительности это явление оказалось предвестником новейшей физики частиц высокой энергии. Однако в течение относительно длительного времени его природа оставалась загадкой.

Вскоре были сделаны две неудачные попытки решить эту загадку. Наша с Оже заметка по этой проблеме появилась в июле 1929 г. [13]. Позже (в начале 1932 г.) Гейзенберг опубликовал свою версию [14]. Насколько скудными были данные эксперимента, необходимые для того, чтобы решить вопрос о природе явления, показывает тот факт, что на пяти страницах статьи Гейзенберга мои наблюдения 1929 г. цитируются одиннадцать раз, что совершенно необычно. Автор (Гейзенберг) опубликовал свою работу слишком рано. В конце того же года (1932) было объявлено об открытии позитрона. А годом позже появились фотографии "ливней" Блэкетта и Оккиалини. Эти события радикально изменили ситуацию.

Наша (Ожэ и моя) идея сводилась к предположению, что группы треков появляются как результат последовательного одновременного обра-

* [12, с. 510]. Перевод с французского выполнен автором этих воспоминаний.

зования комптоновских электронов частицей ультра- γ -излучения. Мы даже усматривали в этом эффекте аргумент для того, чтобы отбросить выдвинутую Боте и Кольхерстером (на основании их измерений проникающей способности частиц космического излучения) гипотезу о природе первичного излучения как β -излучения очень высокой энергии.

Гейзенберг же основывал свои выводы на только что упомянутой гипотезе Боте и Кольхерстера. Согласно его схеме одновременные треки наблюдаемых групп были треками нескольких δ -лучей, рожденных одной и той же β -частицей.

Многие теоретики высокого ранга (и в меньшей степени экспериментаторы) прошли длинный путь исследований, прежде чем прийти к пониманию природы этого явления. В этой связи следует упомянуть имена В. Гейтлера, Г. Бете, Р. Оппенгеймера, К. Вейцсера и многих других. Решение загадки — первый вариант каскадной теории ливней — появилось в 1937 г. в работе Х. Баба и В. Гейтлера [15].

Для последующего развития физики открытие Ожэ (перед самой войной) атмосферных ливней — "ожэ-ливней" — имело большое значение [16]. Это соответствует времени, когда я начал работу в Физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева в Москве.

Ожэ наблюдал совпадения в двух счетчиках, расположенных на расстоянии 300 м друг от друга или около того (в горизонтальной плоскости).

В последние годы войны (1944, 1945) исследования космического излучения в Физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева были возобновлены.

Я предложил Г. Зацепину начать наблюдения атмосферных (позже известных как широких) ливней и попытаться получить этим методом информацию о частицах космического излучения самой высокой энергии. Первым шагом в направлении к этой цели было использование устройства из двух пар счетчиков, расположенных на самом большем (насколько это возможно) расстоянии одна от другой. Используя четырехкратные совпадения вместо двукратных, как в экспериментах Ожэ, можно было уменьшать влияние постороннего фона случайных совпадений. Эти эксперименты, выполненные Зацепиным с сотрудниками, были успешными. Они стали отправным пунктом развития более сложных и более совершенных устройств в различных направлениях исследований. Это составило очень увлекательную главу новейшей физики высоких энергий.

В течение последующих десятилетий работа в этой области велась коллективом высококвалифицированных научных сотрудников Физического института АН СССР им. П.Н. Лебедева и МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skobeltzyn D. — Z. Phys., 1927, Bd 43, S. 354; 1929, Bd 54, S. 686; Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1932, vol. 195, p. 315.
2. Bothe W. — Z. Phys., 1923, Bd 12, S. 127.
3. Bohr N. — Philos. Mag., 1913, vol. 25, p. 10; 1915, vol. 30, p. 581.
4. Geiger H., Müller W. — Naturwissenschaften, 1928, Bd 16, S. 617.
5. Bothe W., Kolhörster W. — Ibid., S. 1045; Z. Phys., 1929, Bd 56, S. 751.
6. Moth-Smith L., Locher G. — Phys. Rev., 1931, vol. 38, p. 1399.
7. Millikan R., Anderson C. — Ibid., 1932, vol. 40, p. 325.

8. Anderson C. — Science, 1932, vol. 76, p. 1967.
9. Anderson C. — Phys. Rev., 1933, vol. 43, p. 491.
10. Blackett P., Occialini G. — Proc. Roy. Soc., 1933, vol. 139, p. 699.
11. Dirac P. — Ibid., 1930, vol. 126, p. 360.
12. Joliot-Curie F. and I. Oeuvres Scientifiques Complets. Paris: Press. Univ., 1961, p. 505.
13. Auger P., Skobelzyn D. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1929, vol. 189, p. 55.
14. Heisenberg W. — Ann. Phys., 1932, Bd 13, S. 430.
15. Bhabha H., Heitler W. — Proc. Roy. Soc., 1937, vol. 159, p. 432.
16. Auger P., Maze R. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1939, vol. 208, p. 1641.

МОДЕЛЬ АТОМНОГО ЯДРА И ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Д.Д. Иваненко

МОДЕЛЬ ЯДРА

Введение. Задачи статьи. Как известно, атомные ядра оказались составленными из протонов и нейтронов, являющихся барионами, "тяжелыми" частицами, в противоположность электронам и другим "легким" частицам — лептонам. Здесь имеются в виду обычные ядра, входящие в состав атомов вещества Земли, Солнца и т.д., и оставлены пока в стороне более общие, также барионные системы, например гиперъядра, содержащие наряду с протонами и нейтронами Λ - и Σ -гипероны и другие, еще гипотетические, экзотические барионные системы типа "бариония" (еще не открытая с достоверностью система протон-антипротон — по информации Европейского физического общества в Лиссабоне, июль 1981 г.). Не будем касаться также обсуждаемых в последнее время гипотетических сверхплотных ядер, содержащих бозонный конденсат пионов, возможно, реализуемых в космических объектах или при столкновении ядер. Говоря об атомах, будем иметь в виду обычные системы, составленные из вращающихся вокруг ядер электронов, если не будут сделаны указания на мезоатомы, в которых электрон заменяется мюоном или пионом, или на системы типа позитрония (электрон-позитронный безъядерный атом).

Гипотеза протон-нейтронного состава ядер была высказана мной вскоре после открытия нейтрона Чадвиком (его сообщение датировано 17 февраля 1932 г.), окончательно она подтвердилась уже в начале становления современной ядерной физики. Как сейчас ясно, протон-нейтронная модель оказалась одним из необходимых отправных пунктов развития ядерной физики наряду с другими фундаментальными открытиями и идеями 1932–1934 гг. — "великого трехлетия" (по удачному выражению Б.М. Кедрова). К ним прежде всего относятся открытие тяжелой воды и дейтрона, искусственное расщепление ядер, открытие позитрона, искусственной позитронной и электронной радиоактивности, космических ливней, гипотеза нейтрино, создание первых ускорителей, выяснение специфического характера ядерных сил, полевая модель ядерных сил как ступень к теории мезонов, подходы к капельной и оболочечной моделям ядер.

Поскольку основные аргументы против существования электронов в ядрах, т.е. против старой протон-электронной модели, и обоснование ба-

рионной модели давно стали общепризнанными, излагаются в монографиях, университетских курсах, трудах по истории и философии науки, формулируются коротко в школьных учебниках, на первый взгляд может показаться излишним возвращаться сейчас к этому вопросу. Однако до сих пор некоторые авторы, в том числе историки науки, умалчивают о довольно продолжительных спорах вокруг протон-нейтронной модели, ошибочно говорят о будто бы незамедлительном ее признании. На самом же деле эта модель ядра вовсе не была сразу безоговорочно принята, с ней в 1932–1933 гг. конкурировали иные представления, вокруг нее шли довольно продолжительные дискуссии, как правильно подчеркивают, например, П.С. Кудрявцев и другие историки науки. Анализ этих дискуссий (в частности, колебаний Гейзенберга относительно полного признания протон-нейтронной модели, в развитие которой сам он внес большой вклад) представляет интерес не только для истории ядерной физики, но в известном смысле и для нынешнего этапа познания материи, связанного с трактовкой элементарных частиц как систем кварков (а в дальнейшем, возможно, субкварковой – преонной – структуры самих кварков), а также с выяснением роли гравитации в микромире и связи его с космологией.

Поэтому прежде всего остановимся на дискуссиях о протон-нейтронной модели в первые годы после ее появления, в частности на 1-й Советской конференции по атомному ядру 1933 г. и Сольвеевском конгрессе 1933 г. Представляют интерес также более поздние дискуссии о модели ядер и по другим вопросам на конференциях по истории науки, из которых обратим особое внимание на 3-ю американскую конференцию по истории ядерной физики 1977 г. [1]. Коротко будут затронуты другие четыре довоенные советские конференции по ядру (1936–1940). Затем обратимся к проблеме ядерных сил, остановившись на советских работах по первой полевой нефеноменологической модели парных электрон-нейтринных сил (1934), являвшейся ступенью к мезонной теории Юкавы (1935). Совсем коротко будут изложены некоторые современные проблемы, представляющие собой развитие ряда идей, возникших в первые годы после рождения ядерной физики. Таким образом, будут значительно полнее рассмотрены вопросы, частично изложенные в статье "Как создавалась модель атомного ядра" в сборнике [2].

Протон-нейтронная модель ядра. Поскольку значение массы ядер примерно вдвое у легких ядер и втрое у более тяжелых превышает значение их заряда, построить ядра из одних протонов невозможно (отвлекаясь от природы ядерных сил, которые могли бы как-то противодействовать кулоновскому отталкиванию протонов). Поэтому естественной оказалась модель протон-электронного состава ядер, предложенная голландским физиком ван ден Бруком (1913), который, кроме того, установил, что порядковый номер в менделеевской периодической системе совпадает с зарядом ядра. Масса ядра определялась числом протонов, а для компенсации части заряда допускалось наличие в ядрах соответствующего числа электронов: например, считали, что в ядре азота ${}^{14}_7\text{N}$ 14 протонов и семь электронов; испускание электронов ядрами при β -распаде, на первый взгляд подобное появлению протонов при расщеплении ядер, также

говорило в пользу данной модели. Очевидным также казалось наличие в ядрах (максимально возможного числа) α -частиц. Теория α -распада как квантового туннельного эффекта (Г.А. Гамов, Кондон и Герни, 1928 г.) указывала на наличие потенциального барьера и подтверждала существование в ядрах некоторых короткодействующих сил в противоположность кулоновским силам, медленно убывающим с расстоянием (как r^{-2}).

Для теории атомных электронов долгое время было достаточно знать массу и заряд ядра; однако когда к началу 30-х годов были измерены спиновые и магнитные моменты многих ядер и определен тип их статистики, стали выясняться все более глубокие противоречия протон-электронной модели. Оказалось, что нельзя применять квантовую механику к предполагаемым "внутриядерным" электронам. Согласно опытам ядра с четным массовым числом A имели целые значения спина, с нечетным — полуцелые значения спина, что не удавалось согласовать с допускаемым общим числом протонов и электронов в ядрах. Далее, эксперименты показали, что ядра с четным массовым числом подчиняются статистике Бозе; это особенно убедительно доказали наблюдения полосатого спектра азота итальянским физиком Разетти (впоследствии сотрудником группы Ферми, стимулировавшим у Ферми интерес к изучению ядра). В то же время протон-электронная модель приводила для главного изотопа азота $^{14}_7\text{N}$ к статистике Ферми—Дирака. Вопрос о статистике системы фермионов был подробно проанализирован Эрэнфестом и Опенгеймером; их теорема гласила, что система из нечетного числа фермионов (каковыми являются протоны и электроны — частицы с полуцелым спином) должна подчиняться статистике Ферми—Дирака, а система (например, ядра) из четного числа фермионов — статистике Бозе. Эта важная теорема рассматривалась и уточнялась до последнего времени (Барут, Хааг и др.).

Критическая для протон-электронной модели ситуация, особенно ясно проявившаяся на данном примере, стала именоваться "азотной катастрофой". Некоторые физики (например, Гейтлер, Герцберг) начали говорить о "потере" спина внутриядерными электронами, о "потере" статистических свойств! В этом же направлении шел анализ магнитных моментов ядер (в измерениях сверхтонкой структуры спектров сыграли важную роль советские физики А.Н. Теренин, С.Э. Фриш и др.). Все ядерные магнитные моменты оказались порядка протонного, а не электронного магнетона Бора (заметим, что "боровское" значение магнетона для электрона было введено румынскими физиками еще до появления теории Бора).

Однако аргументы, основанные на магнитных моментах, в некоторой степени играли роль, противоположную указаниям, связанным со спином и статистикой ядер, что довольно сильно насмущало. Действительно, для магнитных моментов нет закона сохранения; кроме того, именно для релятивистских частиц эти моменты уменьшаются, а предполагавшиеся легкие "внутриядерные" электроны вполне можно было считать релятивистскими в противоположность протонам и α -частицам, так что малые значения магнитных моментов ядер, возможно, не противоречили наличию внутри них электронов. Интересно, что, анализируя

аргументы против старой протон-электронной модели, Уилер вспоминал в дискуссии 1977 г. [1, с. 257], что аргументы, связанные с магнитными моментами электронов, не были решающими.

Наряду с этими аргументами на аномальное поведение "внутриядерных" электронов указывал β -распад с его непрерывным энергетическим спектром электронов (до некоторого значения энергии, устанавливаемого с трудом). Трактовка β -распада как туннельного эффекта, в духе α -распада, не была успешной. Казалось странным появление непрерывного спектра при переходе ядра из одного состояния с определенной энергией в другое (опыты Эллиса и Мотта, позже Мейтнер и Ортмана). Нильс Бор снова пытался усмотреть здесь нарушение закона сохранения энергии, так же как при своей неудачной попытке совместно с Крамерсом и Слэтером предсказать несохранение энергии в атомных процессах, в эффекте Комптона (что было опровергнуто опытами Боте, но все же сыграло некоторую положительную роль в развитии теории дисперсии Крамерса-Гейзенберга и вообще подчеркнуло критическое состояние теории Бора, исчерпавшей свои возможности накануне создания квантовой механики). Конечно, глубокие трудности в понимании структуры ядра и β -распада, указывавшие на аномальное поведение "внутриядерных" электронов, были известны всем размышлявшим над этими проблемами, и еще до открытия нейтрона были предложены варианты разрешения трудностей.

Нильс Бор считал, что невозможно придать электрону разумный смысл заряженной материальной точки в области малого размера, меньшего его классического радиуса (порядка 10^{-13} см). Поддерживая эти соображения Бора, Гейзенберг в своем докладе на 7-м Сольвеевском конгрессе (1933) перечислил трудности со спином, статистикой, выходами энергии, β -распадом и указал на неприменимость квантовой механики к "внутриядерным" электронам. На самом же деле, как показывают современные эксперименты, например, с эффектом Комптона, рассеянием и рождением частиц, квантовая электродинамика, оперирующая с точечными электронами, справедлива во всяком случае до расстояний порядка 10^{-17} см, так что классический электромагнитный радиус электрона 10^{-13} см не представляет собой границы применимости теории электрона. Все же эти, пусть не очень ясные, соображения Бора шли отчасти в правильном направлении — в направлении анализа поведения электронов на малых расстояниях. Касаясь β -распада, Бор предлагал строить новую теорию, в которой не имел бы места закон сохранения энергии; в более мягкой форме он говорил об этом еще в конце 1933 г. на 7-м Сольвеевском конгрессе, указывая на невозможность, по его мнению, определить понятие энергии в некоторых ядерных процессах.

Паули категорически не соглашался с идеями Бора о несохранении энергии при β -распаде и тем более с его попыткой объяснить таким образом происхождение излучения звезд (связь несохранения энергии с излучением звезд одно время поддерживали Л.Д. Ландау и Бек). В письме к Бору (17 июля 1929 г.) Паули писал, что он не согласен с той частью присланной ему статьи, которая относится к β -распаду, и советовал Бору отказаться от ее публикации: "Пусть звезды спокойно продолжают из-

лучать". Все же эта дискуссия, вероятно, сыграла положительную роль, побудив Паули выдвинуть для обеспечения сохранения энергии гипотезу вылета из ядра при β -распаде вместе с электроном частицы малой или исчезающе малой массы, названной нейтрино. По-видимому, впервые эта частица была упомянута Паули в письме, адресованном Мейтнер и Гейгеру — участникам физической конференции в Тюбингене, и начинавшемся обращением: "Уважаемые радиоактивные дамы и господа ...". Сам Паули не был уверен в своей гипотезе и в первое время не упоминал о ней в публикациях, а ссылка на нее была сделана в одной из статей Оппенгеймера.

Гипотеза была изложена Паули в 1931 г. на конференции в Пасадене и более подробно — на Сольвеевском конгрессе в 1933 г. [3, с. 324]. Реально нейтрино (точнее, антинейтрино) были открыты в 1957 г. Рейнесом, использовавшим интенсивные потоки антинейтрино из реакторов. Как известно, построенная с допущением существования нейтрино теория β -распада Ферми 1934 г. (даже простейшая ее форма — теория Перрена) со всеми дальнейшими уточнениями как база теории слабых ("атеннонных") взаимодействий уже фактически не оставляла сомнений в реальности нейтрино (см. статью С.С. Герштейна, А.А. Логунова в настоящем сборнике).

Вместе с тем в моей работе 1930 г. с В.А. Амбарцумяном и в несколько более поздней работе Гейзенберга была высказана идея существенного изменения геометрической структуры пространства-времени на малых расстояниях, а именно переход в дискретность. В качестве модели была выбрана простая решетка, и был рассчитан потенциал (гриновская функция уравнения Лапласа—Пуассона в конечных разностях). Это привело к замене кулоновского потенциала, пропорционального r^{-1} , при $r \rightarrow 0$ величиной, пропорциональной $1/a$, где a — шаг решетки; тем самым устранялось бесконечное значение собственной энергии электрона. В известной мере "к счастью" эти соображения не стали применяться к "внутриядерным" электронам, но сами по себе дали импульс многим вариантам теории дискретного пространства или одного только дискретного времени, разрабатываемым до настоящего времени (операторы координат Снайдера, "хрононы" Кальдиrolа и др.). Предположение о дискретности геометрии, реализуемой в экстремальных условиях сверхвысоких значений энергии и плотности, в последнее время высказывается и разрабатывается многими учеными (Вейцекером, Финкельштейном, Пенроузом, Теразавой, Нильсеном, Г. Сарданашвили, Д.Д. Иваненко и другими) и обсуждается с философской точки зрения.

Так или иначе, но эта работа побудила нас с В.А. Амбарцумяном проанализировать поведение электронов внутри ядер с наиболее принципиальных позиций, учитывая, конечно, упомянутые аномалии со спином, статистикой, магнетизмом, β -распадом. Существенно, что оценка ядерной энергии по дефекту массы указывала на ее большое значение; освобождающаяся при ядерных реакциях энергия (миллионы электронвольт) значительно превосходила собственную энергию электрона ($0,5 \cdot 10^6$ эВ); в атомной же оболочке энергия связи и энергия атомных переходов гораздо меньше собственной энергии электрона mc^2 , поэтому электроны

сохраняют в атомах свою индивидуальность. Точно так же собственная энергия протонов (и нейтронов) гораздо больше собственной энергии связи в ядрах (в среднем около $7 \cdot 10^6$ эВ на барион). Согласно принципу неопределенности на ядерных расстояниях (порядка 10^{-13} см) электроны должны были бы обладать большими импульсами и энергией $\epsilon \gg \gg 137 mc^2$, однако никак не проявлявшейся. Кроме того, релятивистские электроны при внутриядерных взаимодействиях должны были бы по современной терминологии порождать электрон-позитронные пары, которые также не наблюдались. Де-Бройлевская аналогия частиц и фотонов подсказывала нам возможность рассматривать β -распад как излучение частиц, ранее не существовавших в "готовом" виде, подобно излучению фотонов атомами и ядрами. В сущности, уже формализм вторичного квантования поля электронов (Иордан) указывал на возможность и уничтожения частиц, но на это не обращали внимания и трактовали этот формализм только как вспомогательный прием (на появление нашей протон-нейтронной модели ядра косвенное влияние оказал доклад Иордана о вторичном квантовании поля частиц, сделанный им на 1-й Советской конференции по теоретической физике). То же направление имели дираковская гипотеза дырок и предсказание им аннигиляции пар частиц (электронов и позитронов), в то время еще никак не доказанное экспериментально и еще далеко не признанное теоретиками (против него, в частности, возражал Нильс Бор). Не решаясь еще "изгнать" электроны из ядер, мы писали, что "внутриядерные" электроны, потерявшие, согласно указанным аргументам, свою индивидуальность как частицы, следует как-то связать с протонами, "приписать" их к протонам (как отметили некоторые историки науки, это было в каком-то смысле "предсказанием" нейтрона). Еще до обнаружения всех упомянутых трудностей и без анализа поведения электрона внутри ядер некую систему из протона и электрона, меньших по размерам, чем атом водорода, предсказал ранее (в 1920 г.) Резерфорд, аналогичную мысль высказал также Харкинс.

Вследствие указанных соображений открытие нейтрона и привело к гипотезе, что атомные ядра составлены только из нейтронов и протонов (в них могут находиться и другие барионы, но никак не лептоны). Наши коллеги при обсуждении этой гипотезы в марте—апреле 1932 г. не поддержали ее и сочли либо преждевременной (даже наиболее близкие по умонастроению люди), либо ошибочной (Вейскопф); но как раз неубедительность подобных замечаний все больше убеждала нас в правильности гипотезы.

Короткая заметка о новой модели ядра, подписанная 21 апреля 1932 г., была послана в английский журнал "Nature" и опубликована 28 мая 1932 г. Расширенная публикация была сделана в советском журнале на западных языках, только что начавшем выходить в Харькове на базе Физико-технического института. Наиболее ясное изложение обеих частей нашей гипотезы (о протон-нейтронном, безэлектронном составе ядер с признанием протонов и нейтронов элементарными частицами и о рождении электронов при β -распаде подобно фотонам) было опубликовано в августе 1932 г. во французском журнале "Comptes rendus" Парижской Академии наук (по представлению известного экспериментатора Мориса де

Бройля — старшего брата Луи де Бройля, через которого была направлена статья).

Так удалось закрепить за советской наукой приоритет в установлении модели ядра. Поскольку вопросы приоритета, кроме, вообще говоря, не столь значительных моментов персонального характера, отражают борьбу научных направлений или различных групп в тех или других странах и тем самым представляют интерес для истории науки, целесообразно остановиться на этих вопросах и устранить отдельные неточности. Как видно из публикаций в научных журналах 1932—1933 гг., из монографий, начиная с книг Фезера, Бете, из докладов на 1-й конференции по атомному ядру в Ленинграде, на 7-м Сольвеевском конгрессе и на более поздних международных и советских конференциях по истории науки (проходивших, в частности, в Париже — 1968 г., Миннеаполисе — 1977 г., Тамбове — 1974 г., Бухаресте — 1981 г.), а также из трудов историков науки М. Лауэ, М. Льюиса, П.С. Кудрявцева, А.Н. Вяльцева, Я.Г. Дорфмана, Э.В. Шпольского и других, приоритет советской науки в установлении протон-нейтронной модели ядра бесспорен. Упоминание большого вклада Гейзенберга, первым начавшего успешно развивать эту модель, вполне оправдано, утверждение же о будто бы "независимом" предложении модели Гейзенбергом, очевидно, является неточным; сам Гейзенберг в первой своей статье о строении ядра, направленной в печать 7 июня 1932 г., ссылается на публикацию советского автора.

Однако заслуживает внимания выяснение вопросов о вкладе в теорию ядра итальянского теоретика Этторе Майораны — участника семинара Ферми, которого он, как вспоминают, иногда даже побеждал в спорах. Как писали Амальди (см. его статью в настоящем сборнике), Сегре [1, с. 48] и Понтекорво, во-первых, Майорана еще до Чадвика сообразил, что в опытах Жолио-Кюри 1932 г. речь идет не о высокоэнергетических фотонах, выбивавших протоны из ряда содержащих водород веществ, а о нейтронах, но не сделал об этом публикации; во-вторых, как вспоминают эти авторы, он также пришел к идее о протон-нейтронном составе ядра, но опять-таки ничего не печатал по этому вопросу. Нет сомнений в том, что Майорана мог близко подойти к правильному решению указанных проблем, и все же здесь, во всяком случае относительно протон-нейтронной модели, имеет место, по-видимому, недоразумение. Ведь первая опубликованная Майораной работа по ядерной физике относится не к вопросу о структуре ядра, а к варианту обменных сил, развивающему работу Гейзенберга, притом опубликована она была не в 1932 г., а в 1933 г. Если Майорана действительно близко подошел к решению этой проблемы, то непонятно отсутствие его работ по выяснению спорных вопросов, касающихся модели ядра, на фоне значительного числа тогда еще противоречивых публикаций. Кроме того, по некоторым свидетельствам Майорана сперва даже вообще не считал развитие следствий протон-нейтронной модели перспективным и удивлялся появлению серии работ советских ученых в этом направлении. Как видно из доклада Ферми на конгрессе электриков в Париже летом 1932 г., у него и его сотрудника Майораны не было тогда каких-либо решающих аргументов в пользу той или иной модели ядра. Итальянский физик предпочел в своем выступлении оставить этот

вопрос открытым и лишь отметил трудности старой протон-электронной модели, игнорируя новые гипотезы о наличии нейтронов в ядрах, уже опубликованные в печати. Поэтому, на наш взгляд, вопреки предложению упомянутых итальянских авторов включение Майораны в число соавторов протон-нейтронной модели ядра не обосновано. Это заключение согласуется с мнением Гейзенберга, который, подробно обсуждая обменные силы Майораны в своем сольвеевском докладе, никак не включает его в число авторов протон-нейтронной модели.

Майорана известен как один из создателей не только теории обменных сил, но и теории вещественных спиноров, которые в последнее время привлекаются для описания нейтрино. Таинственное исчезновение в 1938 г. 32-летнего быстро выдвинувшегося профессора университета в Палермо произвело тяжелое впечатление и до сих пор служит предметом всевозможных предположений. Имя Этторе Майораны носит ныне научный центр в Болонье, организующий многие авторитетные конференции в городке Эриче (Сицилия).

Вскоре после открытия нейтрона и удачных попыток выбить его из ряда ядер Перрен и Ожэ предложили модель ядра, составленного из протонов, нейтронов и электронов; легкие ядра содержали только протоны и нейтроны, а начиная с радиоактивного нуклида ${}_{19}^{41}\text{K}$ в ядрах находились по их модели электроны, которые и испускались при β -распаде. Конечно, подобные представления не только не объясняли β -распада, но и оставляли проблемы старой протон-электронной модели нерешенными. Перрен вскоре в одной из статей отказался от своей модели и высказался за протон-нейтронную модель, ссылаясь на нашу публикацию. Однако довольно неожиданно в защиту модели Перрена выступил на 7-м Сольвеевском конгрессе в октябре 1933 г. Дирак; он сослался на то, что "пары электронов, присутствующие в большинстве ядер, не будут сказываться хотя бы на спин-статистических" трудностях [3, с. 329]. Гейзенберг возразил, что аналогично калию можно было бы сконструировать также радиоактивное ядро рубидия ${}_{37}^{87}\text{Rb}$ из 19 α -частиц, 11 нейтронов и одного электрона, что противоречило бы, однако, его полужелому (а не целому) значению спина $5/2$, уже известному в то время. Более того, на конгрессе Бор стал обсуждать вопрос, что излучает на самом деле этот изотоп калия: электроны или позитроны? Чадвик, Оккиалини, Мейтнер, Стефан Мейер сообщили, что не нашли здесь позитронов, как и следовало ожидать. В завершение дискуссии Дирак, почему-то совсем не касаясь принципиальных трудностей, связанных с "внутриядерными" электронами или с β -распадом, заметил лишь, что "внутриядерных" электронов, во всяком случае, немного, и мы могли бы действительно рассматривать ядра как "составленные в основном из протонов и нейтронов". Эта любопытная, явно запоздалая дискуссия еще раз продемонстрировала сомнения, возникавшие относительно протон-нейтронного строения ядер даже в конце 1933 г.; выступление Дирака показывало необходимость как привлечения принципиальных аргументов, так и наиболее полного использования эмпирических данных о спинах, статистике и других свойствах ядер.

Наибольшие сомнения вызвала вторая часть нашей гипотезы, связанная с трактовкой β -распада как рождения электронов. Гейзенберг, призна-

вавший первую часть гипотезы, т.е. протон-нейтронный состав ядер, в первой же своей фундаментальной статье (из серии трех работ), посланной в печать в июне и опубликованной в июле 1932 г., вместе с тем предполагал наличие электронов внутри нейтронов и даже стал рассчитывать рассеяние γ -излучения на ядрах (конечно, безуспешно) как рассеяние на гипотетических "внутринейтронных" электронах. На основе этого предположения Гейзенберг пытался анализировать также ряды радиоактивных элементов. Чадвик тоже долго не исключал возможности того, что нейтрон состоит из протона и электрона.

Очевидно, развитие модели ядер не могло пройти мимо решения фундаментального вопроса о том, являются ли протон и нейтрон элементарными частицами. Если признавать наличие электрона внутри нейтрона, то почему бы не считать протон состоящим из нейтрона и позитрона? На такую возможность, высказанную Жаном Перреном, указывал его сын Ф. Перрен в своем докладе на Ленинградской конференции по атомному ядру (1933). Он заметил, что три варианта модели ядра (протон-электронная, нейтрон-позитронная и предложенная нами модель) не так уж резко разграничены и противоречивы, как это кажется на первый взгляд [4, с. 31]. В докладе обсуждались также наличие в ядре α -частиц и ранние оболочечные представления, однако Ф. Перрен еще не присоединился к нашей идее рождения электронов при β -распаде и допускал, в духе Нильса Бора, сохранение энергии только в среднем [4, с. 36]. Вместе с тем он указывал на то, что протон и нейтрон эквивалентны, оба они являются элементарными или сложными частицами. М.П. Бронштейн считал в то время, что вообще вопрос об элементарности протона и нейтрона имеет будто бы только "филологический" характер [4, с.59]. Г.А. Гамов в дискуссии на Ленинградской конференции также возражал против элементарности нейтрона. Нильс Бор на Сольвеевском конгрессе отмечал, что недавние эксперименты делают, по его мнению, наиболее естественной гипотезу о том, что протон состоит из "нейтрона и позитрона"; что касается несохранения энергии при β -распаде, то Бор уже в более мягкой форме указывал на то, что он хотел в основном подчеркнуть полную неприменимость классических концепций для трактовки этой проблемы [3, с. 216].

Мы привели часть характерных высказываний о модели ядра, β -распаде, элементарности протона и нейтрона ряда авторитетных теоретиков и экспериментаторов, чтобы наглядно показать трудности становления правильной модели ядра и наличие многих неясностей в этой проблеме еще в конце 1933 г. В своем большом докладе на Сольвеевском конгрессе [3, с. 289] Гейзенберг привел данные о составе ряда изотопов бериллия, бора, калия, свинца согласно четырем моделям ядра: 1) α -частицы, протоны, электроны (Г.А. Гамов); 2) α -частицы, протоны, нейтроны, электроны (Перрен); 3) и 4) α -частицы, протоны, нейтроны или только протоны, нейтроны (Д.Д. Иваненко и в дальнейшем Е.Н. Гапон). Рассмотрев вновь трудности, к которым приводит допущение "внутриядерных" электронов, Гейзенберг, склоняясь к протон-нейтронной модели с допущением образования α -частиц как системы ($2p, 2n$), вместе с тем осторожно указывал на то, что, хотя эта модель вряд ли лучше подтвержде-

на экспериментально, чем модели с участием электронов, все же полезно развивать ее следствия на основе квантовой механики, поскольку при введении определенного закона взаимодействия между протонами и нейтронами вопрос о структуре ядер можно полностью рассмотреть. Таким образом, Гейзенберг даже в 1933 г. отводил в сторону вопросы об элементарности протона и электрона и β -распаде. Как Гейзенберг писал позже, ему значительно труднее было решить вопрос о полном "изгнании" электронов из ядра, когда он был вынужден отбросить в конце концов (очевидно, и под влиянием ряда аргументов других ученых) свое промежуточное предположение о наличии электронов внутри нейтрона. Как известно, это ошибочное предположение привело все же Гейзенберга к правильному допущению наличия обменных сил между нуклонами по аналогии с теорией молекулы водорода (где силы реализуются квантовыми "перебросами" реальных электронов). В дальнейшем наряду с гейзенберговскими обменными силами (обмен спинами) Майорана ввел другие обменные силы (обмен координатами) и предложил для радиальной зависимости сил вид $I = ae^{-br}$. Самое существенное, однако, в работе Гейзенберга, как стало ясно позднее, заключается в том, что, "ощущая" эквивалентность протона и нейтрона, Гейзенберг ввел впервые понятие внутренней степени свободы — изоспин, значения которого $\pm 1/2$ различают два состояния нуклона, проявляющиеся или как протон, или как нейтрон.

Таким образом, построение теории ядра опиралось на физику элементарных частиц и вместе с тем стимулировало дальнейшее ее развитие, так же как развитие релятивистской квантовой теории поля. Ошибочное представление Гейзенберга о "внутринейтронных" электронах и его попытки рассчитывать рассеяние γ -излучения на ядрах как рассеяние на подобных электронах, так же как его колебания в трактовке β -распада, остались достоянием истории физики ядра, демонстрируя трудности построения правильной модели ядра; реальным же положительным фактом оказалось общее влияние на развитие ядерной физики работ Гейзенберга, первым поддержавшим и начавшим развивать протон-нейтронную модель, и его прекрасная догадка об изоспине, давшая импульс к введению других внутренних степеней свободы с их новыми квантовыми числами, что является фундаментом всей современной концепции элементарных частиц и калибровочной теории поля (см. статью С.С. Герштейна, А.А. Логунова в настоящем сборнике).

Мне запомнились встречи с Вернером Гейзенбергом на зарубежных конференциях 1957, 1958 гг., а также во время его единственного посещения Советского Союза в 1959 г. во время проведения 9-й Международной конференции по физике высоких энергий в Киеве. Эти встречи имели для нас особое значение ввиду благоприятного "перекрытия" ряда работ (дискретное пространство, модель ядра и ядерные силы). В послевоенные годы Гейзенберг, один из основателей нерелятивистской матричной квантовой механики, обратился к построению единой теории поля, исходя из предложенного мной нелинейного спинорного уравнения, обобщающего обычное релятивистское уравнение Дирака.

Интересно, что, обратясь к физике ядра, Гейзенберг первое время еще не стоял на релятивистских принципах, что и объясняет, возможно, его ошибки и сомнения в вопросах структуры нейтрона, рождения электронов в процессе β -распада и др. Но этот крупнейший теоретик нашего времени сумел перейти на квантово-реляти-

вистские позиции в теории ядра, внес существенный вклад в ее разработку и в завершение своей плодотворной деятельности подошел к проблеме построения единой теории поля полностью с квантово-релятивистской точки зрения.

В беседах с Гейзенбергом поражала быстрота его мышления. Он, почти не дожидаясь конца вопроса, схватывал его суть и давал ответ. Эта черта, а также готовность к дискуссии, явная склонность к коллективной работе (фундаментальная статья по единой теории подписана четырьмя авторами), хорошее знание эксперимента были очень характерны для Гейзенберга.

Для более полной характеристики Гейзенберга, деятельности которого посвящено много работ, нельзя не упомянуть о его разносторонней талантливости: как ученого, организатора науки в послевоенной Западной Германии, пианиста, спортсмена.

Вместе с Лауэ, Паули и другими учеными он подписал "Геттингенский манифест" восемнадцати западно-германских ученых, заявивших об отказе участвовать в работах по военному применению ядерной энергии.

Подобно Эйнштейну, Бору, де Бройлю, Юкаве, В.А. Фоку Гейзенберг был физиком-мыслителем. Не останавливаясь здесь на сколько-нибудь полной характеристике его философских взглядов, отметим только близость их к индетерминизму копенгагенской школы и вместе с тем его стремление в последние годы найти аналоги современной теории симметрии в трудах Платона. Необходимо указать также на его своеобразную близость к религии, к этическим ее сторонам, столь характерную для некоторых немецких ученых, например Планка, Гана, Мейтнер и др.

Эти замечания могут помочь читателю осознать стиль и программу работ Гейзенберга, который подобно Эйнштейну посвятил последние годы своей жизни построению единой теории поля.

Остановимся коротко на любопытном продолжении, которое имели дискуссии 30-х годов о модели ядра уже в недавнее время, на 2-й (1969) и 3-й (1977) Американских конференциях по истории ядерной физики (остановимся на последней из них [1]). В своем докладе "Счастливые 30-е годы" Ганс А. Бете подчеркнул, что признание протон-нейтронного состава ядра сделало возможным его квантовую трактовку; он считал, что представления Гейзенберга о "внутринейтронных" электронах непосредственно не мешали развитию собственно теории ядра. Вигнер в докладе "Нейтрон, влияние открытия" коротко напомнил этапы развития ядерной физики, начиная с предварительных предсказаний существования нейтрона Резерфордом и химиком Харкинсом (Чикаго) в 1920 г., и в "мягких" тонах отметил неточности и ошибки в работах Гейзенберга, отдавая вместе с тем дань их значению. В последующей дискуссии Бете упрекнул Вигнера, что тот в статье 1933 г. будто бы в недостаточно корректной форме отметил ошибку Гейзенберга, связанную с признанием наличия внутри нейтронов скрытых электронов. Вигнер справедливо возразил, что, обсуждая историю вопроса, мы должны быть честными и не замалчивать даже небольших, незначительных слабых пунктов в очень стимулирующих исследованиях [1, с. 163].

В конце концов Бете признал, что в работе Гейзенберга были ошибки и некоторые "атавизмы" типа обмена реальным электроном между протоном и нейтроном [1, с. 31]. Завершая дискуссию по этому вопросу, Пайерлс в докладе "О развитии идей о ядерных силах" подчеркнул, что самым трудным пунктом в модели ядра было признание полного отсутствия в них электронов. Фурнье, Перрен и другие физики допускали существование электронов наряду с протонами и нейтронами, однако (цитирую Пайерлса) "... в августе 1932 г. в своей статье Иваненко определен-

но указал, что β -электроны должны быть порождены в момент излучения, подобно фотонам, испущенным атомом. Насколько я знаю, это была первая публикация в печати с таким утверждением . . . С другой стороны, Гейзенберг занял весьма сложную позицию, как уже отмечалось в других докладах; он допустил наличие электронов в ядре, внутри нейтронов". Вспоминая ряд других аналогичных утверждений Гейзенберга, например о наличии электронов в тяжелых ядрах, испускающих β -электроны, Пайерлс справедливо сказал, что "подобные утверждения ныне, при ретроспективном взгляде, представляются весьма странными, но они показывают, как трудно было принять новую точку зрения" [1, с. 184]. Вместе с тем Пайерлс, конечно, отдал должное Гейзенбергу, первому предложившему теории ядерных обменных сил.

В обширном докладе Уилер, также принимавший участие в представительной конференции 1977 г., сказал: "Я признал и буду продолжать искренне применять, подобно другим коллегам, гипотезу Гейзенберга и Иваненко о том, что ядра составлены из нейтронов и протонов, но, однако, выясняя эту картину и никак не противореча ей, хочу вновь проанализировать структуру нейтрона и протона"; он подошел далее к вопросам о силах также с точки зрения запаздывающего действия на расстоянии (в духе Фоккера-Френкеля и более поздней, впрочем, оставленной затем самими Уилером и Фейнманом, теорией).

Эти недавние дискуссии убедительно показывают правоту тех историков науки, которые подобно П.С. Кудряцеву и А.Н. Вальцеву возражали против утверждений о будто бы "простом" характере протон-нейтронной гипотезы и будто бы имевшем место незамедлительном ее признании.

Важную роль в окончательном признании протон-нейтронной модели ядра сыграло открытие Блэккетом и Оккиалини рождения и аннигиляции электронов и позитронов в космическом излучении, наглядно продемонстрированных своеобразными ливнями на фотографиях в камере Вильсона (конец 1932 г. — начало 1933 г.). (Следы ливней в 1927–1929 гг. обнаружил еще Д.В. Скобельцын на своих известных первых снимках космического излучения.) Английский автор и его итальянский коллега ссылались при этом на нашу трактовку β -распада как процесс рождения электронов и учитывали теорию дырок и предсказание Дирака о рождении и аннигиляции пар частиц.

Таким образом, здесь наиболее отчетливо оказались связанными три важнейшие области физики — физика атомного ядра, космического излучения и квантовая релятивистская теория поля и элементарных частиц. Тем самым, в частности, было окончательно подтверждено и открытие позитрона, в котором был не совсем уверен его автор Андерсон, сперва опубликовавший в сентябре 1932 г. письмо об обнаружении им нескольких следов положительно заряженных частиц типа следов частиц с массой, меньшей протонной. Письмо было без фотоснимков, притом опубликовано оно было не в центральном американском журнале "Physical Review", а в журнале "Science", носившем обзорный, несколько популярный характер; никаких ссылок на теорию Дирака сделано не было. Более поздняя статья Андерсона со ставшей знаменитой фотографией следа позитрона была опубликована в начале февраля 1933 г. в "Physical Review", но и она носила следы поспешности, не содержала ссылок ни на предсказание Дирака, ни на эксперименты других авторов (Д. В. Скобельцына, Кунце). Даже аннотация перед статьей была написана не самим автором, а редактором журнала, и статья явно вне очереди была включена в очередной выпуск (для защиты приоритета американской науки в обстановке конкуренции с убедительными результатами Блэккетта и Оккиалини). На то, что результаты кембриджской группы стали ему известны "из прессы" (!), указывал в своей статье Андерсон. Так или иначе, этот своеобразный эпизод с публикацией фундаментального открытия (как известно, принесшего Андерсону Нобелевскую премию) иллюстрирует выход аме-

риканской физики на передовые позиции в физике ядра и элементарных частиц в начале 30-х годов.

Целесообразно напомнить об ошеломляющем впечатлении, произведенном работой Блэкетта и Оккиалини с ее великолепными фотографиями ливней. Пожалуй, ни одно открытие, ни одна новая идея на моей памяти не подействовали на нас подобным образом. Стало, наконец, ясно, что физика вступает в новую релятивистско-квантовую эпоху элементарных частиц, выполняется предсказание о позитронах-дырках, их рождении и аннигиляции с электронами и новая протон-электронная модель ядра, трактующая β -распад как рождение электронов, окончательно доказана. В Ленинградском физико-техническом институте на несколько дней чуть ли не приостановилась работа ряда отделов, люди ходили и дискутировали, завороженные новыми перспективами. От группы участников семинара по атомному ядру Блэкетту была послана приветственная телеграмма со следующим текстом (в русском переводе): "Поздравляем открытием позитронов, подтверждением старой идеи дырок". Когда мы встретились с Блэкеттом на одной из конференций в Венеции в 1957 г., он неожиданно заговорил об этой телеграмме 1933 г., текст которой, как оказалось, более 20 лет помнил наизусть!

Непосредственно вслед за установлением нуклонной модели ядра возникли проблемы ядерных сил и структуры сложных ядер. Отсылая по вопросам структуры и распределения нуклонов в ядрах к статье А.С. Давыдова и Г.Ф. Филиппова в настоящем сборнике, коротко остановимся на самых первых идеях в этом направлении. Крупный физико-химик Е.Н. Гапон пытался еще в старой модели (как Бек и некоторые другие) распределять ядерные протоны и электроны по оболочкам в духе периодической системы (конечно, безуспешно). Неудивительно, что в протон-нейтронной модели он был рад увидеть новые возможности в этом направлении и специально приехал в Ленинград (летом 1932 г.) для обсуждения интересовавших его вопросов. Нам прежде всего пришлось рискнуть сбросить гипноз будто бы всегда присутствующих в ядрах "в готовом виде", притом в максимально возможном числе, α -частиц (что подсказывали успехи теории α -распада).

Как теоретик я, конечно, настаивал на том, что порядок уровней нуклонов должен определяться видом специфических ядерных сил, тогда еще совершенно неизвестных, и не может совпадать с уровнями в атомах, задаваемыми в основном кулоновским полем (с соответствующим дополнительным учетом спинов, межэлектронных сил и т.д.). Пришлось ориентироваться на эмпирические соображения, например наличие более или менее резких минимумов на кривой дефекта массы, которые еще в "донейтронные" годы были отмечены Зоммерфельдом; следовало учесть также кривую распространенности элементов во Вселенной. После рассмотрения простейшего ядра гелия, имитирующего α -частицу и вместе с тем заполненную S -оболочку, возник вопрос о следующей заполненной оболочке, которую мы склонны были усмотреть в ядре изотопа кислорода $^{16}_8\text{O}$; тем самым удалось уловить два первых магических числа. Одновременно аналогичные идеи высказал Барлетт; затем их развили Эльзассер (взявший средний ядерный потенциал в виде прямоугольной ямы), Гуттенгеймер и другие, уже установившие в конце концов правильный ряд всех главных магических чисел 2, 8, 20, 50, 82. В Советском Союзе оболочки, магические числа и их более тонкую структуру ("субмагические" числа) исследовали Л.Я. Штрум, позднее И.П. Селинов, Н.Н. Колесников, С.И. Ларин и др. Однако, как хорошо известно, не-

достаток эмпирических данных и отсутствие убедительных теоретических аргументов относительно формы ядерного потенциала привели к тому, что оболочечная модель была оттеснена капельной моделью, триумфом которой явилась теория деления ядер Френкеля—Бора—Уилера. Оболочки были возрождены в работах Марии Гепперт-Майер (Чикаго), Зюсса и Иенсена при участии Хакселя (Гамбург). Любопытно, что, вспоминая историю обнаружения магических чисел и спин-орбитальной связи немецкими физиками, Зюсс указывал на серию магически-подобных чисел (вплоть до числа 126!), найденных известным минералогом Гольдшмидтом. (Мы с Е.Н. Гапоном примерно таким же образом использовали данные Е.А. Ферсмана по распространенности элементов.)

Наша работа с Е.Н. Гапоном по оболочкам, так же как и ряд дальнейших статей Е.Н. Гапона, касавшихся распределения нуклонов в ядрах, цитировалась в докладе Гейзенберга на Сольвеевском конгрессе 1933 г. наряду со статьей Бартлетта; работы советских ученых были известны также Эльзассеру, и, таким образом, наряду со статьей Бартлетта они дали первый импульс для развития фундаментальной теории оболочек. Чтобы подчеркнуть еще раз (на примере модели оболочек) трудности, с которыми сталкивалась современная ядерная физика в первые годы, отметим, что в дискуссии на американской конференции в 1977 г. на вопрос Бете, не возражал ли Вигнер в 1949 г. против модели оболочек, последний ответил, что, напротив, эти идеи произвели на него большое впечатление: "однако, — продолжал Вигнер, — был человек, который высказывался против оболочек, иронически сравнивая магические числа 8, 20, 50 с номерами остановок нью-йоркского метро, говоря, что всегда, мол, можно подобрать серию чисел, обладающих некоторым смыслом". Это был, как заявил Вигнер, превосходный физик и знаменитый человек — "никто иной, как Нильс Бор!" [1, с. 177].

Здесь следует отметить, что открытие нейтрона заинтересовало Бора прежде всего с позиции теории столкновений, а не в отношении проблемы структуры ядер; Бор вначале считал нейтрон комбинацией протона и электрона. Он интересовался особенно β -распадом, склоняясь к несохранению энергии в этом процессе и подчеркивая неприменимость квантовой теории к трактовке "внутриядерных" электронов.

Ореол, окружавший Нильса Бора — основателя квантовой теории атома, был исключительным, несравнимым ни с чем в физике нынешнего периода. Обращение Бора к ядру с 1939 г. было связано с удачным предсказанием роли изотопа урана ^{235}U при делении медленными нейтронами и построением совместно с Уилером теории деления ядер (параллельно с Я.И. Френкелем). О его неудачных попытках разрешения трудностей старой протон-электронной модели ядер и β -распада на основе несохранения энергии уже неоднократно говорилось выше; вместе с тем, на наш взгляд, совсем неслучайными оказались и другие ошибочные взгляды Бора по ряду самых фундаментальных вопросов. Известно, что даже в конце 1933 г. он допускал справедливость модели сложных нуклонов, строя протон из нейтрона и позитрона, что он скептически относился к теории дырок Дирака и предсказанию позитрона, возражал против гипотезы нейтрино Паули и гипотезы мезонов Юкавы.

По-видимому, все эти ошибки объясняются игнорированием возможностей зарождавшейся квантовой электродинамики и всей релятивистской теории поля и элементарных частиц, позволявших предсказать рождение и уничтожение час-

тиц и построить теорию ядерных сил, реализуемых с частицами, которые обладают массой покоя. Великий теоретик Нильс Бор, как видно, еще не воспринял полностью релятивистско-квантовые идеи, более того, он одной ногой, так сказать, стоял на позициях классической теории (отсюда понятна его трактовка ядра как деформируемой капли, способной к делению).

Что касается философских взглядов Бора, конечно, существенных для понимания его работ, то, не останавливаясь на них подробно, заметим, что Бор, по-видимому, преодолел эволюцию к кантианству. (Он подчеркивал, например, в своей статье в юбилейном сборнике в честь 100-летия со дня рождения Макса Планка в 1958 г. значение в физике "общего языка" для трактовки понятий.) Трудно, однако, согласиться с мнением В.А. Фока, что Бор полностью стоял на материалистических позициях при интерпретации квантовой механики.

Представляет интерес сделанная Бором прекрасная надпись мелом на стене нашего теоретического кабинета в Московском университете, которую он оставил после доклада. Памятная надпись, начертанная Нильсом Бором после продолжительного раздумья, на латинском языке гласит: "Contraria non contradictoria sed complementa sunt" ("противоположности не являются противоречиями, но дополняют друг друга"). Бор неоднократно посещал Советский Союз. На семинаре в Ленинградском физико-техническом институте большое впечатление произвел стиль его доклада, в котором он рельефно, рассматривая одну мысль с разных сторон, развивал суть проблемы. В последний свой приезд в 1961 г., незадолго до кончины, Нильс Бор, уже будучи членом Академии наук СССР, как и многих других академиков, был удостоен звания почетного профессора Московского университета. Посещение университета, теплота встречи его доклада, по всей видимости, произвели впечатление на Бора; довольно неожиданно он повторно приехал на физический факультет для осмотра лабораторий и, прощаясь, заметил: "Как бы я хотел учиться в Московском университете".

Прежде чем перейти к истории первых попыток построения теории ядерных сил как проблемы, возникшей непосредственно после установления модели ядра, остановимся коротко на организации советских конференций по атомному ядру. Удивительный рывок советской физики (и всей науки) в самые первые месяцы после Октябрьской революции, в труднейших условиях гражданской войны, голода, блокады хорошо известен из трудов многих историков науки. Организация в Ленинграде (Петрограде) Физико-технического, Оптического и Радиового институтов, развитие Института физики в Москве, реорганизация университетов быстро принесли свои плоды и позволили уже в 20-е годы получить перво-степенной важности результаты в физике твердого тела, оптике и спектроскопии, космическом излучении, теоретической физике и космологии. С 1919 по 1930 г. состоялось семь съездов физиков, которые потом были заменены многими конференциями по отдельным разделам физики. В конце 20-х годов на базе Ленинградского физико-технического института стали создаваться крупные центры в Харькове, Свердловске, Томске; к началу 30-х годов уровень подготовки физических кадров в Советском Союзе был достаточно высок для того, чтобы советские физики смогли заняться исследованиями ядра вскоре после открытия нейтрона. Уже через несколько месяцев после открытия нейтрона в Ленинградском физико-техническом институте была организована для изучения ядра группа в составе А.Ф. Иоффе (руководитель группы), И.В. Курчатова (заместитель руководителя), М.А. Еремеева, Д.В. Скобельцына, П.А. Богдзевича, И. Пустовойтенко, И.П. Селинова, М.П. Бронштейна, Д.Д. Иваненко; Г.А. Гамов и Л.В. Мысовский числились консультантами.

ми. Ответственность за работу семинара по ядру была возложена на меня. Обращает на себя внимание скромный первоначальный состав группы, а также особое ударение, которое сделано на организации семинара, что было столь характерно для стиля работы института. Начавший фактически работать еще до создания группы семинар по физике ядра стал своего рода общесоюзным форумом, на котором обсуждались все иностранные публикации, докладывались работы советских ученых, организовывались мероприятия типа экспедиции для исследования космического излучения на горе Алагез в Армении (1933 г.), обсуждались созыв 1-й Советской конференции по атомному ядру (24–30 сентября 1933 г.), научная программа высотного полета стратостата в 1935 г. и др.

Экспедиция для исследования космического излучения в составе В.М. Дукельского, Н.С. Ивановой, А.А. Малеева состоялась после наших предварительных поездок в Ереван (В.А. Амбарцумян и Д.Д. Иваненко — инициаторы работы и затем Д.В. Скобельцын, окончательно завершивший подготовку экспедиции и являвшийся ее научным руководителем). Была проделана полезная работа по изучению космического излучения в высокогорных условиях, в месте, расположенном на максимальной южной магнитной широте на советской территории. Позднее, в конце войны, здесь же продолжала работу группа А.И. Алиханьяна и был построен целый институт, занимающийся исследованием космического излучения.

Особую важность приобрела организация 1-й Советской конференции по атомному ядру, председателем оргкомитета которой являлся И.В. Курчатов (он в это время как раз "переключался" на ядерную физику). Мне, как ученому секретарю оргкомитета, пришлось, в частности, иметь дело с приглашением иностранных ученых, а затем совместно с Ю.Б. Харитоновым, М.П. Бронштейном и В.М. Дукельским организовать издание докладов и дискуссий [4]. На конференции присутствовало более ста советских ученых, главным образом из Ленинградского и Харьковского физико-технических институтов, к участию в конференции удалось привлечь ряд наиболее крупных западных ученых. Доклады сделали Ф. Жолио, Ф. Перрен, П.А. М. Дирак, Ф. Разетти, Л.Г. Грей; в работе конференции участвовали также В. Вейскопф, Г. Бек. Фактически это была первая современного типа международная конференция по атомному ядру, которая вместе с состоявшимся через месяц в Брюсселе 7-м Сольвеевским конгрессом (на нем Жолио, Дирак, Перрен, по существу, повторили свои соображения, высказанные в Ленинграде) подвела итоги первого, почти двухгодичного периода после открытия нейтрона.

Обе эти, без сомнений, авторитетные конференции выгодно отличались от предыдущей конференции по ядру (Римской, 1931 г.), участники которой, конечно, полностью стояли на "донецитронных" позициях и которая не оставила заметного следа в науке, несмотря на участие в ней Бора, Зоммерфельда, Боте, Ферми. Не сказалось значение открытия нейтрона еще и на традиционной Копенгагенской весенней конференции 1932 г. и на Международном конгрессе электриков в Париже летом 1932 г. Выступавшие на них физики еще целиком стояли на устаревших "донецитронных" позициях при обсуждении проблем ядра и космического излуче-

ния, несмотря на уже опубликованные дискуссии о модели ядра, радикально меняющие прежние представления.

На 1-й Ленинградской ядерной конференции Перрен и Д.Д. Иваненко выступили с сообщениями о структуре ядра. Г.А. Гамов сделал доклад о ядерных уровнях в модели прямоугольной ямы. Фундаментальный доклад "Теория позитрона" сделал П.А.М. Дирак, который изложил основы теории дырок и вакуума с первой трактовкой его поляризации. Доклад вызвал оживленную дискуссию: В.А. Фок указывал на трудности теории вакуума, связанные с расходимостями; И.Е. Тамм отметил связь теории дырок и шредингеровского разделения четных и нечетных частей операторов; Вейскопф и ряд советских ученых указывали на трудности определения координаты электрона при измерении ввиду рождения электрон-позитронных пар; Дирак же считал, что эти трудности удастся преодолеть.

Следует сказать, что стиль выступлений и статей Дирака отличался лаконичностью и четкостью. Девиз Дирака хорошо выражен в его надписи мелом на стене нашего теоретического кабинета на физическом факультете МГУ – первой из четырех надписей (Дирака, Юкавы, Бора, Уилера). Дирак написал: "Physical law should have mathematical beauty" ("физический закон должен обладать математической красотой"). В тех или других вариантах Дирак повторял этот тезис в статьях и докладах, делая ударение отнюдь не на незамедлительном согласии теории с экспериментом. Например, обсуждая трудности нынешней теории поля (сингулярности!), несмотря на все ее огромные успехи, Дирак призвал к отысканию новых фундаментальных закономерностей, а в одной из статей с видимым раздражением добавил, что, впрочем, вновь может появиться "какой-нибудь Гейзенберг", который разберется в обильном эмпирическом материале. (Действительно, знаменитую первую работу Гейзенберга 1925 г. никак нельзя назвать математически изящной, ведь он даже сначала не понял, что речь идет о матричной формулировке, как вскоре указали Борн и Иордан.)

Бек по-прежнему настаивал на несохранении энергии при β -распаде, указывая, что наличие нейтрино в ядрах представляет трудности (он забыл, однако, что нейтрино, как и электрон, по протон-нейтронной модели рождается при излучении). Конференция способствовала тому, что И.Е. Тамм и Я.И. Френкель вскоре вплотную занялись проблемами ядра.

Я.И. Френкель был теоретиком разносторонних интересов – от теории жидкостей, являвшейся его любимой темой, до теории ядра, в которую он внес вклад работами по термодинамике ядер, и первой теории деления (1939). Рассматривая ядра как деформируемые заряженные капли, Я.И. Френкель с типичной для него ясностью мышления уловил "игру" ядерных сил притяжения (поверхностного натяжения) и отталкивательных кулоновских сил, ввел характерный параметр Z^2/A аналогично тому, как это сделали Борн и Уилер в своей обширной работе (публикуя которую, они уже сослались на результаты советского автора, сообщенные им в письме Я.И. Френкеля). В Ленинградском физико-техническом институте Я.И. Френкель был центральной фигурой, к нему шли за помощью, и он всегда был готов дать в беседе добрый совет любому сотруднику. В области фундаментальных проблем он исследовал, в частности, классические уравнения движения частиц, обладающих спином; ему принадлежала важная идея квазичастиц окситонов. При всем том Я.И. Френкель, имевший немало учеников и являвшийся автором многих книг, не создал своей школы; по-видимому, для этого требовались некоторая "жесткость", а также склонность к коллективной работе и наличие более узкой, но долгосрочной программы. Я.И. Френкель же, можно сказать, слишком быстро сам решал возникающие вопросы, не привлекая сотрудников. Как это было не похоже на знаменитую копенгагенскую школу Бора, в некотором смысле "беспомощного" без непременных крупных ассистентов (Крамерса, Розенфельда,

Уилера и др.), школы Гейзенберга, который, например, разрабатывая многолетнюю программу единой спиновой теории и связывая ее со своими философскими стремлениями, печатал многие совместные статьи, иногда за подписью пяти лиц. Позволю себе добавить, что, несмотря на многолетние дружеские отношения и подробные обсуждения многих проблем, у нас с Я.И. Френкелем не было ни одной совместной работы.

Хобби Я.И. Френкеля, человека разносторонних дарований, являлась живопись, он оставил серию ценных портретов.

После Ленинградской конференции 1933 г. в первый ряд физиков-ядерщиков выдвинулся и московский теоретик И.Е. Тамм, известный своими работами по комбинационному рассеянию, развитием формализма фононов и объяснением совместно с И.М. Франком эффекта Вавилова—Черенкова. Работу по полевой теории парных ядерных сил, которая обескуражилась нами совместно весной 1934 г., сам И.Е. Тамм рассматривал как одну из труднейших и основных своих работ. (Учитывая роль ядерных сил для понимания модели ядра, Лауэ и ряд других историков науки даже присоединяли имя И.Е. Тамма к числу соавторов протон-нейтронной модели, что, конечно, в буквальном смысле, неверно и приводило к довольно забавной путанице в ряде справочников.) Наши научные интересы перекрещивались также в теории каскадных космических ливней, в которой И.Е. Тамм учел ионизационные поправки, развивая работы Гейтлера и Баба, Опенгеймера и Карлсона, Л.Д. Ландау и Румера, мои и А.А. Соколова; в последние годы жизни, уже будучи тяжело больным, И.Е. Тамм разрабатывал вариант теории дискретного пространства, тем самым развивая идеи В.А. Амбарцумяна, Снайдера, Борна, мои и др. Важное значение имели идеи Тамма в начальный период работ по термоядерному синтезу.

Широко известно увлечение И.Е. Тамма альпинизмом, менее известно его увлечение поэзией и глубокое знание поэзии, особенно немецкой.

Важные доклады сделал в Ленинграде Жолио: "Нейтроны" и "Возникновение позитронов при материализации фотонов". Его выступлением, которое сопровождалось демонстрацией великолепных фотографий треков частиц, вызвавших аплодисменты, открылась конференция в парадном зале Академии наук. Д.В. Скобельцын подробно рассказал об исследованиях космического излучения, опираясь на свои ставшие классическими фотографии в камере Вильсона с магнитным полем и на новейшие открытия Блэккетта и др. Разетти докладывал о магнитных моментах ядер, Фриш — о сверхтонкой структуре спектральных линий, Грей — об аномальном рассеянии γ -излучения. Харьковские физики, впервые в Советском Союзе сумевшие на ускорителе типа трансформатора Тесла наблюдать расщепление ядер лития протонами, уточняя открытие Кокрофта и Уолтона 1932 г., докладывали (доклад сделал А.И. Лейпунский) о своих экспериментах. К.Д. Синельников рассказал о (весьма "скромных" по современным представлениям) методах получения быстрых частиц с энергиями несколько миллионов электронвольт.

Ф. Жолио сразу стал на Ленинградской конференции центральной фигурой. Он производил сильное впечатление как физик с широким кругозором, прекрасный оратор, живой, обаятельный человек, обладающий высокой культурой, хорошо знакомый, в частности, с русской классической музыкой; многим запомнились его обожженные, в мозолях пальцы экспериментатора. В дальнейшем Жолио неоднократно посещал Советский Союз, встречались мы и в Париже в 1957 г. Широко известен огромный размах прогрессивной деятельности Жолио по организации движения за мирное применение ядерной энергии.

Другой крупнейший экспериментатор, принимавший участие в работе конференции 1933 г., — И.В. Курчатов хорошо известен как руководитель работ по ядерной физике и использованию ядерной энергии в послевоенные годы. Мы практически

ежедневно встречались в 30-х годах в Ленинградском физико-техническом институте, довольно часто в оргкомитете 1-й конференции по атомному ядру, в Педагогическом институте им. М.И. Покровского. Как заведующий кафедрой физики этого института, я пригласил И.В. Курчатова организовать в институте небольшую лабораторию; после моего перехода на работу в Томский университет И.В. Курчатов продолжил работу в Педагогическом институте в качестве заведующего кафедрой. Теперь наши бывшие ученики организуют каждый год в Ленинграде "Курчатовские чтения".

Пересекались наши пути и в дальнейшем. В первые послевоенные годы И.В. Курчатов одобрил работу руководимой мной кафедры физики в Тимирязевской сельскохозяйственной академии и содействовал работам с использованием радиоактивных нуклидов для исследования процессов в растениях методами хроматографии.

Заканчивая рассказ о 1-й Советской конференции по атомному ядру, нельзя не упомянуть о шоке, который произвело извещение из Лейдена о кончине Эренфеста, пришедшее в дни проведения этой конференции. Встретив меня в перерыве между заседаниями, А.Ф. Иоффе в необычно взволнованном состоянии молча протянул телеграмму, высказав, к сожалению, верную догадку, что Эренфест сам завершил свои счета с жизнью. Как на председателя ближайшего заседания, на меня пала печальная обязанность объявить о кончине замечательного физика, оставившего значительный след в физике своими работами и оказавшего большое влияние на своих учеников, к которым да позволено будет причислить себя и автору этих строк.

Особые связи Эренфеста с нашей страной побуждают коротко остановиться на его деятельности. Хотя Эренфест не был специалистом по теории ядра в узком смысле, его совместный с Оппенгеймером анализ (1931) статистики ядра как системы фермионов был очень важен для доказательства непригодности старой протон-электронной модели.

Пауль Эренфест (1880–1933), Павел Сигизмундович, как называли его в нашей стране, выходец из Австрии (в Вене он слушал лекции Больцмана), перед первой мировой войной работал в Петербурге. Здесь он совместно со своей женой Татьяной Алексеевной Афанасьевой-Эренфест (специалистом в области аксиоматики термодинамики) написал для немецкой Математической энциклопедии статью о принципах статистической физики. Он положил начало теоретическим семинарам современного типа в нашей стране.

Вместе со своим другом А.Ф. Иоффе Эренфест активно участвовал в представительном съезде естествоиспытателей и врачей в Москве в 1909 г., где познакомился с П.Н. Лебедевым и П.П. Лазаревым. Однако нелепые правила повторной защиты диссертации с обязательными экзаменами даже для лиц, уже получивших степень за рубежом, были главной причиной того, что Эренфест покинул Россию, приняв в 1912 г. приглашение на заведование кафедрой теоретической физики в Лейдене в связи с уходом (по возрасту) Лоренца с этого поста. Главный вклад Эренфеста в теоретическую физику связан с теорией фазовых переходов и теорией адиабатических инвариантов. Он продвинул также понимание проблемы трех измерений пространства и ряд других. Известно его "чутье" к терминологии, ему принадлежит авторство в некоторых терминах: негритмер "спинор" и др.

Контакты Эренфеста с нашей страной не прерывались, он переписывался с друзьями из Советского Союза, содействовал в снабжении советских физиков научной литературой в тяжелые для нашей страны годы.

На 4-м съезде физиков в Ленинграде в 1924 г. Эренфест произвел большое впечатление активностью в дискуссиях, энтузиазмом, осведомленностью в последних новостях науки "из первых рук" благодаря обширным знакомствам (с Эйнштейном, Бором и другими известными физиками) и своей организованностью. Вся его жизнь была заполнена наукой.

Эренфест всегда имел при себе множество фотографий известных физиков, был интересным собеседником; для молодежи он являлся мостом в живую, реальную науку. Эренфест много делал для молодых ученых, в свое время оценил и поддержал Ферми; он всегда был готов часами беседовать с молодым теоретиком и, бывало, со свойственной ему экспансивностью доходил до брудершафта.

Эренфест был первоклассным лектором (его акцент забывался через несколько минут, настолько хорошо он проникся духом русского языка); отвечая как-то после доклада на записку с просьбой пояснить законы Бойля-Мариотта и ван-дер-Ваальса (которую председатель сперва хотел отбросить), Эренфест заставил замереть аудиторию изложением сущности и тонких сторон, казалось бы, всем известным по школьным учебникам законов.

Его стремление не оставлять в стороне сомнительных пунктов, раздражение, которое у него вызывали заявления типа "вопрос выяснен", играли опасную роль, мешая ему продвигаться вперед. Ученый, глубоко вникающий в суть вопросов, критик, комментатор, Эренфест не прокладывал совсем новых путей, как его великие коллеги Бор и Эйнштейн. Мучительная совесть, свойственная Эренфесту, несомненно, сыграла роль в трагическом конце его жизни, осложненной рядом семейных обстоятельств [5].

Нельзя умолчать о том, что Эренфест — физик периода еще старой статистики, специальной теории относительности и боровской квантовой теории — был смущен новыми идеями де Бройля, статистики Бозе, возражал против них; вместе с тем Эренфест внес вклад в квантовую механику своей теоремой о движении центра тяжести волнового пакета, а еще раньше поддержал установление спина электрона Гаудсмитом и Уленбеком вопреки возражениям Лоренца о невозможности таким путем описывать "классический вращающийся" электрон! В последние годы Эренфест все больше чувствовал, что он уже не может больше находиться и "дирижировать" на передней линии фронта; его привычкой стало повторять в дискуссиях слова: "Объясните старому учителю", что вызывало наши резкие протесты.

Я опасался, что мое личное знакомство с Павлом Сигизмундовичем не состоится, поскольку в одной из совместных с Ландау статей (1928) мы указали на неверные утверждения Эренфеста, связанные с трактовкой плотности частиц. Эренфест, хотя и признал свою ошибку, но резко отозвался о нашей критике. Все же по приезду его в Ленинград в 1930 г. и во время последовавшего затем посещения Харькова, где я заведовал одно время теоретическим отделом нового Физико-технического института, наши продолжительные беседы приобрели совсем дружеский характер.

Как видно, на Ленинградской конференции были авторитетно обсуждены все важнейшие проблемы ядерной физики тех лет; ее значение для дальнейшего развития ядерной физики трудно переоценить.

Следующие довоенные конференции по атомному ядру состоялись в 1936 г. (Москва), 1938 г. (Ленинград), 1939 г. (Харьков) и в конце ноября 1940 г. (Москва). Из докладов на этих конференциях отметим сообщение И.Е. Тамма о теории ядерных сил (1936), Л.И. Русинова об открытии им совместно с И.В. Курчатовым и другими физиками изомеров брома. На 4-й и 5-й конференциях, где было сделано соответственно 35 и 40 докладов, внимание сосредоточилось, естественно, на только что открытом делении ядра урана, на открытием К.А. Петражом и Г.Н. Флеровым в лаборатории И.В. Курчатова спонтанном делении, на теории деления, разработанной Я.И. Френкелем, и расчете цепной реакции, сделанном Я.Б. Зельдовичем и Ю.Б. Харитоном.

Таким образом, уже перед второй мировой войной советская ядерная физика сумела внести значительный вклад в теорию ядра, сыграв в ряде отношений руководящую роль. Нападение гитлеровской Германии на Советский Союз практически приостановило работы по ядру, возобновились

они уже в конце 1943 г. Опираясь на полученный в предвоенные годы опыт, советские физики во главе с И.В. Курчатовым смогли в очень трудных условиях быстро наверстать возникшее из-за войны отставание в области эксперимента, сконструировать первый реактор в конце 1946 г., испытать атомную и водородную бомбу соответственно в 1949 и 1953 гг. и в научном и техническом отношении вывести советскую ядерную науку и технику на передовые рубежи.

ПРОБЛЕМА ЯДЕРНЫХ СИЛ

После того как протон-нейтронная модель ядра окончательно утвердилась, возникла огромная проблема выяснения природы ядерных сил, не сводимых явно к известным электромагнитным или очень незначительным гравитационным силам. Здесь наметились три направления исследований, основанных на известных свойствах ядер.

1. Определялся обменный характер сил (начиная с первой работы Гейзенберга, развитой Майораной и другими физиками в 1932–1933 гг.). Речь шла об обмене зарядом (Гейзенберг) или координатами (Майорана), что приводило к более стабильной α -частице, а не к дейтрону, одними спинами при взаимодействии нуклонов (Бартлетт), учитывались и обменные силы (Вигнер).

2. Делались попытки феноменологически подобрать вид потенциала, отвечающего короткодействующему характеру сил (в ранних работах Месси и Детуша 1932 г. и более поздних Майораны, обсуждавшихся, например, на Сольвеевском конгрессе, речь шла о потенциале вида e^{-ar} ; для своих интересных расчетов Бете и Пайерлс взяли потенциал в виде простой прямоугольной ямы и т.д.).

3. Мы с И.Е. Таммом попытались подойти к проблеме ядерных сил не феноменологически, а отыскивая соответствующие поля или частицы, реализующие взаимодействие (подобно тому, например, как кулоновские и другие электромагнитные силы реализуются при обмене виртуальными фотонами). По аналогии с гриновской функцией уравнения Лапласа–Пуассона r^{-1} мы обсуждали выражение $e^{-k_0 r}/r$ [гриниан статического уравнения Клейна–Гордона: $\Delta\varphi - k_0^2\varphi = 4\pi\delta(r)$, хорошо передающий основной короткодействующий характер искомых ядерных сил].

Эта (как выяснилось позднее, развивающаяся в правильном направлении) мысль возникла в беседах с астрономом В.А. Амбарцумяном, который и вспомнил о подобной форме потенциала, в конце XIX в. предложенной в теории гравитации Зеелигером и Нейманом вместо потенциала Ньютона (для устранения гравитационного парадокса классической теории гравитации с обращением в бесконечность потенциала для равномерного статического распределения звезд в бесконечной Вселенной; аналогичная трудность при возникновении бесконечной светимости звезд стала известна как парадокс Ольберса–Шезо. Эти трудности были преодолены в модели расширяющейся Вселенной Фридмана на базе эйнштейновской теории гравитации; однако в новейшем варианте "сильной" гравитации Салама гравитация частично реализуется в форме обобщенного зеелигеровского потенциала).

Подобный потенциал конструировался нами и обсуждался на семинарах в Ленинградском физико-техническом институте еще с массой электрона или суммой масс электрона и позитрона, т.е. $k_0 = mc/h$ или $k_0 = 2mc/h$, когда никто еще не предполагал, что существует частица, способная переносить взаимодействие (которую в виде более "тяжелого" мезона ввел позднее Юкава и пришел по существу к той же зеелигер-неймановской форме потенциала). Кроме того, мы хотели учесть именно электроны (и позитроны) в качестве переносчиков взаимодействия, а они как фермионы не подчиняются по отдельности уравнению Клейна—Гордона, что нас очень смущало.

Сильный аргумент в пользу наличия парных сил дала теория β -распада Ферми, в которой нейтрон, распадаясь порождает реальную пару электрон—антинейтрино. Действительно, нейтрон способен испускать виртуальную пару, поглощаемую затем протоном; тем самым нейтрон взаимодействует с протоном. Аналогично протон перебрасывает виртуальную пару лептонов позитрон—нейтрино. Идея создания теории ядерных сил на базе теории β -распада укрепились в беседах с И.Е. Таммом, который пришел примерно к таким же соображениям. Хорошо помнятся многочасовые дискуссии с ним во время его приезда в Ленинград. Форма ядерного потенциала парных сил $V \approx (G_F^2 / \hbar c) r^{-5}$, где G_F — фермиевская константа связи нуклона с полем пар лептонов (константа слабого взаимодействия — по современной терминологии), следовала из соображений аналогии с электродинамикой и учета размерности. Подобно этому имеем ньютонову ($V = GM/r$) или кулоновскую ($V = e/r$) формы потенциала, а для взаимодействия через пару фотонов $V \sim r^{-7}$ и т.д.

Труднее всего было допустить возможность реализации сил частицами с массой покоя, а не безмассовыми фотонами или безмассовым гравитационным полем (гравитонами, или, по теории супергравитации, "гравитино"), но как раз наличие массы у передающих взаимодействие частиц приводит к множителю $e^{-k_0 r}$, обеспечивающему короткодействующий характер сил; на малых расстояниях короткодействующий характер обеспечивался также сильной радиальной зависимостью r^{-5} .

Основные идеи подобной первой полевой, не феноменологической теории ядерных сил были изложены в двух статьях, опубликованных в 1934 г. в одном номере журнала "Nature" со взаимными ссылками на общую дискуссию. Следует указать, что новизна подхода заставила нас несколько задержать публикацию, чтобы обсудить эти проблемы на конференции по теоретической физике в Харькове, в которой участвовали Бор, Розенфельд, Л.Д. Ландау, Гордон, Я.И. Френкель, Ю.Б. Румер и др. Полный математический вывод был приведен в более поздних публикациях 1936 г. И.Е. Таммом, а также мною (совместно с А.А. Соколовым).

Реакция научной общественности на полевую модель парных ядерных сил была быстрой и благоприятной; в ее поддержку выступил, в частности, Гейзенберг в большой программной статье 1935 г., написанной для юбилейного сборника в честь 70-летия Зеемана (о ее переводе в журнале "Успехи физических наук" в 1936 г. И.Е. Тамм срочно сообщил мне в Томск, где я тогда начинал работать, что, конечно, очень поддержало меня). Гейзенберг, по-видимому, близко подошел к аналогичным иде-

ям, что видно из его лекций в Англии, оставшихся неопубликованными. Тем не менее сам Гейзенберг в упомянутой выше статье и его сотрудник Вейцекер в своей вышедшей вскоре книге ссылались только на советских авторов, как и Юкава в своей фундаментальной работе, к которой мы еще вернемся. Таким образом, и в этой оказавшейся важной для дальнейшего развития теории ядра и теории поля области удалось обеспечить приоритет советской науки.

Во-первых, значение теории парных сил заключалось в доказательстве возможности реализации взаимодействия частицами (полем), обладающими массой покоя, что давно уже стало одним из основных, "самоочевидных" положений современной теории элементарных частиц. Во-вторых, на базе теории парных сил И.Е. Таммом предсказано существование важных нецентральных сил; объяснялось требование зарядовой независимости; естественным образом получались разные типы обменных сил, постулированные ранее феноменологически Гейзенбергом и Майораной, качественно было объяснено наличие магнитного момента нейтрона и "аномального" момента протона.

Сравнительно недавно (1968—1976) Зучер и Фейнберг вновь рассмотрели проблему парных фермионных сил между барионами или двумя электронами, переносимых парами безмассовых нейтрино, и, вновь ссылаясь на наши прежние результаты, получили потенциал $V \sim r^{-5}$, при этом были сделаны уточнения, основанные на формализме дисперсионной теории, который связывает потенциал взаимодействия с фейнмановскими амплитудами рассеяния и пропагатором, описывающим распространение виртуальных переносящих взаимодействие частиц. Таким образом, было показано, что радиальная зависимость r^{-5} имеет универсальный характер для парных сил в низкоэнергетическом пределе, если в низшем приближении не равны нулю амплитуды рассеяния.

Итак, в физику, начиная с 1934 г. был введен новый вид фундаментальных взаимодействий, реализуемых парой фермионов, наряду с известными взаимодействиями, осуществляемыми единичными бозонами (взаимодействия посредством ньютоновых и кулоновских сил, мезонных сил Юкавы, взаимодействия янг-миллсовской калибровочной теории поля, в частности взаимодействия посредством предсказываемых теорией Глэшоу—Вейнберга—Салама сил, реализуемых промежуточными сверхтяжелыми бозонами W^{\pm} , Z^0 и др.).

Хотя, как видно, полевая модель парных электрон-нейтринных сил сыграла значительную роль в физике ядра и парные силы, несомненно, действуют между нуклонами, сразу же стало ясно, что эти силы не являются основными для взаимодействия нуклонов из-за своей крайней малости на средних ядерных расстояниях. Образно говоря, поскольку вероятность реального β -распада "геологически" мала, интенсивность взаимодействия через виртуальные β -распадные лептоны также незначительна (вследствие малости константы слабого взаимодействия, не отвечающей относительно большому значению ядерных сил). Под влиянием ряда неточных экспериментов возникло предложение обобщить первоначальный вид фермиевской четырехфермионной связи (ψ^4 ; ψ -функции двух нуклонов и двух лептонов), введя производные от волновых функ-

щий испускаемых электрона и нейтрино (Конопинский, Уленбек). При использовании этой формы связи в теории взаимодействия получались еще более короткодействующие силы с потенциалами вида r^{-9} , r^{-11} , что, однако, было ошибочным, и от этого подхода отказались.

Как хорошо известно, решающий правильный шаг сделал в конце 1934 г. японский физик Юкава, который, сохраняя основные идеи механизма полевой теории парных сил и ссылаясь на советские работы, разумно "оторвался" от β -распада и высказал гипотезу о существовании новой, еще не открытой частицы, названной позднее π -мезоном (пионом) и являющейся бозоном с целым спином. Гипотеза Юкавы "заменила", так сказать, пару лептонных фермионов одной частицей, способной путем испускания одним нуклоном и поглощения другим привести к искомым ядерным силам. Для связи нуклона с мезонным полем вводилась новая константа g , большое значение которой могло обеспечить порядок требуемого ядерного потенциала. Масса пиона по порядку величины предсказывалась из примерного равенства его комптоновской длины волны $h/m_{\pi}c$ размерам ядра и оказалась порядка 200 масс электрона. Статья тогда еще мало известного ученого, оттиски которой он направил ряду физиков, в том числе и советским, сперва не привлекла к себе особого внимания (вне Японии и Советского Союза!), несмотря на дальнейшую разработку теории Юкавой, Сакатой, Такетани и др.

Открытие μ -мезонов в 1937 г., оказавшихся фермионными лептонами, дискуссия о двух типах мезонов и окончательное открытие "истинных юкавских" π -мезонов в 1947 г. (Пауэлл, Латтес, Оккиалини) заставили вспомнить о замечательном предсказании Юкавой основного поля ядерных сил (оказавшегося псевдоскалярным). В настоящее время считается, что в ядерных взаимодействиях, особенно на самых малых расстояниях между нуклонами, участвуют также другие, более тяжелые, чем пионы, мезоны (все мезоны псевдоскалярного октета); кроме того, необходимо учитывать размеры и кварковую структуру нуклонов, релятивистские поправки, реализацию сил несколькими мезонами, "вступление в игру" на самых малых расстояниях парных лептонных сил и даже возможность влияния гравитации. Поэтому не может быть речи о какой-то простой форме ядерных сил типа ньютоновой или кулоновской, но остается в силе их трактовка как взаимодействия через частицы с массой покоя, причем основной вклад во взаимодействия вносят π -мезоны.

Таким образом, развивавшиеся довольно независимо феноменологическая и полевая, динамическая трактовки ядерных сил сейчас снова сблизилась, так как сложность ядерного потенциала (расчеты которого прошли, в частности, через вспомогательный вариант Тамма—Данкова для учета кратных сил) заставила для конкретных расчетов использовать относительно простые вспомогательные виды эффективного потенциала, учитывать все достижения полевой теории и богатый экспериментальный материал, накопленный физикой ядра, элементарных частиц и хромодинамикой.

Для лучшего понимания становления теории ядерных сил и, в частности, значения фундаментального шага, сделанного Юкавой, целесообразно использовать статью Такетани, посвященную японской физике того вре-

мени, и учесть воспоминания Кеммера о восприятии идей Юкавы в Европе. Статья Такетани, одного из учеников Юкавы и соавтора ряда его работ, называется "Методологические подходы в развитии теории мезонов Юкавы в Японии"*.

"Могло показаться, — замечает сперва Такетани, — что замечательное открытие теории мезонов "было подобно внезапному появлению прекрасного цветка в пустыне". На самом же деле в Японии были благоприятные условия для этого открытия.

Во-первых, следует напомнить об атомной модели планетарного типа с центральным ядром, предложенной Нагаокой в 1903 г. В модели Нагаоки вокруг центрального положительно заряженного массивного ядра вращалось большое число электронов в некотором кольце, что, конечно, было правильным, хотя и предварительным шагом от томсоновского безъядерного варианта к окончательной планетарной модели атома Резерфорда (1911). Доклад Нагаоки на заседании физико-математического общества не был поддержан, и Нагаока обратился к исследованию магнетизма.

Во-вторых, большой вклад в теоретические исследования в Японии внес Ишивара, который работал под руководством Эйнштейна. Ишивара сформулировал в 1915 г. общие условия квантования даже несколько раньше Зоммерфельда. Как педагог, основатель журнала "Кагаку" ("Наука") Ишивара оказал значительное влияние на развитие теоретической физики в Японии.

Еще одним крупным физиком в Японии в то время был Нишина, завершивший образование в Копенгагене. Он организовал в 1931 г. в Токио лабораторию по изучению космического излучения и атомного ядра. В 1929 г. Нишина развил теорию рассеяния γ -излучения электронами.

Когда Такетани в 1934 г. закончил университет в Киото, в физике происходили бурные события, связанные с открытием нейтрона и позитрона, шли дискуссии вокруг тезиса Бора о несохранении энергии в ядерных процессах и гипотезы нейтрино Паули. Такетани философски проанализировал проблемы; он отошел от господствовавших в университете неокантианских, махистских взглядов и с помощью Сакаты перешел на материалистические позиции. Юкава и Саката приветствовали протон-нейтронную модель ядра и теорию β -распада Ферми и отвергли боровский тезис о несохранении энергии.

Как вспоминает Такетани, "ознакомление с работами Тамма и Иваненко, указавших на возникновение ядерных короткодействующих сил между протонами и нейтронами благодаря обмену парами электрон-антинейтрино, произвело на Юкаву очень большое впечатление. Для устранения трудности, связанной с тем, что взаимодействие по этому механизму оказывалось слишком незначительным при использовании константы слабого взаимодействия, Юкава пошел по пути введения новой частицы". Трактровка Гейзенберга, введившего обменные силы между протоном и нейтроном через обмен "внутриядерным" электроном, не удовлетворяла Юкаву, и он ввел новое поле "тяжелых квантов", которые, имея массу порядка 200 масс электрона, могли обеспечить короткодействующий характер сил. По отношению к β -распаду новое поле являлось промежуточным (было "прообразом" промежуточных бозонов новейшей теории 70-х годов Вейнберга-Салама). Работа Юкавы была закончена в октябре 1934 г., доложена на собрании Физико-математического общества 17 ноября и опубликована в 1935 г. в Трудах общества. Она отнюдь не сразу была признана, в Японии ее одобрили только Нишина, Томонага и, конечно, группа его сотрудников. Юкава, Саката и Такетани наряду с заряженным мезоном ввели нейтральный.

* Ниже цитируются выдержки из этой статьи, опубликованной в журнале "Supplement Progress of Theoretical Physics", 1971, № 50, p. 12 — 24.

Ценные для истории науки строки посвящает Такетани следующему эпизоду: "Весной 1937 г. Нильс Бор посетил Японию и прочел серию интересных лекций по квантовой механике и о роли наблюдателя. Его увлечение наукой произвело глубокое впечатление на аудиторию. В Киото Юкава и Нишина встретились с Бором. Юкава рассказал ему о теории мезонов, которая Бору не понравилась. Он спросил Юкаву: "Зачем Вы хотите вводить подобную частицу?" Этот вопрос нас всех озадачил. Однако еще до возвращения Бора на родину мы получили сведения из Соединенных Штатов, что там в космическом излучении открыта новая заряженная частица с массой порядка 200 масс электрона".

В лаборатории Нишины в Институте физических и химических исследований (Токио) Такеучи проанализировал фотографии, сделанные в камере Вильсона, и нашел треки новой частицы. Результаты были опубликованы в сентябрьском выпуске журнала "Кагаку" в статье за подписью Нишины, Такеучи и Ишимийи. Мы решили, что предсказанная частица наконец открыта. Юкава опубликовал короткую заметку, в которой указывал, что новая частица, вероятно, соответствует предсказанной им в 1935 г. Все это побуждало японских теоретиков к интенсивной разработке мезонной теории. Параллельно с Прока они установили уравнения частиц со спином 1 и, как было отмечено в японской публикации, проанализировали квантование уравнений, сделанное советскими теоретиками А.Д. Ершовым и Н.А. Дурандиным. Аналогичные работы были параллельно опубликованы в Японии и Великобритании (индийский физик Баба, Кеммер, Фрелих, Гейтлер).

Интересными штрихами Такетани характеризует стиль двух крупнейших японских теоретиков: "Саката обладал острым аналитическим умом, Юкава умел отыскать главное в сложных ситуациях. Саката чрезвычайно умело организовывал коллективную работу группы сотрудников".

НЕКОТОРЫЕ НОВЕЙШИЕ ПРОБЛЕМЫ

Обсуждением в первых двух разделах нашей статьи трудностей установления протон-нейтронной модели ядра и выяснения природы ядерных сил (1932–1935) было сделано также введение к ряду других работ настоящего сборника, в которых анализируются современное понимание структуры ядра, свойства нейтрона и теория элементарных частиц. В данном, заключительном разделе представляется целесообразным, во-первых, указать на существование особых ядерных систем — гиперядер, содержащих наряду с нуклонами другие барионы, а во-вторых, обратить внимание на нейтронные звезды, являющиеся своего рода гигантскими ядрами с массами порядка солнечной.

На этих примерах будет показана характерная для современного этапа развития физики тенденция связать собственно ядерные проблемы как с физикой элементарных частиц, так и с астрофизикой и гравитацией, что вносит вклад в решение одной из важнейших современных проблем — проблемы построения единой теории материи; некоторыми соображениями по этому вопросу завершается статья.

Гиперядра. Отвергая наличие электронов внутри ядер, очевидно, можно допустить существование в них наряду с протонами и нейтронами также различных гиперонов, прежде всего Λ -частиц (аналогично тому как в атомной оболочке электроны заменяются мюонами, пионами, каонами).

Гиперъядра были открыты в 1953 г. в космическом излучении польскими физиками Данишем и Пневским. В настоящее время довольно полно изучены самые легкие гиперъядра: ${}^3\Lambda\text{H}$, ${}^4\Lambda\text{H}$, ${}^5\Lambda\text{He}$, проанализированы не только основные, но и возбужденные уровни гиперъядер: 1s-оболочки ${}^4\Lambda\text{H}$, ${}^4\Lambda\text{He}$, а также рассмотрены Λ -ядра лития, бериллия, углерода, кислорода, серы, кальция ${}^40\Lambda\text{Ca}$ (благодаря прогрессу, достигнутому в последние годы вследствие использования пучков K -мезонов, и технике $K^- \pi$ -совпадений).

Особый интерес к гиперъядрам связан с тем, что они позволяют определить взаимодействие Λ -частиц с нуклонами, а также Λ - Λ -потенциал благодаря обнаружению в 1963 г. двухлямбда-частичных гиперъядер (Даниш, Проус). Тем самым открываются новые перспективы для развития физики элементарных частиц. В этой связи важно отметить обнаружение Σ -гиперъядер и указание на вероятное существование Ξ -гиперъядер. Обсуждается даже возможность существования "суперъядер", содержащих наиболее легкий очарованный барион Λ_c^+ (оценки Н.Н. Колесникова, сделанные в 1981 г. на основании кварковой симметрии, позволяют с наибольшей вероятностью ожидать существования суперъядер вблизи $A \approx 40$).

Энергия связи легких гиперъядер увеличивается примерно пропорционально увеличению массового числа (Д.Д. Иваненко и Н.Н. Колесников, 1956 г.). По мезонной теории лямбда-нуклонное взаимодействие отличается от обычного ядерного тем, что в силу сохранения изоспина однопионный обмен не дает вклада в Δ - N -потенциал. Поэтому следует ожидать, что лямбда-нуклонные силы слабее протон-нейтронных и, что особенно существенно, имеют меньший радиус действия. Благодаря этому яма, аппроксимирующая потенциал взаимодействия Λ -частицы с ядром, не углубляется при переходе ко все более тяжелым ядрам, а лишь становится шире, что приводит к своеобразному насыщению энергии связи гиперъядер при увеличении массового числа (Д.Д. Иваненко и Н.Н. Колесников); этот результат был экспериментально подтвержден. Далее были установлены спиновая зависимость лямбда-нуклонных сил, более сильное взаимодействие в синглетном состоянии (Далиц и другие) и слабая спин-орбитальная зависимость. Согласованное описание низкоэнергетического лямбда-нуклонного рассеяния и энергий связи самых легких гиперъядер с учетом спиновой и зарядовой зависимостей достигается в виде "юкавской или гауссовой экспоненты" при наличии в выражении для потенциала жесткой отталкивательной сердцевины. Однако полное согласование требует усложнения формы потенциала, и дальнейший прогресс зависит от более точного решения задачи для систем сильно-взаимодействующих частиц.

Для сверхплотных тяжелых ядер, как и для аналогичных астрономических систем, в ряде работ предсказывается возможность наличия внутри них бозонного конденсата, который еще, впрочем, не обнаружен. Это иллюстрирует продолжение исследования ядерных систем в разных направлениях.

Кварковые звезды. Как известно, одним из крупнейших достижений современной ядерной физики явилось объяснение самого существова-

ния звезд и их эволюции как объектов, внутри которых при высокой температуре идут термоядерные реакции с превращением, например для звезд типа Солнца, водорода в гелий. Истощив свое "ядерное горючее", звезды под влиянием гравитации коллапсируют и при известных условиях могут превратиться в сверхплотные объекты, подобные гигантским атомным ядрам, в основном состоящие из нейтронов.

Напомним, что предсказание нейтронных звезд (Бааде, Цвикки, 1934 г.) подтвердилось после их отождествления (Голд, 1968 г.) с открытыми Хьюишем (1967) пульсарами — источниками строго периодического радиоизлучения. Исследование уже более 300 пульсаров подтверждает правильность их трактовки как гигантских вращающихся "ядер", состоящих из нейтронов с примесью протонов и электронов. Их масса составляет 0,1–2,5 солнечных, размеры — порядка 10 км, плотность примерно равна ядерной, т.е. $10^{13} - 10^{16}$ г/см³.

"Нейтронная жидкость" может находиться в сверхтекучем состоянии, при вращении образуются квантовые вихри. В массивных звездах ($M > M_{\odot}$) возможно наличие кристаллического ядра, и окружающая его нейтронная жидкость способствует накоплению в ядре упругой энергии (Баим, Лямб и другие, 1976 г.), рассчитать которую можно в рамках общерелятивистской теории сплошной упругой среды, разработанной казанскими физиками В.И. Башковым и А.В. Гусевым в 1978 г. Большой интерес представляет анализ различных фазовых переходов и пионной конденсации в сверхплотной нейтронной среде [6]. Теория нейтронных звезд и других сверхплотных астрономических объектов (например, белых карликов) требует понимания процесса взрыва сверхновой звезды с последующим гравитационным сжатием остатка, общерелятивистской трактовки (развитие работ Оппенгеймера и Волкова 1939 г.) и учета атомно-ядерных характеристик частиц с построением уравнения состояния подобной материи. За всеми подробностями отсылаем к обширной литературе (см., например, [7–9]).

Очень важными были соображения В.А. Амбарцумяна с сотрудниками о возможности наличия областей гиперонов в сверхплотных звездах. В работах нашей группы были рассчитаны кривые равновесных конфигураций (на базе более 20 моделей уравнений состояния с использованием 24 моделей ядерного потенциала путем численного интегрирования общерелятивистских уравнений гидростатического равновесия при ряде правдоподобных допущений). При этом наряду с известными состояниями типа белых карликов ($\rho \sim 10^7$ г/см³) и пульсаров ($\rho \sim 10^{13} \div 10^{16}$ г/см³) получены дополнительные максимумы, соответствующие конфигурациям с гиперонной и впервые предсказанной нами кварковой сердцевиной.

Стабилизация кварков предполагалась возможной при $\rho > 10^{19}$ г/см³. Не будем касаться сложного и, скорее всего, еще не решенного вопроса об объектах типа черных дыр, еще не обнаруженных с достоверностью (к концу 1981 г.), обладающих согласно ряду вариантов теории очень интересными свойствами типа особого "испарения" и отвергаемых некоторыми вариантами не чисто эйнштейновской гравитации (А.А. Логунов, Розен, Тредер, Либшер и др.).

Чтобы отметить сложность вопроса о ядерных потенциалах сверхплотной материи, перечислим их типы (учитывавшиеся нами):

1) потенциалы с твердой сердцевиной (Хамада-Джонстон, Гаммель-Теллер и др.);

2) потенциалы с мягкой сердцевиной (Тамагаки, Рейд и др.);

3) потенциалы с зависимостью от скорости (Аппель и др.);

4) сепарабельные потенциалы (Табакин, Хадчсон и др.);

5) потенциалы на основе мезонной теории (Еркеленц и др.);

6) релятивистские потенциалы (Шриерхольц и др.).

Наши с Д.Ф. Курдгелайдзе соображения (высказанные в 1965—1969 гг.) о возможности наличия кварковой плазмы в сверхплотных астрономических объектах сначала подвергались сомнениям, однако ныне и другие ученые (например, Г.С. Саакян) стали развивать эту теорию, учитывая кварки развитых типов. Наша гипотеза была поддержана в работах де Саббата, Гвальди, Боккалетти, Итоха, Н.И. Максюкова и др. Недавно, в 1980 г., была указана интересная возможность образования подобных объектов при релятивистских столкновениях тяжелых атомных ядер. Не останавливаясь на деталях, отметим лишь любопытную возможность сверхпроводимости в кварковых звездах, подобную возможной сверхпроводимости в белых карликах, нейтронных звездах и др.

При переходе в сверхпроводящее состояние больших областей звезды выталкивание магнитного поля может, по-видимому, приобрести взрывной характер и появятся волны сжатия и разрежения. Де Саббата и другие исследователи указали на возможность существования своеобразных кваркоатомов, в ядрах которых часть нуклонов заменена кварками, что должно привести к появлению новых спектральных линий. Не исключено, что рекомбинация кварков с образованием барионов может играть существенную роль в рассматриваемых макроскопических системах, в частности, для энергетического баланса излучения и эволюции звезд.

В заключение отметим, что наряду с существованием кварковых областей по современным гипотезам следует допустить возможность существования областей преонной, субкварковой, плазмы в звездных или предзвездных космологических условиях. На наш взгляд, гипотетическое состояние праматерии периода большого взрыва или предвзрывной эпохи разумно связать с кварковым или преонным типом материи.

К проблемам единой теории. Как было подчеркнуто выше, протон-нейтронная модель ядра и теория ядерных сил опирались на релятивистскую квантовую теорию поля (вторичное квантование и предсказание позитрона, фактически допускавшие рождение частиц) и предполагали наличие двух новых элементарных частиц — нейтрона и нейтрино; кроме того, они непосредственно привели к гипотезе существования еще одной частицы — мезона. Тем самым ядерная физика дала импульс развитию теории элементарных частиц.

В космическом излучении, в ядерных реакциях, в особенности с помощью ускорителей, обнаружено множество элементарных частиц (с их возбужденными состояниями — резонансами, или резононами) и новых

свойств; это заставило произвести их классификацию и редукцию к относительно небольшому числу основных частиц. Начало этому процессу положила классификация на базе симметрии $SU(3)$ и гипотезы субчастиц — кварков (1964). Отпочковавшись от теории ядра, физика элементарных частиц в ряде отношений продолжает быть с ней связанной и открывает новые перспективы для уточнения трактовки ядер. Поэтому представляется целесообразным в заключение коротко упомянуть о некоторых новых связях указанных двух областей и коснуться вышедшей ныне на первый план задачи построения единой теории всех частиц и всех взаимодействий, включая гравитацию (с учетом космологических гипотез).

Однако фундаментальные связи квантовой физики с гравитацией и космологией начали выясняться в самые последние годы ("грандтеории", или единые теории). Отсылая читателя к многочисленным статьям, посвященным этой теме, напомним коротко, что квантовая хромодинамика, т.е. теория кварков (с полуцелым спином $1/2$, с дробными зарядами $\pm 2/3$, $\pm 1/3$ и с особым свойством "цветом", условно именуемым красным, желтым или синим), трактующая их сильные (адронные) взаимодействия через "глюоны", успешно описывает структуру барионов (составленных из трех кварков) и мезонов (образованных парами кварков). Известны кварковые дублеты трех "ароматов" (генераций). Основной симметрией является группа $SU(3)_C$; ее установление и привело к гипотезе кварков, в правильности основ которой нет сомнений, несмотря на отсутствие ясности в ряде даже коренных пунктов (ненаблюдаемость свободных кварков и др.).

Также нет сомнений в правильности основ теории "электрослабых" взаимодействий, объединяющих электромагнитные и слабые взаимодействия. Известные лептоны также образуют три генерации (электрон, мюон, "тяжелый" τ -лептон с их тремя нейтрино). Естественно попытаться адронные кварки объединить со слабыми лептокварками, роль которых играют сами лептоны, в один мультиплет. Этот подход и лежит в основе современного понимания состава материи (с учетом еще глюонов, фотонов и промежуточных бозонов). В качестве подобного большого объединения предлагаются группы симметрий, начиная с $SU(5)$, $SO(10)$ и др., которые при энергиях нынешних ускорителей (10–500 ГэВ) переходят в неплохо проверенную комбинацию:

$$SU(5) \rightarrow SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1).$$

Главным успехом подобных вариантов является предсказание возможности спонтанного распада протона (время жизни порядка 10^{30} лет), что не противоречит эмпирическим оценкам (с достоверностью этот распад пока еще не обнаружен); предсказывается также наличие массы покоя у нейтрино, указание на которую (несколько десятков электрон-вольт) при распаде трития нашла в 1980 г. группа Любимова в Москве. Однако все эти варианты имеют тот недостаток, что используют большее число произвольных параметров (даже в простейшей группе $SU(5)$ 23 параметра). Неясен также вопрос с использованием полей Хиггса, отрицание которых привело к варианту "техницвета", расширяю-

щему упомянутые симметрии, при этом роль вакуумных "хиггсонов" берет на себя конденсат техницветных фермионов. Кроме того, во всех подобных вариантах неоправданно игнорируется гравитация.

Признанной теорией гравитации является эйнштейновская общая теория относительности (ОТО), согласно которой потенциалы гравитационного поля совпадают с компонентами римановой метрики искривленного пространства-времени. Огромные успехи ОТО связаны с подтверждением четырех эффектов (например, отклонения света в поле тяготения Солнца), что недоступно никакой другой гравитационной динамике без добавления новых параметров, а также с построением на ее базе А.А. Фридманом космологии расширяющейся Вселенной, подтвержденной разбеганием галактик, возникновением модели "большого взрыва" первичного сверхплотного горячего вещества, также подтвержденной открытием предсказанного остаточного реликтового излучения и согласованием с данными наблюдений рассчитанной концентрации водорода и гелия в нашей Метагалактике.

При всем том ОТО сталкивается с рядом трудностей, не выясненных в течение более полувека проблем, связанных прежде всего с наличием сингулярностей в решениях. Нет согласованного мнения и относительно энергии гравитационного поля (на непригодность эйнштейновского "псевдотензора" указывали ранее Шредингер, Меллер и недавно В.И. Родичев, А.А. Логунов и др.). Возобновились также в известной мере споры периода становления ОТО о смысле общей ковариантности, значении принципа эквивалентности, наличии симметрии в ОТО. Недавно Дирак подчеркнул невозможность в рамках ОТО понять наличие странных соотношений между атомными и космологическими параметрами — так называемых больших чисел, выражающих, например, отношение (около 10^{40}) размеров Метагалактики (10^{28} см) к размерам ядер или частиц (10^{-13} см), отношение электрических кулоновских сил к гравитационным, действующим между парой каких-либо частиц (снова 10^{40}). Квантование гравитационного поля в ОТО привносит свои трудности, что указывает, в частности, на недостаточность ограничения лагранжиана предложенным Гильбертом членом скалярной кривизны R , который и сам по себе не очень удовлетворителен без уточненной формулировки краевых условий. Сложившаяся ситуация напоминает положение с теорией тяготения Ньютона, успехи которой привели к тому, что ряд разумных, но чаще всего преждевременных возражений (например, Лейбница, Маха) не был учтен. Учет кручения и индуцированной гравитации требует введения квадратичных лагранжианов.

Все эти обстоятельства побуждают искать какие-то "ближайшие" обобщения эйнштейновской ОТО, сохраняющие ее, конечно, в виде надежной базы в подтвержденной наблюдениями области лабораторных, планетарных и даже широких метагалактических масштабов. Как известно, обобщения ОТО начали возникать вскоре после ее установления в целях геометризации не только гравитации, но также электромагнетизма и построения тем самым единой теории всей (!) известной тогда реальности (вообще говоря, оставались вопрос о наличии частиц, т.е. протонов и электронов, и проблема квантования). Начиная с Вейля,

предложившего в 1918 г. первый вариант неримановой геометрии, в которой электромагнитное поле приводило к изменению длины вектора при параллельном переносе, Картана, заложившего в 1922 г. основы пространства с кручением, Калуца, построившего в 1921 г. пространство пяти измерений, и, наконец, Эйнштейна, развивавшего многие варианты, в том числе телепараллелизм как частный случай кручения (1928 г.) и несимметричную метрику, предлагалось много различных вариантов. Все они не привели к объединению, и данное направление оказалось "опороченным" и не удовлетворяющим действительности после открытия множества новых полей и частиц.

В последние годы возник ряд других вариантов гравитодинамики (биметризм Колера, Розена), варианты плоского пространства с добавочным учетом "эффективной" римановости для описания движения частиц (А.А. Логунов, С. Мавридес и др.), тетрадный вариант Тредера — Либшера, нестандартные космологии (стационарная невзрывающая Вселенная Голда — Хойля — Бонди); кинематическая Вселенная Милна — Уитроу, недавняя космология с учетом больших чисел Дирака. Вместе с тем на первый план в 70–80-е годы выдвинулась трактовка гравитации в духе релятивистской теории электромагнитного, янг-миллсовского и других полей материи, развитая в физике микромира в виде так называемого калибровочного (или компенсирующего) поля. Предложенный Вейлем переход к преобразованиям какой-либо группы с параметрами не постоянными, а меняющимися от точки к точке, с необходимостью требует для сохранения инвариантности введения калибровочных полей (компенсирующих возникшие производные от параметров). Переход от глобальных преобразований к локальным и получение таким путем компенсирующих полей, переносящих взаимодействие, явился фундаментальным формализмом как в хромодинاميке (поскольку привел к глюонам как "компенсонам"), так и в электродинамике и объединенной теории электрослабых взаимодействий (фотоны и предсказываемые бозоны как калибровочные компенсоны).

В поучительной таблице этапов развития калибровочной теории Салам в 1973 г. указал на получение ковариантной производной спинора (Вейль, а также В.А. Фок и Д.Д. Иваненко, 1929 г.) как на начало калибровочной трактовки гравитации и в качестве одного из важнейших этапов отметил переход к локальным изоспиновым преобразованиям (Янг и Миллс, 1954 г.).

Для нас сейчас существенно подчеркнуть, что во всех основных вариантах калибровочной трактовки гравитационного поля (лучше всего в формализме расслоенных пространств) наряду с искривлением возникает кручение пространства-времени. Тем самым с новой точки зрения можно взглянуть на один из "неудачных" вариантов 20-х годов (кручение). Нужно отметить, что и пятимерие Калуцы — О.Клейна ныне возрождается с попыткой, например, геометризации в пространстве $(4+7)$ -измерений групп хромодинاميки и теории электрослабых взаимодействий. На этих интересных, хотя и предварительных, вариантах не будем сейчас останавливаться, но отметим перспективность, на наш взгляд, трактовки переменного числа измерений, т.е. топологического свойства

не как абсолютно жесткого; возможно, что число измерений, как и другие топологические числа (эйлерова характеристика, индекс Понтрягина и другие), является динамической переменной, способной принимать различные значения в зависимости от воздействия "топологических сил" (например, в сверхплотной области, или в крайне малых областях число измерений нашего псевдоевклидова пространства может не равняться $3+1$). (Как показали, например, мы с Г.А. Сарданашвили, гравитоны аналогичны гольдстонам.)

Что касается учета кручения (наряду с искривлением), то, как показали Траутман и Кухович, оно ведет к ряду важных интересных следствий в виде возможности предотвращения коллапса Вселенной в точку. Учет кручения с необходимостью индуцирует нелинейные добавки в уравнении Дирака, а также в уравнениях Прока — Максвелла и приводит к частицеподобным решениям типа сгустков солитонов. Особенно интересен случай спинорного уравнения Дирака $D\psi = 0$, которое в пространстве с кручением приобретает вид (В.И. Родичев, В.Г. Кречет, В.Н. Пономарев и др., 1961 г.):

$$D\psi + l^2 (\bar{\psi} \gamma^\alpha \gamma_5 \psi) \gamma_\alpha \gamma_5 \psi = 0,$$

где $D = \gamma^\alpha \partial / \partial x^\alpha$ — обычный оператор Дирака (для простоты без массы). В точности подобное уравнение (независимо от геометрической интерпретации нелинейной добавки) было установлено нами еще в 1938 г. и предложено в качестве основы праматерии, из которой могут быть построены реальные поля (в духе идей слияния де Бройля, строившего все поля из спиноров спина $1/2$ и получившего спины $0, 1, 3/2, 2 \dots$).

Гейзенберг и Паули взяли наше уравнение за основу единой теории и сумели проквантовать его, установив особые свойства вырожденного вакуума; мы, со своей стороны, развивая этот подход и учитывая кварки, продвинулись еще дальше, что в конце концов позволило получить массы барионов и мезонов, константы связи (и даже магнитные моменты) в примерном (погрешность $10-15\%$) согласии с опытом; удалось даже вычислить зоммерфельдовскую константу тонкой структуры и получить значения $1/115 - 1/120$ (относительно близкие к известному $1/137$). Нелинейное спинорное уравнение вновь привлекло к себе внимание после интерпретации, связанной с кручением, и добавочного замечания, что при учете "сильной" гравитации Салама с огромной константой $G' \approx 10^{40} G$ получается константа нелинейного самодействия, по порядку величины согласующаяся с экспериментальным значением (см. еще работы Синха, Сиварама).

Обратившая на себя внимание попытка построения единой спинорной теории, которую Гейзенберг считал перспективной почти до последних дней своей жизни, все же не могла конкурировать с более конкретными и точными предсказаниями кварковой картины. Однако в последнее время обилие кварков и произвольных параметров типа полей Хиггса во всех современных "больших объединениях" побудило вновь искать какие-то более фундаментальные частицы, уже не субчастицы, а субкварки (именуемые еще преонами), из небольшого числа которых можно будет построить кварки и затем реально наблюдаемые элементарные

частицы. Для поля преонов предлагается взять простейшее нелинейное уравнение праспиноров; подобным образом можно попытаться строить также и гравитоны. Можно ли будет с помощью праспинора, пусть в грубом приближении, описать и возможное особое состояние физической реальности в планковской области сверхвысоких энергий (более 10^{19} ГэВ) и самых малых квантовогравитационных размеров ($l \sim 10^{-33}$ см) — в таких экстремальных условиях, когда даже праматерия и геометрическая арена (прагеометрия) окажутся слитыми, а первый фазовый переход отделит пространство-время от материи и гравитационного поля?

В некотором смысле наиболее распространенным сейчас методом учета гравитации вместе с материей (кварками) в единых теориях является вариант соединения некоторого большого объединения кварков [типа $SU(5)$] с супергравитацией, представляющей собой калибровочную теорию так называемой суперсимметрии, которая связывает в один мультиплет бозоны и фермионы. Можно надеяться, что в этом варианте взаимно сократятся бозонные и фермионные расходимости. В тех или иных вариантах супергравитации наряду с гравитонами спина 2 (соответствующими эйнштейновской ОТО) имеются кванты поля "гравитино" спина $3/2$ и т.д. (Эллис, Гайар, Нанопулос, Нивенгойзен и др.).

Мы изложили коротко эти предварительные интенсивно разрабатываемые варианты единых теорий, чтобы проиллюстрировать различные направления поисков "гранделиной" теории, для которой так характерны все более тесные связи квантовой физики микромира частиц и кварков с гравитацией и космологией, модели частиц как микровселенных и вселенных как частиц.

Резюмируя краткий очерк о развитии единых теорий, опишем эволюцию общих представлений о материи, пространстве-времени в виде следующих этапов: I. Классическая ньютонова теория гравитации и независимых плоских пространства и времени (XVII—XVIII вв.). II. Электромагнитная теория (Максвелл, Лоренц, Томсон, конец XIX — начало XX в.); специальная теория относительности, четырехмерное пространство-время (Пуанкаре, Эйнштейн, Минковский, 1905—1908 гг.). III. Квантовая теория, планетарная модель атома (Д.И. Менделеев, 1869 г.; Резерфорд и Бор, 1911—1913 гг.), квантовая механика (1925—1928). IV. Ядерная теория (открытие радиоактивности, исследования космического излучения, открытие нейтрона, возникновение протон-нейтронной модели ядра, открытие нейтрино, мезонов, первые ускорители, изучение деления ядер, релятивистская квантовая физика элементарных частиц) и кварковая модель частиц (1964); эйнштейновская теория гравитации (1915) и фридмановская космология расширяющейся Вселенной (1922—1924). V. Современный этап исследования кварков, поиски большого объединения; развитие модели большого взрыва первичной горячей Вселенной; установление новых связей микромира с гравитацией и космологией: углубленный анализ ОТО и ее расширение (кручение, супергравитация и др.); попытки построения теории, объединяющей все поля с гравитацией, пространством-временем, физику микромира и космологию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuclear Physics in Retrospect. Proc. of a Symp. on the 1930/Ed. by R.H. Stuewer. Minneapolis (USA): Univ. of Minnesota, 1979.
2. Нейтрон. Предыстория. Открытие. Последствия: Сб. статей. М.: Наука, 1975.
3. Rapports et Discussions du 7me Congrès (Solvay, 1933). Bruxelles: Inst. Solvay, 1934.
4. Атомное ядро: Сб. докладов на 1-й Всесоюз. конф./ Под ред. М.П. Бронштейна, В.М. Дукельского, Д.Д. Иваненко, Ю.Б. Харитона. М. – Л.: Гостехтеориздат, 1934.
5. Капица П.Л. Теория, практика, эксперимент. 3-е изд. М.: Наука, 1981.
6. Башков В.Н., Гусев А.В. Упругое тело в ОТО. Модель Райнера. – Труды Казанской ГАО, 1978, вып. 42, 43, с. 163–174.
7. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация: Пер. с англ. Т. 2. М.: Мир, 1977.
8. Иваненко Д., Курдгеландзе Д. Кварковые звезды. – Астрофизика, 1965, т. 1, № 6, с. 479; Изв. вузов. Сер. физ., 1940, № 8, с. 39–44; Remarks on Quark Stars. – Nuovo cimento Lett., 1969, vol. 2, p. 13–16.
9. Иваненко Д., Максюков Н.И. Уравнение состояния сверхплотного вещества. – Вестник Моск. ун-та, 1975, № 4, с. 443–451.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА*

- Основатели советской физики. Сб. статей/ Под ред. П.С. Кудрявцева. М.: Просвещение, 1970.
- Петросьянц А.М. Проблемы атомной науки и техники. 4-е изд. М.: Атомиздат, 1980; Ядерная энергетика. 2-е изд. М.: Наука, 1981.
- Соминский М.С. Абрам Федорович Иоффе. М.–Л.: Наука, 1964.
- Френкель В.Я. Яков Ильич Френкель. М.–Л.: Наука, 1966.
- Понтекорво Б.М. Вступительная редакционная статья к сб. "Научные труды Энрико Ферми". М.: Наука, 1971.
- Кедров Б.М. К вопросу об открытии и систематике элементарных частиц (предисловие редактора). – В кн.: Вяльцев А.Н. Открытие элементарных частиц (электроны, фотоны). М.: Наука, 1981, с. 3.
- Гейзенберг В. Введение в единую полевую теорию элементарных частиц: Пер. с англ. М.: Мир, 1968.
- Логунов А.А., Арбузов Б.Е. Строение элементарных частиц и связи между их взаимодействиями. – В кн.: Октябрь и наука. М.: Наука, 1977, с. 158–186.
- Иваненко Д., Сарданашвили Г. Принципы относительности и эквивалентности в калибровочной теории гравитации. – Изв. вузов. Сер. физ., 1981, № 6, с. 79–82; Расширения эйнштейновской теории гравитации и перспективы единой калибровочной теории. – Там же, 1980, № 2, с. 54–66.
- Ivanenko D. Perennial Modernity of the Einstein's Theory of Gravitation. – In: Relativity, Quanta and Cosmology in the Development of the Scientific Thought of Einstein. N.Y.: Johnson Reprint Co., 1979, p. 295–354 (юбилейный сборник Национальной итальянской Академии наук).
- Strassman F. Kernspaltung. Mainz: Univ., 1978.
- Melcher M. Zwischen Chemie und Physik: Otto Hahn. – Wissenschaft und Fortschritt, 1979, Bd 29, N 7, S. 256–260; Ibid., N 1, S. 2–5.
- Колесников Н.Н., Амарасингам Д., Тарасов В.И. Кулоновские энергии гиперядер и зарядовая зависимость Λ - N -сил. – Ядерная физика, 1982, т. 35, № 1, с. 32–43.

* См. также недавно опубликованные работы: Глебов Л.А., Шарц А.А., Ларин С.И., Трифионов Д.Н. К истории открытия нейтрона. – Вопросы истории естествознания и техники, 1982, № 2, с. 38–50; К 50-летию открытия нейтрона /три статьи с предисловием И.М. Франка. – Успехи физ. наук, 1982, т. 137, № 1, с. 3–116; Понтекорво Б.М. Детство и молодость физики нейтрино. Препринт ОИЯИ ЕЗ-82-414. Дубна, 1982 (на англ. яз.).

Приложение к статье Д.Д. Иваненко

Оригинальные работы 30-х годов Дж. Чадвика,

Д.Д. Иваненко, В. Гейзенберга, И.Е. Тамма, Х. Юкавы*

ВОЗМОЖНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕЙТРОНА

Дж. Чадвик **

Боте и другие обнаружили, что бериллий при бомбардировке его α -частицами поляния испускает излучение большой проникающей силы, коэффициент поглощения его свинцом примерно равен $0,3 \text{ см}^{-1}$. Измеряя ионизацию, вызываемую этим бериллиевым излучением в камере с тонким окошком, И. Кюри и Ф. Жолио недавно установили, что ионизация возрастает, если перед окошком помещено водородсодержащее вещество. Этот эффект, по-видимому, обусловлен испусканием протонов со скоростями до $3 \cdot 10^9 \text{ см/с}$. Они предположили, что передача энергии протону происходит в процессе типа эффекта Комптона, и подсчитали, что излучение бериллия состоит из квантов с энергией $50 \cdot 10^6 \text{ эВ}$.

Я провел несколько опытов с помощью лампового счетчика для проверки свойств излучения, возбуждаемого в бериллии. Ламповый счетчик представляет собой малую ионизационную камеру, соединенную с усилителем; внезапное появление ионов, вызываемое вторжением такой частицы, как, например, протон или α -частица, фиксируется осциллографом. Эти опыты показали, что излучение выбивает частицы из водорода, гелия, лития, бериллия, углерода, воздуха и аргона. Судя по пробегу и величине ионизации, частицы, выбиваемые из водорода, являются протонами со скоростью до $3,2 \cdot 10^9 \text{ см/с}$. Частицы, выбиваемые из других элементов, производят значительно большую ионизацию и, по-видимому, представляют собой атомы отдачи соответствующих элементов.

Если мы припишем выбивание протонов комптоновской отдаче от кванта с энергией $52 \cdot 10^6 \text{ эВ}$, то атомы отдачи азота, возникающие в таком процессе, должны были бы обладать энергией, не превышающей $400\,000 \text{ эВ}$, создавать не более $10\,000$ ионов и иметь в воздухе при нормальной температуре и нормальном давлении пробег около $1,3 \text{ мм}$. Фактически же некоторые атомы отдачи образуют в азоте по меньшей мере $30\,000$ ионов. В сотрудничестве с Фезером мы наблюдали атомы отдачи в камере Вильсона, и их пробег, установленный визуально, достигал иногда 3 мм при нормальных температуре и давлении.

Эти и другие результаты, полученные мною в ходе работы, очень трудно объяснить, исходя из предположения, что излучение, испускаемое бериллием, представляет собой электромагнитное излучение, если при столкновении должны сохраняться энергия и количество движения. Однако трудности исчезают, если предположить, что излучение состоит из частиц с массой 1 и зарядом 0, т.е. из нейтронов. Можно предположить, что в результате захвата α -частиц ядром ${}^9\text{Be}$ образуется ядро ${}^{12}\text{C}$ и испускается нейтрон. Исходя из энергетических соотношений в этом процессе, можно сделать вывод, что скорость нейтрона, выбитого вперед, вполне может быть около $3 \cdot 10^9 \text{ см/с}$. Столкновение этого нейтрона с атомами, через которые он проходит, создает атомы отдачи, и наблюдаемая энергия атомов отдачи находится в полном соответствии с такой точкой зрения. Более того, я наблюдал, что протоны, выбитые из водорода излучением, испущенным в направлении, противоположном направлению движения α -частиц, обладают, кажется, гораздо меньшим пробегом, нежели те, что выбиваются излучением, испущенным вперед. Это тоже получает простое объяснение на основе нейтронной гипотезы.

Если предположить, что излучение состоит из квантов, то захват α -частицы ядром ${}^9\text{Be}$ будет сопровождаться образованием ядра ${}^{13}\text{C}$. Дефект масс ${}^{13}\text{C}$ извест-

* © Перевод на русский язык, "Наука", 1975.

** Chadwick J. Possible Existence of a Neutron. — Nature, 1932, vol. 129, p. 312. Пер. с англ. Е.К. Комаровой.

тен с достаточной точностью, чтобы можно было утверждать, что энергия испускаемого в этом процессе кванта не может превосходить $14 \cdot 10^6$ эВ. Вряд ли такой квант сможет произвести наблюдаемые эффекты.

Следует ожидать, что прохождение нейтрона через вещество во многом должно быть подобным прохождению кванта большой энергии, и нелегко сделать окончательный выбор между этими двумя гипотезами. До сих пор все свидетельствует в пользу нейтрона, тогда как гипотезу кванта можно принять лишь при условии отказа на какой-то стадии от закона сохранения энергии и количества движения.

Кавендишская лаборатория, Кембридж,
17 февраля 1932 г.

ГИПОТЕЗА О РОЛИ НЕЙТРОНОВ

*Д. Иваненко**

Объяснение доктором Дж. Чадвиком таинственного излучения бериллия очень привлекательно для физиков-теоретиков. Возникает вопрос: нельзя ли допустить, что нейтроны играют также важную роль и в структуре ядер, считая все ядерные электроны "упакованными" либо в α -частицы, либо в нейтроны? Конечно, отсутствие теории ядер делает это предположение далеко не окончательным, но может быть, оно покажется не таким уж неправдоподобным, если мы вспомним, что электроны, проникая в ядра, существенно изменяют свои свойства — теряют, так сказать, свою индивидуальность, например свой спин и магнитный момент.

Наибольший интерес представляет вопрос, насколько нейтроны можно рассматривать как элементарные частицы (чем-то подобными протонам или электронам). Нетрудно подсчитать число α -частиц, протонов и нейтронов, имеющих в каждом ядре, и получить таким образом представление об угловом моменте ядра (полагая угловой момент нейтрона равным $1/2$). Любопытно, что в ядрах бериллия нет свободных протонов, а есть только α -частицы и нейтроны.

Физико-технический институт, Ленинград
21 апреля 1932 г.

О СТРОЕНИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

*Д. Иваненко***

Ввести нейтроны в ядро можно двумя способами: либо не изменяя принятого числа α -частиц в ядре и нейтрализуя не более трех электронов (Перрен и Ожэ), либо нейтрализуя все электроны. Первый способ, по-моему, приводит к прежним трудностям в отношении значений спина. Более того, начиная с некоторого элемента возникает избыток внутриядерных электронов, и отсутствие у ядер соответствующих спинов представляется крайне таинственным. Напротив, второй подход, предложенный нами несколько ранее, по-видимому, позволяет преодолеть указанные трудности. Не будем входить здесь в общие рассуждения о преимуществах этого подхода как обобщения идеи де Бройля о существовании глубокой аналогии между светом и веществом; внутриядерные электроны действительно во многом аналогичны поглощенным фотонам, а испускание ядром β -частицы подобно рождению новой частицы, которая в поглощенном состоянии не обладает индивидуальностью. Укажем строение ядра хлора согласно старой (I) точке зрения и двум новым — Перрена — Ожэ (II) и нашей (III) (ω означает нейтрон):

* Iwanenko D. The Neutron Hypothesis. — Nature, 1932, vol. 129, p. 798. Пер. с англ. Е.К. Комаровой.

** Iwanenko D. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1932, vol. 195, p. 439. Пер. с англ. Е.К. Комаровой. Статья приведена с сокращениями.

$$^{37}\text{Cl} = 9\alpha + 1\pi + 2\epsilon(\text{I}), \quad 9\alpha + 1\omega + 1\epsilon(\text{II}), \quad 8\alpha + 1\pi + 4\omega(\text{III})$$

(изотопы данного элемента отличаются друг от друга только числом нейтронов).

Мы рассматриваем нейтрон не как систему из электрона и протона, но как элементарную частицу. Это вынуждает нас трактовать нейтроны как частицы, обладающие спином $1/2$ и подчиняющиеся статистике Ферми-Дирака. Например, у ядра ^{14}N ($3\alpha + 1\pi + 1\omega$) следует приписать спин 1, а ядра азота, действительно, подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Это становится теперь понятным, так как ^{14}N содержит 14 элементарных частиц, т.е. четное число, а не 21, как в старой схеме.

Все эти предположения, какими бы предварительными они ни были, по-видимому, приводят к совершенно новым взглядам на модель ядер.

Физико-технический институт, Ленинград
8 августа 1932 г.

О СТРОЕНИИ АТОМНЫХ ЯДЕР

В. Гейзенберг*

Опытами Кюри и Жолио [1] (при истолковании их Чадвиком) [2] установлено, что в строении ядер важную роль играет новая фундаментальная частица — нейтрон. Это наводит на мысль считать атомные ядра построенными из протонов и нейтронов без участия электронов [3]. Если это предположение верно, то оно влечет за собой огромное упрощение теории строения ядер. Основные трудности теории β -распада и статистики атомных ядер азота сводятся тогда к вопросу о том, каким образом нейтрон распадается на протон и электрон и какой статистике он подчиняется. Тогда строение ядер может описываться по законам квантовой механики вследствие взаимодействия между протонами и нейтронами.

1. В дальнейшем будем предполагать, что нейтроны подчиняются статистике Ферми и обладают спином $(1/2) \hbar/2\pi$. Это предположение необходимо для объяснения статистики ядер азота и соответствует экспериментальным значениям ядерных моментов. Если бы нейтрон состоял из протона и электрона, то электрону пришлось бы приписать статистику Бозе и нулевой спин. Подробнее рассматривать такую картину представляется нецелесообразным.

Скорее, нейтрон следует считать самостоятельной фундаментальной составной частью ядра, конечно, учитывая, что при определенных условиях он может распасться на протон и электрон, причем, вероятно, законы сохранения энергии и импульса не будут иметь места [4].

Из всех взаимодействий элементарных частиц, входящих в состав ядра, между собой прежде всего рассмотрим взаимодействие между нейтроном и протоном. При сближении нейтрона и протона на расстояние, сравнимое с ядерным, происходит по аналогии с ионом H_2^+ перемена места отрицательного заряда с частотой, определяемой функцией $J(r)/\hbar$, где r — расстояние между частицами. Величина $J(r)$ соответствует обменному интегралу, вернее, интегралу, описывающему обмен координатами в молекулярной теории. Эту перемену места можно сделать наглядной с помощью представления об электроне, не обладающем спином и подчиняющемся статистике Бозе. Но, вероятно, правильнее считать, что интеграл $J(r)$ описывает фундаментальное свойство пары нейтрон-протон, которое не сводится к перемещениям электрона.

Подобным же образом будем описывать обменное взаимодействие двух нейтронов энергией обменного взаимодействия $K(r)$, причем по аналогии с молеку-

* Heisenberg W. Über den Bau der Atomkerne. I. — Z. Phys., 1932, Bd 77, S. 1. Пер. с нем. Ю.М. Глазова. Переведены введение и первый параграф статьи (всего в статье их шесть). В других параграфах этой статьи и в двух следующих статьях, опубликованных в том же журнале, Гейзенберг обсуждает кроме других вопросов структуру нейтрона, склоняясь к наличию внутри него электрона и несохранению энергии при β -распаде. —

лой водорода можно принять, что эта энергия создает силу притяжения между нейтронами*.

Наконец, обозначим дефект массы нейтрона относительно протона (в энергетических единицах) D и предположим, что кроме взаимодействий, определяемых функциями $J(r)$ и $K(r)$, а также кулоновского отталкивания (e^2/r) между двумя протонами между ядерными частицами не существует сколько-нибудь заметного взаимодействия.

Далее, следует пренебречь всеми релятивистскими эффектами, следовательно, и спин-орбитальным взаимодействием. О функциях $J(r)$ и $K(r)$ возможны только некоторые совсем общие высказывания. Предполагается, что в области радиусом порядка 10^{-12} см с увеличением r они быстро стремятся к нулю. По аналогии с молекулами необходимо предположить, что функция $J(r)$ при нормальном значении r больше, чем $K(r)$. Это предположение в дальнейшем окажется важным. Дефект массы нейтрона D может оказаться меньше обычных дефектов массы элементов.

Чтобы записать функцию Гамильтона для атомного ядра, целесообразно ввести следующие переменные. Каждая частица ядра характеризуется пятью величинами: тремя координатами места $(x, y, z) = r$, спином τ^z в z -направлении и числом ρ^{ξ} , способным принимать два значения: $+1$ и -1 .

Равенство $\rho^{\xi} = +1$ означает, что частица — нейтрон, $\rho^{\xi} = -1$ соответствует протону. Поскольку из-за перемены места функция Гамильтона содержит также члены, отвечающие переходам от $\rho^{\xi} = +1$ к $\rho^{\xi} = -1$, целесообразно ввести матрицы

$$\rho^{\xi} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \rho^{\eta} = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \rho^{\zeta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Пространство ξ, η, ζ , конечно, не имеет ничего общего с реальным пространством. В этих переменных полная функция Гамильтона ядра имеет вид:

$$\begin{aligned} H = & \frac{1}{2M} \sum_k p_k^2 - \frac{1}{2} \sum_{k>l} J(r_{kl}) (\rho_k^{\xi} \rho_l^{\xi} + \rho_k^{\eta} \rho_l^{\eta}) - \\ & - \frac{1}{4} \sum_{k>l} K(r_{kl}) (1 + \rho_k^{\zeta}) (1 + \rho_l^{\zeta}) + \frac{1}{4} \sum_{k>l} \frac{e^2}{r_{kl}} (1 - \rho_k^{\zeta}) (1 - \rho_l^{\zeta}) - \\ & - \frac{1}{2} D \sum_k (1 + \rho_k^{\xi}), \end{aligned} \quad (1)$$

где M — масса протона; $r_{kl} = |r_k - r_l|$; p_k — импульс частицы k .

Из пяти членов этого выражения первый означает кинетическую энергию частицы, второй — энергию перемены мест, третий отвечает притяжению нейтронов, четвертый — кулоновскому отталкиванию протонов, пятый — дефект массы нейтронов.

Теперь возникает чисто математическая задача — вывести свойства ядер из уравнения (1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Curie I., Joliot F. — Compt. rend. Acad. sci., 1932, vol. 194, p. 273; 876.
2. Chadwick J. — Nature, 1932, vol. 129, p. 312.
3. Iwanenko D. — Ibid., p. 798.
4. Bohr N. Faraday Lecture. — J. Chem. Soc., 1932, S. 349.

* За указание на это и за многие другие ценные замечания я хотел бы сердечно поблагодарить профессора В. Паули.

ОБМЕННЫЕ СИЛЫ МЕЖДУ НЕЙТРОНАМИ И ПРОТОНАМИ И ТЕОРИЯ ФЕРМИ

И. Тамм*

Ферми [1] недавно развил теорию β -радиоактивности, основанную на предположении о возможном превращении нейтрона в протон и наоборот, сопровождающемся возникновением или исчезновением электрона и нейтрино.

В этой теории можно получить обменные силы между нейтроном и протоном, введенные Гейзенбергом более или менее феноменологически. (Та же идея, совершенно независимо, возникла у моего друга Д. Иваненко, с которым я имел возможность обсуждать этот вопрос.)

Рассмотрим две тяжелые частицы a и b , где a означает состояние нейтрона, а b — протона. Если a станет протоном, а b — нейтроном, то энергия не изменится. Эти два вырожденных состояния данной системы могут быть связаны двухступенчатым процессом — излучением электрона и нейтрино нейтроном a , который тем самым превращается в протон, с последующим поглощением этих легких частиц протоном b , который становится нейтроном. В промежуточном состоянии энергия этой системы в общем не сохраняется (ср. с теорией дисперсии). Также может иметь место излучение и поглощение позитрона и нейтрино [2]. Таким образом, два вырожденных состояния рассматриваемой системы расщепляются на два энергетических состояния, различающихся знаком обменной энергии.

Поскольку роль легких частиц (ψ -поля), обеспечивающих взаимодействие между тяжелыми частицами, в точности соответствует роли фотонов (электромагнитного поля), обеспечивающих взаимодействие между электронами, мы можем для своих целей воспользоваться теми же методами, которые применяются в квантовой электродинамике при выводе выражения для кулоновских сил.

Положив $\psi = \psi_0 + g\psi_1 + g^2\psi_2 + \dots$, где g — константа Ферми ($\approx 4 \times 10^{-50}$ эрг·см³), и применив теорию возмущений при сохранении лишь только той части ψ , которая соответствует отсутствию легких частиц в исходном и конечном состояниях, получим:

$$\left(H_0 - i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \right) \psi_2 \sim \left(K \mp \frac{1}{16\pi^3 \hbar c r^5} I(r) \right) \psi_0,$$

где K — бесконечная константа; r — расстояние между a и b ; $I(r)$ — убывающая функция r , равная единице при $r \ll \hbar/mc$ (m — масса электрона). Пренебрегая K , можно было бы получить тот же самый результат, что и в случае, когда в волновое уравнение для тяжелых частиц прямо вводится обменная энергия $A(r)$:

$$A(r) = \pm \frac{g^2}{16\pi^2 \hbar c r^5} I(r);$$

знак $A(r)$ обуславливается симметрией ψ по отношению к a и b .

Подставив значения \hbar , c и g , получим:

$$|A(r)| \ll 10^{-85} r^{-5} \text{ эрг.}$$

Таким образом, $A(r)$ слишком мала, чтобы объяснить известное взаимодействие нейтронов и протонов на расстояниях порядка 10^{-13} см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fermi F. — Z. Phys., 1934, Bd 88, S. 161.
2. Wick G.C. — Rend. Roy. Nat. Accad. Lincei, 1934, vol. 19, p. 319.

* Tamm I. Exchange Forces between Neutrons and Protons, and Fermi's Theory. — Nature, 1934, vol. 133, p. 981. Пер. с англ. Е.К. Комаровой. Статья приведена с сокращениями.

Введение. На данном этапе развития квантовой теории еще очень мало известно о природе взаимодействия элементарных частиц. Гейзенберг считал, что важную роль в строении ядра играет взаимодействие обменного типа между нейтроном и протоном [1].

Недавно Ферми рассмотрел проблему β -распада на основе гипотезы о "нейтрино" [2]. Согласно этой теории, нейтрон и протон могут взаимодействовать, излучая и поглощая пару частиц — нейтрино и электрон. К сожалению, энергия взаимодействия, вычисленная в этом предположении, чрезмерно мала по сравнению с энергией связи между нейтронами и протонами в ядре [3].

Чтобы устранить данный недостаток, по-видимому, естественно видоизменить теорию Гейзенберга и Ферми следующим образом. Переход тяжелой частицы из состояния нейтрона в состояние протона не всегда сопровождается испусканием легких частиц, т.е. нейтрино и электрона, но иногда энергия, освобождаемая при переходе, поглощается другой тяжелой частицей, которая, в свою очередь, переходит из состояния протона в состояние нейтрона. Если вероятность последнего процесса гораздо больше, нежели вероятность первого, то взаимодействие между нейтроном и протоном будет гораздо сильнее, чем в случае, рассмотренном Ферми, в то время как вероятность испускания легких частиц существенно не изменится.

Оказывается, такое взаимодействие между элементарными частицами можно описать с помощью поля сил так же, как описывается электромагнитным полем взаимодействие заряженных частиц. Приведенные выше соображения показывают, что взаимодействие тяжелых частиц с этим полем значительно сильнее взаимодействия с ним легких частиц.

В квантовой теории этому полю должен соответствовать новый тип квантов, подобно тому как электромагнитному полю соответствует фотон.

В данной статье будут кратко рассмотрены возможная природа этого поля и соответствующего ему кванта, а также их связь со строением ядра.

Кроме такой обменной силы и обычных электрической и магнитной сил, возможно, существуют также и другие силы между элементарными частицами, но мы в настоящей работе не будем принимать их во внимание.

Более полное изложение будет дано в следующей статье.

Поле, описывающее взаимодействие. По аналогии со скалярным потенциалом электромагнитного поля для описания поля между нейтроном и протоном вводится функция $U(x, y, z, t)$. Эта функция будет удовлетворять уравнению, сходному с волновым уравнением для электромагнитного потенциала.

Известно, что уравнение

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t^2} \right\} U = 0 \quad (1)$$

имеет только статическое решение с центральной симметрией $1/r$ с точностью до аддитивных и мультипликативных постоянных. Однако потенциал взаимодействия между нейтроном и протоном должен быть не кулоновским, но убывающим по мере увеличения расстояния гораздо быстрее. Это можно выразить, например, функцией

$$\pm g^2 e^{-\lambda r} / r, \quad (2)$$

где g — постоянная с размерностью электрического заряда, т.е. $\text{см}^{3/2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{1/2}$, λ — постоянная с размерностью см^{-1} .

* Yukawa H. On the Interaction of Elementary Particles. — Proc. Phys.-Math. Soc. Jap., 1935, vol. 17, p. 48. Пер. с англ. Е.К. Комаровой. Перевод с сокращениями трех первых из пяти параграфов статьи.

Поскольку функция (2) является центрально-симметричным статическим решением волнового уравнения

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U = 0, \quad (3)$$

допустим, что это уравнение верно для U в вакууме. При наличии тяжелых частиц U -поле взаимодействует с ним и вызывает переходы из состояния нейтрона в состояние протона.

Итак, если ввести матрицы [1]

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

и обозначить состояние нейтрона и состояние протона соответственно $\tau_3 = +1$ и $\tau_3 = -1$, получится волновое уравнение

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} U = -4 \pi g \tilde{\Psi} \frac{\tau_1 - i\tau_2}{2} \Psi, \quad (4)$$

где Ψ – волновая функция тяжелых частиц, являющаяся функцией времени, места, спина и $\tau_3 = \pm 1$.

Введем комплексно-сопряженную функцию $U(x, y, z, t)$, удовлетворяющую уравнению

$$\left\{ \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \lambda^2 \right\} \tilde{U} = -4 \pi g \tilde{\Psi} \frac{\tau_1 + i\tau_2}{2} \Psi, \quad (5)$$

которое соответствует обратному переходу из состояния протона в состояние нейтрона.

Подобное уравнение будет справедливо и для векторной функции, аналогичной векторному потенциалу электромагнитного поля. Однако в данное время мы не станем на ней останавливаться, поскольку не существует точной релятивистской теории тяжелых частиц. Положим в основу следующее простое нерелятивистское волновое уравнение для тяжелых частиц, не учитывающее спина:

$$\left\{ \frac{\hbar^2}{4} \left(\frac{1 + \tau_3}{M_n} + \frac{1 - \tau_3}{M_p} \right) \Delta + i\hbar \frac{\partial}{\partial t} - \frac{1 + \tau_3}{2} M_n c^2 - \frac{1 - \tau_3}{2} M_p c^2 - g \left(U \frac{\tau_1 - i\tau_2}{2} + \tilde{U} \frac{\tau_1 + i\tau_2}{2} \right) \right\} \Psi = 0, \quad (6)$$

где \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π ; M_n и M_p – соответственно массы нейтрона и протона. Основание для выбора отрицательного знака перед g выяснится впоследствии.

Уравнение (6) соответствует гамильтониану

$$H = \left(\frac{1 + \tau_3}{4M_n} + \frac{1 - \tau_3}{4M_p} \right) p^2 + \frac{1 + \tau_3}{2} M_n c^2 + \frac{1 - \tau_3}{2} M_p c^2 + g \left(\tilde{U} \frac{\tau_1 - i\tau_2}{2} + U \frac{\tau_1 + i\tau_2}{2} \right), \quad (7)$$

где p – импульс частицы. После подстановки $M_n c^2 - M_p c^2 = D$ и $M_n + M_p = 2M$ выражение (7) примет приблизительно такой вид:

$$H = \frac{p^2}{2M} + \frac{g}{2} [\tilde{U}(\tau_1 - i\tau_2) + U(\tau_1 + i\tau_2)] + \frac{D}{2} \tau_3 \quad (8)$$

(здесь опущен постоянный член Mc^2).

Теперь рассмотрим две тяжелые частицы в точках (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) и предположим, что их относительная скорость мала. Поля в точке (x_1, y_1, z_1) , обусловленные частицей, которая находится в точке (x_2, y_2, z_2) , согласно уравнениям (4) и (5) выразятся функциями

$$\left. \begin{aligned} U(x_1, y_1, z_1) &= g \frac{e^{-\lambda r_{12}}}{r_{12}} \frac{\tau_1^{(2)} - i\tau_2^{(2)}}{2}; \\ \tilde{U}(x_1, y_1, z_1) &= g \frac{e^{-\lambda r_{12}}}{r_{12}} \frac{(\tau_1^{(2)} + i\tau_2^{(2)})}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

причем $(\tau_1^{(1)}, \tau_2^{(1)}, \tau_3^{(1)})$ и $(\tau_1^{(2)}, \tau_2^{(2)}, \tau_3^{(2)})$ — матрицы, относящиеся соответственно к первой и второй частицам; r_{12} — расстояние между частицами.

Отсюда при отсутствии внешних полей получаем гамильтониан для данной системы

$$\begin{aligned} H &= \frac{p_1^2}{2M} + \frac{p_2^2}{2M} + \frac{g^2}{4} [(\tau_1^{(1)} - i\tau_2^{(1)})(\tau_1^{(2)} + i\tau_2^{(2)}) + \\ &+ (\tau_1^{(1)} + i\tau_2^{(1)})(\tau_1^{(2)} - i\tau_2^{(2)})] \frac{e^{-\lambda r_{12}}}{r_{12}} + (\tau_3^{(1)} + \tau_3^{(2)})D = \\ &= \frac{p_1^2}{2M} + \frac{p_2^2}{2M} + \frac{g^2}{2} (\tau_1^{(1)}\tau_1^{(2)} + \tau_2^{(1)}\tau_2^{(2)}) \frac{e^{-\lambda r_{12}}}{r_{12}} + (\tau_3^{(1)} + \tau_3^{(2)})D, \end{aligned} \quad (10)$$

где p_1 и p_2 — импульсы частиц.

Этот гамильтониан эквивалентен гамильтониану Гейзенберга (1) [1] с обменным интегралом в форме

$$J(r) = -g^2 e^{-\lambda r} / r, \quad (11)$$

если не считать того, что мы не учли взаимодействие между нейтронами и электростатическое отталкивание между протонами. Гейзенберг принял положительный знак для $J(r)$, поэтому спин состояния ^2H с минимальной энергией получился равным нулю, тогда как в нашем случае из-за отрицательного знака перед g^2 состоянию с минимальной энергией соответствует спин 1, что согласуется с экспериментальными данными.

Константы g и λ , появившиеся в предыдущих уравнениях, должны быть определены путем сравнения с экспериментальными данными. Например, используя гамильтониан (10), для тяжелых частиц можно вычислить дефект массы для ^2H и вероятность рассеяния нейтрона протоном при условии, что относительная скорость незначительна по сравнению со скоростью света*.

Приблизительный подсчет показывает, что теоретические значения совпадают с результатами эксперимента, если принять $\lambda = 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-1}$, а для g — значение, в несколько раз превышающее заряд электрона e , хотя никакой прямой зависимости между g и e в приведенных выше рассуждениях не предполагалось.

*Эти расчеты были ранее сделаны на основе теории Гейзенберга Томонагой, которому автор многим обязан. В нашем случае нужны незначительные изменения. Детальные расчеты будут произведены в следующей статье.

Природа сопровождающих поле квантов. Рассмотренное выше U -поле должно быть проквантовано обычным способом. Поскольку и нейтрон, и протон подчиняются статистике Ферми, кванты, сопровождающие U -поле, должны подчиняться статистике Бозе и квантование можно произвести так же, как это делается для электромагнитного поля.

Закон сохранения электрического заряда требует, чтобы квант обладал зарядом либо $+e$, либо $-e$. Полевая характеристика U соответствует оператору, который увеличивает на единицу число отрицательно заряженных квантов и уменьшает на единицу число квантов, заряженных положительно. Величине \bar{U} , являющейся комплексно-сопряженной величине U , соответствует обратный оператор.

Введем обозначения

$$p_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \text{ и т.д.; } W = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}; m_U c = \lambda\hbar,$$

запишем волновое уравнение для U в свободном пространстве в виде

$$\left\{ p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \frac{W^2}{c^2} + m_U c^2 \right\} U = 0. \quad (12)$$

Здесь $m_U = \lambda\hbar/c$ — масса кванта, сопровождающего поле.

Положив $\lambda = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-1}$, получаем для m_U значение, в $2 \cdot 10^2$ раз превышающее массу электрона. Поскольку квант с такой большой массой и положительным или отрицательным зарядом никогда не наблюдался, изложенная теория находится, по-видимому, на неверном пути. Однако мы в состоянии показать, что в условиях обычных ядерных превращений подобный квант не может быть излучен во внешнее пространство.

Университет Осака

Поступило в редакцию 30 ноября 1934 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heisenberg W. — Z. Phys., 1932, Bd 177, S. 1; Bd 178, S. 156; 1933, Bd 80, S. 587.
2. Fermi E. — Z. Phys., 1934, Bd 88, S. 161.
3. Tamm I. — Nature, 1934, vol. 133, p. 981; Iwanenko D. — Ibid.

ВОСПРИЯТИЕ ТЕОРИИ МЕЗОНОВ ЮКАВЫ ЕВРОПЕЙСКИМИ ФИЗИКАМИ (воспоминания)

*Н. Кеммер**

Я очень рад, что могу включить мою скромную статью в специальный выпуск журнала "Progress of Theoretical Physics", посвященный теории мезонов — наиболее выдающемуся вкладу профессора Хидеки Юкавы в физику. Нет необходимости подчеркивать значение мезонной теории для физики вообще. Работа Юкавы говорит сама за себя, и современную физику (как физику высоких энергий, так и физику ядра) невозможно представить без этой теории. Все, что я могу сейчас добавить, связано с личными замечаниями исследователя, чьи работы оказались в очень высокой

* Kemmer N. The Impact of Yukawa's Meson Theory on Workers in Europe, reminiscence. — In: Problems on Fundamental Physics/Ed. M. Kobayasi. Kyoto, 1965, p. 602—608. Пер. с англ. Д.Д. Иवानенко.

степени основанными на идеях Юкавы, и вместе с тем с воспоминаниями о впечатлении, произведенном теорией Юкавы на физиков-теоретиков в Западной Европе.

Несомненно, все молодые ученые понимают, какая большая разница между новыми идеями, которые возникают и развиваются на их глазах, и теми научными результатами, которые они изучали в качестве уже твердо установленных. Мои собственные воспоминания о физике как живой, развивающейся науке начинаются с открытий нейтрона, искусственной радиоактивности, позитрона и появления гипотезы нейтрино. В области теории в это время как раз завершалась квантовомеханическая революция, начавшаяся в 1925 г. Была установлена и восторженно воспринята дираковская теория релятивистского электрона [1], а работы Дирака по квантованию поля и теории излучения [2] также уже привели к первым успехам. Более полная теория квантования поля Гейзенберга—Паули [3], которая в принципе применима не только к электромагнитному излучению, по-видимому, в этот период была вершиной математического формализма; исследования Иордана совместно с Клейном [4] и Вигнером [5] по квантованию уравнения Шредингера как для статистики Бозе, так и для статистики Ферми также относились к хорошо разработанным разделам теории. Тонкие ответы Паули [6] на вопросы Эренфеста об отношении подобного "вторичного квантования" к теории фотонов согласно квантовой электродинамике также были характерны для ситуации этого периода.

Затем последовало открытие позитрона, подтвердившее идеи Дирака о "теории дырок" [7], которая сначала не воспринималась всерьез. Тогда же было признано, что требуемый теорией дырок отказ от возможности построения теории одного-единственного электрона только внес добавочные трудности в квантовую теорию поля. Вместе с тем эти трудности, в основном связанные с проблемой собственной энергии, можно было считать имеющими общую природу, и, вообще говоря, чувствовалось, что требуется сделать только один шаг для построения согласованной релятивистской квантовой теории. В связи с этим следует напомнить об одной работе, которая в свое время считалась сугубо академической, но, по крайней мере, кругу лиц, близких к ее авторам, представлялась очень ясной и изящной. Речь идет о квантовании Паули и Вейскопфом релятивистского уравнения Шредингера, т.е. уравнения Клейна—Гордона [8]. До появления этой работы квантовая теория поля состояла из двух частей — дираковское уравнение для электрона, максвелловские уравнения для фотона. Теперь же выяснилось, что уравнение Дирака не является единственно возможным для описания частиц, обладающих массой и зарядом; более того, оказывается, что если даже отойти от этого уравнения, все равно нельзя отказаться от двух главных выводов дираковской теории дырок, а именно от признания невозможности ограничиться трактовкой одной-единственной частицы в релятивистской области и от признания согласно этой теории существования античастиц, во всем тождественных с частицами, но обладающих другим знаком заряда.

Рождение и аннигиляция частиц оказались наиболее важным пунктом релятивистской теории заряженных частиц. Формализмы Дирака и Пау-

ли—Вейскопфа различались лишь значениями спина частиц. Последние авторы рассмотрели и быстро отбросили возможность применения уравнения Клейна—Гордона для частиц со спином $1/2$ и установили новый закон—связь спина и статистики, подтвержденный всем дальнейшим развитием физики.

Направление всех этих исследований, казалось бы, лежало в стороне от нового фундаментального открытия — существования нейтрона. Никто не сомневался, что обнаружение этой частицы явилось ключом для понимания структуры материи, но вместе с тем на первый взгляд казалось, что нейтрон не имеет непосредственного отношения к вопросам релятивистской теории поля. Конечно, открытие нейтрона позволило начать разработку современной теории ядра. Очень быстро проблема природы сил, действующих между протонами и нейтронами, оказалась в центре внимания. Шаг за шагом были установлены феноменологические характеристики этих сил. Здесь следует прежде всего напомнить о теоретических работах Гейзенберга [9] и Майораны [10]. Однако несмотря на то что и квантовой теорией поля и теорией ядра занимались одни и те же группы, связи между этими областями оставались поразительно слабыми.

В самом деле, единственным реальным звеном связи являлись исследования β -распада. Здесь Ферми [11] выдвинул теорию, которая во всех своих существенных чертах остается до сих пор тем, что мы называем теорией слабых взаимодействий. В ней впервые (если не считать случаев, связанных с фотонами и парами электрон—позитрон) рассматривалось рождение и уничтожение частиц. Следующий шаг был сделан в работах И.Е. Тамма и Д.Д. Иваненко [12], в которых идея рождения и уничтожения частиц связывалась с наличием обменных сил между протоном и нейтроном и рассматривалась возможность объяснения ядерных сил при помощи взаимодействия фермиевского типа, подобно тому как взаимодействие с электромагнитным полем приводит к кулоновским силам. Как хорошо известно, эта попытка не была полностью удачной по двум причинам: во-первых, ввиду того что проблема собственной энергии в этой теории оказывалась очень серьезной и, во-вторых, из-за того, что любое введение необходимого обрезания приводило к значениям ядерных сил, на много порядков меньшим требуемых экспериментом. В результате вопрос о природе ядерных сил оказался несколько в стороне по сравнению с существовавшей многие годы проблемой истолкования постоянной тонкой структуры, т.е. значения $1/137$, определяющей интенсивность электромагнитных взаимодействий.

Такой была атмосфера того времени, которая привела к тому, что появление статьи Хидеки Юкавы [13] в "Известиях Японского физико-математического общества" в 1935 г. прошло практически незамеченным и, во всяком случае, совершенно не было оценено. Хотя идея Юкавы была по существу очень простой и ясно сформулированной, она не привлекла к себе внимания. Возможно, это отчасти было связано с тем, что журнал, в котором была опубликована статья, не относился к числу широко известных. Однако это не могло играть решающей роли, поскольку в тот период число работ в данной области было столь незначительным по сравнению с нынешним, что любой серьезно настроенный научный работник

без труда заметил бы все соответствующие работы, где бы они ни были напечатаны. Может быть, большое значение имело то обстоятельство, что среди ведущих теоретиков Западной Европы все существенные результаты незамедлительно сообщались на семинарах или в письмах, тогда как идеи Юкавы не получили распространения подобным методом. После всего сказанного становится ясным, что Хидеки Юкава в 1935 г. оказался впереди своей эпохи и нашел ключ к проблеме ядерных сил в дни, когда никто из других теоретиков во всем мире еще не был готов к восприимчивости подобной идее.

Ситуация изменилась в 1937 г., когда Андерсон объявил о своем открытии в космическом излучении частицы с массой, примерно соответствующей теории Юкавы. В течение нескольких недель мы изучили работу Юкавы и предприняли попытки к ее развитию. В ближайшие месяцы, если даже не недели, физики в Японии и в Европе обнаружили, что они двигались практически в одном направлении, и идеи Юкавы были полностью признаны. Конечно, с началом войны научные связи были резко прерваны [14].

Однако перед этим произошла забавная задержка в исследованиях. Хотя все физики, занимавшиеся разработкой теории Юкавы, все больше убеждались в правильности ее основных положений, стало ясно, что "мезотроны" Андерсона не обладают свойствами юкавской частицы. В самый канун войны и в ее годы теоретики, разрабатывающие теорию мезонов, по-видимому, двигались в опасных гипотетических направлениях, оторванных от экспериментов.

Стремясь рассмотреть более подробно влияние работ Юкавы на европейских теоретиков, автор настоящей статьи не может не касаться других личных воспоминаний. Несомненно, реакция на идеи Юкавы, подобная моей, имела место и у других физиков. В частности, Э. Штюкельберг [15], несомненно, был первым европейским ученым, который опубликовал свои замечания к теории Юкавы и начал ее развивать; Х. Баба [16] практически одновременно со мной получил результаты, весьма похожие на мои. Однако имелись благоприятные обстоятельства, которые позволили мне быстро реагировать на работу Юкавы, когда, наконец, я прочел ее в 1937 г., и сейчас я позволю себе остановиться на этом [17]*.

Квантовая теория поля была первой областью моих интересов, когда я начал работать под руководством Грегора Венцеля и позднее В. Паули; занявшись в 1936 г. научной работой в Лондоне, я продолжал пользо-

* Некоторое время имело место различие в терминологии: в работах, посвященных открытой Андерсоном частице, которая известна ныне как μ -мезон, говорилось о "мезотроне" (название самого Андерсона), тогда как в статьях по теории Юкавы речь шла о "мезоне". Насколько я помню, история последнего термина была связана со следующими обстоятельствами. Первоначальный термин Юкавы "тяжелый квант" был предварительным и слишком общим. В частных беседах частицу называли "юкон", но мне неизвестна какая-либо публикация с подобным термином. Некоторым из нас термин "мезотрон" представлялся неудачным [14]. При встрече у Э. Бречера в Кембридже Х. Баба, М. Прайс и автор настоящей статьи согласились применять название "мезон". Тому, чтобы это название вытеснило "мезотрон", несомненно, способствовал С. Пауэлл уже после войны.

ваться содействием моих учителей из Швейцарии. Паули обратил мое внимание на интересные статьи в журнале "Physical Review" (1936, vol. 50, № 9), в которых устанавливалось понятие зарядовой независимости ядерных сил и развивался формализм, соответствующий этой идее [18]. Связь между теорией поля и теорией ядерных сил согласно И.Е. Тамму и Д.Д. Иваненко [12] была мне известна и представляла особый интерес в отношении идеи зарядовой независимости. Острая, но всегда дружеская моя дискуссия с Венцелем привела к проблеме: нельзя ли механизм Тамма-Иваненко, при всех его других недостатках, обобщить и не приведет ли он к теории зарядово-независимых ядерных сил? Ответ оказался положительным и был опубликован мною в "Physical Review" [19]*.

После открытия Андерсона цюрихские коллеги обратили мое внимание на работу Юкавы, и первая статья Штюкельберга быстро стала мне известной. Паули и Вейскопф при мне разрабатывали квантование уравнения Клейна-Гордона**.

Изучив работу Прока [20], я понял, как учесть в свободных уравнениях спина 1 электромагнитное поле. Из статьи Юкавы непосредственно вытекало, что при полном учете ядерных сил нельзя ограничиться простейшим скалярным полем, которое ввел Юкава, и довольно простым шагом явилось использование уравнения Прока, а не уравнения Клейна-Гордона. Насколько я помню, благодаря замечанию Грегора Венцеля я стал рассматривать псевдоскалярное и псевдовекторное поля наряду со скалярным и векторным [22]. Эта работа была выполнена в Лондоне, в то время как Х. Фрелих и В. Гейтлер анализировали ту же проблему в Бристоле. Я встретился с Гейтлером на заседании Лондонского Королевского общества, и мы увидели, что двигаемся в одном направлении, которое представляет собой следующий шаг в развитии теории Юкавы. В то время как я только начинал исследование теории спина 1, Фрелих и Гейтлер специально интересовались объяснением аномальных магнитных моментов протона и нейтрона и главным образом с этой целью ввели добавочный член $\sigma \Delta \varphi$ в свои уравнения сверх основного юкавского члена. В наших работах было много забавных отклонений, например я старался убедить Фрелиха и Гейтлера, что теорию спина 1 следует предпочесть их варианту, упорно защищал сохранение четности, что было основано не столько на данных эксперимента, сколько на убеждении в необходимости наличия лево-правой симметрии. Наши дискуссии привели к публикации совместной статьи [23], в которой обсуждались проблема ядерных сил и магнитные моменты протона и нейтрона. Эта статья вышла в свет почти одновременно с работой Баба [24] аналогичного содержания, а вскоре после этого мы узнали о также весьма близкой работе Юкавы, Сакаты и Такетани [25]. Здесь, пожалуй, следует отметить, что в противоположность работе Баба и, вероятно, работе японских авторов моим

* Вычисления в этой статье правильны с точностью до знака. Выводы относительно члена тензорной силы пришлось уточнить, но вся работа в целом показала, что зарядовая независимость может быть достигнута.

** Любопытно, что мое исследование уравнений Прока было связано с теорией Ми [21] в классической электродинамике, для которой вариант Прока является самым простым частным случаем.

отправным пунктом для применения уравнений Прока к ядерным силам не являлась аналогия с электромагнетизмом. Я всегда считал, что уравнения спина 1 основаны не на теории Максвелла, а на теории Густава Ми, и этим объясняется мое стремление подчеркнуть эквивалентность продольных и поперечных векторных мезонов в теории. Естественно, как теория ядерных сил, так и теория магнитных моментов протона и нейтрона страдали от наличия расходимостей, и применявшиеся тогда приемы обрезания, конечно, еще не могли быть оправданы какой-либо перенормировкой. Нас особенно беспокоила расходимость "тензорной силы" в теории ядерных сил, возникающая в варианте спина 1 теории Юкавы. В ранних работах мы просто усредняли этот член, после чего пришли к выводу, что только "векторная" теория поля спина 1 имеет шансы на успех при количественном описании ядерных взаимодействий. Конечно, это был именно тот случай, когда правая рука не знает, что делает левая! В самом деле, одновременно я переформулировал свои прежние результаты, касающиеся возможности построения теории зарядово-независимых ядерных сил (первоначально они были сформулированы на основе механизма взаимодействия Тамма-Иваненко). Это привело меня к публикации так называемой "симметричной теории"; позднее, уже во время войны, Паули указал мне в одном из писем, что, исследуя протон-нейтронные взаимодействия с помощью симметричной теории, я нашел бы в качестве единственно пригодного варианта псевдоскалярную теорию, возможность которой я отмечал, но затем оставил в стороне при рассмотрении приложений [26]:

Таким образом, в этом случае, как и во многих других, Паули оказался первым, кто понял возможности псевдоскалярной мезонной теории. В данной статье нет необходимости рассказывать, как эти гипотетические рассуждения подтвердились после войны благодаря открытию π -мезона Пауэллом. Также излишне излагать здесь почти параллельное развитие работ Хидеки Юкавой и его школой. Моей задачей было лишь описать ситуацию, сложившуюся в физике после великого научного события, 30-летний юбилей которого отмечался в сентябре 1965 г. и которое оказалось центральным и совершенно необходимым отправным пунктом всего дальнейшего развития этой области физики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dirac P.A.M. — Proc. Roy. Soc., 1928, vol. A 117, p. 610; vol. 118, p. 341.
2. Dirac P.A.M. — Ibid., vol. A 114, p. 243, 710.
3. Heisenberg W., Pauli W. — Z. Phys., 1929, Bd 56, S. 1; 1930, Bd 59, S. 168.
4. Jordan P., Klein O. — Ibid., 1927, Bd 45, S. 751.
5. Jordan P., Wigner E. — Ibid., 1928, Bd 47, S. 631.
6. Pauli W. — Ibid., 1933, Bd 80, S. 573.
7. Dirac P.A.M. — Proc. Roy. Soc., 1931, vol. 126, p. 360.
8. Pauli W., Weisskopf V. — Helv. Phys. Acta, 1934, vol. 7, p. 709.
9. Heisenberg W. — Z. Phys., 1932, Bd 77, S. 1.
10. Majorana E. — Ibid., 1933, Bd 82, S. 137.
11. Fermi E. — Ibid., 1934, Bd 88, S. 161.
12. Tamm I., Iwanenko D. — Nature, 1934, vol. 133, p. 981.
13. Yukawa H. — Proc. Phys.-Math. Soc. Jap., 1935, vol. 17, p. 48.
14. Darwin C.G. — Nature, 1939, vol. 143, p. 602.

15. Stueckelberg E.C.G. — Phys. Rev., 1937, vol. 52, p. 41.
16. Bhabha H.J. — Nature, 1938, vol. 141, p. 117.
17. Kemmer N. — Ibid., p. 116.
18. Kemmer N. — Ibid., 1937, vol. 140, p. 192.
19. Kemmer N. — Phys. Rev., 1937, vol. 52, p. 906.
20. Proca A. — J. phys. et radium, 1936, vol. 7, p. 347.
21. Mie G. — Ann. Phys., 1912, vol. 37, p. 511; vol. 40, p. 1.
22. Kemmer N. — Proc. Roy. Soc., 1938, vol. A166, p. 127.
23. Fröhlich H., Heitler W., Kemmer N. — Ibid., p. 154.
24. Bhabha H. — Ibid., p. 501.
25. Yukawa H., Sakata S., Taketani M. — Proc. Phys.-Math. Soc. Jap., 1937, vol. 19, p. 712.
26. Kemmer N. — Proc. Camb. Philos. Soc., 1938, vol. 34, p. 554.

**ВОСПОМИНАНИЯ ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ
ИСКУССТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ
И СВОЙСТВ НЕЙТРОНА,
ПРОВОДИВШИХСЯ В РИМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
в 1934 — 1936 гг.**

*Э. Амальди**

В данной статье я опираюсь главным образом на собственные воспоминания о событиях, происходивших в 30-х годах в Римском университете, когда я работал в группе, руководимой Энрико Ферми. Таким образом, нарисованная здесь картина неизбежно окажется неполной. Некоторую информацию о работе, проделанной Ферми и его сотрудниками в этот период, можно почерпнуть также из материалов, опубликованных в печати [1—4]**.

1. Об открытии искусственной радиоактивности сообщили Ирен Кюри и Фредерик Жолио в заметке, представленной в "Comptes rendus" Парижской Академии наук, и лондонский журнал "Nature" в январе 1934 г. [5]. Бомбардируя бор и алюминий α -частицами полония, они обнаружили эмиссию позитронов, которая началась не сразу же после сближения источника α -частиц и испытуемых образцов этих элементов, ее интенсивность увеличивалась постепенно, по мере облучения, и достигала некоторого определенного значения. После удаления источника α -частиц эмиссия позитронов не прекращалась, а лишь начинала спадать экспоненциально во времени, как это происходит с активностью радиоактивного вещества. Период полураспада составил для бора 14 мин, для алюминия — 3 мин 15 с, для магния, также изученного в этих опытах, — 2,5 мин. Несколько позже И. Кюри и Ф. Жолио, применив метод химического отделения, определили химическую природу активных продуктов [6].

* © Перевод на русский язык, "Наука", 1975. Пер. с англ. Е.К. Комаровой. Статья приведена с сокращениями.

** Во вступлении к статье "Получение и замедление нейтронов", которую я написал около 15 лет назад (Handbuch der Physik. Bd 38/2/Hrsg. S. Flügge. Berlin: Springer Verlag, 1959, S. 1—659), я попытался дать довольно детальный и точный отчет о следовавших непрерывно одно за другим открытиях, раскрывших перед нами область искусственной радиоактивности и нейтронной физики.

Это открытие побудило Ферми и вообще всю группу, работавшую в Римском университете, приступить к новой экспериментальной работе, имевшей важные последствия. В течение нескольких последних лет мы уже вели разговоры о желательности переноса наших исследований из области атомной физики, где каждый уже проработал по нескольку лет, в область ядерной физики. Эти намерения начали облекаться в практическую форму к концу 1931 г. В октябре того же года по возвращении из Лейпцига, где я провел около десяти месяцев, работая под руководством Дебая над проблемой дифракции рентгеновского излучения в жидкостях, мне посчастливилось получить задание систематически изложить на нескольких семинарах классическую монографию Резерфорда, Чадавика и Эллиса [7], к изучению которой сам я приступил несколько месяцев назад. На эти семинары приходили Ферми, Разетти, Сегре, Майорана и др. Члены группы часто прерывали мою лекцию самыми разными замечаниями, которые вызывали продолжительные дискуссии и позволяли Ферми экспромтом развивать теорию явлений, о которых шла речь. Замечания Майораны также были почти всегда весьма проникательны. Многие из идей и подходов, родившихся во время этих дискуссий, вошли несколькими годами позже в книгу Разетти "Основы ядерной физики", опубликованную не только в Италии, но и в США [8] и ставшую в конце 30-х годов одним из популярных трудов по ядерной физике.

Семинар распался через месяц или два: в ноябре Сегре уехал в Гамбург, в институт, руководимый О. Штерном, изучать методику эксперимента с молекулярными пучками, а Разетти — в Берлин (Далем), в Физический институт, возглавляемый Отто Ганом, для исследований в области проникающего излучения, возникающего в бериллии при бомбардировке его α -частицами. Тогда же в Риме мы с Ферми приступили к сооружению камеры Вильсона того типа и таких размеров, какие были у Блэккетта, чтобы овладеть более совершенной техникой, чем та, которая применялась при исследовании радиоактивности и взаимных превращений элементов.

Ферми и Разетти, когда последний вернулся из Берлина осенью 1932 г., разработали программу исследований в области ядерной физики. Была сконструирована и смонтирована довольно большая камера Вильсона, похожая в основном на те, какими пользовались в Берлине (Далеме); она прекрасно работала с первой минуты. Ферми и Разетти построили кристаллический гамма-спектрометр. Разетти разработал также методику выращивания больших монокристаллов висмута [9]. С помощью счетчиков различных типов он выделил мощный источник радия D из раствора радия. Затем он выделил полоний и, смешав его с порошком бериллия, получил более мощный источник нейтронов по сравнению с теми, какими пользовались в то время.

Эти работы стали возможны лишь благодаря дотациям Национального совета по научным исследованиям, который увеличил научно-исследовательский бюджет факультета до 2–3 тыс. долл. в год, что примерно в 10 раз превышало средний бюджет физических факультетов университетов Италии в те годы.

Летом и осенью 1933 г. Сегре и я не принимали участия в этих работах. Мы были заняты завершением одного спектрографического исследования нового явления, которое наблюдали в последнее время и которое Ферми правильно объяснил только в ноябре того же года. Позднее я еще вернусь к этой работе, потому что ее теория оказалась важной для объяснения поведения медленных нейтронов.

Постепенное переключение из области атомной физики в область ядерной физики происходило также в теоретической деятельности Ферми и остальных членов группы. В 1930 г. Ферми приступил к работе над сверхтонкой структурой спектральных линий, обусловленной ядерным спином

[10]. Немного погодя к нему присоединился Сегре. Благодаря этой работе и участию в дискуссиях, возникавших на различных конференциях и семинарах в Италии и за границей, Ферми стал настолько известным как ученый, знающий свойства ядра, что ему предложили сделать доклад о современном состоянии ядерной физики на конференции по ядерной физике, состоявшейся в Париже в 1932 г. и явившейся частью крупной международной конференции по электричеству. В своем докладе он воспользовался гипотезой Паули о существовании нейтрино, чтобы объяснить кажущееся несохранение энергии и импульса при β -распаде.

В конце 1933 г. Ферми написал свою статью о β -распаде, где ввел новый тип взаимодействия — "слабое взаимодействие, описываемое особым гамилтонианом" [11]. Я не стану касаться этой основополагающей статьи, потому что это увело бы меня слишком далеко от моей главной темы. Сказанного мною вполне достаточно, чтобы дать представление об экспериментальном и теоретическом опыте, накопленном в Римском университете к тому моменту, когда супруги Жолио-Кюри сообщили об открытии искусственной радиоактивности, вызываемой бомбардировкой вещества α -частицами.

2. Всем известно, что события, которые привели к открытию нейтрона, начали разворачиваться в Шарлоттенбурге, где в 1930 г. В. Боте и Г. Беккер [12] открыли весьма проникающее излучение при бомбардировке бериллия α -частицами. Это излучение изучал и Резетти, работая в 1932 г. в лаборатории Лизе Мейтнер в Берлине [13].

Я прекрасно помню, как к концу января 1932 г. мы здесь, в Риме, стали получать выпуски "Comptes rendus" с заметками супругов Жолио-Кюри о свойствах этого проникающего излучения.

В первой из этих заметок было показано, что проникающее излучение, испускаемое бериллием при бомбардировке α -частицами из полониевого источника, может передавать кинетическую энергию около $5 \cdot 10^6$ эВ протонам, присутствующим в тонких слоях различных водородсодержащих веществ (таких, как вода или целлофан). Чтобы объяснить эти факты, супруги Жолио-Кюри выдвинули гипотезу об аналогии этого явления с эффектом Комптона, т.е. об упругом столкновении падающего фотона с протоном [14]. Применяя закон сохранения энергии и закон сохранения количества движения, они вычислили, что бомбардирующие фотоны должны были бы обладать энергией примерно $5 \cdot 10^7$ эВ, чтобы иметь возможность передать столь высокую энергию протонам. Затем они показали, что если к протонам применить формулу Клейна-Нишины, то поперечное сечение окажется слишком малым — на много порядков меньше истинного значения. Французские ученые предположили, что наблюдаемый эффект обусловлен новым типом взаимодействия между γ -излучением и протонами, отличающимся от взаимодействия, которое вызывает эффект Комптона [15].

Мне приятно вспомнить, что Этторе Майорана, прочитав эти заметки, покачал головой и сказал: "Они не понимают, в чем тут дело. Они наблюдают, вероятно, протоны отдачи, создаваемые тяжелыми нейтральными частицами". Несколько дней спустя к нам в Рим пришел выпуск "Nature", где было помещено письмо Чадвика [16], датированное 17 февраля

1932 г. и озаглавленное "Возможное существование нейтрона", где он доказывал существование нейтрона рядом классических экспериментов, в которых кроме протонов отдачи наблюдались ядра отдачи еще у некоторых легких элементов (например, таких, как азот).

Как Майорана смог предугадать это открытие, возможность которого была предположена, но не доказана результатами исследований супругов Жоллио-Кюри? Чтобы понять это, вспомним, что он познакомился с предложенной Резерфордом моделью ядра в опубликованной несколькими годами раньше статье Джованни Джентиле младшего. Резерфорд [17] предложил свою модель в 1927 г., пытаясь вычислить радиус уранового ядра, исходя из отклонений, наблюдаемых в упругом рассеянии α -частиц, по сравнению с вычислениями, построенными на одном лишь законе Кулона ($3,2 \cdot 10^{-12}$ см), и соответствующих значению, выведенному из энергии α -частиц, излучаемой радиоактивными ядрами ($\sim 6 \cdot 10^{-12}$ см). Согласно этой модели ядро состоит из центральной части с положительным зарядом Z_e , вокруг которой вращаются нейтральные спутники, удерживаемые на своих круговых орбитах силами притяжения, порожденными электрической поляризацией, по отношению к которой эти спутники являются объектами воздействия центрального электрического поля.

Резерфорд фактически уже в 1920 г. считал, что если ядро состоит из протонов и электронов, то внутри него, вероятно, находятся нейтральные частицы, состоящие из тесно связанных между собой протонов и электронов. Эта идея была настолько популярна в Кембридже, что некоторые из учеников и коллег Резерфорда, в частности Чадвик, несколько раз пытались между 1920 и 1932 г. экспериментально доказать существование в ядре нейтральных частиц с массой того же порядка, что и у протона. Об этих попытках Дж. Чадвик рассказывает в своих "Воспоминаниях о поисках нейтрона" [18].

В 1928 г. Джентиле доказал [19] противоречивость модели, предложенной Резерфордом год назад. Однако мысль о возможности существования в природе нейтральных частиц субатомных размеров продолжала тревожить умы и в Риме.

Вскоре после открытия Чадвика многие ученые признали, что нейтрон должен быть одним из компонентов ядра, и стали предлагать различные модели, состоящие из α -частиц, протонов, электронов и нейтронов [20].

По всей вероятности, Д. Иваненко [21] был первым, кто выступил в печати с гипотезой, что ядро состоит только из протонов и нейтронов. Ни я, ни остальные друзья Майораны, которых я спрашивал об этом, не помним, самостоятельно ли Майорана пришел к такому же выводу. Несомненно только то, что еще весной того же года Майорана пытался разработать теорию легких ядер, предполагая, что они состоят только из протонов и нейтронов, которые взаимодействуют друг с другом через обменные силы. Кроме того, он пришел к заключению, что эти обменные силы должны действовать только на пространственные координаты (а не на спин), если нам нужно, чтобы не дейтрон, а α -частица была наиболее стабильной системой относительно энергии связи. Однако он был недоволен результатами своей работы и отказался их опубликовать, несмотря

на настойчивые требования Ферми и всех своих друзей *. Он опубликовал свою статью о ядерных силах, названных впоследствии силами Майораны, лишь в конце 1933 г. во время своего пребывания в Лейпциге [22]. Он решился выступить в печати под давлением бесспорного авторитета Гейзенберга, который опубликовал свои знаменитые статьи [23] о ядерных силах еще в 1932 г., ничего не зная о работе Майораны.

3. В марте 1934 г. — вскоре после того как в Риме познакомились со старыми супругами Жолио-Кюри об искусственной радиоактивности [5, 6] — Ферми предложил Разетти провести вместе с ним наблюдения над сходными явлениями, применяя в качестве бомбардирующих частиц нейтроны и используя для этого полониево-бериллиевый ($\text{Po}\alpha + \text{Be}$) источник, приготовленный Разетти. К концу месяца облучению подвергли уже несколько элементов, но, исследовав их на радиоактивность с помощью тонкостенного счетчика Гейгера-Мюллера, получили совершенно отрицательный результат, обусловленный, вероятно, отсутствием интенсивного излучения.

В начале апреля Разетти уехал в Марокко в отпуск, между тем как Ферми продолжал эти эксперименты. И тут Ферми осенила идея, что совсем не обязательно для получения искусственной радиоактивности использовать полониево-бериллиевый источник нейтронов. Можно воспользоваться гораздо более мощным радонново-бериллиевым ($\text{Rn}\alpha + \text{Be}$) источником, так как его β - и γ -излучения (отсутствующие в полониево-бериллиевом источнике) не мешали наблюдению эффекта запаздывания. Ферми был знаком с радонowymi источниками, так как ранее ими пользовался Дж.Ч. Трабакки (из физической лаборатории Института народного здравоохранения) для гамма-спектрометра.

Чтобы получить такой источник, надо было всего лишь наполнить стеклянную трубку порошком бериллия и радоном. Имея этот более мощный источник нейтронов (активность нуклида около 30 мКи), Ферми стал подвергать систематической бомбардировке различные элементы, начиная с водорода, в порядке возрастания их атомных номеров, — литий, бериллий, бор, углерод, азот и кислород, но результаты были отрицательными.

Наконец ему удалось получить несколько показаний на счетчике Гейгера-Мюллера, когда он бомбардировал фтор и алюминий. Результаты этих исследований и их интерпретация с точки зрения (n, α)-реакций были изложены в письме в "Ricerca scientifica" от 25 марта 1934 г. [24]. Самим заглавием "Радиоактивность, наведенная нейтронной бомбардировкой — 1", он указывал на свое намерение приступить к систематическим исследованиям этого явления, что, вероятно, повлекло бы за собой публикацию большой серии статей.

Ферми хотелось как можно скорее продолжить работу, и поэтому он попросил Сегре и меня помочь ему в экспериментах. Разетти была послана телеграмма с просьбой вернуться из отпуска. Работа была сразу же налажена: Ферми выполнял львиную долю измерений и расчетов. Сегре обеспечивал вещества для облучения, источники и необходимое оборудо-

* Некоторые дополнительные факты о том, как Майорана отказывался опубликовывать эти результаты, можно найти у Сегре [2] и Амальди (см.: Amaldi E. La Vita e l'Opera di Ettore Majorana. Accademia Nazionale dei Lincei, 1966). Существует перевод на английский язык: Ettore Majorana Man and Scientist. — In: Strong and Weak Interactions — Present Problems/ Ed by N. Zanichelli. N.Y.: Academic Press Inc., 1966.

дование, а позднее подключился к большинству химических исследований. Я следил за счетчиком Гейгера—Мюллера и за тем, что мы теперь называем электроникой. Однако это "разделение труда" не было жестким, и мы принимали участие в работе на всех ее этапах. Мы сразу же поняли, что нам необходима помощь специалиста-химика. К счастью, мы почти тотчас же уговорили Оскара Д'Агостино работать с нами. Это был химик из лаборатории профессора Трабакки, и в то время, о котором я рассказываю, он был послан на стажировку в Париж в лабораторию мадам Кюри, где изучал радиохимию. Он вернулся в Рим на несколько дней в пасхальные каникулы, но мы показали ему нашу работу, и по просьбе Ферми он остался с нами и уже больше не возвращался в Париж.

В следующие месяцы наша группа опубликовала ряд результатов наших исследований: около 60 элементов было подвергнуто интенсивному воздействию нейтронного облучения и почти в 40 из них был открыт хотя бы один радиоактивный продукт, а зачастую и точно установлено, какой.

Этих результатов было уже вполне достаточно, чтобы приступить к систематической классификации ядерных реакций, вызываемых нейтронами. Мы выяснили, что все элементы, независимо от их атомной массы, могут быть активизированы нейтронами: Полученный нуклид иногда оказывался изотопом ядра мишени, в других случаях его атомный номер был на одну или две единицы меньше. С этой точки зрения было установлено заметное различие в поведении легких и тяжелых элементов: атомный номер радиоактивных продуктов легких элементов обычно меньше атомного номера ядра мишени, в то время как радиоактивные продукты тяжелых элементов (за исключением урана и тория) всегда оказываются изотопами бомбардируемых ядер. В общем результаты, полученные при исследовании легких элементов, можно объяснить как обусловленные реакциями (n, p) и (n, α) , при которых заряд ядра уменьшается соответственно на одну или две единицы. В этих процессах вылетающей частице приходится преодолевать электростатический потенциальный барьер, а он тем выше, чем тяжелее остаточное ядро. Энергия нейтронов, излучаемых бериллием, который бомбардируется α -частицами из полониевого или радиевого источника, находящегося в равновесии со своими продуктами, такова (она равна нескольким мегаэлектронвольтам, и именно такими были все нейтронные источники, которыми пользовались в то время), что проникаемость электростатического барьера оказывается пренебрежимо малой для тяжелых элементов.

Этим же соображением, справедливым при любой бомбардирующей частице, объясняется тот факт, что и супруги Жюлио-Кюри, и другие ученые смогли наблюдать искусственную радиоактивность, вызываемую α -частицами, только у легких элементов.

Напротив, при объяснении ядерных реакций, в которых атомный номер взаимодействующих элементов остается прежним, ученые столкнулись с некоторыми трудностями, для полного их разрешения потребовалось значительное время.

Здесь, пожалуй, стоит сказать, что, во-первых, мы были, скорее всего, первой хорошо организованной группой ученых-физиков, успешно работавшей около двух лет, и, во-вторых, мы, вероятно, первыми стали пользоваться отгисками статей. Чтобы как можно скорее информировать наших коллег о результатах своей работы, мы почти еженедельно писали краткие письма в "Ricerca scientifica" — журнал Национального совета по научным исследованиям — и, получив то, что сейчас мы назвали бы "препринтами", рассылали их по почте 40 наиболее известным и активно

работающим физикам-ядерщикам в разные страны мира, тогда как сами письма, напечатанные в журнале, выходили в свет через две недели. Эта процедура несколько упрощалась тем, что моя жена Джинестра работала в это время в "Ricerca scientifica".

К лету 1934 г. работа была завершена и обобщена в статье, которую мы с Сегре привезли в Кембридж к Резерфорду в начале июля 1934 г. Когда Ферми написал Резерфорду, спрашивая его, нельзя ли нам провести лето в Кавендишской лаборатории, тст прислал в ответ очень любезное письмо, в котором реакция $D + D$, производимая дейтронами с энергией примерно 200 кэВ, обсуждалась как возможный источник нейтронов. Резерфорд закончил свое письмо словами: "Если Ваши ассистенты придут в Кембридж, скажем, в первых числах июля, то я с радостью поделюсь с ними нашим опытом работы и познакомлю с режимом работы наших установок для радиоактивных превращений".

Продолжая работу с элементами все больших атомных номеров, мы еще до лета 1934 г. облучили торий и уран, при этом наблюдался ряд новых значений активности, которые оказалось нелегко объяснить. Считалось, что при облучении урана должны появляться трансурановые элементы, обладающие теми же свойствами, что и рений, осмий, иридий и платина. Эти ошибочные предположения делали в то время все, и поскольку мы доказали, что некоторые из полученных значений не были связаны с изотопами элементов с атомными номерами от 86 до 92, то пришли к заключению, что носителями этой активности, вероятно, являются элементы с атомным номером больше 92, точнее, экарений ($Z = 93$) и экаосмий ($Z = 94$).

Возможность деления, предположенную немецким химиком Идой Нодак [25], мы не восприняли всерьез, хотя позднее не могли понять, почему.

Следует сказать, что в 1935 и 1936 гг. Ган и Мейтнер [26] не только подтвердили наши результаты, но и продолжили наши исследования: в то время они считали, что нужно определить два β -радиоактивных ряда, образующихся при захвате нейтронов двумя разными урановыми изотопами. В каждом из этих рядов помимо экарения и экаосмия появляется также экаиридий ($Z = 95$), а в одном случае из двух — экаплатина (последнее неопределенно). Только после открытия реакции деления Ганом и Штрасманом в 1938 г. ученые разных стран независимо друг от друга установили, что трансурановые элементы и не могли вести себя как рений, осмий, иридий и платина, но должны были образовать второй ряд редкоземельных элементов, названных впоследствии актиноидами. К такому выводу, в частности, пришли с помощью полуэмпирических аргументов Абельсон и Мак-Миллан [27] в 1940 г., а в 1941 г. Мария Майер [28] доказала справедливость этого вывода, подсчитав, по совету Ферми, энергию электронных орбит $5f$ по методу Ферми—Томаса подобно тому, как сам Ферми еще в 1928 г. сделал расчеты [29] электронных орбит $4f$ для редкоземельных металлов.

4. Когда в начале июля 1934 г. Сегре и я приехали в Кембридж, Кавендишская лаборатория предстала перед нами как подлинный центр ядерной физики. В этот момент Резерфорд работал вместе с Олифантом над реакциями $D + D$, однако его сильная личность чувствовалась в работе всей лаборатории. Чадвик работал с Морисом Гольдхабером: они голь-

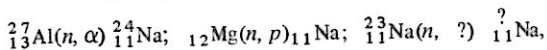
ко что открыли фотораспад дейтрона [30]. Здесь же были Дж.Д. Кокрофт, Ди, Эллис и Н. Фезер, а Ф.У. Астон собирался повысить точность измерений массы атома. В его лаборатории работал молодой американский ученый Бейнбридж, который незадолго до того сделал важное открытие в этой основополагающей области. Бродя по зданию Кавендишской лаборатории, можно было иногда повстречать и Дж.Дж. Томсона, который лишь за несколько лет до нашего приезда удалился от дел.

Единственными людьми, исследовавшими искусственную радиоактивность, вызываемую нейтронами, были Бьерге и Весткотт: один из Копенгагена, другой из Канады. Мы посещали все исследовательские группы, работавшие в ту пору в Кавендишской лаборатории, а также и Петра Капицу, который руководил лабораторией им. Монда и незадолго до того сконструировал свой знаменитый вращающийся генератор для создания чрезвычайно сильного магнитного поля.

Мы с Сегре привезли с собой рукопись большой статьи, в которой обобщались наши исследования искусственной радиоактивности, вызываемой нейтронами, и передали ее лорду Резерфорду. Он принял нас, благосклонно отзываясь о нашей работе, и непрерывно шутил, не вынимая трубки изо рта. Мы так и не поняли, о чем он говорил, но во всяком случае он позаботился, чтобы статья была опубликована как можно скорее [31].

После посещения большинства лабораторий я некоторое время учился у Вин-Вильямса конструировать линейный усилитель для измерения с большой точностью энергии, которую теряет единичная α -частица или протон в газе малой ионизационной камеры. Однако большую часть времени Сегре и я проводили, обсуждая наши общие проблемы с Бьерге и Весткоттом. В нашей статье, переданной в "Proceedings of the Royal Society" [31], остался неразрешенным один вопрос: были ли реакции, вызывавшие появление изотопа ядра мишени, реакциями (n, γ) , т.е. радиационным захватом, или реакциями $(n, 2n)$. Они могли быть также процессами неупругого рассеяния бомбардирующих нейтронов с образованием изомера ядра мишени. Однако последний процесс не рассматривался летом 1934 г., и уж во всяком случае он был исключен после экспериментов и обсуждений, о которых я расскажу ниже. Возражения против реакций типа $(n, 2n)$ основывались на их явно эндонергетическом характере. Поэтому реакция (n, γ) оставалась наиболее естественным объяснением, хотя оно не было основано на "одночастичной модели" реакций, общепризнанной в то время. По этой модели вероятность эмиссии одного или более фотонов с энергией несколько миллионов электронвольт за то короткое время, пока нейтрон пересекает ядро, настолько мала, что расчетное сечение для процессов (n, γ) оказывается ничтожным.

Наиболее важным и решающим аргументом, подтверждающим возможность радиационного захвата, было исследование, может ли один и тот же нестабильный нуклид с атомным номером Z появиться в результате бомбардировки элементов не только с тем же самым атомным номером Z , но и с атомными номерами $Z + 1$ и $Z + 2$. Например, если один и тот же ${}_{11}\text{Na}$ появляется в результате трех реакций



то последняя неизбежно должна быть реакцией радиационного захвата.

Бьерге и Весткотт [32] сделали первый шаг к доказательству, что именно так все и происходит на самом деле. Во время нашего пребывания в Кембридже они обнаружили, что после нейтронной бомбардировки натрия проявляет слабую активность с периодом полураспада (около 10 ч), совпадающим с точностью до погрешностей в измерениях, с большими периодами, характерными для магния и алюминия и принадлежащими, как было известно [24], изотопам натрия. Вернувшись в Рим, мы завершили эту работу, показав с помощью д'Агостино, что возникнове-

ние в натрии этой длительной активности связано с изотопом этого же элемента*.

Я специально остановился именно на этой проблеме, так как считаю, что доказательство способности нейтронов подвергаться радиационному захвату при значительном сечении было одним из первых экспериментальных свидетельств непригодности одночастичной модели для описания многих важных свойств ядер.

Мы нашли также второй случай "доказанного" радиационного захвата для открытого нами нового радионуклида алюминия с периодом полураспада почти 3 мин. Но когда несколько дней спустя, после того как мы уже оповестили всех о своем результате, я попытался повторить измерения, то не нашел и следа этой новой активности. К несчастью, мы уже успели сообщить о нашем результате Ферми, который, возвращаясь из Южной Америки, где он проводил лето, принял участие в Международной конференции по физике в Лондоне. Он даже успел упомянуть о нашем результате на одном из заседаний. Сообщение о том, что мы не можем подтвердить свой результат, было спешно направлено Ферми и рассердило его, так как он попал в неловкое положение, сообщив на конференции ошибочный результат.

Мы были смущены и подавлены, так как не могли понять причину своей ошибки. Это было первое предзнаменование неожиданных трудностей, которые были полностью разрешены лишь месяца через полтора.

5. В статье, опубликованной в "Proceedings of the Royal Society" [31], активность различных искусственных радиоактивных тел классифицировалась только качественно как "сильная" или "слабая". Такая классификация была явно неудовлетворительной, и поэтому в начале 1934/35 учебного года мы решили попытаться создать количественную шкалу радиоактивности, хотя бы в произвольных единицах. Эту работу поручили мне и Б. Понтекорво — одному из наших студентов, который получил диплом в июле 1934 г. и после летних каникул присоединился к нашей группе. Мы приступили к изучению условий излучения, наиболее подходящих для получения хорошо воспроизводимых результатов. Для этой работы мы воспользовались радиоактивным серебром, период полураспада которого равен 2,3 мин.

Однако мы сразу же столкнулись с некоторыми трудностями, так как стало ясно, что интенсивность активации зависит от условий облучения. В частности, деревянные столы, находившиеся рядом со спектроסקопом в темной комнате, обладали чудесными свойствами: серебро, облученное на этих столах, накапливало большую активность, чем тогда, когда его облучали на мраморном столе в той же самой комнате.

Чтобы выяснить ситуацию, я начал систематические исследования. В записной книжке VI, куда в этот период записывались измерения**, записи начинаются 18 октября 1934 г. Необходимый для опыта свинцовый клин был готов утром 20 октября, но воспользоваться им удалось лишь через несколько дней.

* В данном случае это очень убедительное доказательство, так как уже было известно, что алюминий состоит из одного-единственного изотопа $^{27}_{13}\text{Al}$, а $^{24}_{11}\text{Na}$ испускает позитроны вместо электронов, которые следовало бы ожидать от изотопов, имеющих избыток нейтронов по сравнению со стабильными изотопами. Когда же речь идет о процессах ($n, 2n$), можно в принципе ожидать эмиссии позитронов.

** Как эта, так и большинство других записных книжек этого периода были собраны Лодовико Дзанки и мною и впоследствии переданы в Дом Галилея в Пизе [см.: Amaldi E. The Fermi Manuscripts at the Domus Galilaeana. — Physics, 1959, vol. I (2), p. 69; Derenzini T. Analisi dei manoscritti di Enrico Fermi alla Domus Galilaeana. — Physics, 1964, vol. VI (1), p. 75].

Утром 22 октября большинство из нас было занято на экзаменах, но Ферми решил проводить дальнейшие измерения. Бруно Росси из университета в Падуе и Энрико Персико из Туринского университета находились в этот момент в старинном Физическом институте на улице Панисперна в Риме. Мне кажется, что Персико оказался единственным очевидцем случившегося. В тот момент, когда Ферми проводил эксперимент с цинковым клином, ему неожиданно пришло в голову использовать для той же цели и клин из какого-нибудь легкого элемента, и первым был использован парафин. Результаты этих измерений занесены на с. 8 и 9 все той же записной книжки VI. Сначала их записывал Ферми, а затем Персико. К полудню всех нас собрали, чтобы мы могли наблюдать необычный эффект, вызываемый парафином, — явный рост интенсивности активации. Около часа дня работа была, как обычно, прервана, а когда мы вернулись к трем, Ферми уже нашел объяснение этого странного поведения отфильтрованных нейтронов. Эти нейтроны замедляются в результате многочисленных упругих столкновений с протонами, находящимися в парафине, и у них возрастает способность к взаимодействию. Последнее, т.е. увеличение сечения реакции при снижении скорости нейтронов, все же противоречило в ту пору нашим ожиданиям. В этот же день после обеда эксперимент был повторен в бассейне институтского сада, и нам снова повезло: мы смогли установить причину расхождения между двумя сериями измерений активации алюминия, о которых я упомянул выше.

Ферми выдвинул гипотезу, что нейтроны могут приобретать тепловую энергию, и тут же был разработан эксперимент для проверки правильности этого предположения. Вечером того же дня вся группа собралась у меня дома, и мы написали в "Ricerca scientifica" [33] сообщение о полученных результатах.

Само собой разумеется, что с открытием водородного эффекта перед нами встал ряд новых проблем, и мы были вынуждены изменить первоначальную программу. Первым делом надо было определить то, что мы называли "водяным коэффициентом", т.е. степень возрастания активности при погружении в воду, когда нейтронный источник находится внутри тонкого цилиндра из исследуемого вещества. Эти измерения подтвердили, что только реакции (n, γ) чувствительны к водородсодержащим веществам, и к первым числам ноября мы убедились, что замедление нейтронов было верным объяснением данного явления.

Затем мы переключили наше внимание с активных нуклидов на поведение медленных нейтронов.

Среди прочих исследований мы провели один эксперимент с целью установить, действительно ли нейтроны подвергаются тепловому влиянию, для чего сравнили активацию родия, окруженного углеводородами, при двух различных температурах: при комнатной и при температуре 200 °C. Никакого эффекта мы не наблюдали. Через некоторое время Мун и Тилман, работавшие в Лондоне, предположили, что подобный эффект можно наблюдать только вблизи границы между двумя средами с разными температурами, и им удалось получить положительный результат [34]*.

* Указание на малый эффект независимо получили Даннинг, Пеграм, Митчелл, Финк (см.: Dunning J.R., Pegram G.B., Mitchell D.P., Fink G.A. — Phys. Rev., 1935, vol. 47, p. 888).

За эти месяцы нами было получено множество различных результатов, в частности мы установили, что такие вещества, как бор, хлор, кобальт, иттрий, родий, серебро, кадмий, индий и др., обладают очень большими сечениями захвата σ_c . Хотя измерения были крайне грубыми, они позволяли все же установить, что в некоторых случаях σ_c составляет 10^3 или даже 10^4 геометрического поперечного сечения ядра.

Для объяснения этих аномальных сечений захвата явно нужна квантовая механика. Для частиц со столь малой скоростью, что длина их волны λ значительно превосходит радиус R мишени, пределом поперечного сечения является не πR^2 , а $\pi \lambda^2$ с коэффициентом, который не может быть намного меньше единицы.

Та же самая аргументация использовалась для установления основного закона зависимости сечения захвата от скорости нейтронов. Вероятность P захвата нейтрона, имеющего скорость v , ядром дается в виде $P = \sigma_c v$, и если описывать этот процесс, исходя из простого подхода, предлагаемого одночастичной моделью, то легко убедиться, что

$$\lim_{v \rightarrow 0} \sigma_c v = \text{const.}$$

Здесь имеется в виду так называемый закон $1/v$, согласно которому при очень низких скоростях σ_c пропорционально v^{-1} .

Мы изучали также γ -излучение, испускаемое различными ядрами при радиационном захвате нейтронов, и пытались замедлять нейтроны путем столкновения их не с водородом, а с иными веществами. Так, мы обнаружили эффект неупругого столкновения, который объяснил наши первоначальные наблюдения последствий окружения источника и детектора свинцом. Все эти исследования были завершены в декабре 1934 г., т.е. за несколько месяцев с момента открытия медленных нейтронов.

Я еще ничего не сказал о профессоре О.М. Корбино, руководителе физического факультета Римского университета, человеке, который сделал больше, чем кто бы то ни был, для организации в своем институте группы молодых физиков, работавшей вместе с Ферми. В 1926 г. ему удалось создать кафедру теоретической физики для Ферми, а года два спустя — кафедру спектроскопии для Ризетти; Сегре и я были его ассистентами, но он настоял, чтобы мы работали с Ферми. Он защищал всех нас от нападков университетских традиционалистов, которые во многих случаях относились к нам далеко не благосклонно. Он был в высшей степени интеллигентным человеком. Выдающийся физик, он с какого-то момента всю свою энергию переключил на политику и промышленность. Он стал членом парламента Италии и был сначала министром народного образования, а потом министром экономики и промышленности.

Вскоре после открытия эффекта водородсодержащих веществ Корбино высказал предположение, что медленные нейтроны могут получить важное практическое применение и что надо бы взять патент на эту работу. Мы так и сделали и в результате получили итальянский патент № 324458 от 26 октября 1935 г.

Возвращаясь к нашей работе, я должен напомнить, что вскоре нами была изучена реакция с бором и верно определена как реакция (n, α) на основе измерений, проведенных с помощью малой ионизационной камеры, которая была снабжена линейным усилителем, построенным в соответствии с общими указаниями Винн-Вильямса.

Однако в январе—феврале 1935 г. мы предприняли попытку провести

исследования в ином направлении, которая, хотя и оказалась неудачной, все же представляет некоторый интерес. Для объяснения множества новых видов наведенной радиоактивности, выделенных в тории и уране разными группами ученых из Рима, Парижа (И. Кюри и Ф. Жолио с сотрудниками) и Берлина (Ган и Мейтнер), привлекались несколько трансурановых элементов и возможные продукты их распада. Тогда было естественно считать, что кроме β -излучателей должны существовать новые α -излучатели. Было решено, что я должен искать такие типы радиоактивности с помощью малой ионизационной камеры, снабженной линейным усилителем. Я начал облучать мишень из окислов урана (или тория) и сразу же после облучения подносил ее к ионизационной камере с тонким окошком. Время от времени мне по мере необходимости помогал кто-нибудь из коллег. Так как нам не удавалось наблюдать какой бы то ни было активности, мы предположили, что это, по-видимому, обусловлено краткостью соответствующего периода полураспада, равного, возможно, долям секунды. Поэтому урановая мишень была помещена прямо перед ионизационной камерой и облучалась там же из источника, окруженного парафином. Между нейтронным источником и камерой был помещен кусок свинца, чтобы ослабить фон, вызываемый γ -излучением.

Мы считали также, что если существуют α -излучатели с малым периодом полураспада, то согласно закону Гейгера—Наттола они должны излучать α -частицы, пробег которых гораздо длиннее, чем у частиц, самопроизвольно излучаемых ураном и торием. Поэтому все эксперименты проводились всегда с ураном и торием, покрытыми алюминиевой фольгой, что равноценно 5- или 6-сантиметровому слою воздуха.

Эксперимент дал отрицательные результаты, но если бы мы случайно забыли положить алюминиевую фольгу, то уже в январе или феврале 1935 г. смогли бы наблюдать ядра отдачи, порожденные делением. Несколько лет спустя из разговора с Отто Ганом, уже после того как он в 1938 г. в сотрудничестве со Штрассманом открыл деление, я узнал, что похожий эксперимент и тоже с отрицательным результатом проводился примерно в то же время Г. Фон Дростом в Берлине. Оглядываясь назад, трудно сказать, какой была бы наша реакция, если бы мы наблюдали осколки деления в начале 1935 г.

Результаты всех экспериментов, о которых я рассказывал до сих пор, и некоторых других, мною не названных, содержатся во второй статье, опубликованной в "Proceedings of the Royal Society" [35].

Как перед нашей группой, так и перед другими, в частности перед группой ученых Колумбийского университета — Данингом, Пеграмом, Финком и Митчеллом [36], проводившим аналогичные эксперименты, вставали серьезные трудности. Не было взаимосвязи между рассеянием и сечением захвата в тех случаях, когда сечение захвата было слишком велико, как, например, у кадмия. Ферми попытался объяснить это явление, но безуспешно. Его объяснил Нильс Бор в январе 1936 г., но об этом я расскажу позднее.

Для объяснения сечений упругого рассеяния во второй статье, опубликованной в "Proceedings of the Royal Society", была использована концепция длины рассеяния как очень удобный прием для описания того, что происходит в пределе бесконечной длины волны нейтрона ("бесконечное" в данном случае означает, разумеется, "очень большое по сравнению с размерами ядра").

Понятия длины рассеяния и псевдопотенциала Ферми развивал еще в 1933 г. [37] при объяснении одного спектроскопического явления (смещения спектральных линий под давлением), которое было экспериментально открыто Сегре и мною [38].

К лету 1935 г. нам удалось получить новые результаты, и мы провели сравнение скорости нейтронов со скоростью быстро вращающегося колеса [39]. Примерно в то же время Фриш и Соренсен [40] провели в Копенгагене подобный, но все же отличный от нашего эксперимент.

Летом группа ученых Колумбийского университета вместе с Сегре, который там находился, сконструировала и запустила селектор скоростей для медленных нейтронов [41].

6. После летних каникул 1935 г. в Риме остались только Ферми и я; большинство же членов нашей группы разъехалось. На это толкала сложившаяся в Италии обстановка, так как страна готовилась к войне с Абиссинией. Ризетти уехал в США и собирался пробыть в Колумбийском университете не меньше года. Сегре поехал на лето тоже в Соединенные Штаты, а тем временем он был назначен профессором университета в Палермо. Вернувшись в Италию, он уехал из Рима в Сицилию. Д'Агостино уже больше не работал с нами, так как получил место в Химическом институте Национального совета по научным исследованиям. Понтекорво вернулся в Рим вскоре после нас и в течение нескольких месяцев работал с Виком над проблемой обратного рассеяния нейтронов различными элементами [42]. Затем и он уехал из Рима: Министерство народного образования предоставило ему возможность поехать на стажировку за границу, и весной 1936 г. он отправился работать с Жолио в парижской лаборатории Кюри. С тех пор его наезды в Рим стали очень кратки и нерегулярны.

Продолжив работу, мы с Ферми обратили внимание на некоторые результаты Бьерге и Весткотта [43], а также Муна и Тилмана [44]*, которые заметили, что поглощение медленных нейтронов различными элементами происходит не совсем одинаково и зависит от природы элементов, используемых в качестве детектора.

Существовавшая тогда теория поглощения нейтронов ядрами не объясняла этого факта. Как я уже говорил, эта теория предсказывала, что сечение захвата для всех ядер обратно пропорционально скорости нейтронов. Предполагалось, что эта энергетическая зависимость справедлива в таком большом энергетическом интервале, который, несомненно, охватывает и энергетическую область медленных нейтронов.

Мы работали с еще большей энергией, чем прежде, будто гораздо большим напряжением собственных сил хотели компенсировать людские потери нашей группы.

Мы подготовили систематический план исследований элементов, который шутя резюмировали замечанием о готовности измерять коэффициент поглощения для всех 92 элементов во всех возможных сочетаниях с 92 элементами в качестве детекторов. И в шутку же добавляли, что после сочетания всех элементов по два мы скомбинируем их по три. Мы имели в виду, что собираемся изучать также и поглощение нейтронного излучения, отфильтрованного различными способами.

Фактически, измерив коэффициент поглощения 11 разных элементов во всех возможных комбинациях с семью детекторами, мы убедились,

* См. также: Arzimowitsch L., Kurtzschatow I., Latyschew G., Chromow W. — Phys. Z. Sowjet, 1935, Bd 8, S. 472; Pontecorvo B. — Ricerca scient., 1935, vol.6 (2), p. 145; Mitchell D.P., Dunning J.R., Segre E., Pegram G.B. — Phys. Rev., 1935, vol. 48, p. 175.

что наблюдения, сделанные учеными разных групп, о чем говорилось выше, были верны и что во всех случаях было справедливым правило, что коэффициент поглощения всякого элемента увеличивается при использовании в качестве детектора того же самого элемента. Мы стали во всех подробностях изучать конкретные случаи этого явления, взяв для этого серебро, родий и кадмий. Абсорбционные свойства кадмия были исследованы особенно тщательно. На нейтронах, пропущенных через кадмиевую пластинку, мы измерили поглощение различными элементами с разными детекторами, что мы уже делали, изучая неотфильтрованные нейтроны. Таким образом, в начале ноября 1935 г. мы установили, что если нейтроны предварительно пропустить через кадмий, то эффект самопоглощения, о котором говорилось выше, значительно возрастает [45].

Силард [46] независимо от нас пришел к той же мысли исследовать селективное поглощение нейтронов, пропускаемых через кадмий, и показал, что индий и йод ведут себя так же, как у нас вели себя серебро и родий*. Хотя мысль о существовании селективного поглощения высказывалась и ранее в статьях двух групп английских ученых [43, 44], только эксперименты, проведенные нами и Силардом, сделали это объяснение неопровержимым.

Думаю, интересно отметить, что в данном случае я, как и многие другие, стремился упростить картину этого явления: я пытался интерпретировать различные группы нейтронов как группы с различной энергией. Ферми, однако, отказывался принять такое описание. Он тоже не сомневался в том, что это простейшая гипотеза, но утверждал, что она не очень нужна, по крайней мере в данный момент, а потому может оказаться вредной, если ее ввести в нашу картину. Он настаивал на том, что работу нужно продолжать, используя для доказательства только те факты, которые получены в результате наблюдения. Верное объяснение природы нейтронных групп должно было появиться в конце концов как неизбежное следствие полученных данных. Он опасался, что заранее составленное объяснение, как бы правдоподобно оно ни звучало, уведет нас в сторону от объективной оценки явления, с которым мы столкнулись.

Поэтому мы приступили к систематическому изучению свойств поглощения и диффузии различных нейтронных групп, помечая их буквами не только для краткости, но и для того, чтобы избежать каких бы то ни было преждевременных объяснений. Выражение "группа С" употреблялось для нейтронов, сильно поглощающихся кадмием, "группа D" — для нейтронов, активно поглощающихся родием, "группы А и В" — для двух компонентов, которые, как мы считали, характеризуют излучение, активно поглощающееся серебром, но не поглощающееся кадмием.

Во втором письме в "Ricerca Scientifica", датированном 12 декабря 1935 г. [47], дано четкое определение группы медленных нейтронов, исследуются их поглощение и другие свойства. В этой статье описаны эксперименты, проводившиеся с целью установить число нейтронов, принадле-

* Некоторое время спустя аналогичный эффект был замечен и у золота (см.: Frish O.R., Nevesy G., McKay H.A. — Nature, 1936, vol. 137, p. 149).

жащих каждой группе (численность) и излучаемых с поверхности замедлителя (парафина или воды), коэффициент отражения различных групп (альbedo*) и длину диффузии.

Так, мы привели данные, свидетельствующие о том, что нейтроны группы С, активно поглощающиеся кадмием, обладают свойствами, резко отличающимися от свойств нейтронов, проходящих сквозь кадмий. Альbedo нейтронов группы С было очень высоко (0,83), в то время как у групп D, A и т.д. — ничтожно мало. Длина диффузии в парафине составляла около 3 см для нейтронов группы С, а для нейтронов остальных групп она была почти в 6 раз меньше.

В эти последние результаты была внесена ясность более точным экспериментом, проведенным в январе 1936 г., в ходе которого длина диффузии определялась, исходя из вероятности утечки нейтронов, первоначально находившихся на глубине x в заполняющей полупространство среде [48]. Выражение для такой вероятности выводится из диффузионного уравнения, принятого для описания свойств нейтронов группы С. В этой же статье обсуждалась как наиболее вероятная интерпретация нейтронных групп как групп разных энергий, однако при этом не исключалась возможность и других интерпретаций.

Работа кончалась ссылкой на проводившийся как раз в то время, но еще не завершенный эксперимент, который должен был прояснить следующий вопрос: если разные группы нейтронов различаются только энергией, то нейтроны, принадлежащие в какой-то определенный момент одной группе, в результате дальнейшего замедления должны трансформироваться в нейтроны другой группы. В то время мы уже знали из результатов нескольких экспериментов, проводившихся другими учеными**, что в группу С входят тепловые нейтроны. Следовательно, если была верна интерпретация групп как различных энергетических полос, то все остальные группы нейтронов должны были обладать способностью при замедлении трансформироваться в группу С. Окончательные результаты этих экспериментов были приведены в большой заключительной статье [49]. В то же время сообщение об эксперименте такого же типа было опубликовано Хальбаном и Прайсверком [50].

Чтобы точно установить диффузионные свойства нейтронной группы С, нужно было к измерениям длины диффузии, о которых говорилось выше, добавить измерения средней длины свободного пробега. Результат первого измерения этой величины продемонстрировал несомненную разницу между значениями среднего свободного пробега нейтронов группы С и среднего свободного пробега нейтронов всех остальных групп [51, 49].

* Словом "альbedo" астрономы пользуются для определения доли падающего света, отраженного поверхностью планеты или спутника. Чаще всего это относится к поверхности Луны, но используется и для других поверхностей, например для поверхности снега.

** Данное представление подтверждалось тем фактом, что с помощью селектора скорости, в котором "отбор" производился кадмиевыми поглотителями, было получено примерно максвелловское распределение скоростей [31]. Этот аргумент был подтвержден и подкреплён наблюдениями П. Прайсверка и Г. фон Хальбана над серебром (Preiswerk P., Halban H.V. — Nature, 1935, vol. 136, p. 951) и Ф. Разетти и Финком над серебром, родием, индием и йодом (Rasetti F., Fink G.A. — Phys. Rev., 1936, vol. 49, p. 642). Все эти элементы дали термический эффект того типа, который был исследован Муном и Тилманом [44], но как только применялась кадмиевая экранизация, у тех же самых элементов уже не наблюдалось никакого эффекта. Это значит, что линии поглощения у этих элементов расположены выше термической зоны, которая, наоборот, почти целиком входит в область энергий, поглощаемых кадмием.

На объяснение нейтронных групп с точки зрения различия в энергиях в то время наталкивали многие эксперименты, в частности те, на которые указывалось выше, — преобразование различных нейтронных групп в группу С.

Тогда же был сделан важный шаг вперед к разрешению проблем, о которых говорилось выше (существование резонансов и тот факт, что очень большие сечения захвата не коррелировали со значительным рассеянием). Эту роль сыграли одновременно и независимо друг от друга две статьи — Брейта и Вигнера [52] и Н. Бора [53]. Авторы первой статьи по аналогии с молекулярным резонансом предположили, что нейтрон, проникнув в ядро, может отдать часть своей энергии одному из ядерных компонентов и таким образом привести ядро в возбужденное метастабильное состояние, среднее время жизни которого вполне достаточно для создания желаемой малой ширины энергетического уровня. Они получили формулу для сечения радиационного захвата, которая справедлива при захвате нейтрона одним-единственным резонансным уровнем и которую обычно называют одноуровневой формулой Брейта и Вигнера.

Статья Бора, представленная Академии наук Дании 27 января 1936 г., была тоже построена на идее промежуточного уровня. Но вместо того чтобы постулировать существование этого уровня и вывести формулу для соответствующего сечения захвата, Бор развил новую концепцию механизма ядерных процессов, оправдывающую существование множества возбужденных уровней в ядрах атомов со средним и большим значением массового числа, среднее время жизни которых достаточно велико, чтобы соответствовать экспериментальным результатам. Чрезвычайную стабильность промежуточного уровня Бор объяснил, обратив внимание на то, что, как только нейтрон вторгается в ядро, он тут же приходит в столкновение с нейтронами и протонами, входящими в состав ядра. В результате энергия этого нейтрона быстро распределяется между многими частицами и ни одна из них не получает энергии, достаточной для того, чтобы покинуть ядро. Такая ситуация может сохраняться длительное время, пока одна из частиц вследствие мгновенной флуктуации, при которой в ней концентрируется достаточная энергия, не вылетит из ядра.

Согласно этой точке зрения всякий ядерный процесс можно описать как проходящий через два независимых этапа: первый — образование "возбужденного промежуточного ядра" как следствие захвата случайного нейтрона; второй — распад промежуточного ядра либо из-за вылета одной из частиц, либо чаще всего из-за излучения фотонов.

Ферми, однако, объяснил разницу между средними длинами свободного пробега нейтронов группы С и остальных групп [51, 49] влиянием химической связи, так как не мог представить себе никакого ядерного явления, которое вызвало бы сходный эффект. Теория этого явления была изложена Ферми в обширной фундаментальной статье, посвященной теории ряда явлений, замеченных в связи с медленными нейтронами [54].

Тут, пожалуй, стоит вспомнить, что по мере продвижения работы вперед совершенствовалась и измерительная аппаратура. На первом этапе исследований, проводившихся группой ученых Римского университе-

та, измерение активности осуществлялось исключительно с помощью счетчика Гейгера—Мюллера. Однако после открытия замедляющего действия водородсодержащих веществ радиоактивность наших препаратов настолько возросла, что зачастую можно было пользоваться ионизационной камерой, соединенной с электрометром.

Техника измерений продолжала совершенствоваться и в процессе последующих работ с новыми типами ионизационных камер при новых способах использования электрометров. Электрометры были проградуированы с большой тщательностью, для того чтобы знать их характеристики и максимално использовать их возможности. Подготовка номограмм и графиков позволила ускорить расчет активности исследуемого радиоактивного вещества по показаниям электрометра.

После того как была принята интерпретация наблюдаемых явлений на основе представления о резонансных уровнях промежуточных ядер, согласно гипотезе Бора, естественно встал вопрос об определении ширины и энергии этих резонансных линий. Мы с Ферми определили их в серии экспериментов [55, 49], а теоретическое обоснование было изложено Ферми в пространной статье, о которой шла речь выше [54]. Эта работа показывает также, как возрастает среднее значение квадрата расстояния, пройденного нейтронами до того, как их энергия достигнет значения резонансной энергии детектора, по мере уменьшения резонансной энергии детектора. Таким образом, было установлено количественное соотношение между пространственным распределением резонансных нейтронов и их энергией.

Академический год, промелькнувший для нас незаметно в атмосфере изолированности и бешеных темпов работы, уже подходил к концу. Разетти то и дело писал нам о том, что происходит в Колумбийском университете, оттиски статей Хальбана и Прайсверка информировали нас о работе в Париже, а переписываясь с Плачком, мы поддерживали контакт с копенгагенскими учеными. Из копенгагенской переписки мы узнали не только о работе Бора, но и о работе Фриша и Плачека, касающейся $1/v$ -закона поглощения в боре [56]*. Эта переписка разнесла по всему свету родившуюся в Риме шутку, что как возраст капитана можно определить по высоте мачты его корабля, так и энергию группы нейтронов можно определить по расстоянию, проходимому ими при замедлении. Этим же временем можно датировать и термин "возраст", использованный впоследствии Ферми для представления величины $r^2/6$. Впервые выражение "возраст капитана" было использовано в связи с экспериментами по превращению одной группы нейтронов в другую, с более низкой энергией.

Кроме нас с Ферми в институте работали, как я уже говорил, Вик и Понтекорво. Был здесь и Этторе Майорана, а время от времени приезжал к нам из Палермо и Сегре.

Мы работали с невероятным упорством. Мы начинали, бывало, в восемь утра и трудились почти без перерыва до шести или семи часов вечера, а часто и позднее. Измерения проводились по хронометрированно-

* Независимо от них те же самые доказательства развивали Викс, Ливингстон и Бете (см.: Weeks D.F., Livingston M.S., Bethe H.A. — Phys. Rev., 1936, vol. 49, p. 471).

му графику, так как мы уже изучили, какое минимальное время нужно для каждой операции. Они повторялись каждые три-четыре минуты, час за часом и изо дня в день до тех пор, пока мы не приходили к какому-либо выводу по данному вопросу.

Решив одну проблему, мы сразу же набрасывались на другую, не делая перерывов и не ведая сомнений: "Физика — как сома"* — в этой фразе мы, работая, черпали силы, в то время как общее положение в Италии становилось все мрачнее и мрачнее.

Это был уже почти конец "золотого периода" в изучении свойств нейтрона в Римском университете. Работа еще продолжалась в течение нескольких лет, и были получены некоторые интересные результаты, но больше уж не существовало той руководящей роли, которая сохранялась за группой в течение почти трех лет. Отчасти это объяснялось и политической обстановкой, которая все больше и больше ухудшалась в Европе вообще и в Италии в частности; возможно, это было связано и с тем фактом, что с находившимися в нашем распоряжении техническими средствами нам было все труднее и труднее тягаться с другими группами ученых, к тому времени уже оборудовавшими свои лаборатории ускорителями разных типов. С их помощью они получали гораздо более интенсивные потоки нейтронов, чем те, с которыми работали мы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fermi E. Collected Papers. Vol. 1/E. Amaldi, H.L. Anderson, E. Persico, C.S. Smith, A. Wattenberg, E. Segrè Eds. Chicago: Acad. Naz. Lincei and Univ. Chicago Press, 1962 (Ферми Э. Научные труды. Т. 1: Пер. с англ./Под ред. Б. Понтекорво. М.: Наука, 1971).
2. Segrè E. Enrico Fermi. Physicist. Chicago: Univ. Chicago Press, 1970 (Серге Э. Энрико Ферми: Пер. с англ. М.: Мир, 1973).
3. Fermi L. Atoms in the Family. Chicago: Univ. Chicago Press, 1954 (Ферми Л. Атомы у нас дома: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1958).
4. Понтекорво Б. Энрико Ферми. — Природа, 1971, № 9, с. 90; № 10, с. 78.
5. Curie I., Joliot F. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1934, vol. 198, p. 254; Nature, 1934, vol. 133, p. 201.
6. Curie I., Joliot F. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1934, vol. 198, p. 559, J. phys. et radium, 1934, vol. 5, p. 153.
7. Rutherford E., Chadwick J., Ellis C.D. Radiation from Radioactive Substances. Cambridge: Univ. Press, 1930.
8. Rasetti F. Il Nucleo Atomico. Bologna: Zanichelli, 1936; Elements of Nuclear Physics. N.Y.: Prentice Hall, 1936 (Разетти Ф. Основы ядерной физики: Пер. с англ. М.—Л.: Гостехиздат, 1940).
9. Fermi E., Rasetti F. — Ricerca scient., 1933, vol. 4(2) p. 299 ([1], с. 5.15).
10. Fermi E. — Nature, 1930, vol. 125, p. 16 ([1], p. 328); Z. Phys., 1930, Bd 60, S. 320 ([1], с. 323); Fermi E., Segrè E. — Z. Phys., 1933, Bd 82, S. 11 ([1], с. 485).
11. Fermi E. — Nuovo cimento, 1934, vol. 11, p. 1 ([1], p. 599); Z. Phys., 1934, Bd 88, S. 161 ([1], с. 525).
12. Bothe W., Becker H. — Z. Phys., 1930, Bd 66, S. 289; Naturwissenschaften, 1932, Bd 20, S. 349; Z. Phys., 1932, Bd 76, S. 421; Bothe W. — In: Proc. of the Intern. Conf. Rome, 1931, p. 153.
13. Rasetti F. — Naturwissenschaften, 1932, Bd 20, S. 252.

* Это слово взято мной из романа Олдоса Хаксли "Прекрасный новый мир", где им называют гормональные таблетки, которые принимают люди в 2000 г., чтобы побороть скверное настроение.

14. Curie I., Joliot F. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1931, vol. 193, p. 1412; vol. 194, p. 273; Joliot F. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1931, vol. 193, p. 1415; J. phys. et radium, 1933, vol. 4, p. 21.
15. Curie I., Joliot F. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1932, vol. 194, p. 708.
16. Chadwick J. — Nature, 1932, vol. 129, p. 312; Proc. Roy. Soc., 1932, vol. 136, p. 692.
17. Rutherford E. — Philos. Mag., 1927, vol. 4, p. 580.
18. Chadwick J. — In: Actes X Congr. Intern. Histoire des Sciences. Vol. I (Ithaca. N.Y., 1962). Paris: Herman, 1964, p. 159 (перевод статьи Чадвика "Воспоминания о поисках нейтрона" помещен в наст. сб., с. 6).
19. Gentile G. — Rend. Accad. Lincei, 1928, vol. 7, p. 346.
20. Perrin F. — Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1932, vol. 195, p. 236; Heisenberg W. — In: Repts et discussions du 7 me Congr. de l'Inst. Intern. de Phys. Solvay, 1934, p. 289.
21. Iwanenko D. — Nature, 1932, vol. 129, p. 798.
22. Majorana E. — Z. Phys., 1932, Bd 82, S. 137; Ricerca scient., 1934, vol. 4(1), p. 599.
23. Heisenberg W. — Z. Phys., 1932, Bd 77, S. 1; Bd 78, S. 156; 1933, Bd 80, S. 587.
24. Fermi E. — Ricerca scient., 1934, vol. 5(1), p. 283 ([1], с. 601).
25. Noddack I. — Angew. Chem., 1934, vol. 47, p. 653.
26. Hahn O., Meitner L. — Naturwissenschaften, 1935, Bd 24, S. 158; Ber. Dtsch. Chem. Ges., 1936, Bd 69, S. 905; Meitner L. Kernphysik/Hrsg. E. Breitscher. Berlin, 1936, S. 24.
27. McMillan E., Abelson P.H. — Phys. Rev., 1940, vol. 57, p. 1185.
28. Mayer M. — Ibid., 1941, vol. 60, p. 84.
29. Fermi E. — Z. Phys., 1928, Bd 48, S. 73.
30. Chadwick J., Goldhaber M. — Nature, 1934, vol. 134, p. 237.
31. Fermi E., Amaldi E., D'Agostino O., Rasetti F., Segrè E. — Proc. Roy. Soc., 1934, vol. A 146, p. 483 ([1], с. 620).
32. Bjerger T., Westcott C.H. — Nature, 1934, vol. 134, p. 286.
33. Fermi E., Amaldi E., Pontecorvo B., Rasetti F. — Ricerca scient., 1934, vol. 5(2), p. 282 ([1], с. 689).
34. Moon P.B., Tillman J.R. — Nature, 1935, vol. 135, p. 904; Proc. Roy. Soc., 1936, vol. A 153, p. 476.
35. Amaldi E., D'Agostino O., Fermi E., Pontecorvo B., Rasetti F., Segrè E. — Proc. Roy. Soc., 1935, vol. A 149, p. 522 ([1], с. 643).
36. Dunning J.R., Pegram G.B., Fink G.A., Mitchell D.P. — Phys. Rev., 1935, vol. 48, p. 265.
37. Fermi E. — Nuovo cimento, 1934, vol. 11, p. 157 ([1], с. 611).
38. Amaldi E., Segrè E. — Nature, 1934, vol. 133, p. 141; Nuovo cimento, 1934, vol. 11, p. 145.
39. Amaldi E., D'Agostino O., Fermi E., Pontecorvo B., Segrè E. — Ricerca scient., 1935, vol. 6 (1), p. 581 ([1], с. 679).
40. Frisch P., Serensen E.T. — Nature, 1935, vol. 136, p. 258.
41. Dunning J., Pegram G.B., Fink G.A., Mitchell D.P., Segrè E. — Phys. Rev., 1935, vol. 48, p. 704.
42. Pontecorvo B., Wick G.C. — Ricerca scient., 1936, vol. 7(1), p. 134.
43. Bjerger T., Westcott C.H. — Proc. Roy. Soc., 1935, vol. A 150, p. 709.
44. Moon P.B., Tillman J.R. — Nature, 1935, v. 135, p. 904; vol. 136, p. 106.
45. Fermi E., Amaldi E. — Ricerca scient., 1935, vol. 6 (2), p. 344 ([1], с. 811).
46. Szilard L. — Nature, 1935, vol. 136, p. 951.
47. Amaldi E., Fermi E. — Ricerca scient., 1935, vol. 6 (2), p. 443 ([1], с. 816).
48. Amaldi E., Fermi E. — Ibid., 1936, vol. 7 (1), p. 56.
49. Amaldi E., Fermi E. — Ibid., p. 454 ([1], с. 841); vol. 50, p. 899 ([1], с. 691).
50. Von Halban H., Preiswerk P. — Nature, 1935, vol. 136, p. 951, 1027; Compt. rend. Acad. sci. Paris, 1936, vol. 202, p. 840.
51. Amaldi E., Fermi E. — Ricerca scient., 1936, vol. 7 (1), p. 223 ([1], с. 828); p. 393 ([1], с. 393).
52. Breit G., Wigner E. — Phys. Rev., 1936, vol. 49, p. 519.
53. Bohr N. — Nature, 1936, vol. 137, p. 344; Naturwissenschaften, 1936, Bd 24, S. 241 (Бор Н. Избранные научные труды. Т. 2: Пер. с англ. М.: Наука, 1971, с. 192).
54. Fermi E. — Ricerca scient., 1936, vol. 7 (2), p. 13 ([1], с. 741).
55. Amaldi E., Fermi E. — Ibid., vol. 7 (1), p. 310 ([1], p. 832).
56. Frish O.R., Placzek G. — Nature, 1936, vol. 137, p. 357.