1966 г. Март *Том 88, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

539.125

СТРУКТУРА НУКЛОНОВ*)

Л. Фолди

Стремление упорядочить эстетически приемлемым образом бесконечное разнообразие и сложность окружающего мира всегда было частью интеллектуальной жизни людей, начиная с античности. Наиболее естественным направлением и в античной философии, и в современной науке является стремление понять это разнообразие и сложность как следствия огромного числа возможностей при существовании небольшого количества фундаментальных первичных объектов, которые подчиняются определенным законам. Поиски этих фундаментальных объектов и точной формулировки законов, управляющих ими, по-прежнему являются одной из наиболее существенных задач современной физики.

СТРУКТУРА НУКЛОНА

В истории научных исследований был открыт аспект, который, по-видимому, не предвидели античные философы, предположившие впервые, что окружающий нас мир состоит из атомов. Новое заключается в том, что хорошо знакомые нам в повседневном опыте предметы и явления не представляют собой простой совокупности упорядоченно расположенных атомов. Прежде чем образовать предметы макромира, они объединяются в последовательный ряд упорядоченных структур со специфическими свойствами, в известной степени не зависящими от свойств как более сложных, так и более простых структур. Рассмотрим следующий пример. Солнечную систему можно объяснить, если считать ее непрерывно распределенной материей, которая характеризуется только плотностью и подчиняется ньютоновским законам движения и гравитации. На следующем этапе, где изучаются уже внутренние по отношению к солнечной системе, но еще макроскопические свойства материи, имеется, с одной стороны, описание ее упругих, тепловых, электрических и оптических свойств с помощью соответствующих параметров, с другой, — химическое разложение сложных веществ с различными физическими свойствами сначала на образующие их чистые химические соединения, а затем на отдельные химические элементы. Законы химического соединения элементов в свою очередь впервые указывают на справедливость концепции об атомистической структуре материи благодаря открытию того факта, что естественное объяснение наблюдаемых закономерностей можно получить, если считать, что элементарные атомы каждого элемента объеди-

*) L. L. Foldy, The Structure of Nucleons, Phys. Today 18 (9), 26 (1965). Перевод И. И. Ройзена.

В оригинале — резюме: «Обнаружение структуры протона и нейтрона открывает качественно новый этап на пути к более глубокому пониманию материального строения физического мира. Эта структура тесно связана с теперь уже твердо установленной структурой энергетических уровней атомов и ядер и лежит в основе последней».

няются химической связью согласно законам (на этом этапе неизвестной природы) химического сродства. Статистическая механика и кинетическая теория привели к дальнейшему подтверждению такой атомистической концепции, показав, как упругие, тепловые и другие физические свойства макроскопических объектов можно понять непосредственно на основе атомистической точки зрения.

Однако когда атомистическая структура макромира стала неопровержимой, обнаружилось, что сами атомы не являются неделимыми, а в действительности обладают внутренней структурой. Разгадка атомной структуры и ее роли в определении не известных ранее причин, по которым определенные элементы вступают в химические реакции, а также в определении параметров, описывающих внутренние свойства макроскопических объектов (сначала при изучении свойств электрона, протона и атомных ядер, а затем благодаря развитию квантовой механики), поставила вопрос об исследовании внутренней структуры самих ядер. Открытие нейтрона и позитрона является началом этого нового этапа в изучении строения материи. При этом обнаружилось нечто совершенно новое: ядерные силы, которые связывают нуклоны воедино, существенно отличаются от хорошо известных ранее гравитационных и электромагнитных сил, достаточных для объяснения строения атома и более сложных структур. Когда в 1937 г. Юкава предложил мезонную теорию ядерных сил как решение этой проблемы, возникла ситуация, рассматриваемая в данной статье. Стоит лишь предположить, что мезонная теория ядерных сил в основном правильна, как из законов квантовой механики будет однозначно следовать, что нейтрон и протон должны обладать некоторой внутренней структурой. Однако сначала необходимо остановиться на ряде других открытий, сделанных значительно позднее, но играющих важную роль в последующем изложении.

ОТКРЫТИЯ И РАЗМЫШЛЕНИЯ

В дираковской теории позитрона, фермиевской теории β-распада, включавшей тогда еще гипотетическое нейтрино, и юкавской теории ядерных сил имеется новая концепция, связанная с одним из аспектов теории относительности Эйнштейна. Она заключается в том, что частицы (исключая протон) могут возникать непосредственно при превращениях энергии и, следовательно, что по крайней мере часть обнаруженных частиц, излучаемых атомами (или, точнее, их ядрами), например позитроны, электроны и мезоны, не является в действительности неизменными составляющими атомов, а подобно фотонам возникает в процессе превращения энергии. Эта концепция очень существенна для описания происходящих явлений; в то время как атом, а также атомное ядро еще можно рассматривать (что является на известном этапе хорошей аппроксимацией) как состоящие из электронов, нейтронов и протонов в качестве неизменных компонент, на следующем этапе, затрагивающем внутреннюю структуру протонов и нейтронов, мы вынуждены допустить существование «виртуальных частиц», которые существуют только как носители взаимодействия. Они возникают и исчезают благодаря тому самому агенту, который осуществляет взаимодействие между частицами, и являются прямым следствием фундаментального явления квантомеханических флуктуаций, которые связаны с принципом неопределенности Гейзенберга. Это представляет радикальный пересмотр общепринятой и изучавшейся ранее концепции строения материи.

Необходимо отметить два важных события, которые имеют отношение к обсуждаемой теме. Первое — это открытие μ-мезона, который вначале

был принят за мезон, фигурирующий в теории ядерных сил Юкавы. Его значение заключается не в этой комичной ошибке, а в том, что он был первой частицей, которая, по-видимому, не оказывает существенного влияния на поведение макроскопических объектов. Электроны, позитроны и нейтроны необходимы для объяснения структуры макромира; фотоны и пионы (частицы, действительно фигурирующие в теории Юкавы) обеспечивают взаимодействие между ними; нейтрино, благодаря его роли в β-распаде, связано по крайней мере со стабильностью ряда элементов; позитроны, антипротоны и антинейтрино обеспечивают релятивистскую симметрию теории «необходимых» частиц, мюоны же, по-видимому, играют лишь второстепенную роль. Только их симметричное включение вместе с нейтрино и электронами в теорию слабых взаимодействий предполагает, что они не являются всего лишь досадным неудобством, а относятся существенным образом к природе вещей.

Второе событие — это открытие в последнее десятилетие множества новых сильно взаимодействующих частиц, которые живут короткое время и связь которых с макромиром в равной степени загадочна. Само число этих новых частиц и их включение в симметрийную систематику, вместе с хорошо известными протоном, нейтроном и пионом, с определенностью указывает, что мы стали называть элементарными частицами не обязательно только составляющие фундамент материи, и открывает новый этап в исследовании ее структуры. В настоящее время перед физикой стоит задача выяснить систематику в строении материи на новом уровне, так как открытие ее должно обогатить и углубить наше понимание структуры протона и нейтрона. Вместе с тем информация о структуре протона и нейтрона дает сведения о структуре множества новых частиц. Относительно этой новой ступени в понимании строения материи, если она существует, можно только догадываться. Однако соображения на этот счет, имеющиеся сейчас, представляют очень большой потенциальный интерес для обсуждаемых вопросов. Мы коснемся их ниже [1].

Итак, с обнаружением структуры протона и нейтрона открылась новая фаза в исследовании строения материи, тесно связанная с уже твердо установленной атомной и ядерной структурой и лежащая в ее основе. Протон и нейтрон являются двумя примерами изменяющихся объектов, которые тесно связаны и по установившейся терминологии обычно называются элементарными частицами. С этой точки зрения эти частицы не выделяются как радикально более простые, по сравнению с остальными объектами. Скорее всего, они выделены как наиболее доступные для экспериментального наблюдения. Мысль о том, что некоторый новый принцип может лежать в основе «элементарных частиц», связана со стремлением к большей экономии в числе действительно фундаментальных объектов, а также с указаниями теории симметрии о том, что такой фундаментальный структурный базис действительно возможен. Таким образом, когда экспериментальные результаты, полученные при исследовании нейтронов и протонов, станут в нужной степени надежными, их физическая интерпретация будет достаточна для пересмотра наших представлений. В настоящее время еще нельзя предсказать результаты такого пересмотра.

ЗНАЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ

Прежде всего остановимся на вопросе: что такое структура? Конечно, существует интуитивное представление об этом, однако когда мы имеем дело с чем-то совершенно новым, нельзя быть уверенным, что такое интуитивное представление окажется адекватным действительности. Проще

всего было бы понимать под структурой свойства, связанные с протяженностью в пространстве и времени. Это в известной степени оправдано, однако нельзя упускать из виду, что может существовать внутренняя структура совсем иной природы.

Внутренняя симметрия частиц, связанная, например, с изоспином или с инвариантностью относительно преобразований группы $SU(3)$, не относится к тому, что частица обладает пространственно-временно́й протяженностью. Постулат о том, что в некотором изоспиновом пространстве протону соответствует вектор изоспина, направленный «вверх», а нейтрону — вектор изоспина, направленный «вниз», является просто удобным представлением для их совместного описания. Однако в результате обнаружения, что ядерные силы не зависят от ориентации вектора изоспина, это представление приобретает определенный физический смысл, но оно не зависит от пространственно-временно́й структуры нуклонов. Тем не менее, забыв на время о существовании такой возможности, можно задать вопрос о существовании, скажем, пространственной протяженности нейтрона и протона. Если мы обнаружим, что эта протяженность действительно имеет место, возникает вопрос: какова ее природа, а именно — имеет ли она статический характер, отражая только «геометрическую форму» этих частиц, или же эта протяженность обусловлена внутренней динамикой? Другими словами, существуют ли у нуклонов внутренние степени свободы, в известном смысле аналогичные внутренним степеням свободы атомов и обусловленные тем, что атомы состоят из электронов? Если это имеет место, то нужно ожидать, что соответствующая система (например, нуклон) обладает рядом различных внутренних состояний, соответствующих различным внутренним конфигурациям. Другими словами, у нуклонов должны существовать возбужденные квантовые уровни. Можно задать вопрос о природе фундаментальных элементов, ответственных за такую динамику, о природе составных частей нуклона, а именно: являются ли они неизменными или же существуют только в качестве промежуточных частиц в том смысле, который придавался этому выше?

Когда поставлен такой четкий вопрос, возникают существенные принципиальные трудности в отыскании экспериментов, которые могут дать на этот вопрос четкий ответ. Рассмотрим простейший вопрос: обладают ли протон и нейтрон пространственной протяженностью?

В классической теории относительности есть теорема, согласно которой любая система, обладающая орбитальным моментом, не может иметь размер меньше некоторого минимального размера. Будучи использована в применении к нейтрону или протону, эта теорема указывает, что их минимальный размер должен быть порядка их комптоновской длины волны. Если добавить к этому законы квантовой механики, то возникают новые трудности. Представляется невозможным связать с квантовой системой релятивистски инвариантным образом представление о локализации, которое полностью соответствует локализуемости в классической механике. Существуют две (как минимум) концепции локализуемости, которые можно использовать. Одна — концепция Дирака об определении состояния частицы — неблагоприятна, так как в процессе измерения с целью установить локализуемость в предложенном Дираком смысле обязательно рождаются новые частицы и отдельная частица не может быть локализована. Другая — концепция Ньютона—Вигнера — испытывает трудность, заключающуюся в том, что частица, которая считается локализованной в точке в одной лоренцевой системе отсчета, перестает быть локализованной при переходе в другую систему. Двойственность этого способа описания состояния частицы приводит

к размытию положения частицы порядка ее комптоновской длины волны. Так как детальная структура элементарной частицы может сказаться только на расстояниях того же порядка, неизбежно возникает известная неопределенность в построении пространственно-временно́й картины этой структуры. Мы подчеркиваем, что эта трудность обусловлена самим понятием «состояние частицы»; каждый способ описания состояния частицы является внутренне непротиворечивым и может соответствующим образом служить для выражения физических результатов, и коль скоро эти результаты получены в рамках одного формализма, их без труда можно перевести на язык другого формализма.

Далее, возникает вопрос: в чем проявляется пространственная протяженность нуклона и одинаково или различно пространственное распределение различных характеристик, которые обусловлены этой протяженностью? Так, можно поставить вопрос о распределении плотности энергии внутри частицы (что в принципе, но пока еще не на практике, можно определить по поведению частицы в достаточно быстро меняющемся гравитационном поле) или о распределении электрического заряда и тока, которые можно определить по поведению частицы в электромагнитном поле, или о других плотностях, измерение которых связано с поведением частицы в иных «силовых полях». Конечно, с экспериментальной точки зрения мы заинтересованы в полном наборе характеризующих частицу плотностей, чтобы получить всестороннее описание ее структуры. Кроме того, было бы хорошо распространить понятие о соответствующих плотностях также и на «плотности перехода», которые связаны с изменением состояния или самой природы частицы, как, например, в случае перехода нейтрона в протон при β-распаде. На следующей ступени исследований начинают представлять интерес поляризационные эффекты, т. е. изменения распределений соответствующих внутренних плотностей, вызванных влиянием внешних сил, которые достаточно сильны, чтобы необходимо было принимать во внимание эффекты высших порядков.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА

Рассмотрим сначала плотность заряда и магнитного момента. Исторически первым указанием на то, что электромагнитная структура протона и нейтрона является более сложной, чем у электрона, был тот факт, что магнитные моменты этих частиц весьма существенно отличаются от величины, предсказываемой обычной теорией Дирака для частиц со спином $^1/_2$. В обычной теории Дирака заряженные частицы могут иметь только точечный заряд (при дираковском методе описания состояния частицы). Тем не менее у частицы при взаимодействии с электромагнитным полем обнаруживается магнитный момент и пространственное распределение заряда, что обусловлено характерными кинематическими чертами релятивистской квантовой теории, «дрожанием» электрона *). Это тесно связано с дуализмом понятия о положении частицы, который отмечался выше.

Даже в случае свободной частицы с импульсом, равным нулю, ее координата, определенная согласно Дираку, совершает сложное

*) Здесь идет речь о том, что в теории Дирака распространение электрона в пространстве можно описывать следующим образом: благодаря флуктуации вакуума вблизи электрона возникает электрон-позитронная пара, затем позитрон аннигилирует с присутствовавшим ранее электроном, а флуктуационный электрон остается; так как все электроны тождественны, это эквивалентно перемещению электрона в другую точку. (*Прим. перев.*)

беспорядочное движение по области с характерным размером порядка ее комптоновской длины волны, в результате чего возникает распределение заряда и тока по этой области. В методе Ньютона—Вигнера положение такой частицы неизменно, но нелокальный характер ее электромагнитного взаимодействия производит точно такое же распределение заряда и тока, как и в теории Дирака. При этом распределение плотности тока как раз таково, что возникает именно такой магнитный момент, который предписывается теорией Дирака. Поэтому можно считать, что отклонение магнитного момента от этой величины возникает благодаря определенным динамическим эффектам, отражающим более глубокую структуру частицы. Этот добавочный момент получил название аномального момента или момента Паули.

Естественным источником аномального момента протона и нейтрона является ядерное взаимодействие при условии, что оно описывается теорией Юкавы. Согласно этой теории ядерные силы, действующие между нуклонами, возникают в результате обмена квантами поля нового типа (мезонного поля), которые имеют отличную от нуля массу покоя. Частица, которой обмениваются нуклоны, может быть заряжена, что приводит к обменному характеру ядерных сил: нейтрон переходит в протон, излучая отрицательно заряженный мезон, который затем поглощается протоном, в результате чего он превращается в нейтрон. В этом процессе происходит обмен импульсом и зарядом между двумя частицами. Переданные мезоны являются «виртуальными частицами», так как они возникают в результате квантовых флуктуаций, которые нарушают связь между энергией и импульсом частицы на время, необходимое для обмена. Если добавить необходимую для восстановления этой связи энергию, мезоны станут «реальными». Однако те самые квантовые флуктуации, о которых шла речь выше, возможно, приводят к тому, что изолированный нейтрон, например, непрерывно распадается на протон и отрицательный мезон, которые снова объединяются в нейтрон. Точно так же изолированный протон распадается на нейтрон и положительный мезон, которые вновь объединяются в протон. Электромагнитная структура этих частиц будет в таком случае отражать распределение заряда и тока, которое связано с указанной виртуальной перестройкой. Так как доля времени, в течение которого нуклон пребывает в диссоциированном состоянии, зависит от силы взаимодействия и поскольку это взаимодействие должно быть достаточно сильным, чтобы соответствовать большим ядерным силам, можно ожидать, что у рассматриваемых частиц будет довольно большой аномальный момент, как это имеет место в действительности. Можно также ожидать, что заряд и ток, связанные с этими частицами, будут распределены по области пространства порядка комптоновской длины волны мезона, но даже эти полуколичественные предсказания могут измениться благодаря наличию сильного взаимодействия между мезонами.

Чтобы подтвердить такую картину электромагнитной структуры нуклонов, желательно подвергнуть проверке пространственные распределения заряда и тока, которые она предсказывает, и, в частности, показать, что эта картина отличается от ожидаемой на основе обычной теории Дирака. Для достижения этой цели естественно избрать путь, подобный использованному Резерфордом для описания распределения заряда в атоме, а именно изучить рассеяние заряженных частиц электромагнитным полем нуклонов. Первые попытки в этом направлении были предприняты в 1948 г. колумбийской группой во главе с Раби и чикагской группой во главе с Ферми, которые пытались обнаружить электростатическое взаимодействие между медленными нейтронами

и электронами. Были обнаружены некоторые признаки того, что такое взаимодействие существует, и затем проведена количественная обработка результатов. К сожалению, полученные таким путем доказательства не могли быть решающими, так как позднее было показано, что наблюдавшийся эффект может существовать и в случае точечного (но аномального) магнитного момента дираковской частицы: дополнительный электростатический эффект возникает в результате комбинированного действия этого момента и характерной кинематики, обусловленной «дрожанием» частицы. Таким образом, этот эксперимент не дал доказательства, что нейтрон обладает внутренним распределением заряда. Если бы даже внутри нейтрона существовало распределение тока, ответственное за его магнитный момент, то и тогда величина этого момента не могла бы дать информацию о пространственной протяженности этих токов. В действительности этот эксперимент показал, что квадрупольный момент в распределении плотности заряда внутри нейтрона очень мал, а не то, что плотность заряда в нейтроне тождественно равна нулю.

Естественным путем поисков дальнейшей информации о распределении заряда и тока с помощью резерфордовского способа является переход к методам, которые обеспечивают более высокую разрешающую способность. Ее можно добиться, если рассеивать заряженные частицы высокой энергии на нуклонах.

Если имеется определенное распределение заряда и тока, то амплитуда рассеяния с известной передачей импульса между этим распределением заряда и рассеянной частицей непосредственно определяет фурье-компоненту распределения для той длины волны, которая соответствует переданному импульсу. Чем больше энергия заряженных частиц, тем больше переданные импульсы и, следовательно, тем меньшие длины волн доступны, а потому тем детальнее можно изучить соответствующие распределения. Для непосредственной интерпретации результатов такого рассеяния необходима уверенность, во-первых, в том, что существенно только электромагнитное взаимодействие между заряженной пробной частицей и частицей, распределения заряда и токов внутри которой изучаются, и во-вторых, что сама пробная частица не обладает электромагнитной структурой или что по крайней мере ее электромагнитная структура известна. Кроме того, электромагнитное взаимодействие должно быть достаточно слабым, чтобы не были существенны эффекты высшего порядка (поляризуемость). Так как электромагнитное взаимодействие между пробной и изучаемой частицами всегда можно представить как обмен виртуальными фотонами, последнее условие эквивалентно требованию, чтобы преобладал процесс рассеяния, который сопровождается обменом одним фотоном. Это условие будет выполнено (во всяком случае, вплоть до достаточно высоких энергий), если использовать в качестве пробных частиц электроны и мюоны.

Создание линейного ускорителя электронов высокой энергии в Стэнфорде позволило, наконец, предпринять решительное наступление на эту проблему. В 1955 г. Хофштадтер с сотрудниками смогли непосредственно показать, что распределения заряда и тока в протоне действительно обладают пространственной протяженностью порядка 10^{-13} *см*. Они сумели сделать это, показав, что отношение измеренной амплитуды рассеяния электронов на протонах к амплитуде, которую следовало ожидать на основе уравнения Дирака для протона, несущего точечный заряд и точечный аномальный магнитный момент, быстро убывает с ростом переданного импульса. Это как раз тот эффект, который ожидался в случае протяженного распределения заряда и тока. Скорость убывания позволяет измерить истинные размеры этого распределения. Эти

и последующие эксперименты в Стэнфорде, вместе с более поздними экспериментами *) в Корнелле и на кэмбриджском (Массачусетс) электронном ускорителе, позволили количественно определить важные структурные функции протона вплоть до переданного импульса q порядка 2 *Гэв/с*. Эти структурные функции, которые обычно называют форм-факторами, являются, по существу, фурье-преобразованиями распределений заряда и магнитного момента в протоне. Упоминавшимся выше двум точкам зрения на описание состояния частицы (Дирака и Ньютона—Вигнера) соответствуют два способа представления форм-факторов. Форм-факторы, которые обозначаются через F_1 и F_2, представляют собой, грубо говоря,

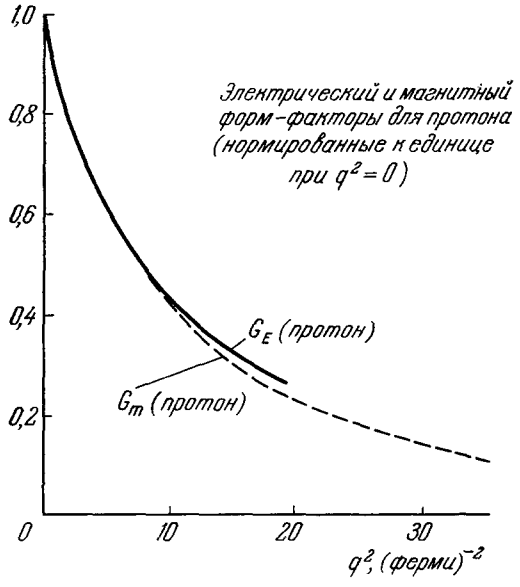

Рис. 1.

фурье-преобразования распределения заряда и магнитного момента соответственно при использовании дираковского способа описания состояния частицы, в то время как функции, обозначаемые через G_E и G_m, соответствуют картине Ньютона — Вигнера. Эти две пары функций связаны между собой простыми линейными уравнениями; зная одну пару, легко найти другую. Функции G непосредственно измеряются в эксперименте. На рис. 1 представлены графики этих функций для протона. Физический смысл полученного результата можно в основном сформулировать следующим образом:

1. Форма кривых соответствует пространственному распределению заряда и магнитного момента, которое, грубо говоря, имеет экспоненциальный характер с радиусом порядка $0{,}8\cdot10^{-13}$ *см*.

2. Размер и форма распределений заряда и магнитного момента весьма сходны.

3. То обстоятельство, что кривые, по-видимому, плавно стремятся к нулю, указывает на то, что не существует «твердой сердцевины» в распределении заряда и тока внутри протона, а наоборот, их плотность изменяется плавно.

---

*) См. перевод статьи Р. Хофштадтера в УФН 81 (1), 185 (1963) и указанную там литературу. (*Прим. ред.*)

Соответствующая информация о нейтроне не так удовлетворительна. Это является отражением того факта, что не существует мишени, состоящей из свободных нейтронов, на которой можно было бы рассеивать электроны. При использовании дейтронной мишени можно получить достаточно ясную информацию о магнитном форм-факторе G_m нейтрона, но информация об электрическом форм-факторе G_E при этом остается весьма неопределенной. Полученная таким образом информация о магнитном форм-факторе нейтрона с большой точностью совпадает с соответствующей информацией для протона. Значительно труднее сказать что-либо определенное об электрическом форм-факторе G_E. Результаты,

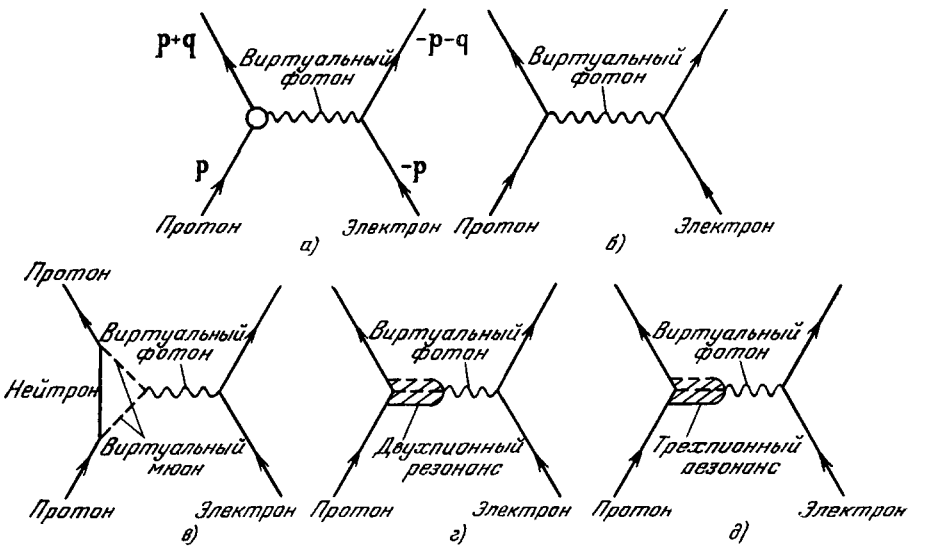

Рис. 2.

которые получены в различных лабораториях при рассеянии электронов, не согласуются друг с другом, и в некоторых случаях удается определить лишь G_E^2, так что даже знак G_E остается неизвестным. Тот факт, что полный электрический заряд нейтрона равен нулю, означает, что $G_E = 0$ при передаче импульса, равного нулю, в то время как эксперименты по рассеянию электронов на нейтронах при низкой энергии приводят к результату, что $G_E > 0$ при малых передачах импульса, причем соответствующая кривая имеет определенный наклон. Эту информацию о поведении G_E нейтрона при малом переданном импульсе трудно примирить даже с теми весьма неоднозначными результатами, которые получены при больших передачах импульса в опытах по рассеянию электронов на нейтронах при высокой энергии [2].

Вернемся теперь к вопросу о том, какой физический смысл имеют полученные результаты. На рис. 2, *а* представлена фейнмановская диаграмма для рассеяния электрона на протоне в системе их центра масс. Волнистой линией обозначен виртуальный фотон, которым обменялись электрон и протон. Он переносит импульс $\mathbf{q}$, в результате чего импульс протона изменяется с $\mathbf{p}$ на $\mathbf{p} + \mathbf{q}$. Он переносит также определенный момент количества движения и изоспин. Кружок в месте соединения линий виртуального фотона и протона соответствует той области пространства, в которой распределены заряд и ток внутри протона. Нас интересует структура именно этой области. Если бы у протона не было

структуры, то его следовало бы представить в виде простого точечного заряда, который поглощает фотон, как это показано на рис. 2, *б*. Если протон время от времени виртуально распадается на пион и нейтрон, в «кружок» добавляется вклад от диаграмм типа той, которая изображена на рис. 2, *в*, когда фотон поглощается виртуальным мезоном. Последний процесс уже отражает пространственную протяженность распределений заряда и тока внутри протона. Отметим, что диаграмма, изображенная на рис. 2, *в*, соответствует тому случаю, когда между двумя мезонами, в которые «превращается» фотон в процессе поглощения протоном, взаимодействие отсутствует. Расчет на примере простой модели такого типа показал, что она не в состоянии количественно описать наблюдаемые в эксперименте форм-факторы. Если, однако, эти мезоны сильно взаимодействуют между собой, что схематически изображено заштрихованной полосой на рис. 2, *г*, то оказывается возможным такое резонансное взаимодействие пионов друг с другом, что при «превращении» фотона в пару пионов предварительно возникает это резонансное состояние. Величина энергии, при которой возникает такое резонансное состояние, сильно влияет на быстроту убывания форм-факторов с ростом передаваемого импульса. Такой двухпионный резонанс вносит вклад в так называемую изовекторную часть форм-факторов. Это означает, что его вклад в форм-факторы протона и нейтрона одинаков по абсолютной величине, но противоположен по знаку. Вклад в изоскалярную часть, который полностью одинаков для протона и нейтрона, возникает от процессов такого типа, как это изображено на диаграмме рис. 2, *д*, где фотон превращается в три мезона. В этом случае взаимодействие между тремя мезонами, как это показано на диаграмме, также может привести к резонансному состоянию, вклад которого снова оказывается чрезвычайно существенным. Подробный анализ показал, что поведение форм-факторов, обнаруженное в эксперименте, можно хорошо описать, если существуют как двухмезонный, так и трехмезонный резонансы с энергией резонансного состояний порядка пяти мезонных масс. Это обстоятельство дало основание для предсказания мезонных резонансов, что получило непосредственное экспериментальное подтверждение после открытия векторных мезонов ϱ, ω и φ, первые два из которых имеют массу порядка 5,5 пионной массы, а третий — массу порядка 7,5 пионной массы. Чрезвычайно интересно разобрать вопрос о том, как показать количественно, что соответствующая экспериментальная информация действительно получит объяснение, если предположить, что существуют векторные мезоны (или резонансы), которые связывают фотонную и нуклонную линии, однако детальный анализ этого вопроса выходит за рамки настоящей статьи. Мы отметим только, что приведенный анализ является многообещающим и отсылаем читателя за подробностями к работе [2].

Обратимся теперь к более общему теоретическому рассмотрению вопроса о характере структуры нуклона. Это схематически изображено на рис. 3. Мы уже рассмотрели выше ряд процессов, которые вносят вклад в структуру вершины, в которой сходятся протонная и фотонная линии. Общий подход, в соответствии с дисперсионной теорией, показывает, что в форм-фактор нуклона вносит аддитивный вклад любое состояние, которое можно себе представить, если только возможен виртуальный переход фотона в это состояние, а затем поглощение нуклоном.

Помимо вклада от такого рода состояний, содержащих только мезоны, вклад в структуру могут давать состояния, состоящие из нуклон-антинуклонных пар или аналогичных пар странных частиц (гиперонов). (Продолжая это рассуждение, можно сказать, что они уже включены

в рассмотренный нами обмен векторными мезонами, так как благодаря квантовым флуктуациям, роль которых подчеркивалась выше, существует вероятность виртуального перехода этих мезонов в барион-антибарионную пару.) Характер каждого вклада зависит от массы системы, связывающей фотонную линию с нуклонной, и от силы, с которой эта система взаимодействует с частицами, которые она соединяет. Чтобы применить к рассматриваемой задаче дисперсионную теорию, необходимо предположить, что сила взаимодействия в среднем убывает с увеличением массы промежуточной системы и подавляющую роль играют вклады в форм-факторы от состояний с наименьшей массой, которая необходима

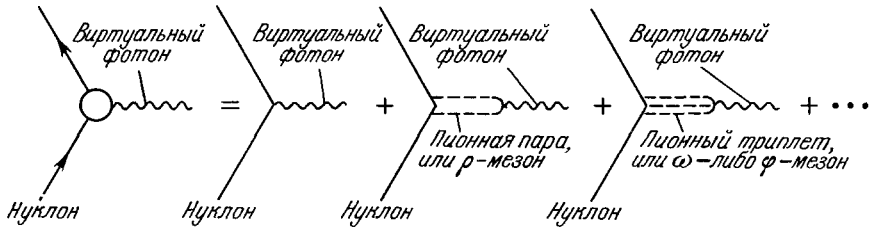

Рис. 3

для формирования «моста» между нуклоном и фотоном. Таким образом, векторные мезоны, которые упоминались выше, вносят наибольшие вклады. С этой точки зрения «внутренность» нуклона представляет собой сложную систему, образованную конфигурациями различных мезонов, мезонных комплексов, барионных пар, барионных резонансов и т. д., которые виртуально возникают и исчезают снова в результате квантовых флуктуаций; каждая конфигурация вносит известный вклад, большой или малый, в распределение заряда и тока внутри нуклона. Это сильно отличается от сравнительно простой картины, описывающей структуру атома, когда распределения заряда и тока связаны с неизменными и в высокой степени стабильными системами — электронами, протонами и нейтронами.

Прежде чем закончить разговор об электромагнитной структуре нуклона, укажем другой источник экспериментальной информации. Если посмотреть на диаграммы с иной точки зрения, то окажется, что они представляют другой физический процесс, а именно — аннигиляцию протон-антипротонной пары в виртуальный фотон, который затем распадается на электрон-позитронную пару. Отличие от рассеяния электрона на протоне состоит в том, что квадрат передаваемого 4-импульса (он является релятивистским инвариантом) в процессе аннигиляции должен быть отрицательным (вместо положительного при рассеянии). Амплитуду этого процесса можно также выразить с помощью описанных ранее форм-факторов, но теперь мы будем иметь дело с аналитическим продолжением этих функций в область отрицательных q^2, которые меньше чем $-4M^2$, где M — масса протона. Свойство аналитических функций—возможность определения их величины во всей комплексной плоскости при задании их в некоторой области изменения аргумента — означает, что такая информация также является полезной для определения характера распределения заряда и тока внутри протона. Эксперименты такого рода еще только начинаются, но, несомненно, они существенно обогатят нашу информацию об электромагнитной структуре нуклона. Рассеяние μ-мезонов и сверхтонкая структура атомного спектра водорода представляет собой еще один возможный источник информации.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ И СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Мы уже подчеркивали ранее, что представляют интерес также распределения других физических характеристик внутри нуклонов. Распределение плотности энергии (и импульса), в принципе, могут быть интересны, однако эта задача пока еще лежит далеко за пределами возможностей эксперимента. По аналогии с электромагнитным случаем, желательно для этого использовать рассеяние, при котором нуклон и пробная частица обмениваются единственным гравитационным квантом. К сожалению, видимо, не существует таких пробных частиц, для которых обмен квантами какого-либо другого рода не преобладал бы в процессе рассеяния, и даже если они существуют, то из-за слабости взаимодействия с ними возникает проблема их регистрации. Перспективы получения информации такого рода весьма сомнительны. Мы отметили здесь этот процесс только для иллюстрации общего принципа: распределения электрического заряда и тока влияют на испускание и поглощение электромагнитных квантов (фотонов) и могут быть исследованы путем изучения процессов, в которых происходит обмен одним фотоном, что уже обсуждалось выше; тензор плотности энергии-импульса является величиной, от которой зависит характер испускания и поглощения гравитационных волн; следовательно, его пространственное распределение можно изучать в процессах, где происходит обмен одним гравитационным квантом. Обобщая эту идею, мы приходим к выводу, что аналогичным образом можно изучать плотность распределения источников любого поля. Поэтому рассмотрим другие процессы, для которых возможна такая интерпретация.

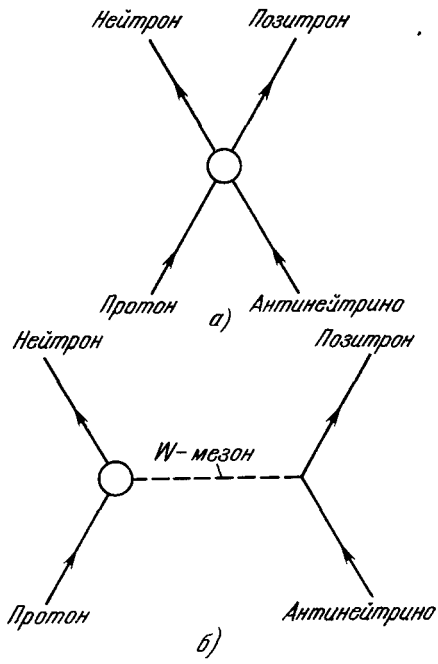

Рис. 4.

Легче всего добиться, чтобы в процессе рассеяния происходил обмен только одним-единственным квантом, когда взаимодействие, переносимое квантами поля, относительно мало́. При этом вспоминаются сразу же так называемые «слабые взаимодействия», которые ответственны за такие процессы, как β-распад, распад μ-мезонов, захват μ-мезонов и т. д. Рассмотрим в качестве примера процесс, показанный на рис. 4, *а*, при котором в результате взаимодействия антинейтрино с протоном возникают нейтрон и позитрон. Предполагается, что взаимодействие в действительности переносится векторным мезонным полем, как показано на рис. 4, *б*, но в настоящее время еще нет прямого доказательства, что это поле существует. Если такое мезонное поле существует, его кванты (так называемые *W*-мезоны) должны иметь массу существенно бо́льшую, чем масса протона. Независимо от того, существует оно или нет, в принципе можно представить себе взаимодействие, которое протекает так, как показано на рис. 4, *б*. *W*-мезон в этом случае служит для переноса импульса и электрического заряда между лептонами и нуклонами. Источниками и поглотителями этого мезонного поля будут «токи», которые

ном (только мезоны с изоспином, равным 1, могут вносить вклад в этот ток, так что ω- и φ-мезоны вклада не вносят). Следовательно, физическая картина, которая возникла бы в результате определения форм-факторов, не должна существенно отличаться от картины, описанной выше и обусловленной электромагнитной структурой.

СИЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрев электромагнитную, гравитационную и «слабую» структуры нуклона, мы должны обратиться теперь к единственному оставшемуся классу известных взаимодействий — так называемым сильным взаимодействиям. Здесь проблема усложняется тем обстоятельством, что эти взаимодействия настолько сильны, что трудно понять, как выделить вклады в процессы рассеяния или взаимодействия, которые обусловлены обменом одним квантом или частицей. Попытка какого-либо анализа становится возможной, если учесть, что радиус взаимодействия, обусловленного обменом частицей или группой частиц между взаимодействующими нуклонами, обратно пропорционален массе этой частицы или группы частиц. Таким образом, наибольший радиус взаимодействия обусловлен обменом наилегчайшей системой. В случае нуклон-нуклонного рассеяния такой наилегчайшей системой, обеспечивающей сильное взаимодействие, является, например, один пион; поэтому обмен одним π-мезоном должен преобладать во взаимодействиях с большим прицельным параметром. При несколько меньшем прицельном параметре может стать существенным обмен двумя π-мезонами. Наличие сильного взаимодействия между π-мезонами, которое приводит к возникновению резонансного состояния, называемого ρ-мезоном, означает, что вклад в двухмезонный обмен в основном вносит именно это состояние, что соответствует обмену одним ρ-мезоном. Так как масса последнего — порядка четырех масс π-мезона, существует определенный интервал прицельных параметров, при которых играет существенную роль только одномезонный обмен. Задача, таким образом, состоит в том, чтобы отделить соударения с большим прицельным параметром от соударений с малым прицельным параметром. В целом это означает, что нужно иметь возможность описывать сталкивающиеся частицы с помощью волновых пакетов, размер которых существенно меньше комптоновской длины волны π-мезона. Это в свою очередь приводит к необходимости изучать столкновения при достаточно высокой энергии. Но даже при высокой энергии осуществляются соударения и с большим, и с малым прицельным параметром. Чтобы выделить соударения с большим прицельным параметром, нужно сосредоточить внимание на тех соударениях, при которых относительный момент количества движения сталкивающихся частиц достаточно велик и они не могут при данной энергии находиться на малом расстоянии друг от друга. Если энергия достаточно велика, то в полную амплитуду рассеяния вносит вклад большое количество состояний с различными угловыми моментами и вклад от небольшого числа состояний с малыми угловыми моментами, за который ответственны соударения с малым прицельным параметром, сравнительно мал. В этом случае можно осуществить намеченную выше программу. Таким образом, можно эффективно изучать структуру поверхностной оболочки частиц, подобных нуклонам, за которую ответственны сильные взаимодействия. Эту оболочку можно назвать периферической, в связи с чем вообще процессы такого типа получили название периферических.

Рассмотрим сначала более подробно процесс упругого нуклон-нуклонного рассеяния, изображенный на рис. 5, *а*. Передача импульса при

связаны с лептоном, с одной стороны, и нуклоном, с другой. Если W-мезона нет, то осуществляется прямое взаимодействие между этими «слабыми токами», как их обычно называют, но мы можем с таким же успехом исследовать их структуру с помощью той же самой методики, которая могла бы применяться в случае существования W-мезона. Она оказывается очень похожей на методику, использованную в электромагнитном случае.

Мы должны выяснить, как амплитуда рассматриваемого процесса зависит от переданного в этом процессе импульса. Это можно сделать, используя соответствующие форм-факторы, которые были бы связаны с пространственным распределением «слабых токов» посредством преобразования Фурье.

Прежде всего отметим некоторую разницу между обсуждаемым и электромагнитным случаями. Во-первых, в данном случае имеет место перенос заряда, и нуклон, испуская W-мезон, должен изменить свой изоспин. Это означает в свою очередь, что соответствующий слабый ток имеет только изовекторную часть, в отличие от электромагнитного случая, когда существует также изоскалярная часть, или, говоря более осторожно, только изовекторная часть тока может играть роль в этом процессе. Далее, нам известно из различных данных, что существуют слабые взаимодействия двух основных типов — векторное и аксиальное. Это означает, что должны существовать слабые токи двух типов — векторный и аксиальный. Фейнман и Гелл-Манн предположили, что векторные токи являются сохраняющимися токами такого же вида, что и электромагнитный ток, и что они в действительности являются «заряженными компонентами» изовекторного тока, нейтральная компонента которого есть обыкновенный электромагнитный ток. Под заряженной и нейтральной компонентами понимаются здесь соответственно компоненты, которые связаны с изменением заряда нуклона или оставляют его неизменным. Эти предположения непосредственно подтверждаются экспериментами по β-распаду и по соотношению между β-распадом и распадом μ-мезонов. Правда, в этих экспериментах осуществляются только сравнительно малые передачи импульса между взаимодействующими нуклонами и лептонами. Если схема Фейнмана — Гелл-Манна действительно правильна, то форм-факторы, связанные со слабыми векторными токами, должны совпадать с электромагнитными форм-факторами и при больших передачах импульса. Всестороннее подтверждение этого было бы настоящим триумфом гипотезы Фейнмана — Гелл-Манна и означало бы, что в теории элементарных частиц существует только один векторный ток, который, хотя и с различной силой, связывает между собой все векторные поля. С другой стороны, у аксиальных векторных токов, которые также играют роль при слабом взаимодействии, нет электромагнитного аналога. Эти токи тоже можно описывать с помощью форм-факторов. Определение их зависимости от переданного импульса также представляло бы интерес. К сожалению, нейтринные эксперименты, которые до сих пор выполнены в Брукхейвене и ЦЕРНе, еще недостаточны для получения непосредственной информации об этой зависимости. Можно, однако, надеяться, что в будущем структура слабых токов в нуклонах будет изучена с помощью нейтринных пучков точно таким же образом, как электромагнитная структура была исследована с помощью электронов.

С теоретической точки зрения можно отметить далее, что если гипотеза Фейнмана — Гелл-Манна о слабом токе правильна и его распределение в пространстве соответствует распределению электромагнитного тока, это распределение будет обусловлено в первую очередь пионными парами, или, точнее, пионным резонансом, называемым ρ-мезоном, который играет роль «моста» между нуклоном и гипотетическим W-мезо-

таком рассеянии может происходить посредством обмена такими системами, как один π-мезон, один ρ-мезон и т. д. Мы хотим выделить одномезонный вклад, как это показано на рис. 5, *б*. Кружками в вершинах на этом рисунке обозначена структура или плотности источников, поглощающих или излучающих π-мезон из нуклона, чем определяется сила взаимодействия, соответствующая данной передаче импульса. Ее можно выразить с помощью форм-фактора в том же смысле, как и в электромагнитном случае, рассмотренном выше. Разница заключается в том, что при релятивистских преобразованиях функция, описывающая источник или ток, ведет себя не как вектор, а как псевдоскаляр, в связи с чем называется «псевдоскалярной». Если мы рассмотрим рассеяние при энергиях вплоть до нескольких сотен *Мэв*, то можно произвести фазовый анализ амплитуды рассеяния. Фазовые сдвиги при рассеянии с большим угловым моментом обусловлены в основном вкладом в силы от одномезонных обменов и, таким образом, дают известную информацию о периферической структуре. При этих энергиях, однако, мы можем определить также полную силу взаимодействия, т. е. форм-фактор при малых передачах импульса, который в случае пион-нуклонного взаимодействия обычно называют константой связи g. Она играет в процессах излучения и поглощения π-мезонов тукую же роль, как и заряд электрона e в процессах излучения и поглощения фотонов.

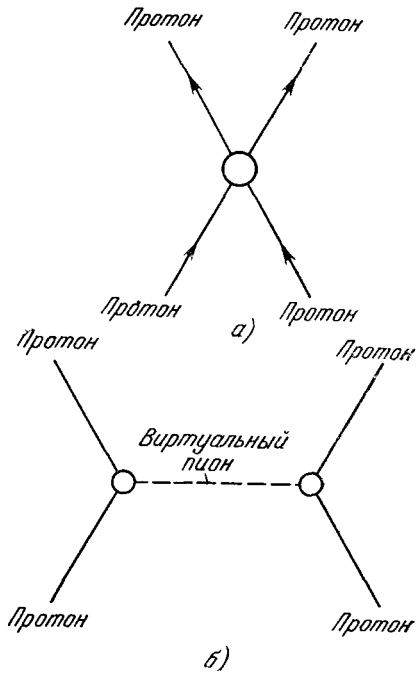

Рис. 5.

Чтобы получить какие-либо сведения о зависимости форм-фактора от величины переданного импульса, необходимо перейти к более высоким энергиям, при которых становятся возможными передачи большого импульса. При этом мы сталкиваемся с трудностью, которая уменьшает эффективность периферического рассмотрения для получения однозначных результатов. Эта трудность связана с существенной конкуренцией со стороны неупругих процессов (даже в случае периферических соударений) — процессов, которые сопровождаются рождением новых π-мезонов или странных частиц. Как только возникают такие неупругие процессы, они начинают оказывать влияние на упругое рассеяние, которое выражается уже в том, что у амплитуды упругого рассеяния появляется мнимая часть. Эта мнимая часть не может возникнуть в результате одномезонного обмена. Для ее описания необходимы обмены по крайней мере двумя мезонами. То обстоятельство, что мнимая часть амплитуды становится сравнимой с вещественной, является указанием на то, что основное предположение о периферичности взаимодействия больше не выполняется.

Задача становится несколько более определенной, если распространить понятие периферического взаимодействия на неупругие процессы, как это показано на рис. 6, где изображен процесс, при котором π-мезон в результате столкновения с нуклоном превращается в ρ-мезон. При этом

предполагается, что соответствующая этому процессу передача импульса осуществляется посредством обмена одним пионом. Однако в этом случае имеются две неизвестные структуры, характеристики которых, выраженные через форм-факторы, необходимо знать для определения амплитуды данного процесса. Вместе с тем влияние других неупругих процессов на этот конкретный процесс весьма существенно и приводит к уменьшению вероятности процесса. Таким образом, уменьшение сечения конкретного неупругого процесса при увеличении переданного импульса не обязательно свидетельствует об убывании форм-факторов, соответствующих двум вершинам, которые излучают и поглощают промежуточный π-мезон. Это уменьшение может явиться следствием изменения волновых функций налетающей и излученной частиц в результате поглощения, которое обусловлено конкурирующими неупругими процессами.

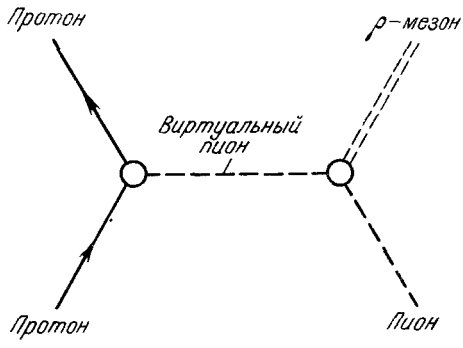

Рис. 6.

Периферический подход к взаимодействиям при высокой энергии серьезно увеличивает нашу информацию о диаграммах, которые играют существенную роль при протекании соответствующих процессов, но его принципиальная ограниченность выясняется, как только мы попробуем вычислить количественно какую-либо из неизвестных величин, например, зависимость от переданного импульса форм-фактора для поглощения или испускания π-мезона. Ясно, что существует глубокая аналогия между периферическим подходом в физике элементарных частиц и изучением процессов прямого взаимодействия в ядерной физике и большое сходство между характером и количественной обоснованностью выводов, которые можно сделать в этих двух случаях [3].

В итоге подчеркнем, что обсуждавшийся выше анализ структуры нуклона заключается в определении пространственного распределения функций источника для полей различных типов, которые взаимодействуют с нуклоном, или, в более общем виде, форм-факторов, которые характеризуют вершину, как это показано на рис. 7. Здесь двумя сплошными линиями обозначены приходящий и уходящий нуклоны (или, в более общем случае,— любой барион) «на массовой поверхности» (это означает, что связь между энергией и импульсом у этого бариона такая же, как и у свободной частицы). Приходящей в вершину пунктирной линией обозначен виртуальный квант некоторого поля, который передает барион соответствующую энергию и импульс вместе с зарядом, изоспином, странностью и т. д., определяемыми правилами отбора. Для каждого определенного набора квантовых чисел, характеризующих приходящий и уходящий барионы, зависимость соответствующей вершинной функции от квадрата переданного барону 4-импульса является форм-фактором, который следует интерпретировать как фурье-образ функции источника поля, с которым этот квант связан. Если таким виртуальным квантом является фотон, то мы уже сейчас прекрасно знаем эту функцию источника для нуклона, исключая распределение заряда в нейтроне. Для определения «слабых токов», которые служат источниками гипотетических W-мезонов, переносящих слабое взаимодействие, и функций источника в случае сильно взаимодействующих мезонных полей необходима еще большая экспериментальная и теоретическая работа, однако уже сейчас имеются

серьезные указания на возможность успешного выполнения этой программы.

С принципиальной точки зрения не так легко представить себе строение нуклона, который обладает такими форм-факторами. Вследствие квантовых флуктуаций следует представлять себе, что физический нуклон непрерывно проходит случайную последовательность виртуальных состояний, на которые он распадается. Эти состояния представляют собой различные конфигурации сильно взаимодействующих частиц, которые разрешены правилами отбора; каждая из таких конфигураций вносит свой вклад, большой или малый, в форм-факторы. Преходящий характер этих «виртуальных частиц» и их многообразие делают такую картину несравненно более сложной, чем сравнительно простая картина, которую представляет электронная структура атома.

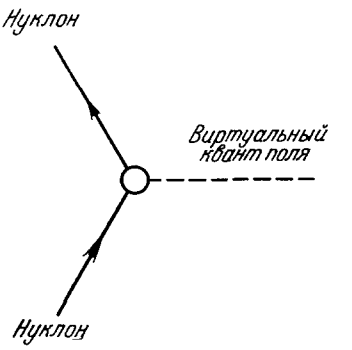

Рис 7

Рост числа частиц, которые мы начинаем называть элементарными: нуклоны, гипероны, барионные резонансы, мезоны и мезонные резонансы различного типа,— привел к возникновению вопроса, не лежит ли в их основе определенная динамическая структура, отражающая более глубокий уровень строения материи, на котором известные «элементарные частицы» окажутся состоящими из более простых объектов. Это мнение значительно окрепло благодаря недавнему открытию замечательных симметрий между этими частицами. Известная $SU(3)$-симметрия Гелл-Манна и Неемана позволяет сгруппировать нуклоны совместно с Σ- и Λ-частицами в октет частиц, которые взаимосвязаны друг с другом аналогично тому, как связаны между собой нейтрон и протон в ядерной физике. Десять барионных резонансов удалось подобным же образом сгруппировать в декуплет. Псевдоскалярные мезоны также можно сгруппировать в октет, а векторные мезоны образуют в рамках этой симметрии октет и синглет. Позднее была изучена симметрия $SU(6)$, которая позволила октет и декуплет барионов объединить в одну группу. Аналогичным образом удалось сгруппировать все перечисленные выше мезоны. При этом наиболее интригующим представляется то обстоятельство, что теоретико-групповая структура этих мультиплетов такова, что можно рассматривать известные барионы и барионные резонансы как различные комбинации, полученные из одного триплета (или нескольких) более фундаментальных частиц. Последние называют по-разному: кварки, тузы, фундаментальные триплеты и т. д. В этом случае частицы, входящие в элементарный триплет, были бы первичными носителями физических свойств, которые мы называем зарядом, барионным числом, изоспином, странностью, и имели бы полуцелый спин. Барионы, входящие в октет и декуплет, были бы композициями, составленными из трех таких базисных частиц, а их различие по изоспину, странности и спину возникло бы от различных сочетаний этих величин в соответствии с различными сочетаниями базисных частиц. Ситуация подобна той, которая имеет место при обычной пространственной симметрии. Мезоны, как векторные, так и псевдоскалярные, были бы аналогичным образом построены из частиц базисного триплета, связанных с античастицами, образующими такой же триплет.

Мы не можем здесь вдаваться в подробности этой схемы. Многое из того, что о ней известно, изложено в обзорах других авторов [1]. Уместно,

однако, обсудить, какой свет может пролить такой подход на вопрос о функциях источников или форм-факторах частиц, которые мы в настоящее время называем элементарными, включая нуклоны. Было показано, что распределение электромагнитных токов в точности согласуется с расчетом на основе схемы классификации частиц, о которой шла речь выше. Это согласие было достигнуто благодаря использованию свойств симметрии этой схемы. Такой же результат получается при учете свойств симметрии и для «слабых токов», а также для тех «сильных токов», которые являются источниками векторных мезонов. Это наводит на мысль, что структура перечисленных токов близка по характеру к суперпозиции токов, связанных по отдельности с каждой из базисных частиц триплета (но не обязательно в точности совпадает с ней). Если такая суперпозиция хотя бы приближенно действительно имеет место, то форм-факторы всех этих частиц могут быть связаны с собственными форм-факторами соответствующих базисных триплетов. Возможно, что такая простота слишком хороша, чтобы надеяться, что она действительно имеет место, но во всяком случае та связь между различными частицами, в основе которой лежит описанная выше симметрия, должна отразиться в виде соответствующих соотношений между их форм-факторами. Это могло бы уменьшить тот объем экспериментальной работы, которую необходимо проделать, чтобы получить всеобъемлющую картину структуры элементарных частиц.

Непосредственным примером плодотворности и значения идей о симметрии частиц является следующее обстоятельство: в предложенной схеме симметрии $SU(6)$ простейшее предположение о трансформационных свойствах электромагнитных токов приводит к величине отношения статических магнитных моментов нейтрона и протона, равной $-{}^2/_3$, которая подтверждается экспериментально с точностью до нескольких процентов. Из непосредственного обобщения этого предположения получается совпадение магнитных форм-факторов протона и нейтрона, что также соответствует опыту. Кроме того, предсказан момент Λ-частицы, который находится в соответствии с грубым экспериментальным значением, полученным к настоящему времени. Можно сделать также множество других предсказаний, касающихся различных форм-факторов членов барионного октета. Эти предсказания пока находятся за пределами возможностей экспериментальной проверки.

По-видимому, остается мало сомнений в том, что приближенные симметрии между элементарными частицами существуют и, вероятно, играют определенную роль. Выживет ли эта привлекательная схема, опирающаяся на базисные триплеты, которые лежат в основе приближенных симметрий, зависит, в частности, от того, будут ли эти триплеты обнаружены в действительности. Так как их массы довольно велики, возможно, что придется ждать появления новых ускорителей частиц высокой энергии, прежде чем мы сможем превратить эти теоретические догадки в неопровержимый экспериментальный факт, или, быть может, космические лучи сослужат нам снова такую же замечательную службу, как это было в прошлом.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. Gell-Mann, Physics Today, 22 (November 1964); G. F. Chew, M. Gell-Mann and A. H. Rosenfeld, Sci. Amer. **210**, 74 (1964) (см. перевод: УФН **83** (4), 585 (1964)); R. E. Cutkosky, Ann. Rev. Nucl. Sci. **14**, 175 (1964).
2. R. R. Wilson and J. S. Levinger, Ann. Rev. Nucl. Sci. **14**, 135 (1964).
3. J. D. Jackson, Revs. Mod. Phys. **37**, 484 (1965).