1976 г. Март *Том 118, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

ЕДИНЫЕ ТЕОРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ *)

С. Вайнберг

Для описания физических явлений в настоящее время в физике используют четыре различных вида взаимодействий или сил. В соответствии с новой теорией две, а, возможно, три, из этих сил имеют единое происхождение.

Одна из давних надежд человека — найти несколько простых общих законов, которые объясняли бы, почему природа со всей ее кажущейся сложностью и разнообразием такова, какова она есть. В настоящий момент ближайший путь, по которому мы можем прийти к единому взгляду на природу, — это описание ее с помощью элементарных частиц и их взаимодействий. Все обычное вещество состоит из элементарных частиц, которые обладают как массой, так и свойством (относительной) стабильности: из электронов, протонов, нейтронов. К ним надо добавить частицы с нулевой массой: фотон, или квант электромагнитного излучения, нейтрино, которое играет существенную роль в определенных видах радиоактивных распадов, и гравитон, или квант гравитационного излучения. (Гравитон взаимодействует с веществом настолько слабо, что нам не удается его наблюдать, но нет никаких серьезных причин сомневаться в его существовании.) Еще несколько короткоживущих частиц может быть найдено в космических лучах, а при соударениях искусственно ускоренных частиц мы наблюдаем огромное количество представителей даже более короткоживущих разновидностей (табл. I).

Хотя частицы различных сортов сильно отличаются по массе, временам жизни, зарядовым свойствам и другим характеристикам, всем им присущи отличительные черты, позволяющие назвать их «элементарными». Во-первых, насколько мы знаем, любые две частицы одного и того же сорта абсолютно идентичны, исключая их положение в пространстве и состояние движения, независимо от того, входят ли они в состав одного атома или лежат на противоположных концах Вселенной. Во-вторых, в настоящее время нет совершенной теории, которая объясняла бы элементарные частицы в терминах более элементарных составляющих в том смысле, в каком подразумевается, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов, а атом состоит из ядер и электронов. Правда, в некоторых аспектах элементарные частицы ведут себя так, как будто они состоят

*) Steven Weinberg, Unified Theories of Elementary-particle Interaction, Scientific American 231 (1), 50 (July 1974). Перевод Владимира М. Дубовика.

Стивен Вайнберг — профессор физики (фонда Хиггинса) в Гарвардском университете и старший научный сотрудник Смитсовской астрофизической обсерватории.

© Scientific American, Inc., 1974.

© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1976 г.

Таблица I

Перечень наблюдаемых элементарных частиц с временем жизни, превышающим 10^{-20} *сек*

(Исключая фотон, все наблюдаемые частицы разделяются на два обширных класса: лептоны и адроны. Лептоны либо вообще не имеют массы, либо имеют, но малые, и не принимают участие в «сильных» взаимодействиях. Адроны — более тяжелые частицы и взаимодействуют сильным образом. Далее адроны разделяются на мезоны и барионы в соответствии с их внутренними угловыми моментами вращения и другими свойствами. Символы частиц, несущие черту сверху, обозначают античастицы. Нейтрино и антинейтрино бывают двух типов: электронного типа ν_e и мюонного типа ν_μ. В трех случаях частицы являются и своими собственными античастицами — это фотон, нейтральный пион и эта-мезон. Заряды даны в единицах заряда электрона e, равного $1{,}602\cdot10^{-19}$ *к*, а массы — в энергетических единицах (1 миллион электрон-вольт (*Мэв*) равен $1{,}783\cdot10^{-27}$ *г*)

		Частица	Обозначение	Заряд	Масса, 10^6 *эв*	Время жизни, *сек*
		Фотон	γ	0	0	∞
Лептоны		Нейтрино	$\nu_e\bar{\nu}_e$	0	0	∞
			$\nu_\mu\bar{\nu}_\mu$	0	0	∞
		Электрон	$e^\pm$	$\pm e$	0,511	∞
		Мюон	$\mu^\pm$	$\pm e$	105,66	$2{,}199\cdot10^{-6}$
Адроны	мезоны	Пион	$\pi^\pm$	$\pm e$	139,57	$2{,}602\cdot10^{-8}$
			π^0	0	134,97	$0{,}84\cdot10^{-16}$
		Каон	$K^\pm$	$\pm e$	493,71	$1{,}237\cdot10^{-8}$
			K^0	0	497,71	$0{,}882\cdot10^{-10}$
		Эта-мезон	η	0	548,8	$2{,}50\cdot10^{-17}$
	Барионы	Протон	$p\bar{p}$	$\pm e$	938,259	∞
		Нейтрон	$n\bar{n}$	0	939,553	918
		Ламбда-гиперон	$\Lambda\bar{\Lambda}$	0	1115,59	$2{,}521\cdot10^{-10}$
		Сигма-гиперон	$\Sigma^+\bar{\Sigma}^+$	±0	1189,42	$8{,}00\cdot10^{-11}$
			$\Sigma^0\bar{\Sigma}^0$	0	1192,48	$<10^{-14}$
			$\Sigma^-\bar{\Sigma}^-$	$\pm e$	1197,34	$1{,}484\cdot10^{-10}$
		Каскадный гиперон	$\Xi^0\bar{\Xi}^0$	0	1314,7	$2{,}98\cdot10^{-10}$
			$\Xi^-\bar{\Xi}^-$	$\pm e$	1321,3	$1{,}672\cdot10^{-10}$
		Омега-гиперон	$\Omega^-\bar{\Omega}^-$	$\pm e$	1672	$1{,}3\cdot10^{-10}$

из еще более элементарных составляющих, называемых кварками, но, несмотря на множество усилий, пока не удается разбить частицы на кварки.

При всем ужасающем разнообразии элементарных частиц их взаимодействия друг с другом укладываются, оказывается, в четыре общих категории (табл. II). Наиболее известными из них являются гравитация и электромагнетизм, которые мы не ощущаем в обыденном мире из-за их дальнодействия. Гравитация удерживает нас на поверхности земли и планеты на их орбитах. Электромагнитные взаимодействия электронов с атомными ядрами ответственны за все известные химические и физические свойства обычных твердых тел, жидкостей и газов. Затем по степени изученности и по величине радиуса их проявления следуют «сильные»

Таблица II

Считается, что за счет четырех типов взаимодействий происходят все физические явления «Радиус» — это расстояние, за которым взаимодействие практически исчезает. В двух случаях считается, что радиус бесконечен. «Напряженность» есть безразмерное число, характеризующее напряженность данного вида сил в типичных условиях (при энергиях) современного эксперимента. Поэтому напряженность гравитационных сил примерно на 39 порядков слабее, чем напряженность сильных

	Гравитационное	Электромагнитное	Сильное	Слабое
Интервал	∞	∞	$10^{-13}-10^{-14}$ *см*	$\ll 10^{-14}$ *см*
Примеры	Астрономические силы	Атомные силы	Ядерные силы	Ядерный β-распад
Сила (естественные единицы)	$G_{\text{Ньютон}} = 5{,}9\cdot 10^{-39}$	$e^2 = \frac{1}{137}$	$g^2 \approx 1$	$G_{\text{Ферми}} = 1{,}02\cdot 10^{-5}$
Взаимодействующие частицы	Любые	Заряженные частицы	Адроны	Адроны, лептоны
Переносчики взаимодействий	Гравитоны	Фотоны	Адроны	?

взаимодействия, которые удерживают протоны и нейтроны в атомных ядрах. Радиус сильных взаимодействий ограничен расстояниями примерно 10^{-13} *см*, так что они совершенно неощутимы в повседневной жизни и даже в масштабе атома (10^{-8} *см*). И в конце назовем наименее изученные «слабые» взаимодействия. Они обладают настолько коротким радиусом действия (менее 10^{-15} *см*) и так слабы, что, по-видимому, не играют никакой роли для образования каких-либо связанных состояний частиц. Они скорее проявляются в определенных видах столкновений или в процессах распада, которые по каким-то причинам не могут идти за счет сильных, электромагнитных или гравитационных взаимодействий. Однако слабые взаимодействия все же причастны к жизни человечества. За счет них происходит первый шаг в цикле термоядерных реакций на Солнце, шаг, в котором сплавляются два протона, образуя ядро дейтерия, позитрон и нейтрино.

Из этого краткого очерка можно видеть, что какая-то степень общности в описании мира выработана. И все же мы стоим перед ужасной проблемой объяснения непонятного разнообразия типов элементарных частиц и их взаимодействий. Наши надежды на дальнейший прогресс были бы совершенно напрасными, если бы не указания, которые мы получили от двух великих достижений физики XX века: развития квантовой теории поля и понимания фундаментальной роли принципов симметрии.

НЕОБХОДИМОСТЬ ПОЛЕЙ

Квантовая теория поля была создана в конце 20-х годов в результате объединения специальной теории относительности и квантовой механики. Легко видеть, как естественно теория относительности приводит к концепции поля. Если частица испытывает резкий толчок, то не создается каких-либо мгновенных изменений сил (гравитационных, электромагнитных, сильных или слабых), действующих на соседнюю частицу, так как, согласно теории относительности, никакой сигнал не может распространяться со скоростью большей, чем скорость света. В соответствии с законами сохранения энергии и импульса, справедливыми в каждый данный момент, мы говорим, что частица, испытавшая толчок, создает поле, которое переносит энергию и импульс через окружающее простран-

ство и при возможности передает часть их соседней частице. Если понятия квантовой механики применить к полю, мы поймем, что энергия и импульс должны передаваться дискретными частями или квантами, отождествляемыми с элементарными частицами. Таким образом, теория относительности и квантовая механика естественным образом ведут к математическому формализму квантовой теории поля, в котором взаимодействия элементарных частиц объясняются обменами самими элементарными частицами.

Далее, простое следствие принципа неопределенности в квантовой механике (который утверждает, что неточности нашего одновременного знания импульса и координаты частицы обратно пропорциональны друг другу) состоит в том, что радиус действия силы должен быть обратно пропорционален массе частицы обмена. (При обмениваемой массе, равной массе протона, радиус взаимодействия равен $2 \cdot 10^{-14}$ *см.*) Таким образом, электромагнетизм и гравитация, обладающие, как нам представляется, бесконечным радиусом действия, существуют за счет обмена частицами с нулевой массой: хорошо известным фотоном и гипотетическим гравитоном. Считается, что сильные взаимодействия, вообще говоря, возникают в результате обмена большим числом сильновзаимодействующих частиц, включая протоны, нейтроны, мезоны и гипероны различных сортов. Так как слабые взаимодействия имеют меньший радиус, чем сильные взаимодействия, они должны возникать в результате обменов намного более тяжелыми частицами, вероятно, настолько тяжелыми, что они еще не могут рождаться на существующих ускорителях.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ВЕКТОРНЫЙ БОЗОН

В течение многих лет делались предположения, что, возможно, существует глубокая связь между слабыми и электромагнитными взаимодействиями, а различие в их наблюдаемых напряженностях возникает просто за счет большой массы частицы, обмен которой создает слабые взаимодействия. Эта гипотеза поддерживается тем наблюдением, что угловой момент, который переносится в слабых процессах, подобных ядерному бета-распаду (рис. 1), имеет то же самое значение, что и угловой момент фотона (равный константе Планка: $1{,}0546 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*). В действительности гипотетическая частица, или квант обмена, в слабых взаимодействиях имеет длинное название: промежуточный векторный бозон. (Термин «векторный» используется потому, что любая частица с таким угловым моментом обычно описывается полем, которое является четырехмерным вектором, подобно вектор-потенциалу, используемому для описания фотона в теории электромагнетизма Дж. Максвелла. Термин бозон относится к целому классу частиц, чьи угловые моменты являются целыми числами, умноженными на постоянную Планка.)

Предположим, что истинная сила взаимодействия гипотетического промежуточного векторного бозона, которым обмениваются в слабых взаимодействиях, та же самая, что и у фотона. Тогда слабые взаимодействия будут проявляться с такой же силой, как и электромагнитные, на малых расстояниях и будут лишь казаться более слабыми из-за их меньшего радиуса действия. Эффект ослабления в любом конкретном процессе возникает за счет коэффициента, представляющего собой квадрат отношения типичной из масс, участвующих в процессе, к массе промежуточного бозона. Для процесса, который характеризуется массами, сравнимыми с массой протона, напряженность слабых взаимодействий, грубо говоря, в тысячу раз меньше, чем напряженность электромагнитных. Следовательно, извлекая квадратный корень из этого отношения, находим,

что масса промежуточного векторного бозона, грубо говоря, составляет 30 масс протона. Применяя закон сохранения заряда к таким процессам, как ядерный бета-распад, мы видим также, что промежуточный векторный бозон должен переносить либо положительный, либо отрицательный электрический заряд, равный по величине заряду протона или электрона.

Квантовая теория поля подсказывает нам, как вычислить вероятность какого-либо процесса в виде суммы отдельных процессов, каждый из которых символизируется фейнмановской диаграммой, подобной тем, какими

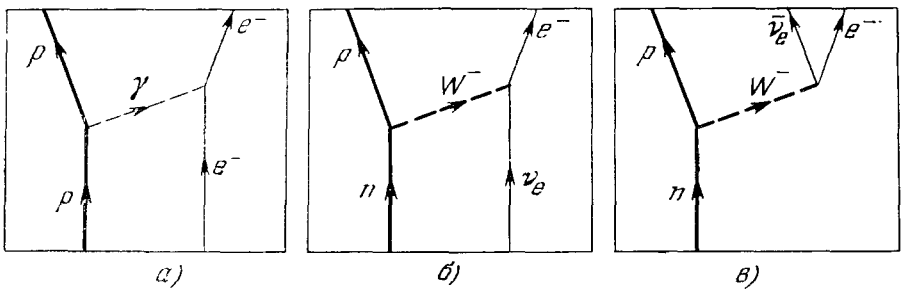

Рис. 1. Электромагнитные и слабые процессы демонстрируют удивительное сходство, когда они изображаются в виде фейнмановских диаграмм.

Такие диаграммы символизируют взаимодействия, которые лежат в основе субъядерных явлений, например столкновения между двумя частицами, рассматриваемые физиками как события рассеяния. Так, на диаграмме рис. *а*) изображено электромагнитное рассеяние электрона протоном, которое происходит за счет обмена фотоном, переносящим энергию и импульс от одной частицы к другой. Поскольку на приведенных диаграммах принято, что время течет вверх, фотон на рис. *а*) распространяется от протона к электрону. Подразумевается, однако, что эта диаграмма включает и другой столь же важный случай, когда фотон распространяется в противоположном направлении по траектории: из нижней точки на правой линии вверх к левой линии. Именно эта черта — объединение различных процессов в единственном графике — и определяет важное значение «языка» фейнмановских диаграмм. Рассеяние нейтрино нейтроном (рис. *б*) происходит за счет слабого взаимодействия, в котором, по-видимому, тяжелая частица, хотя она и не детектируется, промежуточный векторный бозон $W^{\pm}$ играет роль, аналогичную роли фотона при электромагнитном рассеянии. В данном случае *W-частице приписывается отрицательный заряд*, так как предполагается, что она распространяется справа налево. Полагают, что промежуточный векторный бозон служит переносчиком взаимодействия и при радиоактивном распаде нейтрона на протон, электрон и антинейтрино (рис. *в*). Заметим, что диаграмма рис. *б*) может быть получена из диаграммы рис. *а*) простой заменой некоторых частиц другими с отличными зарядами. Диаграмма рис. *в*) может быть получена из диаграммы рис. *б*) заменой входящего нейтрино выходящим антинейтрино. Заметим также, что полный заряд на диаграммах сохраняется в каждой вершине.

мы пользуемся везде в этой статье. Этот весьма полезный метод рассмотрения наблюдаемых субъядерных реакций был введен примерно 25 лет назад Р. Фейнманом. С помощью этого метода была решена трудная проблема, которую не могли преодолеть в квантовой теории поля почти с момента ее возникновения, проблема расходимостей. В 1930 г. было найдено, что вклады процессов, более сложных, чем одночастичный обмен, обычно оказываются бесконечно большими. Действительно, электростатическое отталкивание внутри одного электрона приводит к бесконечно большой собственной энергии, что проявляется всякий раз, когда фотон излучается, а затем поглощается тем же самым электроном (рис. 2, *а*). Эти бесконечности возникают только в фейнмановских диаграммах с петлями, и они могут быть связаны с бесконечным числом путей, по которым могут перетекать энергия и импульс по петле от одной частицы к другой. В данном случае, как и всегда, когда в науке возникает парадокс, проблема расходимостей является и злом и благом: злом, потому что она препятствует вычислениям, которые нам хотелось бы выполнить, и благом, потому что, когда решение проблемы найдено, оно оказывается справедливым только для ограниченного класса теорий, среди которых есть надежда найти истинную теорию.

По-видимому, именно так обстоит дело с проблемой расходимостей. В конце 40-х годов группа молодых теоретиков, работавших независимо (Фейнман, бывший тогда в Корнеллском университете, Ю. Швингер из Гарвардского университета, Ф. Дайсон из Института высших исследований (США) и С. Томонага в Японии), нашла, что в некотором ограниченном классе полевых теорий расходимости появляются только как перенормировки или поправки к фундаментальным параметрам теории (таким, как массы и заряды); поэтому они могут быть исключены, если перенормированные параметры идентифицировать с измеряемыми, которые приводятся в таблицах фундаментальных постоянных. Например, измеряемая масса электрона — это сумма его «голой» массы и массы, связанной с его собственной электромагнитной энергией. Для того чтобы его измеряемая масса была конечной, голая масса должна равняться отрицательной бесконечности, которая сокращается с положительной бесконечностью в собственной энергии. Один простой вариант полевой теории электромагнитных взаимодействий оказался не только перенормируемым (в том смысле, что все бесконечности в этой теории исключаются перенормировкой массы и заряда электрона), но и позволил выполнить электродинамические вычисления, согласие которых с экспериментом беспрецедентно в физике. Так, теория предсказывает, что значение магнитного момента электрона (в естественных единицах) равно 1,001 159 655 3, в то время как наблюдаемое значение есть 1,001 159 657 7. Неточность обеих цифр начинается с девятого знака: ±0,000 000 030.

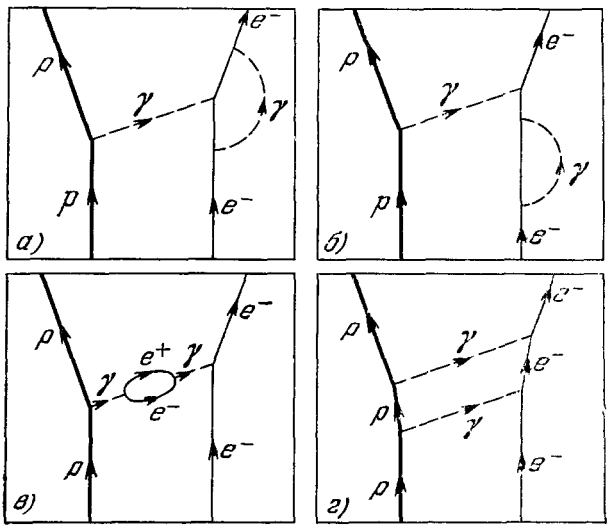

Рис. 2. Вклады старших порядков в вероятности рассеяния не удавалось вычислить, когда, например, фотон излучается, а затем поглощается тем же самым электроном (рис. *а*, *б*) или когда фотон превращается в электрон-позитронную пару, которая впоследствии снова рекомбинирует в фотон (рис. *в*). Когда физики видят «петли» такого вида в фейнмановских диаграммах, они готовятся к встрече с бесконечностями при попытках вычислить вероятности реакций. Так, для диаграммы рис. *б*) электростатическое отталкивание внутри электрона проявляется как бесконечная собственная энергия. В конце 40-х годов было найдено, что бесконечности могут быть устранены путем переопределения массы и заряда электрона — процесса, называемого перенормировкой. Проблем с расходимостями, однако, не возникает в таких случаях рассеяния, как изображенный на рис. *г*) где петля включает четыре вершины или более.

БОЛЕЕ ТРУДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ С РАСХОДИМОСТЯМИ

Несмотря на эти ошеломляющие успехи, попытки построить перенормируемые теории поля другими взаимодействиями элементарных частиц долго оставались безуспешными. Для сильных взаимодействий дело было скорее не в отсутствии ренормируемых теорий, беда была в том (и она все еще остается), что большая напряженность сильного взаимодействия портит любую простую схему приближений, которая предлагается для получения следствий из данной теории поля с целью последующего

сравнения с экспериментом. (Грубо говоря, вероятность обмена набором сильно взаимодействующих частиц при высокоэнергетическом столкновении не зависит от числа обмениваемых частиц, так что надо учитывать сколь угодно сложные обмены даже в низшем приближении.)

Для гравитационных взаимодействий у нас есть хорошо известная теория поля — общая теория относительности Эйнштейна, которая прекрасно объясняет явления в масштабах солнечной системы, но, по-видимому, неперенормируема, а потому, вероятно, нуждается в модификации для описания явлений на очень малых расстояниях. Проблема здесь противоположна той, с которой мы сталкиваемся в сильных взаимодействиях: гравитационные эффекты настолько малы, что мы не можем получить никаких указаний от эксперимента для построения правильной теории при настоящем уровне точности измерений.

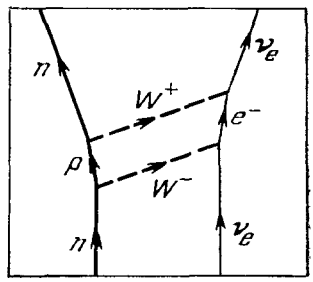

Рис. 3. Проблема с расходимостями возникает при вычислении вероятности рассеяния нейтрино на нейтронах за счет последовательного (гипотетического) обмена двумя промежуточными векторными бозонами W^- и W^+.

Первый обмен превращает нейтрон в протон и нейтрино в электрон. Второй обмен восстанавливает первоначальную ситуацию. Заметим, что фейнмановская диаграмма этого нейтрон-нейтринного события имеет тот же самый вид, что и диаграмма рис. 2, *г* для, которой проблем с расходимостями не возникает. Недавние работы авторы этой статьи показывают, что расходимости можно устранить и для диаграмм с промежуточным векторным бозоном.

В слабых взаимодействиях ситуация промежуточная: они достаточно сильны для получения хороших экспериментальных данных (хотя не столь хороших, как в случае сильных взаимодействий) и все же настолько слабы, что приближенные вычисления практически полезны. Хотя слабые взаимодействия сходны с электромагнитными взаимодействиями, теория слабых взаимодействий в том виде, в каком она существовала несколько лет назад, оказывалась неперенормируемой. Говоря точнее, обмен парами промежуточных векторных бозонов в таких процессах, как рассеяние нейтрино на нейтроне (рис. 3), приводит к расходимостям, которые нельзя скомпенсировать путем перенормировки параметров теории. Следовательно, хотя квантовая теория поля с промежуточными векторными бозонами дает идеально хорошую приближенную картину наблюдаемых слабых взаимодействий, теория портится, как только мы выходим за рамки простейшего приближения.

В чем же состоит различие между фотоном и промежуточными векторными бозонами, которое приводит к столь сильному ухудшению ситуации с расходимостями в последнем случае? Детальный анализ позволяет установить, что различие опять-таки в том, что масса фотона равна нулю, в то время как промежуточные векторные бозоны обладают инертными массами. Подобно всем другим частицам с нулевой массой фотон может существовать в виде суперпозиции не более чем двух чистых состояний, характеризующихся левой или правой циркулярными поляризациями, при которых ось вращения вектора поляризации направлена по или против направления движения фотона соответственно. Промежуточный векторный бозон подобен любой другой массивной частице с угловым моментом, равным постоянной Планка, а потому может существовать в любом из трех состояний, характеризующихся направлением оси вращения по движению, против движения и направлением, перпендикулярным к направлению движения. Именно обмен промежуточными векторными бозонами, оси вращения которых перпендикулярны к направлению движения, приводит к неперенормируемым расходимостям.

ТИПЫ СИММЕТРИИ

Прежде чем увидеть, как можно решить рассматриваемую проблему, мы должны сначала обсудить вопрос о том, какую роль в теоретической физике играют принципы симметрии Рассмотрение симметрий всегда играло важную роль в науке, но приобрэло особое значение с появлением квантовой механики. Дело в том, что уровни энергии или массы любой квантовомеханической системы, отвечающие какому-то принципу симметрии, вообще говоря, объединяются в хорошо определенные и легко различающиеся семейства. (На математическом языке говорят, что совокупность всех математических преобразований поля, которые оставляют форму полевых уравнений неизменной, образуют «группу», а уровни с данной энергией или массой образуют представления этой группы).

Нрпример, квантовомеханические уравнения, описывающие атом водорода, подчиняются принципу симметрии, гласящему, что все пространственные направления эквивалентны. В результате уровни энергии водорода образуют семейства с нечетным числом членов (1, 3, 5 и т. д.), причем внутри каждого семейства уровни энергии различаются направлениями осей вращения (рис. 4). Если посмотреть на таблицу масс элементарных частиц, мы найдем аналогичные разбиения на семейства: протон и нейтрон имеют почти равные массы, три сигма-гиперона (Σ^+, Σ^0, Σ^-) также имеют приблизительно одинаковые массы и т. д. На этом основании считают, что полевые уравнения в физике элементарных частиц должны обладать (изотопической) симметрией, аналогичной симметрии относительно вращений и отличающейся от нее лишь тем, что новые «вращения» изменяют значения зарядов частиц, а не их пространственные ориентации.

В начале 1960 г. было также осознано, что различные пары частиц, триплеты и т. д. группируются в более широкие семейства — сверхсемейства из 8, 10 и более членов, которые соответствуют приближенной симметрии, более широкой, нежели изотопическая (см. пример на рис. 5).

Все эти принципы симметрии требуют, чтобы полевые уравнения не изменялись, когда мы выполняем определенные «вращения» по некоторой классифицирующей характеристике семейства или суперсемейства частиц одновременно во всем пространстве. Можно представить себе еще более ограничительное требование: уравнения не должны изменяться, когда мы выполняем такие вращения в каждой точке пространства и времени независимо.

Первый частный вид операции симметрии сравним с неким заданным и одинаковым поворотом каждого яблока в корзине от принятой ими ориентации в пространстве к другой. Второй более общий вид операции симметрии можно сопоставить с поворотом по отдельности каждого яблока в корзине к различным новым ориентациям. Инвариантность относительно операции симметрии второго типа известна как калибровочная симметрия.

С давних пор известно, что полевые уравнения электромагнетизма Максвелла подчиняются калибровочной симметрии, основанной на группе вращений в двух, а не в трех направлениях. Логика может быть и обратной: предполагая этот принцип калибровочной симметрии, можно вывести все законы электромагнетизма, включая уравнения Максвелла и тот факт, что масса фотона равна нулю. Трудно придумать какой-либо лучший пример мощи принципа симметрии в физике.

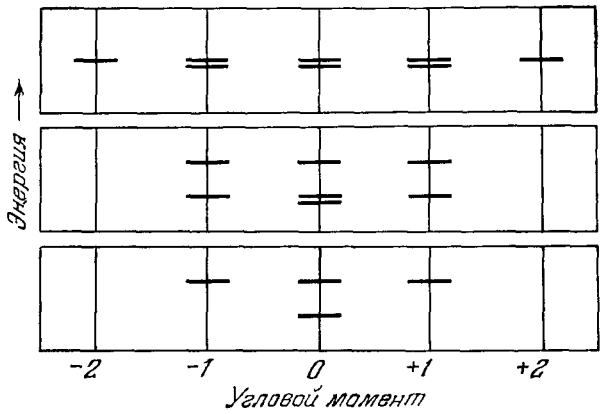

Рис. 4. Принципы симметрии требуют, чтобы энергетические уровни атома, подобного водородному, чьи уровни изображены здесь, объединялись в строго определенные семейства.

Каждое квантовое состояние атома водорода обозначается короткой чертой. Значение энергии указывается на схеме вертикальным положением черты (разрывы между прямоугольниками — это энергетические щели). Значение угловых моментов вдоль некоторого фиксированного направления (в единицах постоянной Планка) указывается горизонтальным положением черты. Точные равенства энергий внутри различных триплетов, квинтетов и т. д. являются следствием симметрии относительно трехмерных вращений уравнений, которые описывают атом, в то время как приближенное равенство энергий внутри различных более широких семейств диктуется более тонкими особенностями динамики, такими, как слабость магнитных взаимодействий протона и электрона, малые значения заряда электрона, и падением электростатического притяжения как квадрата расстояния

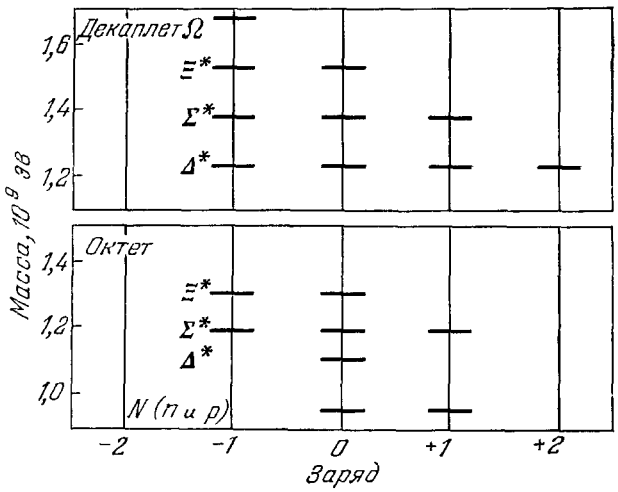

Рис. 5. Считают, что объединение элементарных частиц в семейства есть следствие принципа симметрии, известного как изоспиновая симметрия, аналогичная симметрии относительно трехмерных вращений, порождающей семейства квантовых состояний внутри атома водорода.

Группировка этих семейств элементарных частиц в сверхсемейства (октеты, декаплеты и т. д.) была предположена независимо в начале 60-х годов М. Гелл-Манном и Ю. Нееманом. На этом рисунке вертикальное положение черты показывает массу частицы. Горизонтальное положение указывает значения электрических зарядов в единицах заряда протона. Даже внутри семейства массы частиц слегка отличны, но эти разности слишком малы, чтобы их можно было показать в принятом нами масштабе. Частицы со звездочками являются короткоживущими состояниями, они отсутствуют в табл. I.

КАЖУЩЕЕСЯ И ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ

Наши надежды отыскать соответствие в природе слабых и электромагнитных взаимодействий приводят нас естественным образом к предположению, что может существовать какая-то более широкая калибровочная симметрия, вследствие которой фотон и промежуточный векторный бозон попадают в одно семейство. (Фактически построение математической теории обобщенных калибровочных симметрий было начато Ч. Янгом и Р. Миллсом, которые тогда работали в Брукхейвенской национальной

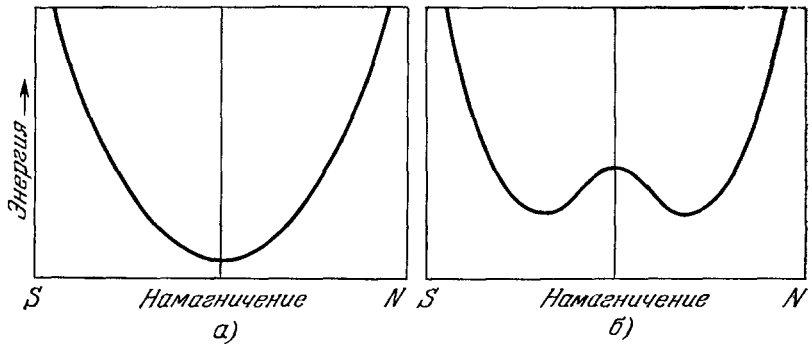

Рис. 6. Пример «нарушенной» симметрии наглядно виден из сравнения двух кривых, которые изображают зависимость свободной энергии от намагничения для линейного магнита при высокой температуре (*а*) и при низкой температуре (*б*).

Магнит, естественно, стремится перейти в состояние с наименьшей свободной энергией. При высокой температуре это — состояние с нулевой намагниченностью, которое обладает идеальной симметрией относительно севера и юга. При низкой температуре состояние равновесия сдвигается к одному из ненулевых состояний намагниченности, которое может быть либо северным, либо южным, несмотря на то, что кривая свободной энергии все же идеально симметрична относительно выбора севера или юга. В этом случае физики говорят, что симметрия спонтанно нарушена. В модели, предложенной автором данной статьи, объединение электромагнитных и слабых взаимодействий происходит за счет подобного нарушения.

лаборатории.) Однако чтобы это было возможным, промежуточный векторный бозон, подобно фотону, должен иметь нулевую массу, но, как мы уже видели, его масса в действительности должна быть много большей, чем у любой известной частицы. Какие родственные связи могут быть у столь различных частиц?

Ответ на этот вопрос можно найти, если различать действительное от кажущегося. В силу того, что принципы симметрии определяют форму полевых уравнений, эти принципы следует рассматривать, вообще говоря, как информацию о законах природы на самом глубоком из возможных уровней. Мыслимо ли, чтобы принцип симметрии был справедлив на таком уровне и все же не проявлялся на уровне масс и других наблюдаемых свойств физических частиц? Известное явление ферромагнетизма служит примером, как такое может случиться.

Уравнения, которым подчиняются электроны и ядра железа в данном куске железа, обладают свойством симметрии относительно вращения. Поэтому свободная энергия этого куска не меняется в зависимости от того, сделан ли данный конец куска северным полюсом или южным в результате намагничения. При высоких температурах кривая зависимости энергии от намагничения имеет простую U-образную форму, которая симметрична относительно вращения так же, как и соответствующее уравнение (рис. 6, *а*). Состояние равновесия — состояние с наименьшей энергией в нижней точке U-образной кривой — является состоянием с нулевой намагниченностью, которое сохраняет эту симметрию. С другой стороны,

когда температура понижается, эта нижайшая точка кривой намагничения выгибается и кривая становится похожей на W со скругленными углами. Кривая все еще сохраняет ту же самую симметрию относительно вращения, что и соответствующие уравнения, но равновесное состояние теперь имеет определенную ненулевую намагниченность, которая может быть либо северной, либо южной и уже не обладает той же симметрией, что и уравнение. В таких случаях мы говорим, что симметрия спонтанно нарушена. Крошечный физик, живущий внутри магнита, мог бы и не знать, что уравнения системы обладают соответствующей симметрией относительно вращений, хотя мы с нашим более широким кругозором видим, что это легко заметить. Проводя аналогию далее, легко понять, что принцип симметрии мог бы таким же образом быть совершенно справедливым в фундаментальном смысле и все же вообще не проявляться в таблице масс элементарных частиц.

Первым предложенным примером нарушенной симметрии такого вида для элементарных частиц была калибровочно неинвариантная теория, известная под названием киральнo симметричной. (Термин «киральная» происходит от греческого слова «рука» и используется здесь, потому что в этой теории имеется симметрия относительно вращений полей с правосторонними и левосторонними поляризациями. Эта симметрия включает в себя и ненарушенную трехмерную группу вращений в изотопическом пространстве.) Киральные симметрии привели к большому успеху в предсказании свойств низкоэнергетических пионов, но обсуждение этих вопросов увело бы нас слишком далеко от рассматриваемых здесь.

НОВЫЕ ТЕОРИИ И ПРЕДСКАЗАНИЯ

В 1967 г. автором данной статьи было высказано предположение, что в слабых и электромагнитных взаимодействиях заложена группа нарушенной калибровочной симметрии. (Подобное предположение высказал независимо от автора несколькими месяцами позже А. Салам из Интернационального центра теоретической физики в Триесте.) Предложенная группа содержит ненарушенную группу калибровочной симметрии электромагнетизма и, следовательно, требует равенства нулю массы фотона, другие члены семейства фотона связаны с нарушенными симметриями и получают большие массы в результате нарушения симметрии. В простейшем варианте этой теории родственниками фотона были бы заряженный промежуточный векторный бозон (издавна обозначаемый как W-частица) с массой, большей чем 39,8 массы протона, и дополнительный нейтральный векторный бозон (названный автором частицей Z) с массой, большей чем 79,6 массы протона. (Теория такого типа более сходна со сверхпроводимостью, чем с ферромагнетизмом. В сверхпроводнике электромагнитная калибровочная симметрия нарушена и сам фотон приобретает массу, что проявляется в том, что магнитное поле может проникать в сверхпроводник только на короткое расстояние. Введение таким способом масс у векторных бозонов в физике частиц называется механизмом Хиггса, поскольку этот механизм стал впервые известен из работы 1964 г., опубликованной П. Хиггсом из Эдинбургского университета.)

В то время, когда автор предложил эту теорию, не было никаких экспериментальных данных за или против нее и никаких прямых указаний, как их получить. Существовал, однако, путь внутренней проверки теории, которая могла быть сделана без эксперимента. Мы видели, что бесконечности в квантовой теории электромагнетизма могут быть устранены перенормировкой, в то время как этого нельзя сделать в существующей теории слабых взаимодействий, в которой промежуточный векторный

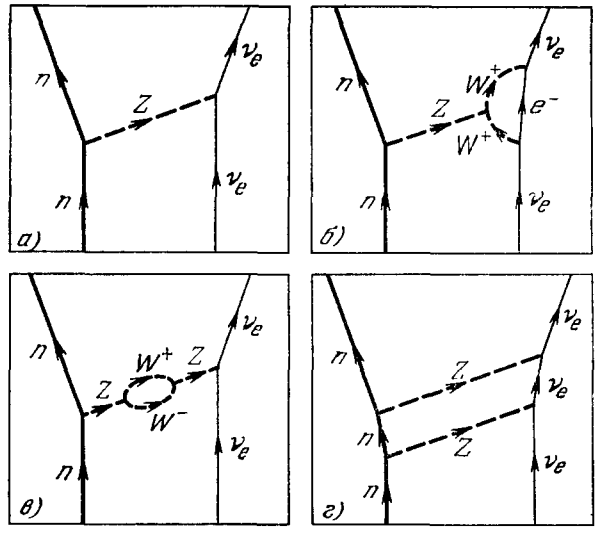

Рис. 7. Решения проблемы расходимостей при вычислении вероятностей рассеяния нейтрино на нейтронах можно, видимо, достичь, если постулировать существование частицы Z — нейтрального промежуточного векторного бозона.

Такая частица предсказывается единой теорией слабых и электромагнитных взаимодействий, предложенной автором. Частица Z приводила бы к различным событиям рассеяния нейтрино, подобно изображенным на данных диаграммах. Если такие процессы добавить к тем, что включают заряженный промежуточный векторный бозон $W^{\pm}$, то расходимости, появляющиеся в сумме вкладов в полную интенсивность, которая соответствует всем диаграммам, могут быть компенсированы за счет параметров перенормировки новой теории.

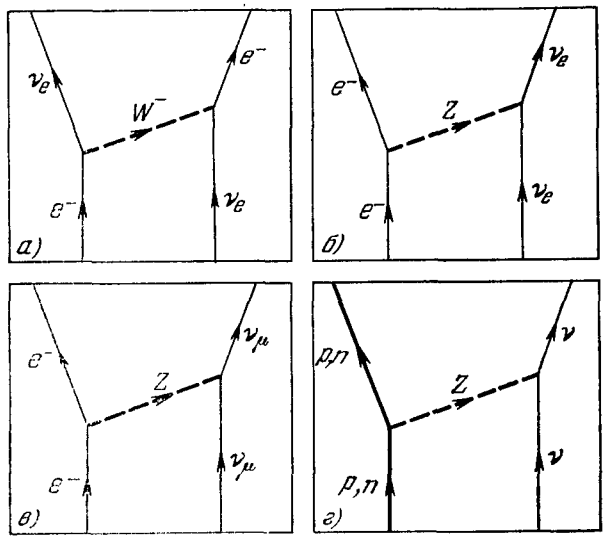

Рис. 8. Существует ли частица Z, можно выяснить, изучая взаимодействия нейтрино с электронами или с протонами и нейтронами.

Рассеяние нейтрино электронного типа ν_e электронами может происходить за счет обмена либо заряженными промежуточным бозоном $W^{\pm}$ (рис. *а*), либо нейтральным промежуточным бозоном Z (рис. *б*). Следовательно, этот процесс можно использовать для обнаружения частицы Z только в том случае, если вероятность процесса очень точно определить экспериментально и затем сравнить с теорией. Напротив, рассеяние мюонного нейтрино ν_μ электронами (рис. *в*) или нейтрино любого типа протонами и нейтронами (рис. *г*) может идти только за счет обмена частицей Z и, следовательно, дает сведения о новом виде слабого взаимодействия. Эти взаимодействия приводят к процессам с нейтральными токами, подобным тому, что виден на снимке, сделанно в пузырьковой камере Аргоннской национальной лаборатории (см. рис. 9, *в*).

бозон имеет массу. Тогда можно задать вопрос: становится ли теория поля перенормируемой, когда промежуточные векторные бозоны принадлежат тому же семейству, что и фотон, и приобретают массы только благодаря спонтанному нарушению калибровочной симметрии? Автор предположил в 1967 г., что так и обстоит дело в данном случае, но перенормируемость теории не была им продемонстрирована; четыре года спустя это впервые показал Г. 't Хуфт, тогда аспирант университета в Утрехте. (После этого доказательство было выполнено более строго многими теоретиками, в частности Б. Ли, Дж. Зинн-Джостеном, М. Вельтманом и самим Г. 't Хуфтом.) Оказывается, что различные многочастичные обмены, включающие фотоны, заряженные промежуточные векторные бозоны, нейтральные промежуточные векторные бозоны и другие частицы, суммируются таким образом, что все перенормируемые бесконечности взаимно сокращаются (рис. 7).

После того как перенормируемость теории была установлена, стало ясно, что долгожданная цель — построение единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий,— вероятно, уже достигнута. Тогда крайне важно проверить теорию на эксперименте. Непосредственное рождение промежуточных векторных бозонов было бы лучшей проверкой теории, но, кроме того, следует искать эффекты, вызываемые теоретически предсказанным нейтральным промежуточным векторным бозоном, новой частицей, которая должна появляться в том же самом семействе, что и фотон и заряженные промежуточные векторные бозоны. Нейтральный бозон не дает вклада в такие процессы, как бета-распад, в котором заряд должен быть перенесен от ядра к излучаемой частице. Однако этот бозон должен давать вклад, наравне с заряженными бозонами, в такие процессы, как рассеяние «обычных» нейтрино электронами (рис. 8, *а*, *б*), и существенно изменять их интенсивности. Наконец, имеются такие процессы, как упругое рассеяние «мюонного» нейтрино электронами и упругое рассеяние нейтрино протонами или нейтронами (рис. 8, *в*, *г*), которые могут идти только за счет обменов нейтральными промежуточными векторными бозонами.

В течение нескольких лет эти процессы с нейтральными токами (так они называются) оставались на грани наблюдаемого, и многие физики сомневались в их существовании. Однако в 1973 г., наконец, были получены первые данные по нейтральным токам. Всеевропейское сотрудничество (включающее 55 исследователей из семи институтов), которое проводит свои работы в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) в Женеве, нашло два случая, в которых мюонные антинейтрино были рассеяны электроном, и несколько сотен случаев, в которых эти антинейтрино рассеивались протонами и нейтронами. Случаи такого рассеяния могут быть, очевидно, объяснены только в предположении обменов нейтральным промежуточным векторным бозоном, или Z-частицей, и являются, следовательно, прямыми данными по новому виду слабого взаимодействия. Более того, найденная в эксперименте вероятность столкновения хорошо согласуется с вероятностью, предсказываемой новой теорией. Американское объединение, работающее в Национальной лаборатории ускорителей в Батавии (штат Иллинойс), и другая группа, работающая в Аргоннской национальной лаборатории, видимо, также наблюдали события с нейтральными токами (рис. 9). Готовятся дальнейшие эксперименты по детектированию нейтральных токов в различных лабораториях Западной Европы, США и СССР.

И все же существование нейтральных токов с полной определенностью не установлено, а общая идея перенормируемой единой теории поля, основанная на спонтанно нарушенной калибровочной симметрии, в общем не имеет абсолютной зависимости от вопроса о существовании нейтральных

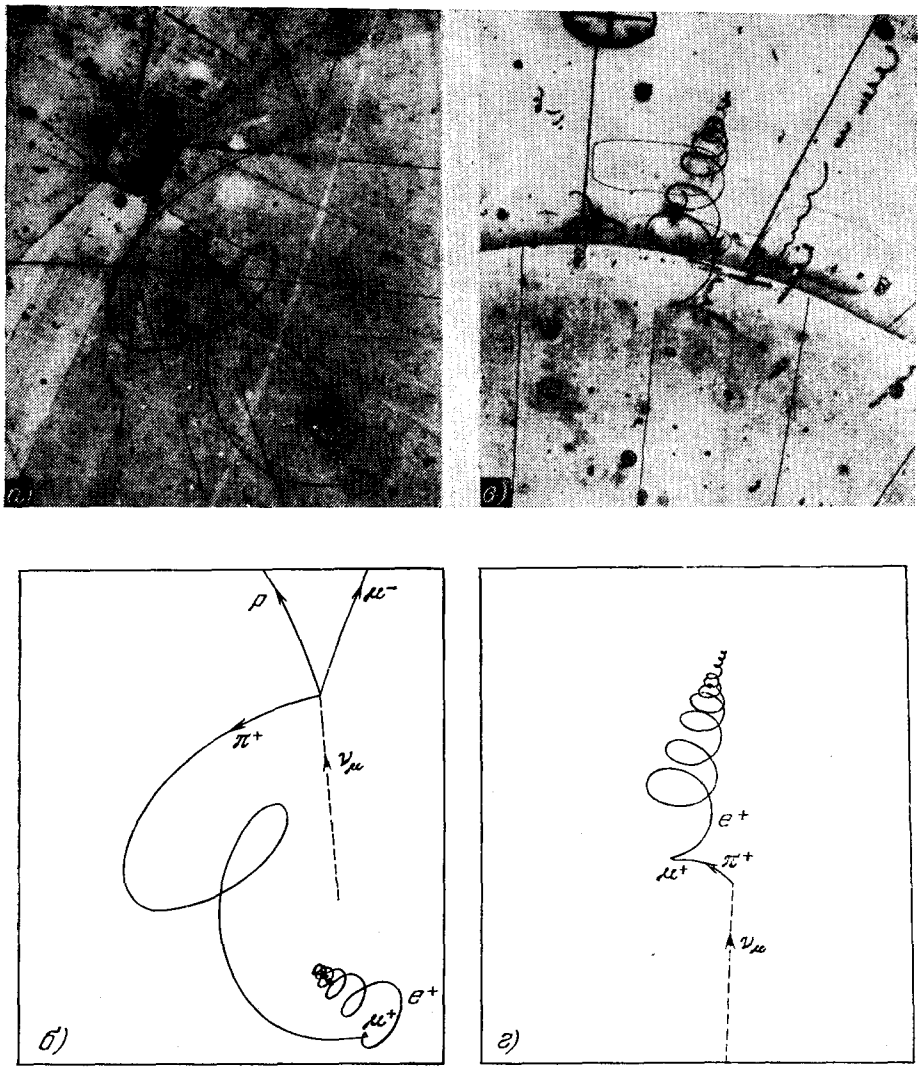

Рис. 9. Данные по нейтральным токам, существование которых могло бы быть поддержано теориями, объединяющими электромагнитные и слабые взаимодействия, были получены в 1973 г. в эксперименте, проведенном Аргоннской национальной лабораторией на синхротроне с полем нулевого градиента с помощью нейтринного пучка, падающего на 12-футовую пузырьковую камеру, заполненную жидким водородом. Фотография рис. *а*), полученная на этой камере и соответствующая процессу на фотографии схема рис. *б*), приведены как пример хорошо известных процессов с заряженными токами ($\nu_\mu + p \longrightarrow \mu^- + p + \pi^+$), в которых единичный электрический заряд переносится между лептонами ($\nu_\mu \mu^-$) и другими частицами. Фотография рис. *в*), и ее схема рис. *г*) дают пример процесса с нейтральными токами ($\nu_\mu + \mu \longrightarrow \nu_\mu + n + \pi^+$), отличающегося отсутствием треков выходящего отрицательного мюона μ^- или протона p. На таких фотографиях следы оставляют только заряженные частицы, так что входящее нейтрино ν_μ и выходящее нейтрино и нейтрон n в процессах с нейтральными токами невидимы. Кроме того, пузырьковая камера помещается в сильное магнитное поле, которое закручивает траектории заряженных частиц — по часовой стрелке отрицательно заряженных частиц и против часовой — положительных. На обеих фотографиях видно, что положительный пион π^+ распадается на положительный мюон μ^+, который распадается на положительный электрон e^+, наблюдаемый как слабо сжатая спираль. Этот эксперимент выполнен после аналогичных экспериментов, проведенных в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) и в Национальной лаборатории ускорителей. В нем получены первые данные по специфической реакции с нейтральными токами: $\nu_\mu + p \longrightarrow \nu_\mu + n + \pi^+$ и $\nu_\mu + p \longrightarrow \nu_\mu + p + \pi^0$.

токов. Например, в модели, предложенной Г. Джорджи и Ш. Глэшоу из Гарвардского университета, фотон и заряженный промежуточный векторный бозон вместе образуют одно семейство сами по себе, хотя это упрощение достигнуто ценой введения новых частиц других видов (теперь имеется множество различных остроумных моделей, предложенных многими теоретиками, и все их трудно перечислить). Нет, однако, никаких сомнений в том, что, по-видимому, открытые нейтральные слабые токи с воодушевлением встречены теоретиками, работающими над квантовой теорией поля.

О НЕКОТОРЫХ ДАЛЬНЕЙШИХ СЛЕДСТВИЯХ

В то самое время, когда экспериментаторы работали над проверкой следствий единых теорий слабых и электромагнитных полей, теоретики обнаружили, что эти теории позволяют по-новому взглянуть на ряд стоящих перед ними проблем. Например, одна из них связана с динамикой гигантских ядерных взрывов звезд, называемых сверхновыми. Считают, что сверхновая — это некоторый момент в эволюции очень массивной звезды, когда ядро звезды становится нестабильным и начинает уплотняться, коллапсировать. Долго оставалось загадкой, как такое сжатие может пойти в обратном направлении и привести к взрыву и как звезда теряет достаточное количество внешних слоев, чтобы достигнуть той стабильности, какой обладает нейтронная звезда, имеющая всего 10 или 20 *км* в диаметре. (Наблюдено, что по крайней мере два пульсара, которые считаются быстро вращающимися нейтронными звездами, окружены остатками бывших сверхновых.)

В 1966 г. С. Колгейт и Р. Уайт из Института горного дела и технологии в Нью-Мехико выдвинули предположение, что внешние слои взрывающейся звезды могут быть отброшены давлением нейтрино, рождающихся в горючем ядре звезды. Однако тщательные вычисления, проведенные Д. Вильсоном из Лоуренсовской лаборатории в Ливерморе в Калифорнийском университете, который использовал существующие теории слабых взаимодействий, не поддержали этого предположения. Недавно Д. Фридман из Нью-Йоркского государственного университета в Стони Брук указал, что нейтральные токи могут давать «когерентные» нейтринные взаимодействия, в которых нейтрино могут взаимодействовать со всем ядром в целом, а не с отдельными нейтронами и протонами. Это приводит к заметно более сильному взаимодействию между нейтрино и относительно тяжелыми ядрами, главным образом ядрами железа во внешних слоях ядра звезды. Согласно позднейшим вычислениям Вильсона, возрастающего давления нейтрино, по-видимому, достаточно, чтобы создать сверхновую.

Другая старая проблема, которая может быть решена при развитии единых калибровочных теорий слабых и электромагнитных взаимодействий, связана с происхождением небольших отклонений от идеальной изотопической симметрии. Массы частиц внутри данного семейства не являются в точности равными, а обычно отличаются друг от друга на один или несколько процентов. (Массы протона и нейтрона, составляющих хорошо изученное семейство, отличаются лишь на 0,13%.) Эта разница в массах примерно такова, как если бы изотопическая симметрия сохранялась в сильных взаимодействиях, но нарушалась за счет электромагнитных. Однако вычисления на основании таких соображений, кажется, никогда не приводили к успеху. Например, электромагнитная собственная энергия протона не только оказывалась положительной, в противоречии с наблюдаемым фактом, что нейтрон немного тяжелее протона, но и имела бесконечное значение. Эта бесконечность того типа, что обсуждена выше, но она

не может быть исключена перенормировкой голой массы протона, если мы примем как обязательное условие равенства голых масс протона и нейтрона.

Если же, как теперь кажется возможным, слабые взаимодействия действительно имеют внутреннюю напряженность, сравнимую с напряженностью электромагнитных взаимодействий, они могут давать дополнительные вклады при вычислении расщеплений изотопических мультиплетов, которые могут сокращаться с бесконечностями электромагнитного происхождения и давать конечные значения правильной величины и знака. Однако прежде чем такие вычисления можно будет эффективно провести, надо разработать детальную модель не только слабых взаимодействий электронов и нейтрино, как в 1967 г., но и слабых взаимодействий сильновзаимодействующих частиц. Этот вопрос находится еще в стадии разработки.

Если верить, что слабые и электромагнитные взаимодействия описываются единой калибровочно-симметричной теорией поля, естественно спросить, вписываются ли сильные взаимодействия в эту картину. В действительности имеются большие основания для поисков описания сильных взаимодействий с помощью калибровочных полей. По-видимому, наиболее важно то, что для некоторого класса таких теорий можно доказать, что сильные и электромагнитные взаимодействия с необходимостью должны обладать симметрией между правым и левым, между материей и антиматерией, что в действительности для них и наблюдается, в то время как при слабых взаимодействиях этого нет. Как мы видели, трудность проверки таких теорий поля — это не отсутствие экспериментальных данных, а скорее отсутствие метода вычислений при большой величине напряженности сильных взаимодействий. В 1973 г. произошел, однако, теоретический прорыв, который может, наконец, позволить решить эту проблему. Д. Политцер, аспирант Гарвардского университета, и независимо Д. Гросс и Ф. Вильчек из Принстонского университета открыли, что в некоторых калибровочно-инвариантных теориях поля эффективная напряженность сильных взаимодействий при данной энергии *) уменьшается с ростом энергии. В таких «асимптотически свободных» теориях можно провести приближенные вычисления теми же самыми методами, что используются для слабых и электромагнитных взаимодействий. При этом, однако, энергия должна быть достаточно высокой (хотя неизвестно, насколько высокой в действительности) для того, чтобы сильные взаимодействия были достаточно слабыми. Некоторые вычисления, проведенные таким путем, видимо, хорошо согласуются с экспериментом, а другие нет.

Хотя слишком рано говорить о том, как это все будет выглядеть окончательно, развитие асимптотически свободных калибровочных теорий поля уже привело Гросса, Вильчека, Политцера, Джорджи, Глэшоу, Е. Куин и меня к ряду интересных выводов. Если эффективное взаимодействие ослабевает при высоких энергиях и на малых расстояниях, тогда оно должно становиться большим при малых энергиях и на больших расстояниях. Возможно это объясняет, почему элементарные частицы не могут быть раздроблены на кварки: когда кварк начинает удаляться от содержавшей его частицы, силы могут беспредельно возрастать. Возможно, притяжение при сильных взаимодействиях в действительности того же порядка величины, что и при слабых и электромагнитных взаимодействиях, а сильными они кажутся лишь потому, что наши эксперименты выполняются при относительно низких энергиях, соответствующих большим расстояниям. Возможно, сильные взаимодействия в действительности

*) Перенормированная константа связи.

происходят за счет обмена частицами, принадлежащими тому же самому семейству, к которому принадлежат фотон и промежуточные векторные бозоны, ответственные за электромагнитные и слабые взаимодействия. Если эти спекулятивные предположения разовьются вследствие дальнейшей теоретической и экспериментальной работы, мы сильно продвинемся на пути к единому взгляду на природу.[1]

ЛИТЕРАТУРА

J. D. Bjorken, S. D. Drell, Relativistic Quantum Field, N.Y., McGraw-Hill, 1965.
S. Weinberg Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967); Rev. Mod. Phys.
R. E. Marshak, Riazuddin, C. P. Ryan, Theory of Weak Interactions in Particle Physics, Wiley-Interscience, 1969.
E. S. Abers, B. W. Lee, Phys. Rept. **C9** (1) (1973).
J. Berstein, Rev. Mod. Phys. **46**, 7 (1974).