

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.122

СВЕТ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТИЦА *)

С. Вайнберг

Вопрос о том, является ли фотон «особым», приводит к ряду замечательных выводов о характере взаимодействий и лежащих в их основе симметриях природы

Мы охотно допускаем, что весь видимый мир вещества и излучения может быть объяснен если не фактически, то по крайней мере в принципе, при помощи взаимодействий небольшого числа так называемых «элементарных частиц»: электрона, протона, нейтрона, кванта света — фотона, кванта гравитационного излучения — гравитона, а также, пожалуй, нейтрино. Нам хотелось бы знать, почему эти частицы обладают теми свойствами, которые они имеют и, следовательно, почему мир таков, какой он есть. Или же, если вы не верите, что ученый должен задавать вопрос «почему», мы можем сформулировать проблему в другой форме: то, что мы хотим знать — это набор простых принципов, из которых могут быть выведены свойства этих частиц и, следовательно, все остальное.

В поисках таких принципов мы обнаружили большое количество других частиц; некоторые из них перечислены в табл. I. Частицы, которые

Таблица I

Некоторые элементарные частицы и их свойства

Частицы	Заряд, e	Спин, \hbar	Масса, $M_{эв/c}$	Время жизни, $сек$
Фотон	0	1	0	∞
Гравитон (?)	0	2	0	∞
Нейтрино	0	1/2	0	∞
Электрон	± 1	1/2	0,511	∞
Мюон	± 1	1/2	106,66	$2,199 \cdot 10^{-5}$
л мезон	}	± 1	0	$2,602 \cdot 10^{-8}$
		0	0	$0,84 \cdot 10^{-16}$
К-мезон	}	1	0	$1,237 \cdot 10^{-8}$
		0	0	$0,862 \cdot 10^{-10}$
η -мезон		0	0	$2,50 \cdot 10^{-17}$ (?)
Протон	1	1/2	938,259	∞
Нейтрон	0	1/2	939,553	935
Λ -гиперон	0	1/2	1115,59	$2,521 \cdot 10^{-9}$

*) Steven Weinberg, Light as a Fundamental Particle, Phys. Today 28 (6) 32 (June 1975). Перевод И. В. Андреева.

С. Вайнберг — профессор физики Гарвардского университета (фонда Хиггинса) и старший научный сотрудник Смитсоновской обсерватории, США.

© Physics Today 1975.

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

мы теперь включаем в таблицу элементарных частиц, в различной мере привычны. Среди них, конечно, имеются фотон, гравитон, нейтрино, электрон, протон и нейтрон. Но существуют также другие члены этого списка — мюон, λ -мезон, K -мезон, — которые менее привычны. Некоторые из них могут создаваться только космическими лучами или искусственными пучками ускорителей. Эти различные частицы отличаются друг от друга своими массами, спинами, зарядами и другими свойствами, но вопрос о том, насколько частицы привычны, зависит в основном от их времени жизни. Наиболее привычны, естественно, те частицы, которые имеют большое время жизни — фотоны, гравитоны, электроны, нейтрино и протоны, а также нейтроны, которые стабильны в ядрах, хотя и нестабильны в свободном пространстве.

По мере того как вы переходите к более и более нестабильным частицам, они, естественно, становятся все менее и менее привычными. Но мы фактически не видим ничего в этой таблице, что указывало бы, что какая-либо частица более фундаментальна, чем другие. Эта статья возникла как

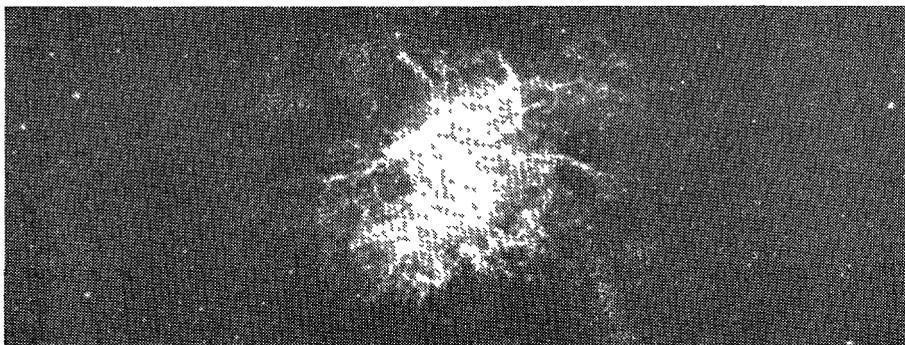


Рис. 1. Эта фотография Крабовидной туманности в созвездии Тельца создана видимым светом, однако во взрыве сверхновой, который создал эту туманность, вполне могли участвовать другие взаимодействия.

Несмотря на их различия, обладают ли основные силы физики общей для них инвариантностью?

доклад на собрании Американского Оптического общества; в то же время мы знаем, что не существует «Американского мюонного общества». Мюон, конечно, играет гораздо меньшую роль в повседневной жизни, чем фотон, но это случайность. Фотон оказывается стабильным, в то время как мюон нестабильным, но мы не видим какой-либо причины предполагать, что мюон — в каком-то смысле менее фундаментальная частица, чем фотон или любая другая частица.

Но действительно ли это так? Правда ли, что фотон — это просто одна из частиц, отличающаяся от других лишь своими значениями заряда, спина, массы, времени жизни и свойствами взаимодействия? Или же в действительности фотоны являются особыми частицами? Играют ли они в некоем смысле фундаментальную роль, имеют ли они более глубокую связь с основными законами физики, чем другие частицы?

Я могу — и сделаю это — привести убедительные доводы в пользу каждой из этих точек зрения. Сначала я буду придерживаться гипотезы, что фотон является просто одной из частиц и что его свойства — фактически, вся электродинамика и оптика — могут быть поняты как простое следствие свойств этой частицы, главным образом ее массы и спина, приведенных в табл. I. Затем я приведу другую точку зрения и покажу, почему я думаю, что фотон действительно отражает нечто фундаментальное

в законах природы. (Я прошу извинить, если окажется, что такой диалог приводит к некоторой путанице.) Это «нечто фундаментальное» символизируется рис. 1. Крабовидная туманность фотографируется в видимом свете, но вспышка сверхновой, которая создала ее, могла быть вызвана силами, связанными с электромагнетизмом, но менее обычными, чем электромагнетизм.

СВЕТ КАК ЧАСТИЦА

Специфические свойства фотона, которые позволяют нам продвинуться столь далеко в выводе всей электродинамики и оптики на основе априорных постулатов, обусловлены тем фактом, что фотон есть безмассовая частица с целым спином. В работе 1939 года Е. Вигнер впервые объяснил, каким образом состояния частицы с определенным спином могут быть проанализированы в рамках специальной теории относительности и квантовой механики на основе так называемой «малой группы». Последняя есть подгруппа лоренцовской группы, которая оставляет неизменным состояние движения. Малая группа, по-просту говоря, представляет собой набор всех лоренцовских преобразований, которые не изменяют скорость частицы.

Если мы рассматриваем массивную частицу в состоянии покоя, малая группа хорошо известна: она состоит из всех вращений; очевидно, что вращения представляют собой как раз те лоренцовские преобразования, которые оставляют частицу в покое. Эти вращения изображены схематически на рис. 2 небольшими окружностями вокруг осей x , y и z . Если мы представим, что частица приобрела скорость вдоль оси z , преобразование Лоренца, хотя и не будет воздействовать на окружности вокруг оси z в плоскости x, y , сплющит окружности вокруг оси x и вокруг оси y . По мере того, как мы переходим к более и более высоким скоростям, эти окружности становятся прямыми линиями.

Таким образом, малая группа в предельном случае частицы, движущейся со скоростью света (как это должно быть в случае безмассовой частицы) не является группой вращений, а представляет собой нечто другое: произведение набора вращений вокруг одной оси z и набора трансляций в плоскости x, y . Именно тот факт, что существует не только J_z , но также J_x и J_y , — не только компонента углового момента вдоль направления движения, но также компоненты, перпендикулярные к нему, — приводит нас к знаменитому выводу квантовой механики, что частица со спином один и массой, не равной нулю, может существовать в трех состояниях, с z -компонентой спина, равной $+1$, 0 и -1 , т. е. в трех поляризационных состояниях.

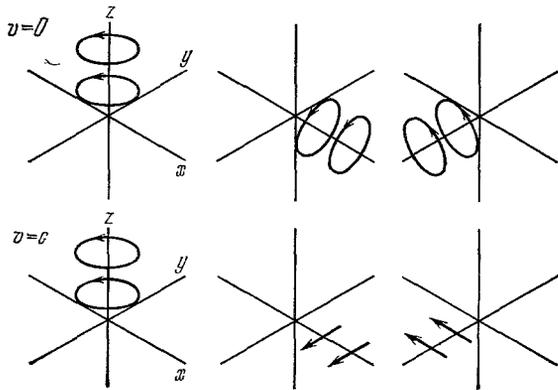


Рис. 2. Почему фотон имеет только два поляризационных состояния.

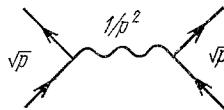
Из трех окружностей (вверху), представляющих компоненты вращения покоящейся частицы, две (проведенные вокруг осей, перпендикулярных к направлению движения) сжимаются в линии в случае безмассового фотона, распространяющегося со скоростью света

Однако этот вывод несправедлив для частицы, движущейся со скоростью света, по той простой причине, что в этом случае малая группа не есть группа вращений. Она содержит только одно вращение, J_z . С общей точки зрения, не существует причины, по которой наличие частицы с $J_z = +1$ должно означать, что существует частица с J_z , равной нулю или какой-либо другой величине. Фактически сохранение четности требует, чтобы существовала также частица с $J_z = -1$, и мы приходим к заключению, что частица со спином единица, движущаяся со скоростью света, должна существовать в двух поляризационных состояниях, характеризующихся спиральностями $+1$ и -1 в зависимости от того, параллельны или антипараллельны ее вектор спина и импульс. В оптике эти состояния известны как состояния левой и правой круговой поляризации. Таким образом, не зная ничего об уравнениях Максвелла, мы приходим к первому выводу о свойствах фотонов: они могут существовать только в двух поляризационных состояниях. (Это необходимо для моей аргументации, так как я пытаюсь получить уравнения Максвелла!)

Из операторов, которые создают или уничтожают фотоны в этих двух поляризационных состояниях, можно попытаться построить различные виды квантовых полей, характеризующихся различными свойствами по отношению к преобразованиям Лоренца. Хорошо известный пример — это антисимметричный тензор, образованный из шести компонент электрического и магнитного полей. Существует теорема, которая утверждает, что это тензорное поле (вместе с его производными) является наиболее общим лоренц-инвариантным полем, которое можно образовать из операторов уничтожения и рождения фотонов со спиральностью плюс или минус единица. В отсутствие взаимодействий с другими частицами или полями, электрическое и магнитное поля, образованные таким образом, автоматически удовлетворяют уравнениям Максвелла для свободных полей. Не могло бы быть ничего более удовлетворительного.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Далее, какова ситуация с взаимодействиями? Если я представляю себе заряженные частицы, взаимодействующие посредством обмена такого рода фотоном и использую упомянутый в предыдущем разделе тензор напряженностей поля, чтобы описать взаимодействие фотонного поля с зарядом, то обнаружу, что в обеих вершинах фейнмановской диаграммы



возникают множители \sqrt{p} , где p — импульс, переносимый фотоном. Распространение фотона вносит множитель $1/p^2$ и, перемножая \sqrt{p} , $1/p^2$ и опять \sqrt{p} , я получаю $1/p$, что при фурье-преобразовании дает $1/r^3$, т. е. обычный диполь-дипольный потенциал. Таким образом, если мы используем только напряженности поля, чтобы описать взаимодействия электромагнитных волн и заряженных частиц, то мы обнаружим, что взаимодействия между фотонами и другими частицами создают только потенциалы вида $1/r^3$, но не знаменитый дальнедействующий кулоновский потенциал $1/r$.

Как же потенциал вида $1/r$ появляется в физике? Как известно каждому, он появляется в физике потому, что взаимодействие фотонов с заряженными частицами происходит не только через тензор напряженностей

поля, но также через векторный потенциал, ротор которого есть тензор напряженностей поля. Это утверждение кажется противоречащим теореме, которую я упомянул выше и которая говорит, что единственные поля, образованные из операторов рождения и уничтожения фотонов со спиральностью плюс или минус единица, — это тензорные поля и их производные, так как здесь, казалось бы, мы имеем векторное поле.

Однако, если вы помните, что существуют только два поляризованных состояния, вы понимаете, что векторный потенциал A_μ не есть вектор. Действительно, если вы смотрите, как он преобразуется при преобразованиях Лоренца, то обнаруживаете, что он приобретает добавочный градиентный член $\partial\varphi/\partial x^\mu$. Это, может быть, будет не столь удивительным, если я напому вам, что единственный векторный потенциал, который может быть действительно образован таким образом, без введения фиктивных степеней свободы, это так называемый векторный потенциал кулоновской, или радиационной, калибровки, определенный так, что он удовлетворяет определенным не лоренц-инвариантным дополнительным условиям связи, такому, например, что временная компонента потенциала равна нулю.

Как же тогда можно удовлетворить условию лоренц-инвариантности? Оно может быть удовлетворено, если этот векторный потенциал взаимодействует с током J^μ таким образом, что добавочный градиентный член в законе лоренц-преобразования несуществен. Другими словами, вектор-потенциал должен взаимодействовать с током, который есть четырехмерный вектор и дивергенция которого равна нулю, так что, когда вы интегрируете по частям, вы находите, что интеграл от $J^\mu\partial\varphi/\partial x^\mu$ равен нулю.

Итак, мы заключаем, что единственный способ описания частиц с массой ноль и спином единица, который приводит к далекодействующим силам, т. е. силам вида $1/r^2$, соответствующим потенциалам вида $1/r$, состоит в том, чтобы использовать вектор-потенциал, который не является четырехмерным вектором и который должен, следовательно, взаимодействовать с сохраняющимся током — не с любым векторным током!

КАЛИБРОВОЧНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ

Существует другой способ описать все это, сказав, что уравнения поля должны оставаться неизменными при калибровочном преобразовании. Это — преобразование фаз, при котором изменение фазы любого поля пропорционально заряду q , который уничтожается этим полем, умноженному на $\varphi(x)$ — произвольную функцию пространства-времени:

$$\Psi(x) \rightarrow e^{iq\varphi(x)} \cdot \Psi(x). \quad (1)$$

При таком калибровочном преобразовании векторный потенциал подвергается трансляции на величину $\partial\varphi/\partial x^\mu$. Тот факт, что A_μ взаимодействует с сохраняющимся током, означает, что это преобразование не изменяет уравнения поля.

Эта калибровочная инвариантность, которая неизбежно приводит к уравнениям Максвелла, является следствием требования лоренц-инвариантности, примененного к частицам с массой ноль и спином единица. В результате мы имеем весь формализм электродинамики и оптики: он с неизбежностью возникает, если мы верим, что существуют фотоны с массой ноль и спином единица.

Существует интересная аналогия между калибровочной инвариантностью, с одной стороны, и общей ковариантностью гравитационной теории — с другой. Фактически весь этот набор аргументов может быть повторен, исходя из идеи, что существует фундаментальная частица,

гравитон, со спином два и массой ноль. Такая аргументация может выглядеть несколько искусственной, так как никто до сих пор не обнаружил каких-либо гравитонов. Существуют, однако, веские причины для того, что они не были обнаружены, и я думаю, что такая аргументация является вполне оправданной.

А ТЕПЕРЬ НАОБОРОТ...

Приведа аргументы в пользу того, что электродинамика и оптика могут быть поняты на основе свойств фотона как одной из частиц, которая обладает специфическими квантовыми числами — спином единица и массой ноль, я теперь буду противоречить себе и укажу, почему такой подход не является наиболее плодотворным. Обернем аргументы и скажем, что калибровочная инвариантность есть фундаментальная симметрия природы. Из калибровочной инвариантности, взятой теперь как априорное предположение, мы можем вывести, что должна существовать частица, фотон, с массой ноль и спином единица и, более того, вывести уравнения Максвелла, а также все другие свойства электродинамики.

Каким же путем мы должны идти? От известных квантовых чисел к калибровочной инвариантности, или от калибровочной инвариантности к известным квантовым числам? Очевидно, вопросы, подобные этим, не имеют какого-либо смысла, если иметь в виду предсказания экспериментальных данных, но они имеют глубокий смысл для выбора направления теоретических исследований.

Мне хотелось бы привести доводы в пользу того, что имеет смысл говорить о калибровочной инвариантности как фундаментальной симметрии природы, из которой следует существование фотона, и, следовательно, света и уравнений Максвелла. Оправданием такой точки зрения является плодотворность идеи, плодотворность, если быть конкретным, объединения электромагнетизма с другими областями физики. Чтобы понять это, вспомним, каким образом в наши дни физики, занимающиеся элементарными частицами, классифицируют различные виды взаимодействий между этими частицами.

Свойства четырех типов взаимодействий перечислены в табл. II. Мы уже обсуждали гравитационное и электромагнитное взаимодействия,

Таблица II

Четыре взаимодействия

	Гравитационное	Электромагнитное	Сильное	Слабое
Радиус действия	∞	∞	10^{-13} — 10^{14} см	$\ll 10^{-14}$ см
Примеры	Астрономические силы	Атомные силы	Ядерные силы	Ядерный β -распад
Сила	$G_{\text{Ньютона}} = 5,9 \cdot 10^{-39}$	$e^2 = 1/137$	$g^2 \approx 1$	$G_{\text{Ферми}} = 1,02 \cdot 10^{-5}$
Частицы, подвергающиеся воздействию	Все	Заряженные частицы	Адроны	Адроны и лептоны
Обмениваемые частицы	Гравитоны	Фотоны	Адроны	?

которые только и проявляются в повседневной жизни. Они характеризуются силами, которые очень различны, гравитационное взаимодействие гораздо слабее электромагнитного. Слабость гравитации, однако, возмещается тем, что она воздействует на все, в то время как электромагнетизм

воздействует только на заряженные частицы. Выше я упоминал, что в настоящее время мы считаем, что гравитационные силы переносятся благодаря обмену гравитонов, и мы знаем, что электромагнитные силы передаются посредством обмена фотонов.

Сильные взаимодействия, которые предположительно ответственны за стабильность ядер, гораздо менее обычны для нас. Они на два порядка величины сильнее, чем электромагнитные, и воздействуют на класс частиц, называемых адронами, которые включают протон, нейтрон, а также различные мезоны и гипероны. Считается, что сильные взаимодействия переносятся посредством обмена адронов.

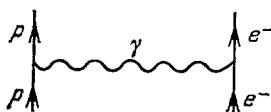
Наименее привычны для нас, конечно, силы с наименьшим радиусом действия — слабые взаимодействия. В то время как сильные взаимодействия имеют радиус действия порядка 10^{-13} — 10^{-14} см и существуют только внутри ядер, слабые взаимодействия имеют еще гораздо меньший радиус действия и, насколько нам известно, не удерживают вместе какие-либо частицы. Они, однако, ответственны за ядерный бета-распад, включая некоторые реакции, обеспечивающие выделение энергии в Солнце. Эти силы гораздо слабее, чем электромагнитные. Хотя мы знаем, что они воздействуют на адроны и лептоны (электроны, мюоны и нейтрино), мы не полностью знаем, обмен каких частиц приводит к слабым взаимодействиям.

Существует правило, что радиус действия силы обратно пропорционален массе обмениваемой частицы:

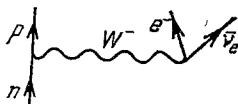
радиус силы $\approx (\hbar/c)/\text{масса обмениваемой частицы}$.

Именно поэтому мы считаем, что существует безмассовый гравитон наряду с безмассовым фотоном. Это также означает, что частица должна быть очень массивной, если ее обмен ответствен за слабые взаимодействия.

Фактически это очень старая идея, что, подобно тому, как кулоновское рассеяние, которое есть электромагнитный процесс, происходит при обмене фотонах, бета-распад происходит благодаря обмену некоего тяжелого «фотона». Мы можем вывести свойства W -частицы, предполагаемого посредника β -распада, из аналогии между электромагнитным и слабым взаимодействием. Сравним фейнмановскую диаграмму для кулоновского рассеяния



«с диаграммой для бета-распада



Анализируя поляризационные состояния различных частиц, участвующих в бета-распаде, мы заключаем, что спин W -частицы, если он существует, должен быть равен единице, т. е. должен быть таким же, как у фотона. Целый спин означает, что это бозон, и так как частица, подобно фотону, должна описываться векторным полем, она называется промежуточным векторным бозоном. W -частица, однако, резко отличается от фотона тем, что обладает положительным или отрицательным единичным

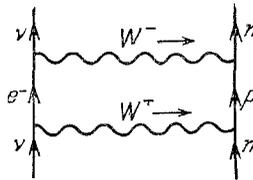
зарядом. Кроме того, зная силу взаимодействия, мы заключаем, что ее масса равна примерно 50 Гэв .

Эти идеи восходят к Э. Ферми и затем развивались Х. Юкавой, Ю. Швингером, Ш. Глэшоу, С. Бладменом, А. Саламом, Дж. Уордом и другими.

ОБОБЩЕННАЯ КАЛИБРОВОЧНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ

Эти идеи, однако, встречаются с трудностями. Одна из проблем состоит в том, что мы рассматриваем аналогичным образом две совершенно различные частицы: фотон с нулевой массой и W -частицу, масса которой близка к пятидесяти нуклонным массам, что гораздо больше, чем мы когда-либо наблюдали.

Столь же важная, хотя и менее очевидная проблема — это появление бесконечностей. Представим себе, например, рассеяние нейтрино на нейтроне. Следовало бы ожидать, что такой процесс происходит при обмене парой W -частиц, так как он не может идти при обмене одной частицей. Если вы анализируете соответствующую фейнмановскую диаграмму



то обнаруживаете, что она бесконечна и нет возможности поглотить эту бесконечность в перенормировку констант связи. При дальнейшем анализе этой бесконечности обнаруживается, что она возникает из-за обмена W -частицами с нулевой спиральностью. Для фотонов эта диаграмма не бесконечна, так как фотоны, как мы видели, не имеют состояний со спиральностью ноль.

В 1967 г. я выдвинул предложение, которое впоследствии было сделано также Саламом, вывести как фотон, так и W -частицу как предсказание общего принципа калибровочной инвариантности, который был бы обобщением принципов калибровочной инвариантности, описанных мною выше в связи с электродинамикой. В этой теории масса W -частицы должна возникать благодаря явлению, которое среди теоретиков известно как спонтанное нарушение симметрии. Идея состоит в том, что на некоем фундаментальном уровне — на уровне законов природы, хотя и не на уровне предсказываемых матричных элементов амплитуды рассеяния — фотон и W -частица могут рассматриваться как члены одного и того же семейства векторных частиц.

Простая иллюстрация спонтанного нарушения симметрии дается на рис. 3, где изображены две полые фигуры. В этой аналогии проекция положения шарика на горизонтальную плоскость соответствует величине вакуумного ожидания комплексного скалярного поля ϕ , а частоты колебаний шарика соответствуют массам скалярных частиц. Когда дно изображенной чаши вдавливается, так что образуется выпуклость, точка равновесия переходит в окружность — исходная симметрия нарушена. Возникший новый вид движения — качение шарика вокруг оси цилиндрической симметрии — соответствует, в рамках этой аналогии, новой частице, называемой голдстоуновским бозоном нулевой массы. Пи-мезон может рассматриваться, по крайней мере приближенно, как такой голдстоуновский бозон.

Такое расширенное семейство частиц должно быть следствием более широкого принципа калибровочной инвариантности, чем принцип калибровочной инвариантности электродинамики.

Обобщенная калибровочная инвариантность, о которой я говорю, состоит в следующем. Представим себе группу, которая не есть простая группа фазовых преобразований, заданных соотношением (1), и которая может быть представлена двумя некоммутирующими матрицами, M и \mathfrak{M} . Различные заряженные поля преобразуются согласно матричным преобразованиям

$$\Psi_n(x) \rightarrow \sum_m M_{nm} [\varphi(x)] \Psi_m(x),$$

$$A_{\alpha\mu}(x) \rightarrow \sum_{\beta} \mathfrak{M}_{\alpha\beta} [\varphi(x)] \times \left[A_{\beta\mu}(x) + \frac{\partial\varphi_{\beta}(x)}{\partial x^{\mu}} \right];$$

здесь $\varphi_{\alpha}(x)$ — набор произвольных функций координат.

Должно быть по одному векторному полю для каждого из параметров, характеризующих преобразования группы, которые сами должны образовывать нетривиальное семейство. Более чем один член этого семейства должен подвергаться матричному преобразованию, так же, как и обычно калибровочному преобразованию.

Такого рода обобщенные калибровочные преобразования были впервые введены в физику Ч. Н. Янгом и Р. Миллсом в пятидесятых годах и использовались как новая математическая возможность в течение многих лет. Предложение, которое было сделано в 1967 г., состояло фактически в том, чтобы рассматривать фотон как член семейства векторных полей, существование которых требуется фундаментальной и точной калибровочной инвариантностью природы. Типы калибровочной инвариантности приведены в табл. III. Существует, прежде всего, калибровоч-

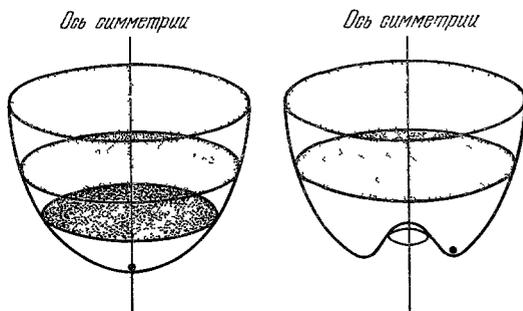


Рис. 3. Спонтанное нарушение симметрии проиллюстрировано здесь при помощи механической аналогии.

Устойчивое положение равновесия в чаше, изображенной слева, находится на оси цилиндрической симметрии, когда на дне появляется выпуклость (справа), равновесным состоянием становится вращение. В этой аналогии положение шарика соответствует величине вакуумного ожидания, скалярного поля, частоты колебаний соответствуют массам скалярной частицы, а появившаяся степень свободы (значение) соответствует голдстоуновскому бозону нулевой массы; π -мезон можно рассматривать как один из таких бозонов.

Таблица III
Калибровочные группы

Группа	Векторные поля	Физическое применение
$O(2)$	A_{μ}	Электромагнетизм
$O(3)$	A_{μ}, W_{μ}^{\pm}	Теория Янга — Миллса сильных взаимодействий
$O(3) \otimes O(2)$	$A_{\mu}, W_{\mu}^{\pm}, Z_{\mu}$	Модель 1967 г. слабых и электромагнитных взаимодействий

ная группа $O(2)$, которая на диаграммах Аргана представляет собой группу фазовых преобразований. Это то же самое, что группа вращений

в двух измерениях, которая приводит только к одному векторному полю (в двумерном пространстве существует только один вид вращений), и, как я указывал выше, мы отождествляем это векторное поле с фотоном.

Исходное предложение Янга и Миллса фактически должно было относиться к сильным взаимодействиям и изотопическому спину. Идея состояла в том, что фотон должен быть связан с парой заряженных векторных полей и калибровочная группа должна быть группой вращений в трех измерениях, т. е. $O(3)$.

НОВЫЕ ВИДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Конкретное предложение, сделанное в 1967 г., простейшее из возможных, состоит в том, что фундаментальная калибровочная группа есть прямое произведение групп $O(3)$ и $O(2)$, $O(3) \otimes O(2)$. В результате вместо трех векторных полей появилось четыре. Это должно означать, что наряду

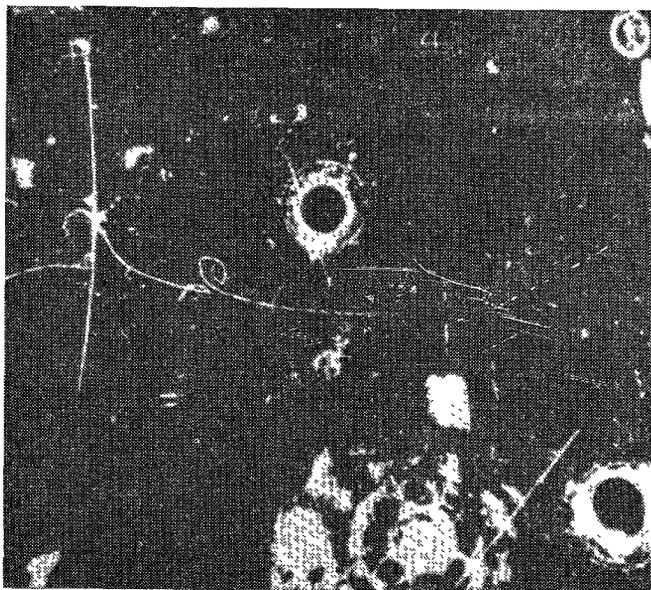


Рис. 4. Деталь фотографии, сделанной на пузырьковой камере «Гаргамель» в ЦЕРНе. Пучок мюонных антинейтрино входит в камеру справа. Он выбивает электрон атома жидкости, который движется влево, закручиваясь по часовой стрелке в магнитном поле камеры, прежде чем остановится. Треки непосредственно слева от трека электрона отдачи образованы электрон-позитронной парой, которая была создана в электрическом поле атома фотоном, испущенным замедляющимся электроном отдачи.

с тяжелыми заряженными промежуточными векторными бозонами, которые должны быть ответственны за наблюдаемые слабые взаимодействия, такие, как бета-распад и ядерные реакции на Солнце, должен существовать нейтральный векторный мезон, подобно фотону не имеющий заряда, но, в отличие от него, тяжелый, подобно W -частицам.

Это предложение 1967 года нигде не использовалось в течение длительного времени, так как, хотя и предполагалось, что оно должно устранить бесконечности из теории слабых взаимодействий, долгое время никто не был достаточно искусен, чтобы доказать это. Это было сделано в 1974 г. Г. т'Хуфтом, в то время аспирантом в Утрехте; его доказательство было впоследствии улучшено рядом других, включая Б. Ли. Когда стало ясно, что эта теория фактически является решением проблемы бесконечностей

в слабых взаимодействиях, проблемы, которая существовала с середины тридцатых годов, физики провели огромную работу как по исследованию ее применений, так и по поискам экспериментальной проверки.

Volume 46B number 1 PHYSICS LETTERS 3 September 1973

OBSERVATION OF NEUTRINO-LIKE INTERACTIONS WITHOUT MUON OR ELECTRON IN THE GARGAMELLE NEUTRINO EXPERIMENT

F J HASERT¹ S KABF² W KRENZ³ J Von KROGH⁴ D LANSKE⁵ J MORFIN⁶
K SCHULTZE and H WEERTS
1/1 Physikalisches Institut der Technischen Hochschule Aachen - Germany

G H BERTRAND⁷ COREMANS⁸ J SACTON⁹ M Van DONING¹⁰ and P VILAIN¹¹
International Institute for High Energy Physics, U.S.S.R. / U.B. Brussels, Belgium

U CAMERINI¹² D C CUNY¹³ R BALDI¹⁴ I DA' ILCHEMNO¹⁵ W T FRY¹⁶ D HAUPT¹⁷
S NATA¹⁸ P MUSSET¹⁹ B OSCULATI¹⁹ R PALMER²⁰ J B M WATSON²¹
D H TERKINS²² A PUZZIA²³ A ROUSSET²⁴ W VENUS²⁵ and J J WACHSMUTH²⁶
CERN, CH-1211 Geneva, Switzerland

V EPISSON²⁷ B DEGRANCE²⁸ M HAGUENAUER²⁹ L KLUDERG³⁰
U NGUYEN³¹ H C and P PFTIAU³²
Laboratoire de Physique Nucleaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Paris, France

E BELOT³³ S BONETTI³⁴ D CAVALLI³⁵ C CONTA³⁶ E EIORINI³⁷ and M POLLIER³⁸
Istituto di Fisica dell'Universita' Leonardo da Vinci, Milano, Italy

D AUBERT³⁹ D BLUM⁴⁰ L M CHOUNET⁴¹ P HEUSSE⁴² A LACARTIGUE⁴³
A M LUTZ⁴⁴ A ORKIN⁴⁵ LECOURTOIS⁴⁶ and J P VIALLE⁴⁷
Laboratoire de l'Accelérateur Lineaire, Orsay, France

E W BULLOCK⁴⁸ M J ESTEN⁴⁹ T W JONES⁵⁰ J MCKENZIE⁵¹ A J MICHELLE⁵²
G MYATT⁵³ and W G SCOTT^{54 55}
University College, London, England

Received 25 July 1973

Events induced by neutral pions and producing hadrons, but no muon or electron, have been observed in the CERN neutrino experiment. These events behave as expected if they arise from neutral current induced processes. The rates relative to the corresponding charged current processes are evaluated.

We have searched for the neutral current (NC) and charged current (CC) reactions

$$\text{NC } \nu_{\mu} \nu_{\mu} + N \rightarrow \nu_{\mu} \nu_{\mu} + \text{hadrons} \quad (1)$$

$$\text{CC } \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu} + N \rightarrow \mu^+ / \mu^- + \text{hadrons} \quad (2)$$

which are distinguished respectively by the absence of any possible muon or the presence of one and only one possible muon. A small contamination of $\nu_c \bar{\nu}_c$ exists in the $\nu_{\mu} \bar{\nu}_{\mu}$ beams giving some CC events which are easily recognised by the e^+e^- signature. The analysis is based on 83 000 ν pictures and 207 000 $\bar{\nu}$ pictures taken at CERN in the Gargamelle bubble chamber filled with freon of density $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. The dimensions of this chamber are such that most

¹ A more detailed account of the analysis of this experiment appears in a paper to be submitted to Nuclear Physics

¹ Chercheur agrégé de l'Institut Interuniversitaire des Sciences Nucleaires, Belgique
² Also at Physics Department, University of Wisconsin
³ Now at Serpukhov
⁴ Now at University of Bari
⁵ Now at Brookhaven National Laboratory
⁶ Also at University of Oxford
⁷ Now at Rutherford High Energy Laboratory
⁸ On leave of absence from University and INFN Pavia
⁹ Supported by Science Research Council grant

138

Рис. 5. Пятьдесят пять авторов приняли участие в написании этой трехстраничной статьи с камеры «Гаргамель», в которой сообщалось о событиях с нейтральными токами: является ли это рекордом?

В настоящее время существует большое количество основанных на опыте соображений в пользу того, что эта теория в некотором смысле правильна. Одно из них состоит в том, что теории этого типа — а существует

не одна теория этого типа — предсказывают замечательный факт, что заряд должен появляться в виде квантованных единиц.

Более того, эти теории указывают, что слабые взаимодействия должны приводить к некоторым эффектам, сравнимым по силе с электромагнитными эффектами, но только в некоторых определенных случаях. Например, существуют веские причины полагать, что разность масс между нейтроном и протоном, которая обычно мыслится как чисто электромагнитная (это вызвано тем, что протон имеет заряд, а нейтрон нет), фактически только частично электромагнитная, а главным образом слабая.

Существует, однако, предсказание такого рода теории, более доступное для непосредственной проверки, — должны существовать новые типы слабых взаимодействий, обусловленные обменом тяжелых нейтральных промежуточных векторных частиц, в частности, рассеяние нейтрино мюонного типа на электроны, которое, по-видимому, было обнаружено в двух событиях в ЦЕРНе. Сделанная на пузырьковой камере фотография одного из таких событий «с нейтральными токами» показана на рис. 4. Два события кажутся очень малым числом, однако в экспериментах этого типа фон очень мал.

С другой стороны, сейчас имеются сотни событий, в которых нейтрино рождает адроны в соударении с нуклоном и в которых не происходит обмена зарядом между нейтрино и адронами. Хотя сотни таких событий наблюдались как в ЦЕРНе, так и в Национальной Лаборатории Ускорителей, фон в этом случае представляет серьезную проблему, так что этот факт также не является окончательно установленным *). Ввиду ее социологического интереса, на рис. 5 показано, как выглядит в наши дни экспериментальная работа по физике высоких энергий — 55 авторов.

Другое недавнее обнадеживающее событие — это открытие новых долгоживущих векторных частиц на Стэнфордском линейном ускорителе и в Брукхейвене. Эти новые частицы могут оказаться связанными состояниями нового «чармированного» кварка и соответствующего антикварка; такой чармированный кварк нужен в единых теориях слабых и электромагнитных взаимодействий, чтобы подавить некоторые ненаблюдаемые процессы с нейтральными токами.

Кроме того, недавно в работе Д. Фридмана, Дж. Вильсона и других произошел прорыв в вопросе о том, каким образом может происходить взрыв сверхновых. Основная идея состоит в том, что нейтральные токи порождают когерентное взаимодействие между нейтрино и ядрами железа во внешней части ядра сверхмассивной звезды. Это взаимодействие впервые позволило создать численную модель, согласно которой звезда действительно расширяется, что приводит к наблюдаемому явлению вспышки сверхновой, такому, какое произошло в 1054 г. и остаток которого является Крабовидная туманность, изображенная на рис. 1.

СИММЕТРИЯ ПРИРОДЫ

Как же ответить на вопрос, что такое свет? Ответ, в который я безоговорочно верю, таков: фотон — это наиболее явный член семейства элементарных частиц, существование которых требуется обобщенной калибровочной группой, которая объединяет электромагнитные, слабые и, возможно, сильные взаимодействия. Насколько я знаю, никто не претендовал на то, что он может включить в эту схему гравитацию.

Если эти теоретические идеи и эксперименты, которые продолжаются, окажутся успешными, мы подойдем к фундаментальному пониманию

*) В настоящее время (1976 г.) наличие нейтральных токов можно считать установленным; см. УФН 120, 97 (1976). (Прим. перев.)

того, что такое свет, и того, что фотон (а также другие частицы, которые нам менее привычны, так как мы живем в гораздо больших временных масштабах, чем они) является проявлением принципа симметрии природы, который описывает взаимодействия материи. Этот принцип почти столь же фундаментален, как что-либо известное нам о природе.

ЛИТЕРАТУРА

- S. Weinberg, in: Lectures on Particles and Field Theory, Ed. S. Deser and K. W. Ford, v. 2, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1965, p. 405.
E. S. Abers, B. W. Lee, Phys. Rept. 9, 1 (1973).
J. Bernstein, Rev. Mod. Phys. 46, 7 (1974).
S. Weinberg, *ibid.*, p. 255.
S. Weinberg, Sci. American 231 (1), 50 (July 1974) (имеется перевод: С. Вайнберг, УФН 118, 505 (1976)).