

ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ СЛАБОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

С. Г. МАТИНЯН

Нобелевская премия по физике за 1979 г. присуждена известным физикам-теоретикам Шелдону Глэшу, Стивену Вайнбергу и Абдусу Саламу за их работы по исследованию взаимодействий элементарных частиц и, в частности, за развитие теории, объединяющей электромагнитные и слабые силы природы.

Электромагнитное взаимодействие, т. е. взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем и между собой, блестяще описывается квантовой электродинамикой, являющейся синтезом уравнений Максвелла с квантовой теорией. Слабое взаимодействие с его очень слабой интенсивностью (в миллионы раз меньшей, чем интенсивность электромагнитного взаимодействия) долгое время было ограничено узким кругом явлений β -радиоактивности. И хотя теория β -распада, созданная в 1934 г. Э. Ферми, была построена по аналогии с электродинамикой, тем не менее трудно было ожидать, что синтез этих столь разных сил природы возможен и притом на основе такой элегантной теории, какой является теория Глэшу, Вайнберга, Салама. С этой точки зрения это объединение двух сил природы на единой теоретической основе можно сравнить с объединением электрического и магнитного полей и связанных с ними явлений в рамках уравнений Максвелла, значение которого для всей нашей жизни вряд ли можно переоценить.

Уже давно было замечено, что слабое взаимодействие можно рассматривать как результат существования некоторого векторного поля — переносчика этого взаимодействия, аналогично тому, как фотон — квант векторного электромагнитного поля — переносит взаимодействие между электрически заряженными объектами. Экспериментально установленная $V-A$ -природа слабых заряженных токов и векторный характер фотонов во многом способствовали развитию этой аналогии.

С другой стороны, $W^\pm$ -бозоны (промежуточные бозоны) — заряженные кванты этого поля, переносчики слабого взаимодействия — в отличие от фотонов должны быть очень массивными ($m_W \approx 10^2 \text{ ГэВ}$), чтобы объяснить хорошо известное сильное короткодействие (локальность) слабого взаимодействия при не очень высоких энергиях. При развитии этой аналогии следовало также учитывать экспериментально установленное несохранение четности в слабых процессах, сводящееся к тому, что частицы, участвующие в них, имеют левую спиральность, а античастицы — правую.

Таким образом, несмотря на то, что электромагнитное и слабое взаимодействия столь различны, их объединяет целый ряд важных моментов:

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ ЗА 1979 г.

Абдус Салам, родился в 1926 г. в Пакистане. Получил докторскую степень в Кембриджском университете в 1952 г., в 1957 г. стал профессором теоретической физики Имперского колледжа в Лондоне. Он один из организаторов Международного центра по теоретической физике в Триесте, который возглавляет по настоящее время.



Шелдон Глаشو (слева), родился в Нью-Йорке в 1932 г. Получил докторскую степень в Гарварде в 1959 г., является профессором Гарвардского университета.

Стивен Вайнберг, родился в Нью-Йорке в 1933 г. Получил степень доктора в Принстонском университете в 1957 г., является профессором Гарвардского университета.



в обоих взаимодействиях участвуют лептоны и адроны, оба они являются по природе векторными (с учетом асимметрии — «левости» слабого взаимодействия, связанной с несохранением четности), их обуславливают обмены частицами спина 1 и отрицательной четности (фотон и $W^\pm$ -бозоны), каждое из взаимодействий имеет универсальную (т. е. не зависящую от типа участвующих в нем частиц) интенсивность («константу» взаимодействия).

Эти общие черты и привели в 1961 г. Глэшоу [1] к теории, объединяющей слабое и электромагнитное взаимодействия на базе группы симметрии $SU(2)_L \times U(1)$, причем группа $SU(2)_L$ характеризует слабое взаимодействие и фермионы входят в нее как ее левые дублеты и правые синглеты, а $U(1)$ ответственна за электромагнетизм.

Однако в такой теории имелась одна большая трудность: как объединить между собой безмассовые фотоны — переносчики электромагнетизма — с промежуточными бозонами, имеющими громадную массу? В точной аналогии между ними, исходящей из ненарушенной симметрии $SU(2)_L \times U(1)$, эти бозоны должны быть, как и фотон, безмассовыми. Как перейти к реальной картине, в которой фотон остается безмассовым, а промежуточные бозоны становятся массивными? Дав правильную мультиплетную структуру теории на базе глобальной симметрии группы $SU(2)_L \times U(1)$, Ш. Глэшоу [1] не смог решить проблему масс W -бозонов.

С другой стороны, построить теорию массивных промежуточных мезонов не так-то просто, ибо в отличие от квантовой электродинамики, обладающей свойством перенормируемости (т. е. обеспечивающей исследование процессов в любом приближении теории возмущений), теория с массивными векторными заряженными частицами, какими являются промежуточные W -бозоны, перенормируема, т. е. процессы, рассчитываемые на ее основе, в высших порядках вычислить непрот противоречиво невозможно.

Перенормируемость квантовой электродинамики во многом обязана тому, что она является калибровочной теорией. Поэтому и единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий, основанная на группе $SU(2)_L \times U(1)$, введенной Глэшоу, должна быть калибровочной теорией, как и электродинамика. При этом массу промежуточных векторных бозонов надо ввести так «мягко», чтобы следы калибровочной инвариантности, обеспечивающей перенормируемость теории, остались. Локальная калибровочная симметрия группы $SU(2)_L \times U(1)$, связанная с нулевыми массами промежуточных мезонов, нарушается за счет возникновения массы у этих мезонов. Точной остается лишь симметрия группы $U(1)$, обеспечивающая равенство нулю массы фотона, как и должно быть.

Такой механизм возникновения массы векторных бозонов и был найден Вайнбергом [2] и Саламом [3] в 1967 г. в виде механизма Хиггса спонтанного нарушения симметрии [4], связанного с существованием мезонов со спином нуль с ненулевым вакуумным средним. В результате взаимодействия промежуточных векторных бозонов с хиггсовскими частицами у первых возникает масса, происходит спонтанное нарушение симметрии

$SU(2)_L \times U(1)$ до симметрии $U(1)$, однако при этом такой механизм возникновения массы не ликвидирует, как и ожидали Вайнберг и Салам и как вскоре (1971 г.) было строго доказано в работе [5], свойств в перенормируемости теории, объединившей в себе слабое и электромагнитное взаимодействия и позволяющей, также как и квантовая электродинамика, проводить, в принципе, расчеты с любой степенью точности по константе связи.

Возникла, как говорят иногда, теория электрослабого взаимодействия, в которой электромагнитное и слабое взаимодействия являются различными проявлениями одного единого взаимодействия, осуществляемого обменом промежуточными бозонами и фотоном. Слабость слабого взаимодействия по сравнению с электромагнитным есть лишь низкоэнергетическое явление. При энергиях, больших чем массы промежуточных бозонов ($\geq 10^2$ ГэВ), существует одно единое взаимодействие. Переносчиком этого электрослабого взаимодействия являются γ -квант и промежуточные бозоны, представляющие собой различные компоненты одного и того же векторного поля. При этом наряду с заряженными бозонами $W^\pm$, ответственными за слабые заряженные токи, теория предсказала существование нейтрального Z^0 -бозона, приводящего к слабому нейтральному току.

В 1973 г. слабые нейтральные токи были обнаружены экспериментально [6], и это был первый большой успех теории Глэшоу—Вайнберга—Салама. Тем самым было установлено, что слабый ток может быть не только заряженным (за него ответственны $W^\pm$ -бозоны), как долгое время считалось, но и нейтральным (за него ответствен Z^0 -бозон), также как электромагнитный ток, который обусловлен обменом γ -квантом.

Однако есть одна разница между этими двумя нейтральными токами: слабый нейтральный ток в отличие от электромагнитного, в принципе, не должен сохранять четность, и это может быть обнаружено экспериментально. Именно с этой стороны и подвергли экспериментаторы проверке единую теорию Глэшоу—Вайнберга—Салама. В 1978 г. несохранение четности, обусловленное слабыми нейтральными токами, было обнаружено экспериментально в опытах по измерению асимметрии в неупругом рассеянии поляризованных электронов на протонах и дейтронах [7] и в труднейших опытах новосибирской группы — в атомных переходах [8]. Оба результата количественно подтвердили теорию. Это были решающие эксперименты для проверки теории.

Кроме того, было выполнено большое количество экспериментов по исследованию свойств нейтральных токов в многочисленных реакциях, вызванных нейтрино и антинейтрино, и сегодня в экспериментах более чем десяти типов теория Глэшоу—Вайнберга—Салама получила блестящее подтверждение. Для описания такого большого количества экспериментальных данных нужен лишь один параметр — угол Вайнберга, описывающий смешивание слабого нейтрального тока с электромагнитным. Этот угол, который является внешним параметром теории, для всех экспериментов один и тот же — $\sin^2 \theta_W \approx 0,20$.

Единая теория электрослабого взаимодействия оказала фундаментальное влияние на развитие наших представлений об основных частицах природы — кварках и лептонах. Открытие нейтральных слабых токов и ненаблюдение их в процессах с изменением странности (например, в распаде $K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$) привело к предсказанию чармованного кварка (с-кварк), который экспериментально проявился в 1974 г. в опытах Тинга и Рихтера, обнаруживших частицы со скрытым очарованием J/ψ . За это открытие им была присуждена Нобелевская премия по физике за 1976 год.

Конкретная форма (дублетный вариант) спонтанного нарушения Хиггса, использованная в схеме Вайнберга—Салама, также получила косвенное подтверждение в нейтринных опытах. И несмотря на то, что главные атрибуты этой теории — $W^\pm$ и Z^0 -бозоны и хиггсовский мезон — еще предстоит открыть на ускорителях следующего поколения, в настоящее время можно утверждать, что схема Глэшоу—Вайнберга—Салама есть теория электрослабого взаимодействия до энергий $\approx 10^2$ ГэВ.

Большие успехи объединения слабого и электромагнитного взаимодействий на базе схемы Глэшоу—Вайнберга—Салама делают очень обнадеживающими усилившиеся в последнее время попытки теоретиков построить единую теорию («великий синтез») всех взаимодействий элементарных частиц — слабого, электромагнитного, сильного и, возможно, гравитационного, т. е. решить задачу, которой отдал столько времени и сил Альберт Эйнштейн, столетие со дня рождения которого отмечалось в 1979 г. Однако, может быть, не следует забывать, что между объединением электрического и магнитного полей в уравнениях Максвелла в единое электромагнитное поле и объединением слабого и электромагнитного полей в единое электрослабое поле прошло более века.

Правда, не мешает также помнить, что одно существенное объединение несколько другого масштаба и характера — объединение группы $SU(2)$ изотопического спина и группы $U(1)$ странности (гиперзаряда) в группу унитарной симметрии $SU(3)$ (Гелл-Манн, Неэман) ($SU(3) \supset SU(2) \times U(1)$) — произошло на наших глазах за гораздо более короткий отрезок времени. И это вселяет надежду на то, что, быть может, «великий синтез» не за горами.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Glashow. Nucl. Phys., 22, 579 (1961).
2. S. Weinberg. Phys. Rev. Lett., 19, 1264 (1967).
3. A. Salam. Elementary Particles Theory, 8-th Nobel Symp., Stockholm, 1968, p. 367.
4. P. W. Higgs. Phys. Lett., 12, 132 (1964).
5. G. 't Hooft. Nucl. Phys., B35, 167 (1971).
6. F. J. Hasert et al. Phys. Lett., 46B, 138 (1971).
7. C. Prescott et al. Phys. Lett., 77B, 347 (1978).
8. А. М. Барков, М. С. Золотарев. Письма ЖЭТФ, 27, 379 (1978).