

ПРИРОДА

№ 1, 2000 г.

Лауреаты Нобелевской премии за 1999 год

По физике

-

Г'т Хофт и М. Велтман

© "Природа"

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск

VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!

<http://www.accessnet.ru/vivovoco>

Лауреаты Нобелевской премии за 1999 год

По физике — Г.'т Хофт и М.Велтман

Королевская шведская академия наук присудила в 1999 г. Нобелевскую премию по физике профессорам Герарду 'т Хофту и Мартину Дж.Г.Велтману. В работах этих голландских исследователей в начале 70-х годов была впервые доказана перенормируемость¹ калибровочной теории электрослабого взаимодействия и разработаны конкретные рецепты, позволившие в дальнейшем провести расчеты петлевых² фейнмановских диаграмм в этой теории. Результаты выполненных расчетов позднее были подтверждены в экспериментах на ускорителях в Европе и США.

Герард 'т Хофт (Gerardus't Hooft) родился в 1946 г. в Нидерландах. Докторскую степень по физике получил в Утрехтском университете

¹ Перенормируемость — свойство "хорошей" квантовой теории поля, позволяющее устранить из окончательных результатов расчетов расходящиеся выражения. Совокупности бесконечных членов имеют в такой теории структуру основных констант — масс и констант взаимодействия (т.е. обладают той же размерностью и занимают соответствующие места в уравнениях). Объявив эти бесконечные совокупности реально наблюдаемыми физическими величинами, т.е. произведя, как говорят, их перенормировку, можно выразить результаты расчетов через значения этих масс и констант.

² Петлевые диаграммы описывают вклады высших порядков теории возмущения в рассматриваемые процессы; распространяющиеся в "петле" частицы называются виртуальными. "Шуба" из виртуальных частиц окружает каждую реальную элементарную частицу.



Г.'т Хофт



М.Велтман

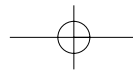
(1972). С 1977 г. 'т Хофт — профессор физики этого университета; с 1982 г. — член Нидерландской Королевской академии наук.

Мартинус Велтман (Martinus J.G. Veltman), 1931 года рождения, тоже остается Нидерландским подданным. Получив докторскую степень по физике в Утрехтском университете (1963), он был профессором физики там в 1966—1981 гг., а с 1981 г. — в Мичиганском университете (Анн-Арбор, США). В настоящее время вышел на пенсию. Стал членом Нидерландской Королевской академии наук на год раньше своего младшего коллеги.

Выдающиеся работы 'т Хофта и Велтмана хорошо известны узкому кругу теоретиков, работающих в квантовой теории поля, и заслу-

женность ими полученной награды не вызывает сомнения. Для более широкой аудитории кратко опишем ситуацию в физике частиц до получения доказательства перенормируемости электрослабой теории.

В те годы слабые взаимодействия описывались неперенормируемой четырехфермионной теорией. В ней последовательное вычисление по теории возмущений невозможно, так как петлевые диаграммы приводят к неустранимым бесконечностям. Особняком стояла квантовая электродинамика электронов и фотонов, перенормируемость которой, установленная в конце 40-х годов, позволяла делать самосогласованные расчеты с практически любой требуемой точностью. В 1967—1968 гг. С.Вайн-



берг и А.Салам предложили качественно новую, так называемую электрослабую теорию, основанную на группе симметрии³ $SU(2)_L \otimes U(1)$ и объединяющую электромагнитное и слабое взаимодействия.

Переход от феноменологической четырехфермионной теории слабых взаимодействий к новой модели требовал введения дополнительной частицы — заряженного векторного бозона. К этому моменту уже была построена теория Янга—Миллса, описывающая взаимодействие безмассовых векторных бозонов на основе неабелевой калибровочной симметрии. Наконец, в ряде работ обсуждался механизм генерации масс этих бозонов без нарушения калибровочной симметрии (механизм Хиггса; спонтанное нарушение калибровочной симметрии). Эти идеи и были соединены в работах Вайнберга и Салама. Они предложили модели слабых взаимодействий, основанные на спонтанно нарушенных неабелевых симметриях (Нобелевская премия 1979 г.). Однако формальное доказательство перенормируемости этих моделей отсутствовало (неформальные аргументы в пользу перенормируемости приводились, в частности, в работе Салама).

В конце 60-х годов Л.Д.Фаддеев и В.Н.Попов сформулировали правила Фейнмана для неабелевой теории в лоренц-ковариантных калибровках, позволяющие проводить анализ и вычисление многопетлевых диаграмм, чем и занялись будущие лауреаты.

Весной 1969 г. 22-летний студент 'т Хофт стал работать с профессором Утрехтского университета Велтманом. В качестве темы диссертации Велтман предложил ему анализ перенормируемости неабелевых калибровочных теорий. Первая работа 'т Хофта касалась теории с безмассовыми векторными бозонами; затем в его самостоятельной публикации и в совмест-

ных работах с Велтманом была рассмотрена теория со спонтанно нарушенной симметрией (масса векторных бозонов возникала за счет механизма Хиггса).

Успеху анализа способствовали изобретенные 'т Хофтом R_ξ -калибровки, зависящие от параметра ξ . Для того чтобы найти пропагатор⁴ векторной частицы, необходимо ввести в лагранжиан член, фиксирующий калибровку. При этом калибровочная симметрия теории оказывается нарушенной, и в дальнейшем требуется доказать, что амплитуды физических процессов не зависят от введенного члена. Придуманый 'т Хофтом член, фиксирующий калибровку векторных полей, приводит к тому, что пропагатор векторной частицы падает при больших импульсах k как $1/k^2$, аналогично пропагатору фотона в квантовой электродинамике, обеспечивая тем самым перенормируемость теории. В пределе $\xi \rightarrow \infty$ пропагатор векторной частицы становится пропагатором массивного векторного поля, не падающим с ростом k^2 . Такая калибровка называется унитарной, так как в ней ясны значения масс частиц в теории — это и есть массы W - и Z -бозонов. Однако для доказательства перенормируемости теории необходимо вернуться в калибровку с конечным ξ (калибровка с $\xi=1$ называется теперь калибровкой 'т Хофта—Фейнмана, с $\xi=0$ — калибровкой 'т Хофта—Ландау). При этом нужно доказать независимость физических амплитуд от ξ — на этом формальное доказательство перенормируемости неабелевых калибровочных теорий, в которых масса бозонов возникает по механизму Хиггса, будет завершено.

Для оперирования с петлевыми амплитудами необходим метод регуляризации, делающий их конечными, — оперирование с бесконечными выражениями опасно, так как может привести к ошибочным результатам. Дело в том, что амплитуды процессов, описываемых петлями, выражаются через интегралы по всему четырехмерному прост-

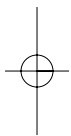
ранству импульсов виртуальных частиц (эту размерность дают три проекции импульса и энергия). Традиционно применяемый метод ограничения области интегрирования — ультрафиолетовое обрезание по модулю импульса интегрирования — непригоден, так как явно нарушается локальная калибровочная инвариантность на расстояниях, меньших обратного импульса обрезания. Лауреатами изобретен метод размерной регуляризации, в котором интегрирование по импульсу проводится в пространстве размерности $d \neq 4$ (точнее, $d=4-\epsilon$). При этом расходящиеся при $d=4$ интегралы становятся сходящимися (одновременно размерная регуляризация была предложена в квантовой теории поля в работах К.Боллини, Дж.Джамбиаджи и Дж.Ашмора).

Имея в руках адекватную регуляризацию, 'т Хофт и Велтман доказали независимость физических амплитуд от параметра ξ , т.е. полученные вычислением в R_ξ -калибровке выражения для амплитуд справедливы в физически прозрачной унитарной калибровке. Перенормируемость калибровочных теорий электрослабого взаимодействия с хиггсовским механизмом генерации масс векторных бозонов была доказана.

В своих дальнейших работах Велтман получил ряд ярких результатов, анализируя "петлевые" поправки в электрослабой теории. В 1977 г. он заметил, что петли с виртуальными кварками приводят к поправкам, пропорциональным квадрату массы наиболее тяжелого кварка. Точные измерения параметров промежуточных Z - и W -бозонов на ускорителях LEP-I в ЦЕРНе, SLC и Тэватрон в США, которые были проведены в начале 90-х годов, позволили экспериментально определить величины петлевых поправок; при этом сильная квадратичная зависимость поправок от массы t -кварка позволила предсказать с неплохой точностью в 20—40 ГэВ его массу на основе формулы, полученной Велтманом. Это предсказание подтвердилось, когда в 1994—1995 гг. t -кварк был обнаружен на Тэватроне. В настоя-

³ О группах симметрии, калибровочной симметрии, а также бозоне Хиггса, спонтанном нарушении симметрии и других связанных вопросах см.: Казаков Д.И. Ждем новых открытий в физике элементарных частиц! // Природа. 1999. №9. С.14—25.

⁴ Пропагатор — функция, описывающая распространение виртуальных элементарных частиц.



щее время из анализа спектров продуктов распада t -кварка получено $m_t=175\pm 5$ ГэВ.

Последней не открытой до сегодняшнего времени частицей Стандартной Модели остается бозон Хиггса. Измерение его массы очень важно, так как, если он легкий, $m_H \leq 140$ ГэВ, то наличие тяжелого t -кварка делает за счет петлевых поправок хиггсовский потенциал нестабильным. Для стабилизации потенциала нужны новые тяжелые бозоны; они естественным образом возникают в суперсимметричных обобщениях Стандартной Модели. Согласно еще одному велтмановскому результату, зависимость однопетлевых электрослабых поправок от массы бозона Хиггса логарифмическая, поэтому, несмотря на высокую точность экспериментальных данных, мы не можем найти по ним массу бозона Хиггса с требуемой точностью. Вот что мы имеем сегодня: $m_H=92^{+78}_{-45}$ ГэВ, $m_H < 245$ ГэВ с 95%-м уровнем достоверности. Прямые поиски на ускорителе LEP-II дают: $m_H > 95$ ГэВ с 95%-м уровнем достоверности. Если хиггсовский бозон легче 110 ГэВ, то в течение ближайшего года он будет обнаружен на ускорителе LEP-II, работающем на пределе своих возможностей, и это станет сильным аргументом в пользу суперсимметрии. Если же он тяжелее, то можно ожидать его открытия после 2005 г. на строящемся ускорителе LHC.

Много замечательных результатов было получено и 'т Хофтом после доказательства перенормируемости электрослабой теории. Перечислим некоторые из них. Он был среди первых исследователей на Западе, установивших в 1972—1973 гг., что с ростом переданного импульса константа взаимодействия в теориях Янга—Миллса падает⁵. Это открытие позже привело к созданию современной теории

сильного взаимодействия, основанной на группе $SU(3)_c$.

В 1974 г. 'т Хофт одновременно с А.М.Поляковым нашел решение классических уравнений Янга—Миллса с хиггсовским механизмом генерации масс, описывающее магнитный монополь. Вскоре после этого, в 1975 г., в работе А.А.Белавина, А.М.Полякова, А.С.Шварца и Ю.С.Тюпкина было получено решение классических уравнений Янга—Миллса, локализованное в четырехмерном пространстве. В 1976 г. 'т Хофт рассмотрел поведение фермионов с учетом этого решения (названного им инстантоном — общеупотребительное теперь название). Установлено, что инстантоны генерируют знаменитое эффективное взаимодействие кварков, пропорциональное детерминанту матрицы полей кварков. В электрослабой теории это взаимодействие приводит к несохранению барионного и лептонного чисел по отдельности, что влечет за собой важные космологические следствия. Амплитуды вызываемых инстантонами процессов пропорциональны $\exp(-1/g^2)$, где g — константа связи. В задаче о массах адронов g не мала и инстантонные амплитуды не подавлены. Это позволяет разгадать одну из загадок физики элементарных частиц — большое значение массы η' -мезона, наблюдаемое в эксперименте. Малость заряда в электрослабой теории делает инстантонные эффекты ненаблюдаемыми в настоящее время. Вместе с тем в ранней Вселенной существовали условия, когда переходы с нарушением барионного и лептонного чисел не были подавлены⁶.

Даже такое конспективное пе-

речисление основных результатов показывает, насколько существен вклад лауреатов в создание современной калибровочной теории квантованных полей и какую роль играют эти проблемы в нашем познании Вселенной.

© **М.И.Высоцкий**,
доктор физико-математических наук
Институт теоретической и экспериментальной физики
Москва ■

⁵ В СССР это впервые обнаружили для электрического заряда векторного бозона В.С.Ваняшин и М.В.Терентьев в 1965 г., а в 1968 г. И.Б.Хриплович получил правильное выражение для этой зависимости.

⁶ О новых экспериментах, планирующихся для прояснения тайны барионной асимметрии, см.: Галактионов Ю.В., Тинг С., Черноплеков Н.А. // Поиски антивещества в космосе: эксперимент АМС // Природа. 1999. №12. С.3—11.