

Как удалось обойти теорему Голдстоуна

П.У. Хиггс

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2013 г.)

PACS numbers: 01.30.Bb, 11.15.-q, 12.15.-y

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510g.1059

Содержание

1. Введение (1059).
2. Нарушение симметрии (1059).
3. Теорема Голдстоуна (1059).
4. Можно ли обойти теорему Голдстоуна? (1059).
5. Как обойти теорему Голдстоуна (1060).
6. Постскриптум (1060).

1. Введение

Моя история началась в 1960 г., когда я был назначен преподавателем математической физики в Университет Эдинбурга. Перед этим назначением мне предложили помочь местному оргкомитету на первой летней школе по физике, устраиваемой университетами Шотландии, которая должна была состояться в июле. Я был назначен стюардом Школы и в мои обязанности входило обеспечение участников Школы вином за ужином.

В число слушателей Школы входило четверо участников, которые допоздна задерживались в общей комнате колледжа Аббатства Ньюбаттл (в крипте бывшего монастыря), увлечённо обсуждая теоретическую физику, так что на следующее утро с трудом просыпались к первой лекции. Это были доктор Н. Кабиббо (N. Cabibbo) (Рим), доктор С.Л. Глэшоу (S.L. Glashow) (ЦЕРН), Д.В. Робинсон (D.W. Robinson) (Оксфорд) и М.Дж.Г. Вельтман (M.J.G. Veltman) (Утрехт). Много лет спустя Н. Кабиббо признался мне, что их долгие разговоры черпали своё вдохновение в бутылках с вином, собранных за ужином и спрятанных за старыми дедушкиными часами в крипте.

Я в этих дискуссиях участия не принимал, так как у меня были дела поважнее (сохранить запасы оставшегося вина). Именно поэтому я ничего не узнал про работу Глэшоу об электрослабом объединении, которая уже тогда была написана.

2. Нарушение симметрии

В течение первого года преподавания я был занят поиском достойной темы для исследования. В первые четыре года своего пребывания в Лондоне я несколько отдалился от физики частиц и заинтересовался квантовой гравитацией. Со студенческих лет я был очарован симметрией, особенно приближённой симметрией (сейчас мы называем её симметрией ароматов) физики частиц.

В 1961 г. я прочитал работы Намбу и Голдстоуна о нарушении симметрии в физике частиц, основанные на аналогии с теорией сверхпроводимости. (Модели Намбу были

инспирированы теорией Бардина, Купера и Шриффера, которая основана на бозе-конденсации куперовских пар электронов: Голдстоун использовал скалярное поле с потенциалом "доньшка бутылки вина", чтобы получить бозе-конденсат, как это было сделано в оригинальной теории Гинзбурга – Ландау.) Меня привлекла концепция спонтанного нарушения симметрии, которая является точной в уравнениях динамики, но оказывается нарушенной в наблюдаемых явлениях из-за асимметрии основного состояния ("вакуума" в квантовой теории поля).

Большинство теоретиков в области физики частиц не обратили тогда должного внимания на идеи Намбу и Голдстоуна. Квантовая теория поля была тогда не в моде: несмотря на успехи в квантовой электродинамике, она не могла объяснить ни слабые, ни сильные взаимодействия.

Кроме того, физика конденсированного состояния воспринималась в то время теоретиками в области частиц как совершенно далёкая область. Как сказал в 1960 г. на семинаре в Корнелльском университете Виктор Вайскопф (со слов Роберта Браута):

"Физика частиц находится в таком застое, что ей следует взять что-нибудь новое из физики многочастичных состояний — например, теорию БКШ. Может быть, что-нибудь путное из этого и выйдет".

3. Теорема Голдстоуна

Подтверждению гипотезы Намбу – Голдстоуна мешало одно обстоятельство. Намбу показал, как спонтанное нарушение киральной симметрии могло бы объяснить наличие массы у частиц с полущелым спином, таких как протон и нейтрон, но эта теория предсказывала безмассовые частицы с нулевым спином (пионы?), что противоречило экспериментальным данным. (Как отметил Вайнберг, такие частицы доминировали бы в энергии излучения звёзд.) Голдстоун утверждал, что такие безмассовые частицы всегда будут результатом флуктуаций поля в направлении "долины" потенциала с формой дна винной бутылки.

В 1962 г. в работе, озаглавленной "Нарушение симметрии", Голдстоун, Салам и Вайнберг доказали "теорему Голдстоуна": "Если в явно лоренц-инвариантной квантовой теории поля существует непрерывная симметрия, оставляющая инвариантным лагранжиан, то либо вакуумное состояние также инвариантно, либо должны существовать безмассовые частицы с нулевым спином".

Казалось, что эта теорема положила конец гипотезе Намбу.

4. Можно ли обойти теорему Голдстоуна?

В 1963 г. Фил Андерсон, занимавшийся теорией конденсированных сред, отметил, что в сверхпроводнике под действием

кулоновских сил голдстоуновская мода превращается в массивный "плазмон", который является продольной модой поперечных электромагнитных мод, также массивных. Андерсон заметил, что "проблема с нулевой массой у Голдстоуна не настолько серьезна, так как, вероятно, можно не учитывать её в сравнении с такой же проблемой нулевой массы в теории Янга–Миллса". Однако он не показал несправедливость теоремы Голдстоуна и не предложил *ни одной* релятивистской модели. Поэтому теоретики, занимающиеся физикой частиц (в том числе и я), отнеслись к его высказыванию скептически.

В марте 1964 г. Абэ Кляйн и Бен Ли предложили изменить одно уравнение, решающее для доказательства теоремы Голдстоуна даже для релятивистской теории, добавив ещё один член, как в теории конденсированных сред. Но уже в июне Уолли Гилберт (в то время он переходил от занятий теоретической физикой к проблемам молекулярной биологии, за работу над которыми потом получил Нобелевскую премию по химии) исключил этот член как нарушающий лоренц-инвариантность.

Именно в это время я начал свои исследования.

5. Как обойти теорему Голдстоуна

Я прочитал работу Гилберта 16 июля 1964 г. Она была опубликована месяцем ранее, но в то время журнал *Physical Review Letters* поступал в библиотеку Эдинбургского университета морским путём. Я сильно расстроился, так как из этой работы следовало, что обойти теорему Голдстоуна никак нельзя. Однако ближе к выходным я вспомнил, что уже видел подобное кажущееся нарушение лоренц-инвариантности, и не где-нибудь, а в самой квантовой электродинамике, и оно было сформулировано Джулианом Швингером.

Квантовая электродинамика инвариантна относительно калибровочных преобразований, поэтому для правильного определения квантового формализма калибровка должна быть сначала зафиксирована. Самым модным тогда было использовать калибровку Лоренца, которая находится в явном согласии с теорией относительности. Однако у такой калибровки были и недостатки, из-за чего Швингер предпочёл кулоновскую калибровку, явно конфликтующую с теорией относительности. Тем не менее было хорошо известно, что выбор кулоновской калибровки не приводит ни к каким противоречиям между предсказаниями и теорией относительности.

Сам Швингер ещё в 1962 г. написал работы, в которых развенчал миф о том, что одной лишь калибровочной инвариантности достаточно для безмассовости фотона. Он привёл примеры калибровочных теорий с *массивным* фотоном, но не описал явно их динамику.

В выходные 18–19 июля мне и пришла в голову мысль, что способ, которым Швингер формулирует калибровочные теории, подрывает аксиомы, на которых основана теорема Голдстоуна. Так что калибровочная теория могла спасти гипотезу Намбу.

В течение следующей недели я написал об этом короткую статью. Я послал её в *Physics Letters* 24 июля, и она была принята к публикации.

К тому времени я вывел (классические) уравнения поля для простейшего случая, способного проиллюстрировать результат ввода электромагнитного взаимодействия в простейшую скалярную модель Голдстоуна. Стало очевидным, что в этой модели безмассовая голдстоуновская мода становится продольной поляризацией массивного векторного (со спином 1) "фотона", как и предлагал в своё время Андерсон.

31 июля я послал в *Physics Letters* свою вторую небольшую статью с кратким описанием этой модели. Эта статья была

отвергнута, а редактор (из ЦЕРН) предложил мне написать более подробную работу и опубликовать её в *Il Nuovo Cimento*.

Я был возмущён. Мне показалось, что рецензент не понял смысла моей статьи. (Позже один мой друг, бывший в то время месяц в ЦЕРНе, сказал мне, что работавшие там теоретики решили, что всё это не имеет никакого отношения к физике частиц.) Кроме того, мне казалось странным, что предыдущую статью приняли, а её более физическое продолжение — нет.

Я решил дополнить статью некоторыми замечаниями о возможных физических следствиях теории и послал уже пересмотренный вариант через Атлантику в *Physical Review Letters*. В дополнении к этой статье было следующее замечание: "Необходимо отметить, что важной особенностью такого рода теории является предсказание существования неполных мультиплетов скалярных и векторных бозонов".

Дополненная рукопись поступила в редакцию журнала *Physical Review Letters* 31 августа и была принята в печать. Рецензент попросил меня включить в свою работу комментарий о статье Энглера и Браута (поступила в редакцию 22 июня), которая была опубликована как раз в тот день. До этого момента я не знал об их работе, но как только получил её копию, то добавил примечание в свою статью. Двадцать лет спустя, в 1984 г., на одной из конференций я встретил Намбу, и он признался, что рецензировал обе работы.

6. Постскриптум

Прошло время, прежде чем работы Энглера и Браута и моя (а также работа Гуральника, Хагена и Киббла, вышедшая несколько позже) получили признание.

Более подробная статья (1966 г.) была написана мной в 1965 г. в Чепел-Хилле (штат Северная Каролина), где я проводил академический отпуск по приглашению Брайса Девитта, занимаясь квантовой гравитацией. Я послал препринт своей статьи Фриману Дайсону и получил положительный отзыв. Он пригласил меня выступить с докладом в Институте передовых исследований в Принстоне. И там в марте 1966 г. мне пришлось выступать перед аудиторией, состоящей из приверженцев аксиоматической квантовой теории поля, всё ещё полагающих, что у теоремы Голдстоуна не может быть исключений.

На следующий день я выступил в Гарварде (по приглашению Стенли Дезера) перед другой скептически настроенной аудиторией, и Уолли Гильбертом в том числе. Я пережил и это. После семинара Шелли Глэшоу сделал мне комплимент по поводу моей "миленькой модели", но он не увидел её актуальности для своей теории слабых электромагнитных взаимодействий — какая упущенная возможность!

Как и Намбу, нам шестерым (опубликовавшим свои работы в 1964 г.) казалось, что наши идеи должны были найти применение в нарушении симметрии *ароматов* в теории сильных взаимодействий, но этого не произошло. Пришлось ждать теории Вайнберга и Салама 1967 г., в которой они нашли правильное применение нашей модели.

Прошло ещё четыре года, прежде чем Герард 'т Хофт, обобщая гипотезу Вельтмана, доказал перенормируемость таких теорий. А ещё через два года обнаружили существование слабых нейтральных токов, что подтвердило правильность модели электрослабого объединения, предложенной Глэшоу. И, наконец, в 1976 г. Эллис, Гайард и Нанопулос из ЦЕРН рекомендовали начать эксперименты по поиску массивных скалярных бозонов, предсказываемых нашей теорией.

Перевёл с английского К.А. Постнов