

Предыстория хиггсовского бозона *

П. Хиггс

PACS numbers: 01.65.+g, 11.15.-q, 12.15.-y

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201510h.1061

Содержание

1. Истоки в физике конденсированных сред (1061).
 2. Спонтанное нарушение симметрии в физике частиц (1061).
 3. Хиггсовские бозоны в реалистических теориях (1062).
 4. Начало поисков (1062).
- Список литературы (1062).

1. Истоки в физике конденсированных сред

В квантовой теории поля существование хиггсовского бозона предсказывалось в классе квантовых теорий поля, где симметрия поля относительно преобразований группы Ли спонтанно нарушается асимметричным вакуумным состоянием. Это квант определённых флуктуаций параметра порядка.

Такое спонтанное нарушение симметрии было впервые предложено в 1960 г. как характерная особенность теорий элементарных частиц, однако гораздо раньше об этом говорилось в контексте теории конденсированных сред. Пример с ферромагнетизмом, описанный Гейзенбергом [1] в 1928 г., — наиболее ранний из всех; спины соседних электронов взаимодействуют друг с другом, и основным состоянием системы становится конфигурация, в которой все спины ориентированы параллельно в одном направлении (энергетически выгодном по сравнению с антипараллельной ориентацией), тем самым нарушая вращательную симметрию динамики.

Другим примером, более близким к нарушению симметрии, интересной для физики элементарных частиц, является сверхтекучесть. В 1947 г. Боголюбов [2] рассмотрел бозе-конденсацию бесконечной системы нейтральных бесспиновых бозонов, которые взаимодействуют друг с другом через короткодействующие силы взаимного отталкивания. Такой конденсат характеризуется комплексной "макроскопической волновой функцией" (параметром порядка). Квадрат модуля этой функции является мерой наблюдаемой плотности конденсата, а её аргумент (ненаблюдаемый) является произвольной величиной, нарушая тем самым симметрию динамики при поворотах волновых функций бозона на диаграмме Аргана. Близкодействия представлены во втором квантованном гамильтониане членом, прямо пропорциональным квадрату плотности частиц, т.е. четвёртой степенью компонент скалярного квантового поля.

Третий пример, ставший моделью для теоретиков в области элементарных частиц, — это сверхпроводимость. В 1950 г. Гинзбург и Ландау [3] показали, что это явление можно объяснить бозе-конденсацией электрически заряженных скалярных бозонов. В то время казалось, что кандидатов в такие бозоны

нет среди известных компонентов металлов или сплавов. Только позднее, после того как Купер показал, каким образом можно связать два электрона в пару, представляющую собой бесспиновую бозе-частицу, теория сверхпроводимости, сформулированная Бардиным, Купером и Шриффером в 1957 г. [4], стала жизнеспособной. Таким образом, теория Гинзбурга – Ландау приобрела статус эффективной теории, которая оставалась верной и в условиях, когда составная структура куперовских пар была не важна.

По аналогии со сверхтекучестью макроскопическая волновая функция конденсата, обуславливающего сверхпроводимость, нарушает симметрию динамики системы при вращениях амплитуды на диаграмме Аргана. Однако в случае сверхпроводимости бозоны электрически заряжены, и эту симметрию можно обобщить на калибровочную инвариантность в электродинамике.

Энергетическая щель в фермионном спектре в теории БКШ пропорциональна модулю волновой функции конденсата. Возможность существования флуктуаций, для которых эта величина перестаёт быть постоянной и становится волнообразной в пространстве-времени, была впервые получена из теории БКШ Литтлвудом и Варма [5] в 1981 г. и предложена в качестве объяснения загадочного свойства рамановского спектра в сверхпроводящем NbSe_2 , измеренного за год до этого Соорьякумаром и Кляйном [6].

2. Спонтанное нарушение симметрии в физике частиц

В 1960 г. Намбу [7], вдохновлённый теорией БКШ, впервые предложил релятивистские модели генерации массы в физике элементарных частиц. Его идея состояла в том, что энергетическая щель между однофермионным состоянием и заполненными дираковскими состояниями с отрицательной энергией должна возникать благодаря наличию некоторого скалярного конденсата, как в теории БКШ, в которой заполненные энергетические полосы являются аналогом "моря Дирака". Существование такого конденсата нарушало бы симметрию модели при преобразованиях группы Ли, которая в физике частиц была бы неабелевой группой, включающей группу $U(1)$ в качестве подгруппы, отвечающей за сохранение электрического заряда.

Хотя Намбу был вдохновлён теорией БКШ, но предложенные им адронные модели, в отличие от этой теории, не обладали локальной калибровочной инвариантностью. Вскоре стало ясно, что как в этих моделях (содержащих элементарные скалярные поля), так и в моделях, изученных Голдстоуном [8] (1961), всегда существуют флуктуации, соответствующие бесспиновым частицам с нулевой массой (голдстоуновские бозоны). Связь между спонтанным нарушением симметрии и голдстоуновскими бозонами в релятивистских теориях была формально доказана Голдстоуном, Саламом и Вайнбергом [9] в 1962 г. Экспериментальные свидетельства против существования таких частиц в реальном мире подвергли бы сомнению правильность идей Намбу.

Между 1962 и 1964 гг. в литературе велись дебаты, можно ли обойти теорему Голдстоуна. В 1963 г. Андерсон [10] указал, что в сверхпроводниках из-за электромагнитного взаимодействия

* Статья впервые была опубликована в журнале *Comptes Rendus Physique* том 8, вып. 9, с. 970–972, ноябрь 2007 года [Higgs P "Prehistory of the Higgs boson" *C.R. Physique* 8 970–972 (2007)].

голдстоуновская мода (флуктуации аргумента волновой функции скалярного конденсата) становится массивной и соответствует продольной поляризации дополнительно к двум поперечным (тоже массивным) электромагнитным модам. (Это было первое следствие механизма, который сейчас называют "механизмом Хиггса".) Он заметил, что в физике элементарных частиц "проблема гольдстоуновской нулевой массы не так уж серьёзна, поскольку ей, вероятно, можно пренебречь по сравнению с аналогичной проблемой нулевой массы в теории Янга–Миллса". Его замечание в ведущихся тогда дебатах не привлекло должного внимания теоретиков физики частиц, и моего в том числе, главным образом потому, что он не указал на ошибку в доказательстве теоремы Гольдстоуна и не обсуждал явно никакие релятивистские модели.

Это противоречие, наконец, разрешилось в июле 1964 г., когда я понял, что теории с локальной калибровочной инвариантностью нарушают одну из аксиом (они должны быть лоренц-ковариантными), на которой основана теорема Гольдстоуна 1962 г. (Это прозрение было вызвано моим знакомством с работами Швингера по калибровочной инвариантности [11].) Моя короткая статья о том, как можно обойти теорему Гольдстоуна в калибровочных теориях, была впоследствии опубликована в *Physics Letters* [12].

К концу июля 1964 г. я также разработал простейшую теоретико-полевую модель, которая количественно учитывала моё утверждение. Эта модель сейчас известна как модель Хиггса, но позже я понял, что это просто релятивистская версия теории Гинзбурга–Ландау, с которой я в то время не был знаком. К сожалению, моя вторая статья была отклонена из *Physics Letters*. (Позднее мой коллега, который был в ЦЕРН в то время, когда моя статья рассматривалась одним из редакторов журнала, рассказал, что читавшие её рецензенты не думали, что она имеет отношение к физике частиц.)

Именно в период доработки этой статьи, которую я собирался направить в *Physics Review Letters*, я добавил параграф, привлекающий внимание к характерной особенности теорий со спонтанно нарушенной симметрией. В частности, я указал, что в этих теориях всегда должны присутствовать массивные скалярные возбуждения, которые остаются после того, как гольдстоуновские моды нарушающего симметрию скалярного мультиплетта взаимодействуют с каким-нибудь калибровочным полем и порождают продольную компоненту массивных векторных бозонов. Теперь эти скалярные флуктуации известны как хиггсовские бозоны.

Моя доработанная статья была принята к публикации в *Physical Review Letters* [13], однако рецензент привлёк моё внимание к статье, полученной редакцией этого журнала на месяц раньше. Это была работа Энглера и Браута [14] (основанная на исследованиях, проведённых прежде моих), в которой "хиггсовский механизм" обсуждался гораздо подробнее, чем в моей статье. Наши работы были комплементарны. Энглер и Браут изучали в древесном приближении пропагатор векторного поля в спонтанно нарушенных калибровочных теориях методом диаграмм Фейнмана, в то время как я отталкивался от классической лагранжевой теории поля.

Спустя двадцать лет, когда я впервые встретился с Намбу, он признался мне, что был рецензентом обеих статей. Он также обратил моё внимание на то, что пример БКШ-аналога хиггсовского бозона был найден на несколько лет раньше в работах [5, 6].

3. Хиггсовские бозоны в реалистических теориях

Браут и Энглер и я потратили значительное время в безуспешных попытках применить развитые идеи к нарушению адронной симметрии ароматов, как это ранее делал Намбу (в 1960-х годах было модно рассматривать нарушение этих симметрий).

Прогресс был достигнут только в 1967 г., когда Вайнберг [15] и Салам [16] независимо поняли, что спонтанно нарушенной

оказывается симметрия группы $SU(2) \times U(1)$ в модели Глэшоу [17] для лептонных электрослабых взаимодействий. Прошло ещё несколько лет, прежде чем в 1971 г. 'т Хофт [18] завершил начатую Вельтманом программу по исследованию перенормируемости теорий Янга–Миллса, что убедило теоретиков в жизнеспособности электрослабой теории и других теорий такого типа.

В 1972 г. на конференции по физике высоких энергий в Фермилабе работа 'т Хофта вызвала шквал активности теоретиков, изучающих альтернативные теории со спонтанным нарушением симметрии для электрослабых и других взаимодействий. Резюмируя итоги секции по теории слабых взаимодействий, Б.В. Ли [19] упоминал моё имя в связи с разнообразными аспектами таких теорий, и особенно в связи с "хиггсовскими мезонами" (вклад Энглера и Браута был упомянут лишь мимоходом).

4. Начало поисков

В течение нескольких следующих лет, в особенности благодаря открытию слабых нейтральных токов в 1973 г., возник огромный интерес к экспериментальной проверке электрослабой теории. Во время разработки ускорителя LEP для производства Z и $W^\pm$ векторных бозонов и прецизионных тестов этой теории была опубликована работа, которая мягко подталкивала экспериментаторов не пренебрегать также и поисками хиггсовского бозона. Эллис, Гайяр и Нанопулос [20] делали такой вывод:

"Нам, быть может, следует напоследок принести извинения и сделать одно предупреждение. Мы извиняемся перед экспериментаторами за то, что у нас нет идей насчёт массы хиггсовского бозона, в отличие от случая с очарованными частицами, и за то, что мы не уверены в его связях (вероятно, слабых) с другими частицами. По этим причинам мы не хотим призывать к масштабным экспериментальным поискам хиггсовского бозона. Однако мы всё же отмечаем, что при постановке экспериментов, способных почувствовать хиггсовский бозон, исследователи должны знать о его возможных проявлениях".

Так начались поиски.

Список литературы

1. Heisenberg W Z. *Phys.* **49** 619 (1928)
2. Bogolubov N J. *Phys. USSR* **11** 23 (1947)¹
3. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д. *ЖЭТФ* **20** 1064 (1950)²
4. Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R *Phys. Rev.* **108** 1175 (1957)
5. Littlewood P B, Varma C M *Phys. Rev. Lett.* **47** 811 (1981)
6. Sooryakumar R, Klein M V *Phys. Rev. Lett.* **45** 660 (1980)
7. Nambu Y *Phys. Rev. Lett.* **4** 380 (1960)
8. Goldstone J *Nuovo Cimento* **19** 154 (1961)
9. Goldstone J, Salam A, Weinberg S *Phys. Rev.* **127** 965 (1962)
10. Anderson P W *Phys. Rev.* **130** 439 (1963)
11. Schwinger J *Phys. Rev.* **125** 397 (1962)
12. Higgs P W *Phys. Lett.* **12** 132 (1964)
13. Higgs P W *Phys. Rev. Lett.* **13** 508 (1964)
14. Englert F, Brout R *Phys. Rev. Lett.* **13** 321 (1964)
15. Weinberg S *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967)
16. Salam A, in *Elementary Particle Theory. Proc. 8th Nobel Symp., 19–25 May 1968, Lerum, Sweden* (Ed. N Svartholm) (New York: Wiley, Stockholm: Almqvist and Wiksell, 1968) p. 367
17. Glashow S L *Nucl. Phys.* **22** 579 (1961)
18. 'т Хофт G *Nucl. Phys.* **B 35** 167 (1971)
19. Lee B W, in *Proc. of the 16th Intern. Conf. on High-Energy Physics, 6–13 September 1972, Batavia, Ill., USA* (Eds J D Jackson, A Roberts) (Menlo Park, CA: SLAC, 1972)
20. Ellis J, Gaillard M K, Nanopoulos D V *Nucl. Phys. B* **106** 292 (1976)

¹ Электронная версия статьи размещена на сайте (примеч. ред.): http://ufn.ru/pdf/jphysussr/1947/11_1/3jphysussr19471101.pdf

² См. эту статью "К теории сверхпроводимости" в кн. Гинзбург В.Л. "О сверхпроводимости и сверхтекучести. Автобиография" (М.: Изд. физ.-мат. лит., 2006) с. 122, а также перевод этой статьи на английский язык в кн. Ginzburg V.L. "On Superconductivity and Superfluidity. A Scientific Autobiography" (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009) p. 113. (Примеч. ред.)