



И. Е. ПРИСЬ

БОЗОН ХИГГСА,
КВАНТОВЫЕ СТРУНЫ
И ФИЛОСОФИЯ
ФИЗИКИ

УДК 14
ББК 87
П 771

Прись И. Е.

П 771 Бозон Хиггса, квантовые струны и философия физики /
И. Е. Прись. – СПб.: Алетейя, 2021. – 192 с. – (Тела мысли).

ISBN 978-5-00165-271-7

Книга состоит из четырех частей. В первой части дается общее представление о бозоне Хиггса и механизме спонтанного нарушения симметрии. Поднимаются философские вопросы относительно понятия научной теории, концепта частицы, классификации и реальности элементарных частиц и, в частности, реальности виртуальных частиц. Во второй части рассматривается вопрос онтологии теорий струн, связанных между собой преобразованиями дуальности. Дуальные теории определяются как теории, которые являются инстанциациями одного и того же витгенштейновского правила – понятие, извлекаемое из философии позднего Витгенштейна. В третьей части показано, каким образом конструктивный эмпирицизм Бас ван Фраассена может быть преобразован в контекстуальный (критический) научный реализм – позицию, отстаиваемую на протяжении всей книги. В четвертой части устраняются проблемы, с которыми сталкиваются репрезентационализм, реляционизм, перспективизм и феноменологический подход в определении понятия научных данных.

УДК 14
ББК 87

ISBN 978-5-00165-271-7



© И. Е. Прись, 2021
© Издательство «Алетейя» (СПб.), 2021

Часть I.

ФИЗИКА И МЕТАФИЗИКА БОЗОНА ХИГГСА

В первой части дается общее представление о бозоне Хиггса и механизме спонтанного нарушения симметрии. Объясняется историческая роль теории сверхпроводимости в открытии механизма Хиггса в физике элементарных частиц. Поднимаются философские вопросы относительно понятия научной теории, концепта частицы, классификации и реальности элементарных частиц и, в частности, реальности виртуальных частиц. Так называемый метафизический реализм отвергается в пользу реалистической позиции, которую можно найти, например, у позднего Витгенштейна.

§ 1. Стандартная модель и бозон Хиггса

В начале 1970-х годов было в основном завершено построение квантовой калибровочной теории элементарных частиц — Стандартной модели (СМ). Это теория электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий, то есть трех из четырех известных в природе взаимодействий, исключая гравитацию. Хотя теория не является полной, до сих пор она в основном успешно объясняла все известные явления микромира. Исходная версия

СМ не могла объяснить лишь открытые позже ненулевую массу и осцилляцию нейтрино. Модифицированная версия СМ позволила, однако, объяснить и эти явления.

СМ имеет группу калибровочной симметрии $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Группой глобальной внешней симметрии СМ является группа Пуанкаре. СМ — ренормализуемая теория, то есть расходимости, которые возникают в результате применения теории возмущений, могут быть устранены благодаря переопределению входящих в лагранжиан параметров. Ренормализуемость — следствие отсутствия аномалий, то есть нарушений классических симметрий при квантовании.

У СМ есть свои проблемы. В частности, она содержит около 20 свободных параметров, не является полной теорией — то есть не включает в себя гравитацию¹ и не объясняет существование темной материи и темной энергии, — некоторые ее параметры имеют неестественно малое значение (это «проблема естественности»), является эффективной теорией — то есть теорией, которая описывает физику в лишь определенных энергетических пределах и с определенной точностью (при все более и более высоких энергиях эффективные теории замещаются более полными описаниями. Предполагается, что при сколь угодно высоких энергиях существует Теория Всего).

Электромагнитные и слабые взаимодействия объединяются в рамках электрослабой теории Вайнберга-Салама, имеющей группу калибровочных симметрий $SU(2) \times U(1)$. Эта теория — составная часть СМ. Электрослабые взаимодействия, однако, объединяются в рамках СМ с сильными взаимодействиями лишь достаточно формально. Единой теории электрослабых и сильных взаимодействий, имеющей простую калибровочную группу и объединяющей кварки и лептоны в один мультиплет, — теории Большого объединения — пока что не существует. Такая теория, а также дополнительные измерения и суперсимметрия могут оказаться составляющими более полной теории, чем СМ.

¹ СМ, объединенная с квантовой гравитацией, неренормализуема. Расходимости возникают в сингулярностях даже в случае объединения СМ с классической гравитацией.

Многие проблемы, возникающие при объединении СМ и гравитации, решаются в рамках теории струн. В частности, проблема неренормализуемости теории решается благодаря тому, что взаимодействия струн не являются точечными.

Предсказываемые теорией Вайнберга-Салама электрослабые бозоны — переносчики слабых взаимодействий — были открыты в 1983 году. Для окончательного завершения объединения электромагнитных и слабых взаимодействий оставалось открыть предсказываемый теорией бозон Хиггса.

4 июля 2012 года в Церне (Швейцария) было объявлено об открытии (обнаружении с вероятностью 99,9999 % — это статистически значимый результат) незаряженного бозона, имеющего массу порядка 125–126 *GeV* и очень похожего на бозон Хиггса — единственную предсказываемую СМ частицу, которая в течение 48 лет после ее предсказания оставалась неоткрытой.

Точные свойства открытой частицы еще следовало установить. В частности, следовало с достоверностью установить, что частица скалярная, то есть имеет нулевой спин и положительную четность², так как, исходя из того, каким образом частица распалась, можно было лишь заключить, что ее спин либо нулевой, либо равен двум. Это было сделано в следующем году.

Хотя прямого нарушения СМ или выхода за ее пределы обнаружено не было, масса открытого бозона оказалась слишком малой. С точки зрения СМ она должна быть гораздо большей. Есть и другие трудности, которые указывают на возможность существования расширенной СМ.

Может, таким образом, оказаться, что открытая частица не в точности бозон Хиггса, предсказываемый простейшей моделью, то есть СМ. (Одно из космологических следствий физики элементарных частиц состоит в том, что если открытый бозон окажется в точности тем, который предсказывается СМ, то наша Вселенная метастабильна, то есть через достаточно длительный период времени она претерпит изменения [Lincoln 2013].) Например, минимальная суперсимметричная СМ предсказывает

² Положительная четность частицы означает инвариантность ее волновой функции относительно операции инверсии пространства (зеркального отражения).

существование пяти «бозонов Хиггса», один из которых имеет свойства бозона Хиггса в рамках СМ.

Гипотетическая суперсимметрия устанавливает связь между частицами материи (фермионами) и «силами» (калибровочными бозонами). Эта симметрия, предполагающая, что у каждого фермиона/бозона имеется суперпартнер — бозон/фермион, — единственная симметрия, которая может быть естественным образом добавлена к СМ. Она совместима с единой теорией всех взаимодействий и находится в согласии с измеренным значением массы бозона Хиггса. (Суперсимметрия также может объяснить существование так называемой темной материи во Вселенной, поскольку она предсказывает существование тяжелой стабильной частицы, которая лишь незначительно взаимодействует с окружающей материей.)

Бозон (или поле³) Хиггса — массивная⁴ нейтральная бесспиновая (точнее, скалярная) элементарная частица (квант поля Хиггса) — единственная, известная на сегодняшний день, бесспиновая элементарная частица, — которая взаимодействует со всеми массивными частицами, то есть со всеми частицами, за исключением фотонов и глюонов, и имеет очень короткое время жизни. Ее существование предсказывается в рамках механизма спонтанного нарушения симметрии (см. § 6), который был введен в физику частиц в 1964 году почти одновременно тремя группами ученых: Р. Браутом и Ф. Энглером [Englert 1964; 2015], П. Хиггсом [Higgs 1964A; 1964B] и Дж. Гуралником [Guralnik 1964A; 1964B], К. Хагеном и Т. Кибблом.

Эксплицитно, в нескольких словах в конце своей двухстраничной статьи, новую частицу предсказал лишь Хиггс [Higgs 1964B]. В своей статье [Higgs 1964B] он представил механизм спонтанного нарушения симметрии, не обращаясь к теории вто-

³ Классическая физика имеет дело либо с частицами, либо с волнами. Квантовое поле — основное понятие квантовой теории поля — представляет собой синтез классических понятий волны и частицы. Квантовое поле заполняет все пространство. В результате измерения его энергия локализуется в виде кванта поля. Квантовое поле — последняя физическая реальность.

⁴ Для сравнения: фотон не имеет массы покоя. Протон в 1836 раз тяжелее электрона. Масса открытого бозона Хиггса приблизительно в 133 раз больше массы протона, то есть примерно такая же, как масса тяжелого атома.

рично квантованных полей, а рассматривая квантовое возмущение классического поля в окрестности классического вакуума⁵.

Бозон Хиггса обладает необычными свойствами. В отличие, например, от однозначного вакуумного состояния электромагнитного поля, которое равно нулю и, следовательно, инвариантно относительно калибровочных преобразований $U(1)$ электромагнитного потенциала, вакуумное состояние поля Хиггса, вообще говоря, неоднозначная отличная от нуля постоянная.

При достаточно высокой температуре имеется целое семейство вакуумных состояний поля Хиггса, которые в простейшем случае связаны между собой преобразованиями группы симметрии $U(1)$. Каждое фиксированное вакуумное состояние не является, таким образом, калибровочно инвариантным. При понижении температуры в результате фазового перехода происходит фиксация одного из вакуумных состояний поля Хиггса и, соответственно, спонтанное нарушение калибровочной инвариантности. При этом сама теория, то есть исходный лагранжиан и уравнения поля, остаются калибровочно инвариантными.

Физический вакуум — основное состояние системы, то есть состояние с минимальной энергией, — не является вакуумом в обыденном смысле. (При этом классический вакуум и соответствующий квантовый вакуум не всегда совпадают.) С точки зрения современной физики абсолютная пустота не существует. Вакуум имеет бесконечно богатую внутреннюю (можно сказать, имплицитную) структуру, которая, например, проявляется в постоянном рождении и уничтожении виртуальных частиц.

Вакуум, в частности, содержит универсальное скалярное поле Хиггса, имеющее некоторую постоянную величину и заполняющее всю Вселенную (как сказано выше, отличную от нуля фиксированную постоянную величину поле Хиггса приобретает лишь в результате спонтанного нарушения симметрии). На первоначальной, очень короткой стадии ее существования сразу же после Большого взрыва, составляющей малую долю секунды, все элементарные частицы были безмассовыми. Наличие у них мас-

⁵ В 2013 году за теоретическое открытие механизма, который помогает понять происхождение массы субатомных частиц, П. Хиггс и Ф. Энглер получили Нобелевскую премию по физике.

сы является результатом их взаимодействия с вакуумным полем Хиггса при достаточно низкой температуре Вселенной — температуре ниже температуры фазового перехода, — когда последнее является достаточно «плотным» [Vargau 2013].

Существуют различные научно-популярные образные представления этого явления. Например, поле Хиггса представляют в виде снежного покрова постоянной высоты, а элементарные частицы как скользящие по поверхности этого покрова. Взаимодействие между частицей и полем Хиггса и, соответственно, возникающая эффективная масса частицы, тем больше, чем больше ее поверхностное трение. Безмассовый фотон представляют как скользящий без трения.

В рамках другого образного представления приобретение той или иной эффективной массы изначально безмассовой частицей объясняют, используя в качестве аналогии движущийся в жидкости предмет. Жидкость играет роль поля Хиггса, а движущийся в ней предмет — роль элементарной частицы. Возникающая эффективная масса предмета-частицы тем больше, чем больше сопротивление жидкости⁶.

Не все элементарные частицы приобрели массу одновременно. Что касается, например, калибровочных бозонов, то считается, что изначально, когда температура Вселенной была очень высокой, существовало лишь одно-единственное взаимодействие, объединяющее в себе гравитационное, сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия. В результате охлаждения Вселенной, которое сопровождалось серией последовательных фазовых переходов, это единство все больше и больше нарушалось. Сначала независимым от остальных стало гравитационное взаимодействие. Потом в качестве самостоятельного отделилось сильное взаимодействие. Наконец, произошло разделение слабого и электромагнитного взаимодействий.

Взаимодействуя с виртуальными хиггсовскими частицами, элементарные частицы приобретают ту или иную массу в зависимости от силы взаимодействия, которая тем больше, чем больше констан-

⁶ Эти метафоры, конечно, очень далеки от реальности. Интересную и достаточно точную аналогию механизма Хиггса в экономических терминах предложил в своей публичной лекции Ю. Малдасена [Maldacena 2012].

та соответствующего взаимодействия. Возникновение (различных) масс разрушает первоначальную симметрию между частицами. Масса самого бозона Хиггса, который есть реальная, а не виртуальная, флуктуация (или «складка») вакуума и которую Стандартная модель не позволяет предсказать, также возникает в результате фазового перехода или спонтанного нарушения симметрии.

Существование вездесущего поля Хиггса, взаимодействия между ним и элементарными частицами, объясняет происхождение массы элементарных частиц — масса, таким образом, не является внутренней характеристикой частиц, как это считалось со времен Галилея, — а значит, и происхождение массы во Вселенной, но не объясняет прямым образом массу составных частиц, таких, например, как нуклоны (напротив, например, масса электрона полностью объясняется механизмом Хиггса), то есть не объясняет всю существующую во Вселенной массу⁷.

Хиггс медленно движется и, взаимодействуя с другими частицами, быстро распадается. Он может распадаться различными способами с разной вероятностью. Например, с вероятностью 51 % Хиггс распадается на два b -кварка, с вероятностью 30 % — на W -бозоны. Хиггс может распадаться на два глюона. И так далее. К очень редкому относится распад бозона Хиггса на два фотона. (То, что Хиггс может распадаться на две идентичные безмассовые частицы, имеющие спин 1, свидетельствует, согласно теореме Ландау-Янга, что он сам не может иметь спин 1.) Именно этот распад, однако, легче всего наблюдать и интерпретировать в коллайдере⁸.

⁷ Нобелевский лауреат по физике Ф. Вильчек не считает, что механизм Хиггса объясняет происхождение массы или различных значений масс. Согласно ему, поле Хиггса лишь позволяет устранить противоречия между существованием некоторых видов масс и функционированием слабого взаимодействия [Wilczek 2008, p. 202].

⁸ Элементарные частицы не имеют внутренней эксплицитной структуры в том смысле, что их нельзя разложить на составляющие, подобно тому как молекулу можно разложить на атомы, атом на электроны и ядро, ядро на нуклоны, а нуклон на кварки (последнее разложение не является полным в том смысле, что кварки не могут быть изолированы и, следовательно, прямым образом наблюдаемы), но они как бы имеют имплицитную структуру, которая проявляется, например, при распаде частицы в результате ее взаимодействия с другими частицами. Разные частицы распадаются по-разному.

§ 2. Механизм происхождения массы

Изучение элементарных частиц в физике начинается с применения идеи симметрии (см. § 1 о группах симметрии Стандартной модели). Согласно теоремам Эммы Нетер, симметриям соответствуют законы сохранения, и наоборот. Закону сохранения энергии, например, соответствует однородность времени, или инвариантность теории относительно сдвигов во времени. Закону сохранения углового момента — изотропность пространства, то есть инвариантность теории относительно группы вращений. Инвариантности относительно группы Лоренца соответствует сохранение углового момента и импульса. Калибровочным симметриям соответствуют законы сохранения соответствующих калибровочных зарядов (электрического заряда — в квантовой электродинамике, изоспина — в неабелевой $SU(2)$ — калибровочной теории; в квантовой хромодинамике, то есть $SU(3)$ — калибровочно-инвариантной теории, сохраняются цвета кварков, то есть сильные заряды).

Одна лишь идея симметрии не позволяет, однако, объяснить наличие у элементарных частиц массы, а также наличие разных масс у частиц разных видов. Дополнительная идея спонтанного нарушения симметрии, первоначально заимствованная из теории сверхпроводимости (см. § 3), позволяет устранить этот недостаток⁹. Механизм спонтанного нарушения симметрии требует введения дополнительного скалярного поля, которое в квантовой теории поля называется полем Хиггса. Происхождение массы у электрослабых калибровочных бозонов, лептонов и кварков в результате охлаждения Вселенной и серии фазовых переходов объясняется взаимодействием этих частиц с полем Хиггса.

⁹ Согласно теореме Голдстоуна [Goldstone 1961], механизм спонтанного нарушения симметрии приводит к возникновению безмассовой бесспиновой частицы, которая не наблюдается. Условия теоремы Голдстоуна, однако, нарушаются в теории элементарных частиц. Поэтому механизм спонтанного нарушения симметрии оказывается приемлемым (см. § 3).

Замечание 2.1

В результате охлаждения, или старения, Вселенной возникла не только масса элементарных частиц. В качестве эпиграфа к своей книге «Feynman Motives» М. Марколли [Marcolli 2010] взяла следующее стихотворение Юрия Манина:

*Звезда в Галактике и ворон на суку
Живут, не мучимы шекспировской дилеммой.
Но мы — мы поздний стиль стареющей Вселенной.
Она сквозь нас поет свою тоску.*

Если вкратце (подробнее см. § 6), введение в лагранжиане ответственного за массу калибровочного поля, скажем поля A , квадратичного члена, пропорционального A^2 , нарушает калибровочную инвариантность. Поэтому исходный лагранжиан вводится безмассовым. Введение скалярного поля, ϕ , взаимодействующего с полем A (взаимодействие принимается во внимание благодаря замене обычных производных на зависящие от A ковариантные производные), приводит к возникновению слагаемого пропорционального $\phi^* \phi A^2$. Если представить поле ϕ в виде возмущения в окрестности фиксированного вакуума λ (фиксация вакуумного состояния происходит в результате фазового перехода), то есть в виде $\phi = H + \lambda$, где H — поле Хиггса, то благодаря члену $\lambda^2 A^2$ возникает масса калибровочного поля A . Масса возникает также у самого поля Хиггса.

Замечание 2.2

В рамках некоммутативной геометрии Алена Конна, которая объединяет Стандартную модель и гравитацию (объединение достигается в рамках алгебраического представления произведения 4-мерного пространства-времени и дискретного пространства), поле Хиггса — одно из калибровочных полей, ассоциированных с дискретным пространством (другими калибровочными полями являются калибровочные поля стандартной модели). (См., например: [Connes 1994; 2008], Alain Connes's Homepage.)

Отметим, что существование механизма спонтанного нарушения симметрии и, соответственно, поля Хиггса, объясняет проис-

хождение массы, но не объясняет всю массу во Вселенной (вопрос так называемой темной материи мы здесь вообще не затрагиваем). В действительности механизм Хиггса объясняет лишь малую часть массы во Вселенной. Основная ее масса (за исключением массы темной материи) приходится на адроны и объясняется природой сильных взаимодействий.

Нуклоны, например, состоят из легких валентных u - и d -кварков. Причиной большой массы нуклонов является большая величина постоянной сильного взаимодействия, приводящая к тому, что материя внутри протонов и нейтронов (в частности, валентные u - и d -кварки) оказывается релятивистской. Нерелятивистскими являются лишь тяжелые виртуальные b -, c -, t -кварки.

§ 3. Спонтанное нарушение симметрии и сверхпроводимость

Идея спонтанного нарушения симметрии, как сказано выше, была заимствована физиками, занимавшимися теорией элементарных частиц, из теории сверхпроводимости¹⁰, которая была представлена Й. Намбу [Nambu 1960A; 1960B] и Ф. У. Андерсеном [Anderson 1963] на языке калибровочной теории.

Намбу понял теорию сверхпроводимости Бардена-Купера-Шриффера (см. § 4) в терминах квантовой калибровочной теории поля. Он показал, что все свойства сверхпроводников следуют из спонтанного нарушения симметрии. Вначале Намбу полагал, что механизм спонтанного нарушения симметрии с необходимостью приводит к появлению безмассового бесспинового бозона. Голдстоун доказал справедливость этой гипотезы при определенных условиях (см. также сноску 9). Безмассовый бесспиновый бозон получил название бозона Намбу-Голдстоуна.

Теорема Голдстоуна предполагает явную Лоренц-ковариантность. Использование так называемой радиационной калибров-

¹⁰ Ф. Вильчек определил бозон Хиггса так: «Возбуждение $\langle \dots \rangle$ поля, которое делает пустое пространство сверхпроводником для слабого взаимодействия» [Wilczek 2008, p. 231].

ки, или калибровки Кулона ($\partial_j A_j = 0$, где $j = 1, 2, 3$ и подразумевается правило суммирования Эйнштейна по повторяющимся индексам), которая, в отличие от калибровки Лоренца ($\partial_\mu A_\mu = 0$, где $\mu = 0, 1, 2, 3$), не обладает указанным свойством, позволяет избежать вывода теоремы. Наблюдаемые физические величины не зависят от выбора калибровки. Поэтому бозон Намбу-Голдстоуна не является физическим бозоном; он устраняется при переходе к радиационной калибровке.

Позже, используя аналогию с теорией сверхпроводимости, Й. Намбу и Дж. Иона-Лазинио [Nambu 1961A; 1961B] предположили возможность существования массивных бозонов Намбу-Голдстоуна. Они также предложили механизм генерирования массы нуклонов.

Намбу, в частности, предположил, что в физике частиц имеет место явление, аналогичное явлению энергетического зазора в сверхпроводниках. Для разрыва так называемых куперовских пар — имеющих суммарный спин единицы пар электронов — в сверхпроводниках требуется энергия. Поэтому между основным энергетическим уровнем сверхпроводника и первым возбужденным уровнем, которому соответствует наличие квазичастиц, имеется энергетический зазор. При отсутствии возбуждения энергия куперовских пар не превращается в тепловую энергию и имеет место сверхпроводимость.

Намбу показал, что «энергетический зазор» и «спонтанное нарушение симметрии» интимно связаны друг с другом. Он предположил, в частности, квантовую теорию поля сильных взаимодействий, включающую механизм генерации массы первоначально безмассового фермионного поля, при котором масса нуклона возникает подобно энергетическому зазору в теории сверхпроводимости в результате спонтанного нарушения симметрии.

В 1963 году Ф. У. Андерсен установил, что безмассовые возбуждения в сверхпроводниках, которые Намбу описал в рамках механизма спонтанного нарушения симметрии приобретают массу, если не пренебрегать кулоновским взаимодействием. Предложенный Андерсеном механизм спонтанного нарушения симметрии в теории сверхпроводимости, при котором безмассовый бозон не возникает, был нерелятивистским. Релятивистская

модель механизма, которая в конечном итоге и привела к открытию бозона Хиггса, была предложена в 1964 году в физике частиц независимо тремя группами физиков (см. § 1).

Замечание 3.1

Следует делать различие между спонтанным нарушением глобальной симметрии и спонтанным нарушением локальной симметрии.

Нелинейное уравнение для комплексного скалярного релятивистского поля с потенциалом Гинзбурга-Ландау (см. § 4) имеет глобальную $U(1)$ -симметрию. Спонтанное нарушение этой симметрии приводит к возникновению массивного скалярного бозона и безмассового голдстоуновского бозона (см., например, элементарное изложение в: [Zeidler 2006–2012, т. III, гл. 14]).

Спонтанное нарушение локальной калибровочной симметрии (в случае, когда скалярное поле взаимодействует с калибровочным полем) приводит к образованию незаряженного массивного скалярного бозона (соответствующего бозону Хиггса) и массивного калибровочного бозона.

§ 4. Краткая история сверхпроводимости

Явление сверхпроводимости, то есть исчезновение электрического сопротивления при низких температурах, было обнаружено экспериментально Х. Камерлинг-Оннесом в 1908 году. Существовавшие к тому времени классические понятия силы тока, сопротивления, электромагнитного поля и другие были достаточны для наблюдения и феноменологического описания явления.

В 1935 году Ф. В. Лондон сформулировал первую феноменологическую теорию сверхпроводимости. Закон Ома, утверждающий, что сила тока пропорциональна электрическому полю, в случае сверхпроводимости нарушается. Закон Лондона утверждает, что производная по времени от силы тока пропорциональна электрическому полю. Этот закон — самое первое математическое описание явления сверхпроводимости, так сказать, его формулировка, а не «объяснение».

Замечание 4.1

Согласно Витгенштейну «ничто не скрыто» [Витгенштейн 2019, § 435]. Реальность — в данном случае реальность сверхпроводимости — такова, каковой она нам является в результате корректного применения правил для ее описания.

Сказанное следует правильно понимать. Научная теория не может быть доступна без специальной подготовки. В том случае, однако, когда она действительно доступна, она схватывает саму реальность (см. также философские отступления в § 5).

И наоборот, обыденное, повседневное, не всегда раскрывается нам. Можно согласиться с М. Мерло-Понти, который, по сути, выражает другую — дополнительную — идею, с которой согласился бы и Витгенштейн, что чтобы понять обыденное, то есть то, что мы воспринимаем при помощи наших органов чувств, требуется много внимания и усилий. Может быть, используя терминологию современной философии сознания, можно было бы сказать, что требуется развитие специфической рефлексивной/интроспективной способности оперировать феноменальными концептами, которые формируются в результате непосредственного опыта, противопоставляются теоретическим концептам и в то же время дополняют их. Поскольку практика всякого научного исследования всегда предполагает некоторый обыденный контекст, эта специфическая способность также необходима и ученым.

Последующая теория Гинзбурга-Ландау приняла во внимание термодинамические эффекты. Не зная глубинной природы явления и детального микроскопического механизма, она сделала это «эффективным» образом, то есть угадав основной математический принцип. В результате предыдущая теория была уточнена благодаря введению комплексного релятивистского скалярного поля с нелинейным потенциалом (потенциал Гинзбурга-Ландау), взаимодействующего с электрическим полем.

Смысл скалярного поля был понят лишь позже Барденом, Купером и Шриффером. Их теория позволила объяснить теорию Гинзбурга-Ландау. Квадрат модуля скалярного поля есть плотность куперовских пар. Куперовские пары являются бозонами. Явление сверхпроводимости — конденсация Бозе-Эйнштейна куперовских пар.

В состоянии термодинамического равновесия при температуре выше критической плотность куперовских пар равна нулю, тогда как при температуре ниже критической она отлична от нуля и определяется отношением коэффициентов, входящих в потенциал Гинзбурга-Ландау. Коэффициенты зависят от температуры. Один из них меняет знак при критической температуре.

Закон Лондона может быть выведен в рамках теории Гинзбурга-Ландау. Этот закон, в свою очередь, позволяет объяснить эффект Мейснера, состоящий в том, что отличное от нуля магнитное поле может существовать лишь в тонком пограничном слое на поверхности сверхпроводника.

То, что речь действительно идет о куперовских электронных парах с удвоенным зарядом электрона, может быть установлено на эксперименте. Можно показать, что магнитный поток через поверхность, ограниченную сверхпроводником, квантуется и зависит от заряда скалярного поля. Измеряя поток, можно экспериментально установить, что этот заряд равен $-2e$, где e — заряд электрона.

Введенное Гинзбургом и Ландау скалярное поле реально в том смысле, что оно описывает поток реальных куперовских пар. Как сказано выше, первоначально эта реальность была схвачена чисто математически, без понимания ее смысла. Лишь позже, в том числе благодаря эксперименту, она была понята на микроскопическом уровне и еще позже на языке квантовой калибровочной теории поля (см. § 3).

Скалярное поле Хиггса обладает менее наглядной реальностью квантового поля в физике частиц. Эта реальность, а также природа бозона Хиггса, могут быть поняты лишь в рамках калибровочной теории со спонтанным нарушением симметрии (см. § 6).

§ 5. Теория и реальность

Дает ли физика понимание самой природы вещей или же лишь поверхностное математическое описание их, за которым скрывается нечто глубинное и, может быть, принципиально недоступное для нашего познания, по крайней мере, для познания научного?

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть I. Физика и метафизика бозона Хиггса	5
§ 1. Стандартная модель и бозон Хиггса.....	5
§ 2. Механизм происхождения массы	12
§ 3. Спонтанное нарушение симметрии и сверхпроводимость.....	14
§ 4. Краткая история сверхпроводимости.....	16
§ 5. Теория и реальность	18
§ 6. Механизм спонтанного нарушения симметрии и механизм Хиггса в теории поля.....	23
§ 7. О семействе различных понятий частицы	29
§ 8. Виртуальные частицы.....	36
§ 9. Виртуальные частицы и эффект Казимира	40
§ 10. Классификация элементарных частиц.....	43
Библиография.....	50
Часть II. Онтология дуальных теорий струн	53
§ 1. Введение	54
§ 2. Фундаментальные физические теории	55
§ 3. Дуальности в теории струн и квантовой теории поля.....	58
§ 4. Определения дуальностей.....	62
§ 5. Эквивалентность теорий	64
§ 6. Дуальность как правило.....	66
§ 7. В -правило, семейное сходство и критерии эквивалентности	72
§ 8. Метафизический реализм vs контекстуальный реализм.....	78
§ 9. Эмпирические эквивалентность и дуальность	79
§ 10. Тождественность неразличимостей	86
§ 11. Некоторые традиционные подходы к дуальностям	87
§ 12. Плюрализм	90
§ 13. Контекстуальный плюрализм	92
§ 14. Квантовая механика, СТО и теория струн	95
§ 15. Заключение	100
Библиография.....	101

Часть III. Конструктивный эмпирицизм, адаптивный эмпирицизм и контекстуальный реализм	107
Введение	108
<i>Раздел 1. Конструктивный эмпирицизм Бас ван Фраассена и контекстуальный реализм</i>	115
§ 1.1. Цель науки и эмпирическая истина.....	115
§ 1.2. Наблюдаемые vs ненаблюдаемые	121
§ 1.3. Эмпирическая недоопределенность теории и неэмпирические критерии	126
§ 1.4. К-эмпирицизм и неокантизм.....	128
§ 1.5. «Эмпирическое основание» теории согласно ван Фраассену	131
<i>Раздел 2. Адаптивный эмпирицизм и контекстуальный реализм</i>	136
§ 2.1. От конструктивного эмпирицизма к адаптивному эмпирицизму ...	137
§ 2.2. От адаптивного эмпирицизма к контекстуальному реализму	139
§ 2.3. Примеры	147
Заключение	152
Библиография.....	154
Часть IV. Эмпирические данные без теоретической нагрузки	160
§ 1. Введение	160
§ 2. Репрезентационализм, реляционизм, перспективизм	164
§ 3. Недостатки реляционизма	169
§ 4. Данные	171
§ 5. Эмпирические данные и феноменологическое данное	176
§ 6. Вариабельность данных	178
§ 7. Объективность без объектов.....	180
§ 8. Заключение.....	183
Библиография.....	184