

# ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕОРЕТИКО-ПОЛЕВОЙ ПАРАДИГМЫ

DOI: 10.22363/2224-7580-2024-1-92-122

EDN: KDYLCL

## ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И МЕТАФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОСЛАБОЙ ТЕОРИИ: РАЗВИТИЕ И МОДИФИКАЦИИ ПРИНЦИПА СИММЕТРИИ

**Вл.П. Визгин**

*Институт истории естествознания и техники РАН  
Российская Федерация, 125315, Москва, ул. Балтийская, 14*

**Аннотация.** Исследуется история создания единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий (электрослабой теории, называемой также теорией Вайнберга – Салама), которая является существенной частью современной теории элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий между ними, именуемой стандартной моделью. Выделены основные поворотные события в этой истории: концепция неабелевых калибровочных полей (полей Янга – Миллса, 1954), выдвижение идеи объединения электромагнитных и слабых сил (1958-1959), обнаружение глобальной внутренней симметрии электрослабых взаимодействий (1961, Ш. Глэшоу), открытие на основе спонтанного нарушения симметрии – механизма Хиггса (1964), позволившего решить проблему массы калибровочных частиц (теория Вайнберга – Салама, 1967). Рассмотрены метафизические аспекты теории и процесса ее построения, связанные главным образом с принципом симметрии и его различными расширениями и модификациями.

**Ключевые слова:** стандартная модель, электрослабая теория (теория Вайнберга – Салама), принцип симметрии, калибровочные поля (поля Янга – Миллса), проблема массы калибровочных частиц, спонтанное нарушение симметрии, механизм Хиггса, бозон Хиггса, принцип перенормируемости, принцип «динамика из симметрии», метафизические аспекты теории

...Возникает и более глубокий вопрос: не может ли механизм спонтанного нарушения симметрии быть посредником для превращения дальних взаимодействий, осуществляемых безмассовыми калибровочными полями, в короткодействие,

осуществляемое массивными калибровочными бозонами, без нарушения квантовых свойств, которые характерны для простейших теорий Янга – Миллса, прежде всего квантовой электродинамики.

*Ф. Энглер* [1. С. 1051]

Работы трех групп, опубликованные в 1964 г. (по механизму Хиггса, или, точнее, по механизму БЭГХКХ, то есть Браута – Энглера – Гуральника – Хагена – Киббла – Хиггса. – *В.В.*), привлекли мало внимания в то время. Разговоры по данной теме часто встречали скептически. К концу года этот механизм был известен и модель электрослабой симметрии  $SU(2)\times U(1)$  Глэшоу (и Салама – Уорда) была также известна. Но удивительно, что потребовалось еще три года для того, чтобы свести их воедино. Может быть, это произошло частично потому, что многие из нас все еще думали о калибровочной теории не слабых, а сильных взаимодействий.

*Т. Киббл* [2. С. 13]

Работа Вайнберга – Салама (точнее, теория Вайнберга – Салама, изложенная в двух разных работах. – *В.В.*), в которой была предложена перенормируемая калибровочная теория, позволившая навести порядок в слабых взаимодействиях, теория того же ранга, что и квантовая электродинамика, означала замечательный успех теоретической физики... Успех этот был достигнут ценой отказа от независимого описания слабых и электромагнитных взаимодействий, признания того факта, что с самого начала эти взаимодействия тесно переплетены друг с другом в одних и тех же рамках.

*Ё. Намбу* [3. С. 193].

Благодаря изящно экономной структуре калибровочной группы, электрослабая  $SU(2)\times U(1)$ -теория Глэшоу, Салама, Вайнберга привела к последней великой эре предсказаний в теоретической физике элементарных частиц... В 1999 г. ‘т Хоофт и Велтман получили Нобелевскую премию за доказательство того, что электрослабая  $SU(2)\times U(1)$ -теория является перенормируемой, проложив тем самым путь к торжеству неабелевых калибровочных теорий при описании сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий.

*Э. Зи* [4. С. 427–428].

...В 1967 г. меня увлекли проблемы сильных ядерных сил... Я пытался развить теорию сильного взаимодействия по

аналогии с квантовой электродинамикой (точнее, ее обобщением в духе теории Янга – Миллса. – *В.В.*). Мне казалось, что различие между сильными ядерными силами и электромагнетизмом можно объяснить с помощью явления, известного под названием *нарушения симметрии* (точнее, спонтанного нарушения симметрии или связанного с ним механизма Хиггса. – *В.В.*) ...Моя идея не сработала. Силы сильного взаимодействия в развитой мной теории были совершенно не похожи на те, которые нам известны из опыта. Но затем внезапно до меня дошло, что идеи, оказавшиеся совершенно непригодными для объяснения сильных взаимодействий, дают математическую основу для теории слабой ядерной силы, содержащую все, что только можно пожелать ... Построенная мной теория оказалась не просто теорией слабой силы...; эта теория оказалась единой теорией электромагнитных и слабых сил... По существу, такую же теорию независимо построил в 1968 г. пакистанский физик Абдус Салам, работавший тогда в Триесте... И Салам, и я высказали убеждение, что теория устранит проблемы бесконечностей при расчете процессов, обусловленных слабыми силами. Но у нас не хватило сообразительности доказать это. В 1971 г. я получил препринт работы... Г.'т Хоофта, в которой он утверждал, что наша теория действительно разрешила проблемы бесконечностей...

*С. Вайнберг* [5. С. 94–96].

...Механизм СНС, реализованный через поле Хиггса, привел в свое время к одному из величайших триумфов квантовой теории поля – предсказанию существования нейтральных слабых токов и численных значений масс промежуточных векторных бозонов  $W$ - и  $Z_0$ -частиц... Наряду с квантовой электродинамикой и квантовой хромодинамикой, электрослабая теория Глэшоу, Салама и Вайнберга представляет собой великолепное достижение человеческого ума. Основанная на элегантном и мощном принципе *динамики из симметрии*, она составляет фундамент Стандартной модели.

*Д.В. Ширков* [6. С. 588].

## Введение

Создание стандартной модели (СМ) в физике элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, начавшееся с открытия концепции неабелевых калибровочных полей, именуемой также концепцией Янга – Миллса, в 1954 году, и завершившееся в основном к 1973–1974 годам, было настоящей

научной революцией эйнштейновского масштаба. СМ, которую теперь следовало бы называть стандартной теорией, состоит из двух относительно независимых блоков: квантовой хромодинамики (КХД), являющейся калибровочно-полевой теорией сильных взаимодействий, и электрослабой теории, являющейся единой калибровочно-полевой теорией слабых и электромагнитных взаимодействий. И исторически оба этих блока, несмотря на взаимосвязанность их возникновения, формировались достаточно независимо. Данная работа посвящена истории создания именно второго блока СМ. В этой истории в качестве поворотных выделяются те же годы, что и в истории возникновения первого блока (то есть КХД), а именно 1954, 1961 годы, а также главные моменты, относящиеся к 1964 году (создание механизма Хиггса) и 1967 года (создание электрослабой теории, теории Вайнберга – Салама). Конечно, полное признание последней произошло после доказательства ее перенормируемости Г. 'т Хоофтом (отчасти вместе с его научным руководителем М. Вельтманом, в 1971—1972 гг.). Но за этим последовали и важные экспериментальные подтверждения сначала в 1973 (нейтральные токи), затем в 1983 (W-и Z-бозоны) и, наконец, в 2012 году (открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере, предсказанного еще в 1964 г.). Наше внимание будет сосредоточено на раннем периоде, когда были созданы теоретические основы электрослабой теории, прежде всего относящиеся к 1961–1967 годам и отчасти к 1971 году.

В кратчайшем виде все главное сосредоточено в приведенных эпиграфах, принадлежащих в основном творцам замечательной теории. Обратим внимание на то, что в каждом из них так или иначе речь идет о лежащих в основе единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий принципах симметрии, нарушенной симметрии, спонтанного нарушения симметрии, локальной калибровочной симметрии и «динамики из симметрии». История создания электрослабой теории представляется как бы пронизанной вариациями на тему симметрии, так что можно сказать принцип симметрии является одним из метафизических оснований этой теории и лежал в основе ее создания. Это согласуется и с точкой зрения Ю.С. Владимирова, посвятившего немало работ изучению метафизических оснований физики [7]. В заключительной части статьи мы выделим и некоторые другие метафизические (или философские) аспекты истории построения электрослабой теории. Мы начнем с относящейся к событиям с середины 1950-х годов, по существу, предыстории, при рассмотрении которой придется затрагивать и сильные взаимодействия.

### **Предыстория электрослабой теории и открытие ее $SU(2)\times U(1)$ – симметрии (1954–1961 гг.)**

Калибровочная концепция неабелевых полей Ч. Янга и Р. Миллса 1954 года первоначально относилась только к сильным взаимодействиям, точно так же аналогичный подход, развитый Г. Вейлем в конце 1920-х годов для абелевых полей, приводит к теории электромагнитного взаимодействия

[8; 9]. Но и им самим и другим теоретикам было ясно, что, как только будет установлена симметрия слабых взаимодействий, концепция Янга – Миллса даст ключ к построению их теории. В 1956–1958 годы в теории слабых взаимодействий произошли два выдающихся события: открытие Т.Д. Ли и Ч. Янгом нарушения пространственной зеркальной симметрии (несохранения четности) в слабых взаимодействиях и вслед за этим создание векторной теории слабых взаимодействий (точнее, теории V-A-взаимодействия, в чем преуспели Р. Фейнман и М. Гелл-Манн и независимо от них Р. Маршак и Э. Сударшан, а также Дж. Сакураи) [8]. С этим были связаны и первые попытки объединения слабого взаимодействия с электромагнитным, предпринятые сначала Дж. Швингером (1956), а затем его учеником Ш. Глэшоу (1958) и А. Саламом вместе с Дж. Уордом. Добавим, что эти первые варианты опирались на концепцию калибровочных полей Янга – Миллса и что первую калибровочную теорию слабых взаимодействий тогда же, в 1958 году, построил С. Бладмен, используя симметрию SU(2), которую Янг и Миллс пытались положить в основу теории сильных взаимодействий [Там же]. Остановимся на некоторых из названных событий более подробно.

Хотя теория Янга – Миллса 1954 года относилась к сильным взаимодействиям, трудности на пути ее развития оказались настолько значительными, что большинство теоретиков было склонно отказаться вообще от теоретико-полевого подхода в пользу S-матричной феноменологической программы [9]. Те же, кто сохранял уверенность в правильности и перспективности теории поля, увидели возможность ее применения в теории слабых взаимодействий, которая бурно прогрессировала после открытия тем же Янгом и Ли несохранения четности в слабых взаимодействиях (1956). «Из-за упомянутых трудностей в расчетах теории сильного взаимодействия, – вспоминал впоследствии один из участников событий Т. Киббл, – люди начали думать, что, возможно, слабые взаимодействия были бы лучшим промежуточным объектом описания, особенно после разработки в 1958 году V-A-теории Фейнмана и Гелл-Манна, а также Сударшана и Маршака, которые показали, что их можно рассматривать происходящими через обмен положительными и отрицательными W-бозонами, имеющими спин 1. Это помогло Швингеру предложить калибровочную теорию слабого взаимодействия на основе обмена W-бозонами. Он даже поставил вопрос: возможна ли единая теория слабого и электромагнитного взаимодействий, включающая три калибровочных бозона два заряженных W и фотон?» [2. С. 5–6].

Вслед за открытием нарушения зеркальной симметрии в слабых взаимодействиях Л.Д. Ландау, А. Салам и сами Янг и Ли ввели понятие спиральности нейтрино и разработали теорию двухкомпонентного нейтрино, что стало исходным пунктом для построения V-A-теории. С.С. Герштейн, который вместе с Я.Б. Зельдовичем внес важный вклад в создание этой теории, заметил: «Гипотеза спирального нейтрино и стала той подсказкой, которая помогла найти универсальный закон слабого взаимодействия». Продолжим это высказывание Герштейна: «Фейнман и Гелл-Манн предположили, что не только нейтрино (тогда считавшееся безмассовым), но и массивные частицы дают

вклад в плотность энергии своими левыми спиральными компонентами. А в этом случае единственной возможностью для взаимодействия четырех фермионов остается произведение векторных токов... Такие произведения соответствуют суперпозиции векторного (V) и аксиального (A) токов, а сам закон получил название (V-A)-взаимодействия. По существу, похожие соображения привели к такому же закону Маршака и Сударшана, а также Сакураи» [10. С. 10].

Последующие эксперименты вскоре подтвердили предсказания V-A-теории. Кстати говоря, именно Герштейн и Зельдович, еще в 1955 году сформулировав закон сохранения векторного тока адронов при бета-распаде, в какой-то мере предвосхитили (V-A)-теорию, которая, судя по всему, стала «исходным пунктом применения калибровочных теорий в слабом, а в дальнейшем и в сильном взаимодействиях. Именно обнаружение V-A-структуры слабого взаимодействия... указывало на сходство его с электромагнитным взаимодействием и ставило вопрос о причине особой выделенности векторных полей как переносчиков электромагнитных и слабых взаимодействий» [11. С. 155]. Конечно, это было, скорее, возрождением калибровочной концепции, выдвинутой ранее Янгом и Миллсом для сильных взаимодействий. Таким образом, создание V-A-теории было своего рода «вторым рождением», вновь подчеркнувшим калибровочную природу фундаментальных взаимодействий и заодно открывшим путь к построению единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий. Теперь в калибровочно-полевым направлении на передний план выдвинулись слабые взаимодействия.

Итак, создание V-A-теории открыло новые возможности для объединения слабого и электромагнитного взаимодействий. Первым калибровочную теорию слабого взаимодействия на основе локализации группы SU(2) разработал С. Бладмен (1958). Но, по мнению Ш. Глэшоу, который в это время готовил в Гарварде под руководством Дж. Швингера свою диссертацию по теории слабых взаимодействий, «теория одних только слабых взаимодействий не могла быть сделана перенормируемой. Для этого слабые взаимодействия должны быть объединены с электромагнитными». И далее: «Еще в 1956 году Швингер считал, что слабые и электромагнитные взаимодействия должны вместе входить в единую калибровочную теорию. При этом заряженные массивные промежуточные бозоны и безмассовый фотон должны были быть калибровочными мезонами» [12. С. 55]. «Будучи его (Швингера. – В.В.) учеником, – продолжает Глэшоу, – я принял эту веру. В своей диссертации 1958 года в Гарварде я писал: „Немногого стоит потенциально перенормируемая теория бета-процессов без перспективы одновременно описать перенормируемую электродинамику. Надо полагать, что полностью приемлемая теория может быть построена, если рассматривать эти взаимодействия совместно“» [Там же]. Важной, хотя и ошибочной, была попытка А. Салама и Дж. Уорда построить единую калибровочную слабого и электромагнитного взаимодействий на основе группы SU(2), преобразования которой рассматриваются не в изотопическом, а в зарядовом пространстве [13]. Позже, уже в 1961 г., они пытались, развивая идеи статьи 1959 года, построить единую

калибровочную теорию трех фундаментальных взаимодействий микромира на базе локализации группы  $SU(2) \times SU(2)$ , что было, по словам Глэшоу, «замечательным предзнаменованием  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ -модели, принятой сейчас», то есть стандартной модели.

Однако заключительный шаг к правильной симметрии электрослабого взаимодействия, а именно к группе  $SU(2) \times U(1)$ , Глэшоу пришел в 1960 году, но на этот раз аналогом и образцом для него была калибровочная теория сильного взаимодействия, разработанная Дж. Сакураи в этом же году на основе локализации группы  $SU(2) \times U(1)$ . Иначе говоря, в 1960 году сильные взаимодействия, благодаря Сакураи, снова вырвались вперед и помогли найти правильную симметрию электрослабой теории. Об этом говорит сам Глэшоу в Нобелевской лекции: «К группе  $SU(2) \times U(1)$  я пришел по аналогии с приближенной изоспин-гиперзарядовой симметрией, характеризующей сильные взаимодействия» [12. С. 56]. Таким образом, открытие правильной симметрии электрослабого взаимодействия было сделано Ш. Глэшоу в 1960 году, вскоре после публикации фундаментальной работы Сакураи [14]. При этом, как говорил Глэшоу в Нобелевской лекции, к группе  $SU(2) \times U(1)$  он пришел по аналогии с приближенной изоспин-гиперзарядовой симметрии сильных взаимодействий, предложенной Сакураи. Этот результат был получен им в 1960 году, когда он был в Копенгагене [12. С. 56], хотя соответствующая публикация появилась в 1961 году [15]. При этом он замечает, что независимо к этому годом раньше пришли также А. Салам и Дж. Уорд [13]. «Было, наконец, обнаружено, что для описания электрослабых (как и для сильных. – В.В.) взаимодействий необходима более широкая, чем  $SU(2)$ , калибровочная группа» [12. С. 56].

Различие, впрочем, было существенным. В варианте Салама и Уорда речь шла о «трехмерной калибровочной инвариантности» в зарядовом пространстве (Q-пространстве) и соответственно трех векторных полях (два из которых были заряженными мезонами, а одно – нейтральное – отождествлялось с электромагнитным). В работе Глэшоу фигурировало два электрически нейтральных бозона: безмассовый фотон и массивный векторный бозон, существование которого впоследствии было подтверждено экспериментально. Салам (вместе с Уордом) и Глэшоу находились в контакте между собой и выражали друг другу благодарность. Кстати говоря, авторы обеих работ ссылались на то, что первооткрывателем электрослабого взаимодействия был Дж. Швингер, и на его работу 1957 года [16]. Однако эта теория электрослабого взаимодействия была явно не полной и вызывала сомнения из-за оставшейся нерешенной проблемы массы калибровочных бозонов и из-за проблем с ее перенормируемостью.

### **Идея спонтанного нарушения симметрии и первые шаги на пути к механизму Хиггса в электрослабой теории (1960–1961 гг.)**

В 1960 и особенно в 1961 году наметилось еще одно направление развития проблем СМ, связанное с проблемой массы калибровочных бозонов и

особенно важное в разработке электрослабой теории. Мы имеем в виду концепцию спонтанного нарушения симметрии (СНС). Именно ее развитие привело сначала (в 1964 г.) к созданию так называемого «механизма Хиггса», позволяющего наделить калибровочные бозоны массой, а затем (в 1967 г.) к его применению для создания электрослабой теории. Само понятие СНС первоначально было развито в физике конденсированного состояния, в частности в теории сверхпроводимости (а также теориях сверхтекучести и фазовых переходов и т.д.). Кстати говоря, здесь весьма значительным был вклад советских теоретиков, относящихся к двум выдающимся научным теоретико-физическим школам, а именно школам Л.Д. Ландау и Н.Н. Боголюбова.

Для западных физиков особое значение имела в этом плане микроскопическая теория сверхпроводимости БКШ (Дж. Бардина, Л. Купера, Дж. Шриффера), созданная в 1956 году и в 1972 году удостоенная Нобелевской премии. Йоитиро Намбу был одним из первых, кто перенес идею СНС из физики конденсированного состояния в теорию элементарных частиц. Он начинал свою карьеру еще в Японии, занимаясь физикой твердого тела. И после переезда в США, сначала в Принстон (1952), а затем в Чикаго (1954), он в 1956 году посетил семинар Дж. Шриффера по теории сверхпроводимости. Намбу связал возникновение «куперовских пар» электронов, являющихся массивными бозонами и по существу объясняющих сверхпроводимость, со спонтанным нарушением глобальной калибровочной симметрии, которой отвечает закон сохранения электрического заряда. Эту идею Намбу вместе с Дж. Йона-Ласинио перенес в теорию элементарных частиц открыв тем самым реальную перспективу решения проблемы массы калибровочных бозонов в теории элементарных частиц [17] (см. также [2; 3; 8]). Аналогичный результат примерно тогда же был получен в СССР А.И. Ларкиным и В.Г. Ваксом, примыкавшим к научной школе Л.Д. Ландау, в работе с характерным названием «О применении методов сверхпроводимости к вопросу о массах элементарных частиц», опубликованной в ЖЭТФ (1961) [18]. Несколько ранее, в 1958 году, Ф. Андерсон интерпретировал некоторые ситуации в физике конденсированных сред с помощью «массивных фотонов», являющихся аналогами куперовских пар.

Вслед за Намбу и Йона-Ласинио, также в 1961 году, британский физик Дж. Голдстоун показал, что спонтанное нарушение глобальной симметрии приводит к необходимости существования безмассовых бесспиновых частиц, получивших название бозонов Голдстоуна – Намбу (теорема Голдстоуна) [19]. Конечно, такие бозоны не наблюдались. Так что на первых порах применение СНС к физике частиц, казалось, не только не приводило к решению проблемы массы, но даже усложняло ситуацию, предсказывая появление безмассовых скалярных бозонов, которых в реальности не существовало.

Через год Голдстоун вместе с А. Саламом и С. Вайнбергом [20] дали два варианта доказательства теоремы Голдстоуна, и этот результат сильно разочаровал Салама и Вайнберга, которые пытались устранить трудности, возникшие на пути создания электрослабой теории. Вайнберг и Салам в своих Нобелевских лекциях так описывали этот важный этап в ее создании



(приводим сначала высказывание из лекции Вайнберга): «Где-то в 1960 году или в начале 1961 года я познакомился с идеей, которая вначале появилась в физике твердого тела, а затем была привнесена в физику частиц теми, кто, подобно Гейзенбергу, Намбу и Голдстоуну, работал в обеих областях физики. Это была идея о «нарушенной симметрии», заключающаяся в том, что гамильтониан и коммутационные соотношения квантовой теории могут обладать точной симметрией и тем не менее физические состояния могут не отвечать представлениям этой симметрии. В частности, может оказаться что симметрия гамильтониана не является симметрией вакуума... Я влюбился в эту идею... Поэтому на меня сильное впечатление произвел результат, полученный Голдстоуном о том, что (по крайней мере в одном простейшем случае) спонтанное нарушение непрерывной симметрии... обязательно влечет за собой появление безмассовой частицы с нулевым спином... Казалось очевидным, что не может существовать никаких безмассовых частиц такого типа, которых не удалось бы обнаружить на опыте. У меня были длительные обсуждения этой проблемы с Голдстоуном в Медисоне летом 1961 года, а затем с Саламом, когда я был у него гостем в Империял-колледже в 1961–1962 годах. Вскоре мы втроем смогли показать, что голдстоуновские бозоны действительно должны появляться и в том случае когда спонтанно нарушаются такие симметрии, как изоспин или странность, и притом их массы остаются равными нулю во всех порядках теории возмущений. Насколько помню, я был столь разочарован этими нулевыми массами, что... добавил к статье эпиграф, чтобы показать бессмысленность попыток объяснить что-либо в терминах неинвариантного состояния вакуума: это были слова Лира к Корделии: «Из ничего не выйдет ничего. Так объяснись»... На самом деле было одно исключение из этого правила (то есть исключение, позволявшее обойти теорему Голдстоуна. – *В.В.*), указанное вскоре Хиггсом, Кибблом и др. Они показали, что если нарушенная симметрия является локальной калибровочной симметрией, подобной калибровочной инвариантности в электродинамике, то, хотя голдстоуновские бозоны формально существуют и в каком-то смысле реальны, они могут быть устранены калибровочным преобразованием, и поэтому они не появляются в виде настоящих физических частиц» [21. С. 38]. Дополним описанное положение вещей аналогичным описанием СНС и фрагментом из Нобелевской лекции А. Салама: «...Последующие семь лет, с 1961 по 1967 год, были решающими для количественного постижения явления спонтанного нарушения симметрии и появления  $SU(2) \times U(1)$  – теории в форме, допускающей экспериментальную проверку... Существовала интересная и важная для дальнейшего работа Голдстоуна 1961 года, в которой... он показал, что плата за спонтанное нарушение непрерывной внутренней симметрии выражается в появлении скаляров с нулевой массой – результат, ранее предсказанный Намбу. Для получения доказательства этой теоремы я и Голдстоун объединили свои усилия со Стивом Вайнбергом... Я не буду подробно останавливаться на хорошо известных достижениях Андерсона, Хиггса, Браута и Энглерта, Гуральника, Хагена и Киббла, относящихся к 1963 году (точнее, 1963–1964 гг. – *В.В.*), которые указали способ, как,

используя нарушение спонтанной симметрии, снабдить векторные мезоны массами, избежав при этом появления голдстоуновских частиц. Это – так называемый механизм Хиггса» [22. С. 17].

### **Механизм Хиггса как основной способ наделения частиц массой (1964)**

Поворотность 1964 года заключалась, прежде всего, в том, что, только благодаря механизму Хиггса, удалось решить проблему массы калибровочных бозонов слабого взаимодействия  $W$  и  $Z$ , в результате чего была восстановлена применимость теории калибровочных полей Янга – Миллса к электрослабым взаимодействиям. Скрытость же этого поворота состояла в том, что, как отмечали сами открыватели, отношение к их работам было довольно скептическое и потребовалось почти три года на то, чтобы этот механизм сработал в нужном месте, то есть при создании электрослабой теории. Проблемная ситуация, сложившаяся в 1961 году и вполне определившаяся в следующем году, выглядела так. Благодаря работам Й. Намбу и Дж. Голдстоуна (а также Голдстоуна, С. Вайнберга и А. Салама) было установлено, что механизм спонтанного нарушения симметрии, заимствованный из физики конденсированного состояния, ведет к возникновению частиц, но частиц безмассовых. Этот вывод составлял существо теоремы Голдстоуна, а эти безмассовые частицы получили название частиц Намбу – Голдстоуна. И вот на рубеже лета и осени 1964 года в одном томе *Physical Review Letters* появляются три публикации, в которых предлагался способ «обойти» теорему Голдстоуна и, в частности, наделить калибровочные векторные бозоны в теории Янга – Миллса массой. Этот результат был независимо получен бельгийскими физиками из Свободного университета в Брюсселе Ф. Энглером и Р. Браутом, шотландским теоретиком из Института математической физики Эдинбургского университета П. Хиггсом и тремя физиками из Имперского колледжа в Лондоне Дж. Гуральником, Т. Кибблом и К. Хагеном [23–25]. П. Хиггс и Ф. Энглер были удостоены в 2013 году, через год после открытия знаменитого бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе, Нобелевской премии (Р. Браут к этому времени умер, в 2011 г.).

Лондонская тройка, к сожалению, осталась без этой высшей награды, хотя также вполне заслуживала ее. Все три работы были помещены в томе журнала, посвященном его 50-летию, что говорило о высокой оценке полученных в них результатов. Как выяснилось впоследствии, статьи рецензировались Й. Намбу, работы которого были одним из исходных пунктов открывателей механизма Хиггса, нередко называемого также механизмом БЭХ (Браута, Энглера, Хиггса) или даже механизмом БЭХГКХ (ВЕНГНК, то есть Браута, Энглера, Хиггса, Гуральника, Киббла, Хагена). Поначалу скалярному бозонному полю, которое приходилось вводить, чтобы обойти теорему Голдстоуна, исключив безмассовые частицы Намбу – Голдстоуна и наделив векторные калибровочные бозоны массой, никто не придал особого значения. Но в конечном счете с начала 1980-х годов, когда стандартная модель (СМ) была завершена и общепризнана, вопрос об обнаружении кванта этого скалярного

поля, то есть бозона Хиггса, вышел на первый план решающего экспериментального подтверждения СМ. И тут надо отдать должное именно П. Хиггсу, который, в отличие от других авторов, уже в упомянутой статье 1964 года, хотя и в несколько туманной форме, сказал о скалярном бозоне. Первоначально же в статье Хиггса, присланной в *Physical Review Letters*, не было упоминания о новой частице. Это упоминание было сделано по совету рецензента (а им оказался сам Намбу, чего, конечно, ни Хиггс, ни другие сооткрыватели механизма знать не могли), который также познакомил Хиггса со статьей Энглера и Браута и попросил его упомянуть и о ней, что и было сделано в опубликованном варианте статьи Хиггса. В своих Нобелевских лекциях Хиггс и Энглер [26; 27], а Т. Киббл в своем докладе вскоре после открытия бозона Хиггса [2] рассказали о том, из чего они исходили и каков был ход их мысли на пути к механизму Хиггса.

Рассмотрим несколько подробнее эти рассказы, отмечая общие особенности и различия в этих путях. Начнем с Хиггса. Его путь к открытию начался в 1961 году, когда он прочитал известные работы Намбу и Голдстоуна. Его привлекла концепция спонтанного нарушения симметрии, которая, казалось, создавала реальную возможность решения проблемы массы бозонов, передающих как сильные, так и слабые взаимодействия. Но теорема Голдстоуна, которая была строго доказана в 1962 года в работе трех авторов – самого Дж. Голдстоуна, а также С. Вайнберга и А. Салама, – казалась, закрывала эту возможность. Хиггс приводит формулировку теоремы из этой статьи: «Если в явно лоренц-ковариантной квантовой теории поля существует непрерывная симметрия, оставляющая инвариантным лагранжиан, то либо вакуумное состояние также инвариантно, либо должны существовать безмассовые частицы с нулевым спином» и делает вывод: «Казалось, что эта теорема положила конец гипотезе Намбу» [26. С. 1059].

Но идея спонтанного нарушения симметрии так хорошо работала в физике конденсированных сред и выглядела настолько эстетически и теоретически привлекательной, что находились крупные теоретики, которые считали преждевременным отказ от гипотезы Намбу. Хиггс в этой связи ссылается на важную работу выдающегося специалиста по физике конденсированных сред Ф.У. Андерсона 1963 года (в 1977 г. он вместе с другими физиками был удостоен Нобелевской премии за исследования электронной структуры магнитных и неупорядоченных систем) [28]: «Андерсон заметил, «что проблема с нулевой массой у Голдстоуна не настолько серьезна, так как, вероятно, ее можно не учитывать в сравнении с такой же проблемой нулевой массы в теориях Янга – Миллса» [26. С. 1060]. Здесь ключевой была идея подключения локально-калибровочной концепции, которая в конечном счете и позволила обойти теорему Голдстоуна. Хиггс упоминает еще об одной работе 1964 года (А. Кляйна и Б. Ли), которые, как будто, нашли брешь в доказательстве теоремы Голдстоуна, но вскоре У. Гилберт показал некорректность их рассуждений.

Здесь наступают решающие дни для П. Хиггса, который сразу после прочтения статьи Гилберта делает две работы, содержащие и изложение

механизма, и упоминание о скалярном бозоне, носящих его имя. Ввиду особой важности цитируемого ниже фрагмента мы с некоторыми купюрами приводим весьма обширный отрывок: «Я прочитал работу Гилберта 16 июля 1964 года. ...Я сильно расстроился, так как из этой работы следовало, что обойти теорему Голдстоуна никак нельзя. Однако ближе к выходным я вспомнил, что видел подобное кажущееся нарушение лоренц-инвариантности (похожее нарушение нашел Гилберт в работе Кляйна и Ли. – *V.B.*), и не где-нибудь, а в самой квантовой электродинамике, и оно было сформулировано Джулианом Швингером... Сам Швингер в 1962 году написал работу, в которой развенчал миф о том, что лишь одной калибровочной инвариантности достаточно для безмассовости фотона. Он привел пример калибровочной теории с массивным фотоном, но не описал явно их динамику. В выходные 18–19 июля мне 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 и послал ее в *Phys. Letters* 24 июля, и она была принята к публикации» [1. С. 1060].

Несколько слов о логике рассуждений Хиггса и цепочке тех работ, которые были для него исходными и важными. Исходной ключевой идеей была идея спонтанного нарушения симметрии, которая приводила к генерации частиц (гипотеза Намбу, так именует ее автор). Но реализация этой гипотезы натолкнулась на теорему Голдстоуна, которая разрешала появление только безмассовых частиц с нулевым спином (казавшееся убедительным и строгим доказательство этой теоремы было дано в 1962 году. Голдстоуном вместе с А. Саламом и С. Вайнбергом). Возможность «обойти» эту теорему и «спасти» гипотезу Намбу подсказывали и идеи Ф. Андерсона об аналогичной проблеме с массами частиц в калибровочной теории Янга – Миллса и эффективности спонтанного нарушения симметрии в физике конденсированного состояния (1963), и дискуссия по поводу корректности доказательства теоремы (в связи с требованием лоренц-ковариантности теории), и работа Швингера, в которой было показано, что «калибровочная инвариантность векторного поля не означает с необходимостью равенства нулю массы соответствующих частиц» [29. С. 203].

Хиггс сразу же после отсылки первой статьи стал готовить продолжение, в нем он вывел уравнения поля для простейшего случая – введения электромагнитного взаимодействия в скалярную модель Голдстоуна, в результате чего безмассовые голдстоуновские частицы приобретали массу, становясь массивными «фотонами», о которых говорил ранее Ф. Андерсон. Он послал вторую статью в тот же журнал 31 июля, но неожиданно получил отказ. «Я был возмущен, – вспоминал он в Нобелевской лекции. – Мне показалось, что рецензент (из ЦЕРНа. – *V.B.*) не понял моей статьи. (Позже один мой друг, бывший в то время в ЦЕРНе, сказал мне, что работавшие там теоретики решили, что все это не имеет никакого отношения к физике частиц)»

[1. С. 1060]. Дополнив статью несколькими туманными замечаниями, что такие теории приводят к скалярным и векторным массивным бозонам, он послал ее в другой (американский) журнал «Phys.Rev.Letters» (она была датирована 31 августа и принята к публикации). По рекомендации рецензента Хиггс сослался на опубликованную как раз в этот день близкую по содержанию статью Ф. Энглера и Р. Браута [23], которая была прислана ему.

Вторая статья Хиггса была опубликована в середине октября 1964 года [30]. Кстати говоря, впоследствии, как сообщил автор в конце Нобелевской лекции, Й. Намбу признался, что обе его статьи рецензировал именно он. Статья Ф. Энглера и Р. Браута называлась почти так же, как и вторая статья Хиггса. Первая называлась «Нарушенные симметрии и масса калибровочных векторных мезонов», вторая статья Хиггса – «Нарушенные симметрии и массы калибровочных бозонов». Кстати, статья Хиггса поступила в журнал в тот же день, когда была опубликована статья Энглера и Браута, 31 августа 1964 года. Исходная мотивация и выводы были сходными, хотя в статье Хиггса более определенно было сказано о появлении новой частицы, массивного скалярного бозона, за которым с легкой руки С. Вайнберга закрепилось название «бозона Хиггса» [31. С. 318].

Вот как о своей с Браутом работе рассказывал в Нобелевской лекции Энглер: «Мы с Браутом постепенно убеждались, что самосогласованная формулировка близкодействия (понимаемого, по-видимому, в духе локально-калибровочной концепции Янга – Миллса. – *B.B.*) требует единого описания как короткодействующих, так и далекодействующих сил» [27. С. 1050]. Для дальнего, то есть фактически электромагнитного, взаимодействия никаких проблем не было, так как реализующие его калибровочные бозоны, или фотоны, были безмассовыми частицами. «Для преобразования дальних взаимодействий в короткодействия в контексте теории Янга – Миллса было бы достаточно придать этим (соответствующим векторным бозонам. – *B.B.*) обобщенным фотонам массу, то есть свойство, которое... запрещается локальной симметрией». После работ Й. Намбу (отчасти вместе с Дж. Йона-Ласинио) и Дж. Голдстоуна для решения проблемы напрашивалось обращение к идее спонтанного нарушения симметрии. «Поскольку локальная симметрия очевидно запрещает введение в теорию массивных бозонов (необходимых для описания короткодействующих взаимодействий. – *B.B.*), – говорилось в лекции Энглера, – обратимся к классу теорий, в которых состояние системы несимметрично относительно принципа симметрии, контролирующего ее динамику (то есть к идее спонтанного нарушения симметрии. – *B.B.*)». «Не могла бы и масса калибровочных бозонов быть результатом спонтанного нарушения симметрии?.. Возникает и более глубокий вопрос: не может ли механизм спонтанного нарушения симметрии быть посредником для превращения дальних взаимодействий, осуществляемых безмассовыми калибровочными полями, в короткодействия, осуществляемые массивными калибровочными бозонами, без нарушения квантовых свойств, которые характерны для простейшей теорий Янга – Миллса, а именно квантовой электродинамики? Как мы увидим, ответ на оба вопроса положительный при условии, если

концепция спонтанного нарушения симметрии заменяется на более тонкий механизм БЭХ (то есть механизм Браута – Энглера – Хиггса, или для краткости – просто механизм Хиггса. – *В.В.*)» [4. С. 1051]. Суть этого механизма заключалась в переходе от глобальной симметрии и ее спонтанного нарушения к соответствующей локальной симметрии, спонтанное нарушение которой приводило к исчезновению безмассовых бозонов Намбу – Голдстоуна и наделению безмассовых янг-миллсовских векторных бозонов массой. «...Бозоны Намбу-Голдстоуна, – подчеркивал Энглер, – не выживают при калибровке глобальной спонтанно нарушенной симметрии к локальной симметрии» [4. С. 1054]. И далее: «Таким образом, механизм БЭХ (чуть ранее Энглер сослался также и на работу Дж. Гуральника, К.Р. Хагена и Т. Киббла [25], в которой были получены те же результаты. – *В.В.*) способен объединить дальнедействующие и короткодействующие взаимодействия в одной теории, оставляя ненарушенной подгруппу преобразований симметрии (дальнедействующего взаимодействия. – *В.В.*), и соответствующие ей калибровочные поля останутся безмассовыми» [4. С. 1055].

Именно поэтому через три года С. Вайнбергу и А. Саламу удалось завершить создание электрослабой теории, применив механизм БЭХ к ее «слабой части». Вслед за Браутом – Энглером и Хиггсом способ «обойти» теорему Голдстоуна и наделить векторные калибровочные бозоны массой независимо нашла группа молодых физиков из Имперского колледжа в Лондоне. Это были американцы Дж. Гуральник и К.Р. Хаген, приехавшие в Лондон для сотрудничества с теоретиками из группы А. Салама, а также сотрудник этой группы Т. Киббл. Гуральник был учеником У. Гилберта в Гарварде, который сам ранее также был студентом Салама. Салам был уже автором (отчасти совместно с Дж. Уордом) ряда важных работ по калибровочным теориям, включая электрослабую теорию. Он же был соавтором Голдстоуна и С. Вайнберга по работе, содержащей строгое доказательство теоремы Голдстоуна. А Гилберт в 1964 году сделал работу, в которой показал некорректность некоторых попыток найти брешь в доказательстве теоремы Голдстоуна. Вскоре после экспериментального открытия бозона Хиггса в 2012 году и присуждения Нобелевской премии 2013 году Энглеру и Хиггсу за его предсказание с воспоминаниями о своем участии в этом открытии выступил и Киббл. Вот несколько фрагментов из них. В начале раздела «Выход из тупика» (этим «тупиком» была теорема Голдстоуна) он писал: «Гуральник в начале 1964 года исследовал проблему придания массы калибровочным бозонам и уже опубликовал некоторые идеи об этом (так что он был некоторым лидером в этой тройке. – *В.В.*). Мы начали сотрудничать с другим американским гостем, К.Р. Хагеном, чтобы найти пути обхода препятствия, поставленного теоремой Голдстоуна. И мы... фактически преуспели в этом. Доказательство (этой теоремы. – *В.В.*) не проходит в случае перехода к калибровочной симметрии... Это было обнаружено тремя группами независимо друг от друга» [2]. Рассмотрев некоторые варианты действия механизма Хиггса, Киббл эмоционально заключает: «Кажется почти волшебным образом безмассовые калибровочные и голдстоуновские бозоны объединяются для получения

массивного калибровочного бозона» («Seemingly almost by magic, the massless gauge and Goldstone boson have combined to give a massive gauge boson») [2]. Как известно, механизм Хиггса впервые эффективно сработал только через три года в работах С. Вайнберга и А. Салама, в которых благодаря этому механизму удалось завершить электрослабую теорию.

О трудностях восприятия работ по механизму Хиггса говорится в одном из наших эпиграфов, взятом как раз из этих воспоминаний Киббла. Они были двоякого рода: 1) большинство теоретиков слишком полагалось на правильность теоремы Голдстоуна, ее выводы выглядели как строгий результат, полученный авторитетными физиками (недаром это утверждение называлось теоремой); 2) в 1964 году и в ближайшие последующие годы в центре внимания находилась теория сильного взаимодействия (как писал Киббл, «многие из нас еще думали в первую очередь о калибровочной теории сильных взаимодействий, а не слабых» [2]). Еще одно важное замечание, которое сделал в своем мемуарно-историческом обзоре Киббл. Главным достижением в 1960-е годы считалось открытие самого механизма БЭХГКХ и его применение к наделению калибровочных векторных бозонов массой, а на предсказание новой частицы почти никто не обратил особого внимания: «В 1964 и 1967 гг. существование массивного скалярного бозона (названного впоследствии бозоном Хиггса) считалось незначительным фактом. Важным считался механизм придания массы калибровочным бозонам и исключение появления безмассовых бозонов Намбу – Голдстоуна» [2].

В середине 1960-х годов было еще достаточно далеко до завершения основ стандартной модели. Предстояло решить немало других, более первостепенных проблем. Но к началу 1980-х годов, особенно после триумфального экспериментального подтверждения стандартной модели, а именно открытия W- и Z-бозонов, в 1983 году ситуация изменилась: «Но после 1983 г. было признано, что бозон Хиггса имеет ключевое значение как единственный неоткрытый кусочек пазла в стандартной модели... Стандартная модель работала так хорошо, что бозон Хиггса, либо что-то другое, выполняющее те же функции..., должно было так или иначе присутствовать» [Там же]. Тем не менее Нобелевская премия, врученная Хиггсу и Энглеру в 2013 году, была вручена не столько за предсказание существования бозона Хиггса, сколько «за теоретическое открытие механизма, который способствует нашему пониманию происхождения массы субатомных частиц».

Итак, все три группы (группа Хиггса состояла только из него самого) решали одну и ту же проблему, исходные идеи также были общими, и, несмотря на небольшие расхождения, они пришли к открытию одного и того же способа решения проблемы. Всех привлекали идеи Намбу и Ф. Андерсона об использовании концепции спонтанного нарушения симметрии в теории частиц и переносе ее из физики конденсированных сред в теорию элементарных частиц. Но этому неожиданно воспрепятствовали результаты, полученные самим Намбу и особенно Голдстоуном (теорема Голдстоуна). И конечно, общим был главный способ преодоления этого препятствия, а именно

переход к локально-калибровочной теории Янга – Миллса (точнее, к изучению спонтанного нарушения именно локализованной калибровочной симметрии).

Для Хиггса дополнительным важным соображением были идеи Дж. Швингера о возможной совместимости калибровочной симметрии с наличием массы у калибровочных бозонов. Энглер и Браут искали способ превращения дальних (безмассовых) взаимодействий в короткодействия и объединения их в единой теории.

Для лондонской «команды» было крайне важным общение с лидером теоретической группы в Имперском колледже А. Саламом, автором и соавтором важных работ по электрослабой теории и соавтором строгого доказательства теоремы Голдстоуна.

Добавим важный фрагмент из Нобелевской лекции Хиггса о раннем нелегком восприятии механизма Хиггса, частично пересекающийся с аналогичным отрывком из воспоминаний Киббла. Хиггс рассказывает о том, как в марте 1966 года он выступал в Принстоне: «Мне пришлось выступить перед аудиторией, состоящей из приверженцев аксиоматической квантовой теории поля, все еще полагававших, что у теоремы Голдстоуна не может быть исключений. На следующий день я выступал в Гарварде... перед другой скептически настроенной аудиторией и У. Гилбертом в том числе. Я пережил и это. После семинара Ш. Глэшоу сделал мне комплимент по поводу моей «миленькой модели», но он не увидел ее актуальности для своей теории электрослабых взаимодействий – какая упущенная возможность! Как и Намбу, нам шестерым (опубликовавшим свои работы в 1964 г.) казалось, что наши идеи должны были найти применение в нарушенной симметрии ароматов в теории сильных взаимодействий (то есть  $SU(3)$  – симметрии 1961 г. – *В.В.*), но этого не произошло. Пришлось ждать теории Вайнберга и Салама 1967 года, в которой они нашли правильное применение нашей модели» [26. С. 1060]. И в этой истории с открытием механизма Хиггса и его применения мы без труда находим общие для всей истории стандартной модели характерные особенности развития, такие как, выражаясь метафорически, «комедия ошибок», феномен «спящей красавицы», феномен «упущенных возможностей», феномен «одновременных и независимых открытий» и т.д. [32].

Коснемся еще одного важного аспекта рассматриваемой истории, на который обратил внимание Д.А. Киржниц [33]. Речь идет о роли программы Гейзенберга, связанной с его единой нелинейной квантово-полевой теории элементарных частиц, в развитии концепции спонтанного нарушения, ее трансляции из физики конденсированного состояния в теорию частиц и тем самым открытию механизма Хиггса. Это большая самостоятельная тема, которую мы только затронем. Никаких прямых свидетельств о влиянии программы Гейзенберга на открывателей механизма Хиггса мы не находим. Однако анализ проблемы, проведенный Киржницем, представляется достаточно убедительным. Все элементарные частицы в этой теории рассматривались как своего рода квазичастицы в системе взаимодействующих частиц «прамате-



рии». Соответствующее уравнение поле было нелинейным обобщением уравнения Дирака, в котором отсутствовал член с массой частиц. Но соединить в одном уравнении различные симметрии, которые соответствовали различным взаимодействиям, было весьма затруднительно.

И тут на помощь Гейзенбергу пришла идея спонтанного нарушения симметрии, которая была известна ему из разработанной им ранее теории ферромагнетизма и других теорий конденсированного состояния (теории фазовых переходов, теории сверхпроводимости и др.). «Идея о спонтанном нарушении симметрии, – по мнению Киржница, – действительно позволяет, по крайней мере в принципе, разрешить трудность этой теории (то есть единой нелинейной теории поля Гейзенберга. – *В.В.*), связанную с различной степенью симметрии взаимодействий элементарных частиц. С этой целью нужно выбрать фундаментальное уравнение единой теории материи... обладающее максимальной степенью симметрии, а необходимые нарушения симметрии для взаимодействий соответствующих квазичастиц должны происходить спонтанным образом, путем реализации решений с неполной симметрией. Появляющиеся при этом частицы Голдстоуна можно было бы отождествить с имеющимися в природе безмассовыми частицами... Один из наиболее важных механизмов спонтанного нарушения симметрии в рамках программы Гейзенберга был предложен в начале 60-х годов Намбу и Йона-Ласинию и Ваксом и Ларкиным (и это затем привело к теореме Голдстоуна и открытию механизма Хиггса. – *В.В.*)...» [33. С. 184–185].

Далее Киржниц подчеркивает «очень близкое сходство» фундаментального уравнения единой теории материи Гейзенберга с микроскопическим уравнением, лежащим в основе теории сверхпроводимости. Отсюда следует далеко идущая аналогия теории элементарных частиц и теории сверхпроводимости, в частности уравнений, использованных в работе Хиггса, и уравнений в теории сверхпроводимости Гинзбурга – Ландау [33. С. 185–187].

Вспомним, что с середины 1950-х вплоть до начала 1970-х годов в теории элементарных частиц все-таки явно преобладающей была S-матричная феноменологическая программа. Значительным шагом вперед в возрождении квантово-полевой программы стало, помимо первых ростков калибровочно-полевой теории кварков, соединение концепции спонтанного нарушения симметрии с теорией калибровочных полей Янга – Миллса, оказавшееся возможным благодаря трансляции идей из теории конденсированных сред в теорию элементарных частиц. Кстати говоря, именно Д.А. Киржниц сравнил это возрождение с пробуждением Спящей Красавицы: «Оказалось, таким образом, что квантовая теория поля не умерла, а пребывала, как Спящая Красавица, в состоянии летаргии. Чтобы ее разбудить, понадобилось, конечно, нечто большее, чем поцелуй сказочного принца. Здесь сказало воздействие многих факторов, среди которых далеко не последнюю роль сыграло привлечение физических идей, заимствованных из теории многих тел и, в частности, из теории сверхпроводимости» [33. С. 173].

Обратим также внимание на то, что в истории введения концепции спонтанного нарушения симметрии в физику элементарных частиц и открытия механизма нередко встречаются имена советских физиков. Ссылки на ранние труды Л.Д. Ландау по теории фазовых переходов, В.Л. Гинзбурга и Ландау, а также Н.Н. Боголюбова по теории сверхпроводимости, в которых так или иначе присутствовала идея спонтанного нарушения симметрии, имеются в рассмотренных ранее работах Намбу, Энглера и Браута, Хиггса и др. К сожалению, в них не удалось найти ссылок на важную статью А.И. Ларкина и В.Г. Вакса «О применении методов теории сверхпроводимости к вопросу о массах элементарных частиц», опубликованную в ЖЭТФе в 1961 году [18]. Впоследствии Б.Л. Иоффе весьма высоко оценивал эту работу, стоящую в одном ряду с работами Намбу, Намбу и Йона-Ласинио и Голдстоуна: «Я считаю, что высшим достижением Анатолия Ивановича Ларкина является открытие им (в работе с В.Г. Ваксом) спонтанного нарушения симметрии в физике элементарных частиц, сделанное в 1950-х годах (публикация 1961 г. – В.В.). Тогда не понимали, что явления спонтанного нарушения симметрии в сверхпроводимости с теоретической точки зрения аналогичны и в физике частиц» [34. С. 84].

### **Теория электрослабых взаимодействий Вайнберга – Салама (1967–1968)**

Истоки электрослабой теории, в основе которой лежит модель Вайнберга – Салама 1967–1968 годов [35; 36], с одной стороны, восходят, как мы видели, к ранним работам Дж. Швингера, а также А. Салама и Дж. Уорда и, наконец, Ш. Глэшоу (1961 г., именно им была найдена  $SU(2) \times U(1)$  – симметрия электрослабых взаимодействий), а с другой стороны, связаны с введением концепции спонтанного нарушения симметрии в физику частиц в форме механизма Хиггса (он же механизм Браута – Энглера – Хиггса – БЭХ, он же механизм БЭХГКХ) (1964). Слабое и электромагнитное взаимодействия рассматривались как проявления одного электрослабого взаимодействия, возникающего при локализации  $SU(2) \times U(1)$ - симметрии в виде янг-миллсовских калибровочных бозонов – массивных векторных бозонов  $W$  и  $Z$  и безмассового фотона. При этом кардинальная проблема массы янг-миллсовских частиц впервые находила решение благодаря использованию спонтанного нарушения калибровочной симметрии в форме механизма Хиггса. Но в центре внимания тогда находились сильные взаимодействия, к тому же, несмотря на работы по механизму БЭХГКХ, большинство теоретиков не верило в реальную возможность преодоления выводов теоремы Голдстоуна, не была доказана и перенормируемость теории, хотя авторы ее выражали уверенность в ее доказуемости. Поэтому в течение нескольких лет теорию Вайнберга – Салама никто не принимал всерьез.

Однако, как только перенормируемость теории была доказана – а это произошло в 1971 году и было сделано в работах голландцев М. Вельтмана и особенно его ученика Г.’т Хоофта, которые использовали «технику» советских математических физиков Л.Д. Фаддеева и В.Н. Попова, – модель Вайнберга-

Салама быстро превратилась в «стандартную модель электрослабых взаимодействий». Через шесть лет после ее триумфального экспериментального подтверждения, а именно обнаружения нейтральных токов (1973), творцы теории электрослабых взаимодействий Ш. Глэшоу, С. Вайнберг и А. Салам были удостоены Нобелевской премии. В своих Нобелевских лекциях [12; 21; 22] они рассказали об истории создания теории, и мы эти лекции будем основательно цитировать. Для этого раздела оказалась особенно ценной лекция Вайнберга [21]. К ней примыкают и другие, более поздние, тексты С. Вайнберга [5; 31; 37]. Из историко-научных работ отметим соответствующие разделы монографии А. Пайса [8]. Изложение теории Вайнберга – Салама, близкое к их работам 1967–1968 годов, содержится в ранних обзорах Е.С. Аберса и Б.В. Ли, Дж. Бернстайна, В.Б. Берестецкого [38; 39] и монографиях К. Мориасу и Н.Ф. Нелипы [40; 41].

Мы начнем с рассмотрения пути С. Вайнберга к электрослабой теории, основанного на его Нобелевской лекции и фрагментах его воспоминаний, содержащихся в некоторых научно-популярных книгах и интервью с ним. В интервью, взятом у Вайнберга А.Е. Левиным и опубликованном в январе 2013 года в журнале «Популярная механика», вскоре после открытия бозона Хиггса, в краткой и доступной форме сформулированы главные особенности его пути к электрослабой теории: «Я прочел статью Янга и Миллса во время учебы в аспирантуре в 1950-х и был буквально очарован. Их работе свойственна та же красота, как и ОТО (общая теория относительности. – *V.V.*), где динамика тоже выводится из симметрии... Однако для физической теории мало лишь математической элегантности. Главная проблема модели Янга и Миллса заключалась в том, что никто не мог понять, как она связана с реальной физикой. Поля Янга и Миллса имели кванты с нулевой массой, а экспериментаторы ничего подобного никогда не наблюдали... Во второй половине 1960-х годов мы с Абдусом Саламом независимо друг от друга нашли первые физические приложения модели Янга и Миллса. Мы оба использовали так называемый механизм Хиггса, который объяснил, как спонтанное нарушение калибровочной симметрии оборачивается рождением массивных частиц. С его помощью нам удалось построить калибровочную теорию электрослабого взаимодействия, которое переносят фотоны и три тяжелых векторных бозона. Сходная теория несколькими годами ранее была развита Шелдоном Глэшоу, однако он не смог справиться с проблемой массы этих бозонов. А вот нам удалось ее вычислить, причем, как показали эксперименты, весьма точно. Вот так и было впервые доказано, что калибровочная теория фундаментальных взаимодействий обладает реальной предсказательной силой...» [42].

В рассказе об этих событиях, содержащемся в Нобелевской лекции (1979), появляется ряд новых важных подробностей. Во-первых, Вайнберг еще до открытия механизма Хиггса в 1964 году был увлечен идеей спонтанного нарушения симметрии, перенесенной Й. Намбу и Дж. Голдстоуном из физики твердого тела в физику элементарных частиц, и даже вместе с Голдстоуном и Саламом подтвердил и обобщил в 1962 году основной вывод теоремы Голдстоуна о появлении бесспиновых и безмассовых бозонов при

спонтанном нарушении, связанных с изоспином и странностью. «Где-то в 1960 или в начале 1961 года, – вспоминал Вайнберг, – я познакомился с идеей... о „нарушенной симметрии“, заключающейся в том, что гамильтониан и коммутационные соотношения квантовой теории могут обладать точной симметрией и тем не менее физические состояния могут не отвечать представлениям этой симметрии. В частности, может оказаться, что симметрия гамильтониана не является симметрией вакуума. Как иногда случается с теоретиками, я влюбился в эту идею... Я думал (как оказалось потом, неверно), что приближенные симметрии – четность, изоспин, странность и восьмеричный путь – действительно могли бы быть точными априорными принципами симметрии, а наблюдаемые на опыте нарушения этих симметрий могли бы каким-то образом привнесены спонтанным нарушением симметрии. Поэтому на меня сильное впечатление произвел результат, полученный Голдстоуном (о появлении безмассовых «голдстоуновских бозонов». – *В.В.*)... У меня были длительные обсуждения этой проблемы с Голдстоуном в Медисоне летом 1961 года, а затем с Саламом, когда я был его гостем в Имperiал-колледже в 1961–1962 годах. Вскоре мы вдвоем смогли показать, что голдстоуновские бозоны действительно должны появляться и в том случае, когда спонтанно нарушаются такие симметрии, как изоспин или странность, и притом их массы остаются равными нулю... Насколько помню, я был... разочарован этими нулевыми массами... В свете последующего развития идеи о неинвариантном вакууме в теоретической физике это оказалось правильным. На самом деле было исключение из этого правила, указанное вскоре Хиггсом, Кибблом и др. Они показали, что если нарушенная симметрия является локальной калибровочной симметрией..., то, хотя голдстоуновские бозоны формально существуют и в каком-то смысле реальны, они могут быть устранены калибровочным преобразованием, и поэтому они не появляются в виде настоящих физических частиц...» [21. С. 38].

Сразу обратим внимание на появление рассуждений явно метафизического характера, когда речь идет о проблеме реальности голдстоуновских бозонов. Во-вторых, сначала, но уже в 1967 году, Вайнберг думал о применении спонтанного нарушения симметрии для сильных взаимодействий, рассматривая при этом локальную группу  $SU(2) \times SU(2)$ ; соответствующая теория «не была калибровочно-инвариантной, а следовательно, не могла быть перенормируемой», и поэтому он «по отношению к ней не проявил большого энтузиазма». И дальше он рассказывает о том, как в конце 1967 года по дороге в МТИ (Массачусетский технологический институт) ему «пришла в голову мысль о том, что он использовал верные идеи к неподходящей проблеме». Он увидел возможность применить эти «верные идеи» к электрослабой теории с локально-калибровочной симметрией  $SU(2) \times U(1)$ , спонтанное нарушение которой «до группы обычной электромагнитной калибровочной инвариантности привело бы к появлению масс у трех из четырех векторных калибровочных бозонов: заряженных бозонов  $W$  и нейтрального, который я назвал

Z-ноль... Естественность этой теории хорошо показывает тот факт, что практически такая же теория была независимо развита Саламом в 1968 г.» [21. С. 42–43].

В блестящей книге «Мечты об окончательной теории», вышедшей в 1992 году, излагается близкий вариант хода мыслей Вайнберга [5. С. 94–95]. В книге «Все еще неизвестная Вселенная» (2018) он еще раз вспоминает о своем открытии [31]. В ней отмечается еще один важный аспект теории, о котором мы еще не говорили, аспект, касающийся бозона Хиггса: «В исходной версии этой теории имеется также квартет бесспиновых полей, которые принимают нулевые значения в вакууме при условии, что симметрия не нарушена. (Поля этого общего типа уже появлялись в пояснительных примерах, представленных ВЕГНКН.) Электрослабая симметрия нарушается вследствие появления ненулевого значения для одного из этих четырех бесспиновых полей, и в результате взаимодействия с этими полями электроны, кварки и частицы, переносящие слабое ядерное взаимодействие, приобретают массу. В этой теории только одно из четырех бесспиновых полей рассматривается как физическая частица – электрически нейтральная бесспиновая частица, взаимодействие которой описывается теорией, но масса которой, к сожалению, не известна. Эта частица – бозон Хиггса...» [31. С. 166].

Как уже говорилось, и Вайнберг, и Салам были уверены в том, что их электрослабая теория перенормируема, но у них «не хватило сообразительности это доказать». Не было и никаких экспериментальных свидетельств в пользу новой теории. Только через три-четыре года Г. 'т Хоофт доказал перенормируемость теории Вайнберга – Салама, что стало поворотным моментом в ее восприятии и развитии. Вот примечательные цифры, касающиеся цитируемости статьи Вайнберга 1967 года, которые приводит он сам, иллюстрирующие динамику этого восприятия и развития: «Моя статья была опубликована в 1967 году. В этом году количество ссылок на нее равнялось нулю. В период 1968–1969 годов количество ссылок опять равнялось нулю. (В это время и Салам, и я пытались доказать то, что в конце концов удалось 'т Хоофту, то есть что теория свободна от бесконечностей). В 1970 году на работу сослались один раз. (Я не знаю, кто это сделал). В 1971 году... появились три ссылки, одна из которых принадлежала 'т Хоофту. В 1972 году, все еще не имея поддержки со стороны эксперимента, работа внезапно получила 65 ссылок (напомним крылатую фразу Коулмена: «Работа 'т Хоофта превратила вайнберг-саламовскую лягушку в прекрасного принца» [22. С. 18]. – *В.В.*). В 1973 году число ссылок составило 165, затем это число постепенно возрастало, пока в 1980 г. не составило 330 ссылок» [5. С. 96]. Только после 1972 года начали накапливаться экспериментальные подтверждения, в 1973 году в ЦЕРНе были открыты так называемые нейтральные токи, предсказываемые электрослабой теорией. В 1975 году ожидалось присуждение Вайнбергу и Саламу Нобелевской премии, но это произошло только через четыре года, когда они вместе с Ш. Глэшоу были ее удостоены.

Главным достижением теории на первых порах считались решение проблемы массы векторных калибровочных бозонов и возможность проверки

теории с помощью обнаружения предсказанных теорией нейтральных токов. Скалярному же бесспиновому бозону, фигурирующему в теории и обеспечивающему спонтанное нарушение симметрии, особого внимания не уделялось, хотя Вайнберг впоследствии говорил, что он ждал открытия бозона Хиггса с 1967 года [31. С. 175]. Заслуживает внимания замечание Вайнберга, касающееся самого термина «бозон Хиггса»: «В своей статье 1967 г... я процитировал работы Питера Хиггса и двух других групп теоретиков, которые разработали математический аппарат, описывающий нарушение симметрии в общих теориях с частицами, переносящими взаимодействие, хотя авторы работ не применяли этот аппарат к слабому и электромагнитному взаимодействиям. Типичным следствием теорий нарушения симметрии является возникновение новых частиц, своего рода мусора. Существование особой частицы такого общего типа было предсказано в моей работе 1967 года; это именно тот самый бозон Хиггса, который ищут сейчас с помощью БАК (то есть Большого адронного коллайдера, на котором и был открыт в 2012 г. этот замечательный бозон. – *В.В.*). Из-за ошибки в датах этих трех более ранних публикаций (упомянутых выше. – *В.В.*) я решил, что самой первой была работа Хиггса, поэтому в своей статье 1967 года я процитировал Хиггса первым и с тех пор поступал именно так. Другие физики, очевидно, повторяли за мной» [31. С. 318].

В итоге прижилось название именно «бозон Хиггса». Помимо «терминологической истории», из приведенного фрагмента следует, что настоящее предсказание бозона, открытого в 2012 году, было сделано в явной форме именно С. Вайнбергом в его статье 1967 года А. Салам в своей Нобелевской лекции был весьма лаконичен в отношении своей работы 1968 года [36]. Мы, несмотря на некоторые повторы, все-таки приведем это место из его Нобелевской лекции из-за нескольких важных деталей, о которых ранее не говорилось: «Последний шаг в построении электрослабой теории был сделан Вайнбергом и мной (Киббл из Империял-колледжа обучал меня механизму Хиггса) (напомним, что Т. Киббл вместе с Дж. Гуральником и К. Хагеном независимо от П. Хиггса и Ф. Энглера с Р. Браутом были первооткрывателями этого механизма. – *В.В.*). Мы смогли завершить формулировку спонтанно нарушенной  $SU(2) \times U(1)$  – теории для слабых лептонных взаимодействий с одним параметром, описывающим все слабые и электромагнитные явления при одном хиггсовском изодублете... Мы оба, Вайнберг и я, подозревали, что эта теория скорее всего является перенормируемой... Однако этот вопрос не был исследован серьезно до работы 'т Хоофта из Утрехта, который дал настоящее доказательство перенормируемости в 1971 г.» [22. С. 17–18]. И дальше следует «мостик» к следующей части, связанной во многом с работами советских теоретиков, прежде всего Л.Д. Фаддеева и В.Н. Попова: «Прогресс был обусловлен ранними основополагающими достижениями в области янг-миллсовской техники счета – работами Фейнмана, де Витта, Фаддеева и Попова, Мандельштама, Фрадкина и Тютина, Боулвара, Гейлора, Славнова, Стразди и Салама (точные ссылки на эти работы можно найти в книге А.А. Славнова и Л.Д. Фаддеева [43]. – *В.В.*)» [22. С. 18].

С высокой оценкой работы 'т Хоофта в восприятии и развитии электрослабой теории, как мы видим, согласны оба соавтора теории, и оба они подчеркивают, что успех голландского теоретика был обусловлен во многом работами советских теоретиков по квантовой теории калибровочных полей.

Отметим также два вполне справедливых вывода историко-научного характера, к которым приходит Салам. Первый вывод: «...В разработке спонтанно-нарушенной  $SU(2) \times U(1)$  – калибровочной теории принимала участие, прямо или косвенно, целая плеяда умов (Салам так или иначе упомянул примерно несколько десятков имен, из них не менее пяти – советские теоретики. – *В.В.*)». Не менее интересен второй вывод: «Мораль всего сказанного, возможно, состоит в том, что качественная идея не пробивает себе дорогу в физике до тех пор, пока не появляются возможности для ее количественной проверки» [22. С. 19]. Последний вывод относится и к таким «качественным идеям», как концепция калибровочных полей Янга и Миллса, как «механизм Хиггса» и как теория Вайнберга – Салама. При этом возможности для количественной проверки создаются как в процессе развития теории (в том числе путем построения квантовой теории калибровочных полей и доказательства ее перенормируемости), так и благодаря выходу на эксперимент (как было в случае нейтральных токов, которые предсказывались теорией).

Работы Вайнберга и Салама были важным, так сказать, предпоследним, шагом на пути к электрослабой теории. Последним шагом были работы М. Вельтмана и особенно его ученика Г. 'т Хоофта (1971). Но не следует забывать о раннем выдающемся вкладе в создание электрослабой теории, который был внесен Ш. Глэшоу, удостоенным вместе с Вайнбергом и Саламом Нобелевской премии «за вклад в объединенную теорию слабых и электромагнитных взаимодействий между элементарными частицами, в том числе за предсказание слабых нейтральных токов» [44. С. 576]. Мы знаем, что именно Глэшоу нашел правильную симметрию электрослабых взаимодействий  $SU(2) \times U(1)$  и предсказал существование массивного нейтрального векторного бозона и связанного с ним нейтрального тока. Вместе с тем он не оценил значение механизма Хиггса (эту «упущенную возможность» отмечал в своей Нобелевской лекции П. Хиггс), а Вайнберг и Салам оценили, и поэтому теория 1967 года все-таки именуется теорией Вайнберга – Салама, а не Вайнберга – Салама – Глэшоу. «И Вайнберг, и Салам, – говорил Глэшоу в Нобелевской лекции, – имели большой опыт в формальной теории поля, оба они сотрудничали с Голдстоуном в исследовании спонтанного нарушения симметрии. Ретроспективно не так уж удивительно, что именно они впервые применили этот ключ. Их  $SU(2) \times U(1)$ -калибровочная симметрия была спонтанно нарушена. Массы  $W$  и  $Z$  и природа эффектов нейтральных токов зависели от единственного измеримого параметра, не от двух, как в моей перенормируемой модели. Сила взаимодействия нейтральных токов предсказывалась правильно. Смелое предположение Вайнберга – Салама о перенормируемости было доказано в 1971 году. Нейтральные токи были открыты в 1973 году, но вплоть до 1978 года было неясно, имеют ли они в точности предсказанные свойства» [12. С. 58].

Остановимся на концептуальной структуре теории Вайнберга – Салама. Эта теория замечательным образом включает в себя три главных элемента стандартной модели в целом:

- 1) это – теория калибровочных полей Янга – Миллса;
- 2) в ней реализуется спонтанное нарушение симметрии (для наделения частиц массой);
- 3) она является перенормируемой теорией.

Конечно, это также – квантовая теория поля, и, как все теории этого типа, она конструируется на основе вариационного принципа действия (или, для краткости, лагранжиана) и принципов симметрии, или инвариантности. Как известно, обычные полевые теории имеют нетерову структуру (динамические переменные и законы сохранения в них, согласно теореме Нетер, получаются из соответствующих глобальных симметрий действия или лагранжиана). Локализация глобальных симметрий порождает определенные взаимодействия, подобно тому как переход от глобальной калибровочной симметрии в электродинамике к локальной калибровочной симметрии приводит к электромагнитному взаимодействию. Для изотопической симметрии сильных взаимодействий эта концепция впервые была развита Янгом и Миллсом в 1954 году [6].

Структура теорий, в которых фундаментальное взаимодействие, трактуется как калибровочное поле, является, таким образом, обобщенной нетеровой структурой. Такой структурой обладает и теория Вайнберга – Салама. Глобальная симметрия теории, которая является единой теорией электромагнитных и слабых взаимодействий, была найдена Ш. Глэшоу (1961). Это группа  $SU(2) \times U(1)$ . Ее локализация приводила к следующим калибровочным полям: двум слабым заряженным бозонным полям  $W$  и двум нейтральным бозонным полям, связанным с фотоном и нейтральным слабым бозоном  $Z$ . В несколько упрощенной форме лагранжиан взаимодействия теории может быть записан в виде суммы четырех членов, каждый из которых является произведением соответствующих и связанных с ними токов. Однако в теории 1961 года слабые бозоны получались безмассовыми, хотя было ясно, что реальные слабые бозоны, в отличие от фотона, должны были быть массивными. Введение же этих масс «руками» существенно обесценивало теорию, приводя к ее перенормируемости. Как мы знаем, Вайнберг и Салам нашли замечательный способ наделить слабые калибровочные бозоны массой, применив открытый тремя годами ранее механизм Хиггса и связанную с ним концепцию спонтанного нарушения симметрии. Они показали, что существовали физические состояния системы, не обладающие симметрией лагранжиана; таковым было вакуумное состояние (то есть физическое состояние с минимальной энергией). Такое нарушение симметрии достигалось за счет введения особого скалярного поля, взаимодействующего как с фермионными лептонами, так и с калибровочными векторными полями, и это взаимодействие и приводило к наделению частиц массой. Тем самым разрешалась главная проблема теории калибровочных полей, а именно проблема массы калибровочных



частиц, которая затрудняла признание и принятие теории Янга – Миллса, в частности и таким классиком современной физики, как В. Паули [9].

Несмотря на уверенность авторов в перенормируемости теории, явное доказательство этого отсутствовало, что вызывало сомнения в ее правильности. Кроме того теория предсказывала существование ряда новых частиц и нейтральных токов, связанных с  $Z$ -ноль-бозоном. На первых порах, как мы знаем, несмотря на то, что скалярное поле, вызывающее нарушение калибровочной симметрии, это тоже новая частица, на нее особого внимания не обращалось. Забегая вперед, отметим последовательные дальнейшие этапы развития теории Вайнберга – Салама, превратившие ее в одну из основ стандартной модели. В 1971–1972 годах усилиями ряда теоретиков, но прежде всего Г. 'т Хоофта, была доказана перенормируемость теории (и здесь безусловно важным было то, что он опирался на методы квантования калибровочных теорий, разработанные советскими математиками Л.Д. Фаддеевым и В.Н. Поповым). И это сразу привлекло повышенное внимание к теории. Затем экспериментаторы подтвердили существование нейтральных токов (1973), и спустя шесть лет Вайнберг, Салам и Глэшоу были удостоены Нобелевской премии. Далее, в 1983 году экспериментаторы обнаружили слабые  $W$ - и  $Z$ -бозоны с теми массами, которые предсказывались теорией. И только после этого нарастающую актуальность стала приобретать задача поиска бозона Хиггса. Но до открытия бозона Хиггса, которое произошло в 2012 году, Г. 'т Хоофт и его учитель М. Вельтман получили в 1999 году Нобелевскую премию «за прояснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий». А в 2013 году Нобелевской премии были удостоены П. Хиггс и Ф. Энглер за открытие механизма Хиггса и предсказание связанного с ним скалярного бозона, получившего с легкой руки С. Вайнберга название «бозона Хиггса».

Возвращаясь к структуре теории Вайнберга – Салама, отметим, что формульно-математическое изложение теории, близкое к тому, как это было сделано в их работах 1967–1968 годов [36; 37], содержится в следующих обзорных статьях и книгах 1970–1980-х годов [4; 8; 37–41; 43]. Весьма полезна также «Физика микромира», изданная в 1980 году в серии «Маленькая энциклопедия» под редакцией Д.В. Ширкова [45]. Ясное современное изложение классической части электрослабой теории содержится в книге [46]. В заключение еще раз подчеркнем, что все особенности теории и других, родственных ей, моделей в сжатой форме содержатся в структуре лагранжиана теории, согласованной с ее симметрией, а также наборами фермионных полей (источников) и бозонных калибровочных полей (обеспечивающих взаимодействия между фермионами). Кроме того, в лагранжиане теории имеются члены, связанные с введением скалярного поля, нарушающего симметрию и наделяющего слабые калибровочные бозоны массой.

Выписанный в монографии Л.Б. Окуня [47. С. 172] простейший лагранжиан электрослабой теории, точнее ее лептонной части (соответствующей только легким лептонам, то есть электронам и нейтрино), состоит из девяти слагаемых и занимает три строчки. Первые два слагаемых (бозонный сектор) – это члены, квадратичные по напряженностям калибровочных полей,

отвечающих слабым бозонам и фотону. Следующие три члена описывают свободное движение фермионов и их взаимодействие с калибровочными полями. Последние четыре члена описывают скалярное поле, нарушающее симметрию лагранжиана и позволяющее наделять массами как калибровочные бозоны, так и фермионы: шестой член описывает свободное движение скалярного поля, а также его взаимодействие с калибровочными бозонными полями; седьмое слагаемое характеризует потенциальную энергию скалярного поля, приводящую к наличию постоянного скалярного поля в вакууме (вакуумный конденсат); наконец, последние два слагаемых описывают взаимодействие фермионов со скалярным полем, наделяющих массой эти фермионы. Аналогичным образом в лагранжиан можно ввести тяжелый лептон (мюон) и соответствующее ему мюонное нейтрино, а также тау-лептон и связанное с ним нейтрино. Точно так же включаются в лагранжиан и кварки. При формировании фермионных членов в лагранжиане следует с самого начала учитывать факт несохранения четности в слабых взаимодействиях и отдельно рассматривать левые и правые частицы, точнее соответствующие им дублеты и синглеты. Добавим еще, что скалярное поле (точнее скалярные поля, их может быть несколько), о котором шла речь, является в сущности знаменитым бозоном Хиггса, предсказанным, таким образом, сначала в очень туманной форме П. Хиггсом (и неявно – также другими изобретателями механизма Хиггса), и вполне определенно, теорией Вайнберга – Салама. О возможности его открытия стали говорить с начала 1980-х годов, а само открытие было сделано только в 2012 году.

### О метафизических аспектах электрослабой теории

Касаясь вопроса о структуре теории Вайнберга – Салама, мы в какой-то мере уже затрагивали ее метафизические аспекты. Здесь же, в заключение, попытаемся кратко сформулировать эти аспекты. Прежде всего, имеется в виду *принцип симметрии*, его различные модификации, которые фигурируют в электрослабой теории и истории ее создания. Первый важный шаг был связан с обнаружением глобальной внутренней симметрией теории, а именно с унитарной  $SU(2) \times U(1)$ -симметрией (Ш. Глэшоу, 1961). В соответствии с теоремой Нетер с этой симметрией связаны соответствующие законы сохранения (квантовые числа). Переход от глобальной симметрии к локальной (при этом параметры группы симметрии становятся функциями пространства-времени; этот переход связан с метафизической концепцией близкодействия, или «концепцией локализованного поля, лежащей в основе обычных физических теорий»), позволяет ввести соответствующие векторные взаимодействия (называемые также калибровочными полями, или полями Янга – Миллса; последние впервые (1954) использовали этот подход для построения  $SU(2)$ -локальной калибровочной теории сильных взаимодействий). Такой, «симметрический», способ введения взаимодействий многие теоретики (Дж. Швингер, Дж. Сакураи, Д.В. Ширков и др.) предпочитали связывать с

метафизическим, по существу, принципом «внутренняя симметрия – ergo динамика», «динамика из симметрии».

Но в 1950–1960-е годы такой способ введения взаимодействий столкнулся с проблемой массы, точнее безмассовости, калибровочных частиц. В сочетании с некоторыми другими эта проблема привела даже к серьезным сомнениям в отношении квантово-полевой программы (парадигмы) в теории элементарных частиц. Большинство физиков в этот период были готовы отказаться от нее и примкнуть к альтернативной феноменологической программе, опирающейся на беспольную теорию S-матрицы (с использованием дисперсионных соотношений, полюсов Редже, концепции бутстрапа). Но квантово-полевую программу, а вместе с ней и локально-калибровочную концепцию взаимодействий спасла еще одна нетривиальная модификация симметрии, а именно так называемое спонтанное нарушение симметрии (СНС). Разработанный на ее основе «механизм Хиггса» позволил наделить калибровочные частицы массой и тем самым реабилитировать и локально-калибровочную концепцию Янга – Миллса, и квантово-полевую программу в целом.

На этом этапе сработал важный, если и не метафизический, то методологический *принцип трансляции идей* и структур из одной области физики в, казалось бы, очень далекую от нее другую область (в данном случае из физики конденсированных сред, в том числе из теории сверхпроводимости, в физику элементарных частиц и квантовую теорию поля). Из теорий сверхпроводимости и сверхтекучести в квантово-полевую теорию элементарных частиц была транслирована и концепция СНС. В этой связи заслуживает внимания замечание Д.В. Ширкова «о двух, в какой-то степени противостоящих друг другу, способах получения представлений об устройстве окружающего мира» [6. С. 582], относящихся, таким образом, к метафизике. Первый способ – «это путь теоретика-феноменолога – от явления к теоретической схеме и обратно». Другой, более умозрительный, путь, – это путь теоретика-редукциониста, «старющегося исходить из некоторых более глубоких... принципов» типа «принципа динамики из симметрии», то есть метафизических по своей сути [Там же]. С этой точки зрения, Л.Д. Ландау в работах по применению СНС к описанию сверхпроводимости был феноменологом, а Н.Н. Боголюбов, разрабатывавший микроскопическую теорию сверхпроводимости и сверхтекучести на основе СНС, был, скорее, редукционистом. Еще один канал переноса идеи СНС из физики конденсированного состояния в физику элементарных частиц, как это особенно четко было указано, Д.А. Киржницем [33], был связан с «программой Гейзенберга», метафизической во многом программой построения единой нелинейной теории материи. Идея СНС, которая фактически использовалась им в теориях ферромагнетизма и сверхпроводимости, позволяла разрешить трудности единой теории материи, касающиеся проблемы разных симметрий для разных фундаментальных взаимодействий. Однако поначалу электрослабая теория вызывала у большинства физиков большие сомнения, и только после доказательства ее перенормируемости Г. 'т Хоофтом (1971) она быстро получает признание.

Здесь произошла парадоксальная трансформация, казалось бы, чисто вычислительного требования, метафизически вроде бы не нагруженного, в своего рода эстетический, а затем и квазиметафизический принцип, *принцип перенормируемости*. С самого начала возникновения квантовой теории поля в работах Гейзенберга и Паули (1929) в ней были обнаружены так называемые расходимости, заключающиеся в том, что выражения для некоторых наблюдаемых величин, вычисляемых с помощью теории возмущений, получались бесконечно большими. В 1948 году Р. Фейнман, Дж. Швингер, С. Томонага, а также Ф. Дайсон, разработали метод избавления от расходимостей посредством перенормировки нескольких физических величин (зарядов и масс) в квантовой электродинамике (КЭД). КЭД стала нормальной теорией, удовлетворяющей принципу перенормируемости. Квантово-полевые проекты слабых и сильных взаимодействий сталкивались в этом плане с серьезными трудностями.

Поначалу это не казалось их существенным недостатком. Как заметил Л.Б. Окунь в своей монографии «Лептоны и кварки» (1981), «при известном снобизме можно сказать, что требование перенормируемости теории является чисто «ремесленным» и что «цель его придать смысл расчетам по теории возмущений, но природа может совершенно не заботиться об этом» [47. С. 146]. Иначе говоря, ничего метафизического в этом требовании нет. Но затем оно приобретало силу, как в эстетическом плане, так и в метафизическом отношении как мощный принцип выбора эффективной теории. Л.Б. Окунь так писал об эстетическом аргументе перенормируемости: «Перенормируемая теория слабого взаимодействия, несмотря на свое „неаристократическое“, „ремесленное“ происхождение... полна жизненных сил, красива и обладает большим запасом предсказаний» [47. С. 147].

Здесь также заслуживает внимания своеобразная метафизическая аргументация теории перенормировок японским теоретиком нобелиатом С. Томонагой, о которой напомнил его соотечественник, тоже нобелиат, Й. Намбу: «Ее (то есть, теории перенормировок. – В.В.) дух Томонага как-то кратко выразил словами: „Принцип недеяния“. Суть его слов в том, что надо признать совершенство теории, отказаться от притязаний на вычисление любого из содержащихся в ней выражений и отделить осуществимое от неосуществимого. В определенном смысле такая позиция напоминает восточную философию примирения с действительностью» [3. С. 153]. И затем Намбу поясняет, что Томонага и его соавторы по концепции перенормируемости сумели отделить вычисляемые и невычисляемые величины (к последним относились масса и заряд электрона). Они обратили внимание на то, что на опыте наблюдаются полные масса и заряд, которые можно разделить на часть, относящуюся к голлому электрону и часть, относящуюся к окружающему его облаку виртуальных электронно-позитронных пар, что приводит к бесконечно большим значениям этих величин. «Решение проблемы бесконечностей, – продолжил Намбу, – сводится к утверждению, что относящиеся к облаку бесконечные величины компенсируются соответствующими величинами, характеризующими ненаблюдаемую голую частицу, в результате чего остаются

наблюдаемые значения массы и электрического заряда» [З. С. 154.]. Заметим, в заключение, что теория перенормировок и перенормируемость также имеют симметрическую природу, которая проявляется в концепции ренорм-группы (см. об этом [48]).

### Литература

1. *Энглер Ф.* Механизм БЭХ и его скалярный бозон // УФН, 2015. Т. 185, № 10. С. 1050–1058
2. *Киббл Т.* История нарушения симметрии электрослабых взаимодействий / пер. В. Кайдаровой. URL: <https://ru.wikipedia.org/Киббл,Томас>
3. *Намбу Ё.* Кварки. М.: Мир, 1984. 225 с.
4. *Зи Э.* Квантовая теория поля в двух словах. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 632 с.
5. *Вайнберг С.* Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. М.: УРСС, 2004. 256 с.
6. *Ширков Д. В.* 60 лет нарушенным симметриям в квантовой теории поля (от теории сверхтекучести Боголюбова до Стандартной модели) // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 6. С. 581–589.
7. *Владимиров Ю. С.* Метафизические основания физики (Доклад на семинаре «Основания фундаментальной физики», рук. Ю. С. Владимиров, 5 октября 2023 г.). URL: [https://www.youtube.com/channel/USGjOm1IJwSeHyFOheT\\_5Pg](https://www.youtube.com/channel/USGjOm1IJwSeHyFOheT_5Pg)
8. *Pais A.* Inward bound: of matter and forces in the physical world. Oxford, N.Y.: Oxford Univ. Press, 1986. VIII+666 p.
9. *Визгин В.П.* У истоков стандартной модели в физике фундаментальных взаимодействий // Исследования по истории физики и механики. 2019–2020. М.: Янус-К, 2021. С. 249–293/
10. *Герштейн С. С.* От бета-сил к универсальному взаимодействию // Природа. 2010. № 1. С. 3–14.
11. *Ахиезер А. И., М. П. Рекало.* Элементарные частицы. М.: Наука, 1986. 256 с.
12. *Глэшоу Ш.* На пути к объединенной теории – нити в гобелене (Нобелевская лекция) // На пути к единой теории поля. М.: Знание, 1980. С. 51–64.
13. *Салам А., Уорд Дж.* Слабые и электромагнитные взаимодействия // Элементарные частицы и компенсирующие поля: сб. С. 186–195.
14. *Сакураи Дж.* Теория сильных взаимодействий // Элементарные частицы и компенсирующие поля: сб. С. 42–104.
15. *Glashow S. L.* Partial symmetries of weak interactions // Nuclear Physics. 1961. Vol. 22. P. 579–588.
16. *Schwinger J.* A theory of the fundamental interactions // Annals of Physics. 1957. Vol. 2. P. 407–454.
17. *Nambu Y., Jona-Lasinio G.* Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. 1, 2 // Phys. Rev. 1961. Vol. 122. P. 345–358; Vol. 124. P. 246–254.
18. *Вакс В. Г., Ларкин А. И.* О применении методов теории сверхпроводимости к вопросу о массах элементарных частиц // ЖЭТФ. 1961. Т. 40 (1). С. 282–289.
19. *Goldstone J.* Field theories with «superconductor» solutions // Nuovo Cimento. 1961. Vol. 19. P. 154–164.
20. *Goldstone J., Salam A., Weinberg S.* Broken symmetries // Phys. Rev. 1962. Vol. 127. P. 965–970.

21. *Вайнберг С.* Идеиные основы единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий (Нобелевская лекция) // На пути к единой теории поля: сб. М.: Знание, 1980. С. 36–51.
22. *Салам А.* Калибровочное объединение фундаментальных сил // На пути к единой теории поля: сб. М.: Знание, 1980. С. 5–27.
23. *Englert F., Brout R.* Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons // *Phys. Rev. Letters.* 1964. Vol. 13, no. 9. P. 321–323.
24. *Higgs P.* Broken symmetries and the masses of gauge bosons // *Phys. Rev. Letters.* 1964. Vol. 13, no. 16. P. 508–509.
25. *Guralnik G., Hagen C., Kibble T.* Global conservation laws and massless particles // *Phys. Rev. Letters.* 1964. Vol. 13, no. 20. P. 585–587.
26. *Хиггс П.* Как удалось обойти теорему Голдстоуна. Нобелевская лекция // УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1059–1060
27. *Энглер Ф.* Механизм БЭХ и его скалярный бозон // УФН. 2015. Т. 185, № 10. С. 1050–1058
28. *Anderson P.* Plasmons, gauge in variance and mass // *Phys. Rev.* 1963. Vol. 130. P. 439–442.
29. *Швингер Ю.* 10. Калибровочная инвариантность и масса // *Элементарные частицы и компенсирующие поля.* С. 203–206. URL: [https://scask.ru/l\\_book\\_del.php?id=39](https://scask.ru/l_book_del.php?id=39)
30. *Higgs P.* Broken symmetries, massless particles and gauge fields // *Phys. Lett.* 1964. Vol. 12. P. 132–133.
31. *Вайнберг С.* Все еще неизвестная Вселенная. Мысли о физике, искусстве и кризисе науки. М.: Альпина нон-фикшн, 2020. 330 с.
32. *Визгин В. П.* Об «историко-научных феноменах» в истории открытия кварков // *Управление наукой: теория и практика,* 2023. Т. 5, № 3. С. 185–202.
33. *Киржниц Д. А.* Сверхпроводимость и элементарные частицы // *Труды по теоретической физике и воспоминания: в 2 т. Т. 1.* М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. С. 172–197.
34. *Иоффе Б. Л.* Атомные проекты: события и люди. М.: ЦСП и М, 2018. 208 с.
35. *Weinberg S.* A model of leptons // *Phys. Rev. Letters.* 1967. Vol. 19, no. 21. P. 1264–1266.
36. *Salam A.* Weak and electromagnetic interactions // *Elementary particle theory: Relativistic group and analyticity. Proceedings of Nobel Conference VIII / ed. by N. Svartholm.* Stockholm: Almqvist and Wiksell, 1968. P. 367–377.
37. *Вайнберг С.* Квантовая теория поля. Т. 2: Современные приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 528 с.
38. *Квантовая теория калибровочных полей: сборник статей / под ред. Н. П. Коноплевой,* М.: Мир, 1977. 436 с.
39. *Берестецкий В. Б.* Нуль-заряд и асимптотическая свобода // *Проблемы физики элементарных частиц.* М.: Наука, 1979. С. 231–254.
40. *Moriyasu K.* An elementary primer for gauge theory. Singapore: World Scientific, 1983 – VIII+177 p.
41. *Нелипа Н. Ф.* Физика элементарных частиц. Калибровочные поля. М.: Высшая школа, 1985. 280 с.
42. *Левин А. Е.* Разговор с классиком // *Популярная механика.* 2013. № 1.
43. *Славнов А. А., Фаддеев Л. Д.* Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1988. 272 с.
44. *Ильин В. А., Кудрявцев В. В.* История и методология физики: учебник для магистров. М.: Изд. Юрайт, 2014. 579 с.
45. *Физика микромира, Маленькая энциклопедия / под ред. Д. В. Ширкова.* М.: Советская энциклопедия, 1980.

46. Степанянц К. В. Классическая теория поля. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 540 с.
47. Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981. 304 с.
48. Ширков Д. В. Ренорм-группа Боголюбова // Сообщения Объединенного института ядерных исследований. P2-2008-107. Дубна, 2008. 46 с.

## HISTORY OF CREATION AND METAPHYSICAL ASPECTS OF ELECTROWEAK THEORY: DEVELOPMENT AND MODIFICATIONS OF THE SYMMETRY PRINCIPLE

**VI.P. Vizgin**

*Institute of History of Natural Science and Technology RAS  
14 Baltiyskaya St, Moscow, 125315, Russian Federation*

**Abstract.** The history of the creation of a unified theory of electromagnetic and weak interactions (electroweak theory, also called the Weinberg-Salam theory), which is an essential part of the modern theory of elementary particles and fundamental interactions between them, called the standard model, is explored. The main turning points in this history are highlighted: the concept of non-Abelian gauge fields (Yang-Mills fields, 1954), the promotion of the idea of unifying electromagnetic and weak forces (1958-1959), the discovery of the global internal symmetry of electroweak interactions (1961, S. Glashow), the discovery of based on spontaneous symmetry breaking – the Higgs mechanism (1964), which made it possible to solve the problem of the mass of gauge particles (Weinberg-Salam theory, 1967). The metaphysical aspects of the theory and the process of its construction are considered, mainly related to the principle of symmetry and its various extensions and modifications.

**Keywords:** standard model, electroweak theory (Weinberg – Salam theory), symmetry principle, gauge fields (Yang – Mills fields), gauge particle mass problem, spontaneous symmetry breaking, Higgs mechanism, Higgs boson, renormalizability principle, “dynamics from symmetry” principle, metaphysical aspects of the theory