

*Р.М. Нугаев*

## **Методологические проблемы синтеза теорий электромагнетизма и слабых взаимодействий**

**Нугаев Ринат Магдиевич** – доктор философских наук, профессор. Поволжская государственная академия физической культуры, спорта и туризма. Российская Федерация, 420138, г. Казань, ул. Деревня Универсиады, д. 35; e-mail: rinatnugaev@mail.ru

В статье представлен анализ методологических проблем создания теории электрослабых взаимодействий, связанных с оценкой ее онтологического статуса. Для этого рассмотрен процесс объединения теорий электромагнитных и слабых взаимодействий, имевший место в 60–70-х гг. XX в. Дан сравнительный анализ данного синтеза по отношению к классическим образцам объединения, отсылающим к работам И. Ньютона, Дж. Максвелла и А. Эйнштейна. Показано, что эпистемологическая специфика синтеза теорий электромагнитных и слабых взаимодействий в истории науки состоит в том, что он был осуществлен в рамках синтетической программы, ставившей своей целью построение последовательности теорий электрослабых взаимодействий в качестве последовательных приближений к калибровочной теории Янга – Миллса. Рассмотрены основные этапы реализации калибровочной синтетической программы, завершившейся разработкой так называемой модели Глэшоу – Вайнберга – Салама. Обосновывается, что во многом гибридный характер этой модели обуславливает ее незаконченный характер.

**Ключевые слова:** методология синтеза, электромагнетизм, слабые взаимодействия, гибридные объекты

Понятия «единство науки», «единство научного метода», «единая теория» в современной, посткуновской философии науки являются предметом оживленных дискуссий. Иногда они даже отвергаются как нежелательные в социально-политическом [Dupre, 2012], метафизическом [Galison, Darton, 2007] или иных смыслах.

Классическими и наиболее успешными образцами синтеза научных теорий принято считать следующие 4 эпизода истории физики: ньютоновское объединение «физики Земли» и «математики Неба», максвелловский синтез

оптики и теории электромагнетизма и эйнштейновские синтезы – пространства и времени в специальной и гравитации и инерции в общей теориях относительности. В силу того, что классические образцы синтеза подробно изучены (см., например, [Morrison, 2007; VanDongen, 2010; Nugayev, 2018]), значительный интерес представляют собой неклассические, современные, образцы.

Цель данной статьи – обсудить методологические проблемы синтеза научных теорий в контексте историко-научной реконструкции одного из современных эпизодов – создания теории электрослабых взаимодействий. Эта реконструкция нацелена на раскрытие *специфики генезиса* электрослабой теории, выявление отличия этого эпизода от классических образцов синтеза.

Первая квантово-полевая теория слабых взаимодействий была создана Э. Ферми в 1934 г. для объяснения процесса  $\beta$ -распада. Для предлагаемой реконструкции важно, что именно эта теория явилась местом *встречи* двух существенно различных фундаментальных теорий XX в. – квантовой электродинамики и теории слабых взаимодействий [Fermi 1934, p. 1151]. В дальнейшем теория Ферми была значительно усовершенствована для того, чтобы, убедительно объяснив процессы несохранения четности, трансформироваться в V-A теорию [Feynman, Gell-Mann, 1958]. Правда, встреча теорий столь принципиально разных взаимодействий, как слабое и электромагнитное (чего только стоит крайне короткий радиус действия слабой силы –  $10^{-15}$  в сравнении с фактической бесконечностью электромагнитного взаимодействия  $r^{-2}$ ), не могла не привести к таким парадоксам, как *неперенормируемость*, и, соответственно, к следующему странному предсказанию: сечения рассеяния нейтрино на электронах должны линейно расти вместе с ростом энергий (это должно было привести к переизбытку нейтрино в пузырьковых камерах и космических лучах). Упомянутые парадоксы слишком хорошо напоминали печально знаменитую «*ультрафиолетовую катастрофу*», вызванную встречей максвелловской электродинамики, больцмановской статистической механики и классической термодинамики [Nugayev, 2018].

Благодаря попыткам преодоления этих трудностей и были предложены объяснения феномена радиоактивности, основанные не на представлениях о непосредственных точечных взаимодействиях слабых токов, а на идее *обмена* частицами. «Так называемая слабая ядерная сила – сила, ответственная за  $\beta$ -радиоактивность (и описанная неперенормируемой теорией Ферми), должна была передаваться некоторыми неизвестными мезонами с нулевым спином для того, чтобы теория была перенормируемой» [Salam, 1984c, p. 325]. Для сохранения пространственно-временной структуры V-A теории было необходимо предположить, что частицы-носители слабого взаимодействия являются векторными мезонами со спином 1, которые стали называть *промежуточными векторными бозонами* (ПВБ). И феноменология V-A теории требовала введения не просто ПВБ, а  $W^+$  и  $W^-$  частиц.

Однако случилось так, что изменение способов описания слабых взаимодействий не столько привело к разрешению рассмотренных парадоксов (противоречий встречи), сколько еще более высветило пропасть, разделявшую фотоны и W-бозоны. Самым разительным отличием было то, что фотоны электрически нейтральны, тогда как  $\beta$ -распад с необходимостью включал обмен электрически заряженными частицами.

Второе – и на этот раз *коренное* – отличие состояло в том, что  $W$ -бозоны были *массивными* частицами (в отличие от безмассового фотона). Это было необходимо для объяснения чрезвычайно малого радиуса действия слабых сил в атомах. Данное обстоятельство (вместе с векторным характером ПВБ) и вело к появлению таких расходящихся членов в пропагаторах (функциях Грина) для слабых взаимодействий, которые не удавалось элиминировать посредством рецептов, заимствованных из квантовой электродинамики (КЭД) [Morrisson, 2007].

Неоднократные неудачи в устранении расходимостей показали, что необходимо от попыток решения частных проблем перейти к решению главной – *синтезу* теорий электромагнитных и слабых взаимодействий. И первой обнадеживающей попыткой построения такой теории явилась работа Ю. Швингера [Schwinger, 1957], обозначившая главное направление успешного синтеза – так называемую калибровочную теорию Янга и Миллса.

В ряде исследований, но прежде всего в своей классической работе Чж. Янг и Р. Миллс продемонстрировали, что специфические, зависящие от координат, локальные, так называемые *калибровочные*, преобразования не изменяют лагранжиан в КЭД и, следовательно, все предсказания этой теории [Yang, Mills, 1954]. При этом та часть лагранжиана  $L$ , которая относится к электронам и позитронам, при калибровочных преобразованиях инвариантна; для инвариантности нужна та часть  $L$ , которая относится к *взаимодействиям* фотонов с источниками поля. В итоге существование взаимодействующих с источниками поля фотонов предстает как необходимое условие калибровочной инвариантности *всего* электромагнитного лагранжиана.

Неудивительно, что Янгу и Миллсу пришла в голову мысль о том, что *любую* полевую теорию (и даже теорию сильных взаимодействий) можно сконструировать в соответствии с КЭД. На языке теории групп калибровочные преобразования, оставляющие инвариантным лагранжиан КЭД, относятся к унитарной группе преобразований  $U(1)$ . Янг и Миллс попытались создать аналогичную теорию, которая была бы инвариантна относительно локальных преобразований группы сильно взаимодействующих симметрий изоспина, т. е. специальной унитарной группы  $SU(2)$ . Роль первых двух членов лагранжиана, которые в КЭД относились к электронам и протонам, теперь стали играть члены, относившиеся к изоспиновым мультиплетам адронов. Теперь волновая функция представляла 2-компонентное поле  $(p, n)$ , представлявшее дублет ядерного изоспина. Как и в КЭД, эта часть лагранжиана оказалась инвариантной относительно калибровочных преобразований. Но если мы введем  $W$ -частицы со спином 1, образующие знаменитый триплет  $(W^-, W^0, W^+)$ , то сможем без особых затей ввести в  $L$  такие члены, описывающие взаимодействия  $W$ -бозонов с нуклонами, что его инвариантность относительно калибровочных преобразований будет, наконец, обеспечена.

Теория, сконструированная Янгом и Миллсом, стала рассматриваться в качестве *образца* («парадигмы») создания целого класса калибровочных теорий, вплоть до теории гравитации. Действительно, «замечательным свойством неабелевой калибровочной симметрии является то, что она не только накладывает ограничение на массы частиц и константы связи, но и детерминирует динамику взаимодействия калибровочных полей» [Okun, 1987, p. 185].

Янг и Миллс создали SU(2)-инвариантную теорию взаимодействующих нуклеонов, и многочисленные группы исследователей быстро распространили их результаты на другие калибровочные группы, на взаимодействия иных частиц [Сао, 1997, р. 269]. Как справедливо отмечает Т. Као, «методологически использование калибровочной теории направлялось стремлением заполучить универсальный принцип, фиксирующий уникальную форму связей, сцеплений (couplings) между множеством различных возможностей...» [Ibid.].

Но вернемся к исследованиям Ю. Швингера, поставившего своей конечной целью описание *всего* множества элементарных частиц в рамках теории квантованных полей. В частности, он намеревался рассмотреть массивные заряженные векторные бозоны и безмассовые фотоны в качестве калибровочных мезонов. Его наиболее существенные результаты состояли в демонстрации следующих двух тезисов:

(а) лептоны несут слабую форму изоспина аналогичную сильно взаимодействующим частицам;

(б) фотон и промежуточный векторный бозон (идентифицируемый как Z-частица) являются частями одного и того же изоспинового мультиплетта.

Работа Швингера раскрыла ведущую роль, которую играла симметрия как в конструировании теоретико-полевых моделей элементарных частиц, так и в успешном синтезе этих моделей. Он справедливо предположил, что одной из причин разнообразия элементарных частиц является наличие их так называемых *внутренних* степеней свободы. Ядро его исследовательской программы составляли базисные принципы симметрии и теории поля, на основе которых он конструировал концептуальный каркас для описания фундаментальных взаимодействий. В частности, лептоны слабых взаимодействий начали трактоваться им как неприводимые представления трехмерной группы вращений, из которой можно было считать их основные черты. Отталкиваясь от рассмотрения симметрии между изоспиновыми свойствами тяжелых бозонов и фермионов, Швингер поставил вопрос о существовании семейства бозонов, которые явились бы реализацией трехмерной группы вращений. Из-за того, что электромагнитное поле предположительно оказывалось третьей компонентой трехмерного изоспинового вектора, было совершенно естественно предположить существование еще двух заряженных частиц, входящих в триплет. Отсюда Швингер заключил, что «мы вынуждены принять концепцию существования семьи бозонов со спином равным единице, в которую входят безмассовый нейтральный фотон и пара электрически заряженных Z-частиц, которые предположительно несут массу по аналогии с лептонами» [Schwinger, 1957, р. 434]. И на основе общего предположения о том, что существует семья бозонов, являющихся изотопическим аналогом лептонов, вкуче с идентификацией фотона в качестве нейтрального члена этого семейства Швингер успешно развил динамическую теорию заряженного поля Z-частиц со спином 1.

Тем не менее данная *реальная* попытка объединения слабых и электромагнитных взаимодействий столкнулась с множеством проблем, основной из которых была проблема массы векторных бозонов. Радиус действия слабых взаимодействий крайне мал, что в соответствии с принципом неопределенности предполагает весьма значительные массы W-частиц. Их мы должны «руками» (by hands) вводить в лагранжиан, что расходится с одним из необходимых

условий применимости калибровочного подхода: калибровочные частицы должны быть безмассовыми.

«Проблема массы» привела к всеобщему мнению, что только частичные симметрии, т. е. инвариантность только части лагранжиана  $L$  относительно группы инфинитезимальных преобразований, могут связать массивные бозоны с безмассовым фотоном. Исследователи были вынуждены выйти за пределы триплета и ввести *дополнительный* нейтральный бозон  $Z^0$ , который мог бы быть связан с его собственным нейтральным лептонным током [‘T’Hooft, 1980].

Следующий важный шаг в синтезе электромагнитного и слабого взаимодействий сделал аспирант Швингера Ш. Глэшоу. В 1961 г. он выдвинул теорию, предвосхитившую многие особенности будущих достижений. Его модель включала как триплет, так и синглет калибровочных векторных бозонов, а соответствующая калибровочная симметрия теперь относилась к группе  $SU(2) \times U(1)$ . Триплет содержал положительно заряженный, отрицательно заряженный и нейтральный ПВБ, в то время как синглет относился только к нейтральному бозону. Благодаря соответствующей модификации квантово-полевого лагранжиана, состоявшей в искусном введении «массовых» членов, Глэшоу показал, что синглет и нейтральный член триплета «смешиваются» так, чтобы произвести как очень массивную частицу  $Z^0$ , так и безмассовую частицу, сильно напоминающую фотон (подробнее см.: [Pickering, 1984]).

Сходные результаты были получены А. Саламом и Дж. Уордом [Salam, Ward, 1964]. Действительно важным оказалось то обстоятельство, что эта работа, хотя и страдавшая таким недостатком, как «проблема масс» ПВБ, которые вводились в лагранжиан «руками» и приводили к неперенормируемости теории, тем не менее содержала возможность выхода из непростой проблемной ситуации. Возможности эти были связаны с концепциями «спонтанного нарушения симметрии» и «бозона Хиггса».

Подчеркнем, что идея спонтанного нарушения симметрии оказалась занесенной в физику элементарных частиц из достаточно далекой области – физики твердого тела (явление сверхпроводимости, теория которого была создана Л.Д. Ландау и В.Л. Гинзбургом). Необходимым звеном этого переноса оказались ученые – специалисты одновременно в двух областях – физике твердого тела и физике элементарных частиц. Так же как и в случае разработки калибровочных теорий, решающую роль сыграли исследователи, имевшие первоклассный опыт работы как в теории групп, так и в физике сильных и слабых взаимодействий.

Сама идея спонтанного нарушения симметрии возникла в физике твердого тела при теоретическом воспроизведении явления *ферромагнетизма*. Обычный магнит представляет собой совокупность обладающих спином частиц, расположенных в атомах железа. Магнетизм объясняется существованием взаимодействия спинов, когда каждый спин ведет себя, как крошечный магнит. Далее, лагранжиан системы в целом не содержит и намека на какое-либо выделенное направление, т. е. является «инвариантным относительно вращений». Но когда спины всей системы выстраиваются в линию для производства явления ферромагнетизма, физическое состояние ферромагнита теряет свойства инвариантности, присущего лагранжиану.

Значимость спонтанного нарушения симметрии для сильных и слабых взаимодействий была осознана Й. Намбу [Nambu, Jona-Lasilio, 1961], но дальнейшее развитие этой идеи было связано с исследованиями, проведенными в 1960-х гг. П. Хиггсом [Higgs, 1964; 1966]. Он разработал так называемый хиггсовский механизм на основе модели, заимствованной из квантовой электродинамики. Она состояла из обычного электромагнитного лагранжиана, дополненного частями, относящимися к двум скалярным полям с нулевым спином, которые взаимодействовали и с фотонами, и друг с другом так, чтобы калибровочная инвариантность сохранялась. Хиггс продемонстрировал, что если член в  $L$ , относящийся к массам скалярных полей, окажется отрицательным, то физический спектр теории должен будет содержать один массивный фотон и одну массивную скалярную частицу – так называемый бозон Хиггса.

Однако решающий шаг в объединении электромагнитных и слабых взаимодействий был сделан в 1967 г. независимо друг от друга С. Вайнбергом (Массачусетский технологический институт) и А. Саламом (Имперский колледж Лондона). И тот, и другой исходили из моделей электрослабых взаимодействий, предложенных ранее Глэшоу [Glashow, 1961] и Саламом и Уордом [Salam, Ward, 1964], но они заменили в лагранжиане термины, относившиеся к массам ПВБ и вводимые «руками», теми терминами, которые были образованы посредством хиггсовского механизма. В частности, в работе Вайнберга соотношения между массами ПВБ были определены при помощи так называемого угла Вайнберга  $\theta_w$  [Weinberg, 1967].

Фактически и Вайнберг, и Салам, не мудрствуя лукаво, соединили хиггсовский механизм с ранними электрослабыми моделями. Этим и объясняется тот факт, что их работы первоначально не вызвали особого интереса у научного сообщества. Но все переменялось после доказательства перенормируемости модели Вайнберга – Салама, которое было представлено Вельтманом и т'Хоофтом.

Итак, объединение электромагнитного и слабого взаимодействий несомненно состоялось. Но как его следует понимать? В чем состоит его специфика и отличие от четырех «образцовых» синтезов? Ключом к выявлению этой специфики могут служить следующие слова Салама, произнесенные в Стокгольме во время получения вместе с Глэшоу и Вайнбергом Нобелевской премии по физике (1979):

С незапамятных времен человек пытался понять сложность природы в терминах как можно меньшего числа элементарных понятий. Среди его поисков первый состоял, по словам Фейнмана, в нахождении «колес внутри колес»; задача натуральной философии состояла в отыскании самых последних колесиков мироздания, если таковые, конечно, существуют. Второй поиск относился к фундаментальным силам, которые заставляют колеса вертеться и сцепляться друг с другом... А вот третий поиск пытается объединить заряды (а значит, и силы) за счет поиска единой сущности, компонентами которой все эти различные заряды являются в том смысле, что они могут быть преобразованы друг в друга (курсив мой. – Р.Н.) [Salam, 1984c, p. 324].

Представляется, что исходным пунктом исследования ряда важных особенностей модели Вайнберга – Салама может служить книга канадского историка и философа науки М. Моррисон, содержащая наиболее полную

из представленных до сих пор рациональных реконструкций этого эпизода. Тем не менее определенные обстоятельства генезиса модели Вайнберга – Салама, раскрываемые иной эпистемологической моделью синтеза, не позволяют автору настоящей статьи согласиться со всеми выводами Моррисон. Выделим те из полученных ею результатов, которые относятся к рассматриваемой нами теме.

1. Случай объединения электромагнитного и слабого взаимодействий относится к *синтетическому*, но не редукционистскому типу синтеза теорий (подробнее об этих двух типах синтеза теорий см.: [Nugayev, 1999]). Подчеркнем, что объединение этих взаимодействий произошло не за счет грубой *редукции* одного взаимодействия к другому, но в результате искусственного комбинирования электромагнитного и слабого калибровочных полей.

2. Несмотря на синтетический способ синтеза, частицы-переносчики взаимодействий остаются жестко отделенными друг от друга. Тем не менее способ объединения, в основе которого лежит калибровочная группа  $SU(2) \times U(1)$ , приводит к *смешиванию* электромагнитного и слабого полей. Последнее стало возможным за счет отождествления лептонов с группой симметрии изоспина  $SU(2)$ , которая затем была объединена с группой  $U(1)$ .

3. Осевым параметром, контролирующим процесс смешивания, является так называемый *угол Вайнберга*, представляющий собой простую комбинацию констант связи электромагнитного и слабого взаимодействий. В самом деле, при помощи калибровочно-теоретических ограничений мы можем теоретически воспроизвести динамику электрослабой модели из математического каркаса калибровочной теории. Но этот каркас ничего не скажет нам о *перемешивании* двух фундаментальных полей.

4. Две фундаментальные теории, каждая из которых доминируется своей, независимой от другой, группой симметрий, «объединяются большей структурой симметрии, дающей новую гибридную теорию» [Morrison, 2007, p. 109]. Но в данном случае мы имеем дело не с простой *конъюнкцией*, но с *действительным синтезом*, приводящим как к переосмыслению электромагнитного потенциала, так и к новой динамике обоих фундаментальных полей.

5. Процесс объединения электромагнитных и слабых взаимодействий определялся соображениями, коренящимися в большей степени в *математике калибровочной теории*, чем в феноменологии физических процессов. Поэтому механизмы, вовлеченные в процесс синтеза, говорят нам больше о разновидности математических моделей и структур, имевшихся в распоряжении теоретиков, чем об онтологическом статусе самих электрослабых процессов. Действительно, взаимодействие электромагнитного и слабого полей описывается отнюдь не за счет использования феноменологических аспектов электрослабой теории. Внедрение в «живую ткань» теории чужеродного элемента, перенесенного из теории сверхпроводимости жидкого гелия, – идеи «спонтанного нарушения симметрии» – позволяет приспособить существенно отличные друг от друга сорта частиц, относящихся к электрослабой теории. Свойства этих частиц (массивных и безмассовых бозонов) не просто различны, но *диаметрально противоположны*. Эти несовместимости были разрешены при помощи «поля Хиггса». Более того, группы симметрий  $U(1)$  и  $SU(2)$ , управляющие электромагнитными и слабыми взаимодействиями, были соединены в большую группу  $U(1) \times SU(2)$  – в противоположность редукции частиц и сил

к общему источнику. Но единство было достигнуто не благодаря простой конъюнкции двух теорий или двух групп симметрий, а путем введения новых компонент во встретившиеся теории слабых и электромагнитных взаимодействий.

6. Не только единство, но и *перенормируемость* электрослабой теории обязана своей возможностью тем структурным особенностям, которые налагались не столько эмпирически фиксируемыми особенностями электромагнитных и слабых взаимодействий, сколько математическим каркасом модели Вайнберга – Салама.

7. Несмотря на то что электрослабая теория в самом деле описывает поведение сразу двух фундаментальных полей, «никакое каузальное объяснение не дано для того, чтобы объяснить, почему эти поля должны быть объединены... Механизм Хиггса является неотъемлемым свойством этого единства лишь в том смысле, что он допускает его *возможность*; тем не менее действительное объединение имеет место из-за ограничений, наложенных на группу изоспиновых симметрий, и из-за неабелевой структуры полей» [Morrison, 2007, p. 135].

8. Механизм объединения двух теорий состоит в соответствующей репрезентации *взаимодействия* или «*перемешивания*» различных полей. Но в силу того, что поля остаются различными, электрослабая теория сохраняет две отличные друг от друга константы связи: константу  $q$ , ассоциируемую с  $U(1)$  электромагнитным полем, и константу  $g$  для калибровочного поля  $SU(2)$ . Тем не менее для того, чтобы теория успешно предсказала массы  $W^\pm$  и  $Z^0$  частиц, мы должны знать величину основного состояния поля Хиггса  $\langle\phi_0\rangle$ . Однако эта величина не может быть подсчитана. Для выхода из затруднительного положения константы связи были остроумно скомбинированы в единый параметр, который называется «углом Вайнберга»  $\theta_w$ . Точнее,  $\text{Sin}\theta_w = q / \sqrt{g^2 + q^2}$ .

9. Для того чтобы определить  $\theta_w$ , мы должны знать  $g$  и  $q$ ; но непосредственно они неизмеримы. В итоге угол  $\theta_w$ , *определяющий степень перемешивания электромагнитного и слабого полей, из теории не определяется!* Этот параметр определяется феноменологически, из эксперимента:  $\theta_w \approx 30^\circ$ .

10. К наиболее убедительным эмпирическим предсказаниям электрослабой теории относятся как существование  $W$  и  $Z^\pm$  бозонов, так и существование так называемых нейтральных токов. Оба предсказания были подтверждены (1973, 1983).

Судя по всему, самый сильный элемент рассматриваемой реконструкции – анализ *математических* элементов механизма объединения, раскрывающий значительный отрыв электрослабой теории от ее эмпирического базиса. Этот отрыв связан с применением понятий и методов, разработанных в областях, далеких от физики слабых взаимодействий. Неудивительно, что Моррисон приходит к весьма скептическому выводу: «То, что я хочу показать в завершающем разделе, – это то, каким образом синтетическое единство, выказываемое электрослабой теорией, *недостаточно* для каких-либо заключений о единстве в Природе» [Morrison, 2007, p. 135]. Один из аргументов в пользу данной точки зрения – вывод о том, что «в противоположность току смещения в теории Максвелла, значительная доля объяснительной мощи электрослабой теории обусловлена механизмом (Хиггс), который не подкреплён экспериментальными данными» [Ibid., p. 139].



Несмотря на значимость полученных результатов, не все выводы Моррисон носят бесспорный характер. Начнем с недавнего открытия (на Большом адронном коллайдере) бозона Хиггса, фактически положившего конец спорам об эмпирической адекватности и электрослабой теории, и Стандартной модели элементарных частиц. Открытие было высоко оценено научным сообществом, что, в частности, выразилось в присуждении П. Хиггсу Нобелевской премии по физике (2013).

Слишком сильным представляется утверждение Моррисон, что электрослабая теория «сама по себе не дает полного ответа на вопрос о том, каким именно образом поля перемешиваются за счет уточнения прямых значений угла Вайнберга (т. е. степень перемешивания не определяется самой теорией). Еще важнее, что теория не определяет никоим образом то, что эти поля *должны* перемешиваться» [Morrison, 2007, p. 136]. В основе этого тезиса лежит одностороннее рассмотрение процесса встречи электромагнитной и слабой теории в работах Ферми и в V-A теории Фейнмана – Гелл-Манна. Действительно, эмпирически взаимодействия электромагнитного и слабого полей не были тогда зафиксированы; другое дело – так называемые парадоксы встречи, выражавшиеся в появлении расходимостей полевых величин и в перенормируемости теорий Ферми и Фейнмана – Гелл-Манна. Данное обстоятельство хорошо известно и представлено в стандартных учебных руководствах по электрослабой теории [Greiner, Muller, 2009]. Не менее убедительным является утверждение одного из исследователей, получившего Нобелевскую премию именно за объединение электромагнитных и слабых взаимодействий, – Ш. Глэшоу. В Нобелевской лекции бывший аспирант страстного сторонника объединения Ю. Швингера отметил:

разумеется, теория одних только слабых взаимодействий не могла быть сделана перенормируемой. Для этого слабые взаимодействия должны быть объединены с электромагнитными... В своей диссертации 1958 г. 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» [Glashow, 1980, p. 1321].

И максвелловская электродинамика, и эйнштейновская общая теория относительности (ОТО), и электрослабая теории строились на основе последовательного синтеза частных теоретических схем. В каждой синтетической теории использовался свой «нейтральный язык» для описания встретившихся теорий: в максвелловской синтетической программе – язык гидродинамики и теории вихрей, в ОТО – язык римановой геометрии, в электрослабой программе – язык калибровочной теории Янга – Миллса. Последовательное применение «нейтрального языка» позволило структурировать объединяемый материал, превращая его в частные теоретические схемы для последующего обобщения в глобальную теоретическую схему.

Иные аспекты специфики генезиса электрослабой теории раскрываются при сравнении этого процесса с генезисом ОТО и максвелловской электродинамики. В частности, базисная идеальная модель ОТО (или, в терминах В.С. Степина, фундаментальная теоретическая схема [Stepin, 2005]) была создана за счет

синтеза «частных теоретических схем» М. Абрагама, Г. Нордстрема и А. Эйнштейна [Nugayev, 2018]. Как сами частные модели, так и базисная модель были гибридными моделями, соединявшими, хотя и в разной степени, основные особенности всех встретившихся теорий. Эта же эпистемологическая схема присутствует и в случае с электрослабой теорией, но с той разницей, что в случае с ОТО роль эвристического принципа, направляющего конструирование последовательностей все менее и менее гибридных моделей, играл так называемый принцип эквивалентности. В случае электрослабой теории роль этого принципа выполнял «калибровочный принцип» – стремление максимально приблизиться к «идеалу» (А. Салам), т. е. к калибровочной теории Янга – Миллса.

Задача дальнейших этапов разработки электрослабой теории свелась к созданию ее адекватной калибровочной модели за счет поиска соответствующей группы симметрии, конструирования соответствующего лагранжиана, его совершенствования с целью добиться его инвариантности относительно калибровочных преобразований, доказательству его перенормируемости, сравнению предсказаний теории с экспериментом и т. д. В итоге мы можем заключить о «редукции» электрослабой теории к калибровочной теории Янга – Миллса, поэтому способ синтеза электромагнитных и слабых взаимодействий может быть более точно охарактеризован как «редукционистско-синтетический».

Вторым элементом позитивной эвристики синтетической программы создания электрослабой теории стала постоянная «оглядка» на электродинамику, использование КЭД в качестве образца («парадигмы») создания успешной перенормируемой калибровочной теории. Для этого прямо заимствовались не только и не столько положения успешной теории, но и методы (например, техника фейнмановских диаграмм).

Более того, как и ОТО, электрослабая теория была создана за счет последовательного синтеза систем различных гибридных объектов, первым из которых являются ПВБ  $W^\pm$  и  $Z^0$ . Точнее, «эти три заряда – вместе с электрическим – образуют четыре компонента “единой” сущности (entity), каждая компонента которой преобразуется в другую при помощи операций групповой структуры  $SU(2) \times U(1)$ , действующей во “внутреннем пространстве симметрий”» [Salam, 1984a, p. 316]. Эти гибридные объекты, сконструированные одновременно из разных встретившихся теорий, и осуществляли перенос свойств из одной теории в другую и соответствующую модификацию этих теорий. Согласно Саламу

...наиболее убедительное предсказание, подтвержденное в прошлом году в Стэнфордском линейном центре для ускорителей, состояло в следующем. Если слабая ядерная сила есть действительно не что иное, как аспект фундаментальной силы, другим аспектом которой является электромагнетизм, то электромагнетизм – сила между электронами и протонами, – будучи тщательно исследованным, должен выказать такие свойства, которые раньше связывались только со слабой ядерной силой. Одна из таких характеристик – различия в силе, испытываемой лево-вращающимися и право-вращающимися электронами. Стэнфордский эксперимент, измеривший эти различия с точностью, которая никогда ранее не была достигнута, показал, что лево-вращающиеся электроны, будучи рассеяны в тяжелой воде, действительно отклоняются на одну десятитысячную долю больше, чем электроны право-вращающиеся. На одну часть из десяти тысяч – в точности в соответствии

с предсказаниями теории – то, что раньше считалось отличной от других слабой ядерной силой, внедряется в доселе независимую область электромагнетизма для того, чтобы выдвинуть гипотезу о том, что эти две силы действительно являются сторонами единой фундаментальной силы и переплетаются (intertwined) одна с другой [Salam, 1984b, p. 304].

Правда, существует весьма важное отличие редукционистско-синтетического способа построения электрослабой теории от максвелловского. Если у Максвелла объединение электромагнетизма и оптики увенчалось потрясающе точным в результате введения базисного гибридного объекта – тока смещения – вычислением скорости света из электрической и магнитной констант ( $c = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ ), то у Глэшоу, Салама и Вайнберга объединение электромагнитного и слабого взаимодействий привело лишь к введению угла Вайнберга, описывающего перемешивание слабого и электромагнитного полей. А этот угол, напомним, не вычисляется в теории, а определяется эмпирически, из эксперимента. Данное обстоятельство особенно явно раскрывает *незавершенность* электрослабой теории. Как неоднократно отмечал академик Л.Б. Окунь, то, что слабые и электромагнитные взаимодействия характеризуются одним и тем же зарядом, есть наиболее яркое выражение того, что стандартная модель электрослабых взаимодействий все же является *единой* теорией слабых и электромагнитных взаимодействий. Но «то, что в модели имеется свободный параметр  $\theta_w$ , который теоретически не фиксируется и не предсказывается, означает, что *единая теория пока не завершена*. <...> Наличие свободного параметра  $\theta_w$  является следствием того, что группа симметрии слабых взаимодействий является прямым произведением двух простых групп: SU(2) и U(1). Мы могли бы избавиться от этого произвола, если бы потребовали, чтобы обе эти группы были подгруппами какой-то более обширной группы (курсив мой. – Р.Н.)» [Окун, 1987, p. 204]. Слова российского академика хорошо гармонируют с мнением американского нобелевского лауреата: «Я не верю в то, что стандартная теория долго продержится в качестве правильной и полной картины мира. Взаимодействия могут иметь калибровочную природу, но при этом они, конечно, должны лежать внутри объединяющей их группы» [Glashow, 1980, p. 1220].

Вполне вероятно, что полноценное объединение электромагнитных и слабых взаимодействий будет-таки дано в рамках таких до сих пор активно развивающихся исследовательских программ, как суперсимметрия, супергравитация и теория суперструн [Maldacena, Strominger, Witten, 1997].

### Список литературы / References

- Cao, 1997 – Cao, T.Y. *Conceptual Developments of 20<sup>th</sup> century field theories*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 451 pp.
- Dupre, 2012 – Dupre, J. *Processes of Life: Essays in the Philosophy of Biology*. Oxford: Oxford University Press, 2012. 350 pp.
- Fermi, 1934 – Fermi, E. “Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen”, *Z. Phys.*, 1934, vol. 88, pp. 161; trans. in: Wilson, F.L. “Fermi’s Theory of Beta Decay”, *Am. J. Phys.*, 1968, vol. 36, no. 12, pp. 1150–1160.
- Feynman, Gell-Mann, 1958 – Feynman, R.P., Gell – Mann, M. “Theory of the Fermi Interaction”, *Phys. Rev.*, 1958, vol. 109, pp. 193–198.

Galison, Darton, 2007 – Galison, P., Darton, L. *Objectivity*. Cambridge, Massachusetts: Zone Books, 2007. 501 pp.

Glashow, 1961 – Glashow, S.L. “Partial Symmetries of Weak Interactions”, *Nuclear Physics*, 1961, vol. 22, pp. 579–588.

Glashow, 1980 – Glashow, S.L. “Towards a Unified Theory – Threads in a Tapestry”, *Science*, 1980, vol. 210, iss. 4476, pp. 1319–1323.

Greiner, Muller, 2009 – Greiner, W., Muller, B. *Gauge Theory of Weak Interactions*. Heidelberg; Dordrecht: Springer, 2009. 404 pp.

Higgs, 1964 – Higgs, P.W. “Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields”, *Physics Letters*, 1964, vol. 12, pp. 132–133.

Higgs, 1966 – Higgs, P.W. “Spontaneous Symmetry Breaking Without Massless Bosons”, *Phys. Rev.* 1966, vol. 145, pp. 1156–1163.

Maldacena, Strominger, Witten, 1997 – Maldacena, J., Strominger, A., Witten, E. “Black-Hole entropy in M-theory”, *Journal of High Energy Physics*, 1997, no. 2, pp. 209–254.

Morrison, 2007 – Morrison, M. *Unifying Scientific Theories. Physical Concepts and Mathematical Structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 272 pp.

Nambu, Jona-Lasilio, 1961 – Nambu, Y., Jona-Lasilio, G. “Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity”, *Phys. Rev.*, 1961, vol. 122, pp. 345–358, 124–246.

Nugayev, 1999 – Nugayev, R.M. *Reconstruction of Mature Theory Change: A Theory-Change Model*. Frankfurt am Main: Peter Lang, 1999. 199 pp.

Nugayev, 2018 – Nugayev, R.M. *Einstein’s Revolution: A Study of Theory Unification*. Sharjah: Bentham Science, 2018. 214 pp.

Okun, 1987 – Okun, L.B. *Leptons and Quarks*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 362 pp.

Pickering, 1984 – Pickering, A. *Constructing Quarks. A sociological history of particle physics*. Chicago: The University of Chicago Press, 1984. 468 pp.

Salam, Ward, 1964 – Salam, A., Ward, J.C. “Electromagnetic and Weak Interactions”, *Physics Letters*, 1964, vol. 13, pp. 168–171.

Salam, 1984a – Salam, A. “Einstein’s Last Dream: The Space-Time Unification of Fundamental Forces”, in: *Ideals and Realities: Selected Essays of Abdus Salam*, ed. by Z. Hassan, C.H. Lay. Singapore: World Scientific, 1984, pp. 299–309.

Salam, 1984b – Salam, A. “The Nature of the “Ultimate” Explanation in Physics”, in: *Ideals and Realities: Selected Essays of Abdus Salam*, ed. by Z. Hassan, C.H. Lay. Singapore: World Scientific, 1984, pp. 310–319.

Salam, 1984c – Salam, A. “Gauge Unification of Fundamental Forces”, in: *Ideals and Realities: Selected Essays of Abdus Salam*, ed. by Z. Hassan, C.H. Lay. Singapore: World Scientific, 1984, pp. 320–369.

Schwinger, 1957 – Schwinger, J.A. “Theory of Fundamental Interactions”, *Annals of Physics*, 1957, vol. 2, pp. 407–434.

Stepin, 2005 – Stepin, V.S. *Theoretical Knowledge*. Dordrecht: Springer, 2005. 373 pp.

T’Hooft, 1980 – T’Hooft, G. “Gauge Theories of the Forces between Elementary Particles”, *Scientific American*, 1980, vol. 242 (6), pp. 90–119.

Van Dongen, 2010 – Van Dongen, J. *Einstein’s Unification*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 224 pp.

Weinberg, 1967 – Weinberg, S. “A Model of Leptons”, *Phys. Rev. Letters*, 1967, vol. 19, pp. 1264–1266.

Yang, Mills, 1954 – Yang, C.N., Mills R. “Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance”, *The Physical Review*, 1954, pp. 96–191.

## Methodological problems of the unification of the theories of electromagnetism and weak interactions

*Rinat M. Nugayev*

Volga Region State Academy. 33 Universiade Village, Kazan, 420138, Russian Federation; e-mail: rinatnugayev@mail.ru

The methodological problems of creation of the electroweak theory connected with the evaluation of its ontological condition are indicated. Correspondingly the process of unification of electromagnetic and weak interactions that took place in the second half of the XX<sup>th</sup> century is scrutinized. Comparative analysis of the unification in relation to four classical examples connected with the names of Newton, Maxwell and Einstein is provided. It is unfolded that the epistemological particularity of the synthesis in history of science consists in that it was realized within the framework of the synthetic research programme aimed at the construction of the sequence of electroweak theories as consequent approximations to the Yang–Mills gauge theory. The main stages of the gauge synthetic programme that had terminated with the Glashow–Salam–Weinberg model construction and its empirical justification are elicited. It is contended that the crossbred character of this model determines its unfinished character. Yet one of the tenets of Margaret Morrison’s fine rational reconstruction of the electroweak theory creation according to which nothing about the mixing of the two gauge fields follows from the mathematical structure of gauge theory alone is contested. Finally it is exhibited that the inter-theoretic relations played an essential role in the construction of the modern electroweak theory.

**Keywords:** methodology of unification, electromagnetism, weak interactions, crossbred objects