

И «КОМЕДИЯ ОШИБОК», И «ДРАМА ЛЮДЕЙ»: ОБ ОТЕЧЕСТВЕННОМ ВКЛАДЕ В СОЗДАНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Визгин Владимир Павлович

Институт истории естествознания и техники
им. С. И. Вавилова РАН,
Москва, Россия
vlvizgin@gmail.com

DOI: 10.19181/sntp.2020.2.3.11

АННОТАЦИЯ

В статье исследуется отечественный вклад в создание стандартной модели (СМ). СМ – это квантово-полевая калибровочная теория электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий, являющаяся основой современной теории элементарных частиц. Процесс её разработки охватывает двадцатилетний период – с 1954 г. (концепция неабелевых калибровочных полей Янга–Миллса) до начала 1970-х гг., когда было завершено построение перенормируемых квантовой хромодинамики и электрослабой теории. Анализируются причины затруднённого восприятия калибровочной полевой концепции Янга–Миллса в СССР, связанные в первую очередь с проблемой «нуль-заряда» в квантовой электродинамике, а затем и в полевых теориях сильных и слабых взаимодействий. Этот результат, полученный лидерами выдающихся отечественных научных школ теоретической физики Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчуком и их учениками, привёл к отказу большинства советских физиков от теории поля и к их переходу на позиции неполевой феноменологической программы (опирающейся на теорию S-матрицы) при построении теории элементарных частиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Стандартная модель, физика элементарных частиц, советская физика, Л. Д. Ландау, проблема нуль-заряда, S-матричная программа, асимптотическая свобода, научные школы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Визгин В. П. И «комедия ошибок», и «драма людей»: об отечественном вкладе в создание стандартной модели в физике элементарных частиц // Управление наукой: теория и практика. 2020. Т. 2. № 3. С. 196–224.

DOI: 10.19181/sntp.2020.2.3.11

«...Думали, что своды крепости крошатся, а это просто с них осыпалась засохшая плесень, и крепость нужно было не разрушать, а почистить и, поверив в её надёжность, сделать её прочной опорой для дальнейшего наступления».

Е. Л. Фейнберг [1, с. 325]

«В 1950-е годы подозрения насчёт теории поля дошли до того, что возникла могущественная догма: теория поля неверна, начиная с основ, особенно в приложении к сильным взаимодействиям... В СССР теория поля подверглась даже ещё более сильным нападкам... Это – знаменитая проблема нулевого заряда, поразительный результат, который означал для Ландау... ошибочность теории поля и её полную непригодность в случае сильного взаимодействия... Под влиянием Ландау и Померанчука поколению физиков было запрещено работать над теорией поля».

Д. Гросс [2, с. 730–731]

ВВЕДЕНИЕ

Создание стандартной модели в физике элементарных частиц в 1960–1970-е гг. было самым выдающимся теоретическим достижением второй половины XX в. или даже научной революцией, сопоставимой с квантово-релятивистской революцией первой трети XX в. Эта теория стала не только своего рода единой теорией элементарных частиц, но единой теорией трёх фундаментальных взаимодействий, существующих в микромире: сильного, электромагнитного и слабого. Об истории создания стандартной модели (СМ) и роли в этом процессе метафизических и социокультурных факторов – см. [3–5]. В этой работе мы остановимся на отечественных исследованиях в этой области. При рассмотрении хронологии событий построения стандартной модели бросается в глаза то, что отечественный вклад в создание СМ весьма невелик [3]. И это при том, что в СССР в 1940–1960-е гг. существовало не менее полудюжины крупных и даже выдающихся научных школ в сфере теоретической физики, таких, как школы Л. Д. Ландау, И. Е. Тамма, И. Я. Померанчука, Н. Н. Боголюбова, Я. Б. Зельдовича и др. Кстати говоря, все названные школы сыграли огромную роль в реализации национальной программы по созданию ядерного и термоядерного оружия, причём термоядерное оружие создавалось как раз в 1950-е гг. В какой-то мере оба эпитафия объясняют эту историко-научную аномалию. За создание СМ Нобелевской премии по физике были удостоены более полутора десятков теоретиков, и ни одного из СССР! Хотя Ландау и Тамм были нобелевскими лауреатами, но премии они получили за более ранние работы.

Эта аномалия заключалась в возникшей во второй половине 1950-х гг. и укрепившейся в дальнейшем уверенности многих теоретиков, а в СССР – подавляющего большинства, в логической противоречивости и непригодности квантово-полевого подхода к описанию фундаментальных взаимодействий в физике элементарных частиц, особенно сильных взаимодействий.

В нашей стране отказ от теории поля усиливался ещё и потому, что именно в СССР в 1954 г. была обнаружена новая трудность квантовой теории электромагнитного поля с точечными зарядами, а именно парадоксальное «обнуление» эффективных (наблюдаемых) зарядов и соответствующих взаимодействий при очень малых расстояниях за счёт поляризации вакуума. Это было установлено московскими теоретиками – Л. Д. Ландау с соавторами, Е. С. Фрадкиным (из школы Тамма), а также энергично поддержано И. Я. Померанчуком. За эффектом закрепилось название «московского нуля». Е. Л. Фейнберг, цитируя Б. Л. Пастернака, его «Высокую болезнь», где под осадой крепости имеется в виду революция 1917 г., использует эту метафору, понимая под крепостью теорию поля. Уверенность лидеров выдающихся теоретических школ в правильности вывода об ущербности теории поля и их высокий научный авторитет оказались сильным тормозом на пути развития калибровочно-полевой концепции и тем самым СМ в СССР. Тем не менее, в стране всё-таки были определённые точки роста калибровочных теорий, и были некоторые важные достижения на пути к СМ, о которых будет рассказано ниже. И то, и другое, как мы попытаемся показать, было связано с определёнными метафизическими и социокультурными факторами. Скрытые поворотные моменты и упущенные возможности на пути к СМ подтверждают справедливость «ошибочностной» концепции развития научного знания С. И. Вавилова, перекликающейся с теоретико-познавательной схемой К. Поппера [6].

КРАТКАЯ ПРЕДЫСТОРИЯ: ДОВОЕННЫЕ И ПЕРВЫЕ ПОСЛЕВОЕННЫЕ ГОДЫ

Три выдающихся советских теоретика – В. А. Фок, Д. Д. Иваненко и И. Е. Тамм – стоят у истоков теории сильного взаимодействия и калибровочной концепции фундаментальных взаимодействий. Фок был одним из первых, кто обнаружил инвариантность уравнения Шредингера и его релятивистского аналога относительно локальных калибровочных преобразований (1926), хотя идея интерпретации электромагнитного поля как калибровочного, т. е. возникающего в результате локализации глобальной абелевой калибровочной симметрии, принадлежала Г. Вейлю (более детальное рассмотрение этих вопросов и вклада Фока в калибровочную концепцию см. [7, 8]). Д. Д. Иваненко был первым, кто сразу после открытия нейтрона выдвинул протонно-нейтронную модель атомного ядра. А через два года почти одновременно с И. Е. Таммом предложил обменную теорию ядерных сил наподобие теории бета-распада Э. Ферми.

Остановимся несколько более подробно на работе И. Е. Тамма 1934 г., в которой теория была развита детально и чётко сформулирован вывод, что электрон и нейтрино как обменные частицы не подходят для описания ядерных сил. Краткая характеристика этой работы И. Е. Тамма в изложении его ближайших учеников В. Л. Гинзбурга и Е. Л. Фейнберга такова:

«Опираясь на теорию бета-распада Ферми, И. Е. Тамм выдвинул идею, что ядерные силы возникают в результате обмена парами частиц – электроном и нейтрино. Сама мысль о том, что обмен квантами поля может вести к возникновению сил между частицами, не была нова. Её, как объяснение кулоновских сил с помощью обмена фотонами, высказал и реализовал (совместно с В. А. Фоком и Б. Подольским) Дирак (1932). Однако, во-первых, оригинальной была мысль о поле сил, образованном парами частиц, и притом частиц, обладающих массой. Во-вторых, что особенно важно, эта мысль была воплощена в довольно сложную по тем временам и полную теорию... Уже в первом сообщении (1934) И. Е. Тамм привёл полученную им формулу для потенциала взаимодействия, возникающего между нуклонами, и показал, что это взаимодействие очень мало по сравнению с реально существующими ядерными силами... и что не они обеспечивают устойчивость ядер. Однако, отпрявляясь от этой работы, Юкава вскоре показал, что ядерные силы могут обуславливаться обменом частицами, если эти частицы гораздо тяжелее электрона. Так были предсказаны, а затем и обнаружены «ядерные» сильно взаимодействующие мезоны. Работа И. Е. Тамма стала прообразом и основой как этой мезонной теории ядерных сил, так и других подобных исследований, которые все строились в общем по той же теоретической схеме... Эта работа принадлежит к его лучшим достижениям, и он ценил её больше всех своих работ» [9, с. 11–12].

Первое послевоенное десятилетие почти все выдающиеся советские теоретики, как уже говорилось во Введении, были заняты в первую очередь ядерно-оружейными проблемами. Конечно, термоядерные реакции относились к сильным и слабым ядерным взаимодействиям, но только со второй половины 1950-х – начала 1960-х гг., после решения проблемы создания термоядерного оружия ведущие теоретики, лидеры основных теоретических школ получили возможность выхода из Атомного проекта и могли посвятить себя в полной мере теории элементарных частиц, которая к этому времени сильно уступала эксперименту и, казалось, встретилась с очень значительными трудностями. И всё-таки Атомный проект принёс огромную пользу фундаментальной физике элементарных частиц. Именно на его волне создавались новые ускорители частиц, появлялись целые институты, финансировались масштабные проекты в области фундаментальных исследований [5]. В меньшей степени в советском Атомном проекте были задействованы (или вообще не участвовали) из известных теоретиков только Д. Д. Иваненко, Я. И. Френкель и М. А. Марков, которые в конце 1940-х – начале 1950-х гг. выступили с обзорами по теории частиц на страницах журнала «Успехи физических наук» (УФН) [10–12] (см. также книгу Д. Д. Иваненко и А. А. Соколова [13]).

Уже в 1947 г. Д. Д. Иваненко писал о серьёзных трудностях квантово-полевой теории элементарных частиц и намечающихся способах их преодоления: «...В борьбе с трудностями теории ядерных сил и бесконечностью собственной массы, трудностями вакуума, а также расходимостями высших приближений, намечаются новые пути к построению более общей теории, которая и должна будет представить собой вполне последовательную, непро-

тиворечивую релятивистскую квантовую механику элементарных частиц и полей и сможет не только устранить все указанные трудности, но и вывести значения масс и зарядов всех частиц» [10, с. 315]. Трудности с бесконечностями и расходимостями, по крайней мере, в области квантовой электродинамики, к 1949–1950 гг. хитроумно, но физически не очень убедительно были разрешены методом перенормировок, развитым японцем С. Томонагой и американцами Ю. Швингером, Р. Фейнманом и Ф. Дайсоном (первые трое были в 1965 г. удостоены Нобелевской премии). Но эти проблемы удалось решить, не выходя за пределы квантовой теории поля. «Новые пути» подразумевали выход за эти пределы. Иваненко рассматривал возможность квантования пространства-времени (квантовая геометрия), нелинейные обобщения в духе нелинейной электродинамики Борна–Инфельда и использование матрицы рассеяния, что предполагало фактический отказ от последовательного полевого подхода. Последняя альтернатива казалась ему, судя по всему, наиболее перспективной. «Последний (В. Гейзенберг – В. В.), – писал он, – предлагает во главу угла всей теории поставить не гамильтонову функцию и волновые уравнения релятивистской квантовой механики, которые так или иначе, наряду с успехами, привели к указанным трудностям, или во всяком случае не сумели устранить трудности с бесконечной энергией поля, порождённой точечным зарядом, и других, но некоторую характеристическую «матрицу рассеяния» S , долженствующую непосредственно трансформировать наблюдаемые падающие волны в рассеянные волны, наблюдаемые на большом расстоянии. Более точное описание процессов столкновения на самых малых расстояниях, как не наблюдаемых, не должно иметь места» [10, с. 314].

Однако отказ от локальности и последовательного полевого подхода выглядел рискованным, излишне радикальным и к тому же философски сомнительным. Последнее в какой-то мере было существенно для советских физиков, испытывавших в последние сталинские годы серьёзное философско-идеологическое давление (вспомним, что в течение первых месяцев 1949 г. шла интенсивная подготовка к знаменитому «несостоявшемуся совещанию» физиков, которое должно было пройти по образу и подобию разгромной сессии ВАСХНИЛ 1948 г.). Я. И. Френкель в 1950 г. полагал, что полевою концепцию нужно, безусловно, сохранить и искать разрешение трудностей на основе построения некоторого варианта единой теории поля в духе Эйнштейна, но квантовой: «...Советские физики должны искать решение вопроса в дальнейшем развитии теории на основе философии диалектического материализма. Основным направлением для дальнейшей работы, по мнению автора, является построение монистической полевой теории материи» [11, с. 74]. Можно предположить, что Френкель имел в виду один из вариантов нелокальной теории поля, которые начали обсуждаться в это время: либо в духе выдвинутой несколько позже Гейзенбергом единой нелинейной теории поля с введением новой фундаментальной постоянной, имеющей размерность длины, либо с введением параметров размерности длины, характеризующими область взаимодействия частиц. Последний вариант в начале 1950-х гг. разрабатывал М. А. Марков. Вот как начинается

его обзор в журнале «УФН» (1953): «В настоящее время в теории поля имеются два резко отличных друг от друга направления. Одно направление связано с различного рода «вычитательными операциями», с различного рода способами регуляризаций известных расходящихся выражений (имеется в виду прежде всего теория перенормировок – В. В.). Другое направление связано с идеями нелокализованного поля, с различного рода попытками ввести в рассмотрение протяжённость элементарных частиц» [12, с. 317]. Но такая нелокальность ведёт к мгновенному дальнему действию и противоречию с СТО. К тому же эксперименты свидетельствовали об отсутствии подобной нелокальности даже на весьма малых расстояниях. Таков был довольно значительный разброс в мнениях по поводу того, как разрешать трудности теории элементарных частиц и как строить общую теорию частиц и взаимодействий между ними. И этот разброс был характерен не только для отечественных теоретиков, но и для всего научного сообщества физиков, занимавшихся элементарными частицами.

1954. ДВОЙНОЙ ПОВОРОТНЫЙ МОМЕНТ: ТЕОРИЯ ЯНГА–МИЛЛСА И ПРОБЛЕМА «МОСКОВСКОГО НУЛЯ»

Теория Янга–Миллса впервые появилась в работе Ч. Янга и Р. Миллса в 1954 г. как квантово-полевая калибровочная теория сильного взаимодействия с лежащей в её основе неабелевой группой изотопического спина $SU(2)$, локализация которой приводила к калибровочному бозонному полю, подобно тому, как локализация однопараметрической абелевой симметрии, связанной с законом сохранения электрического заряда, приводила в электродинамике к безмассовому электромагнитному полю. Кстати говоря, как уже отмечалось, локальная калибровочная симметрия в квантовой механике электрона впервые была введена в физику В. А. Фоком. Этот механизм Фока–Вейля служил для Янга и Миллса образцом, но он приводил, как и в электродинамике, к безмассовым «обменным» частицам. Но недавно открытые пионы, которые тогда рассматривались как кандидаты в «обменные» частицы, реализующие сильные взаимодействия, были массивными. Поэтому теория Янга–Миллса большинству теоретиков тогда представлялась ошибочной (см. об этом [3]). Но в 1960–1970-е гг. теоретикам удалось преодолеть эту проблему безмассовости калибровочных частиц и некоторые другие трудности, и тогда выяснилось, что в основе теории трёх фундаментальных взаимодействий микромира лежит теория Янга–Миллса, ставшая ядром стандартной модели (СМ). Таким образом, революционный, или поворотный характер работы Янга и Миллса 1954 г. проявился в полной мере только во второй половине 1960 – начале 1970-х гг., оставаясь до этого времени в скрытой форме.

В этот же 1954 год произошло ещё одно важное событие, в котором советские физики играли главную роль и которое особенно сильно повлияло на отрицательное отношение к полевой концепции в теории элементарных

частиц вообще и полевой теории сильного взаимодействия Янга–Миллса в частности. Мы имеем в виду обнаруженный тогда же парадокс в квантовой электродинамике, а затем и в полевых теориях других взаимодействий (прежде всего сильного), суть которого заключалась в том, что поляризация квантово-полевого вакуума на весьма малых расстояниях от точечного электрона приводила к полной экранировке его заряда, в результате чего наблюдаемый заряд реального электрона оказывался равным нулю. Этот парадокс был зафиксирован в серии работ Л. Д. Ландау, написанных совместно с его учениками И. М. Халатниковым и А. А. Абрикосовым, в которых точечное взаимодействие рассматривалось как предел некоторого «размазанного» взаимодействия с конечным радиусом, когда этот радиус уменьшается до нуля (см. [14, соч. 76–79]). К ним затем примкнул И. Я. Померанчук; в совместной работе Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчука выводы были сформулированы особенно чётко: «Мы приходим к фундаментальному выводу, что из формальной квантовой электродинамики, вероятно, следует равенство нулю заряда электрона... Полученный результат указывает на логическую незамкнутость квантовой электродинамики. Следует подчеркнуть при этом, что указываемая здесь несостоятельность теории вызвана непосредственно не бесконечностями (как считалось последние 25 лет), а обращением физического взаимодействия в нуль» [15, с. 249]. И далее о том, что аналогичный результат естественно переносится и в полевую теорию сильных взаимодействий: «Если... обращение e в нуль есть отражение общих свойств всякого точечного взаимодействия, то современная мезонная теория окажется полностью несостоятельной» [15, с. 250]. Фактически тогда же это «обнуление» заряда и, соответственно, физического точечного взаимодействия в КЭД было установлено также теоретиком из научной школы Тамма Е. С. Фрадкиным, а в США – М. Гелл-Манном и Ф. Лоу (подробнее об этом – см. великолепный обзор ученика Ландау и Померанчука В. Б. Берестецкого [16]). Но москвичи, прежде всего Ландау, Померанчук и их ученики, более детально исследовали проблему «нулификации», и они же сразу сформулировали радикальные выводы о возникновении своего рода кризисной ситуации в квантово-полевой теории элементарных частиц. Поэтому за этой проблемой «нуль-заряда» закрепилось название «московский нуль».

Несколько позже, в статье 1960 г., написанной к 60-летнему юбилею В. Паули, Ландау из кризиса теории поля с характерной для неё лагранж-гамильтоновой структурой делал весьма революционное заключение о крахе локального полевого подхода и неизбежности перехода к новой перспективной концепции, связанной с матрицей рассеяния Гейзенберга: «...Если мы не хотим пользоваться ненаблюдаемыми величинами, мы должны вводить в теорию в качестве фундаментальных величин только амплитуды рассеяния. Операторы пси, содержащие ненаблюдаемую информацию, должны исчезнуть из теории; и поскольку гамильтониан можно построить только из операторов пси, мы с необходимостью приходим к выводу, что гамильтонов метод для сильных взаимодействий изжил себя и должен быть похоронен, конечно, со всеми почестями, которые он заслужил» [14, с. 423]. Тем самым проблема «нуль-заряда» стала своего рода поворотным моментом в разви-

тии теории элементарных частиц, который воспринимался большинством теоретиков, особенно в СССР, как начало настоящей революции в микрофизике. Но, как выяснилось спустя 10–15 лет, этот явно обозначившийся поворот, связанный с отказом от локальной теории поля, был ошибочным. А решающий поворот, приведший к созданию СМ (калибровочно-полевой!), до поры до времени оставался скрытым. Кстати говоря, при этом полевой, близкодействующий характер взаимодействия ещё более усиливался.

Заслуживает особого внимания обращение Ландау, казалось бы, не склонного к философии, к аргументам метафизического или методологического характера, связанным с принципом наблюдаемости. По-видимому, положение в теории элементарных частиц ему напоминало революционную ситуацию накануне создания квантовой механики, когда Гейзенберг, опираясь на принцип наблюдаемости, открыл её матричный вариант. В. Б. Берестецкий так комментировал это обращение Ландау к основаниям квантовой теории поля и использованию соображений метафизического характера: «Ученики Ландау, знавшие, как высоко он ценит конкретные физические результаты и как мало любит разговоры на общие «обосновательские» темы, были несколько удивлены той относительной сдержанностью, с которой Ландау встретил успехи квантовой электродинамики в вычислении радиационных поправок (и концепцию перенормировок – В. В.). Но они проявили недостаточное понимание характера отношения к науке учителя. На самом деле Ландау не мог работать вне атмосферы идейной ясности... Он действительно не любил дискуссии на темы об обосновании наук, но лишь тех, основы которых считал для себя ясными, таких, например, как квантовая механика или статистическая физика. Совершенно иначе он вёл себя в отношении тех областей, в которых ясности нет» [16, с. 234–235]. Именно так обстояло дело в квантовой электродинамике, перенормировочные процедуры он «считал формальными рецептами. И Ландау со своими учениками занялся поисками обоснования» [16, с. 234–235]. Полученное парадоксальное «обнуление» зарядов и взаимодействий в полной мере относилось и к сильным взаимодействиям. Кризис квантово-полевого подхода становился всё более ощутимым: «...У большинства ведущих теоретиков независимо складывалось ощущение тупика в попытках получить из теории поля вне рамок теории возмущений конкретные физические результаты. Это ощущение разделял, например, Фейнман... Свою точку зрения он выразил в письме к Ландау, относящемся приблизительно к 1955 г., в котором он характеризует попытки создания теории сильных взаимодействий как детски примитивное подражание квантовой электродинамике... и высказывает мнение, что природа «не настолько глупа», чтобы не придумать что-либо более хитрое» [16, с. 243].

Так проблема «московского нуля», в первую очередь в СССР, стала важным стимулом для поисков неполевого подхода к теории элементарных частиц. И главным из таких подходов виделось обращение к теории S-матрицы Гейзенберга, в которой «стали рассматривать в качестве основных элементов теории не поля, а более близкие к непосредственно измеряемым величинам амплитуды – элементы матрицы рассеяния» [16, с. 243]. Требо-

вания унитарности и аналитичности этих амплитуд «образуют ряд соотношений, которые можно рассматривать как аналог динамической системы уравнений» [16, с. 244]. На этом пути были получены некоторые важные результаты для сильных взаимодействий, например, теорема Померанчука об асимптотическом равенстве сечений частиц и античастиц. Развитию S-матричного подхода способствовало и то, что в это время было открыто много новых адронов и было не ясно, какие именно из них следовало считать первичными, элементарными. Возникла идея «ядерной демократии», приведшая к концепции «бутстрапа», «согласно которой практически любые адроны с подходящими квантовыми числами могут быть взяты за исходные, при этом требования аналитичности и унитарности сами дадут весь спектр адронов» [16, с. 244].

Д. Д. Иваненко, описывая развитие S-матричных методов, выделял аксиоматическое направление, которое в начале 1960-х гг. у нас поддерживал Ю. М. Широков, теорию дисперсионных соотношений, в разработке которой участвовали представители теоретических школ Л. Д. Ландау, Н. Н. Боголюбова и И. Я. Померанчука, теорию полюсов Редже, представлявшую собой обобщение S-матричного формализма и дисперсионных соотношений на комплексные значения углового момента и др. Однако уже в начале 1960-х гг. становилось всё более ясным, что «претензии крайних представителей дисперсионизма и «реджистики» на построение полной теории элементарных частиц, несомненно, преувеличены...» [17, с. 16]. И. Е. Тамм так оценивал ситуацию, сложившуюся в теории элементарных частиц в конце 1950-х – начале 1960-х гг.: «Совершенно ясно, что мы находимся накануне нового этапа развития физики, что те принципиальные трудности, которые стали возникать перед физической теорией по мере проникновения человека в новый, неизведанный мир элементарных частиц, больших энергий и взаимных превращений, будут преодолены только на основе пересмотра и обобщения основных физических понятий и представлений. Этот пересмотр будет несомненно не менее радикальным, чем тот, который в начале нашего века привёл к созданию теории относительности и квантовой теории» [18, с. 441]. В этой ситуации, несмотря на некоторую множественность конкурирующих направлений, доминирующим всё-таки считалось S-матрично-дисперсионное направление. «В последние 3–4 года Л. Д. Ландау был одним из наиболее ярких проводников идеи, что на основе аппарата дисперсионных соотношений может возникнуть новая фундаментальная физическая теория. Я же вместе с рядом других теоретиков, – продолжал И. Е. Тамм, – считал, что дисперсионная теория носит в значительной мере феноменологический характер, что каждый шаг её требует введения всё новых параметров, значения которых не предсказываются теорией, а берутся из опыта, и что поэтому её несомненные успехи отнюдь не решают основной задачи – создания новой, последовательной, внутренне замкнутой физической теории, базирующейся на ограниченном числе общих принципов и постулатов» [18, с. 454]. Подход самого И. Е. Тамма заключался в отказе от непрерывности пространства в ультрамалых масштабах и использовании того или иного варианта дискретного пространства или простран-

ства импульсов. Но он колебался в своём отношении к дисперсионизму и после некоторых его успехов всё-таки счёл это направление более перспективным. Приведём достаточно пространное высказывание И. Е. Тамма об этом: «В 1961 – начале 1962 гг. появился ряд очень важных работ, весьма существенно подкрепивших концепцию Л. Д. Ландау. Эти успехи связаны в первую очередь с именами И. Я. Померачука и В. Н. Грибова в нашей стране и с именами Редже, Чу, Гелл-Манна и другими за рубежом» [18, с. 454]. Описав суть S-матрично-дисперсионного подхода, он всё-таки заключает: «Несмотря на несомненную обоснованность оптимистических надежд, связанных с развитием новой теории, эта теория находится ещё в начальной стадии развития и, что важнее всего, в ней ещё пока не сделано главное – не найдена система тех общих принципов..., из которых однозначно вытекали бы все положения теории» [18, с. 455].

И И. Е. Тамм, и Д. Д. Иваненко, впрочем, отметили ещё одно набирающее силу направление, которое, как вскоре выяснилось, было органически связано с локально-калибровочной полевой концепцией Янга–Миллса. Речь идёт об изучении внутренних симметрий элементарных частиц. Д. Д. Иваненко выделил как перспективное отдельное направление исследование групп симметрии, описывающих систематику адронов, прежде всего группы SU(3) [17, с. 16]. А И. Е. Тамм писал в статье 1965 г.: «В последнее время, особенно в минувшем году, чрезвычайно широко стало развиваться новое направление – так называемое изучение симметрий частиц, которое пытается внести порядок в открывшийся перед нами мир частиц, найти в нём закономерности... В великом многообразии этих частиц удалось выделить ряд мультиплетов, объединяющих близкие по своим свойствам частицы... Мы, несомненно, ухватили некоторое зерно истины. В этом направлении идёт буквально лихорадочная работа, новые идеи и гипотезы возникают ежемесячно, но мы пока очень далеки от окончательного решения проблемы систематики частиц» [19, с. 470–472]. Именно на этом пути М. Гелл-Манн и независимо Ю. Не’еман открыли в 1961 г. правильную глобальную симметрию сильных взаимодействий SU(3), а спустя три года тот же Гелл-Манн и тоже независимо Г. Цвейг предложили кварковую модель, реализующую эту симметрию. Несмотря на то, что эта модель, как подчёркивал Тамм, «носит крайне гипотетический характер», «не исключено, что кварки действительно существуют» [19, с. 472–473].

ЛОКАЛЬНО-ПОЛЕВЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ ОСТРОВКИ В МОРЕ S-МАТРИЧНОЙ ФЕНОМЕНОЛОГИИ

В цитированной вступительной статье к сборнику переводных работ «Элементарные частицы и компенсирующие поля» (1964) Д. Д. Иваненко отдельно рассмотрел новое направление, которое почти не получило развития в нашей стране и которое он назвал теорией компенсирующих полей [17, с. 16–19]. Сборник включал переводы 15 работ, относящихся к 1954–1962 гг. и содержащих ядро теории неабелевых калибровочных полей и тем самым

первый важнейший блок классических ныне работ по стандартной модели. Сборник открывался основополагающей работой Ч. Янга и Р. Миллса (1954). В нём были первые работы Дж. Сакураи, М. Гелл-Манна, Ю. Не'емана и др. по калибровочной теории сильных взаимодействий и по глобальной SU(3)-симметрии, работы А. Салама (с Дж. Уордом), содержащие первые наброски единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий, статьи Ю. Швингера по проблеме массивных калибровочных полей, а также статьи Р. Утиямы и Т. Киббла по применению калибровочной теории к гравитации. Кстати говоря, статья Р. Утиямы 1956 г. содержала общую теорию полей Янга–Миллса, которую японский теоретик разработал одновременно с Янгом и Миллсом, но не опубликовал своевременно, упустив возможность дополнить именование неабелевых калибровочных полей (поля Янга–Миллса назывались бы полями Янга–Миллса–Утиямы) [20, с. 201–208]. Калибровочные поля взаимодействия, возникающие при локализации глобальной внутренней симметрии и являющиеся векторными, Д. Д. Иваненко называет компенсирующими потому, что они компенсируют нарушение инвариантности исходного лагранжиана, вызванное этой локализацией. Самого Д. Д. Иваненко и его учеников калибровочный, или компенсационный подход интересовал в первую очередь в связи с его применением к теории гравитации. В цитированной статье он ссылается на работы физиков, относящихся к его теоретической школе, которую в эти годы привлекала главным образом теория гравитации, а именно на свои собственные работы (в основном, с соавторами А. М. Бродским, Г. А. Соколик и др.), того же Г. А. Соколика, Б. Н. Фролова и др. [17]. Единая калибровочная трактовка всех четырёх фундаментальных взаимодействий давала надежды на возможность создания действительно единой квантовой теории этих взаимодействий. Сосредоточенная на физфаке МГУ школа Д. Д. Иваненко, в основном именно гравитационная, как раз формировалась в конце 1950-х – начале 1960-х гг., находилась в определённом противостоянии с академическими теоретическими школами [21] и была по существу небольшим калибровочным островком в море S-матричных и дисперсионных феноменологических теорий. Мощные теоретические школы Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчука, И. Е. Тамма, Н. Н. Боголюбова, связанные в основном с московскими академическими институтами (Институтом физических проблем, Физическим институтом АН СССР (ФИАН), Математическим институтом АН СССР), а также институтами, возникшими на волне Атомного проекта, – Институтом экспериментальной и теоретической физики и Объединённым институтом ядерных исследований в Дубне), как уже отмечалось, были склонны к отказу от локальной теории поля (включая её калибровочный вариант) и погружены либо в S-матрично-дисперсионные, либо в другие нелокальные концепции. Возвращаясь к школе Иваненко, подчеркнём, что представители этой школы – Г. А. Соколик и затем Н. П. Коноплёва – включились в разработку теории калибровочных полей, обращая особое внимание на вопросы принципиального и даже метафизического характера. Впоследствии Н. П. Коноплёва вполне справедливо отмечала: «Можно считать, что в СССР систематическое изучение калибровочных полей было стимулировано вы-

ходом в свет в 1964 сборника статей под редакцией Д. Д. Иваненко «Элементарные частицы и компенсирующие поля», затем в 1972 г. выходом нашей с В. Н. Поповым книги «Калибровочные поля» [22, с. 19]. Во всяком случае, это абсолютно верно в отношении сборника [17], первая же отечественная монография по калибровочным полям [23] увидела свет почти одновременно с завершением стандартной модели, основанной на теории неабелевых калибровочных полей.

Остановимся кратко на более ранних работах Г. А. Соколика и Н. П. Коноплёвой, прежде всего на монографии Г. А. Соколика, опубликованной в 1965 г. [24]. В ней симметричный, или теоретико-групповой подход к элементарным частицам прочно связывался с теорией калибровочных, или компенсирующих полей. При этом подчёркивалась особая роль для понимания структуры этой теории и общей картины развития физики элементарных частиц теорем Э. Нётер о связи симметрий с законами сохранения и Эрлангенской программы Ф. Клейна, в соответствии с которой геометрии интерпретируются как теории инвариантов непрерывных групп преобразований. «Теория компенсирующих полей, – писал Г. А. Соколик, – возникла как результат обобщения теоремы Нетер на случай локальных групп Ли, т. е. конечнопараметрических групп Ли с параметрами, зависящими от координат пространства–времени. Такая формулировка теоремы Нётер позволяет сопоставить инвариантам группы не только законы сохранения, но также и взаимодействия» [24, с. 144]. Эта теория, как считал Г. А. Соколик, открывала путь к своего рода единой теории фундаментальных взаимодействий: «В теории компенсирующих полей каждое взаимодействие вводится для восстановления инвариантности, нарушенной некоторым локальным принципом относительности. Если исходить из существования фундаментальной группы, т. е. Эрлангенской программы Ф. Клейна, то приходим к иерархии вложенных друг в друга локальных групп и тем самым к иерархии взаимодействий...» [24, с. 154].

Нетривиальные дополнительные разъяснения содержались в несколько более поздней совместной статье Г. А. Соколика и Н. П. Коноплёвой, написанной для журнала «Вопросы философии». Кстати, в ней же локализация симметрии рассматривалась как дальнейшее усиление принципа близкого действия, позволяющее перенести эйнштейновскую идею об обусловленности геометрии взаимодействием с гравитации на три других фундаментальных взаимодействия: «Стремление удалить дальное действие из теории поля с помощью локализации симметрии побудило в своё время Янга и Миллса выдвинуть идею калибровочного поля как взаимодействия, связывающего между собой локальные пространства внутренних симметрий элементарных частиц. По существу, идея локализации внутренних симметрий наряду с пространственно-временными и введение калибровочных полей – это развитие и обобщение идеи Эйнштейна о том, что геометрия пространства не задаётся априори, а определяется взаимодействием физических тел. В этом подходе как «внутренние», так и «внешние» свойства симметрии элементарных частиц удаётся связать с геометрическими свойствами пространства, обобщающего риманово пространство» [25, с. 125]. Эти работы Г. А. Соко-

лика, Н. П. Коноплёвой и других представителей школы Д. Д. Иваненко свидетельствовали о наличии в стране «калибровочного потенциала» и в какой-то мере внесли вклад в развитие калибровочных исследований в стране, но в период, когда основы СМ уже были заложены.

Было ещё два калибровочных островка, две калибровочных точки роста в стране. Одна из этих точек находилась в главном отечественном ядерно-оружейном центре в Сарове (Арзамасе-16, или КБ-11, а впоследствии и сейчас – ВНИИЭФ, Всероссийском НИИ экспериментальной физики). В. Б. Адамский, один из видных теоретиков Атомного проекта, коллега Я. Б. Зельдовича, А. Д. Сахарова и др., опубликовал в 1961 г. в журнале «УФН» содержательный обзор по теориям Янга–Миллса в духе общей теории калибровочных полей Р. Утиямы [26]. Но, как и многим зарубежным теоретикам, ему казалась почти непреодолимым препятствием на пути реализации калибровочно-полевой концепции проблема безмассовости получающихся полей взаимодействия. (Кстати говоря, он тоже использовал термин «компенсирующие поля»). «Применение принципа локальной инвариантности к преобразованиям типа изотопических, – заключал В. Б. Адамский, – приводит к введению заряженных полей без массы покоя. Чтобы они могли служить переносчиками уже известных взаимодействий, слабого или сильного, они должны обладать массой покоя. При этом нарушится локальная инвариантность... Отсутствие массы покоя в компенсирующих полях означало бы, что эти поля не имеют отношения к короткодействующим силам слабого и сильного взаимодействий» [26, с. 625–626]. Таким образом, несмотря на логическую обоснованность, теоретическую привлекательность и потенциальную универсальность калибровочно-полевой концепции (она же – концепция локальной инвариантности и компенсирующих полей), приходилось признать её неприменимость к реальным слабым и сильным взаимодействиям. В сущности, это была первая публикация по калибровочным теориям в СССР. Но окончательный вывод был пессимистическим, оправдывавшим позицию Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчука и др., сделавшим ставку на S-матричную феноменологическую программу построения теории элементарных частиц, прежде всего теории сильных взаимодействий.

Вторая точка роста появилась в Ленинграде, в Ленинградском отделении Математического института АН СССР. Речь идёт о Л. Д. Фаддееве, который в 1967 г. вместе с В. Н. Поповым разработал на основе метода континуального интегрирования квантовую теорию калибровочных полей (почти одновременно аналогичная теория была развита Б. Де Виттом – см. об этом [27]). Эта работа рассматривается как реальный серьёзный (и чуть ли не единственный!) вклад советских теоретиков в решение проблемы квантования неабелевых калибровочных полей и таким образом в создание СМ. Предполагая ещё вернуться к этому результату, снова перейдём к обсуждению вопроса о том, как «московский нуль» и авторитет московских теоретических школ, в первую очередь Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчука, повлиял на весьма отрицательное отношение наших теоретиков к полевой концепции в физике частиц, включая её калибровочный вариант.

«ТОРМОЖЕНИЯ» И «ТУПИКИ», СВЯЗАННЫЕ С «МОСКОВСКИМ НУЛЁМ»

Подтверждается ли высказывание Д. Гросса, взятое в качестве второго эпиграфа, о том, что «московский нуль», результат, полученный лидерами ведущих теоретических школ и их учениками, привёл чуть ли не к запрету теоретико-полевого направления в СССР?

Конечно, никакого запрета не было, но слишком велик был авторитет ведущих московских научных школ теоретической физики. И потому радикальный вывод о крахе или бесперспективности теории поля, вытекающий из парадокса «нуль-заряда», не мог не отвратить большинство теоретиков, особенно молодых, от казавшегося консервативным или даже ошибочным полевого направления, включая и концепцию калибровочных полей. И это, безусловно, приводило многих физиков к выбору направлений, оказавшихся тупиковыми, и (или) к явному торможению в развитии полевой программы и, в частности, локально-калибровочной, инициированной работой Ч. Янга и Р. Миллса. Приведём несколько свидетельств мемуарного характера, принадлежащих советским участникам событий 1950-х – 1960-х гг.

Вот как об этом вспоминал принадлежащий к школе И. Е. Тамма один из ведущих теоретиков термоядерной части советского атомного проекта А. Д. Сахаров (в 1953 г. была успешно испытана первая советская термоядерная бомба, известная как сахаровская «слойка», а в 1955 г. – первый двухступенчатый термоядерный заряд, ставший основой советского термоядерного оружия): «В 1955 г. независимо Фрадкин, Ландау и Померанчук нашли, что последовательное вычисление радиационных поправок приводит к чудовищному следствию – к полному исчезновению электромагнитного взаимодействия (знаменитый «Московский нуль»). В тот год я встретил Ландау на новогоднем банкете в Кремле (Ландау, как известно, был одним из главных «расчётчиков» ядерного оружия – В. В.). С очень озабоченным, даже удручённым видом он сказал: «Мы все оказались в тупике, что делать – совершенно непонятно». К этому времени относятся слова Ландау: «Лагранжиан мёртв...». Ландау, однако, ошибался. Лагранжиан не был мёртв. Многие годы трудность «московского нуля» рассматривалась как указание на необходимость отказа в физике высоких энергий от квантовой теории поля, делались попытки найти другие пути построения теории элементарных частиц, оказавшиеся неэффективными» [28, с. 124–125].

Об этом же в воспоминаниях о своём учителе Н. Н. Боголюбове писал Д. В. Ширков: «Заключение Л. Д. Ландау было пессимистическим: забудьте о локальной квантовой теории поля и лагранжиане. Именно такой тезис защищал в запомнившемся разговоре со мной соавтор Дау по нуль-заряду И. Я. Померанчук. Во имя этого тезиса он даже закрыл свой семинар в ИТЭФ по квантовой теории поля, порекомендовав молодым коллегам сменить область теоретической физики» [29, с. 160]. Кстати говоря, школа Н. Н. Боголюбова получила ряд важных результатов по теории матрицы рассеяния и дисперсионным отношениям, а что касается проблемы «нуль-заряда», то, как заметил в этих воспоминаниях Д. В. Ширков, «анализ этой проблемы,

проведённый Н. Н. (т. е. Н. Н. Боголюбовым – В. В.) с помощью только что развитого им аппарата ренорм-группы привёл к выводу, что заключение Ландау и Померанчука о внутренней противоречивости локальной квантовой теории поля не имеет статуса строгого результата, независимого от теории возмущения» [29, с. 164]. Что же получилось в итоге, по мнению Д. В. Ширкова? А в итоге, как он заключил, получились тупики в развитии того полевого направления, которое привело к созданию СМ: «Как известно, спустя 10–15 лет локальная лагранжева теория поля полностью вернула себе статус основного метода в теории частиц. Однако категоричность заключения знаменитого теоретика существенно затормозила развитие теории и привела к развитию некоторых тупиковых направлений типа теории «бутстрапа» [29, с. 164].

О трудностях, с которыми проходило восприятие локально-полевых калибровочных идей в СССР, можно судить по воспоминаниям одного из соавторов первой отечественной монографии по калибровочным полям Н. П. Коноплёвой [23]. Она рассказывает о крайне скептическом отношении большинства маститых теоретиков к калибровочно-полевым работам Г. А. Соколика и её собственным, относящимся к середине 1960-х гг., и о проблемах, с которыми ей приходилось сталкиваться при защите диссертаций и подготовке к изданию монографии по калибровочным полям. Отмечая поддержку Д. Д. Иваненко, а также некоторых известных теоретиков из ФИАН (М. А. Марков) и ОИЯИ в Дубне (А. М. Балдин) и несколько позже – Л. Д. Фаддеева и его соавтора В. Н. Попова, Н. П. Коноплёва заключает: «И всё-таки похоронить теорию калибровочных полей никак не удавалось. Её жизнестойкость объяснялась «симметричным бумом» в теоретической физике тех лет и настойчивым интересом к фундаментальным физическим принципам, которые могли бы помочь создать настоящую теорию сильных и слабых взаимодействий» [22, с. 19]. Одним из аргументов против работ Н. П. Коноплёвой было то, что она занималась классической теорией калибровочных полей, потому что специфика калибровочных полей, начиная со статьи Янга и Миллса, проявлялась уже на классическом уровне. Но из всей этой истории, как заметила Н. П. Коноплёва, следует «поучительный вывод: “Сначала создай правильную классическую теорию, а потом квантуй”» [22, с. 20].

Конкретные примеры неэффективных путей, торможений и тупиков, вызванных «московским нулем» и отказом от полевой концепции, приводил в своих воспоминаниях Б. Л. Иоффе, один из наиболее известных учеников И. Я. Померанчука. Так, после появления в 1959–1961 гг. работ А. Салама и Дж. Уорда, а также Ш. Глэшоу с первыми попытками объединения слабых и электромагнитных взаимодействий, которые не вызвали большого интереса, в ИТЭФ, где была сосредоточена школа Померанчука, заходил Я. Б. Зельдович и «говорил: «Какая замечательная теория, почему вы ею не занимаетесь? Мы отвечали, что теория неперенормируема..., но Я. Б. считал, что идея настолько глубока, что такой теорией всё равно нужно заниматься, не обращая внимания на трудности. И, по большому счёту, он был прав» [30, с. 159]. Ещё один пример, который приводит Б. Л. Иоф-

фе, касается работы Дж. Голдстоуна 1961 г., в которой было показано, что спонтанное нарушение симметрии приводит к возникновению безмассовых частиц. «Отношение к этой работе в ИТЭФ, – вспоминал он, – тогда было таким: все соглашались, что работа интересная, но никто не хотел развивать эти идеи дальше. Может быть, причина была в том, что почти все в ИТЭФ (и, особенно, Померанчук) были увлечены тогда реджевской теорией (некоторое развитие S-матричной программы и теории дисперсионных соотношений – В. В.). Я. Б. в обсуждениях неоднократно подчёркивал глубину и перспективность идей Голдстоуна и призывал нас развивать их. Но, увы, его усилия здесь были безуспешны – мы продолжали заниматься своим делом. Как известно, сейчас идеи о спонтанном нарушении симметрии и возникновении голдстоунов (т. е. соответствующих безмассовых частиц – В. В.) пронизывают всю физику элементарных частиц» [30, с. 159]. Б. Л. Иоффе вспоминал также о том, что после обнаружения «московского нуля» Померанчук «на протяжении 10 лет... развивал феноменологические и основанные на аналитичности методы в физике частиц (теорема Померанчука, теория Редже... и др.)» и что насколько труден для него был возврат «к методам квантовой теории поля, т. е. лагранжиану» в последней его работе, написанной совместно с В. Н. Грибовым и Б. Л. Иоффе [30, с. 154]. Ведь за 10 лет до этого он вместе с Ландау провозгласил кончину лагранжиана!

Таким образом, уже в середине и второй половине 1960-х гг. началось возвращение большинства советских теоретиков к полевой концепции в её локально-калибровочной форме. Надежды на антиполевую революцию, которые разделяли в первую очередь корифеи квантово-релятивистской революции и их приверженцы Н. Бор, В. Гейзенберг, В. Паули, а в СССР – Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчук, И. Е. Тамм и др., не оправдывались, а соответствующие успехи на этом пути были весьма незначительными по сравнению с достижениями набравшей силу локально-калибровочной полевой программы. Е. Л. Фейнберг, представитель школы И. Е. Тамма и в какой-то степени сам участник описываемых событий, считал, что для многих физиков, свернувших с правильного пути на уводящие в дебри тропы, вся эта ситуация приобретала драматический и даже иногда трагический характер. Имея в виду именно эту ситуацию и именно этот этап в истории создания СМ, он писал: «Часто вспоминают слова Эйнштейна о том, что история возникновения нового в науке – это «драма идей». Но не в меньшей мере это и «драма людей», часто трагедия. Помнят победивших, вышедших из вызывающего лихорадку тумана на подлинный свет и выведших на него других. Но сколько талантливых и трудолюбивых ошиблось, заблудилось, завязло в болоте, которое засосало так, что о них и памяти вскоре не осталось!» [1, с. 324–325]. И в дополнение к этому: «Вся эта драматическая история показывает, как может быть ошибочна «всеобщая» точка зрения (в данном случае отказ от локально-полевой концепции – В. В.), как она может быть губительна и для науки, и для принявших её учёных. Перебирая в памяти события тех полутора десятилетий, можно вспомнить множество имён, прогремевших, а ныне забытых. Те же, очень немногие, кто устоял против поветрия, естественно вступили в новую эпоху грандиозных успехов

теории. Они вышли на свет. Ожидавшаяся революция не состоялась. Новая (консервативная! – В. В.) революция продолжается» [1, с. 338]. Среди тех «очень немногих, кто устоял против поветрия» были создатели СМ, такие как Ч. Янг, М. Гелл-Манн, Ш. Глэшоу, А. Салам, С. Вайнберг, Г.'т Хоофт, Ё. Намбу, Ф. Вильчек, Д. Гросс, Х. Д. Политцер и др. (почти все упомянутые были в разное время удостоены Нобелевской премии). А из наших теоретиков в эту когорту можно было бы включить, наверное, лишь Л. Д. Фаддеева и В. Н. Попова, которые ещё в 1967 г. продемонстрировали эффективный метод квантования неабелевых калибровочных полей, лёгший в основу квантовой теории калибровочных полей [27]. Кстати говоря, Л. Д. Фаддеев впоследствии в «Автобиографии» объяснял, почему он устоял против анти-полевого поветрия: «В то время квантовая теория поля была практически запрещена в СССР из-за (чисто научной) цензуры. К счастью, живя в Ленинграде, я был вне влияния Москвы (точнее, теоретических школ Ландау и Померанчука – В. В.) и был свободен делать то, что хотел... Я решил заняться проблемой квантования полей Янга–Миллса. Осенью 1966 г. в сотрудничестве с ярким молодым коллегой Виктором Поповым я пришёл к правильной формулировке этой теории в терминах функционального интеграла» [31].

Но говоря о нашем вкладе в создание СМ, всё-таки нельзя ограничиться только работой Фаддеева и Попова. Во-первых, потому, что направления, казавшиеся правильными, но оказавшиеся ошибочными, и даже явные тупики, нередко «оживают», приходясь в новой ситуации. А во-вторых, методы и идеи, приведшие к успеху в совершенно другой области физики, например, в теории конденсированного состояния (в частности, в теории сверхпроводимости), неожиданно могут оказаться эффективными в теории элементарных частиц. Первое случилось с «московским нулём», а второе – с теориями Н. Н. Боголюбова, а также Л. Д. Ландау и В. Л. Гинзбурга по физике конденсированного состояния и в особенности теории сверхпроводимости.

ПРОБЛЕМА «НУЛЬ-ЗАРЯДА» И «АСИМПТОТИЧЕСКАЯ СВОБОДА»: ЭВРИСТИКА «МОСКОВСКОГО НУЛЯ»

Е. Л. Фейнберг очень красочно описал извилистый путь к научной истине, имея в виду как раз создание СМ, когда прозрения и прорывы чередуются с ошибками и заблуждениями, которые нередко оборачиваются проблесками истины: «В непроглядном тумане неизвестного, непонятного, противоречивого, в котором делается каждый шаг, происходит не упорядоченное движение вперёд, а блуждание, которым управляет не столько последовательное, логическое мышление, сколько интуиция, возникшая из знания и полужнания, из догадок и ошибок, ведомая где-то мелькающими далёкими огоньками, которые один примет за проблеск истины, другой – за обманывающие болотные огни. Один поверит им, пойдёт, побежит на них, цели-

ком доверившись, другой – махнёт рукой и будет вглядываться снова и блуждать по-прежнему. А кто окажется прав, выяснится ещё очень нескоро, после новых блужданий, сомнений, душевного смятения и адски трудной работы, работы, работы» [1, с. 324]. Об этом же говорится в книге ученика И. Я. Померанчука И. Ю. Кобзарева и математика Ю. И. Манина, исследовавшего математические структуры современной физики. Описав некоторые зигзаги на пути к СМ, Математик (а книга представляет собой диалоги Физика-теоретика и Математика, за которыми стоят И. Ю. Кобзарев и Ю. И. Манин) говорит: «История того, как это всё открылось, больше похожа на комедию ошибок, чем на порядочный индуктивный процесс по Стюарту Миллю (классику индуктивной логики – В. В.)».

Теоретик уточняет, что были не только ошибки, но и некоторая логика, в частности, аналогии, ведущие к истине: «Конечно, но в основе догадок, приведших к современным теориям, лежит простое заключение по аналогии (имеется в виду аналогия локально-калибровочной абелевой симметрии в квантовой электродинамике с неабелевой локально-калибровочной симметрией сильных взаимодействий – В. В.)... В догадках, которые привели к группе цвета и слабой группе, также всё время сочетались элементы угаданной истины и ошибочных отождествлений, предубеждений. В конце концов, заблуждения приходили в противоречия с фактами и отпадали, а фрагменты истины сливались в согласованную картину». Математик снова сомневается: «Мне, однако, кажется, что дорога от КЭД (т. е. квантовой электродинамики – В. В.) к теориям полей Янга–Миллса не была такой торной, как у вас получилось». Теоретик соглашается и добавляет: «Та линия развития, которую я не то чтобы проследить, но хоть пунктиром пытался наметить, часто на многие годы почти исчезала из виду, а на поверхности шумно пробовали разыграть совсем другие сценарии. Расширение парадигмы на новую область (т. е. квантово-релятивистской парадигмы на физику частиц в середине XX в. – В. В.) безболезненно никогда не проходит, неизбежно возникают противоречия, кризисы, да и сама парадигма перестраивается и меняется» [32, с. 26–27]. Таким образом, подтверждается так называемая «ошибочностная» концепция научного познания в физике, намеченная С. И. Вавиловым в 1930–1940-е гг. [6].

Мы уже свыклись с мыслью, что отказ от полевого подхода в физике частиц и взятие за основу феноменологической теории матрицы рассеяния и дисперсионных соотношений, вызванные во многом парадоксом «нуль-заряда» и санкционированные авторитетом таких корифеев, как В. Гейзенберг и В. Паули, а в СССР – Л. Д. Ландау, И. Я. Померанчуком, в какой-то степени также и И. Е. Таммом и Н. Н. Боголюбовым – это всё-таки ошибка, заблуждение, которые как будто вели к драмам и даже трагедиям. Но в начале 1970-х гг. Д. Гросс, Ф. Вильчек и Х. Д. Политцер, опираясь на рассуждения Л. Д. Ландау и других «нуллификаторов» в их антиэкранировочном варианте, пришли в случае сильных взаимодействий не к «обнулению» заряда и взаимодействия, а к так называемой «асимптотической свободе», ключевому понятию квантовой хромодинамики (КХД) [3; 33]. За эти работы они были удостоены Нобелевской премии, а ведь к открытию феномена асимптотической

свободы были очень близки Ландау и другие «нулификаторы», причём лет за 15 до будущих нобелевцев! Из Нобелевских лекций Д. Гросса и Ф. Вильчека видно, что они тщательно продумывали проблему «нуль-заряда». Так, Д. Гросс, рассмотрев «экранировочную» природу «московского нуля», связанную с поляризацией вакуума, понимает, насколько Л. Д. Ландау был близок к понятию «асимптотической свободы» и даже задаётся вопросом: «Почему проблема нулевого заряда не вдохновила (Ландау или других «нулификаторов» – В. В.) на поиски асимптотически свободных теорий, лишённых этого недостатка?» [2, с. 731]. Его дополняет Ф. Вильчек, заметивший, что «нулификация» заряда и взаимодействия в КЭД, как было установлено Ландау и др., порождалась «экранировочным» эффектом из-за поляризации вакуума. Но поля, реализующие сильные взаимодействия, т. е. фигурирующие в квантовой хромодинамике (КХД), имеют более сложный вакуум, в котором вместо «экранирования» может получиться «антиэкранирование». «Антиэкранирование, – продолжал Ф. Вильчек, – переворачивает проблему Ландау с ног на голову. В случае экранирования источник воздействия... индуцирует появление компенсирующего облака виртуальных частиц. Большой заряд, расположенный в центре облака, слабо действует на больших расстояниях. Антиэкранирование, или асимптотическая свобода, напротив, подразумевает, что заряд малой величины катализирует появление облака виртуальных частиц, увеличивающих его мощность... Так как виртуальные частицы сами являются заряженными, этот рост самоусиливается по мере удаления от источника». И дальше следует пояснение, как это антиэкранирование проявляется в КХД: «Теории, в которых была обнаружена асимптотическая свобода, были названы неабелевыми калибровочными теориями или теориями Янга–Миллса. Они представляют собой обобщение электродинамики. В них постулируется существование нескольких типов зарядов. То есть вместо одного-единственного «заряда» мы имеем дело с несколькими «цветами». Соответственно, вместо одного фотона появляется семейство цветных глюонов. В этом отношении неабелевы теории отличаются от электродинамики, в которой фотон является электрически нейтральным. Таким образом, глюоны в неабелевых теориях играют гораздо более активную роль, чем фотоны в электродинамике... Именно виртуальные глюоны ответственны за наличие антиэкранирования, которое отсутствует в КЭД» [34, с. 773–774].

Из воспоминаний ученика Л. Д. Ландау С. С. Герштейна и ученика И. Я. Померанчука Б. Л. Иоффе мы узнаём некоторые важные детали, касающиеся открытия Л. Д. Ландау с соавторами «московского нуля». Оказывается, вначале он ошибочно получил в КЭД не обращение в нуль эффективного заряда, а нечто подобное асимптотической свободе, когда при очень малых расстояниях аннулируется затравочный заряд. «Интересно, – замечает С. С. Герштейн, – что ещё до проведения расчётов Ландау полагал, что «затравочный» заряд будет уменьшаться и стремиться к нулю с уменьшением радиуса... Он даже развил общую философию, отвечающую принципу «асимптотической свободы» в КХД. Но в этих расчётах была допущена ошибка в знаке... Когда ошибка была замечена (кажется, Б. Л. Иоффе), Лев Давидович успел забрать статью из редакции и исправить её. Вместе с этим исчезла

философия «асимптотической свободы». А жаль. Зная её, новосибирский теоретик из ИЯФ СО АН СССР Ю. Б. Хриплович (в 1969 г. – В. В.), обнаружив в частном примере, что цветовой заряд в КХД уменьшается с уменьшением расстояния, возможно, мог бы построить общую теорию (за которую Д. Гросс, Ф. Вильчек и Х. Д. Политцер уже в XXI в. получили Нобелевскую премию) (эта теория была разработана ими в 1973 г. – В. В.)» [35, с. 18]. Воспоминания Б. Л. Иоффе подтверждают описанный Герштейном случай: «В последней из серии работ Ландау, Абрикосова и Халатникова, которую авторы уже собирались отправить в печать, была ошибка в знаке, кардинально меняющая все выводы – вместо асимптотической свободы появился нуль заряда. То есть квантовая электродинамика оказывалась внутренне противоречивой теорией. Как впоследствии рассказывал С. С. Герштейн (который работал тогда в Институте физических проблем), вернувшись после этого семинара из ТТЛ (т. е. после семинара в ИТЭФе, на котором Б. Л. Иоффе и А. Д. Галанин указали Ландау на его ошибку – В. В.), Ландау сказал: “Галанин и Иоффе спасли меня от позора”» [30, с. 87]. Как подчеркнул В. Б. Берестецкий, принципиальное различие вывода о нулевом заряде в КЭД от асимптотической свободы заключается в том, что «не заряд на конечном расстоянии обращается в нуль при любом значении первоначального точечного заряда, а нулевой точечный заряд отвечает конечному заряду на конечном расстоянии». И результат, касающийся асимптотической свободы, «невозможно получить, если руководствуясь формально уравнениями поля, рассматривать только точечные заряды. Надо действовать путём предельного перехода, как было предложено Ландау» [16, с. 249–250]. Так нередко ошибочные решения берут реванш, доказывая свою эвристичность. Поэтому было бы неправильно, говоря об отечественном вкладе в создание СМ, не учитывать работы Ландау (с соавторами), Померанчука и Фрадкина по проблеме нуль-заряда. Вначале они как бы уводили теоретиков с правильного локально-полевого пути, но затем, на конечной стадии формирования СМ способствовали возвращению на этот путь.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Просматривая именные указатели книг по СМ или истории физики элементарных частиц, изданных в том числе и на Западе, мы нередко наталкиваемся на имена наших теоретиков, упоминаемых в связи с их работами по теории конденсированного состояния, главным образом по теории сверхпроводимости (см., например, [33, 36]). Оказывается, имеются в виду работы В. Л. Гинзбурга и Л. Д. Ландау, а также Н. Н. Боголюбова по спонтанному нарушению симметрии, которое первоначально изучалось именно в физике твердого тела, или в квантовой теории многих тел, важной частью которых являются современные теории сверхпроводимости и сверхтекучести. Достижения названных теоретиков и руководимых ими больших теоретических школ в этих областях, казалось бы, далёких от физики элементарных частиц, достижения именно в области изучения феномена спонтанного на-

рушения симметрии, который является ключевым в теории электрослабого взаимодействия, позволяют говорить о дополнительном своего рода косвенном вкладе отечественных теоретиков в создание СМ. Здесь мы ограничимся только некоторыми высказываниями представителей этих школ, взятых из их обзорных работ или воспоминаний.

А. Н. Тавхелидзе о работах Н. Н. Боголюбова: «Явление спонтанного нарушения симметрии для квантовых систем, открытое Н. Н. Боголюбовым при создании микроскопической теории сверхтекучести (1946) и сверхпроводимости (1950), в настоящее время составляют фундаментальный принцип стандартной модели электрослабых взаимодействий». Кстати, там же отмечается ещё один вклад Боголюбова в создание СМ, о котором ранее мы не говорили: «А предложенное Н. Н. Боголюбовым с сотрудниками новое квантовое число (1965), впоследствии названное цветом, является основой квантовой хромодинамики» [37, с. 136].

Д. А. Киржниц, выписав лагранжиан, использованный П. Хиггсом и позволяющий наделить калибровочные частицы массой в его работе, удостоенной впоследствии Нобелевской премии, замечает: «Переходя здесь к статическому пределу, легко увидеть, что модель Хиггса полностью аналогична теории Гинзбурга-Ландау (по теории сверхпроводимости – В. В.), представляя собой её релятивистское обобщение... Как оказалось, этот вывод имеет немаловажную эвристическую ценность, позволяя устанавливать прямые аналогии между теорией сверхпроводимости и теориями элементарных частиц, включающими в себя модель Хиггса» [38, с. 187]. Киржницу же принадлежит замечательная метафора возрождения полевой концепции, во многом благодаря трансляции идей из физики конденсированного состояния в теорию элементарных частиц: «Оказалось, таким образом, что квантовая теория поля не умерла, а пребывала, как Спящая Красавица, в состоянии летаргии. Чтобы разбудить её, понадобилось, конечно, нечто большее, чем поцелуй сказочного принца. Здесь сказалось воздействие многих факторов, среди которых далеко не последнюю роль сыграло привлечение физических идей, заимствованных из теории многих тел и, в частности, из теории сверхпроводимости» [38, с. 173].

Особого упоминания в этой связи заслуживает работа А. И. Ларкина и В. Г. Вакса, которые, почти одновременно с Ё. Намбу, удостоенного в 2008 г. Нобелевской премии, перенесли идею спонтанного нарушения симметрии из теории сверхпроводимости в теорию элементарных частиц. Б. Л. Иоффе даже говорил об «открытии им (Ларкиным – В. В.) (в работе с В. Г. Ваксом) спонтанного нарушения симметрии в физике элементарных частиц, сделанное в 1950-х годах (работа была опубликована в 1961 г. – В. В.)» [30, с. 84–85].

Упомянем ещё об одной линии развития идей, ведущих к СМ, у истоков которых находятся работы советских физиков, это – теория слабых взаимодействий. С одной стороны, мы имеем в виду работу Я. Б. Зельдовича и С. С. Герштейна 1955 г., в которой «сформулирована важная идея о том, что слабый заряженный векторный адронный ток должен сохраняться». Этот результат через три года был переоткрыт Р. Фейнманом и М. Гелл-Манном, которые признали важность работы советских физиков. «С тех пор в

литературе по физике элементарных гипотеза сохраняющегося векторного тока прочно связана с именами С. С. Герштейна и ЯБ (т. е. Я. Б. Зельдовича – В. В.). Гипотеза сохраняющегося векторного тока и аналогия между слабым и электромагнитным токами сыграли важную роль в создании современной картины слабого взаимодействия вообще и единой калибровочной теории электромагнитного и слабого взаимодействий, в частности. По существу, именно сохранение векторного тока заставило теоретиков обратиться к описанию слабых взаимодействий на основе теории Янга–Миллса» [39, с. 66] (см. об этом также [40]). С другой стороны, речь идёт об открытии нарушения закона сохранения четности в слабых взаимодействиях (за это Ч. Янг и Ц. Д. Ли были удостоены Нобелевской премии), а также о работах Л. Д. Ландау, Л. Б. Окуня, Б. Л. Иоффе и А. П. Рудика по этой проблематике [30, с. 88–91]. Эти работы придали новый импульс развитию теории слабых взаимодействий и их объединению с электромагнитными взаимодействиями.

Своеобразная историко-научная аномалия, состоящая в не слишком заметном вкладе отечественных теоретиков в создание СМ при наличии ряда таких мощных теоретических научных школ, как школы Ландау, Померанчука, Тамма, Боголюбова и др., нашла своё объяснение в отказе лидеров этих школ от локально-полевого концепции, вызванной в основном парадоксом «нуль-заряда», получившим название «московского нуля». Этому способствовала и феноменологическая, близкая к позитивизму ориентация Л. Д. Ландау и И. Я. Померанчука, связанная с радикальным переходом от полевого подхода на позиции матрицы рассеяния и дисперсионизма. Этот радикализм и научный авторитет ведущих теоретиков и их школ существенно повлиял, по-видимому, на негативное отношение большинства молодых отечественных теоретиков к полювому концепции в целом и теории Янга–Миллса в частности. А это не могло не привести к упущенным возможностям, а также к драмам и иногда даже трагедиям отдельных исследователей. Рассмотренная история убеждает также в справедливости «ошибочностной» концепции развития научного знания С. И. Вавилова и учит нас терпимости по отношению к альтернативным подходам и умению в рамках научного этоса вести научные дискуссии и достигать компромисса.

Тем не менее, оказывается, что отечественный вклад в создание СМ был разнообразен и так или иначе важен. Иногда ошибки оборачивались эвристикой, как в случае с «московским нулём», иногда этот вклад носил, так сказать, косвенный характер, как в случае с переносом феномена спонтанного нарушения симметрии из теории многих тел и теории сверхпроводимости, в частности, в теорию элементарных частиц. Наша история, в основном, укладывается в 15–20 лет. Последующая история остаётся за пределами нашего рассмотрения. Заметим только, что после признания правильности и перспективности СМ в начале 1970-х гг. она быстро была воспринята и в нашей стране и получила значительное развитие. В последующее десятилетие были изданы десятки учебников, монографий, даже энциклопедий, обзоров в журнале «УФН», научно-популярных очерков (на первые из них мы уже ссылались [23, 27, 32, 41]).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фейнберг Е. Л.* Как важно иногда быть консервативным // Фейнберг Евгений Львович: личность сквозь призму памяти / Под ред. В. Л. Гинзбурга. М.: Физматлит, 2008. С. 324–338.
2. *Гросс Д.* Открытие асимптотической свободы и появление КХД // Нобелевские лекции по физике. 1995–2004. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2009. С. 727–752.
3. *Визгин В. П.* У истоков стандартной модели в физике фундаментальных взаимодействий // Исследования по истории физики и механики. 2019–2020 (в печати).
4. *Визгин В. П.* Метафизические аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории её создания // Метафизика (в печати).
5. *Визгин В. П.* Социокультурные аспекты стандартной модели в физике элементарных частиц и истории её создания // Эпистемология и философия науки (в печати).
6. *Визгин В. П. С. И. Вавилов:* «...на ошибках вырастает наука» // Исследования по истории физики и механики. 2016–2018. М.: Янус-К, 2019. С. 287–318.
7. *Визгин В. П.* Единые теории поля в первой трети XX в. М.: Наука, 1985. 304 с.
8. *Окунь Л. Б.* Введение в калибровочные теории. М: МИФИ, 1984. 88 с.
9. *Гинзбург В. Л., Фейнберг Е. Л.* Игорь Евгеньевич Тамм (Краткий биографический очерк) // И. Е. Тамм. Собрание научных трудов в 2-х томах. Т. 1. М.: Наука, 1975. С. 7–18.
10. *Иваненко Д. Д.* Введение в теорию элементарных частиц. Ч. 2 // Успехи физических наук. 1947. Т. 32. С. 261–315.
11. *Френкель Я. И.* Замечания к квантовополевой теории материи // Успехи физических наук. 1950. Т. 42. С. 69–75.
12. *Марков М. А.* О нелокальных полях и сложной природе «элементарных» частиц (динамически деформируемый форм-фактор) // М. А. Марков. Избранные труды: В 2 т. Т. 1. М.: Наука, 2000. С. 179–201.
13. *Иваненко Д. Д., Соколов А. А.* Классическая теория поля (Новые проблемы). М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. 432 с.
14. *Ландау Л. Д.* Собрание трудов. В 2-х т. Т. 2. М.: Наука, 1969. 450 с.
15. *Ландау Л. Д., Померанчук И. Я.* О точечном взаимодействии в квантовой электродинамике // Л. Д. Ландау. Собрание трудов. Т. 2. С. 247–251.
16. *Берестецкий В. Б.* Нуль-заряд и асимптотическая свобода // В. Б. Берестецкий. Проблемы физики элементарных частиц. М.: Наука, 1979. С. 231–259.
17. *Иваненко Д. Д.* Теория элементарных частиц и векторные или компенсирующие поля (вступительная статья) // Элементарные частицы и компенсирующие поля. Сборник статей / Под ред. Д. Д. Иваненко. М.: Мир, 1964. С. 7–27
18. *Тамм И. Е.* Элементарные частицы // И. Е. Тамм. Собрание научных трудов в 2-х томах. Том 2. М.: Наука. 1976. С. 438–455.
19. *Тамм И. Е.* На пороге новой теории // И. Е. Тамм. Собрание научных трудов в 2-х томах. Том 2. М.: Наука. 1976. С. 461–477.
20. *Утияма Р.* К чему пришла физика. От теории относительности к теории калибровочных полей. М.: Знание, 1986. 224 с.
21. *Визгин В. П.* Гравитационная школа Д. Д. Иваненко // Исследования по истории физики и механики. 2014–2015. М.: Янус-К, 2016. С. 217–236.
22. *Коноплёва Н. П. А. З. Петров и его время: мои воспоминания.* Препринт ОИЯИ. Р2-2012-52. Дубна: ОИЯИ, 2012. 30 с.
23. *Коноплёва Н. П., Попов В. Н.* Калибровочные поля. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.

24. Соколик Г. А. Групповые методы в теории элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1965. 175 с.
25. Коноплёва Н. П., Соколик Г. А. Симметрия и типы физических теорий // Вопросы философии. 1972. № 1. С. 118–127.
26. Адамский В. Б. Локальная инвариантность и теория компенсирующих полей // Успехи физических наук. 1961. Т. 74. Вып. 4. С. 609–626.
27. Славнов А. А., Фаддеев Л. Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1988. 272 с.
28. Сахаров А. Д. Воспоминания. В 2-х томах. Т. 1. М.: Права человека, 1996. 912 с.
29. Ширков Д. В. Вспоминая Н. Н. Боголюбова // Воспоминания об академике Н. Н. Боголюбове. К столетию со дня рождения / Под ред. В. С. Владимирова и И. В. Воловича. М.: МИАН, 2009. С. 143–172.
30. Иоффе Б. Л. Атомные проекты: события и люди. М.: Центр социального прогнозирования и маркетинга, 2018. 208 с.
31. Фаддеев Л. Д. Автобиография [Электронный ресурс] // Фаддеев. URL: faddeev.com/биография/биографические публикации (дата обращения: 14.08.2020)
32. Кобзарев И. Ю., Манин Ю. И. Элементарные частицы. Диалоги физика и математика. М.: ФАЗИС. 1997. 208 с.
33. Pais A. Inward bound. Of matter and forces in the physical world. Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press. 1986. 666 p.
34. Вильчек Ф. Асимптотическая свобода: от парадоксов к парадигмам // Нобелевские лекции по физике. 1995–2004. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. С. 767–795.
35. Герштейн С. С. Великий универсал XX века (к 100-летию Льва Давидовича Ландау) // Природа. 2008. № 1. С. 15–33.
36. Вайнберг С. Квантовая теория поля. Т. 2. Современные приложения. М.: Физматлит, 2003. 528 с.
37. Тавхелидзе А. Н. Н. Н. Боголюбов (штрихи к портрету) // Воспоминания об академике Н. Н. Боголюбове. К столетию со дня рождения / Под ред. В. С. Владимирова и И. В. Воловича. М.: МИАН, 2009. С. 136–142.
38. Киржниц Д. А. Сверхпроводимость и элементарные частицы // Д. А. Киржниц. Труды по теоретической физике и воспоминания. В 2-х т. Т. 1. М.: Физматлит, 2001. С. 172–196.
39. Зельдович Я. Б., Герштейн С. С. О мезонных поправках в теории бета-распада. Комментарий // Я. Б. Зельдович. Избранные труды. Частицы, ядра, Вселенная. М.: Наука, 1985. С. 66.
40. Герштейн С. С. От бета-сил к универсальному взаимодействию // Природа. 2010. № 1. С. 3–14.
41. Физика микромира. Маленькая энциклопедия / Главный редактор Д. В. Ширков. М.: Советская энциклопедия, 1980. 528 с.

Статья поступила в редакцию 25.05.2020.

“COMEDY OF MISTAKES” AND “DRAMA OF HUMANS”: ON THE DOMESTIC CONTRIBUTION TO THE CREATION OF THE STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLE IN PHYSICS

Vladimir P. Vizgin

S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the RAS,
Moscow, Russian Federation

vlvizgin@gmail.com

DOI: 10.19181/smtp.2020.2.3.11

Abstract. The article explores domestic contribution to the creation of The Standard Model (SM). SM is a quantum field gauge theory of electromagnetic, weak and strong interactions, which is the basis of the modern theory of elementary particles. The process of its development covers a twenty-year period – from 1954 (the concept of non-Abelian Yang-Mills gauge fields) to the early 1970s, when the construction of renormalizable quantum chromodynamics and electroweak theory was completed. The reasons for the difficult perception of the Yang-Mills gauge field concept in the USSR are analyzed, associated primarily with the problem of “zero-charge” in quantum electrodynamics, and then in field theories of strong and weak interactions. This result, obtained by the leaders of the outstanding Russian scientific schools of theoretical physics, L. D. Landau, I. Ya. Pomeranchuk and their students, led to the rejection of the majority of Soviet physicists from field theory and to their transition to the position of a non-field phenomenological program (based on the S-matrix theory) in the construction of the theory of elementary particles.

Keywords: The Standard Model, elementary particle physics, Soviet physics, L. D. Landau, problem of zero-charge, S-matrix program, asymptotic freedom, scientific schools.

For citation: Vizgin, V. P. (2020). “Comedy of mistakes” and “drama of humans”: on the domestic contribution to the creation of The Standard Model of elementary particle in physics. *Science Management: Theory and Practice*. Vol. 2. No. 3. Pp. 196–224.

DOI: 10.19181/smtp.2020.2.3.11

REFERENCES

1. Feinberg, E. L. (2008). Kak vazhno inogda byt' konservativnym [How important it is to be conservative sometimes]. In: *Feinberg Evgenii L'vovich: lichnost' skvoz' prizmu pamyati*. Ed. by V. L. Ginzburg. Moscow: Fizmatlit publ. Pp. 324–338. (In Russ.).
2. Gross, D. (2009). Otkrytie asimptoticheskoi svobody i poyavlenie KKHD [The discovery of asymptotic freedom and the emergence of QCD]. In: *Nobelevskie lektsii po fizike*.

1995–2004. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy; Izhevsk: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika. Pp. 727–752. (In Russ.).

3. Vizgin, V. P. U istokov standartnoi modeli v fizike fundamental'nykh vzaimodeistvii [At the origins of the standard model in the physics of fundamental interactions]. In: *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki*. (In print). (In Russ.).

4. Vizgin, V. P. Metafizicheskie aspekty standartnoi modeli v fizike ehlementarnykh chastits i istorii ee sozdaniya [Metaphysical aspects of the standard model in particle physics and the history of its creation]. In: *Metafizika* (In print). (In Russ.).

5. Vizgin, V. P. Sotsiokul'turnye aspekty standartnoi modeli v fizike ehlementarnykh chastits i istorii ee sozdaniya [Sociocultural aspects of the standard model in particle physics and its creation history]. In: *Ehpistemologiya i filosofiya nauki* (In print). (In Russ.).

6. Vizgin, V. P. (2019). S. I. Vavilov: «...na oshibkakh vyrastaet nauka» [S. I. Vavilov: "...science grows out of mistakes"]. In: *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki. 2016–2018*. Moscow: Yanus-K publ. Pp. 287–318. (In Russ.).

7. Vizgin, V. P. (1985). *Edinye teorii polya v pervoi treti XX v.* [Unified field theories in the first third of the twentieth century]. Moscow: Nauka publ. 304 p. (In Russ.).

8. Okun, L. B. (1984). *Vvedenie v kalibrovochnye teorii* [Introduction to gauge theories]. Moscow: MIFI publ., 1984. 88 p. (In Russ.).

9. Ginzburg, V. L., Feinberg, E. L. (1975). Igor' Evgen'evich Tamm (Kratkii biograficheskii ocherk) [Igor E. Tamm (Short biographical sketch)]. In: I. E. Tamm. *Sobranie nauchnykh trudov*. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Nauka publ. Pp. 7–18. (In Russ.).

10. Ivanenko, D. D. (1947). Vvedenie v teoriyu ehlementarnykh chastits [Introduction to the theory of elementary particles]. Part. 2. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. Vol. 32. Pp. 261–315. (In Russ.).

11. Frenkel, Ja. I. (1950). Zamechaniya k kvantovopolevoi teorii materii [Remarks on the quantum field theory of matter]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. Vol. 42. Pp. 69–75. (In Russ.).

12. Markov, M. A. (2000). O nelokal'nykh polyakh i slozhnoi prirode «ehlementarnykh» chastits (dinamicheski deformiruemyi form-faktor) [On non-local fields and the complex nature of "elementary" particles (dynamically deformable form factor)]. In: Markov M. A. *Izbrannye Trudy*. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Nauka publ. Pp. 179–201. (In Russ.).

13. Ivanenko, D. D. and Sokolov, A. A. (1949). *Klassicheskaya teoriya polya (Novye problemy)* [Classical field theory (New problems)]. Moscow-Leningrad: GITTL publ. 432 p. (In Russ.).

14. Landau, L. D. (1969). *Sobranie trudov*. In 2 vol. Vol. 2. M.: Nauka publ. 450 p. (In Russ.).

15. Landau, L. D. and Pomeranchuk, I. Ja. (1969). O tochechnom vzaimodeistvii v kvantovoi ehlektrodinamike [On point interaction in quantum electrodynamics]. In: L. D. Landau. *Sobranie trudov*. In 2 vol. Vol. 2. Pp. 247–251. (In Russ.).

16. Berestetskii, V. B. (1979). Nul'-zaryad i asimptoticheskaya svoboda [Zero-charge and asymptotic freedom]. In: Berestetskii, V. B. *Problemy fiziki ehlementarnykh chastits*. Moscow: Nauka publ. Pp. 231–259. (In Russ.).

17. Ivanenko, D. D. (1964). Teoriya ehlementarnykh chastits i vektornye ili kompensiruyushchie polya (vstupitel'naya stat'ya) [The theory of elementary particles and compensating fields or vector (introductory article)]. In: *Ehlementarnye chastitsy i kompensiruyushchie polya*. Sbornik statei. Ed. by D. D. Ivanenko. Moscow: Mir publ. Pp. 7–27. (In Russ.).

18. Tamm, I. E. (1976). Ehlementarnye chastitsy [Elementary particle]. In: Tamm I. E. *Sobranie nauchnykh trudov*. In 2 vol. Vol. 2. Moscow: Nauka publ. Pp. 438–455. (In Russ.).

19. Tamm, I. E. (1976). Na poroge novoi teorii [On the threshold of a new theory]. In: Tamm I. E. *Sobranie nauchnykh trudov*. In 2 vol. Vol. 2. Moscow: Nauka publ. Pp. 461–477. (In Russ.).
20. Utijama, R. (1986). *K chemu prishla fizika. Ot teorii odnositel'nosti k teorii kalibrovochnykh polei* [What physics has come to. From the theory of relativity to the theory of gauge fields]. Moscow: Znanie publ. 224 p. (In Russ.).
21. Vizgin, V. P. (2016). Gravitatsionnaya shkola D. D. Ivanenko [Gravity school of D. D. Ivanenko]. In: *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki. 2014–2015*. Moscow: Yanus-K publ. Pp. 217–236. (In Russ.).
22. Konopleva, N. P. (2012). *A. Z. Petrov i ego vremya: moi vospominaniya* [A. Z. Petrov and his times: my reminiscences. Preprint JINR. P2-2012-52. Dubna: JINR. 30 p. (In Russ.).
23. Konopleva, N. P. and Popov, V. N. (1980). *Kalibrovochnye polya* [Gauge field]. Moscow: Atomizdat publ. 240 p. (In Russ.).
24. Sokolik, G. A. (1965). *Gruppovye metody v teorii ehlementarnykh chastits*. [Group methods in the theory of elementary particles]. Moscow: Atomizdat publ. 175 p. (In Russ.).
25. Konopleva, N. P. and Sokolik, G. A. (1972). Simmetriya i tipy fizicheskikh teorii [Symmetry and types of physical theories]. *Voprosy filosofii*. No. 1. Pp. 118–127. (In Russ.).
26. Adamskii, V. B. (1961). Lokal'naya invariantnost' i teoriya kompensiruyushchikh polei [Local invariance and the theory of compensating fields]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. Vol. 74. Iss. 4. Pp. 609–626. (In Russ.).
27. Slavnov, A. A. and Faddeev, L. D. (1988). *Vvedenie v kvantovuyu teoriyu kalibrovochnykh polei* [Introduction to the quantum theory of gauge fields]. Moscow: Nauka publ. 272 p. (In Russ.).
28. Sakharov, A. D. (1996). *Vospominaniya* [Memories]. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Prava cheloveka publ. 912 p. (In Russ.).
29. Shirkov, D. V. (2009). Vspominaya N. N. Bogolyubova [Remembering N. N. Bogolyubov] *Vospominaniya ob akademike N. N. Bogolyubove. K stoletiyu so dnya rozhdeniya*. Ed. by V. S. Vladimirov, I. V. Volovich. Moscow: MIAN publ. Pp. 143–172. (In Russ.).
30. Ioffe, B. L. (2018). *Atomnye proekty: sobytiya i lyudi* [Nuclear projects: events and people]. Moscow: Tsentr sotsial'nogo prognozirovaniya i marketinga. 208 p. (In Russ.).
31. Faddeev, L. D. *Autobiography. Faddeev*. URL: faddeev.com/биография/биографические публикации (accessed on 14.08.2020).
32. Kobzarev, I. Ju. and Manin Ju. I. (1997). *Ehlementarnye chastitsy. Dialogi fizika i matematika* [Elementary particle. Conversations in physics and mathematics]. Moscow: FAZIS. 208 p. (In Russ.).
33. Pais, A. (1986). *Inward bound. Of matter and forces in the physical world*. Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press. 666 p.
34. Vilchek, F. (2009). Asimptoticheskaya svoboda: ot paradoksov k paradigmam [Asymptotic freedom: from paradoxes to paradigms]. In: *Nobelevskie leksii po fizike. 1995–2004*. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy; Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khatoticheskaya dinamika». Pp. 767–795. (In Russ.).
35. Gershtein, S. S. (2008). Velikii universal XX veka (k 100-letiyu L'va Davidovicha Landau) [The great universal of the twentieth century (to the 100th anniversary of Lev Davidovich Landau)]. *Priroda*. No. 1. Pp. 15–33. (In Russ.).
36. Wainberg, S. (2003). *Kvantovaya teoriya polya. T. 2. Sovremennye prilozheniya* [Quantum field theory, Vol. 2. Modern applications]. Moscow: Fizmatlit publ. 528 p. (In Russ.).

37. Tavkhelidze, A. N. (2009). N. N. Bogolyubov (shtrikhi k portretu) [N. N. Bogolyubov (touches to the portrait)]. In: *Vospominaniya ob akademike N. N. Bogolyubove. K stoletiyu so dnya rozhdeniya*. Ed. by V. S. Vladimirov and I. V. Volovich. Moscow: MIAN. Pp. 136–142. (In Russ.).

38. Kirzhnits, D. A. (2001). Sverkhprovodimost' i ehlementarnye chastitsy [Superconductivity and elementary particles]. In: Kirzhnits, D. A. *Trudy po teoreticheskoi fizike i vospominaniya*. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit publ. Pp. 172–196. (In Russ.).

39. Zeldovich Ja. B. and Gershtein, S. S. (1985). O mezonnykh popravkakh v teorii beta-raspada. Kommentarii [On meson corrections in beta decay theory. Comment]. In: Zeldovich Ja. B. *Izbrannye trudy. Chastitsy, yadra, Vselennaya*. Moscow: Nauka publ. (In Russ.).

40. Gershtein, S. S. (2010). Ot beta-sil k universal'nomu vzaimodeistviyu [From beta forces to universal interaction]. *Priroda*. No. 1. Pp. 3–14. (In Russ.).

41. *Fizika mikromira. Malen'kaya ehntsiklopediya* [Physics of the microcosm. Little encyclopedia]. (1980). Chief editor D. V. Shirkov. Moscow: Sovetskaya ehntsiklopediya publ. 528 p. (In Russ.).

The article was submitted on 25.05.2020.